

ABB

1|11

Actualités technologiques  
du Groupe ABB

# revue

---

**2011, année de l'innovation 6**

Récupération d'énergie : une bonne récolte! 47

**Des moteurs sans étincelles 52**

Postes électriques : le sens du partage 73

---



Innovation

Power and productivity  
for a better world™





Notre couverture met à l'honneur la créativité architecturale du *Yas Hotel*, à Abou Dabi (Émirats arabes unis). Si les visiteurs seront assurément médusés par l'originalité du design, la plupart ignorera qu'une autre innovation majeure participe aussi à leur confort : la gestion technique du bâtiment i-bus® KNX d'ABB.

Les produits et services de demain brassent une multitude d'innovations, fruits d'une foisonnante recherche-développement : ce numéro présente une sélection des dernières grandes avancées du Groupe.

---

## Innovations

- 6 **Perspectives**  
L'année 2011 en 11 innovations
- 12 **L'innovation, un travail d'équipe**  
La collaboration «CLEEN» au service de la recherche-développement ABB

---

## Appareillages moyenne tension

- 18 **eVD4, évolution intelligente de la Distribution**  
Simplicité et fiabilité pour les réseaux électriques
- 24 **Soubresauts dans la moyenne tension**  
Tableaux ABB pour centrales électronucléaires : un maillon essentiel de la chaîne de sûreté énergétique

---

## Variateurs et convertisseurs

- 29 **Force rotatrice**  
Les variateurs ABB boostent les performances des broyeurs (1<sup>ère</sup> partie).
- 36 **Manœuvres d'appareillage**  
Technologies et normalisation de l'alimentation électrique des navires à quai
- 41 **Reçu cinq sur cinq**  
Le convertisseur à cinq niveaux de tension ANPC-5L et le variateur ACS 2000 sont sur la même longueur d'onde.

---

## Productivité

- 47 **Moisson énergétique**  
ou l'art de glaner l'énergie ambiante pour bâtir une usine totalement autonome.
- 52 **Moteurs sans étincelles**  
Les moteurs et générateurs synchrones et asynchrones ABB sont parés pour les ambiances explosibles.
- 56 **Régime moteur**  
Les moteurs synchrones commandés en vitesse variable dopent le bilan énergétique des applications industrielles.

---

## Énergie

- 63 **Alternative énergétique**  
L'efficacité énergétique œuvre au développement durable des centrales électriques.
- 68 **Protection éclair**  
ABB aide les transformateurs de distribution à surmonter les tensions transitoires rapides.
- 73 **Valeurs partagées**  
Le premier bus de procédé ABB conforme à la norme CEI 61850-9-2 de communication dans les postes électriques

---

## Enquête de satisfaction

- 78 **Nos lecteurs ont la parole**

# Festival d'innovations



**Peter Terwiesch**  
Directeur des technologies  
ABB Ltd.

## Chers lecteurs,

La technologie est l'un des pivots de notre société. Pour comprendre la portée de notre dépendance à chacune de ses composantes, il suffit de voir comment sont fabriqués les objets de notre quotidien ou comment la fée électricité éclaire nos foyers. L'ampleur des mutations de demain sera largement dictée par le progrès technique. Au travers de ses laboratoires de recherche-développement, ABB est fier de jouer un rôle central, sinon dans l'émergence, du moins dans l'avancée de ces technologies porteuses d'avenir.

Ce numéro passe en revue 11 innovations ABB qui feront date en 2011. Certaines thématiques sont approfondies dans les pages qui suivent ou seront abordées ultérieurement.

S'il est un domaine à l'origine des profonds bouleversements de ces dernières décennies, c'est bien l'électronique de puissance. Des dispositifs à semi-conducteurs compacts et fiables permettent de convertir l'électricité avec une souplesse, une efficacité et une précision sans égales. La *Revue ABB* consacre trois articles aux convertisseurs de fréquence en donnant la vedette au premier variateur moyenne tension ABB sans transformateur, l'ACS 2000, que vient de distinguer le prix Frost & Sullivan de l'innovation 2010.

De nos jours, il n'est guère de procédés industriels sans moteurs adaptés à une grande variété d'applications, comme nos moteurs sans étincelles pour ambiances explosibles. Quelques pages plus loin, nous présentons nos moteurs synchrones à faibles pertes, puis nous enchaînons sur l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les centrales d'énergie, que l'on pourrait avantageusement assimiler à un « combustible alternatif » : une nouvelle piste de progrès pour les produits ABB.

Les usines de transformation regorgent de capteurs et d'actionneurs. Si bon nombre d'entre eux n'ont besoin que d'une infime quantité d'énergie pour fonctionner, la continuité de l'alimentation électrique reste leur talon d'Achille. Adieu fileries et batteries, l'heure est à l'exploitation de l'énergie thermoélectrique ou vibratoire qui nous entoure, comme le démontre notre article sur la récupération de l'énergie ambiante.

Dans le transport et la distribution électriques, ABB est un acteur de longue date de la normalisation internationale sur la communication dans les postes. La *Revue ABB* consacre un article à la modernisation de plusieurs postes en Australie, première mise en œuvre de la partie 9-2 de la norme CEI 61850. D'autres articles portent sur différents types d'appareillages et la protection des transformateurs contre la foudre.

Puissent les innovations égrenées au fil de ces pages sensibiliser nos lecteurs au formidable potentiel de ces technologies et susciter l'envie d'en faire bon usage !

Très bonne lecture,

Peter Terwiesch  
Directeur des technologies  
ABB Ltd.



# Perspectives

## L'année 2011 en 11 innovations

ABB ne cesse de renforcer et d'étoffer son offre de produits. Dans le monde entier, les laboratoires de recherche-développement du Groupe sont à l'œuvre pour inventer les technologies, produits et solutions qui doperont la productivité, l'efficacité et la flexibilité

des activités de ses clients. Piocher dans cette pléiade d'innovations ABB les réussites les plus marquantes n'est pas chose aisée; nombre d'entre elles font l'objet d'un article dans ce numéro ou seront abordées dans les prochaines éditions de la *Revue ABB*.

### Un robot de soudage au bras long

**La famille des robots IRB 2600 d'ABB s'agrandit avec l'arrivée d'un poids moyen pour le soudage à l'arc, l'IRB 2600ID. Sa particularité? L'intégration dans le poignet et dans le bras de tous les câbles et flexibles!**

Il ne s'agit pas d'un simple problème esthétique! En effet, n'ayant plus à se soucier des câbles externes qui se tordent à chaque mouvement du robot, celui-ci est plus simple à programmer et les opérations peuvent se faire à plus grande vitesse. Avec son poignet et son bras effilés, le robot accède aux endroits les plus exigus pour des tâches très complexes (joints circulaires, par exemple) sans compromettre la qualité ou la vitesse.

Fixé à l'intérieur du bras, le faisceau de câbles est protégé des projections de soudage, ce qui rallonge considérablement sa durée de vie, réduit jusqu'à



75 % les coûts d'achat et de remplacement, et supprime chaque année jusqu'à trois arrêts de production pour leur maintenance. Des faisceaux de câbles complets spéciaux pour l'IRB 2600ID sont proposés par plusieurs grands fournisseurs d'équipements de soudage à l'arc, notamment Fronius, Esab, Binzel et SKS.

L'IRB 2600ID est très compact; le rayon de sa base rotative atteint à peine 337 mm pour une embase de

511 mm de large. Pour les applications de soudage à l'arc, le risque réduit de collision avec les autres robots de la cellule de production est un facteur de productivité: en installant 50 % de robots en plus dans une même cellule, les gains de productivité peuvent avoisiner 50 %.

Pour en savoir plus, rendez-vous sur [www.abb.com/robotics](http://www.abb.com/robotics).

## Premier bus de procédé CEI 61850-9-2

La norme CEI 61850 régit la communication et l'échange de données entre automatismes de poste électrique; sa partie 9-2 décrit plus précisément le partage de valeurs analogiques sur un «bus de procédé». ABB signe la première installation d'un bus de procédé conforme à la normalisation.

Un bus de procédé véhicule les données échangées entre équipements primaires (disjoncteurs, transformateurs de mesure, etc.) et appareillages secondaires (dispositifs de protection et commande) d'un

système d'automatisation de postes. Il achemine des valeurs analogiques (mesures de courant et de tension), des données numériques (indications de position de l'appareillage) et des commandes d'ouverture/fermeture des disjoncteurs et sectionneurs. Avant la norme, ces transmissions nécessitaient inévitablement de grandes longueurs de câble cuivre.

La CEI 61850-9-2 multiplie les avantages: son bus optique réduit les risques inhérents à la haute tension et sa maintenance est simplifiée, les composants électroniques pouvant être remplacés sans avoir à arrêter tout le système. Sa mise en œuvre est facilitée par une puissante «boîte à outils» ABB de diagnostic et d'essai.

Pour en savoir plus, lire «Valeurs partagées», p. 73.

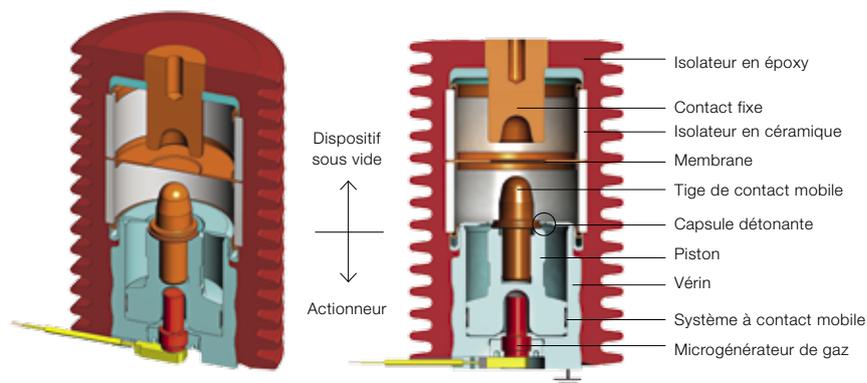


## Vitesse sécurisée

ABB a combiné les technologies de deux dispositifs éprouvés, sa célèbre chambre de coupure sous vide et le limiteur  $I_s$ , appareil de commutation et de limitation le plus rapide au monde, pour réaliser un ingénieux système de protection contre les défauts d'arc interne destiné aux appareillages moyenne tension ultrarapides.

Le dispositif repose sur le principe d'une mise à la terre triphasée métallique rapide qui empêche la libération incontrôlée d'énergie, lors d'un défaut d'arc interne. Ce raccordement de très faible impédance provoque la commutation immédiate du courant de court-circuit d'un défaut d'arc vers le sectionneur de terre rapide, puis l'extinction de l'arc.

Ce sectionneur de terre ultrarapide «UFES» (*Ultra-Fast Earthing Switch*) se compose de trois commutateurs



primaires complets (constitués chacun d'une chambre sous vide en deux parties, encapsulée dans une résine époxyde) et d'une électronique de déclenchement rapide qui détecte les courants de défaut et l'intensité lumineuse de l'arc avec une célérité et une fiabilité maximales. Le déclenchement extrêmement rapide du dispositif (< 1,5 ms) garantit une extinction quasi immédiate de tous les arcs.

Le sectionneur UFES offre des avantages technico-économiques: nette amélioration de la disponibilité

du système et de la sécurité de l'opérateur, aux valeurs assignées de tension (40,5 kV maxi) et de courant admissible de courte durée (63 kA maxi durant 1 s); baisse impressionnante des temps d'indisponibilité et des coûts de réparation après défaut.

Pour en savoir plus, lire «Rapidité, sécurité, compétitivité – La triple devise du nouveau sectionneur de terre ultrarapide d'ABB», *Revue ABB*, 2/2010, p. 84–87.

## Compact et sobre

**ABB continue de perfectionner son appareillage d'interruption à isolation gazeuse (GIS) de type ENK, à 72,5 kV : à performances identiques, son encombrement est aujourd'hui réduit de 25 % par rapport aux produits existants et la quantité de gaz SF<sub>6</sub> diminuée de moitié !**

La série ENK se distingue par une technique de coupure et de connexion innovante et une interface secondaire « intelligente », adaptée aux exigences des réseaux électriques du futur.

Autres innovations majeures : une plus grande facilité de manœuvre avec, notamment, un accès direct au mécanisme de commande en face avant, et des transformateurs de courant situés en dehors du compartiment à gaz.

Une technique de couplage des jeux de barres par connecteurs et la livraison des travées entièrement montées et testées en usine facilitent et accélèrent l'installation sur site de l'ENK. Ses valeurs assignées de tension (72,5 kV), de courant (2 500 A maxi) et de courant de court-circuit (40 kA) en font un appareil conforme à la normalisation CEI et IEEE.

Compact et modulaire, il est tout désigné pour les sites où l'espace est compté, comme en milieu urbain, mais autorise aussi les installations en intérieur. ABB dispose également d'appareillages à



isolation gazeuse pour les applications *offshore* et mobiles. Précurseur de la coupure dans le gaz, ABB conserve depuis 1965 sa place de numéro un mondial des appareillages GIS haute tension, avec plus de 20 000 travées installées et exploitées dans le monde.

## De l'électricité dans l'air

**Dans l'industrie des procédés, les capteurs relaient l'information qui permet de maximiser la fiabilité et la disponibilité de l'outil productif. Or cette instrumentation a toujours besoin de câbles d'alimentation et de transmission, qui renchérissent le coût et la complexité de l'installation, mais aussi de batteries dont le remplacement régulier menace d'annuler les économies procurées par le sans-fil. La solution ? Récupérer l'énergie ambiante !**

Le procédé consiste à capter l'énergie environnante pour la convertir en électricité et alimenter des appareils électroniques à faible consommation. L'énergie est puisée d'une multitude de sources comme les variations de température (procédés chauds et froids), le rayonne-

ment solaire, les vibrations, la circulation des fluides ou les pièces en mouvement (énergie cinétique).

Cette collecte pouvant être fluctuante ou, à l'inverse, plus productive que nécessaire, il faut toujours un stockage tampon (condensateurs spéciaux, accumulateurs primaires ou secondaires, par exemple) pour compenser les moments où le dispositif récupérateur d'énergie ne débite pas assez pour alimenter le capteur. Une gestion appropriée de l'énergie est également nécessaire pour s'affranchir de toute alimentation externe.

C'est sur ce principe de récupération d'énergie totalement intégrée qu'ABB a développé un transmetteur de température 100 % autonome. L'appareil embarque des générateurs thermoélectriques et une solution de gestion intelligente de l'énergie qui vient à la rescousse quand la température du procédé ne produit pas assez d'électricité.



Pour en savoir plus, lire « Moisson énergétique », p. 47.

## Le système 800xA passe à la puissance 5.1

Depuis son lancement en 2004, la plate-forme d'automatisation étendue 800xA d'ABB a été adoptée par plus de 6 000 clients qui en ont apprécié les avantages en termes d'efficacité opérationnelle, de transparence du contrôle-commande et d'intégration de systèmes traditionnellement hétérogènes. La version 5.1 de 2010 fait encore progresser la performance, la facilité d'usage et la richesse fonctionnelle de la solution.

Deux domaines sont les premiers bénéficiaires de ces avancées : le développement et la gestion des changements. L'analyseur de tâches (*Task Analysis Tool*) permet d'anticiper l'exécution d'une application, avant même son téléchargement, en signalant notamment ses temps de latence et



risques de conflit. Un relevé détaillé des différences (*Detailed Difference Report*) pointe les modifications (ajouts, retraits...) apportées aux applications et graphiques du contrôle-commande.

Cette nouvelle version va de pair avec le dernier-né de la famille d'automates AC800M, le PM891 : cadencé à 450 MHz (soit le triple de son prédécesseur) et doté d'une capacité mémoire multipliée par 4, celui-ci surclasse tous les automates de sa catégorie. De même, la virtualisation réduit jusqu'à 75 % le nombre de PC installés : c'est autant de gagner sur l'encombrement, la

consommation d'énergie et les besoins de maintenance !

Les améliorations portent également sur la gestion des alarmes avec de nouvelles fonctions d'analyse et de masquage volontaire des alertes parasites et non prioritaires, ainsi qu'un meilleur partage des alarmes. La sécurité et la connectivité marquent aussi des points.

Ces modifications ne sont qu'une petite partie des évolutions du 800xA 5.1.

À découvrir dans un prochain numéro de la *Revue ABB*.

## Disjoncteurs évolués

Les progrès de l'électrotechnique permettent le développement de produits ABB hautement intégrés et polyvalents ; c'est le cas du disjoncteur automatique eVD4 qui facilite et fiabilise les projets d'appareillage moyenne tension (MT) en conciliant performance, simplicité (nombre réduit de composants choisis dans un vaste catalogue d'accessoires vite installés), fiabilité, sécurité et rentabilité de l'appareillage, pour une large panoplie d'applications.

L'eVD4 hérite du disjoncteur MT sous vide à commande mécanique VD4 d'ABB, du relais de protection et commande RBX615 de la gamme Relion® et de la dernière génération



de capteurs de courant et de tension. Le RBX615 se charge de la protection générale des lignes aériennes et câblées, et des barres de distribution du poste électrique, sur n'importe quel réseau maillé. La technologie de développement des capteurs a permis de réduire l'encombrement de l'appareil, de gagner en performance et de

standardiser les composants. L'association capteurs-RBX615 garantit une surveillance et un enregistrement précis et fiables des paramètres réseau, ainsi qu'une protection renforcée du personnel d'exploitation et du matériel du poste.

Conforme à la norme CEI 61850 et à sa messagerie GOOSE, l'eVD4 est totalement compatible avec les nouveaux réseaux de communication de postes.

Pour en savoir plus, lire « eVD4, évolution intelligente de la Distribution », p. 18.

## Station ABB de recharge rapide en courant continu

Les stations de recharge rapide en courant continu (CC) s'imposent de plus en plus comme un rouage essentiel de la mobilité électrique. Contrairement aux systèmes en courant alternatif qui embarquent dans le véhicule électrique (VE) un petit convertisseur pour recharger les batteries la nuit, cette solution permet d'extraire le convertisseur du véhicule pour l'intégrer à des infrastructures de recharge communes et gagner ainsi sur la masse et le prix du VE. Elle multiplie également les possibilités de gérer la charge du réseau.

Les activités d'ABB dans les infrastructures propices à l'électromobilité sont passées à la vitesse supérieure, début novembre 2010, avec la certification CHAdeMO de ses stations de recharge rapide CC et la mise en place, dans la foulée, de la première installation pilote



au Science and Technology Park de Hong Kong, en partenariat avec l'énergéticien China Light and Power.

Dans le domaine de la recharge rapide CC, le standard japonais CHAdeMO est le référentiel adopté par de nombreux grands constructeurs. Pour preuve, 2010 a vu le lancement des premiers véhicules de série compatibles avec les stations de recharge rapide CC au standard CHAdeMO ; d'autres suivront en 2011 et 2012.

La certification CHAdeMO des stations ABB marque un véritable tournant.

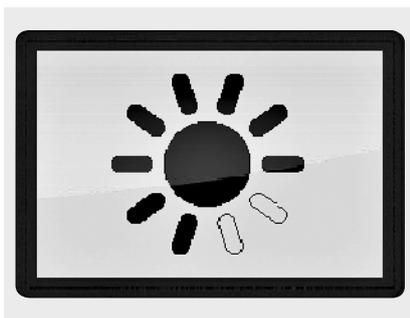
Fruit d'une collaboration entre ABB et le Japonais TEPCO (Tokyo Electric Power Corporation), elle a été obtenue en un temps record et l'installation pilote achevée en seulement deux jours ! La nouvelle station ABB est vite devenue le principal point de recharge rapide des VE défilant au 25<sup>ème</sup> congrès international EVS (Electric Vehicle Symposium), à Shenzhen. Pas moins de sept *i-MIEV* de Mitsubishi appartenant à China Light and Power s'y sont succédé pour « faire le plein de courant ».

Pour en savoir plus, lire « L'aube d'une ère nouvelle », Revue ABB, 2/2010, p. 77.

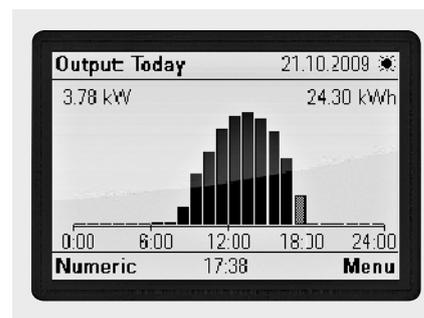
## Énergie... maison !

Déjà présent sur le marché des onduleurs raccordant les grands parcs photovoltaïques au réseau électrique, ABB n'en délaisse pas pour autant les installations plus modestes, telles que les panneaux solaires installés en toitures des bâtiments résidentiels et tertiaires. Son nouvel onduleur « de rangée » (*string*) garantit à la fois un couplage au réseau ergonomique, une grande facilité de pose et des fonctions de protection évoluées et performantes. Non content de satisfaire aux besoins énergétiques de ses utilisateurs, il permet aussi d'injecter l'excédent de puissance dans le réseau.

Un onduleur domestique doit être aussi simple à utiliser que facile à comprendre



par tous les membres du foyer. C'est pourquoi l'onduleur *string* d'ABB s'accompagne d'un affichage distant particulièrement intuitif. L'écran d'accueil est un soleil dont le nombre de rayons reflète l'intensité lumineuse captée par les panneaux ; l'utilisateur peut ainsi contrôler en permanence et en un clin d'œil l'activité de l'onduleur. De même, un histogramme retrace l'évolution de la production photovol-



taïque au fil des heures pour mieux évaluer la rentabilité de l'installation. Enfin, un troisième niveau d'affichage, plus complexe, renseigne l'ingénieur avec force détails techniques. L'onduleur ABB, très compact, offre une excellente protection contre les surtensions.

Un prochain numéro de la Revue ABB ne manquera pas de lui réserver une place au soleil !

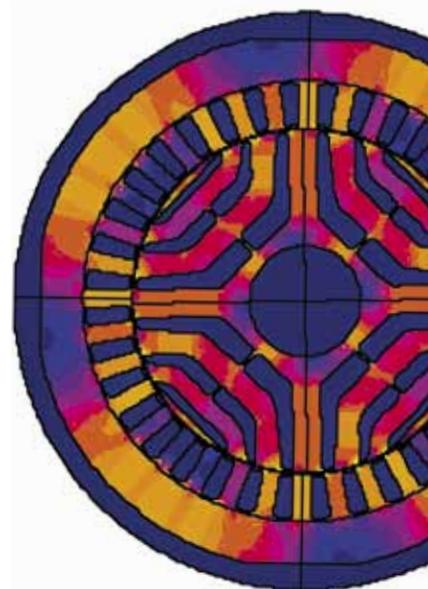
## Le moteur synchrone en grande forme

**En simplifiant la structure du rotor de ses moteurs synchrones à réluctance, ABB supprime les pertes rotoriques, augmente leur rendement et réduit leur encombrement. L'obtention des valeurs normalisées de puissance et de couple avec un échauffement limité de classe A (60 K) accroît la durée de vie de l'isolant, ce qui permet de prolonger celle des roulements ou d'espacer les intervalles de lubrification.**

Les moteurs synchrones commandés en vitesse variable améliorent le bilan énergétique de nombreuses applications industrielles aux exigences souvent analogues : rendement élevé, longévité, maintenance allégée et

fiabilité accrue. Les moteurs synchrones à réluctance ABB fonctionnent selon le principe de la réluctance magnétique. Leur faible encombrement permet aux constructeurs de machines de concevoir des équipements plus compacts, plus légers et plus efficaces. Le moteur est fonctionnellement sûr car, sans aimants, aucune tension de force contre-électromotrice n'est induite et le convertisseur ne doit plus être protégé des surtensions. Qui plus est, pouvant fonctionner à des vitesses supérieures, ces moteurs permettent de s'affranchir de certains organes mécaniques de transmission (notamment les réducteurs), ce qui favorise leur intégration dans les machines.

Pour en savoir plus, lire « Régime moteur », p. 56.



## Busch-iceLight

**Tout comme la lumière participe à la réussite d'un cliché, l'éclairage est indispensable à l'ambiance d'un lieu. En collaboration avec l'architecte et designer de renom Hadi Teherani, Busch-Jaeger a mis au point un nouveau système d'éclairage résidentiel et tertiaire, qui associe la technologie novatrice des LED à une palette d'options pour paramétrer la direction et l'intensité du flux lumineux, ainsi que la température et le rendu de couleur.**

Modulaire et réglable, Busch-iceLight est un éclairage d'orientation qui crée l'ambiance d'une pièce. Aussi discret qu'un interrupteur ou une prise électrique, il utilise les mêmes cadres pour se fondre parfaitement dans l'installation électrique existante.



Le module d'éclairage est ajustable dans cinq directions différentes afin d'affiner l'orientation et la qualité du faisceau. Deux réglages permettent de diffuser une lumière de couleur blanc rosé (chaud) ou blanc neutre. Dans le même esprit, l'intensité lumineuse peut basculer sur 100 % ou 25 %, à l'aide d'un variateur de 350 mA/5 W ou d'un variateur de 40 mA/0,15 W pour éclairage nocturne. Qu'il guide vos pas dans l'obscurité ou vous renseigne sur

les issues ou services du bâtiment, Busch-iceLight est gage de confort et de sécurité. De nombreux modèles d'enjoliveurs de qualité et des pictogrammes sur mesure s'adaptent aux préférences de chacun.

Busch-Jaeger est une société du Groupe ABB.



# L'innovation, un travail d'équipe

La collaboration au service de la recherche-développement ABB

JUKKA TOLVANEN, TERO AHONEN, JUHA VIHOLAINEN – Les grandes inventions sont souvent l'œuvre d'un seul homme; l'ampoule électrique et Thomas A. Edison, le téléphone et Alexander G. Bell. Si, sur la scène de l'innovation moderne, l'élan créatif du soliste a toujours sa place, des talents divers (partenariats et consortiums) se partagent souvent l'affiche pour forger de nouvelles idées. ABB bénéficie d'un formidable vivier de compétences techniques et d'une présence mondiale pour cerner les attentes de ses clients aux quatre coins du globe. Le Groupe peut également compter sur la collaboration d'universités et d'autres entreprises pour développer de nouveaux services et technologies.

jour, en Finlande, un centre stratégique pour la science, la technologie et l'innovation dans les domaines de l'énergie et de l'environnement, baptisé «CLEEN», en vue de catalyser la coopération internationale et transversale dans ces secteurs. Société à responsabilité limitée détenue par des groupes d'envergure mondiale et les instituts de recherche et universités les plus compétents sur ces questions, CLEEN favorise la mutualisation des savoirs et l'émergence de solutions, technologies et services novateurs qui dépassent le périmètre des ressources en R&D d'une seule entreprise ou filière industrielle [1]. Ses 44 propriétaires sont, pour deux tiers, des sociétés privées, notamment des acteurs majeurs du marché mondialisé et des technologies, à l'instar d'ABB, de Metso et de Wärtsilä. ABB compte parmi ses membres fondateurs et joue un rôle actif dans son fonctionnement; sa participation a ouvert de nouvelles perspectives de recherche conjointe avec d'autres entreprises, organismes et instituts.

Ce type de coentreprise accroît également les possibilités de financements externes, qui sont souvent décisifs pour les grands consortiums de recherche engagés dans des projets au long cours (sur trois à cinq ans, par exemple). En Finlande, le principal bailleur de fonds est l'Agence finlandaise pour la technologie et l'innovation (Tekes), qui apporte son soutien à un consortium d'entreprises et d'instituts de recherche dans le cadre de son nouveau programme d'innovation. Cet appui traduit un véritable changement de culture: l'innovation en solo fait place à l'innovation en réseau.

#### Une coopération moderne entre entreprises et universités

CLEEN s'inscrit dans une vaste réforme du système d'innovation finlandais. Le gouvernement a ainsi inauguré six centres stratégiques pour la science, la technologie et l'innovation dont la propriété et l'exploitation reviennent exclusivement à l'industrie et à la recherche universitaire. CLEEN se concentre sur l'énergie et l'environnement. Pour son directeur général, Tommy Jacobson, le centre entend promouvoir l'innovation tripartite entre entreprises, universités

et instituts de recherche. Les partenaires de ce réseau mènent leurs activités de R&D et élargissent leurs connaissances plus rapidement que s'ils faisaient cavalier seul.

Autre argument avancé par M. Jacobson: la coopération revêt une dimension plus stratégique quand les entreprises s'impliquent et mobilisent leurs propres ressources humaines en R&D sur plusieurs années pour ensuite partager leurs résultats que lorsqu'elles se contentent d'en financer l'externalisation. Qui plus est, un tel degré d'implication industrielle contribue à bâtir de larges interfaces qui favorisent l'échange de connaissances, d'innovations et de conseils.

Les programmes sont élaborés selon la procédure suivante: les entreprises commencent par définir le thème de recherche qu'elles jugent utiles à leurs activités futures et pour lequel elles souhaitent allouer leurs propres ressources et partager les résultats; les universités et les instituts de recherche répondent à cette demande du marché en lançant des initiatives qui donnent en retour l'impulsion de la science. «*Ce mode d'organisation n'est pas seulement efficace*», souligne M. Jacobson, *il*

**D**eux têtes valent mieux qu'une. L'adage se confirme pour les domaines de l'ingénierie et de la technologie. Le développement de nouveaux concepts réclame en effet une pluralité de savoir-faire et, par conséquent, le concours de diverses entreprises et organisations. Ainsi, l'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes électriques ne saurait reposer uniquement sur des compétences techniques. Une prise en compte des volets économiques et sociaux est indispensable pour traduire l'innovation en produits et services.

À l'inverse, on peut avoir besoin de puiser cette expertise technique de divers domaines en faisant intervenir plusieurs acteurs. Une seule entreprise ne pouvant prétendre à l'excellence mondiale dans tous les domaines, la coopération entre sociétés et organisations relevant de différents secteurs d'activité est le plus sûr chemin vers l'innovation.

#### L'union fait la force

Toute démarche collaborative impose au préalable certaines règles. En effet, comment envisager une collaboration durable et bénéfique à tous si les questions de financement et de propriété intellectuelle, entre autres, n'ont pas été d'emblée tirées au clair? Le recours à un centre ou organisme commun de recherche et développement (R&D) est une solution. C'est ainsi qu'à vu le

---

## CLEEN dynamise la coopération industrielle internationale dans les domaines de l'énergie et des technologies de l'environnement.

*est aussi pour les universités synonyme d'économies de ressources: au lieu de perdre leur temps sur des projets à l'issue incertaine, les chercheurs bénéficient d'un retour d'expérience immédiat, interactif et itératif».*

Les marchés de l'énergie et les réseaux électriques intelligents occupent un pan essentiel de la recherche. Dans ces domaines, les principales contributions émanent de Nokia Siemens Networks et d'ABB. D'autres thématiques sont au programme, comme l'efficacité énergétique et la production électrique décentralisée.

#### Réseaux électriques intelligents et marchés de l'énergie

Le réseau électrique du futur (*Smart grid*) s'appuie sur des technologies numériques

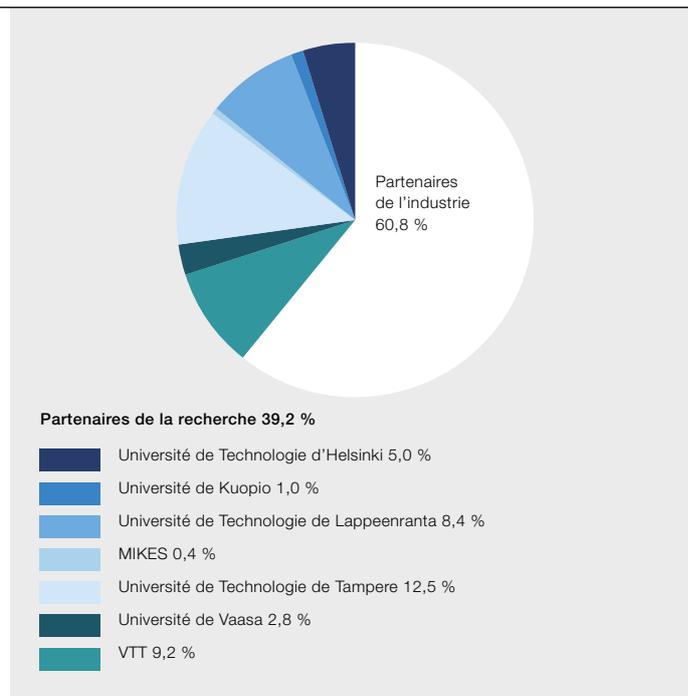
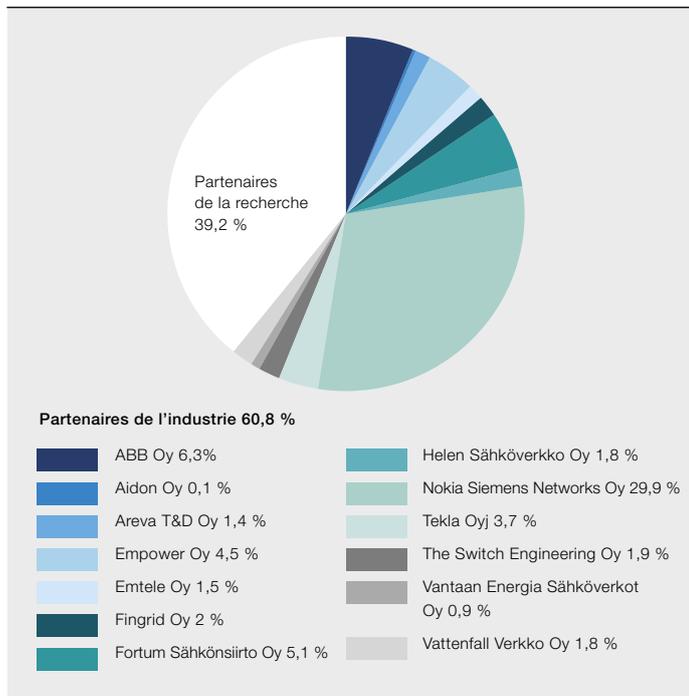


ABB fait partie des fondateurs de CLEEN et joue un rôle actif dans son fonctionnement.

bidirectionnelles et un système intelligent de suivi des flux électriques, depuis un grand nombre de fournisseurs jusqu'aux consommateurs. Les transits de puissance peuvent ainsi emprunter de multiples chemins et être commandés aussi bien en local qu'à distance. Par rapport aux réseaux traditionnels, ce réseau communicant autorise une exploitation et une régulation plus efficaces de la production décentralisée, et un usage intelligent des batteries de véhicules électriques raccordées au réseau de distribution. Cinq axes de recherche constituent la trame du programme «SGEM» (*Smart Grids and Energy Markets*) sur les réseaux intelligents et les marchés de l'énergie :

- L'infrastructure des systèmes d'énergie de demain ;
- La gestion et l'exploitation intelligentes des réseaux électriques ;
- Les passerelles d'accès des consommateurs au réseau ;
- Le déploiement de services de gestion des consommations et des émissions.

Bénéficiant des infrastructures dédiées à la R&D et à l'innovation en Finlande, ce consortium travaille sur un déploiement international, en grandeur réelle, des solutions de réseau intelligent. Ce cadre de recherche interactif est également l'occasion de rassembler les savoir-faire des meilleurs fournisseurs mondiaux de technologies de l'information et de la communication (TIC) et de réseaux intelligents. Le programme associe industriels, chercheurs et universitaires → 1: les industriels sont des

acteurs de la production et de la distribution d'électricité, des télécommunications et des technologies de l'information ; la recherche est représentée par cinq universités finlandaises et deux instituts (MIKES et VTT). La durée du projet est fixée à cinq ans.

### L'efficacité énergétique en ligne de mire

Le programme EFEU (*Efficient Energy Use*) cherche à élaborer des méthodes pour renforcer l'écoperformance des équipements et des systèmes. Il cible les secteurs de l'industrie et des services, qui consomment environ 60% de la production d'énergie totale. L'objectif est triple :

- Mettre au point des méthodes, pratiques métiers et systèmes inédits qui participent à l'amélioration notable de l'efficacité énergétique ;
- Élaborer à moindres frais des méthodes véritablement écoperformantes ;
- Bâtir un réseau national de R&D dédié à l'efficacité énergétique.

Au carrefour de plusieurs disciplines scientifiques, l'efficacité énergétique réclame l'expertise et la participation active des différents intervenants : constructeurs, équipementiers, sociétés de services, bureaux d'étude, universités et organismes de recherche. Les travaux, échelonnés sur trois à dix ans avant fourniture du produit ou du service, déboucheront pour l'essentiel sur de nouveaux concepts de système, règles de dimensionnement, méthodes de mesure et d'évaluation de l'écoperfor-



mance des systèmes, solutions et services en lien avec l'efficacité énergétique. Ces innovations passeront par une phase pilote avant d'être développées dans une optique applicative.

#### Recherche académique et partenariale

Les mondes industriel et universitaire peuvent aussi nouer des relations directes et fécondes en dehors des consortiums. Ce mode de coopération bénéficie aux deux parties : la recherche académique peut soumettre des sujets intéressants et l'industrie expérimenter sa R&D et ses idées nouvelles en utilisant les laboratoires de l'université. C'est avec succès qu'une coopération de

fait référence dans nombre de domaines : efficacité énergétique et marché de l'énergie, stratégie des entreprises et technologique, calcul scientifique et modélisation des procédés industriels. Elle est en outre rompue aux pratiques de l'économie et de l'industrie russes dans ces disciplines [2].

Disposant d'installations d'essais dédiées aux groupes de pompage et aux moteurs électriques → 2, et d'une solide expérience dans l'efficacité énergétique de ces équipements, LUT a réalisé des travaux qui ont aussi nourri la recherche-développement de nouveaux produits d'ABB, comme la technologie DTC de contrôle

direct de couple des moteurs synchrones à aimants permanents et le calcul des débits de pompes centrifuges sans retour capteur [3,4]. Ces sujets de recherche ont abouti à plusieurs brevets

et publications scientifiques tout en bénéficiant directement aux spécialistes ABB de la variation électronique de vitesse.

C'est sur cette base solide que s'est édifiée la coopération entre LUT et ABB dans les domaines de la motorisation électrique et de la vitesse variable avec, pour théâtre des opérations, le centre CDMC (*Carelian Drives and Motor Center*) rattaché au département d'électrotechnique de LUT. En travaillant

main dans la main avec la recherche académique, ABB explore de nouveaux horizons et met à l'épreuve les produits de demain.

Cette collaboration bénéficie également au CDMC, qui y trouve un formidable gisement de nouvelles thématiques de recherche et un moyen d'étoffer ses compétences dans le domaine de l'efficacité énergétique des moteurs électriques, variateurs de vitesse et machines tournantes. Porteuses d'innovations, ses équipes de chercheurs ont contribué à la recherche-développement de produits et services inédits. Certains travaux débouchent sur des thèses de doctorat, publications dans la presse ou brevets. Les projets de recherche ont porté sur les techniques de commande des moteurs en vitesse variable, le renforcement de l'efficacité énergétique des moteurs électriques ainsi que la commande et le diagnostic des machines tournantes (pompes centrifuges, par exemple).

S'associer à d'autres entreprises et à des universités est souvent source d'innovations, comme l'illustre l'article suivant « Audit énergétique ». Cette collaboration n'est pas à négliger car elle donne lieu à des projets de R&D plus vastes qui capitalisent sur des compétences pluridisciplinaires. Que cette coopération passe par un consortium d'entreprises et d'instituts de recherche, ou rapproche directement industriels et universitaires, chacun y trouve son compte !

#### Jukka Tolvanen

ABB Drives  
Helsinki (Finlande)  
jukka.tolvanen@fi.abb.com

#### Tero Ahonen

Juha Viholainen  
Lappeenranta University of Technology  
Lappeenranta (Finlande)  
tero.ahonen@lut.fi  
juha.viholainen@lut.fi

#### Bibliographie

- [1] CLEEN Ltd., *Finnish Cluster for Energy and Environment*, <http://www.cleen.fi>, consulté le 24 août 2010.
- [2] Présentation de l'université de Technologie de Lappeenranta, <http://www.lut.fi/en/lut/introduction/>, consulté le 24 août 2010.
- [3] Luukko, J., *Direct torque control of permanent magnet synchronous machines: analysis and implementation*, thèse de l'université de Technologie de Lappeenranta, 2000.
- [4] Ahonen, T., Tamminen, J., Ahola, J., Viholainen, J., Aranto, N., Kestilä, J., « Estimation of pump operational state with model-based methods », *Energy Conversion and Management*, vol. 51, p. 1319-1325, 2010.

## Entreprises et universités peuvent nouer des relations fécondes en innovations et technologies nouvelles.

cette nature s'est instaurée entre ABB et l'université de Technologie de Lappeenranta LUT (*Lappeenranta University of Technology*) en Finlande, dans le domaine des moteurs électriques et des variateurs de vitesse, leviers essentiels pour doper le rendement des machines tournantes.

Fondée en 1969, l'université LUT est un pôle d'enseignement et de recherche en sciences de l'ingénieur et en économie, qui

## Audit énergétique

### ABB et une université finlandaise unissent leurs forces pour améliorer l'efficacité énergétique des groupes de pompage

Le projet d'audit énergétique EAP (*Energy Audit Project*) de l'université de Technologie de Lappeenranta LUT (*Lappeenranta University of Technology*) a démarré à l'automne 2008. Ce type d'audit analyse la consommation énergétique d'un procédé ou d'une installation → 1. Il intéresse au premier chef les industriels et recense leurs applications grosses consommatrices d'énergie équipées de machines électriques tournantes. Il s'agit souvent de groupes de pompage. Financé par ABB, le projet de recherche EAP est mené par l'Institut de l'Énergie de l'université LUT [1]. C'est l'aboutissement d'une collaboration de longue date entre ABB et LUT, en particulier dans le domaine du rendement des groupes de pompage. Il a permis d'acquérir des connaissances spéciales sur l'efficacité énergétique des applications de pompage et de développer des outils de simulation et de calcul du rendement des groupes.

#### Diagnostiquer les usages énergétiques industriels

Principal objectif de ce projet : développer une méthode d'audit énergétique simple et avantageuse pour toutes les parties prenantes. Cet audit doit permettre d'établir le bilan énergétique d'un système existant et de cerner les facteurs d'influence pour ensuite identifier les gisements d'économie afin de rendre le système plus efficace et réduire les coûts. Le produit final remis au client est un plan d'actions destiné à améliorer son efficacité énergétique.

#### Travaux de R&D sur les groupes de pompage

Les travaux de l'université LUT sur l'utilisation des fonctionnalités avancées des variateurs électroniques de vitesse pour diagnostiquer les



pompes centrifuges remontent à 2005. À l'époque, le laboratoire mesura la précision de la fonction de calcul des débits sans retour capteur des variateurs de la gamme *ABB industrial drive*. Les résultats furent publiés dans *World Pumps Magazine* en 2005 et 2006.

Tout comme un variateur est capable de connaître l'état fonctionnel d'un moteur sans capteur monté sur l'arbre, il peut également évaluer le mode opératoire d'une pompe ou d'une machine entraînée par le moteur. Ainsi, par exemple, la fonction de calcul des débits des variateurs *ABB industrial drive* utilise la vitesse de rotation interne et la puissance à l'arbre pour estimer le débit de pompage sans recourir à aucun capteur. Si cette fonction permet à l'utilisateur de connaître les débits, elle ne peut toutefois servir à des fins de facturation.

D'autres projets avaient également pour but d'innover dans la détection de cavitation<sup>1</sup> et d'améliorer l'efficacité énergétique des pompes en parallèle. Les travaux permettent de supprimer les principales causes de défaillance des pompes et de réduire considérablement la consommation énergétique totale des groupes de pompage.

#### Des groupes de pompage moins énergivores

La détection de cavitation sans capteur est basée sur une analyse fine des estimations du variateur pour déterminer un fonctionnement

---

Des économies d'énergie importantes sont réalisables grâce aux fonctionnalités avancées des variateurs de vitesse pilotant les pompes en parallèle.

---

#### Note

- 1 Phénomène d'apparition de bulles de gaz dans un liquide en circulation rapide lorsque la dépression devient inférieure à la pression de vapeur. En implosant, les bulles créent des ondes de choc susceptibles d'endommager les surfaces.

## 1 Étapes de la procédure d'audit énergétique de l'université LUT

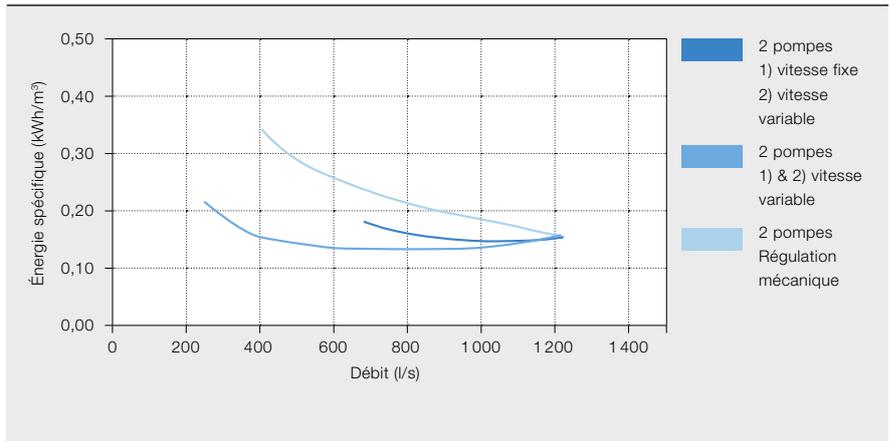


anormal de la pompe. Dans le cas des pompes centrifuges, la cavitation est une des causes les plus connues de baisse du rendement de pompage et de défaillance des pompes. Plusieurs méthodes de détection ont ainsi été développées qui, pour la plupart, nécessitent des mesures supplémentaires parfois difficiles à réaliser. En effet, l'ajout de capteurs peut s'avérer

Tout comme un variateur est capable de connaître l'état fonctionnel d'un moteur sans capteur monté sur l'arbre, il peut également évaluer le mode opératoire d'une pompe ou d'une machine entraînée par le moteur.

coûteux et le nombre de pompes à surveiller être tellement élevé qu'il faut envisager l'installation d'un système de surveillance d'état pour seulement une poignée de pompes. C'est pourquoi une détection de cavitation

## 2 Consommation énergétique spécifique des différentes méthodes de régulation des débits de deux pompes centrifuges en parallèle



sans capteur ni modification des installations offre de réels avantages aux utilisateurs [2].

En allégeant la facture énergétique, la commande « intelligente » des pompes en parallèle par des variateurs électroniques de vitesse procure de substantielles économies. Comparés à la commande traditionnelle en tout ou rien, les gains énergétiques potentiels de la vitesse variable sont d'autant plus significatifs que l'on fait tourner les moteurs à des vitesses plus faibles. Des mesures relevées lors d'essais à l'université LUT confirment ces gains.

Plusieurs études en vraie grandeur ont également été menées sur des applications industrielles de pompage d'eau brute, au sein de centrales d'énergie et de stations d'épuration urbaines. Les résultats ont prouvé que des économies d'énergie importantes étaient réalisables grâce aux fonctionnalités avancées des variateurs de vitesse pilotant les pompes en parallèle. Un exemple est donné à la figure → 2 pour deux pompes centrifuges raccordées en parallèle. Lorsqu'elles sont toutes deux commandées en vitesse variable, la consommation énergétique spécifique est minimale à des débits plus faibles [3].

Les résultats de ces projets de recherche mettent en évidence les avantages d'une collaboration dans le domaine de la R&D. La mise en commun du savoir-faire et des compétences favorise le développement de solutions innovantes d'amélioration

du rendement des groupes de pompage et de réduction des coûts.

### Jukka Tolvanen

ABB Drives  
Helsinki (Finlande)  
jukka.tolvanen@fi.abb.com

### Tero Ahonen

Niina Aranto  
Université de Technologie  
Lappeenranta (Finlande)  
tero.ahonen@lut.fi  
niina.aranto@lut.fi

### Bibliographie

- [1] Aranto, N., Ahonen, T., Viholainen, J., « Energy Audits: University approach with ABB », Compte-rendu de la 6<sup>ème</sup> Conférence Internationale sur l'Efficacité Énergétique des Systèmes Motorisés (EEMODS '09), Centre commun de Recherche de la Commission européenne, Institut de l'Énergie, 14–17 septembre 2009.
- [2] Ahonen, T., Tamminen, J., Ahola, J., Kestilä, J., « Novel method for detecting cavitation in centrifugal pump with frequency converter », *Proceedings of the 7th international Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies (CM and MFPT 2010)*, The British Institute of Non-Destructive Testing and Coxmoor Publishing Company, 22–24 juin 2010.
- [3] Viholainen, J., Kortelainen, J., Ahonen, T., Aranto, T., Kestilä, J., « Energy efficiency in variable speed drive (VSD) controlled parallel pumping », Compte-rendu de la 6<sup>ème</sup> Conférence Internationale sur l'Efficacité Énergétique des Systèmes Motorisés (EEMODS '09), Centre commun de Recherche de la Commission européenne, Institut de l'Énergie, 14–17 septembre 2009.



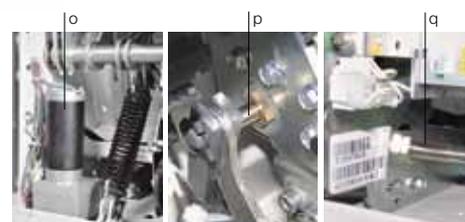
# eVD4, éVolution intelligente de la Distribution

Simplicité et fiabilité  
pour les réseaux  
électriques moyenne  
tension (MT)

CALOGERO SAEI, CALLISTO GATTI, CARLO GEMME, EMILIA DANERI, CARLO CEREDA – Les réseaux de distribution MT ont bénéficié des progrès constants de ces dix dernières années. ABB est à l'avant-garde de cette évolution avec de nouveaux produits de haute technologie comme les équipements de protection et commande Relion®, les capteurs de courant et de tension, et les disjoncteurs sous vide à pôles encastres. L'ensemble donne un disjoncteur automatique embarquant des capteurs et le relais de protection et contrôle-commande RBX615. Baptisé « eVD4 », il simplifie et accélère la conception, la spécification et l'installation de l'appareillage grâce à une standardisation poussée de ses composants, tout en garantissant une fiabilité accrue, une maintenance allégée et des coûts de cycle de vie réduits.



- a Pôle et chambre de coupure
- b Signaux de relais
- c Capteur : bobine de Rogowski ou combiné courant/tension
- d Chariot de disjoncteur débrochable
- e Relais de protection et commande RBX615
- f Poussoir d'ouverture
- g Levier de bandage des ressorts de fermeture
- h Indicateur mécanique de disjoncteur ouvert/fermé
- i Motoréducteur de bandage des ressorts de fermeture
- j Fiche pour circuits auxiliaires (sur disjoncteur débrochable seulement)
- k Poussoir de fermeture
- l Indicateur mécanique de ressorts de fermeture bandés/débandés
- m Compteur de manœuvres
- n Mécanisme de manœuvre



- o Motoréducteur d'embrochage et de débrochage (sur disjoncteur débrochable seulement)
- p Capteur de position de disjoncteur ouvert/fermé
- q Capteur de position de ressort bandé/débandé

La distribution MT a beaucoup contribué ces dernières années à l'évolution technologique de la filière électrique avec le développement de nouvelles solutions répondant aux exigences présentes et futures des réseaux. La norme CEI 61850, par exemple, tire l'innovation en dotant les appareils de nouvelles fonctionnalités et architectures qui profitent d'une standardisation, d'une intégration et d'une polyvalence renforcées, au bénéfice d'une plus grande fiabilité, rapidité et facilité d'installation et de maintenance.

ABB est à l'origine de bon nombre de ces technologies qu'il ne cesse de développer pour offrir de nouveaux produits et gammes d'appareillages de distribution primaire MT.

Le disjoncteur automatique eVD4 → 1 fait partie de cette longue lignée spécialement développée pour faciliter et fiabiliser la distribution MT, à tous les stades d'un projet, de la spécification produit, de la soumission d'offre, du développement et de la production jusqu'à l'installation, la mise en service, les essais et la maintenance de l'appareillage.

La série eVD4 est un concentré de hautes technologies ABB associant mécanique, électronique et instrumentation.

Cette synthèse donne un équipement hautement intégré combinant la mesure, la protection et le contrôle-commande aux fonctions de sectionnement, commutation et coupure primaires.

### Innover sur des bases solides

L'eVD4 bénéficie d'un triple héritage ABB : le disjoncteur MT sous vide à commande mécanique VD4, la nouvelle gamme de produits Relion® et une mesure par capteurs. Depuis sa commercialisation en 2003, le disjoncteur VD4 se compte dans le monde entier en plus de 250 000 exemplaires offrant une excellente fiabilité et une polyvalence apte à satisfaire quantité d'applications.

Le relais RBX615, basé sur la technologie Relion d'ABB, est un dispositif électronique intelligent, plus connu sous l'acronyme anglo-saxon

« IED » (*Intelligent Electronic Device*), assurant la protection, la commande, la mesure et la surveillance des postes de distribution publique et des installations électriques industrielles. Il s'enfiche dans le châssis de l'eVD4, par l'intermédiaire d'une unité dédiée.

Le relais RBX615 garantit la protection générale de lignes aériennes, de lignes câblées et de barres de distribution du poste électrique ; il convient à n'importe quel réseau radial, quel que soit le sché-

**Le nouveau disjoncteur tout automatique eVD4 d'ABB a été spécialement développé pour simplifier et fiabiliser l'appareillage MT.**

ma de mise à la terre. Les entrées-sorties tout ou rien (E/S TOR) et les liaisons de transmission, regroupées dans le

## 2 Comparaison du disjoncteur tout automatique eVD4 et d'un disjoncteur MT classique, à tous les stades de la vie de l'appareil

### Spécification

Le haut niveau d'adaptabilité de l'eVD4 simplifie la tâche du prescripteur :

- Inutile de paramétrer l'instrumentation : les caractéristiques assignées des capteurs découlent de celles du disjoncteur et le type de capteur (courant seul ou combiné courant/tension) est donné par la fonction de protection.
- Toutes les configurations standard du relais RBX615 sont adaptables pour coller aux exigences du réseau.

### Logistique

Fin la multiplication des ordres d'achat : l'appareil MT est livré complet, sous un numéro de commande et une référence uniques !

### Rapidité de livraison

La chaîne de production ultramoderne d'ABB et ses composants standardisés garantissent le même délai de livraison, que ce soit pour l'eVD4 ou un disjoncteur classique.

### Installation

L'eVD4 est « prêt à installer ». Tous les capteurs étant embarqués dans l'appareil, aucun câblage ni surcroît de travail ne sont nécessaires ; la filerie du relais est entièrement raccordée par la fiche du disjoncteur.

### Réduction des efforts et du temps de développement et de câblage

Intégration oblige, la majorité des câbles de l'appareillage est logée dans le disjoncteur pour mieux standardiser le produit. La quantité de câbles cheminant dans le compartiment basse tension est limitée et le risque d'erreur, considérablement atténué. La solution gagne en rapidité et souplesse de développement.

### Simplification de la réception en usine pour plus de sécurité et de fiabilité

Une solution entièrement testée et intégrée, avec moins de câbles, facilite et écourte les essais obligatoires de réception usine.

### Facilité de maintenance, optimisation des stocks de rechange et réduction du temps moyen de réparation (MTTR)

L'eVD4 est bâti sur des composants standardisés, utilisables dans une large gamme d'applications. De plus, quelques variantes d'exécution suffisent à couvrir la totalité des modèles de disjoncteurs de la série eVD4 ; de quoi réduire le nombre de pièces de rechange en stock ! Tous les accessoires sont faciles d'accès et d'entretien. Cette solution intégrée autorise une reprise rapide du système en cas de défaillance ; tous les composants clés de l'appareillage sont remplacés en changeant tout simplement l'eVD4.

17,5 kV,  $I_n$  jusqu'à 2 500 A et pouvoir de coupure maxi de 40 kA. Le relais RBX615 peut être commandé en 5 configurations différentes, chacune correspondant à un groupe de fonctions de protection nécessitant des mesures à la fois de courant et de tension. Partie intégrante du disjoncteur, RBX615 a bénéficié d'une conception optimisée pour les fonctions de surveillance, commande et diagnostic de l'eVD4.

### Radioscopie

La conception de ce nouveau disjoncteur sous vide d'ABB satisfait amplement aux exigences de simplicité (faible nombre de composants, grande fiabilité, multiplicité des variantes d'exécution puisées dans un vaste catalogue d'accessoires vite et facilement installés) et de sécurité (châssis métallique robuste auxquels sont fixés les pôles et le mécanisme de commande).

### Mécanisme de commande

Il se compose d'un ressort pour accumuler l'énergie nécessaire aux déclencheurs d'ouverture et de fermeture et aux interverrouillages associés. Pour bien manœuvrer, le disjoncteur doit pouvoir disposer immédiatement de cette énergie, même en faible quantité puisque les contacts de la chambre de coupure de l'eVD4 sont légers et leur course de commutation est réduite. Cela limite d'autant l'usure du système et donne un disjoncteur quasiment sans entretien. L'eVD4 peut ainsi totaliser 30 000 manœuvres d'ouverture/fermeture sur toute sa durée de vie.

### Capteurs de position

Ils permettent à l'eVD4 de détecter en toute fiabilité l'état de ses pièces mobiles : disjoncteur ouvert/fermé, ressort armé/désarmé, position du chariot. L'information est ensuite transmise au relais RBX615 sur une liaison câblée dédiée.

### Fiche pour circuits auxiliaires

Elle a pour fonction de garantir le raccordement fiable non seulement des circuits auxiliaires du disjoncteur mais aussi des connexions du relais (voies de transmission, signaux d'E/S et autres liaisons du capteur de courant) → 3. Ses 58 broches sont complétées de 2 ports électriques Ethernet (à droite de la photo).

## Le relais intégré de protection et commande RBX615 assure la surveillance, la commande et le diagnostic de l'eVD4.

compartiment basse tension (BT) de l'appareil, sont accessibles par la fiche du disjoncteur raccordée à la prise du compartiment BT.

Les capteurs, montés sur les pôles du disjoncteur → 7, mesurent les courants et tensions nécessaires à la protection et à la conduite des réseaux électriques MT. La technologie utilisée pour développer cette instrumentation a permis de réduire l'encombrement de l'équipement et d'en améliorer les performances avec un niveau de standardisation accru. Cette association de capteurs et d'IED (RBX615) autorise une surveillance et un enregistrement précis et fiables des paramètres réseau, doublés d'une protection renforcée du personnel d'exploitation et des équipements du poste.

Les avantages du disjoncteur eVD4 tout automatique sur un disjoncteur MT classique se confirment à toutes les étapes du cycle de vie de l'appareil → 2.

Les valeurs assignées de l'eVD4 sont pour la plupart identiques à celles d'un disjoncteur MT classique :  $U_n$  jusqu'à



L'eVD4 a été conçu pour exploiter pleinement la norme CEI 61850 sur la communication et l'interopérabilité des automatismes de postes électriques, et sa messagerie événementielle GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Events*), notamment les flux horizontaux haut débit entre relais, sur bus inter-tableau. Ce qui ne l'empêche pas de disposer d'une liaison câblée traditionnelle point à point avec le relais RBX615 sur les 12 entrées TOR et 8 sorties TOR de la fiche.

Pour faciliter son installation, l'eVD4 est aussi équipé d'une prise de tableau spéciale (accessoire).

#### RBX615 et interface de dialogue

RBX615 est un relais de protection multifonction de la gamme Relion® d'ABB, conçu spécialement pour l'eVD4 → 4. Sa forme et son brochage ont été optimisés pour l'installer sans difficulté dans le disjoncteur, moyennant une unité dédiée.

Le relais se décline en 5 configurations standard, dont 3 réservées à la protection de départs et 2 destinées principalement à la protection de moteurs → 5. Ces préconfigurations peuvent totalement s'adapter aux besoins de l'application avec le gestionnaire d'IED de protection

et commande PCM600<sup>1</sup> et le configurateur graphique d'application ACT (*Application Configuration Tool*) qui permet de modifier facilement la logique applicative. Plusieurs blocs logiques sont fournis pour satisfaire aux exigences de chaque poste électrique. Il est aussi possible de modifier les paramètres de protection/commande des préconfigurations sur une micro-console montée en face avant du relais.

L'écran reproduit en → 6 montre le schéma unifilaire (gauche) et le menu du relais (droite). Ce schéma peut être réalisé avec l'éditeur graphique intégré à PCM600 ; les symboles sont liés dynamiquement à l'objet associé (disjoncteur, motoréducteur d'embrochage/débrochage, sectionneur de terre, sectionneur de ligne) et leur état est affiché. De même, l'état de chaque objet peut être aisément commandé à partir de la micro-console.

Le port Ethernet permet de relier facilement le relais à un ordinateur, en point à point. L'interface de dialogue s'affiche alors automatiquement dans le navigateur web, l'utilisateur pouvant modifier les paramètres des protections et charger des fichiers de perturbographie et autres fonctions. Nul besoin de logiciel supplémentaire sur le poste client pour communiquer avec le relais ! Deux voies de transmission permettent à ce dernier d'échanger avec le procédé. Normalisé CEI 61850, RBX615 prend aussi en charge Modbus® TCP/IP. D'autres protocoles seront proposés à l'avenir.

L'eVD4 exploite le plein potentiel de la normalisation CEI 61850/GOOSE, notamment les échanges horizontaux rapides de relais à relais.

#### Note

<sup>1</sup> La conformité CEI 61850 de PCM600 simplifie le développement des IED et les échanges avec d'autres outils normalisés CEI 61850.

## 5 Les 5 fonctions de protection préconfigurées du relais RBX615

Description de la protection	Pour :
Surintensité non directionnelle et défaut à la terre non directionnel	Départ 1 (F1)
Surintensité non directionnelle et défaut à la terre directionnel avec mesure des tensions de phase	Départ 2 (F2)
Surintensité directionnelle, défaut à la terre directionnel avec mesure des tensions de phase, sous-tension et surtension	Départ 3 (F3)
Protection moteur par mesure de courant	Moteur 1 (M1)
Protection moteur par mesure de courant et de tension	Moteur 2 (M2)

## L'eVD4 utilise deux types de capteurs : capteurs de courant de type bobine à Rogowski et capteurs combiné courant/tension.

### Capteurs

Le disjoncteur automatique eVD4 embarque la plus récente technologie de capteurs : capteurs de courant de type bobine de Rogowski et capteurs de courant et tension combinés. Le choix du capteur est dicté par la fonction de protection du RBX615 → 7.

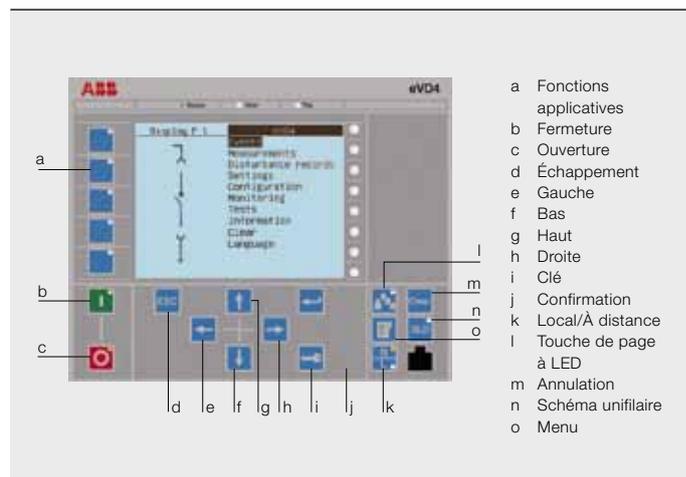
Ces capteurs ont trois fonctions :

- Convertir les valeurs élevées de courant et tension dans le circuit primaire du réseau en un signal adapté aux équipements du circuit secondaire (RBX615) ;
- Isoler le primaire du secondaire ;
- Protéger les équipements secondaires des effets néfastes de forts courants et tensions susceptibles d'apparaître au primaire en cas de court-circuit dans le réseau.

Toute la plage de courant et de tension est couverte par seulement trois tailles de capteur, jusqu'aux valeurs assignées maximales de tension/courant du disjoncteur.

Le capteur de courant est une boucle de Rogowski (enroulement uniforme bobiné sur un mandrin torique de section constante, constitué d'un matériau non ferromagnétique) → 8 : le champ magnétique produit par le courant génère aux bornes de la bobine une tension (signal transmis) proportionnelle au courant traversant. L'absence de saturation et d'hystérésis (la bobine ne contenant pas de fer) lui confère d'excellentes caractéristiques de linéarité : les capteurs de courant de l'eVD4 fournissent des mesures linéaires jusqu'à la valeur maximale fixée pour les seuils de protection.

## 6 Les paramètres de protection/commande des préconfigurations sont modifiés sur la micro-console du relais.



Le capteur de tension utilise un diviseur capacitif pour la mesure → 9 : une électrode métallique cylindrique est moulée dans le capteur, face à la traversée du disjoncteur. Le signal de sortie est une tension directement proportionnelle à la tension primaire. À l'instar des capteurs de courant, les capteurs de tension se caractérisent par l'absence de ferrorésonance et une insensibilité aux effets des composantes du courant continu.

Le disjoncteur en tire plusieurs avantages :

### Linéarité des mesures et polyvalence de la protection

En l'absence de phénomènes de ferrorésonance et d'hystérésis, les capteurs affichent de bonnes performances dynamiques et une linéarité jusqu'aux plus hauts niveaux de courant et de tension : d'où une excellente protection et la possibilité d'analyse multiple des perturbations.

### Sécurité d'exploitation

La valeur nominale du signal transmis, assez faible, est inoffensive tant pour les personnes que l'équipement secondaire, même avec les courants et tensions les plus élevés au primaire. Une coupure de circuit ou un court-circuit dans le câble de signaux est sans danger pour le personnel et sans dommage pour l'installation.

### Faible consommation

L'efficacité d'un capteur est élevée par rapport à celle d'un transformateur de mesure. De surcroît, il n'y a pas de pertes dans le câblage secondaire. Ces atouts contribuent à accroître la durée de vie de

## 7 Le choix du capteur dépend du profil de protection du relais RBX615.



l'équipement: un argument non négligeable pour le distributeur d'électricité!

### Respect de l'environnement

La construction des capteurs est très peu gourmande en matières premières et en énergie.

### L'avenir de la distribution MT

Le nouveau disjoncteur automatique eVD4 d'ABB est un pilier de l'appareillage MT simple, fiable et sûr. Sa totale conformité à la norme CEI 61850 et la

L'eVD4 améliore la performance, la simplicité, la fiabilité, la sécurité et la rentabilité de l'appareillage de distribution MT.

messaging GOOSE en fait un disjoncteur pleinement compatible avec les nouveaux réseaux de communication de postes et apte à optimiser le cycle de vie complet de l'appareillage. En facilitant la spécification et la commande du produit, en réduisant énormément la complexité

## 8 Les capteurs de courant reprennent le principe de la bobine de Rogowski.

Boucle de Rogowski

Le signal transmis est une tension :

$$V_{\text{sort}} = M \frac{di_p}{dt}$$

Pour un courant sinusoïdal en régime établi, la tension vaut :

$$V_{\text{sort}} = M \cdot j \cdot \omega \cdot I_p$$

Le signal en sortie est une tension sinusoïdale proportionnelle au courant, déphasée de 90° (en avance).

Dans tous les cas, même si le courant primaire n'est pas sinusoïdal, on obtient une image de la forme d'onde du courant primaire en intégrant le signal transmis.

## 9 Les capteurs de tension utilisent un diviseur capacitif.

Diviseur capacitif

Signal transmis à partir d'un diviseur de tension

Le signal transmis vaut :

$$V_{\text{sort}} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_p \quad (\text{diviseur capacitif})$$

Dans tous les cas, le signal transmis reproduit la forme d'onde de la tension primaire.

et l'effort de développement, de câblage et d'essai, en allégeant la mise en service et la maintenance, eVD4 constitue un progrès majeur en termes de performance, de simplicité, de fiabilité, de sécurité et de coût.

Calogero Saeli

Callisto Gatti

Carlo Gemme

Emilia Daneri

Carlo Cereda

ABB Power Products

Dalmine (Italie)

calogero.saeli@it.abb.com

callisto.gatti@it.abb.com

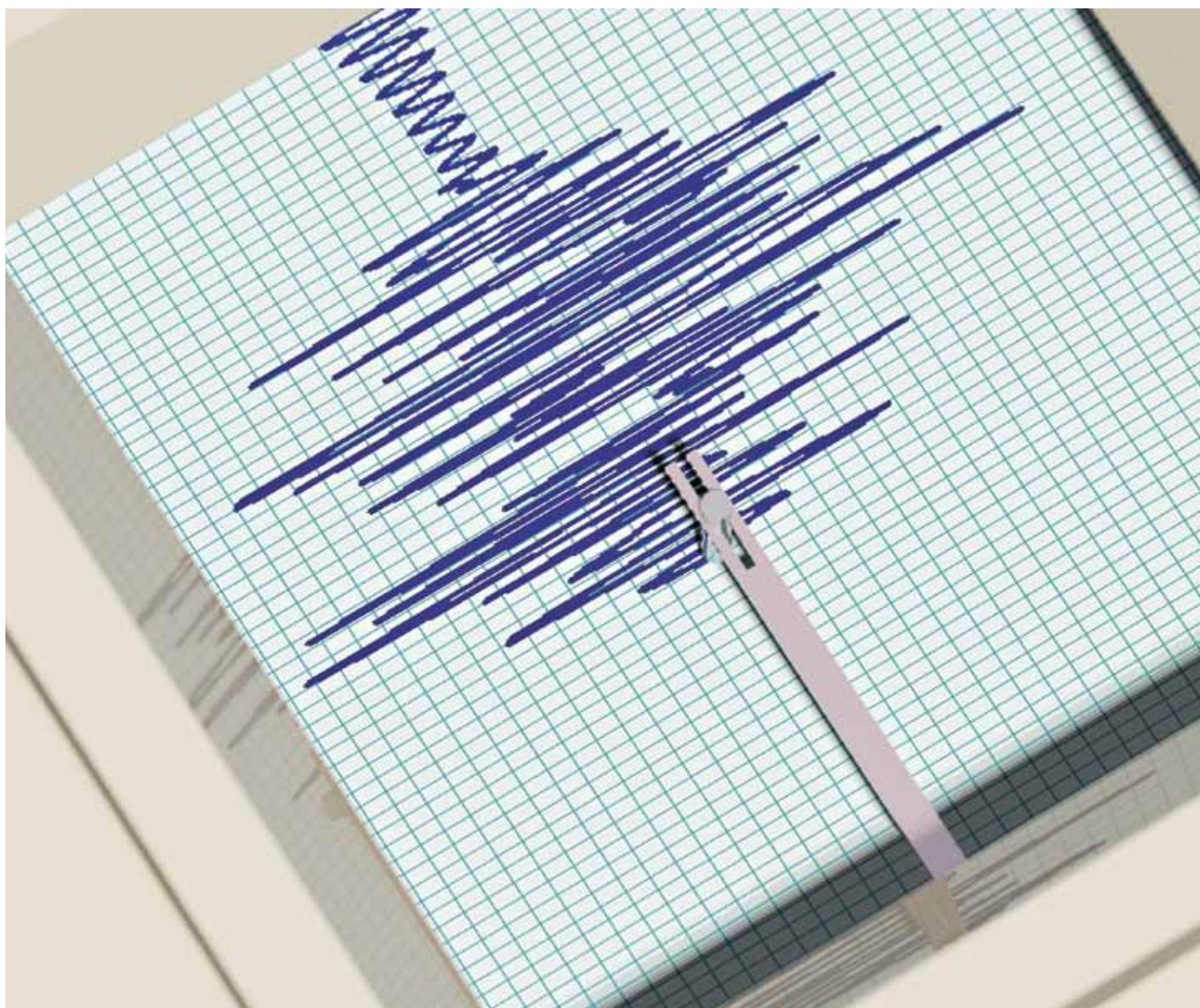
carlo.gemme@it.abb.com

emilia.daneri@it.abb.com

carlo.cereda@it.abb.com

### Photo p. 18

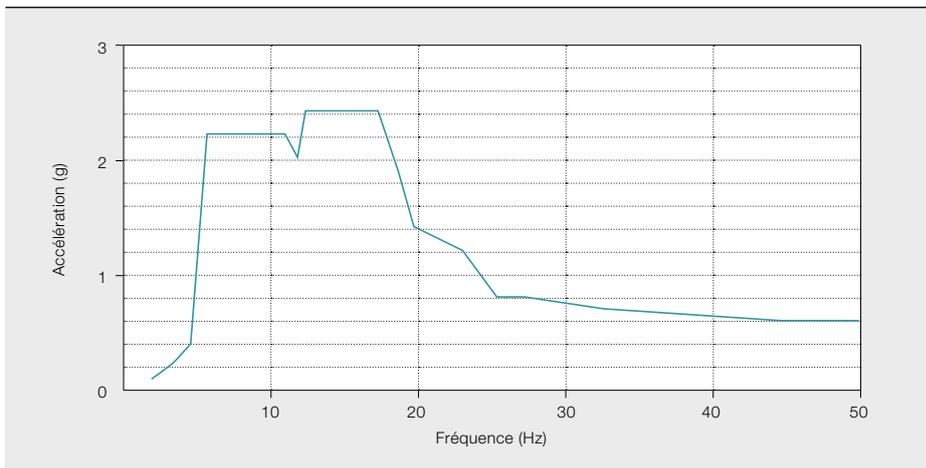
Disjoncteur automatique eVD4 d'ABB pour la distribution MT avec sa micro-console



# Soubresauts dans la moyenne tension

Tableaux ABB pour centrales électro-nucléaires : un maillon essentiel de la chaîne de sûreté énergétique

RENATO PICCARDO, ANNUNZIO REGANTINI, DAVIDE CATTANEO, LUCIANO DI MAIO – Une centrale nucléaire doit pouvoir produire d'énormes quantités d'énergie dans des conditions d'extrême sécurité, en maîtrisant toutes les fonctions du système avec la plus haute fiabilité et sûreté de fonctionnement. Il lui faut aussi endurer les dégradations causées au fil du temps par des contraintes sévères de température, de pression, d'humidité, de rayonnement, de vibration et de choc, dont les secousses sismiques. C'est pour répondre à l'ensemble de ces exigences critiques qu'ABB a développé le tableau moyenne tension (MT) certifié UniGear ZS1.



Quiconque travaille dans le nucléaire sait l'importance accordée au détail et à l'emploi exclusif d'équipements certifiés : pas question de « faire tourner » une centrale tant que l'on n'a pas la garantie que chacun de ses constituants et fonctions de sûreté a été intégralement testé et certifié, dans le strict respect de la normalisation nord-américaine IEEE<sup>1</sup> et européenne CEI<sup>2</sup>.

### Processus de qualification

Tout intervenant dans la chaîne de sûreté d'une centrale nucléaire doit soumettre ses produits à un processus spécifique de qualification afin de vérifier et de certifier la totale fiabilité de sa fourniture.

Certains des équipements d'une centrale doivent aussi pouvoir fonctionner dans des conditions particulièrement difficiles. La motivation première de cette qualification est de démontrer la bonne tenue de l'équi-

pement à diverses ambiances et sollicitations spécifiées ou normées.

L'aléa sismique en fait partie : le système doit pouvoir continuer à fonctionner durant un « séisme de maintien en exploitation » ou « OBE » (*Operating Basic Earthquake*), ou arrêter automatiquement le réacteur lors d'un « séisme d'arrêt de sécurité » ou « SSE » (*Safe Shutdown Earthquake*) consécutif à une très forte secousse. Autre impératif : vérifier la fonctionnalité de chaque composant soumis à des conditions d'environnement extrêmes (température/humidité) et à un double processus de vieillissement (thermique et par rayonnement).

La normalisation IEEE et CEI stipule trois grandes méthodes de qualification des constituants du système, que l'on peut utiliser seules ou panacher :

- Essais de type : ils consistent à soumettre un échantillon représentatif du matériel (interfaces comprises) à une batterie de tests simulant les effets d'importants mécanismes de vieillissement en fonctionnement normal ;
- Expérience d'exploitation : elle s'appuie sur l'historique du matériel en question ou d'un équipement de conception identique ayant fonctionné de façon satisfaisante dans des conditions d'exploitation spécifiées pour qualifier d'autres matériels destinés à un service de sévérité égale ou inférieure ;

- Qualification par l'analyse : contrairement aux deux précédentes méthodes, elle ne fait pas appel à des essais spécifiques ni à l'historique du matériel mais à une évaluation logique ou à un modèle mathématique validé de l'équipement.

La dégradation dans le temps tout comme l'exposition à des conditions extrêmes de température, pression, humidité, rayonnement et vibration peuvent accélérer les défaillances de cause commune de l'équipement qualifié. Aussi faut-il définir une « durée de vie qualifiée » pour le matériel soumis à d'importants mécanismes du vieillissement. Il s'agit en fait de l'intervalle de temps, avant le début d'un événement de référence, pour lequel l'équipement a démontré son aptitude à satisfaire aux contraintes de conception dans les conditions de service spécifiées [1].

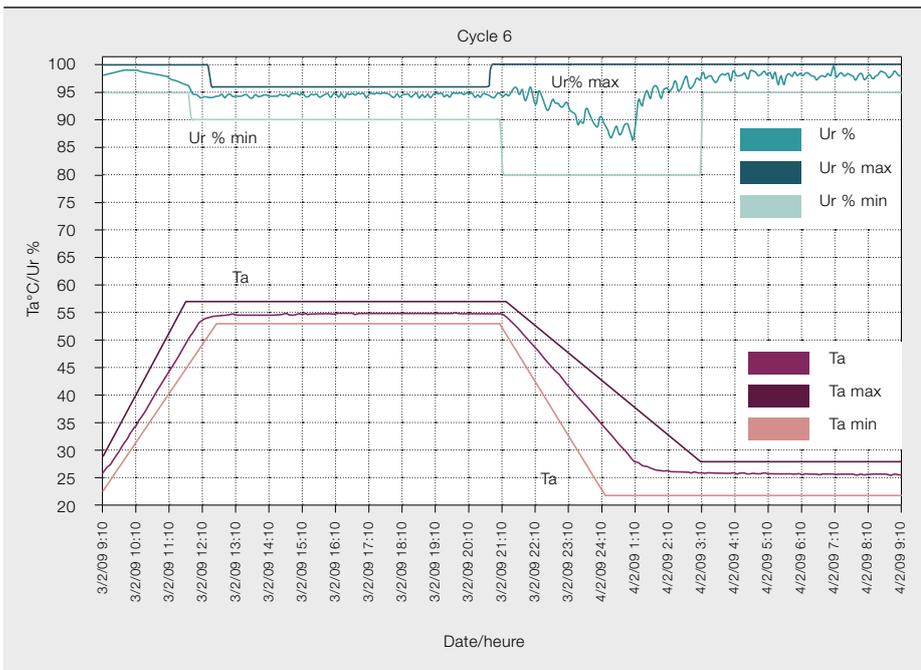
**Le système doit pouvoir continuer à fonctionner durant un « séisme de maintien en exploitation » ou, en cas de très forte secousse, arrêter le réacteur.**

### Essais cycliques de chaleur humide

La qualification climatique entend démontrer l'aptitude de l'appareillage à remplir ses fonctions de sûreté avant, pendant et après variation des niveaux de température et d'humidité dans l'environnement d'exploitation de l'équipement. Concrètement, elle détermine son adéquation à des

### Notes

- 1 *Institute of Electrical and Electronics Engineers* : organisation à but non lucratif constituée de professionnels œuvrant à la promotion du génie électrique, électronique, informatique et télécoms.
- 2 Commission électrotechnique internationale : organisme mondial de normalisation de l'électricité, de l'électronique et des techniques connexes



Tihange et Doel en Belgique, Cernavoda en Roumanie, Oskarsham en Suède et Leibstadt en Suisse : autant de centrales nucléaires européennes récemment équipées d'appareillages MT par le centre de compétences ABB de Dalmine (Italie).

conditions de forte humidité accompagnée de variations cycliques de température avec formation de condensation sur la surface du matériel soumis à qualification. Dans un appareillage MT, la condensation produite au cours de cycles humidité-température peut en effet éroder les propriétés isolantes du matériel.

#### Tenue aux séismes et aux chocs d'aéronefs

La CEI 60980 [4] et l'IEEE 344 [2] sont les deux principaux référentiels de la qualification sismique du matériel électrique de sûreté des centrales nucléaires. Au demeurant, ni l'un ni l'autre ne spécifient de spectres de réponse car ceux-ci dépendent du contexte géosismique et de la structure du bâtiment ; ils figurent normalement dans le cahier des charges technique du projet.

On procède habituellement à un essai triaxial qui soumet le spécimen à des accélérogrammes (évolution en fonction du temps de l'accélération du sol) synthétisés à partir d'un spectre de réponse spécifié (SRS) → 1 simulant les effets d'ondes multifréquences indépendantes sur les trois axes du matériel excités simultanément. Le SRS tient compte de la localisation de l'équipement et des caractéristiques des structures de support ou du bâtiment ; cette méthode est le meilleur moyen de simuler des sollicitations sismiques pendant la qualification de l'équipement.

#### Catégories de séismes et d'accéléérations recréées

Séisme de maintien en exploitation/Sévérité 1 (OBE/S1) : les fonctions et caractéristiques assurant la poursuite de l'exploitation sans dommage ni risque pour la sécurité des personnes sont conçues pour rester opérationnelles ;

Séisme d'arrêt de sécurité/Sévérité 2 (SSE/S2) : les fonctions et mécanismes essentiels de mise en sécurité (structures, systèmes et constituants assurant l'intégrité de l'enveloppe de pression du circuit primaire ainsi que l'arrêt et le maintien en fonctionnement sûrs du réacteur) sont conçus pour rester opérationnels.

#### Qualification CEM

L'équipement doit aussi garantir la totale disponibilité des fonctions de sûreté en cas de fortes contraintes électromagnétiques concomitantes d'un accident. Deux types d'essais reproduisant la configuration réelle de l'instrumentation et du contrôle-commande de l'équipement primaire (câblage compris) sont effectués sur l'ensemble du matériel.

Immunité : ces essais vérifient le niveau d'immunité de l'équipement à son environnement électromagnétique, dans une large bande de fréquence.

Émission : les perturbations rayonnées et conduites par les fileries de chaque équipement électrique sont mesurées sur un large spectre.

Des essais fonctionnels détaillés sont effectués sur la totalité de l'instrumentation et du contrôle-commande, comme les fonctions de protection ou de conduite intégrées à un seul équipement. Le processus de qualification logicielle suit les normes relatives aux centrales nucléaires, énumérées dans la CEI 60780 [3].

#### La réponse ABB

ABB a les produits, l'expertise et les moyens techniques pour garantir le respect de toutes les exigences imposées par la filière nucléaire. Le centre de compétences ABB de Dalmine (Italie) a installé plusieurs appareillages MT dans les centrales européennes de Tihange et Doel en Belgique, Cernavoda en Roumanie, Oskarsham en Suède et Leibstadt en Suisse. Pour chacun de ces chantiers, les produits d'ABB ont subi une rigoureuse procédure de qualification visant à valider les fonc-

### 3 Configuration de qualification sismique d'un tableau UniGear ZS1 de la centrale de Doel



tionnalités et la réponse de l'équipement à des excitations sismiques et un environnement difficile.

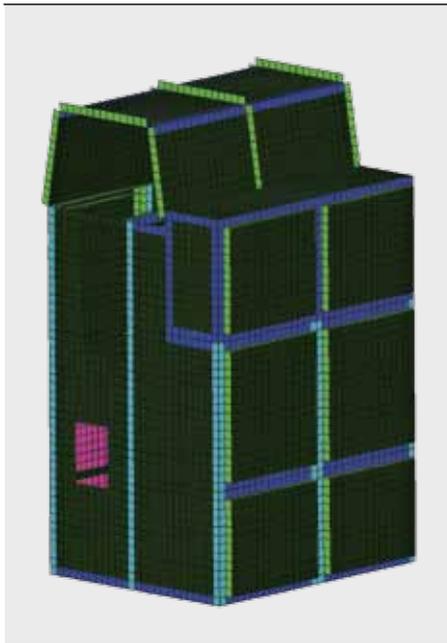
Au-delà de son offre de produits, de ses laboratoires et de son savoir-faire, ABB peut aussi compter sur un partenariat étroit avec les laboratoires de proximité dotés d'équipements de pointe comme, par exemple, une table vibrante triaxiale; ABB peut aussi faire intervenir une équipe d'experts en structures antisismiques. Les simulations logicielles de secousses présentent de nombreux avantages pour les projets nucléaires puisqu'elles évitent les prototypes et écourtent ainsi les délais de réalisation tout en abaissant les coûts.

Areva NP, leader mondial de l'ingénierie, de l'approvisionnement et de la gestion de la construction (IAGC) de centrales nucléaires, certifiait en 2009 que le centre de compétences ABB satisfaisait aux conditions de «planification et de production d'appareillages MT pour les centrales nucléaires».

#### UniGear ZS1

L'appareillage MT est un jalon clé du réseau de distribution électrique. Par sa conception, le tableau UniGear ZS1 d'ABB pour installations intérieures répond à toutes les exigences des utilisateurs. Synthèse de solutions éprouvées et de composants innovants d'ABB, il se distingue par un cloisonnement métallique

### 4 Exemple d'étude numérique de structure utilisée pour la qualification sismique par l'analyse



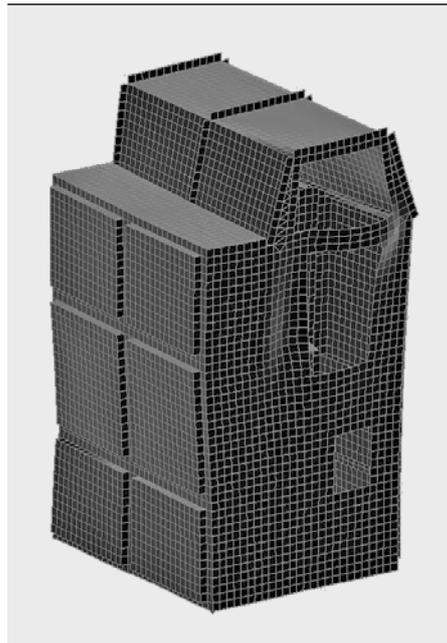
des unités fonctionnelles et des parties sous tension isolées dans l'air. Sa gamme d'appareils (disjoncteurs à vide et à gaz, contacteurs sous vide avec fusibles) est la plus complète du marché!

#### Applications industrielles

Doel est l'une des deux grandes centrales nucléaires que compte la Belgique; elle est exploitée par l'énergéticien Electrabel, société du groupe GDF Suez. En 2009, ABB lui fournit un appareillage MT composé de 18 tableaux UniGear ZS1 de 12 kV/1 600 A/50 kA équipés de disjoncteurs HD4 isolés à l'hexafluorure de soufre ( $SF_6$ ); cet équipement ABB sert à distribuer l'énergie débitée par les groupes électrogènes de secours.

Cette fourniture fut qualifiée selon les normes IEEE 323 et 344 ainsi que les spécifications du client qui comportaient des essais climatiques → 2 et sismiques; un appareillage d'essai reprenant toutes ses caractéristiques fut défini. Les prototypes furent soumis à un programme de qualification → 3 qui donna de bons résultats.

### 5 Exemple de déformation amplifiée de structure UniGear ZS1



Tihange est la seconde centrale d'envergure en Belgique ayant aussi Electrabel pour exploitant. Ses 3 réacteurs à eau sous pression (REP) produisent 2 985 MWe, soit 52 % de la capacité totale de production nucléaire belge.

ABB a remplacé 344 disjoncteurs de fabrication CEM Gardy par des HD4 au  $SF_6$ . Le site abrite 354 disjoncteurs (dont 35 appareils de rechange) et 34 chariots débrochables «TP» (dont 7 de rechange)

L'appareillage MT est un jalon clé du réseau de distribution électrique. Le tableau UniGear ZS1 conjugue solutions éprouvées et composants de dernière génération d'ABB.

dotés de transformateurs de tension. Le contrat prévoyait le remplacement de tous les disjoncteurs et chariots TP, échelonné sur 2009–2010, au cours des arrêts annuels de maintenance périodique.

La qualification s'est déroulée en deux temps: les volets industriel et nucléaire ont respecté les normes CEI et standards IEEE applicables à l'appareillage MT, ainsi



Outre ses produits, moyens d'essais et compétences, ABB peut aussi compter sur un partenariat étroit avec des laboratoires de pointe.

que les spécifications techniques du client; les essais sismiques furent menés dans les laboratoires CESI/ISMES de Milan, aux standards IEEE.

La centrale d'Oskarshamn est l'une des 10 installations nucléaires suédoises en activité. Ses 3 réacteurs à eau bouillante (REB) lui permettent de couvrir près de 10 % des besoins en électricité du pays. En 2009, ABB a fourni 4 appareillages MT comprenant chacun 7 tableaux UniGear ZS1 12 kV/1 600 A/50 kA avec disjoncteurs HD4 au SF<sub>6</sub>. Comme à Doel, cet équipement distribue l'énergie délivrée par les groupes électrogènes de secours et fut qualifié selon les standards IEEE 323/344 et le cahier des charges client qui exigeait une qualification sismique.

Cette dernière s'est appuyée sur des méthodes d'analyse et d'essai, menées en collaboration avec les laboratoires CESI/ISMES situés à quelques kilomètres de l'usine ABB d'appareillages MT → 4, → 5.

#### Modernisation de l'existant

Moderniser des installations MT existantes consiste à les équiper de composants de dernière génération, tels que des appareils de coupure primaire et des dispositifs de protection et commande numériques. L'opération ne vise que les constituants prévus pour être remplacés en fonction de leur cycle de vie attendu.

Qui dit disjoncteurs, dit cycles répétés de manœuvres d'ouverture et de fermeture, contrairement aux autres appareils statiques d'un tableau: ce sont donc les équipements les plus sensibles au vieillissement et généralement soumis aux pires conditions. Les remplacer est la solution par excellence.

ABB a d'ores et déjà modernisé ses propres disjoncteurs tout comme ceux de la concurrence. Son plus gros chantier fut celui des 344 disjoncteurs CEM Gardy de Tihange remplacés par des HD4 au SF<sub>6</sub>.

**Renato Piccardo**

**Annunzio Regantini**

**Davide Cattaneo**

**Luciano Di Maio**

ABB Power Products, Medium Voltage Products  
Dalmine (Italie)

renato.piccardo@it.abb.com

annunzio.regantini@it.abb.com

davide.cattaneo@it.abb.com

luciano.di\_maio@it.abb.com

#### Bibliographie

- [1] IEEE 323, *Qualification du matériel 1E de centrales nucléaires.*
- [2] IEEE 344, *Recommandations pour la qualification sismique des équipements 1E pour les centrales électronucléaires.*
- [3] CEI 60780, *Centrales nucléaires – Équipements électriques de sûreté – Qualification.*
- [4] CEI 60980, *Pratiques recommandées pour la qualification sismique du matériel électrique du système de sûreté dans les centrales électronucléaires.*

#### Lecture complémentaire

EN 61000-4, *Compatibilité électromagnétique (CEM) – Partie 4: techniques d'essai et de mesure.*

#### Photo p. 24

Le sismographe est l'appareil qui capte, enregistre et mesure les tremblements de terre et les secousses produites lors d'essais sur table vibrante.

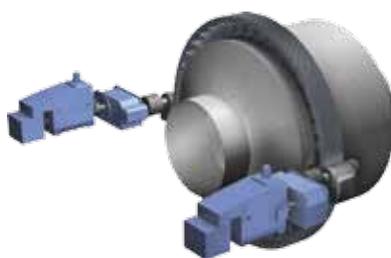


# Force rotatrice

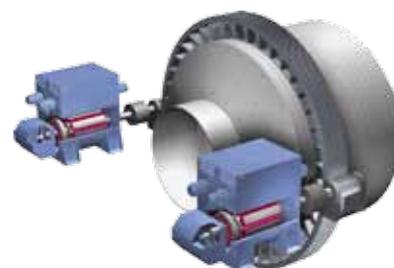
Les variateurs ABB dopent les performances des broyeurs (1<sup>ère</sup> partie)

MARCO RUFLI, MAARTEN VAN DE VIJFEIJKEN – La dernière génération de variateurs de fréquence moyenne tension ABB offre un excellent levier d'amélioration des performances des broyeurs de minerais. Dotés de fonctions pointues développées spécifiquement pour les broyeurs à couronne dentée, ces variateurs stabilisent, fiabilisent et sécurisent le fonctionnement de ces machines en mini-

misant les contraintes exercées sur les organes mécaniques et en maximisant la disponibilité des ateliers de broyage. Ce premier article décrit les avantages de ces fonctions tandis que le second présentera le retour d'expérience sur ce type de système d'entraînement pour broyeurs à couronne.

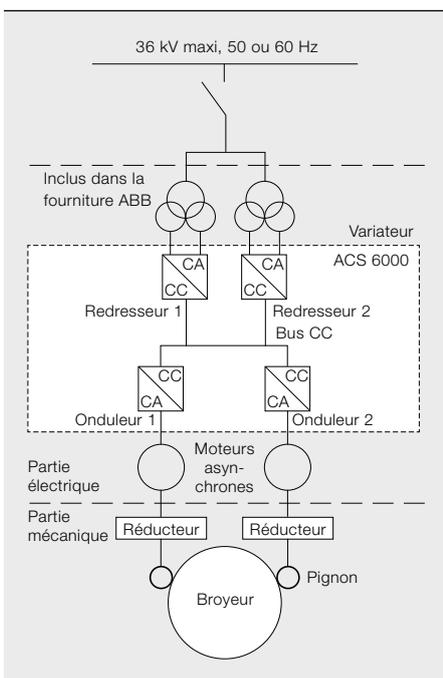


Avec réducteur

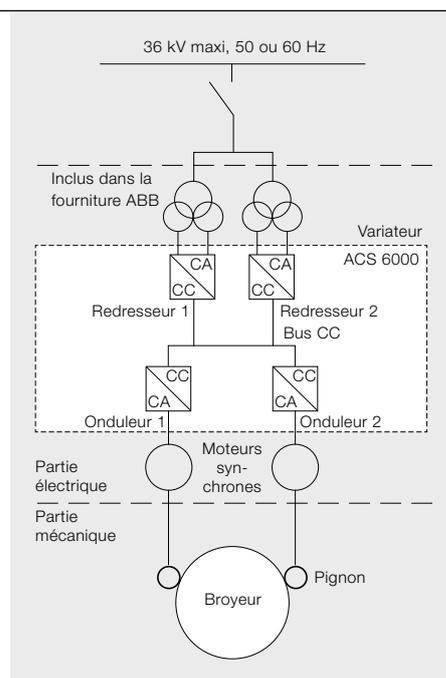


Sans réducteur

2 Schéma simplifié d'un entraînement de broyeur à 2 pignons à grande vitesse (gauche) et petite vitesse (droite)



Avec réducteur



Sans réducteur

Les broyeurs ont des exigences spécifiques en matière d'exploitation, de maintenance et de protection. En effet, pour garantir un fonctionnement sûr et stable, il importe d'éviter autant que possible les situations critiques. Si la maintenance doit être simple et rapide, la protection du système est primordiale à tous les régimes de marche.

Dans les broyeurs à couronne, plus particulièrement ceux à deux pignons → 1, les moteurs peuvent accroître les efforts mécaniques de manière significative. Par conséquent, la commande entre les deux moteurs doit être rapide et précise afin d'éviter tout effort supplémentaire sur les pignons et la couronne d'entraînement.

Grâce à des fonctions innovantes conçues spécialement pour les broyeurs, la nouvelle génération de variateurs de fréquence moyenne tension (MT) d'ABB satisfait, voire dépasse ces exigences. Qui plus est, l'ajout d'un contrôleur permet d'inclure un grand nombre de fonctions applicatives et de protection, tout en simplifiant l'interface entre le système d'entraînement du broyeur et le système de contrôle-commande distribué du client. Les variateurs de fréquence ABB intègrent la technologie exclusive DTC (*Direct Torque Control*) → 2. Perçue comme le nec plus ultra de la commande des moteurs, elle contrôle directement leur couple

et leur flux en commutant l'onduleur. Seuls les variateurs électroniques de vitesse permettent d'élargir le domaine fonctionnel des machines entraînées et d'en améliorer la maintenance. Leurs performances intrinsèques contribuent à renforcer celles du système et apportent plus de souplesse dans la conduite des ateliers de broyage. Parmi leurs nombreux avantages, citons une mesure très précise des valeurs de courant et de couple, la gestion des pertes du réseau, ainsi que la protection contre les défauts de terre et les courts-circuits.

Sur les gros broyeurs où la longueur de la denture des pignons et de la couronne augmente graduellement, le parfait alignement du pignon et de la couronne (et, dans certains cas, du réducteur) est primordial. Or, sachant par expérience qu'un tel alignement peut être difficile à obtenir et à conserver, il est impératif d'éviter les démarrages

brutaux ainsi que les à-coups de couple. À tous les régimes (démarrage, fonctionnement normal et arrêt), il faut ménager la mécanique.

Le système d'entraînement électrique qui fait l'objet de cet article se compose d'un transformateur, d'un variateur de fréquence MT ACS 6000 en configuration multimoteurs et de deux moteurs asynchrones à cage 4 pôles AMI630 d'ABB. Nous étudierons ses performances pendant les séquences de démarrage, d'exploitation et d'arrêt, et verrons comment il participe à l'amélioration du fonctionnement général de l'atelier de broyage.

Démarrage et arrêt du broyeur

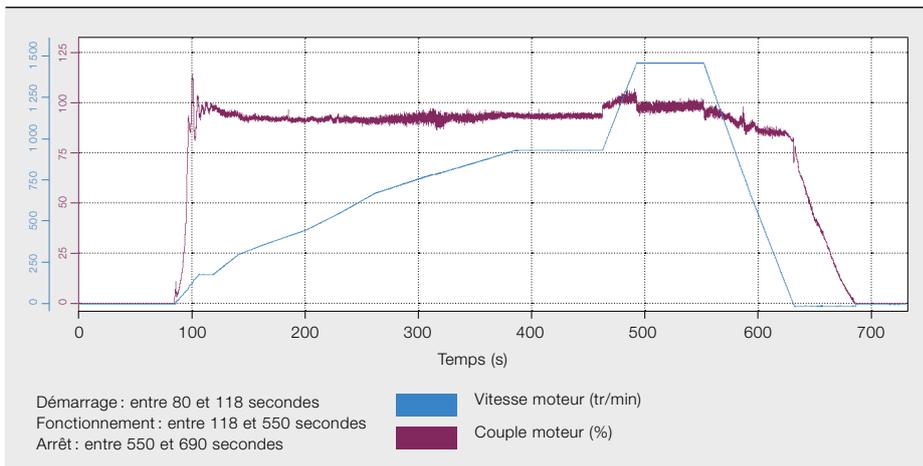
La séquence de démarrage du broyeur est intégralement pilotée par le système d'entraînement électrique. Le système de contrôle-commande distribué du client (ou un pupitre opérateur situé à proximité du

broyeur) doit simplement envoyer un ordre de démarrage ainsi que la consigne de vitesse d'exploitation. Pour un démarrage sûr et sans à-coups, le système d'entraînement commence par accélérer sur la rampe jusqu'à la vitesse de démarrage préétablie (généralement égale à environ 10% de la vitesse nominale). Il maintient cette vitesse tout en surveillant le couple et l'angle de rotation du broyeur. Normalement, la charge retombe en cascade avant que le broyeur n'ait effectué une rotation de 90 degrés. Or, si elle est bloquée (ou solidifiée), elle chutera après une rotation de 180 degrés, risquant d'endommager gravement le broyeur et ses paliers, et de provoquer un arrêt de production intempestif et prolongé. La technologie ABB de commande des moteurs peut prévenir ce cas de figure en n'autorisant le variateur à suivre la consigne de vitesse qu'après détection par le contrôleur de l'effet de cascade de la charge par une diminution du couple avant d'atteindre l'angle de rotation critique → 3. À partir de là, l'entraînement obéit aux ordres du système de contrôle-commande distribué, suivant très précisément tout changement de vitesse demandé.

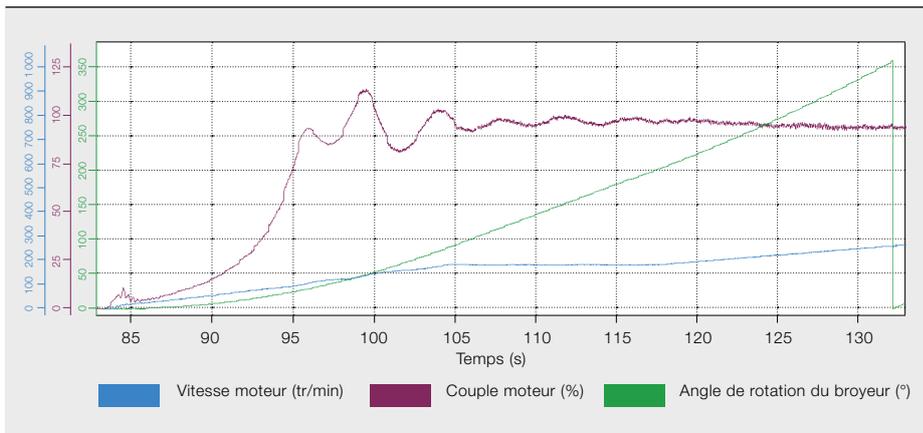
Pendant la phase de démarrage, il y a un risque potentiel de chute de charge solidifiée susceptible d'endommager gravement la paroi du broyeur, ses paliers, etc. Le contrôleur ABB élimine ce risque et aucune action supplémentaire (avance lente, par exemple) n'est requise avant un ordre de démarrage, même après un arrêt machine prolongé. Si le broyeur contient réellement une charge solidifiée, l'entraînement déclenche et s'arrête en roue libre avant que l'angle de rotation critique ne soit atteint. En résumé, l'absence de surcouple important au démarrage évite toute contrainte sur les composants mécaniques comme le réducteur, le pignon et la couronne.

Une partie de la séquence de démarrage illustrée en → 3 est détaillée en → 4. La toute première petite pointe de couple correspond au couple de décrochage à partir duquel la vitesse du moteur augmente lentement et progressivement au fur et à mesure de la hausse du couple avec l'angle de rotation du broyeur. À un angle approximatif de 30 degrés (la première pointe de couple importante atteint grosso modo 94% du couple nominal alors que la suivante, qui est la plus forte, correspond approximativement à 113%), la charge commence à rouler en cascade. Une fois l'effet de cascade détecté, le broyeur continue de tourner à

### 3 Séquence de démarrage et d'arrêt complet



### 4 Séquence de démarrage avec fonction de protection contre les charges solidifiées



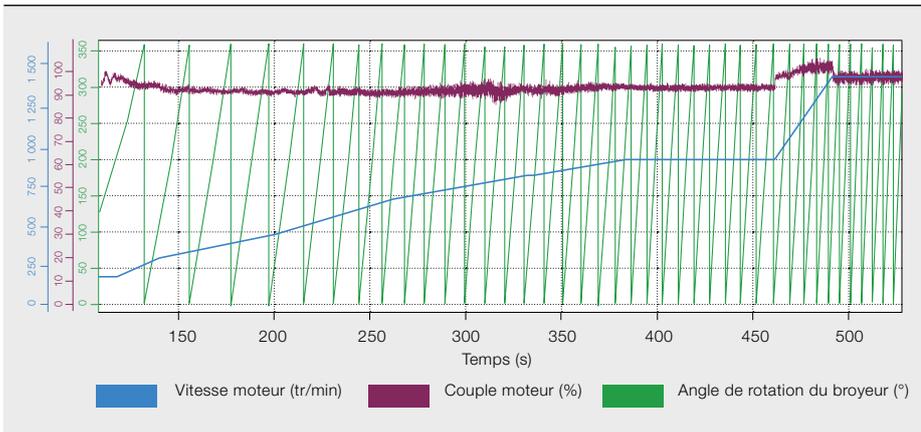
faible vitesse jusqu'à obtenir un mouvement de cascade continu, ce que confirment les mesures de couple constant. À un angle d'environ 200 degrés, le système fonctionne en régime établi; le contrôleur débloque alors l'entraînement qui peut ainsi suivre la consigne de vitesse du système de contrôle-commande distribué.

Le couple moteur maximum autorisé peut être limité dans l'entraînement à des seuils de démarrage distincts (limite de couple supérieure fixée à 130% du couple nominal, par exemple) et pour le fonctionnement normal après démarrage (limite de couple inférieure fixée à 110% du couple nominal, par exemple).

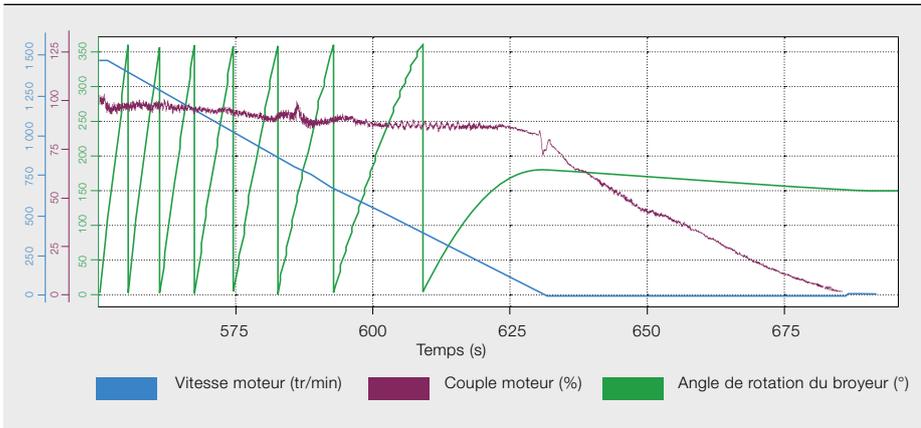
En plus de protéger la mécanique, ce mode de démarrage n'a pour ainsi dire aucune incidence sur le réseau électrique. En effet, le moteur étant alimenté par le variateur ACS 6000, le réseau ne subit aucune surintensité, contrairement à un démarrage direct. Par conséquent, le courant prélevé sur le réseau au démarrage ne représente qu'environ 12% du courant nominal (pour une pointe maxi de 113% du couple nominal).

Dans les broyeurs à couronne, les moteurs peuvent nettement accroître les efforts mécaniques ; leur commande doit donc être rapide et précise.

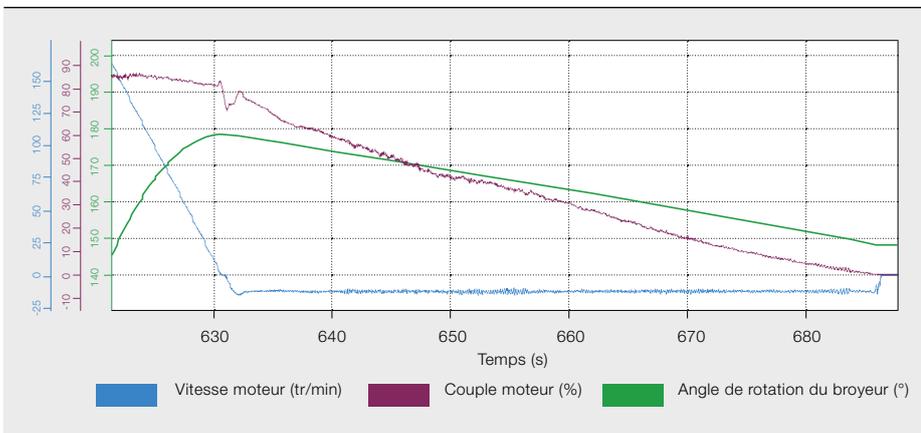
## 5 Fonctionnement normal



## 6 Séquence d'arrêt complète



## 7 Vue détaillée de la fonction d'oscillation contrôlée



### Zone de fonctionnement

Dès que le contrôleur du broyeur a débloqué l'entraînement, la vitesse peut être adaptée par l'opérateur en fonction des besoins. Le système d'entraînement électrique est capable de fournir un couple constant sur toute la plage de vitesse de même que fonctionner à une vitesse supérieure à la vitesse nominale mais à couple réduit (zone de fonctionnement à puissance constante).

Sur le graphique → 5, l'opérateur a lentement accéléré le broyeur sur la rampe jusqu'à la vitesse de consigne. Après être resté aux deux tiers de la vitesse nominale pendant plus d'une minute, le broyeur accélère à nouveau sur la rampe jusqu'à la vitesse maximale d'environ 1500tr/min (vitesse nominale du moteur). Même s'il bondit légèrement pendant l'accélération sur la rampe (le couple d'accélération équivaut à environ 7% du couple nominal), le couple reste tout à fait constant sur toute la plage de vitesse.

Pour simplifier, sécuriser et accélérer la maintenance du broyeur, ABB a intégré des fonctions dédiées dans le contrôleur.

### Séquence d'arrêt avec oscillation contrôlée

Lorsque l'ordre d'arrêt est reçu du système de contrôle-commande distribué, le contrôleur du broyeur gère intégralement la séquence d'arrêt. Pour éviter l'oscillation avant-arrière inutile et prolongée du broyeur en cas d'arrêt en roue libre (la charge déséquilibrée entraînant la rotation du cylindre), ABB a développé une fonction d'« oscillation contrôlée » qui amène rapidement le broyeur dans une position à couple nul par une décélération sur la rampe jusqu'à vitesse nulle. Une fois celle-ci atteinte, le système d'entraînement inverse lentement le sens de rotation pour faire tourner le broyeur en arrière jusqu'à disparition complète du couple dans le système → 6. Pendant ce temps, le moteur fonctionne en mode générateur en récupérant l'énergie potentielle

présente dans le système du fait d'une charge dans le broyeur à un angle donné.

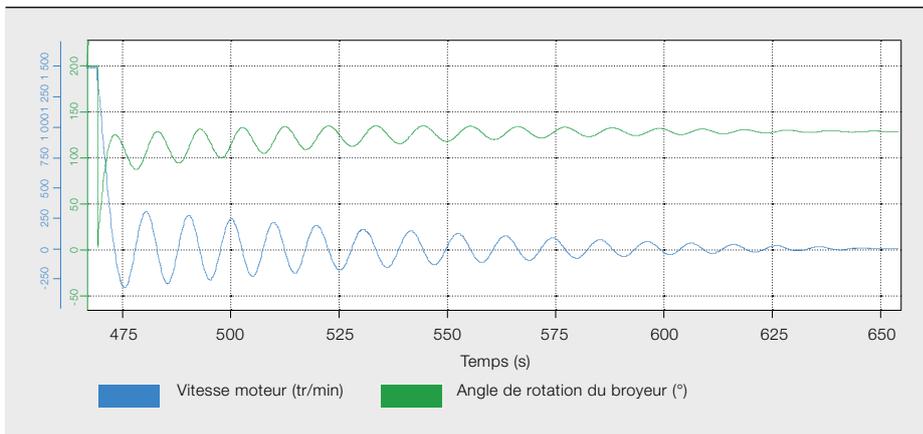
Dans ce type de système d'entraînement (où le redresseur à pont de diodes rend impossible le renvoi d'énergie sur le réseau), la vitesse négative disponible pour la rotation en sens inverse du broyeur est relativement faible car l'énergie régénérative est limitée par les pertes dans le système d'entraînement (moteur + onduleur/bus CC du variateur de fréquence). ABB propose également un véritable système d'entraînement 4 quadrants (4Q) doté d'un redresseur actif qui renvoie l'énergie de freinage sur le réseau et réduit considérablement le temps requis pour contrôler l'oscillation d'un broyeur avec une charge déséquilibrée.

Le graphique → 7 permet de comprendre le déroulement de la fonction d'oscillation contrôlée. Après décélération sur la rampe, le broyeur se trouve dans une position déséquilibrée; le moteur commence par créer un couple positif pour l'immobiliser avec la charge déséquilibrée. Une légère réduction de couple provoque alors l'inversion du sens de rotation; le broyeur revient doucement en arrière jusqu'à équilibrer la charge. Les courbes montrent clairement que le couple (exercé sur la denture du pignon) reste positif pendant toute l'opération: il n'y a donc aucun jeu entre le pignon et la couronne, et le contact entre les deux est toujours maintenu. La présence d'un jeu serait révélée par une chute de couple à une valeur nulle ou inférieure.

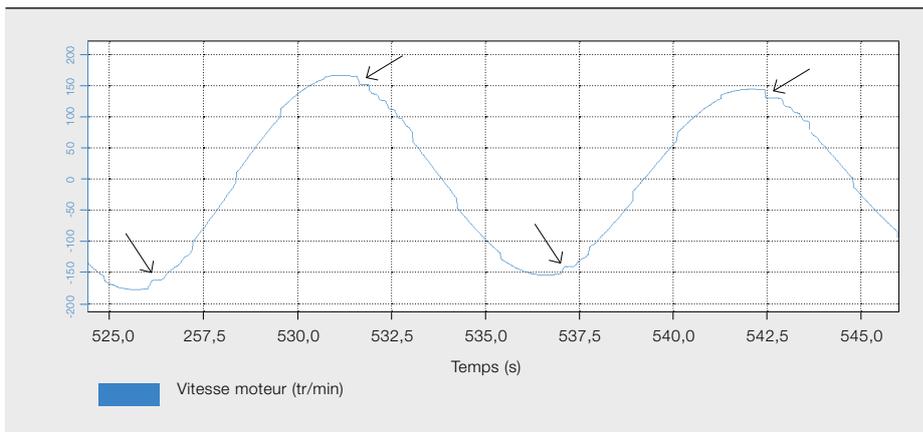
## La dernière génération de variateurs de fréquence moyenne tension ABB est un excellent levier d'amélioration des performances des broyeurs de minerais.

Dans cette configuration particulière, la vitesse du moteur pendant le contrôle de l'oscillation n'est que de 12,8 tr/min, soit environ 0,85 % de la vitesse nominale! En

### 8 Arrêt en roue libre (broyeur en oscillation)



### 9 Jeu pendant un arrêt en roue libre



d'autres termes, le broyeur revient doucement en arrière de manière contrôlée à environ 0,1 tr/min. Même à cette vitesse très faible, la stabilité du système est garantie par la technologie avancée DTC. Par ailleurs, une fois la vitesse nulle atteinte, 55 secondes suffisent pour atteindre un couple nul (broyeur arrêté et aucune surmodulation), ce qui est déjà beaucoup plus rapide qu'un arrêt en roue libre; le recours à un variateur 4Q permettrait de gagner encore quelques secondes de plus.

Sur la courbe de l'angle de rotation du broyeur en → 7, on observe que le broyeur opère une rotation arrière de 30 degrés, passant de 178 à près de 148 degrés (la courbe d'angle décroît dès que la courbe de vitesse du broyeur devient négative à environ 630 secondes), ce qui correspond parfaitement à l'angle de l'effet cascade mesuré au démarrage en → 4.

### Arrêt en roue libre (broyeur en oscillation)

Pour pleinement apprécier les avantages de l'entraînement à vitesse variable et, donc, de la fonction d'oscillation contrôlée, le même broyeur a été testé avec un arrêt en roue libre à partir de la vitesse nominale. Dans ce cas, il a fallu près de 180 secondes

pour immobiliser le broyeur (arrêt de l'oscillation avant-arrière) → 8.

En examinant de plus près le signal de vitesse du moteur (mesuré par un capteur monté sur son arbre) → 9, un jeu apparaît clairement entre la denture du pignon et la couronne (flèches). La raison en est la suivante: la couronne entraîne le moteur qui doit être accéléré et décéléré du fait de son inertie. Pendant la décélération, la denture de la couronne frappe à plusieurs reprises la denture du pignon pour freiner la vitesse du moteur. Outre le fait de créer du jeu, cela impose d'énormes contraintes à la couronne.

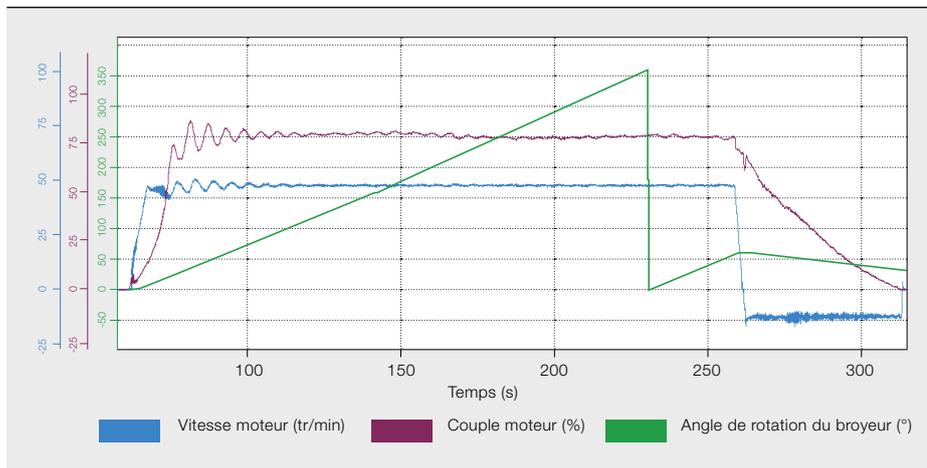
### Fonctions de maintenance

Pour simplifier, sécuriser et accélérer la maintenance du broyeur, ABB a intégré des fonctions dédiées dans le contrôleur.

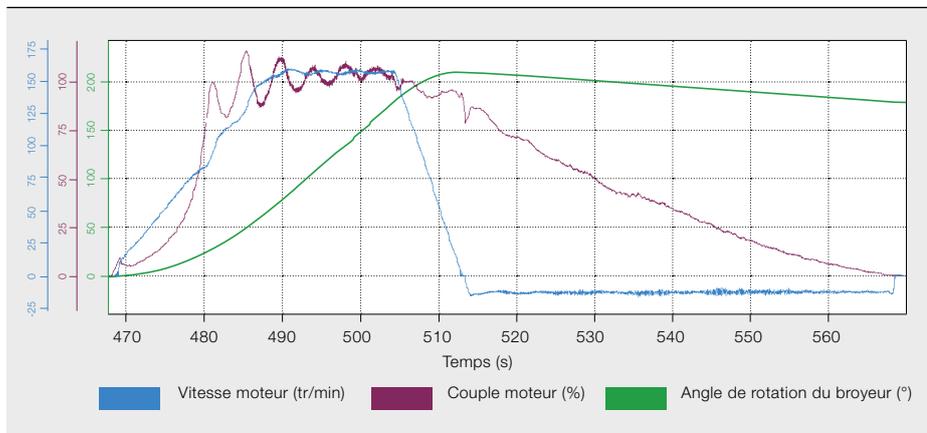
### Avance lente

La fonction d'avance lente, courante pour les broyeurs, consiste tout simplement à faire tourner le broyeur à très faible vitesse pour, par exemple, contrôler visuellement les paliers ou l'amener dans une position permettant de remplacer le blindage. En général, les broyeurs dont le système d'en-

## 10 Fonction d'avance lente



## 11 Fonction de positionnement automatique avec consigne d'angle de 180°



La fonction de positionnement automatique permet à l'opérateur de faire tourner le broyeur sur un angle ou un nombre de rangées de blindages donné.

traînement principal comporte des moteurs tournant à vitesse fixe nécessitent un moteur auxiliaire avec un réducteur pour cette avance lente. Les systèmes d'entraînement ABB pour broyeurs sont capables de fournir un couple élevé à petite vitesse ; l'entraînement principal peut donc réaliser lui-même cette fonction d'avance lente.

La commande d'avance lente doit, de préférence, être donnée par un pupitre opérateur local placé à proximité du broyeur ; toutefois, elle peut également être émise à distance par le système de commande distribué. La procédure de démarrage est totalement pilotée par le contrôleur du broyeur et la protection contre les charges solidifiées est activée dès que le mode d'avance lente est sélectionné. La vitesse d'avance lente correspond généralement à 5% de la vitesse nominale mais peut être réglée entre 1 et 10% après un démarrage satisfaisant.

Une séquence d'avance lente complète est illustrée en → 10. La vitesse est réglée à 48 tr/min, soit 3,2% de la vitesse nominale ; l'effet de cascade est détecté à un angle de rotation du broyeur de 23,5 degrés et à un

couple de 73% du couple nominal. L'opérateur fait tourner le broyeur à cette vitesse sur 420 degrés avant d'envoyer un ordre d'arrêt ; le contrôleur décélère alors le broyeur sur la rampe et contrôle son oscillation jusqu'à obtenir un couple nul dans le système avant d'arrêter l'entraînement.

### Positionnement automatique

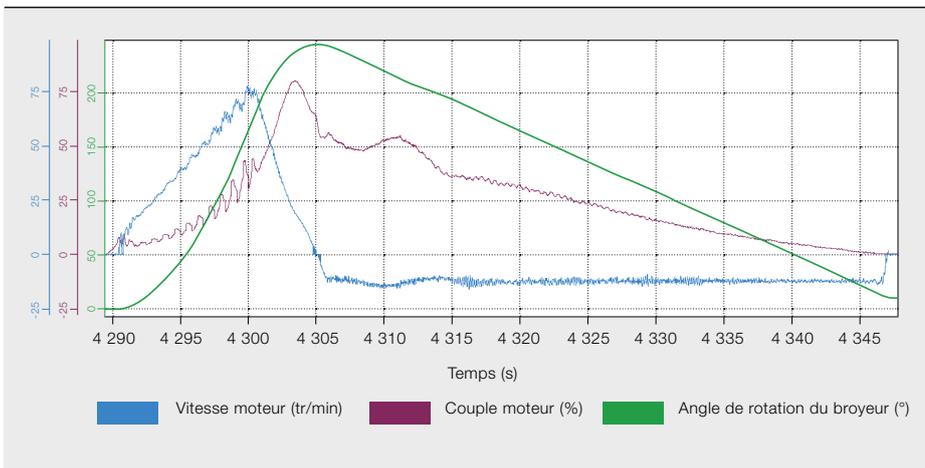
La fonction de positionnement automatique permet à l'opérateur de faire tourner le broyeur sur un angle ou un nombre de rangées de blindages donné. En fait, cette fonction s'avère très utile pendant l'opération de remplacement du blindage car elle contribue à réduire les arrêts machine et accroître la disponibilité. À partir du pupitre opérateur local ou du système de commande distribué, l'opérateur présélectionne le mode de positionnement, le sens de rotation ainsi que l'angle ou le nombre de rangées de blindages désiré.

La figure → 11 illustre une commande de positionnement automatique avec rotation de 180 degrés. La charge roule en cascade à 27 degrés ; l'entraînement continue de fonctionner à faible vitesse pendant un certain temps avant de décélérer sur la rampe. Lorsque la vitesse nulle est atteinte, le broyeur a effectué une rotation de 209 degrés, angle où la valeur de couple correspond à 94% du couple nominal (taux de remplissage maximum du broyeur) et où l'entraînement inverse le sens de rotation, réduisant lentement le couple. Lorsque l'entraînement s'arrête (101,6 secondes après), le broyeur a effectué une rotation de 179,2 degrés, soit une erreur de 0,5% seulement ! La vitesse de positionnement optimale pour cet exemple a été réglée à 158 tr/min, à savoir 10,5% (10% en moyenne) de la vitesse nominale. À cette vitesse, l'erreur angulaire était inférieure à 1% pour tous les essais.

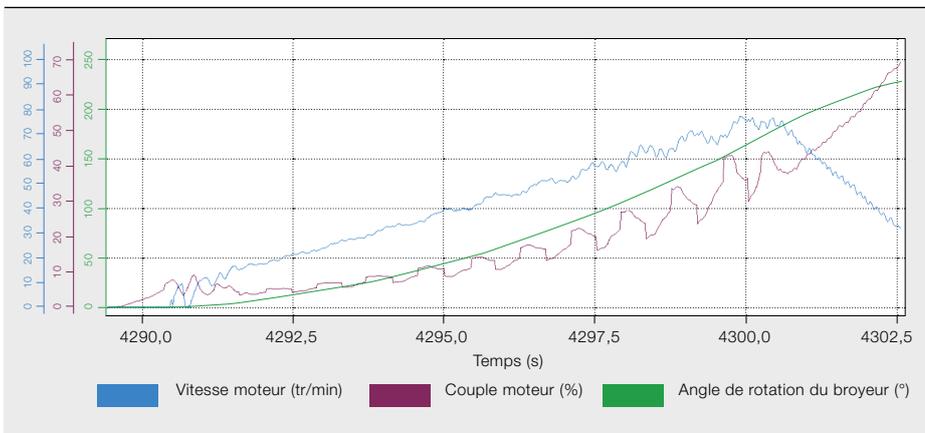
### Protection contre la déformation

Cette fonction consiste en une séquence de positionnement automatique avec une consigne d'angle fixe de 180 degrés. Même si la déformation ne pose pas vraiment de problème pour les broyeurs de minerais, cette fonction peut être utilisée pendant les arrêts prolongés (intervention de maintenance, par exemple) pour empêcher la formation de charges solidifiées. Il suffit à l'opérateur de présélectionner un mode de protection contre la déformation et de préciser le sens de rotation désiré avant d'émettre un ordre de démarrage. Le contrôleur du broyeur active la rotation sur 180 degrés, comme illustré en → 11.

## 12 Élimination d'une charge solidifiée avec oscillation contrôlée



## 13 Échelons de couple de la fonction d'élimination des charges solidifiées



### Élimination des charges solidifiées

Les charges se solidifient principalement dans les broyeurs à boulets. Toute charge solidifiée détectée doit être éliminée; cette opération réalisée normalement manuellement peut immobiliser le broyeur pendant un temps considérable.

contrôle-commande distribué. Pour les éliminer, le système applique des échelons de couple dont l'amplitude et la durée sont optimisées et réglées lors de la mise en service. Leur amplitude est définie en ajoutant un certain pourcentage du couple réel au système, alors que les fonctions de protec-

tion (notamment les limites de couple et de courant) fonctionnent comme si les conditions d'exploitation du broyeur étaient normales. Ainsi, les organes mécaniques ne sont jamais sollicités au-delà des valeurs autorisées en marche

normale. La fonction d'élimination des charges solidifiées peut être appliquée à la fois dans le sens positif et le sens négatif.

Une séquence complète d'élimination des charges solidifiées avec un sens de rotation positif et un contrôle de l'oscillation est illustrée en → 12. Le début de la séquence est détaillé en → 13. Les échelons de couple,

également mis en évidence par les fluctuations de vitesse, sont appliqués au système immédiatement après un démarrage du broyeur et prennent la forme d'une succession de phases d'accélération et de décélération pour détacher la charge solidifiée. L'amplitude des échelons est une valeur relative fixe du couple réel ajoutée au système; cette valeur peut être ajustée pendant la mise en service.

En → 13, l'amplitude maximale du plus gros échelon de couple est de 19,2% du couple nominal. Sachant que le couple et la vitesse sont toujours positifs et que l'entraînement fonctionne dans le même quadrant (1<sup>er</sup> quadrant), aucun jeu ne peut se produire entre les pignons et la couronne.

### À suivre...

Les fonctions développées par ABB apportent une valeur ajoutée considérable aux broyeurs en termes de rendement et de maintenance. Ce système d'entraînement est également disponible pour les entraînements de broyeurs à deux pignons (deux moteurs sont accouplés mécaniquement par l'intermédiaire de la couronne et assurent ensemble la rotation du broyeur). Cette configuration impose une répartition précise de la charge. Dans un second article, nous démontrerons, au moyen de mesures, la précision exceptionnelle d'un système d'entraînement à deux pignons de 5 MW.

Marco Ruffli

Maarten van de Vijfeijken

ABB Switzerland Ltd.

Baden-Dättwil (Suisse)

marco.ruffli@ch.abb.com

maarten.vijfeijken@ch.abb.com

### Lectures complémentaires

- [1] Ravani von Ow, T., Bomvisinho, L., « Use of the latest technology to overcome the demands of mill operation », *42nd Annual Canadian, Mineral processors Operators Conference, Ottawa (Canada)*, 2010.
- [2] Ravani von Ow, T., Gerhard, B., « Ring-gear mills operated with frequency converter (much more than just variable speed) », *SME annual meeting, Phoenix (Arizona, États-Unis)*, 2010.

### Photo p. 29

Les variateurs de fréquence MT ABB de dernière génération sont utilisés au sein du concentrateur de minerai de cuivre de la mine suédoise Aitik de Boliden.

Les fonctions développées par ABB apportent une valeur ajoutée considérable aux broyeurs en termes de rendement et de maintenance.

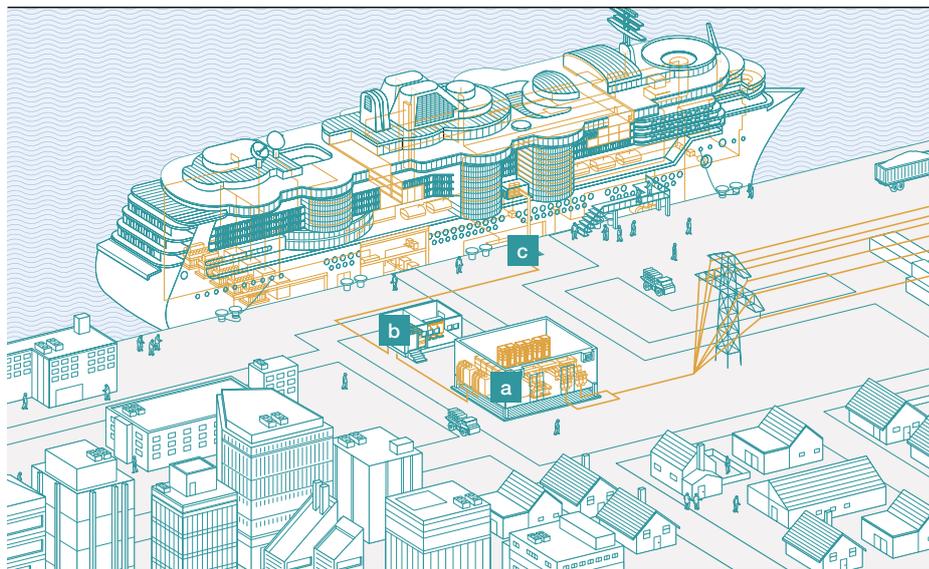
Les fonctions développées spécialement par ABB pour les broyeurs visent non seulement à les protéger de la chute des charges solidifiées, mais également à éliminer ces dernières. La fonction brevetée d'élimination des charges solidifiées disponible dans le contrôleur peut uniquement être activée en mode manuel, à partir du pupitre opérateur local ou du système de



# Manœuvres d'appareillage

Technologies et normalisation de l'alimentation électrique des navires à quai

LUTZ THURM, ISMIR FAZLAGIC, THORSTEN HARDER, KNUT MARQUART – L'empreinte écologique des zones portuaires est dans le collimateur des pouvoirs publics, des autorités portuaires et des armateurs. Plusieurs solutions sont actuellement explorées pour réduire les émissions polluantes des navires durant leur escale. L'une d'elles, le courant quai<sup>1</sup>, consiste à raccorder les navires au réseau électrique terrestre pour alimenter les équipements de bord utilisés par les équipages et les passagers, et assurer le chargement/déchargement des marchandises. Alors que sa normalisation est imminente, cette solution va sans nul doute prendre son essor et aider l'industrie portuaire et maritime à réduire ses rejets polluants.



1a Transformateur et appareillage

1b Convertisseur

1c Prise de quai

Le courant quai ne manque pas d'attraits → 1. L'écobilan de l'électricité produite par les centrales terrestres comparé à celui des moteurs Diesel marins fonctionnant aux soutes est un des atouts majeurs de cette technologie. Pour les autorités de réglementation, le courant quai permet de résoudre une problématique locale (pollution) par une solution locale. En outre, le branchement des navires au réseau terrestre contribue à renforcer et à stabiliser l'alimentation électrique du port lui-même. Les investissements d'infrastructures ont une durée de vie de plusieurs décennies et génèrent des recettes sur le long terme. Pour les riverains, la solution a l'avantage supplémentaire de réduire les nuisances sonores et les vibrations. Enfin, la mise en place d'un cadre normatif crée un environnement propice aux investissements.

### Équipements de quai

La technologie pour alimenter en électricité les navires en escale existe. En effet, les ingénieurs peuvent partir d'un matériel éprouvé pour développer une infrastructure fiable de courant quai. Pour autant, la manipulation et le branchement des câbles exigent une attention particulière en raison des dangers de l'électricité pour le personnel. Le coût des équipements varie grandement selon les

besoins du port et les puissances à fournir. Des investissements supplémentaires sont à prévoir pour la construction et l'installation des infrastructures de quai et l'éventuel renforcement du réseau électrique du port.

La consommation électrique d'un port équivaut généralement à celle d'une petite usine ; parmi les gros postes, citons les équipements de chargement/déchargement (grues, convoyeurs et portiques, entre autres), le chauffage, la climatisation, etc. La plupart des ports dispose de suffisamment de puissance électrique pour alimenter ces consommateurs, avec 2 ou 3 MW supplémentaires pour leurs besoins secondaires. Or certains navires pouvant absorber jusqu'à 10 MW pendant leur escale, de nombreux ports se verront obliger de renforcer considérablement leurs infrastructures électriques s'ils veulent accueillir et alimenter plusieurs navires à quai. Cela suppose d'investir dans un nouveau poste électrique ou d'installer une nouvelle ligne de puissance supérieure, deux cas de figure qui doivent être négociés avec le fournisseur d'électricité du port.

Les solutions de courant quai englobent souvent tous les maillons de la chaîne de

distribution électrique à partir du poste d'alimentation, y compris les transformateurs et les convertisseurs de fréquence pour adapter la tension et la fréquence du réseau terrestre au réseau de bord. Plusieurs navires peuvent ainsi être raccordés simultanément et alimentés en 50 ou 60 Hz, quelle que soit la fréquence réseau. Enfin, les solutions de courant quai regroupent également les câbles de raccordement et les bornes à quai.

La consommation électrique d'un port équivaut à celle d'une petite usine ; les gros postes incluent les équipements de chargement/déchargement.

Pour chaque branchement d'un navire, le port ou le terminal doit disposer d'un transformateur dédié qui remplit une double fonction : d'une part, l'isolation galvanique entre deux circuits, évitant qu'un défaut à la terre dans le réseau du navire ne menace le réseau du port et vice versa ; d'autre part, l'abaissement du niveau de tension optimisé pour la distribution (20 kV, par exemple) au niveau standard des navires, à savoir 11 ou 6,6 kV.

#### Note

- 1 Aussi appelé « branchement ou connexion quai à bord », « connexion électrique des navires à quai » et « branchement direct à quai ».



a Convertisseur de fréquence statique ABB PCS100



b Convertisseur de fréquence statique ABB PCS6000

Chaque poste de branchement à quai nécessite également un appareillage moyenne tension (MT) muni d'un interrupteur de mise à la terre automatisé. Fondamentalement, le premier sectionne l'alimentation électrique alors que le second garantit l'absence totale de courant dans les câbles pendant leur manipulation et leur branchement. Sachant que, pour le personnel, la manipulation des câbles et des équipements électriques représente le principal danger, cet appareillage MT joue un rôle fondamental.

La plupart des branchements de courant quai nécessite un convertisseur de fré-

tallent dans un poste électrique ou un conteneur avec l'appareillage électrique et les transformateurs compacts. En améliorant le facteur de puissance et en stabilisant la tension et la fréquence, ils contribuent à la qualité globale de l'alimentation du port. Selon les spécificités de chaque projet, on utilisera des convertisseurs basse tension PCS100 ou moyenne tension PCS6000.

Dernier équipement indispensable à la solution courant quai: un système de communication et d'automatisation qui permet au personnel de coordonner le branchement des câbles et de synchroniser la charge électrique du navire avec le réseau terrestre. Deux postes locaux de téléconduite, l'un à bord, l'autre à quai, communiquant sur liaison optique Ethernet, assurent cette tâche.

Dans un port, l'espace est limité. Le poste électrique peut sans problème être installé très loin (10 km maxi) du petit poste de quai qui abrite le transformateur, l'appareillage MT et son interrupteur de mise à la terre automatisé, les équipements de protection et de contrôle-commande, et l'interface opérateur. Ce poste compact a l'avantage majeur de ne pas entraver les activités portuaires et de pouvoir être déplacé.

### Équipements de bord

Pour être alimentés en courant quai, les navires doivent intégrer un équipement spécial de connexion au réseau terrestre, de synchronisation lors du basculement de source et de raccordement au réseau auxiliaire de bord. Cet équipement est soit installé d'origine, soit ajouté ultérieurement. L'installation ultérieure est sûre et relativement rapide ; elle peut se faire sur le navire en exploitation ou en cale sèche, sans arrêt important des activités.

Les câbles de raccordement au quai → 4 sont un composant clé du système. Certains navires, en particulier les porte-conteneurs et les navires rouliers, embarquent directement les câbles qui sont descendus sur le quai par un enrouleur ou un tambour → 5. Dans le cas des navires de croisière, le câble est toujours à quai et remonté sur le navire par un petit bras hydraulique.

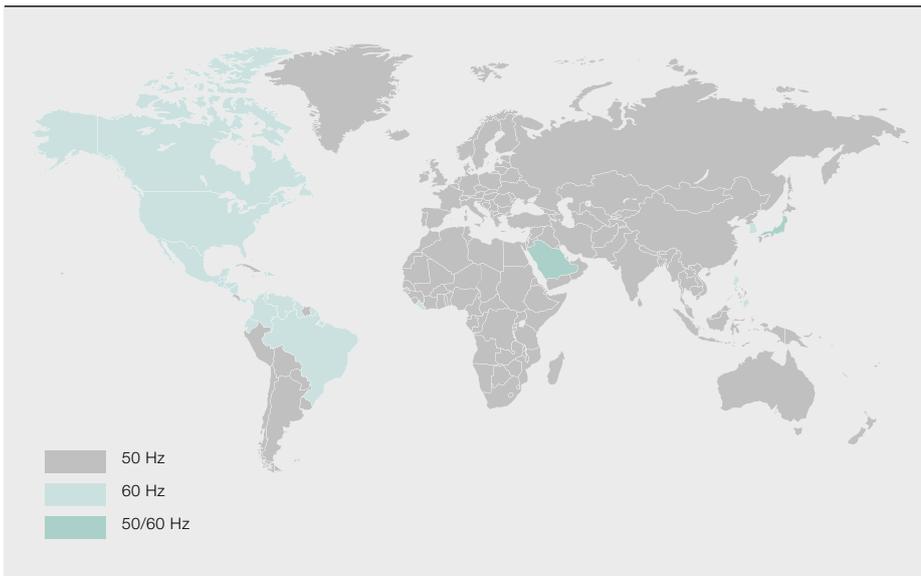
Lorsque le système de manipulation des câbles est à quai, le branchement côté navire s'effectue sur un tableau de raccordement → 6. Généralement placé à proximité de la coque pour faciliter le branchement des lourds câbles électriques, ce tableau comporte un disjoncteur, un relais de protection, les prises et le câble de mise à la terre ainsi qu'une interface de contrôle-commande avec le système d'automatisation intégré du navire ou le système de gestion d'énergie. Ces équipements permettent de synchroniser le courant électrique avec les

---

## Beaucoup de navires aujourd'hui équipés pour le courant quai ne le sont pas d'origine, les infrastructures ayant été ajoutées par la suite.

quence statique → 2 car les navires sont alimentés dans leur majorité en 60 Hz alors que de nombreux ports dans le monde fonctionnent en 50 Hz → 3. Ces convertisseurs constituent une solution économique pour raccorder les navires aux réseaux terrestres, indépendamment de leur fréquence. Selon l'agencement du port, un seul convertisseur peut servir à plusieurs navires et mouillages. Peu encombrants, les convertisseurs s'ins-

### 3 Fréquence des réseaux électriques dans le monde. Pour abolir ces différences, les technologies de courant quai font appel à des convertisseurs de fréquence.



moteurs Diesel auxiliaires avant le basculement de source. Les tableaux ABB comprennent deux armoires dont les dimensions varient selon la puissance nominale. Ces équipements MT doivent être installés dans une salle à part.

Sur les navires à propulsion mécanique traditionnelle (où les moteurs Diesel entraînent directement les hélices, contrairement à la propulsion Diesel électrique), il faut un transformateur pour abaisser la tension du réseau terrestre (11 ou 6,6 kV) au niveau de la tension du réseau auxiliaire BT (400 à 690 V). Contrairement au tableau de raccordement, ce transformateur relativement lourd et encombrant a l'avantage de pouvoir être installé dans la salle des machines ou à tout autre emplacement adapté à bord du navire.

Il faut entre 5 et 30 minutes pour brancher ou débrancher un navire du réseau terrestre. À bord, l'ingénieur en chef ou une personne formée et connaissant bien le système de gestion d'énergie du navire réalise le basculement de source. La manipulation des câbles peut être confiée au personnel de bord ou de quai rodé aux équipements MT. Au moins une entreprise se consacre à la mise au point d'un système automatique de raccordement des câbles au navire pour sécuriser et accélérer cette opération.

Actuellement, si la majorité des navires équipés pour le courant quai sont des porte-conteneurs, de nombreux concep-

teurs de navires intègrent d'office les équipements ou prévoient l'espace à bord pour leur ajout ultérieur. Beaucoup de navires aujourd'hui équipés ne le sont pas d'origine, les infrastructures ayant été ajoutées par la suite.

Si la technologie de courant quai utilise peu d'équipements innovants, tout système installé réclame néanmoins généralement une étude au cas par cas. Même si les éléments qui le composent sont standardisés, chaque navire est différent et les problèmes d'encombrement, d'accessibilité, d'interfaçage avec le système de gestion d'énergie et les moteurs Diesel doivent être soigneusement jaugés et analysés en amont. ABB a mis au point des solutions clés en main qui englobent l'ensemble de la fourniture et dont l'installation demande une interruption minimale des activités du navire.

#### Normalisation

Les solutions de branchement direct à quai ne présentent un intérêt que si elles s'inscrivent dans un cadre normatif. Aucun opérateur portuaire ni armateur ne consentira à faire de lourds investissements sans avoir la garantie que le système sera opérationnel dans un grand nombre de régions du monde et pendant une période donnée.

Les premiers travaux de normalisation remontent au début 2005. Les principales contributions sont venues des fournisseurs de solutions technologiques,

### 4 Câbles de raccordement au navire MS Oosterdam (classe Vista) de la compagnie Holland America Line



La CEI, l'ISO et l'IEEE ont uni leurs forces pour élaborer une norme de portée mondiale.



des pouvoirs publics, des autorités portuaires, des compagnies maritimes (en particulier des exploitants de navires de croisière, pétroliers et porte-conteneurs), de sociétés de classification, etc. La CEI, l'ISO et l'IEEE<sup>2</sup> ont uni leurs forces pour élaborer une norme de portée véritablement mondiale.

Cette norme qui fixe les exigences de spécification, d'installation et d'essai des

## Pour les autorités de réglementation, le courant quai permet de résoudre une problématique locale (pollution) par une solution locale.

réseaux et centrales électriques à quai, aborde les éléments suivants :

- Réseau de distribution terrestre ;
- Connexion quai à bord ;
- Transformateurs/bobines d'inductance ;
- Convertisseurs statiques et tournants ;
- Réseaux électriques de bord ;

### Note

- 2 Commission électrotechnique internationale (cf. encadré 3, p. 54)  
Organisation internationale de Normalisation  
*Institute of Electrical and Electronics Engineers*



- Systèmes de contrôle-commande, de surveillance, d'interverrouillage et de gestion d'énergie.

Ce travail de normalisation a pour but de définir des exigences qui, « avec la mise en œuvre de pratiques adaptées, favorisent le raccordement rapide des navires et réseaux terrestres HT conformes à ces exigences au moyen d'une connexion quai à bord compatible » [1]. La norme devrait dispenser les opérateurs portuaires et les armateurs d'adapter ou de modifier leurs infrastructures pour permettre le branchement quai à bord.

L'objectif initial de créer une seule et unique norme internationale, pour tous les navires et tous les ports, a dû être abandonné, tant les navires diffèrent en termes de capacités et de besoins énergétiques. Ce sont donc quatre normes différentes mais connexes qui ont été élaborées pour les navires rouliers, les porte-conteneurs, les navires de croisière et les pétroliers. En outre, deux niveaux de tension normalisés principaux ont été fixés pour le branchement : 11 kV et 6,6 kV.

L'adoption d'une norme internationale constitue une incitation forte pour les armateurs et les opérateurs portuaires à investir dans le courant quai. La version finale de la norme est en passe d'être ratifiée.

### Lutz Thurm

ABB ship solutions  
lutz.thurm@us.abb.com

### Ismir Fazlagic

ABB shore solutions  
ismir.fazlagic@se.abb.com

### Thorsten Harder

ABB frequency converters  
thorsten.harder@ch.abb.com

### Knut Marquart

ABB Marketing and Customer Solutions  
knut.marquart@ch.abb.com

### Lectures complémentaires

- Marquart, K., Haasdijk, T., Ferrari, GB, Schmidhalter, R., « Branchement électrique des navires à quai : une solution clé en main d'ABB pour réduire les émissions polluantes dans les ports », *Revue ABB*, 4/2010, p. 56–60.
- [www.abb.com/ports](http://www.abb.com/ports)

### Bibliographie

- [1] IEC/PAS 60092-510, *Installations électriques à bord des navires – Partie 510 : caractéristiques spéciales – High-voltage shore connection systems* [Alimentation électrique haute tension des navires à quai], édition 1.0 (en anglais), avril 2009, [http://webstore.iec.ch/preview/info\\_iecpas60092-510%7Bed1.0%7Den.pdf](http://webstore.iec.ch/preview/info_iecpas60092-510%7Bed1.0%7Den.pdf) (en ligne), consulté le 20 septembre 2010.

### Photo p. 36

Équipé pour le courant quai, le navire de croisière MS Zuiderdam de la compagnie Holland America Line contribue à améliorer la qualité de vie à proximité des ports.



# Reçu cinq sur cinq

Le convertisseur cinq niveaux de tension ANPC-5L et le variateur ACS 2000 sont sur la même longueur d'onde

FREDERICK KIEFERNDORF, MICHAEL BASLER, LEONARDO SERPA, JAN-HENNING FABIAN, ANTONIO COCCIA, GERALD SCHEUER – L'électronique de puissance moderne révolutionne la fourniture et l'usage de l'énergie électrique. Dans le domaine des variateurs, la possibilité de sélectionner de manière arbitraire et de faire varier en continu l'amplitude et la fréquence de sortie d'un onduleur a beaucoup fait progresser le rendement et la précision de commande. Un onduleur utilise des semi-conducteurs pour produire une tension alternative en commutant entre différents niveaux de tension continue à une fréquence élevée. La forme

d'onde ainsi créée diffère d'une sinusoïde pure du fait de ce schéma de commutation rectangulaire. La différence peut être suffisamment importante pour bannir les variateurs de nombreuses applications nécessitant une onde alternative de meilleure « qualité ». Pour tirer profit du rendement avantageux des variateurs dans un éventail élargi d'applications, on peut augmenter le nombre de niveaux de tension de sortie. Avec ses cinq niveaux, le variateur ACS 2000 d'ABB se démarque nettement des configurations à trois niveaux sans pour autant accroître sa complexité structurelle, grâce à une topologie ingénieuse.

breux moteurs standard disponibles sur catalogue) ou renoncer à installer des convertisseurs dans des applications existantes. Autant d'arguments qui plaident en faveur de convertisseurs capables de produire une onde très proche de la sinusoïdale pure !

### Niveaux de tension

L'onduleur le plus simple est un convertisseur à deux niveaux de tension, appelé ainsi car il ne peut appliquer que deux valeurs de tension : la tension d'alimentation continue et l'inverse de cette tension.

Le convertisseur à trois niveaux et clampé par le neutre NPC (*Neutral-Point Clamped*), qui découle de ce concept, peut en plus appliquer la tension neutre → 1a et produire les séquences de commutation du type illustré en → 1c.

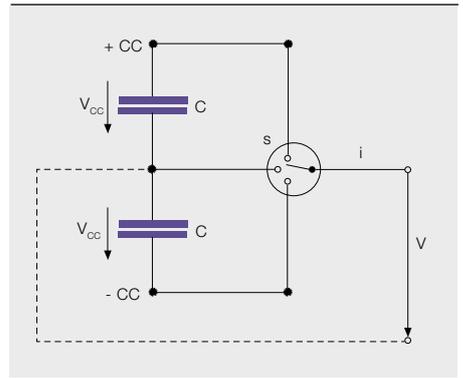
En poursuivant dans cette voie, des convertisseurs capables de produire cinq niveaux de tension ont été conçus, au prix toutefois d'une complexité beaucoup plus grande. En effet, une topologie cinq niveaux nécessite, en général, des condensateurs et des diodes supplémentaires avec leurs circuits de commande et de charge. Autre solution : raccorder des convertisseurs en série. Or, dans ce cas également, la structure du circuit en tension CC se complexifie du fait d'une séparation galvanique obligatoire entre les tensions d'alimentation et, donc, du recours à de coûteux transformateurs. Si cela peut s'envisager dans les puissances élevées, les variateurs fonctionnant dans le bas de la fourchette des moyennes tensions nécessitent des solutions plus simples.

ABB s'est attelé au problème et a élaboré une solution apte à produire cinq niveaux de tension avec un circuit CC qui n'est pas plus complexe. Une alimentation CC à trois niveaux ne peut à elle seule fournir cinq niveaux de tension ; le circuit exige donc un condensateur supplémentaire par phase de sortie. L'ingéniosité de la solution ABB réside dans le condensateur qui reste chargé sans circuit de charge dédié.

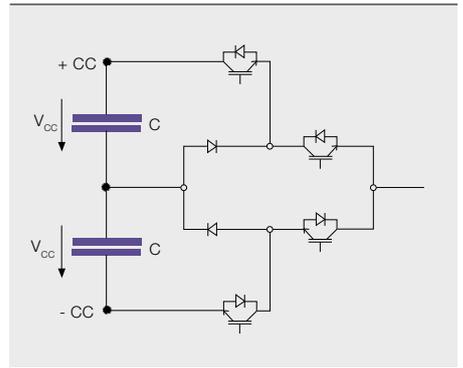
### Convertisseur ANPC-5L

La structure de base du convertisseur ANPC-5L (*Active Neutral Point Clamped Five Level*) figure en → 2a. Le condensateur de phase  $C_{ph}$  est maintenu chargé à la moitié de la tension des condensateurs du bus CC (soit un quart de la tension totale de ce dernier). Globalement, le

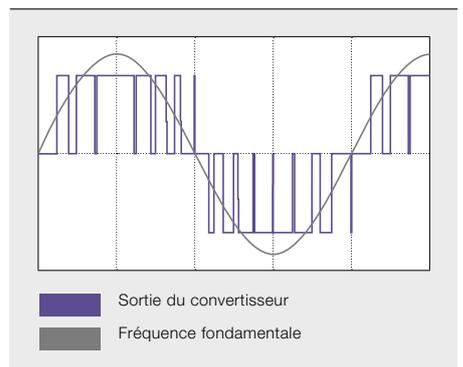
## 1 Structure de base du NPC (une seule phase représentée)



1a Schéma de principe



1b Circuit



1c Forme d'onde de tension (échantillon)

Un onduleur convertit une tension continue en tension alternative en commutant entre différents niveaux de tension continue. Par conséquent, sa sortie n'est pas une onde de forme sinusoïdale, mais une série de créneaux rectangulaires haute fréquence dont la forme doit se rapprocher le plus possible de la sinusoïde → 1c. Par analogie, prenons une photo numérique basse résolution. L'image est floue parce que la taille des pixels limite son niveau de détail. De la même manière, la capacité à créer une onde sinusoïdale pure avec des impulsions rectangulaires est limitée par le nombre de niveaux de tension disponible. À la différence de la photo, le problème n'est pas uniquement d'ordre esthétique. En effet, une onde sinusoïdale imparfaite engendre des harmoniques (de courant et de tension aux plus hautes fréquences) aux effets néfastes : dégradation de l'isolant et des roulements des moteurs, et perturbations d'autres équipements. Des filtres anti-harmoniques peuvent certes être utilisés pour lisser l'onde de sortie en absorbant les harmoniques problématiques, mais ils représentent un surcoût et engendrent des pertes supplémentaires. En présence d'harmoniques, l'utilisateur a donc deux solutions : s'équiper de moteurs conçus pour résister aux contraintes supplémentaires (ce qui exclut de nom-

Le convertisseur cinq niveaux ne nécessite qu'un seul condensateur par phase supplémentaire, comparé à un convertisseur NPC trois niveaux.

circuit s'apparente à un convertisseur NPC trois niveaux avec un condensateur supplémentaire. Ce condensateur de phase est commuté en série avec le convertisseur trois niveaux selon les besoins et fournit deux niveaux de sortie intermédiaires supplémentaires.

L'alimentation CC est identique à celle d'un convertisseur NPC trois niveaux : la topologie de la cellule de commutation 1 en → 2b est similaire à celle d'un convertisseur NPC trois niveaux → 1b avec des transistors bipolaires à grille isolée IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) calibrés à la moitié de la tension du bus CC. Le condensateur supplémentaire étant chargé au quart de la tension du bus CC, les IGBT des cellules 2 et 3 sont calibrés pour cette tension réduite, contribuant à la simplicité du circuit. Celle-ci est encore plus manifeste lorsque l'on sait que le convertisseur cinq niveaux ne nécessite qu'un seul condensateur par phase supplémentaire comparé à un convertisseur NPC trois niveaux. Qui plus est, il fonctionne dans les quatre quadrants (conversion bidirectionnelle de la tension).

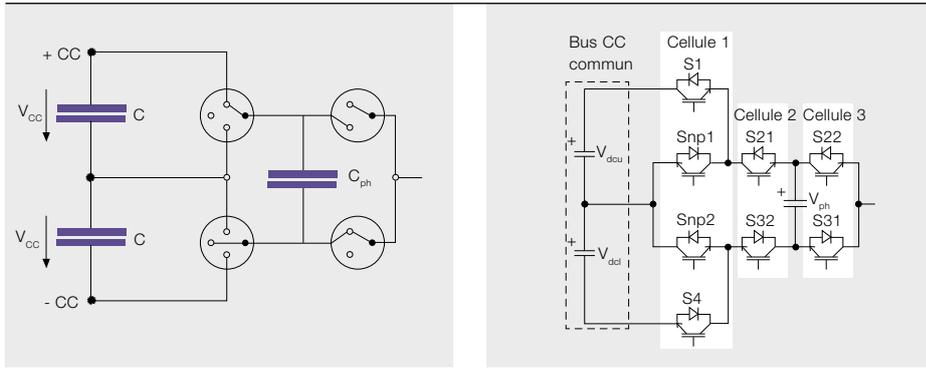
### Fonctionnement du ANPC-5L

Les composants IGBT de la cellule 1 (→ 2b) sont complémentaires, S1 et Snp2 fonctionnant ensemble (de même que S4 et Snp1). Les composants de la cellule 2 fonctionnent en opposition tout comme ceux de la cellule 3. Le nombre total d'états de commutation par phase (8) figure au tableau → 3. Le convertisseur ne possédant que cinq niveaux de tension de sortie, certains états sont redondants. Cela ne signifie toutefois pas qu'ils ne sont jamais utilisés ; en effet, l'examen du tableau révèle que pour deux des trois couples d'états redondants (V1/V2 et V5/V6), des effets opposés peuvent être obtenus sur la charge du condensateur de phase. La figure → 4 compare V5 et V6, et montre comment V6 soustrait  $V_{CC}/2$  de la tension du bus CC alors que V5 l'ajoute à la tension neutre. Dès lors, le courant qui parcourt le condensateur de phase circule dans le sens opposé. Cette particularité peut être utilisée pour maintenir la tension requise dans le condensateur de phase sans circuit de charge supplémentaire.

### Variateur ACS 2000

L'ACS 2000 utilise deux convertisseurs cinq niveaux adossés. Sa configuration de base est illustrée en → 5.

## 2 Structure de base de l'ANPC-5L (une seule phase représentée)



2a Schéma de principe

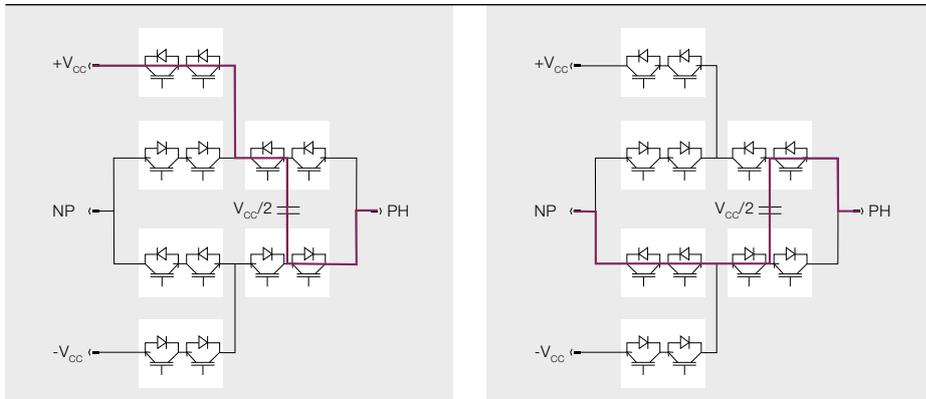
2b Circuit

Le condensateur de phase  $C_{ph}$  est maintenu chargé à la moitié de la tension des condensateurs du bus CC.

## 3 États du convertisseur ANPC-5L

Cellule 3				Cellule 2		Cellule 1		Niveau de sortie	Tension de sortie de phase	Effet sur $C_{ph}$		Effet sur $V_{np}$		Vecteur de commutation
S4	Snp2	Snp1	S1	S32	S21	S31	S22			$i > 0$	$i < 0$	$i > 0$	$i < 0$	
1	0	1	0	1	0	1	0	-2	-V	0	0	0	0	V0
1	0	1	0	1	0	0	1	-1	-V/2	-	+	0	0	V1
1	0	1	0	0	1	1	0	-1	-V/2	+	-	-	+	V2
1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	-	+	V3
0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	-	+	V4
0	1	0	1	1	0	0	1	+1	V/2	-	+	-	+	V5
0	1	0	1	0	1	1	0	+1	V/2	+	-	0	0	V6
0	1	0	1	0	1	0	1	+2	V	0	0	0	0	V7

## 4 Deux parcours des courants différents pour produire la même tension de sortie

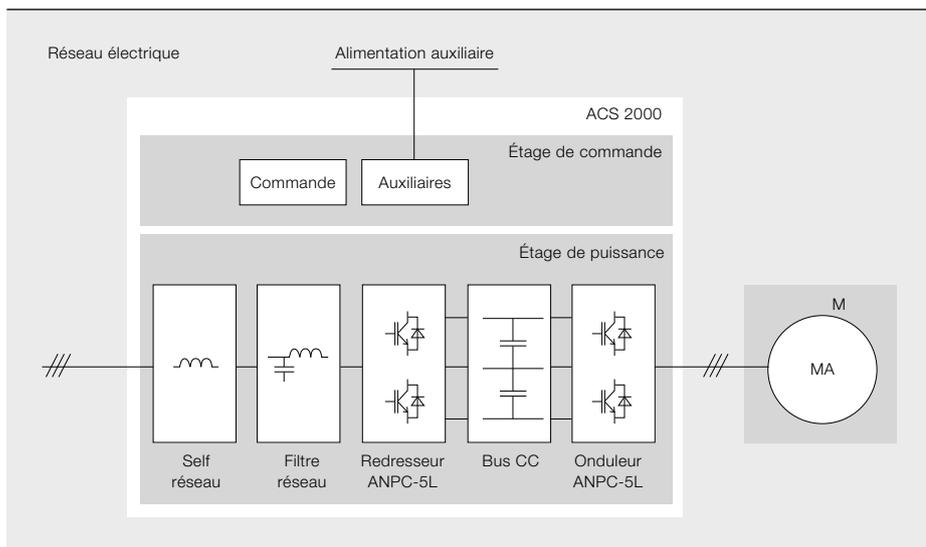


4a État de V6 → 3

4b État de V5 → 3

Le sens inverse du courant en  $C_{ph}$  permet de maintenir la charge de ce condensateur.

## 5 Configuration de base de l'ACS 2000



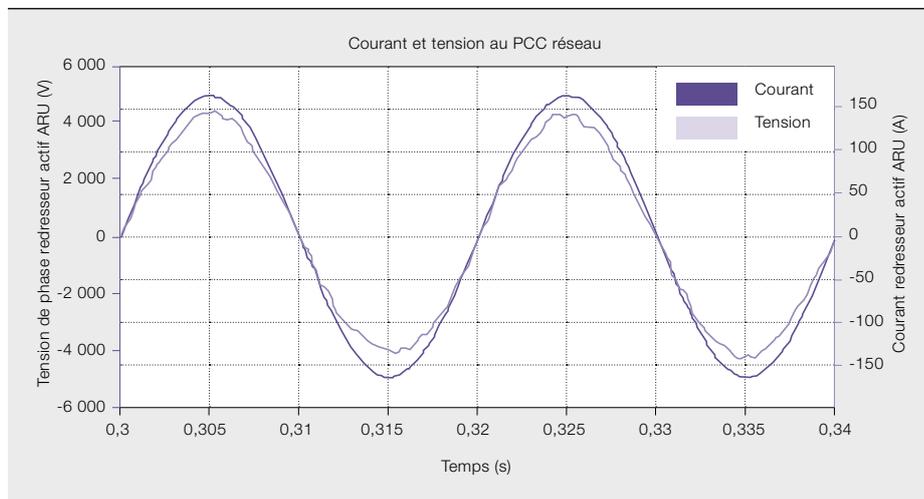
## 6 Variateur ACS 2000 de 800 kW/6 kV sans transformateur



## 7 Module de phase de l'ACS 2000



## 8 Tension et courant d'entrée du variateur : fonctionnement au facteur de puissance unitaire



La modularité de l'ACS 2000, qui fonctionne sans transformateur, garantit une disponibilité maximale.

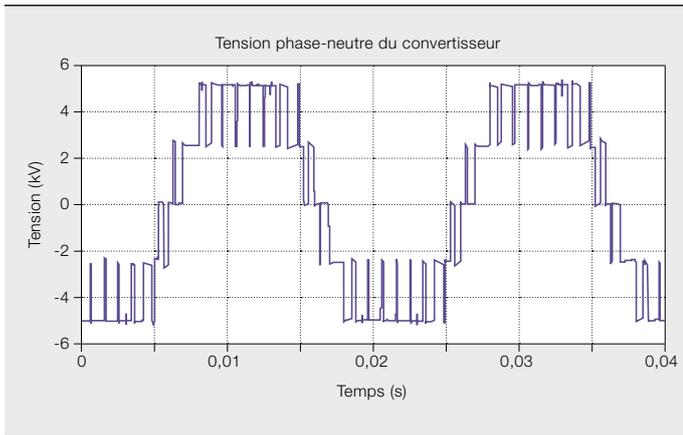
### Caractéristiques constructives

La modularité de l'ACS 2000, qui fonctionne sans transformateur → 6, garantit une disponibilité maximale. Les éléments constitutifs sont dimensionnés pour une durée de vie attendue, avec les composants critiques facilement accessibles en face avant. Les modules de phase logés dans des tiroirs autorisent un remplacement sûr et rapide en cas de défaillance. Au cœur de cette structure se trouve le module de phase → 7 avec les principaux composants d'un bras de phase du convertisseur (comme illustré en → 2b), notamment les semi-conducteurs de puissance, la commande de gâchette et le condensateur de phase. Le module comporte également une carte d'interface avec le système de contrôle-commande de rang supérieur de même que les capteurs de mesure du courant et de la tension. Les interconnexions sont ainsi simplifiées car seuls un raccordement de puissance et

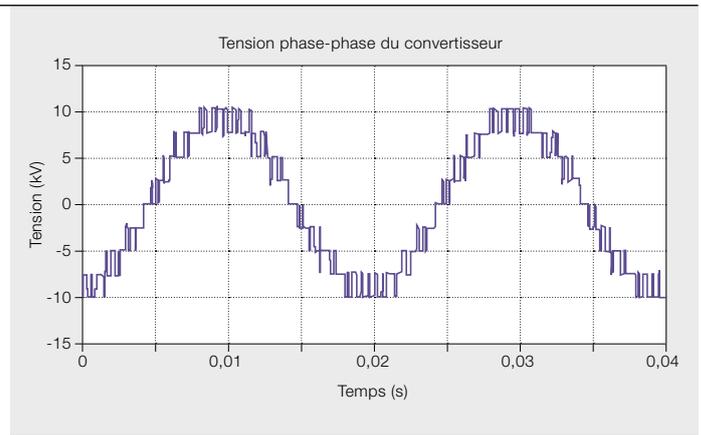
une liaison à fibre optique sont nécessaires. Les connexions de courant sont réalisées au moyen de fiches de contact. Grâce à cette simplicité, quelques minutes suffisent à l'utilisateur pour remplacer un module.

### Essais

L'ACS 2000 a été testé en configuration adossée. Deux variateurs furent installés – l'appareil testé et un onduleur en charge –, raccordés en un point unique du réseau électrique triphasé et branchés sur leur moteur respectif (accouplés à un même arbre). Avantage de cette configuration : seules les pertes dans le système d'entraînement doivent être compensées par l'alimentation. S'agissant de deux variateurs ACS 2000, il fut possible d'observer simultanément le fonctionnement en mode moteur et en mode freinage régénératif. Des essais prolongés sur la configuration adossée furent également menés pour valider le niveau élevé de fiabilité des variateurs.



9a Forme d'onde 5 niveaux (tension phase-neutre)



9b Forme d'onde 9 niveaux (tension phase-phase)

### Performances côté réseau et côté moteur

Les performances du redresseur sont illustrées en → 8. L'onduleur cinq niveaux fournit au moteur neuf niveaux de tension entre phases. Les formes d'onde types de tension et de courant figurent en → 9. Le nouvel onduleur cinq niveaux produit avec satisfaction une tension proche de l'onde sinusoïdale pure qui permet d'entraîner, sans aucun déclassement, des moteurs conçus pour un démarrage direct sur le réseau.

### Immunité aux perturbations du réseau

La topologie multiniveaux de l'ANPC-5L combinée à la dynamique élevée de la commande DTC peut empêcher le varia-

faire, l'énergie de la masse en rotation du moteur et de la charge est renvoyée par l'onduleur afin de compenser les pertes et maintenir la tension du bus CC. Ce mode de fonctionnement peut perdurer tant que la masse en rotation dispose de suffisamment d'énergie pour satisfaire ces besoins. Dès que la tension réseau est rétablie, la machine peut immédiatement accélérer jusqu'à la vitesse désirée.

Des mesures réalisées sur l'installation d'un client lors d'une perte réseau d'une seconde sont reprises en → 10. Le graphique → 10a montre la chute du courant et de la tension réseau à une valeur nulle alors que le graphique → 10c illustre l'inversion du couple moteur pendant la perturbation pour maintenir la tension du bus CC → 10b. Après rétablissement de la tension réseau, le couple repasse rapidement en mode moteur.

### Domaines d'application

L'ACS 2000 est un variateur polyvalent qui trouve sa place dans des secteurs

d'activités très variés pour la commande de nombreuses machines → 11.

### Un variateur champion

En décembre 2010, le cabinet-conseil Frost and Sullivan décernait à ABB le Prix 2010 *European Medium Voltage Drives New Product Innovation* pour son variateur ACS 2000, soulignant les nombreux avantages du produit : souplesse de raccordement au réseau, faible pollution harmonique, consommation énergétique

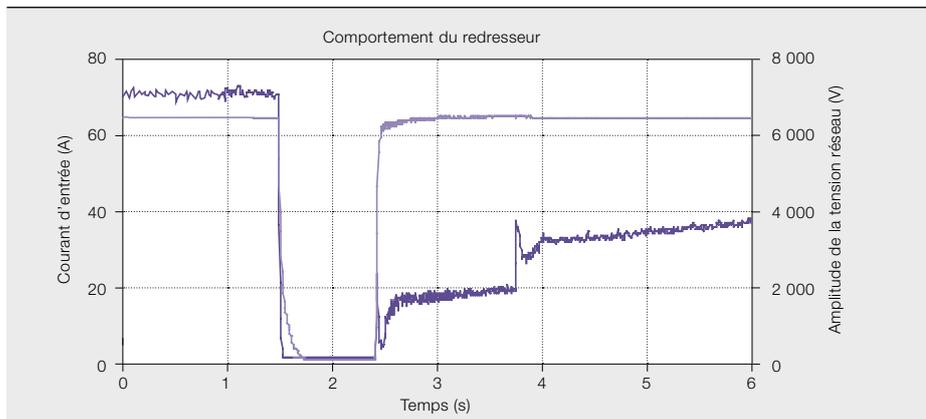
Le nouvel onduleur cinq niveaux produit une tension qui permet d'entraîner, sans aucun déclassement, des moteurs conçus pour un démarrage direct sur le réseau.

La topologie multiniveaux de l'ANPC-5L combinée à la dynamique élevée de la commande DTC peut empêcher le variateur de déclencher même en cas de perte réseau de plusieurs secondes.

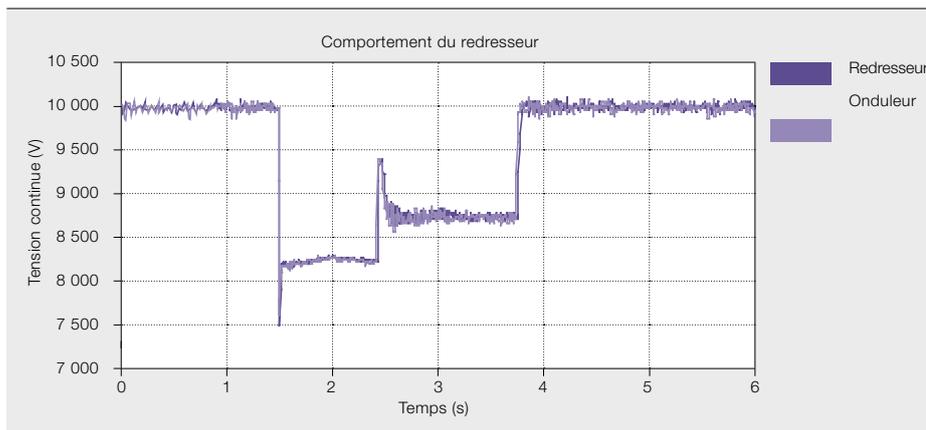
teur de déclencher même en cas de coupure réseau de plusieurs secondes. Il peut également continuer de fonctionner en cas de défaut de certaines alimentations auxiliaires pendant une durée limitée. La durée maximale d'immunité à une perte réseau dépend de la charge, de la machine et du point de fonctionnement avant la perte.

Pendant une coupure réseau, la tension du bus CC reste à un niveau donné pour maintenir la machine magnétisée. Pour ce

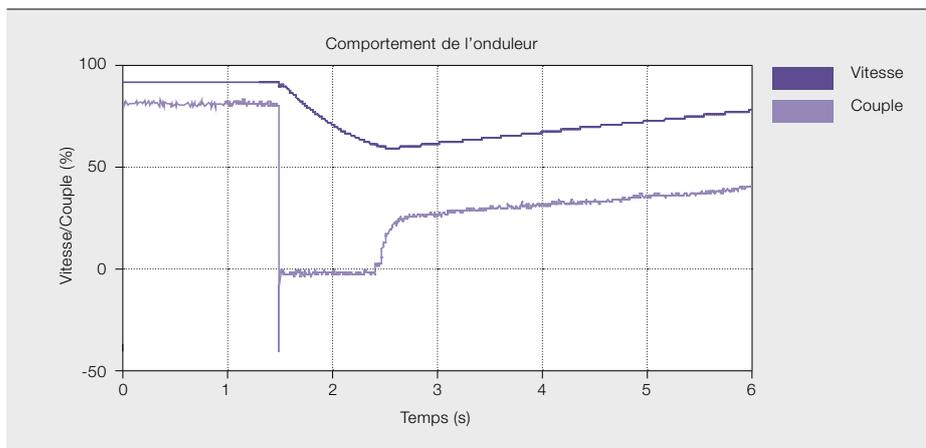
## 10 Gestion d'une coupure réseau de courte durée



### 10a Réseau



### 10b Tension du bus CC



### 10c Comportement

## 11 Marchés visés par l'ACS 2000

Secteurs d'activité	Machines
Ciment, exploitation minière et minerais	Convoyeurs, broyeurs, concasseurs, ventilateurs et pompes
Chimie, pétrole et gaz	Pompes, compresseurs, extrudeuses, mélangeurs et soufflantes
Métallurgie	Ventilateurs et pompes
Production papetière	Ventilateurs, pompes, raffineurs, pompes à vide et coupeuses
Production d'énergie	Ventilateurs, pompes, convoyeurs et broyeurs à charbon
Eau	Pompes
Autres	Bancs d'essais et souffleries

réduite, simplicité d'installation et de mise en service, fiabilité élevée et faible coût de possession. Seul variateur multiniveaux à associer un onduleur à source de tension et des composants de puissance IGBT brevetés, l'ACS 2000 fonctionne par ailleurs sans transformateur. À ce titre, il représente une innovation majeure dans le domaine des variateurs MT. Sa simplicité d'installation, de mise en service et d'exploitation constitue un véritable levier de valeur pour l'utilisateur.

**Frederick Kieferndorf**

**Leonardo Serpa**

**Jan-Henning Fabian**

**Antonio Coccia (anciennement chez ABB)**

ABB Corporate Research

Baden-Dättwil (Suisse)

frederick.kieferndorf@ch.abb.com

leonardo.serpa@ch.abb.com

jan-henning.fabian@ch.abb.com

**Michael Basler**

Power Electronics and Medium Voltage Drives

New Berlin (Wisconsin, États-Unis)

michael.basler@us.abb.com

**Gerald Scheuer**

Power Electronics and Medium Voltage Drives

Turgi (Suisse)

gerald-a.scheuer@ch.abb.com

### Lecture complémentaire

La partie technique de cet article est basée sur une communication faite à un symposium à Pise (Italie), en juin 2010. Ce texte a été considérablement raccourci et nous invitons les lecteurs désirant en savoir plus à consulter la version d'origine. [1]

Les auteurs tiennent à remercier plusieurs collègues (anciens et actuels) pour leur contribution au développement de cette technologie : P. Barbosa, N. Celanovic, M. Winkelnkemper, F. Wildner, C. Haederli, P. Steimer, J. Steinke et bien d'autres.

### Bibliographie

- [1] Kieferndorf, F., Basler, M., Serpa, L. A., Fabian, J.-H., Coccia A., Scheuer, G.A., « ANPC-5L technology applied to medium voltage variable speed drives applications », *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, CD-ROM Proceedings, Pise (Italie), juin 2010.

### Photo p. 40

(Centrale électrique de Torrevaldaliga Nord en Italie)  
Les variateurs sont omniprésents au sein des sites industriels et des centrales d'énergie, pilotant des machines de toutes tailles, des petits ventilateurs aux énormes broyeurs.



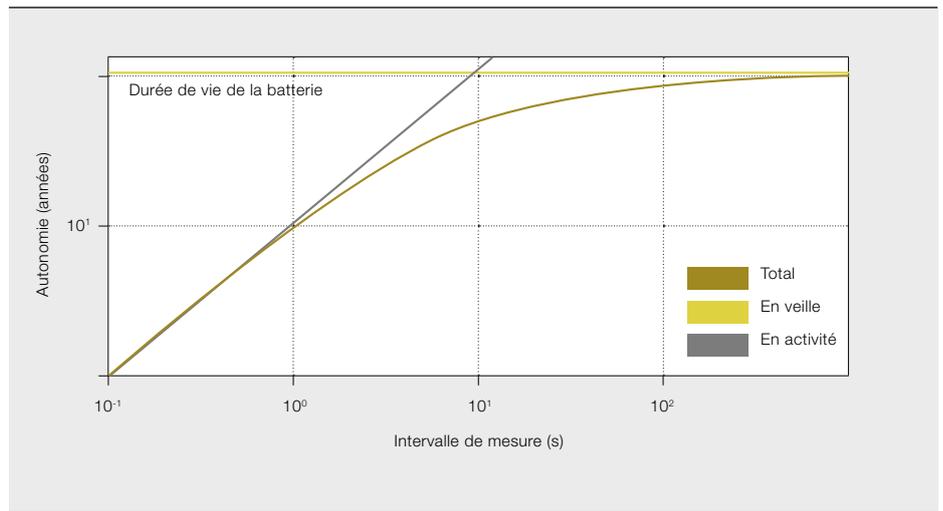
# Moisson énergétique

ou l'art de glaner l'énergie ambiante  
pour bâtir une usine totalement autonome

PHILIPP NENNINGER, MARCO ULRICH – Pour répondre aux besoins croissants de fiabilité et de réduction des temps improductifs, les industriels doivent en savoir plus sur l'état de santé de leurs actifs. Certes, les capteurs sont leur principale source d'informations mais les multiplier oblige à tirer toujours plus de câbles électriques et donc à accroître les coûts d'installation. À l'inverse, s'en affranchir aurait l'avantage de réduire ces frais et la complexité du procédé tout entier. La consommation d'un grand nombre de

capteurs industriels étant modique, le recours aux batteries est une solution toute trouvée. Reste que leur remplacement régulier menace de réduire à néant les économies procurées par l'instrumentation sans fil! Autre possibilité: récupérer l'énergie dissipée dans la nature par les mouvements, le vent et la lumière, et la stocker pour alimenter des produits électroniques à faible consommation. Cette énergie étant disponible en abondance dans l'industrie des procédés, c'est là que notre « moisson énergétique » trace son sillon.

## 1 Rapport entre l'autonomie et l'intervalle de mesure d'un capteur de température idéal



Le sans-fil a beaucoup contribué au progrès technologique de ces 15 dernières années et s'est peu à peu imposé dans le *process*, notamment pour surveiller les actifs de production.

Les usines de transformation ayant en général une durée d'exploitation d'une vingtaine d'années, il faut impérativement maximiser leur retour sur investissement durant cette période et les exploiter à leur optimum. Dans la mesure où un site n'est opérationnel que si tous ses équipements fonctionnent correctement, la fiabilité est primordiale. On y parvient en surveillant ces actifs afin d'anticiper leurs éventuels dysfonctionnements et d'en éliminer les causes. Mais pour cela, il faut obtenir davantage d'informations des capteurs. Ces données peuvent provenir soit des capteurs en place, capables de fournir les mesures requises (comme les transmetteurs de pression différentielle d'ABB utilisés pour détecter les obstructions de ligne d'impulsion), soit de capteurs supplémentaires montés en d'autres points du *process*. Dans ce dernier cas, il faut minimiser le coût d'installation de ces équipements pour maximiser les bénéfices tirés de leur emploi. Quand on sait que le câblage et l'installation peuvent représenter près de 90 % du coût total

du dispositif, on mesure l'intérêt financier et technologique de l'instrumentation sans fil.

### Technologie sans fil

Les solutions sans fil se sont invitées dans l'industrie des procédés dès les années 1960. Pourtant, elles se sont cantonnées à des applications spécifiques avec des produits « métier » comme le débitmètre électronique pour la gestion d'eau potable *AquaMaster* d'ABB et les totalisateurs de débit de l'industrie pétrogazière, dont le système d'automatisation et de télémessure *Total-flow* d'ABB.

À l'instar des bus de terrain, le déploiement des protocoles sans fil passe par un référentiel mondial ralliant tous les constructeurs. C'est le cas de Wireless-HART, premier standard international de communication sans fil industrielle au niveau des instruments de terrain.

La fiabilité des transmissions est l'une des priorités de l'automatisation des procédés. Le réseau maillé répond à cette exigence : il assure un premier niveau de redondance des connexions entre deux nœuds de capteurs en faisant passer l'information par d'autres chemins pour arriver à destination. Ce maillage augmente la tolérance aux

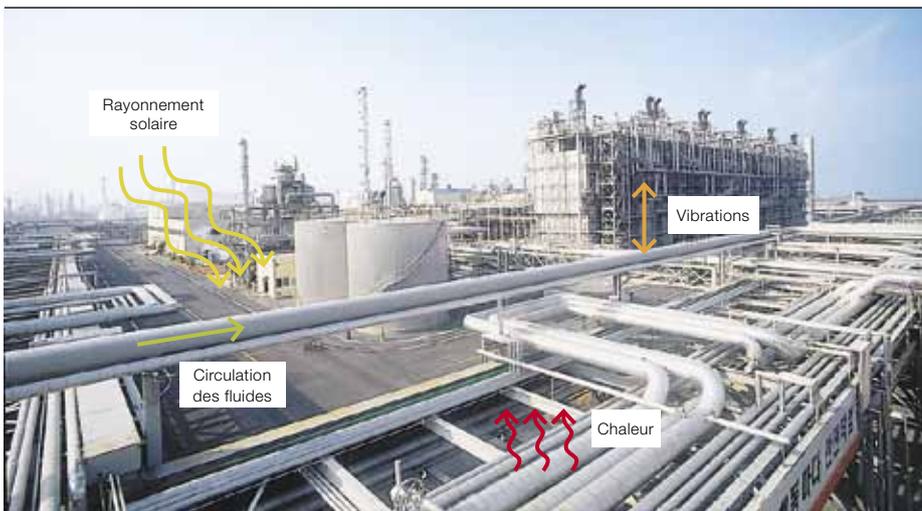
erreurs de transmission et permet à un réseau bien conçu de pallier les défaillances d'une liaison et d'un dispositif de routage. De plus, la redondance spatiale fiabilise la communication, même dans la bande de fréquences ISM (industrielle, scientifique et médicale), souvent encombrée. Rançon de l'architecture maillée, le réacheminement des messages de même que la contrainte de sécurité en continu gonflent le budget énergétique qu'il faut alors optimiser en réduisant la consommation des capteurs.

### Consommer moins pour mesurer plus

Au chapitre de la consommation électrique, il existe de grandes différences entre équipements filaires et sans fil. Prenons l'exemple du transmetteur de température industriel « câblé » TTH300 d'ABB pour illustrer ce point. Alimenté par la boucle de courant 4–20 mA, le TTH300 mesure notamment la résistance d'une sonde Pt100 4 fils (et donc

Quand on sait que le câblage et l'installation peuvent représenter près de 90 % du coût total d'un capteur, on comprend l'intérêt financier et technologique de l'instrumentation sans fil.

la température à l'extrémité du capteur) à de très courts intervalles (toutes les 100 ms, par exemple, selon le type et la



configuration de l'instrument). Comme la BC 4–20 mA fournit en permanence jusqu'à 40 mW, l'appareil est limité par cette puissance, alors que sa consommation est insignifiante.

De son côté, un capteur sans fil n'a pas besoin de mesurer la température plusieurs fois par seconde car la plupart des réseaux de capteurs de process ne gère pas de boucles de régulation rapides avec de si courts intervalles de rafraîchissement. Entre les mesures, le transmetteur se contente de relayer les messages jusqu'aux autres nœuds. Le reste du temps, l'électronique peut basculer en mode faible consommation; dispensée de tout calcul ou mesure, elle n'utilise qu'une partie de la puissance débitée.

Dans ce mode, on peut estimer la consommation de l'appareil en tenant compte de la puissance utilisée en modes actif et faible consommation, et du cycle de fonctionnement de l'appareil. Pour le capteur de température de notre exemple, ce cycle est à peu près corrélé à la fréquence de scrutation. Abstraction faite de l'autodécharge de la batterie, on obtient une estimation grossière de l'autonomie d'un appareil (idéal) → 1 alimenté par batterie.

### Opportunité énergétique

Remplacer les batteries à intervalles réguliers n'est donc pas la panacée; selon la configuration du site, cela risque même de réduire à néant les économies du sans-fil. La récupération de l'énergie dissipée dans notre environnement peut remédier à cet inconvénient pour créer

des équipements complètement autonomes. Le principe? Transformer en électricité l'énergie engendrée par l'activité et le milieu environnant → 2 pour alimenter des appareils sans fil. Cette énergie est puisée d'une multitude de sources comme les variations de température (procédés chauds et froids), le rayonnement solaire, les vibrations, la circulation des fluides ou les pièces en mouvement (énergie cinétique). Trois modes de conversion sont privilégiés: photovoltaïque, thermoélectrique et cinétique.

#### Photovoltaïque

Si le photovoltaïque a fait aujourd'hui la preuve de sa robustesse, son utilisation en intérieur est plutôt limitée. L'ensoleillement en extérieur approche certes 1 000 W/m<sup>2</sup> mais retombe en intérieur aux alentours de 1 W/m<sup>2</sup> [1]: une bien maigre «récolte» d'énergie!

#### Thermoélectricité

Les générateurs thermoélectriques utilisent des matériaux qui, soumis à un gradient thermique (différence de température entre procédés chauds ou froids et milieu ambiant), produisent une force électromotrice: c'est l'effet Seebeck<sup>1</sup> [2]. Malgré de faibles rendements de conversion (le plus souvent inférieurs à 1%), la technique a l'avantage d'être robuste et stable. De plus, l'industrie est souvent une grande dissipatrice de chaleur, notamment dans le process. L'énergie fournie par des thermogénérateurs du commerce suffit donc à maintenir en activité un grand nombre de nœuds de capteurs sans fil, dans différents contextes.



La récupération d'énergie convertit l'énergie du milieu industriel en électricité.

#### Note

- 1 Du nom du physicien allemand, Thomas Johann Seebeck, qui découvrit en 1821 qu'une différence de température entre deux métaux différents soudés ensemble produit un courant électrique.

4 Malgré sa petite taille (8 mm<sup>2</sup> seulement), ce microgénérateur thermoélectrique peut fournir des tensions de sortie élevées.



Source : Micropelt GmbH

#### Conversion cinétique

La conversion directe d'énergie mécanique (vibratoire, par exemple) en électricité obéit à différents principes :

- Les convertisseurs électromagnétiques utilisent une bobine souple qui se déplace dans le champ magnétique statique d'un petit aimant permanent, générant une tension (loi de Faraday).
- La piézoélectricité fait appel aux propriétés des matériaux piézoélectriques : le déplacement d'une masse étalon en suspension exerce une contrainte mécanique sur le matériau piézoélectrique et crée un signal électrique.
- Les transducteurs électrostatiques s'appuient sur un condensateur polarisé variable : l'application de forces mécaniques empêche l'attraction des plaques de charges opposées du condensateur, induisant une variation de capacité et un courant électrique dans le circuit fermé.

En résumé, tous les principes de conversion cinétique sont basés sur un résonateur mécanique qui fait que ces systèmes ne peuvent débiter une puissance raisonnable que si la fréquence de résonance du dispositif de récupération d'énergie correspond à la fréquence d'excitation externe. L'utilisation de variateurs de fréquence dans le procédé limite la mise en œuvre de systèmes récupérateurs d'énergie vibratoire.

#### Constitution et architecture

La récupération d'énergie peut être un processus discontinu : dans le cas des applications photovoltaïques extérieures, par exemple, l'intermittence jour-nuit

rend cette ressource énergétique instable ; dans l'usine, les arrêts de production peuvent entraîner des écarts de température du process jouant sur la quantité d'énergie fournie par les générateurs thermoélectriques ; enfin, nous l'avons vu, les variateurs de fréquence restreignent l'intérêt de la récupération d'énergie vibratoire. En contrepartie, il peut y avoir des moments où ces systèmes délivrent plus d'énergie que nécessaire.

Le profil de consommation électrique des nœuds de capteurs sans fil est lui

**ABB a développé un transmetteur de température 100 % autonome sur le principe d'une récupération d'énergie totalement intégrée.**

aussi fluctuant : le cycle de fonctionnement et la vitesse de rafraîchissement variables du capteur peuvent occasionner des pointes de charge qui doivent être mises en tampon pour pallier l'incapacité de ces systèmes à supporter de forts courants de courte durée. Chaque dispositif récupérateur d'énergie a besoin d'un stockage intermédiaire permettant de suppléer les intermittences de la fourniture électrique au nœud de capteur, à savoir :

5 Simulations numériques thermiques



Distribution de la température du procédé : 80 °C (rouge)  
Température ambiante : 25 °C (bleu)

- des supercondensateurs ou des condensateurs à couches hybrides spéciaux, qui tolèrent de forts courants de crête ;
- des cellules secondaires rechargeables ;
- des cellules primaires traditionnelles qui, à défaut de stocker le surplus d'énergie du système récupérateur, peuvent prendre ponctuellement le relais de l'alimentation des capteurs ;
- des cellules primaires industrielles classiques dont la grande longévité et la faible autodécharge font une solution de substitution très fiable.

Les cellules secondaires classiques au lithium-ion souffrent d'un nombre limité de cycles de décharge/charge.

La récupération d'énergie doit s'accompagner d'une gestion de l'énergie idoine pour garantir une alimentation 100 % autonome. Deux objectifs sont visés :

- Adapter les caractéristiques de tension et de courant de sortie du système récupérateur aux exigences d'entrée du consommateur électrique ;
- Basculer en douceur du stockage tampon aux différentes sources récupératrices d'énergie.

#### Transmetteur de température autonome d'ABB

La recherche ABB a développé un transmetteur de température totalement autonome → 3 sur le principe d'une récupération d'énergie entièrement intégrée. Le dispositif embarque des générateurs thermoélectriques qui, sans modifier la manipulation, la stabilité et l'encombrement du capteur, accroissent considéra-



blement sa longévité et sa fonctionnalité. Il intègre également une solution de stockage tampon intelligent dans les cas où la température du procédé est insuffisante pour produire l'énergie requise.

Les dimensions hors tout du composant ne permettaient pas de loger des thermo-

tionné à une distance suffisante pour autoriser des applications où les canalisations du procédé sont revêtues d'une bonne épaisseur d'isolant.

Un écart de température minimal d'environ 30 K entre procédé et air ambiant suffit pour produire assez d'énergie et

alimenter l'électronique de mesure et de transmission sans fil. Des gradients thermiques supérieurs à 30 K fournissent plus d'énergie que nécessaire, ce surplus de puissance pouvant être mis à profit, par exemple, pour augmen-

## En devenant totalement autonomes, les équipements industriels nous permettront de mieux comprendre et piloter la production pour une rentabilité accrue.

générateurs classiques à l'échelle macroscopique (environ 10 à 20 cm<sup>2</sup>). ABB innova avec des « microgénérateurs » thermoélectriques réalisés par un procédé de fabrication sur tranches [4] → 4. Toute la difficulté d'intégrer ces deux dispositifs résida dans le maintien de la stabilité et de la robustesse du transmetteur.

Le plus souvent, la température du procédé est plus élevée que celle de l'air ambiant : le côté chaud des thermogénérateurs doit donc être couplé au procédé avec une conductivité thermique optimale. On procéda à des simulations numériques poussées pour maximiser le transfert de chaleur dans les générateurs → 5. Par contre, il faut refroidir leur côté froid en le couplant à l'air ambiant avec un radiateur ; ce dernier doit être posi-

tionner le rythme de lecture des données.

### Perspectives d'avenir

Le transmetteur de température ABB alimenté par récupération de l'énergie ambiante lève le handicap majeur des nœuds de capteurs sans fil, à savoir le remplacement régulier des cellules primaires, et permet d'en réduire le coût global de possession. Si la récupération d'énergie ne convient pas à tous les capteurs ni à toutes les applications, c'est néanmoins une source d'énergie viable pour un large éventail d'appareils. En fonctionnant ainsi de manière totalement autonome, ces derniers nous permettront de mieux comprendre et piloter les procédés industriels pour en accroître la rentabilité.

**Philipp Nenninger**

**Marco Ulrich**

ABB Corporate Research  
Ladenburg (Allemagne)

philipp.nenninger@de.abb.com  
marco.ulrich@de.abb.com

### Bibliographie

- [1] Müller, M., Wienold, J., Reindl, L. M., « Characterization of indoor photovoltaic devices and light », *IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, p. 738–743, 2009.
- [2] Vining, C. B., « Semiconductors are cool », *Nature*, 413 (6856), p. 577–578, 11 octobre 2001.
- [3] Nenninger, P., Ulrich, M., Kaul, H., « On the Energy Problem of Wireless Applications in Industrial Automation », *Proceedings of the IFAC Symposium on Telematics Applications*, p. 218–224, 2010.
- [4] Nurnus, J., « Thermoelectric Thin-film Power Generators – Self-sustaining power supply for smart systems », *Proceedings of Smart Sensors, Actuators and MEMS IV*, Vol. 7362-05, Dresde, 2009.



# Moteurs sans étincelles

Les moteurs et générateurs synchrones et asynchrones ABB parés pour les ambiances explosibles

GÖRAN PAULSSON, JOHAN KARLSSON, JUSSI RAUTEE – Les moteurs et générateurs électriques sont la cheville ouvrière de nos sociétés industrielles. Ils fournissent la force motrice à de nombreuses machines (compresseurs, pompes, etc.) ou produisent eux-mêmes de l'électricité. Or, lorsqu'ils sont installés en atmosphères explosibles gazeuses, ils sont sources d'inflammation. C'est notamment le cas dans l'industrie pétro-gazière. Une étincelle, une surface chaude ou un champ électrique de forte intensité comme l'effet de couronne (grésillement que l'on entend parfois sous une ligne à haute tension) risque d'enflammer le mélange gazeux présent dans le milieu ambiant. Les gros moteurs et générateurs synchrones et asynchrones sans étincelles d'ABB sont certifiés conformes aux normes internationales CEI les plus récentes et les plus sévères.



La conception et la certification des moteurs synchrones et asynchrones HT de forte puissance ABB sont avantageuses à plus d'un titre : mise en route plus rapide, maintenance plus simple et retour sur investissement plus court.

**D**epuis des années, ABB fait constamment évoluer les méthodes de conception et de fabrication de ses produits pour garder une longueur d'avance sur les exigences normatives de qualité et de sécurité, deux critères déterminants pour nos clients. En 2010, tous nos moteurs et générateurs synchrones de forte puissance ont été certifiés conformes aux normes internationales les plus contraignantes (CEI 60079-15:2010 et CEI 60079-7:2006). Désormais, notre gamme complète de moteurs et générateurs basse et haute tensions est certifiée pour fonctionner en zones dangereuses → 1.

Les clients utilisant des équipements non testés ou certifiés doivent en général protéger les moteurs dans une enceinte sous pression, les obligeant à investir dans des équipements supplémentaires (compresseur, tuyauterie, régulateur de ventilation, etc.). En testant et en certifiant ses moteurs, ABB aide ses clients à rationaliser leurs processus d'analyse des risques.

Cette certification offre de nombreux avantages : dépenses d'investissement et d'exploitation réduites, mise en route plus rapide des moteurs et fiabilité accrue des installations sans accessoires supplémentaires. Les économies peuvent être considérables. Ainsi, par exemple, dans une raffinerie, la ventilation d'un moteur pendant une trentaine de minutes coûte énormément d'argent du fait des arrêts et pertes de production. L'utilisation de machines certifiées ABB évite au client de telles déconvenues.

L'élaboration des normes de la série CEI 60079 débuta après plusieurs explosions graves provoquées par des moteurs installés dans des zones à risque, à proximité ou sur des exploitations pétrolières et gazières en Mer du Nord, au cours des années 1980 et 1990 → 2. En 2008, avec

l'institut allemand *Physikalisch-Technischen Bundesanstalt* (PTB) et la société Shell, ABB présentait une communication [1] à la conférence européenne de l'IEEE PCIC<sup>1</sup>. Les normes décrites étaient issues

Malgré les progrès considérables en automatisation, la fabrication d'un moteur électrique pouvant peser jusqu'à 80 tonnes reste un travail essentiellement manuel.

de la Commission électrotechnique internationale (CEI), organisme plus que centenaire chargé d'élaborer la réglementation et la normalisation internationales → 3. Au fil des ans, les normes et essais de la CEI

**Note**

<sup>1</sup> *Institute of Electrical and Electronics Engineers et Petroleum and Chemical Industry Committee*

## 1 Classification des zones dangereuses

Les industriels de la chimie, du pétrole et du gaz définissent les conditions d'exploitation des équipements en fonction de la nature de l'atmosphère d'un site. Les atmosphères explosibles sont classées en 3 zones selon la présence et la concentration de gaz, vapeurs, brouillards ou poussières combustibles dans le milieu ambiant :

- Zone 0 : présence permanente d'une atmosphère explosive
- Zone 1 : présence occasionnelle d'une atmosphère explosive (< 1000 h/an)
- Zone 2 : présence accidentelle d'une atmosphère explosive (< 10 h/an)

Pour une machine installée en zone dangereuse, un mode de protection différent s'impose pour prévenir l'inflammation d'un gaz explosif. Les normes internationales spécifient les modes de protection des matériels exploités en zones 1 et 2. Le but de la protection est d'éviter les sources d'inflammation dont les plus courantes sont les surfaces chaudes et les étincelles.

## Le positionnement des bobines dans le stator a une importance cruciale pour éviter les effluves.

## 2 Modes de protection « n » et « e »

La norme CEI 60079-15:2010 spécifie les exigences de construction, d'essai et de marquage du matériel électrique du Groupe II avec mode de protection « n » (sans étincelles) destiné à être utilisé en atmosphères explosibles gazeuses en zone 2. Cette norme s'applique au matériel électrique dont la tension assignée ne dépasse pas 15 kV efficaces CA ou CC.

La norme CEI 60079-7:2006 spécifie les exigences de conception, de construction, d'essai et de marquage du matériel électrique avec mode de protection « e » (sécurité augmentée) destiné à être utilisé en atmosphères explosibles gazeuses en zones 1 et 2. Cette norme s'applique au matériel électrique dont la tension assignée ne dépasse pas 11 kV efficaces CA ou CC.

## 3 Normalisation CEI : bref historique

Le 15 septembre 1904, des participants au Congrès international d'Électricité de Saint Louis (Missouri, États-Unis) s'engageaient à coopérer en créant une commission représentative chargée de normaliser les nomenclatures et caractéristiques assignées des appareils et machines électriques.

Ainsi naquit, en juin 1906 à Londres, la Commission électrotechnique internationale (CEI). Depuis, elle élabore des normes, des guides techniques, des méthodes d'essais et des spécifications pour la filière électrotechnique dans le monde entier. Son périmètre d'intervention très large englobe les condensateurs, résistances, semi-conducteurs, radiocommunications, appareils électriques, moteurs électriques, etc.

En 1930, la CEI a joué un rôle de premier plan dans le choix d'unités de mesure comme le hertz (Hz) pour la fréquence, le gauss (G) pour la densité de flux magnétique et le gilbert (Gi) pour la force magnétomotrice.

En 2005, la CEI mettait en ligne son *Vocabulaire électrotechnique international* de 20 000 termes, en 13 langues (Electropedia).

se transforment en véritables passeports pour les industriels qui fabriquent et commercialisent des moteurs électriques à la fois sûrs et efficaces.

### Certification des moteurs ABB

Dans ses usines de Suède, de Finlande, d'Italie, d'Afrique du Sud, de Chine et d'Inde, ABB fabrique deux types de moteurs électriques haute tension (HT) : des moteurs synchrones et des moteurs

## 4 Coupe d'un bobinage haute tension isolé



## 5 Stator bobiné imprégné sous vide, avant montage



asynchrones. Un moteur synchrone est une machine à courant alternatif (CA) qui se distingue par une vitesse de rotation proportionnelle à la fréquence du réseau CA ; il fonctionne donc en synchronisme avec celui-ci. Le rotor est normalement magnétisé par un dispositif externe. Ce type de moteur peut être conçu pour fonctionner en continu dans une atmosphère explosible correspondant à la zone 2 ; il est appelé « moteur sans étincelles, Ex nA ».

Un moteur asynchrone est également un moteur CA dont le rotor est magnétisé par induction électromagnétique, mais sa vitesse de rotation est légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme, d'où son nom ! Ce type de moteur peut être conçu pour fonctionner en zone 1 ; il s'agit d'un moteur « à sécurité augmentée, Ex e ».

Le 28 janvier 2010, de nouvelles normes CEI sont entrées en vigueur pour les matériels installés en atmosphères explosibles. La majorité des moteurs et générateurs HT

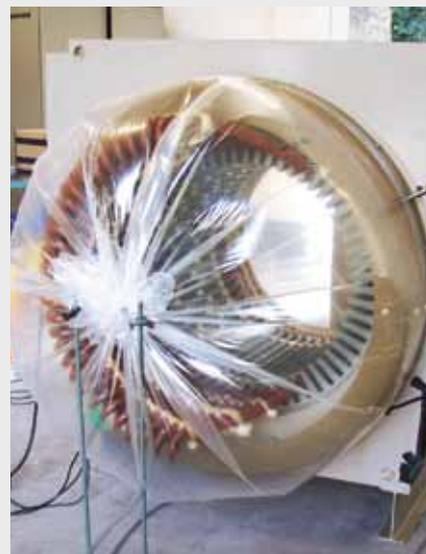
Pour être certifié conforme, le stator des moteurs et générateurs sans étincelles doit être testé pendant 3 minutes en atmosphère explosible gazeuse. Cet essai est obligatoire pour les moteurs de tension assignée supérieure à 1 kV fonctionnant dans des atmosphères qui contiennent, par exemple, de l'hydrogène, de l'éthylène ou de l'acétylène. Il l'est également pour les moteurs de plus de 6,6 kV fonctionnant dans des atmosphères comportant des traces de propane, de gazole, d'acétone, d'éthane, d'ammoniac ou d'une dizaine d'autres gaz et vapeurs explosifs.

Au cours de l'essai, le bobinage stator est enfermé dans une feuille de plastique remplie d'un mélange détonant (ex., mélange d'air et d'hydrogène comme pour l'essai illustré ci-contre). Des valeurs variables et croissantes de tension (sinusoïdale) lui sont alors appliquées jusqu'à la valeur d'essai spécifiée. En cas d'explosion provoquée par une petite étincelle dans le bobinage stator, le plastique

se déchire sous l'onde de choc. La tension d'essai spécifiée correspond à 1,5 fois la tension assignée. Pour réussir l'essai, le mélange gazeux ne doit pas s'enflammer.

Selon les essais réalisés en Allemagne à l'Institut *Physikalisch-Technischen Bundesanstalt* (PTB) en 2004 et 2009, les stators ABB ne produisent pas d'étincelles à une tension  $\leq 13,8$  kV pour l'hydrogène (gaz représentatif du groupe IIC) et 15 kV à la fois pour l'éthylène et le propane (gaz représentatifs des groupes IIB et IIA).

Pour un moteur asynchrone à cage, le rotor est également testé en présence d'un gaz explosif pour vérifier l'absence d'étincelles dans les barres rotoriques. Ce type d'essai n'est pas obligatoire pour un rotor synchrone, de construction différente. La même norme CEI 60079 décrit également les essais pour les moteurs asynchrones à sécurité augmentée.



synchrones et asynchrones d'ABB était déjà testée et certifiée conforme aux nouvelles exigences normatives. Les machines restantes furent mises en conformité au cours de l'année 2010.

Malgré les progrès considérables en automatisation, la fabrication d'un moteur électrique pouvant peser jusqu'à 80 tonnes reste un travail essentiellement manuel. Dans son usine suédoise de Västerås, par exemple, ABB fabrique chaque année près de 200 moteurs et générateurs sur un cahier des charges très précis des clients. Le personnel utilise une machine spéciale pour plier, avec le plus grand soin, des fils de cuivre isolés au mica de la grosseur du doigt et leur donner exactement la forme demandée. Le bobinage préformé est ensuite isolé avec une nouvelle couche de mica avant insertion dans le stator → 4.

La physique des moteurs électriques est relativement simple et bien comprise de nombreuses personnes. Là où les choses se corsent, c'est dans l'isolation des bobines de cuivre insérées dans le stator et ficelées au moyen de fils de fibre de verre. Le stator complet est ensuite imprégné sous vide dans une résine époxyde, puis séché en étuve pour acquérir ses propriétés électriques et mécaniques finales → 5.

Le système MCI (*Micadur®-Compact Industry*) garantit une isolation étanche et homogène, conférant de faibles pertes diélectriques, une rigidité mécanique et électrique élevée ainsi qu'une excellente

répartition thermique à l'intérieur du stator. Si ce système a largement fait ses preuves, le positionnement des bobines dans le stator a une importance cruciale pour éviter les effluves. Si elles sont trop proches les unes des autres, ce phénomène risque d'augmenter. Un volume d'air suffisant entre les bobines et l'optimisation de leur insertion sont la clé d'une utilisation maximale de la machine. Le recours à des maté-

riaux anti-effluves est également primordial. La conception et la certification des moteurs synchrones et asynchrones HT de forte puissance ABB sont avantageuses à plus d'un titre: mise en route plus rapide, maintenance plus simple et retour sur investissement plus court. Pour autant, seuls les essais garantissent la sécurité normative de ces matériels pour atmosphères explosibles.

**Le 28 janvier 2010, de nouvelles normes CEI sont entrées en vigueur pour les matériels installés en atmosphères explosibles. La majorité des moteurs et générateurs HT synchrones et asynchrones d'ABB était déjà testée et certifiée conforme aux exigences normatives.**

**Göran Paulsson**

**Johan Karlsson**

ABB Discrete Automation and Motion, Machines  
Västerås (Suède)  
goran.paulsson@se.abb.com  
johan.e.karlsson@se.abb.com

**Jussi Rautee**

ABB Discrete Automation and Motion  
Notting Hill (Australie)  
jussi.rautee@au.abb.com

#### Bibliographie

- [1] Rautee, J., Lienesch, F. Liew, T., « Safety improvements of non-sparking and increased safety motors », *PCIC Europe Conference – Electrical and Instrumentation Applications*, Weimar (Allemagne), 2008.

#### Photo p. 52

Sur une plate-forme pétro-gazière, la moindre étincelle peut avoir des conséquences désastreuses. Seuls des moteurs certifiés sans étincelles peuvent être utilisés.

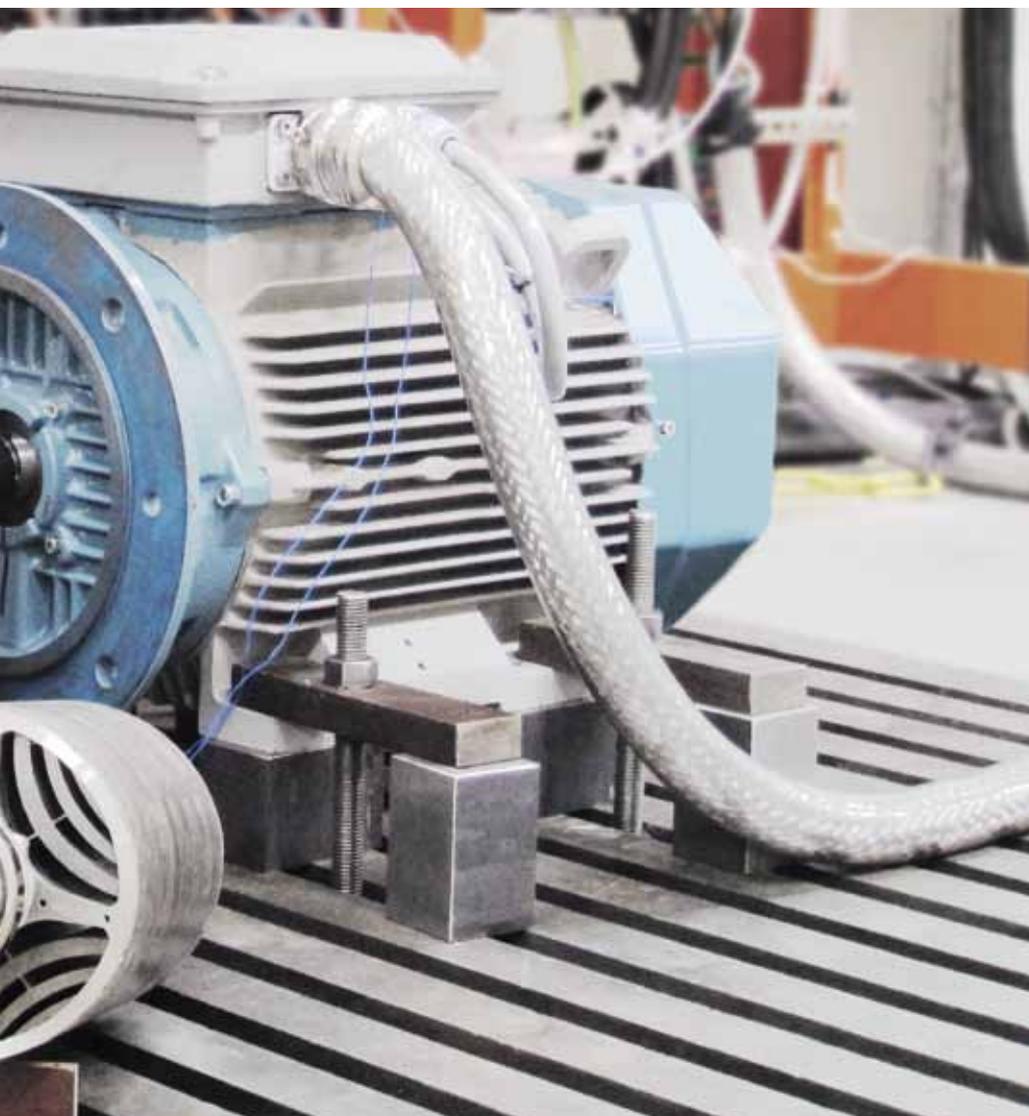


# Régime moteur

Les moteurs synchrones commandés en vitesse variable musclent le bilan énergétique des applications industrielles

HEINZ LENDENMANN, REZA R. MOGHADDAM, ARI TAMMI, LARS-ERIK THAND – Dans l'industrie, les moteurs électriques absorbent à eux seuls 60 à 65 % de l'électricité consommée. Augmenter leur rendement est une des pistes suivies pour optimiser leurs performances et améliorer le bilan énergétique des usines. Leur commande en vitesse variable constitue également une source majeure d'économies d'énergie ; aujourd'hui, 30 à 40 % des nouvelles installations de moteurs adoptent cette technologie. Enfin, la nécessité de pérenniser les

investissements et les équipements productifs impose d'accroître la fiabilité et la durée de vie des moteurs. En simplifiant la structure du rotor de ses moteurs synchrones à réluctance, ABB supprime les pertes rotoriques, augmente leur rendement et réduit leur encombrement. L'obtention des valeurs normalisées de puissance et de couple avec un échauffement limité de classe A (60 K) améliore la durée de vie de l'isolant, permettant de prolonger celle des roulements ou d'espacer les intervalles de lubrification.



Pouvant fonctionner à des vitesses supérieures, les moteurs synchrones à réluctance permettent d'éliminer certains organes mécaniques de transmission comme les réducteurs.

Les moteurs électriques sont utilisés dans de nombreuses applications industrielles aux exigences souvent analogues : rendement élevé, longévité, maintenance allégée et fiabilité accrue. Le faible encombrement des moteurs synchrones à réluctance ABB permet aux constructeurs de machines de concevoir des équipements plus compacts, plus légers et plus efficaces. En outre, pouvant fonctionner à des vitesses supérieures, ces moteurs permettent de s'affranchir de certains organes mécaniques de transmission (notamment les réducteurs), ce qui favorise leur intégration dans les machines, une revendication de plus en plus forte des constructeurs.

Pour proposer un moteur en phase avec les besoins du marché et parfaitement adapté à la commande en vitesse variable, ABB a remis à plat tous ses choix technologiques. Deux critères offraient des perspectives de simplification des moteurs et de gain de rendement : d'une part, le démarrage d'un

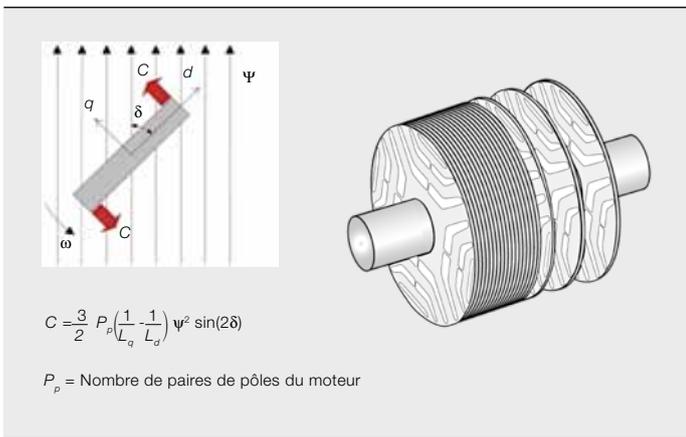
moteur alimenté par un variateur de vitesse est très différent de celui d'un moteur directement couplé au réseau électrique et, d'autre part, la modification des conditions aux limites. Les avantages des moteurs synchrones sont bien connus. En effet, un moteur synchrone avec un rotor 4 pôles alimenté à 50 Hz est en synchronisme avec cette alimentation très précisément à 1 500 tr/min alors qu'un moteur asynchrone équivalent de 30 kW, par exemple, ne tourne qu'à 1 475 tr/min du fait des pertes par glissement. Dans les moteurs asynchrones modernes à cage en court-circuit, les pertes rotoriques représentent 20 à 35% des pertes totales. La rotation en synchronisme avec le réseau permet donc d'en supprimer une grosse partie.

La suppression des pertes par glissement induit un gain de rendement de l'ordre de 0,6% dans le cas d'un moteur de 220 kW et jusqu'à 8% pour un moteur de 3 kW. Parallèlement, elle permet d'augmenter de 20 à 40% la densité de puissance et de

couple pour la même classe d'isolation. Il existe différents types de moteur synchrone : moteur à excitation bobinée sans balais, moteur à aimants permanents, moteur à réluctance. Fonctionnant selon le principe de la réluctance magnétique, le rotor de ce dernier est dépourvu de cage en court-circuit (cas du moteur asynchrone), d'aimants permanents et d'excitation bobinée.

#### Moteur synchrone à réluctance

La réluctance magnétique est l'équivalent magnétique de la résistance dans les circuits électriques. Le rotor consiste en un sens de la résistance magnétique la plus faible possible  $d$  et un sens perpendiculaire  $q$  avec une réluctance magnétique élevée ou une bonne « isolation » magnétique → 1. Le moteur produit un couple lorsque le rotor tente de s'aligner sur le champ magnétique du stator. La valeur de ce couple est directement fonction du rapport de saillance, soit le rapport d'inductance entre les deux sens magnétiques du rotor.



Le moteur synchrone à réductance a été inventé en 1923. Ne pouvant être démarré directement sur le réseau, il était inadapté à l'usage industriel. Aujourd'hui, son alimentation par un variateur de vitesse a permis de lever cet obstacle → 2.

La découverte des aimants NdFeB date de 1982. La technologie innovante des moteurs à aimants permanents fut adaptée aux servomoteurs; ils trouvent aujourd'hui leur place dans de nombreuses applications industrielles spéciales, notamment sous la forme de moteurs couplés à basses vitesses sans réducteurs [1]. À nouveau, le moteur synchrone à réductance, pourtant de conception plus simple, fut relégué au second plan!

Parallèlement, des travaux plus anciens publiés sur les moteurs synchrones à réductance ne parvinrent pas tous à démontrer la supériorité de leurs performances en termes de couple ou de rendement par rapport aux moteurs asynchrones, comme le laissaient présager les calculs. Les experts et le monde académique s'entendent sur ce point pour expliquer le peu de succès du moteur synchrone à réductance. Il semblerait que les calculs initiaux résultaient d'une commande électronique sous-optimisée. En effet, certaines publications faisaient état de résultats très encourageants avec un examen très approfondi des différentes conceptions électromagnétiques [2], [3]. Il faut préciser que le moteur synchrone à réductance se distingue du moteur à réductance commuté, ou moteur pas à pas, par un concept d'enroulement statorique totalement différent et des ondes de courant non sinusoïdales; un moteur souvent considéré comme inadapté aux applications industrielles parce que bruyant. Inconvénient évoqué du moteur synchrone à réductance par rapport au moteur à aimants permanents :

la nécessité d'un niveau de courant plus élevé pour fournir le même couple, car le rotor doit être magnétisé au travers du stator. Toutefois, le facteur de puissance vu côté réseau est déterminé par le convertisseur de puissance et est proche de l'unité à tous les régimes de marche, même pour le moteur synchrone à réductance.

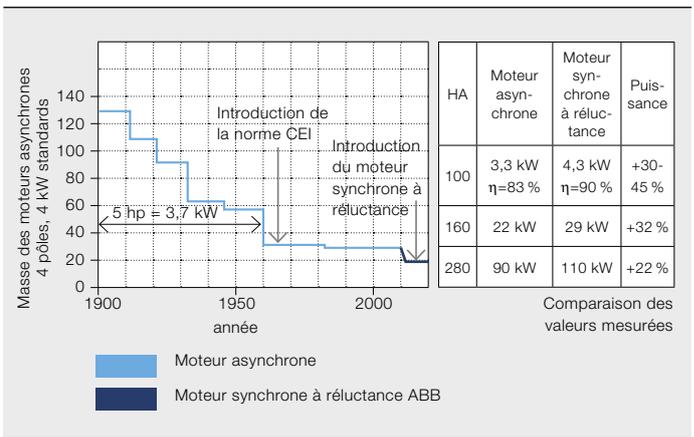
### Un moteur commandé en vitesse variable pour l'industrie

Dans le moteur synchrone à réductance ABB à commande électronique, le courant moteur, proportionnel à l'inverse du facteur de puissance et du rendement ( $\propto 1/(\eta \cdot \cos(\rho))$ ) est en réalité inférieur à celui d'un petit moteur asynchrone aux mêmes valeurs de couple et de vitesse. Cela résulte, essentiellement, du rendement nettement plus élevé. Dans les gros moteurs uniquement, le courant du convertisseur est plus élevé que dans un moteur asynchrone à la même valeur de couple. En général, le moteur synchrone à réductance ABB est piloté par un variateur de même calibre (ACS 850, par exemple) que le moteur asynchrone aux mêmes niveaux de puissance et de couple, mais avec une densité de puissance et un rendement supérieurs à ce dernier. Ce gain de rendement induit des économies d'énergie pratiquement identiques au niveau du système d'entraînement.

Autre avantage majeur du moteur synchrone à réductance ABB: le rotor de structure plus simple qui, sans aimants ni cage, est plus robuste que celui des moteurs asynchrones ou à aimants permanents. De plus, il n'y a aucun risque de

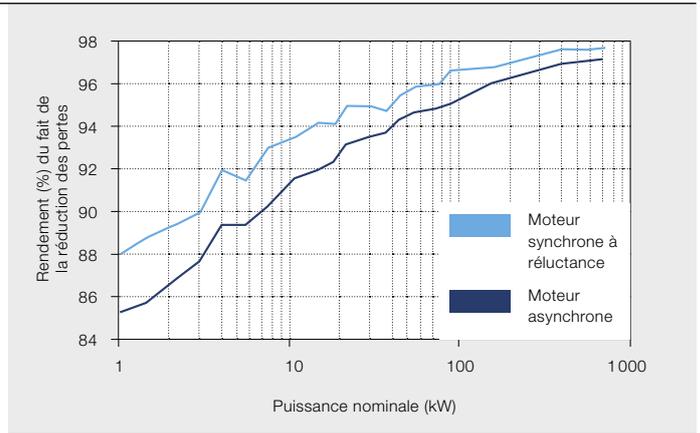
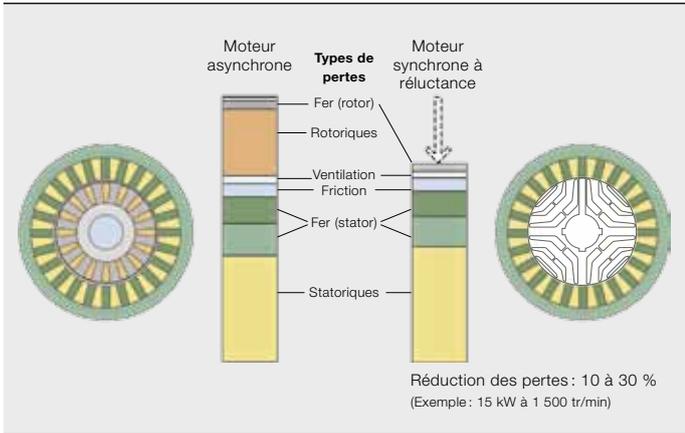
perte constante de performance du fait de la démagnétisation potentielle en cas de défaillance ou d'échauffement anormal. Le moteur est fonctionnellement sûr car, sans aimants, aucune tension de force contre-électromotrice n'est induite et le convertisseur ne doit plus être protégé des surtensions. Enfin, les terres rares utilisées pour les aimants permanents sont des matériaux relativement chers et à la disponibilité limitée sur certains marchés, du fait de la concentration géographique des sources d'approvisionnement.

La suppression de la plupart des pertes rotoriques et la structure plus simple du rotor confèrent un certain nombre d'avantages à ce moteur et à la machine entraînée → 3. Il peut en effet fonctionner aux puissances normalisées CEI pour une hauteur d'axe donnée. Dans ce cas, le gain de rendement de l'entraînement à vitesse variable peut dépasser 5% pour les moteurs de puissance unitaire et approcher 0,5% pour les plus gros moteurs (hauteur d'axe 315). Par conséquent, alors qu'un moteur asynchrone fonctionnerait à un échauffement de classe F (105 K), le moteur synchrone à réductance ABB ne fonctionnerait qu'à un échauffement de classe A (60 K) → 4. À titre



## Pour les petits moteurs de 3 ou 4 kW, le gain de puissance peut atteindre 60 % pour le même échauffement.

de comparaison, prenons un compresseur tournant à 4 500 tr/min : lorsqu'il fonctionne à un échauffement réel de classe H (125 K), le moteur synchrone à réductance ABB



affiche des températures de roulement encore inférieures à celles du plus gros moteur asynchrone fonctionnant à un échauffement de classe F (105 K). C'est pourquoi ce moteur était aussi appelé *CoolMotor* → 5. Ce fonctionnement à basse température améliore la durée de vie de l'isolant du moteur et, donc, celle des roulements ou autorise des intervalles de lubrification plus longs. Les organes de roulement des moteurs exigent, en particulier, un entretien régulier ; selon certaines études, leur défaillance est à l'origine de près de 70 % des arrêts intempestifs des moteurs. Le moindre échauffement des roulements a un impact direct sur les intervalles de lubrification, la simplicité de maintenance et la fiabilité. Même si un roulement se dégrade, l'absence de forces magnétiques (contrairement à un moteur à aimants permanents) fait que son remplacement est aussi simple que celui d'un moteur asynchrone.

La technologie du moteur synchrone à réductance autorise une bonne régulation du couple aux vitesses plus élevées, tout en conservant un fonctionnement avec échauffement traditionnel, souvent de classe B ou F. Les pertes rotoriques étant difficiles à dissiper, comparées aux pertes statoriques, leur quasi-suppression a un impact particulièrement important sur les performances en couple. Pour les petits moteurs de 3 ou 4 kW, le gain de puissance par rapport à un moteur asynchrone peut atteindre 60 % pour le même échauffement. Dans le cas d'un moteur de 60 kW, ce gain tourne autour de 40 % et de 20 % pour un moteur de 220 kW. Le plus souvent, la même puissance peut être obtenue avec un moteur d'une, voire deux hauteurs d'axe inférieures à celle d'un moteur asynchrone. La réduction d'encombrement s'apprécie dans toutes les applications pouvant tirer profit de moteurs plus petits ou de calibres

inférieurs. Autre avantage : le moindre transfert thermique sur les équipements à proximité, en particulier dans les armoires fermées. Même à cette densité de puissance très accrue, l'élimination des pertes rotoriques diminue les calories transmises par l'arbre moteur, réduisant la température des roulements, en particulier côté commande. Si l'on compare un moteur synchrone à réductance ABB de 6 kW à un moteur asynchrone de même puissance, cette réduction peut atteindre 30 K, avec une moyenne de 15 à 20 K sur la plage complète. L'impact est particulièrement prononcé aux vitesses élevées de même qu'en fonctionnement aux classes d'échauffement supérieures. Le rendement élevé est conservé même à cette puissance supérieure. De surcroît, le moteur ABB affiche une courbe de rendement à charge partielle exceptionnelle, typique des machines synchrones et très appréciée pour la commande en vitesse variable des ventilateurs et des pompes.

Enfin, l'inertie de ces rotors est réduite de 30 à 50 % du fait de l'absence de cage et d'aimants. Dans les applications très dynamiques comme l'entraînement d'engins de levage, cette réduction offre des avantages supplémentaires en termes d'efficacité énergétique et de cycles de levage en raison du raccourcissement des temps de rampe de vitesse.

#### Caractéristiques constructives et fiabilité du rotor

La plupart des éléments du système d'entraînement ABB à moteur synchrone à réductance est issue de technologies existantes. Le carter, la boîte à bornes, le stator, la conception et la technologie du bobinage ainsi que les types de roulement sont identiques à ceux des moteurs asynchrones. Les courants triphasés étant sinusoïdaux,

Le fonctionnement à basse température améliore la durée de vie de l'isolant du moteur et, donc, celle des roulements, ou autorise des intervalles de lubrification plus longs.

La température ambiante d'un moteur est celle de son milieu environnant lorsqu'il est à l'arrêt et complètement refroidi.

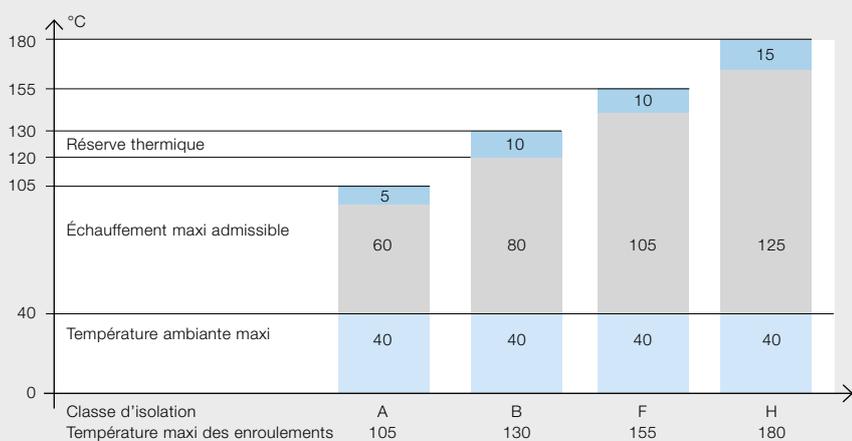
L'échauffement est l'élévation de la température interne d'un moteur fonctionnant à pleine charge : c'est l'écart entre sa température au démarrage et la température stabilisée à chaud.

Cet échauffement est mesuré par la méthode normalisée de variation de résistance des enroulements. Il s'agit d'une moyenne de la variation de température de l'enroulement complet, y compris les conducteurs du moteur, les têtes de bobines et les fils se trouvant au fond des encoches du stator. Sachant que certains points sont plus chauds que d'autres, un facteur de marge utilise la température moyenne pour indiquer la température probable au point le plus chaud. C'est ce qu'on appelle la réserve thermique.

Les classes d'isolation regroupent les isolants selon leur résistance au vieillissement thermique et à la défaillance. On distingue 4 classes d'isolation (A, B, F et H). Pour chacune d'elles, la capacité thermique désigne la température maximale à laquelle l'isolant peut fonctionner avec une durée de vie moyenne de 20 000 heures.

En faisant fonctionner un moteur à une valeur d'échauffement inférieure à celle admise par la classe d'isolation, on modifie sa capacité thermique. Il peut alors résister à des températures supérieures aux températures ambiantes normales. Ce faisant, on prolonge sa durée de vie.

Le graphique ci-dessous spécifie les températures nominales, les échauffements admissibles ainsi que les réserves thermiques pour des moteurs standard de différentes classes d'isolation.



Les performances de l'entraînement dans différentes applications (pompage, ventilation, compression, exploitation minière et levage) furent vérifiées lors d'essais de vieillissement très accéléré.

on a recours à la même gamme de variateurs pour commander ce type de moteur ; leur logiciel doit uniquement être optimisé et prendre en compte ce nouveau moteur. En réalité, seul le rotor est différent.

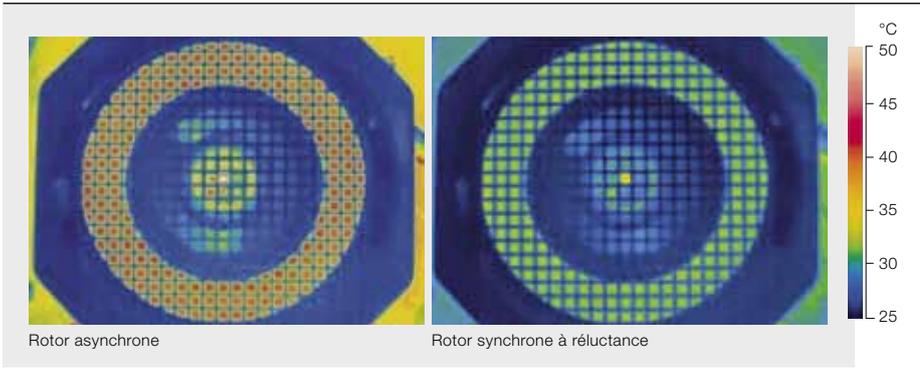
Moins complexe que celui des moteurs asynchrones et à aimants permanents, le rotor est composé de tôles d'acier électriques feuilletées et calées sur l'arbre. Sa complexité réside, en fait, dans sa conception qui a nécessité de très nombreuses simulations par éléments finis pour déterminer ses propriétés électriques et mécaniques. Parmi les choix prioritaires, citons le nombre de sections magnétiques ainsi que la forme exacte de l'entrefer, qui déterminent le couple produit et le courant d'aimantation du moteur. Il était capital de minimiser ce courant réactif si l'on voulait conserver un calibre de variateur avantageux. Le positionnement précis des sections le long de la périphérie contribue pour beaucoup à une bonne régulation du couple pendant la rotation du moteur et, donc, au maintien d'un niveau sonore comparable à celui des moteurs traditionnels. Les nombreux efforts d'optimisation au moyen de simulations par éléments finis et d'algorithmes analytiques et génétiques ont permis de concevoir une configuration 4 pôles idéale pour la plage de vitesse complète jusqu'à 6 000 tr/min.

Pour valider la fiabilité de ce nouveau rotor, des essais poussés ont accompagné le développement du système d'entraînement (cf. photo p. 56-57). Ses performances dans différentes applications (pompage, ventilation, compression, exploitation minière et levage) furent vérifiées lors d'essais de vieillissement très accéléré avec des cycles d'essais spécifiques à ce moteur pour valider sa robustesse sur sa durée de vie complète. Ainsi, par exemple, un essai avec arrêts et démarrages répétés du moteur à des vitesses supérieures aux valeurs maximales des catalogues fut mené avec succès. Le nombre de cycles et les conditions de surcharge imposées correspondaient à plus de 20 ans d'exploitation en régime nominal.

#### Commande en vitesse variable

La technologie standard ABB de contrôle direct de couple DTC des moteurs asynchrones et à aimants permanents a fait l'objet de développements supplémentaires pour inclure les moteurs synchrones à réluctance. Malgré de nombreuses similitudes avec le moteur à aimants perma-

## 5 Mesure des températures par imagerie thermique



## 6 Spécification du système d'entraînement (moteur + variateur)

Performances du nouveau système d'entraînement à vitesse variable (spécifiées pour 3 hauteurs d'axe normalisées)

Moteur, échauffement classe F								Variateur, 400 V				
Hauteur d'axe mm	PN kW	nN tr/min	PN kW	nmaxi tr/min	Rend. % (1/1)	CN Nm	Masse kg	Code type ACS-850-04	N A	Bruit dBA	Taille	Masse kg
100	4	1500	4	2250	84,3	25	22	010A-5	10,5	39	B	5
100	7,5	3000	7,5	4500	88,7	23	22	018A-5	18	39	B	5
100	13	4500	13	6000	90,5	27	22	030A-5	30	63	C	16
100	17,5	6000	17,5	6000	91,3	27	22	044A-5	44	71	C	16
160	26	1500	26	2250	91,7	165	180	061A-5	61	70	D	23
160	50	3000	50	4500	94,0	159	180	144A-5	144	65	E0	35
160	70	4500	70	5300	94,6	148	180	166A-5	166	65	E	67
280	110	1500	110	1800	96,0	700	640	260A-5	260	65	E	67
280	130	1800	130	2200	95,9	689	640	290A-5	290	65	E	67

Pour les spécifications complètes, rendez-vous sur [www.abb.com/motors&generators](http://www.abb.com/motors&generators).

ments, à l'exception du flux rotor nul, d'importants efforts ont été consentis pour optimiser la production de couple avec une fonction innovante de maximisation du

L'installation et l'exploitation du variateur électronique de vitesse avec ce type de moteur se font comme pour les moteurs asynchrones et à aimants permanents.

## Autre avantage : le moindre transfert thermique sur les équipements à proximité, en particulier dans les armoires fermées.

couple par ampère qui garantit le maintien du courant minimal du variateur à chaque point de fonctionnement. Le variateur assure également la commande au régime de défluxage (plage de vitesse au-delà de la vitesse nominale). Une vitesse maximale pouvant atteindre 1,5 fois la valeur nominale est possible dans la majeure partie de la plage de fonctionnement du moteur. Cette possibilité revêt une importance particulière pour ABB car elle permet à son moteur synchrone à réluctance d'atteindre des densités de couple sensiblement supérieures à celles des moteurs asynchrones.

précision en régulation de vitesse et la dynamique en régulation de couple. Le variateur peut même être dimensionné pour des valeurs de surcharge et des cycles de charge spéciaux.

### Des performances au rendez-vous

Comme le moteur à aimants permanents, le moteur synchrone à réluctance qu'ABB vient de développer peut uniquement être alimenté par un variateur; les catalogues fournissent donc des tableaux spécifiant les associations moteur/variateur pour différentes puissances et vitesses → 6.

Ce nouveau moteur répond aux besoins de puissance, de rendement, de compacité et de simplicité de maintenance du marché. Avec une densité de puissance de 20 à 40% supérieure à celle d'un moteur asynchrone, un rotor sans cage en court-circuit ni aimants permanents et un échauffement inférieur, ABB propose une solution d'entraînement à vitesse variable moins encombrante avec un rendement global supérieur. Les fonctions spéciales ajoutées par ABB à son variateur standard améliorent le bilan énergétique et la puissance des systèmes d'entraînement à moteurs synchrones à réluctance, désormais comparables à ceux d'un entraînement à moteur à aimants permanents, mais avec un moteur plus simple et plus robuste. L'utilisateur gagne donc sur les deux tableaux.

**Heinz Lendenmann**

**Reza Rajabi Moghaddam**

ABB Corporate Research

Västerås (Suède)

[heinz.lendenmann@se.abb.com](mailto:heinz.lendenmann@se.abb.com)

[reza.r.moghaddam@se.abb.com](mailto:reza.r.moghaddam@se.abb.com)

**Ari Tammi**

ABB Discrete Automation and Motion,

Motors & Generators

Vaasa (Finlande)

[ari.tammi@fi.abb.com](mailto:ari.tammi@fi.abb.com)

**Lars-Erik Thand**

ABB Discrete Automation and Motion,

Motors & Generators

Västerås (Suède)

[lars-erik.thand@se.abb.com](mailto:lars-erik.thand@se.abb.com)

### Bibliographie

- [1] Haikola, M., « Effets démultiplicateurs – La solution *Direct Drive* d'ABB découple les performances des procédés industriels les plus contraignants au monde », *Revue ABB*, 4/2009, p. 12–15.
- [2] Bloglietti, A., Cavagnino, A., Pastorelli, M., Vagati, A., « Experimental comparison of induction and synchronous reluctance motors performance », *Conf. Rec 40th IEEE IAS ANNU. Meeting*, vol. 1, p. 474–479, octobre 2005.
- [3] Germishuizen, J. J., Van der Merwe, F. S., Van der Westhuizen, K., Kamper, M. J., « Performance comparison of reluctance synchronous and induction traction drives for electrical multiple units », *Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting*, vol. 1, p. 316–323, 8–12 octobre 2000.

### Photo p. 56–57

Essais de vieillissement très accéléré sur moteurs commandés en vitesse variable.

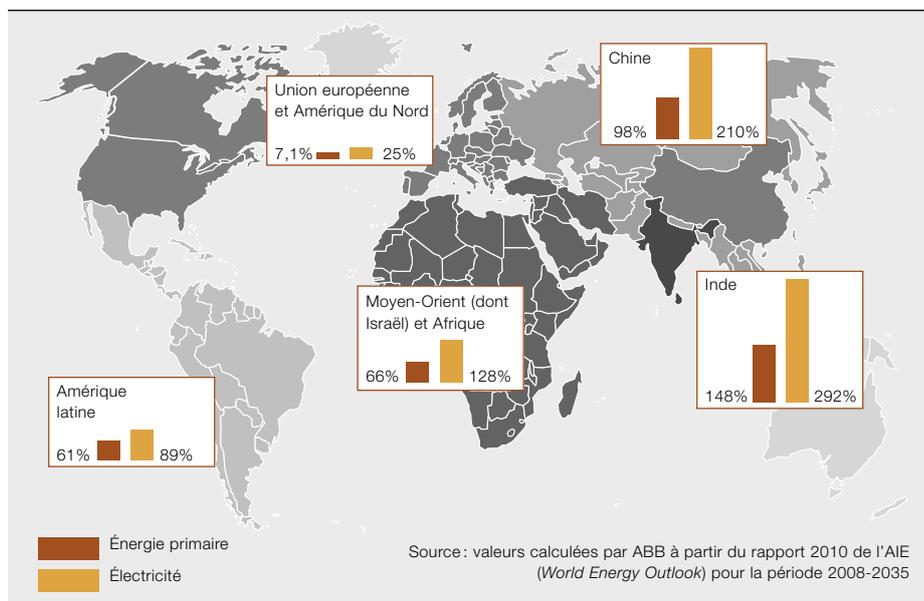




# Alternative énergétique

L'efficacité énergétique, moteur du développement durable des centrales électriques

WERNER JANI, JOSEPH LAUER – Démographie galopante, boulimie énergétique, épuisement annoncé des combustibles fossiles, première source d'énergie primaire au monde... La pénurie menace notre planète. Sans compter que les énergies fossiles sont aussi responsables aujourd'hui de la plupart des rejets de CO<sub>2</sub> et du dérèglement climatique. Tant que persistera cette dépendance, la situation n'est pas près de s'inverser. Bien sûr, il y a longtemps que l'on songe aux énergies renouvelables (EnR) pour y remédier. Néanmoins, malgré tous les efforts déployés pour les substituer aux centrales thermiques, de nombreuses questions se posent avant qu'elles puissent faire réellement le poids dans le bouquet énergétique mondial. Et le temps presse : plus question d'attendre les dernières innovations des énergies « propres » ni l'avènement de la fusion nucléaire. Il faut agir sans tarder pour préserver les ressources et équilibres écologiques des générations futures ; les méthodes et techniques de l'efficacité énergétique (EE) peuvent nous y aider.



**P**roduire de l'électricité aujourd'hui, c'est essentiellement brûler des énergies fossiles. Premier grand pollueur de la planète, le charbon fournit plus de 40 % de l'électricité mondiale, accélérant à lui seul les émissions de CO<sub>2</sub>. Certes, le taux de croissance de la production d'EnR est élevé et la complexe équation entre usages énergétiques et pollution pourrait être inversée en mettant à profit ces énergies. Hélas, leur part dans le mix énergétique global reste minime et leur intégration massive fait encore l'objet de recherches.

Or la planète ne peut pas se payer le luxe d'attendre : il faut emprunter d'autres pistes d'amélioration pour mieux utiliser ses ressources et diminuer l'empreinte carbone des activités humaines.

Si l'on en croit l'Agence internationale de l'Énergie (AIE), une utilisation optimale, rationnelle et durable de l'énergie a plus de chances d'enrayer la pollution par le CO<sub>2</sub>, dans les 20 prochaines années, que toutes les autres solutions confondues. L'adoption de techniques, méthodes et comportements « éco-efficaces » permettrait de briser immédiatement la spirale inflationniste de la croissance économique et de la consommation énergétique. Dans le domaine de la production

d'énergie par centrales thermiques, en particulier, ABB a déjà les technologies et procédés pour y parvenir.

### L'enjeu énergétique : produire avec moins

Partout dans le monde, la consommation d'électricité augmente deux fois plus vite que la demande en énergie primaire → 1. Cette croissance est manifeste dans les économies en expansion du Moyen-Orient, de l'Inde et de la Chine où elle devrait atteindre des sommets : de 140 % à 261 % pour l'électricité et de 89 % à 116 % pour l'énergie primaire.

Pour autant, subvenir à ces besoins revient à trouver la juste mesure entre production et consommation. L'objectif mondial de la performance énergétique sera donc de puiser le maximum d'énergie électrique des ressources fossiles disponibles tout en consommant le moins possible. Ainsi, chaque kilowatt d'électricité épargné devient un « combustible alternatif » utilisable à d'autres fins.

### Pistes et solutions ABB

La chaîne de production d'électricité et de consommation énergétique est un véritable panier percé ! → 2 : du gisement

d'énergie primaire (gaz ou pétrole) à l'industriel ou au particulier, ce sont près de 80 % d'énergie perdue. Ce mode de production en est le premier responsable, essentiellement en raison de la thermodynamique du procédé. Prenons l'exemple d'une centrale alimentée au charbon pouvant produire 500 mégawatts (MW) bruts. L'installation, vieille d'environ 25 ans, affiche un rendement thermique type de 34 %, soit 10,2 Btu<sup>1</sup>/kWh nets. Initialement prévue pour fonctionner à charge de base, la centrale s'est adaptée aux importantes variations de la demande qui caractérisent les réseaux actuels : son facteur de charge annuel a baissé à environ 70 %, avec une exploitation en charge partielle de 50 à 90 %. Cette pratique, plus ou moins courante aujourd'hui dans nombre de centrales, a le potentiel pour produire ce « combustible alternatif » qu'est l'efficacité énergétique.

**La chaîne énergétique qui relie le producteur au consommateur peut accuser jusqu'à 80 % de pertes, surtout au niveau de la production.**

Trois questions se posent néanmoins avant d'investir dans ces nouveaux gisements d'économies et d'EE :

- Où trouver le savoir-faire et la technologie pour les mettre en œuvre à bon compte ?
- Quels gains peut-on en attendre ?
- Comment y parvenir ?

La réponse aux deux premières questions peut se résumer en une phrase : les méthodes et technologies développées par ABB permettent un gain d'EE de 8 à 10 %. Dans le cas de notre centrale au charbon de 500 MW, le surcroît de combustible disponible et les économies possibles (à l'année) se chiffrent à :

- Consommation initiale : 1,4 million de tonnes
- Énergie supplémentaire injectée dans le réseau : 21,25 MWh
- Énergie économisée : 22,5 millions de kWh
- Réduction des émissions de CO<sub>2</sub> : 260 000 tonnes
- Équivalent combustible alternatif : plus de 154 000 tonnes (assez pour faire rouler près de 850 voitures pendant un an !)

Pour qui douterait de la faisabilité économique de ces méthodes et techniques d'EE, l'expérience d'ABB montre qu'un retour sur investissement moyen de 2 à 3 ans suffit pour atteindre ces objectifs.

### Mode d'emploi

La démarche ABB d'optimisation énergétique s'appuie sur trois étapes essentielles :

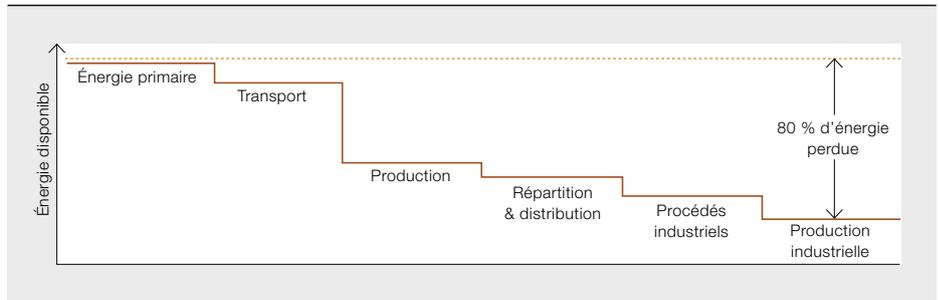
- 1) Identification des potentiels
- 2) Plan directeur
- 3) Réalisation

Les outils et techniques d'accompagnement de la méthodologie sont le prolongement de travaux pluriannuels sur une grande variété de procédés de production d'énergie et de schémas de consommation, sur de nombreux sites clients. Chaque étape de la démarche vise à fournir précisément l'information utile pour faire progresser en confiance les opérateurs d'une centrale et aboutir à un programme d'améliorations garantissant des économies d'énergie tangibles et durables.

### Identification des potentiels

La première phase consiste à évaluer l'EE d'un site, selon trois axes : repérer les pistes d'amélioration en s'interrogeant sur les usages énergétiques (comment, où et pourquoi ?) ; identifier les poches d'inefficacité ; confronter les per-

## 2 Du producteur à l'utilisateur, les pertes énergétiques peuvent atteindre 80 %.



## 3 L'étude ABB d'identification des gisements d'efficacité énergétique couvre de multiples volets de la gestion de l'énergie.

### Technologie et contrôle-commande

Identification des perspectives d'amélioration par la conduite du procédé, la modification des équipements ou la mise en œuvre de techniques alternatives d'EE portant sur les systèmes d'énergie suivants :

- Équipements de combustion (turbines à gaz, foyers, réchauffeurs, etc.)
- Chaudières, turbines et réseaux vapeur
- Production d'électricité et équipements électriques
- Pompes, ventilation et moteurs
- Réseaux électriques haute tension et moyenne/basse tension du site
- Air comprimé et gaz industriels
- Chauffage, ventilation et climatisation (CVC)
- Groupes froid

### Comportements et pratiques

Étude complète des comportements et pratiques en matière d'EE sur l'ensemble des procédés, énergies et fluides du site, comparés aux meilleures pratiques :

- Stratégie et politique énergétiques
- Gestion de l'énergie
- Dépenses d'investissement
- Technologies de l'information
- Gestion opérationnelle
- Planification et performance opérationnelles
- Formation et développement
- Pratiques et stratégies de maintenance
- Motivation du personnel

formances actuelles aux meilleures pratiques établies de l'industrie. La démarche fait intervenir un grand nombre d'aspects « gestion de l'énergie » → 3.

Pour une centrale au charbon classique, en tous points analogue à notre exemple, les composantes de cette identification des potentiels d'EE sont recensées en → 4.

Grâce à cette étude de cadrage des leviers d'EE, ABB est capable de décrire la nature et l'ampleur des économies d'énergie potentielles, et de préconiser clairement des mesures pour en accroître les bénéfices. À l'issue de cette phase, les actions les plus prometteuses sont engagées.

On peut aussi mieux cibler et hiérarchiser ces mesures à l'aide d'un graphique mettant en regard les gisements d'économies d'énergie identifiés, les gains énergétiques potentiels et les investissements probables → 5. Cette représentation permet de visualiser d'un coup d'œil les actions (normalement au-dessus du tracé orange) assurées d'un bon retour sur investissement.

Selon l'AIE, une utilisation efficace de l'énergie a plus de chances d'enrayer la pollution par le CO<sub>2</sub>, dans les 20 années à venir, que toutes les autres solutions réunies.

### Note

- 1 Unité thermique britannique valant environ 1,055 kilojoule et représentant la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer de 1 degré Fahrenheit (0,556 °C) 1 livre d'eau (0,454 kg).

#### 4 Composantes de l'étude d'identification des potentiels d'amélioration pour une centrale au charbon type (25 ans, 500 MW bruts, rendement 34 %)

##### Performance et pilotage des turbines à vapeur

- Thermodynamique
- Performance du condenseur (le cas échéant)
- Optimisation de la commande de vapeur de soutirage et contrepression
- Commande individuelle et globale des turbines pour optimisation des rendements thermiques

##### Performance et pilotage des turbines à gaz

- Thermodynamique
- Maintenance prédictive
- Dégradation des performances
- Commande individuelle et globale des turbines pour optimisation des rendements thermiques

##### Performance et pilotage des chaudières

- Thermodynamique
- Eau d'alimentation
- Commande individuelle et globale des chaudières pour optimisation des rendements thermiques
- Distribution de vapeur

##### Bilan électrique de la centrale

- Moteurs et variateurs (pompes et ventilateurs)
- Transformateurs
- Appareils de coupure et de commutation
- Équipements de terrain
- Réseau d'air comprimé

##### Gestion de l'énergie

- Comptage, surveillance et enregistrement
- Portée de l'analyse des indicateurs clés de performance et étude de performance en cours
- Intégration dans la politique de gestion énergétique

##### Équipements de tableau

- Acquisition de données
- Alarmes
- Auxiliaires

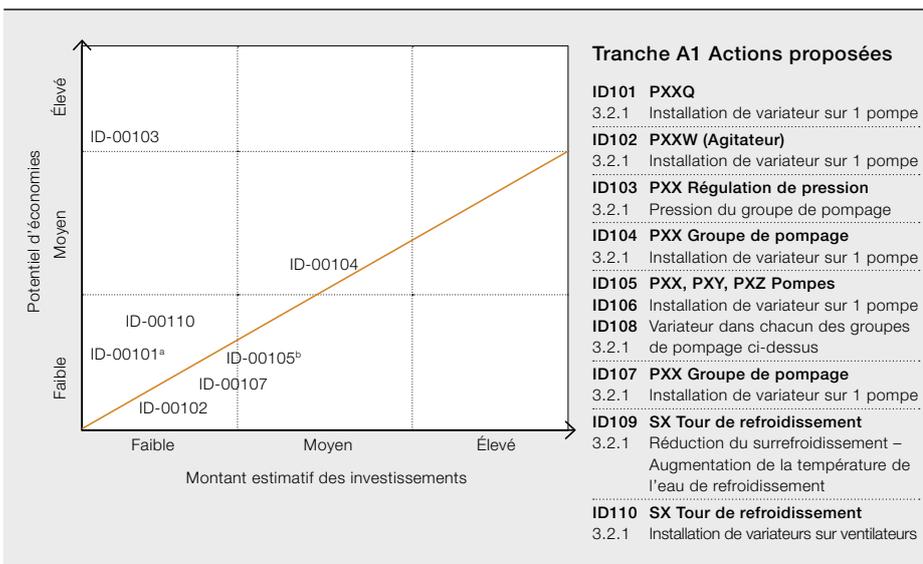
##### Rendement thermique global de la centrale

- Perspectives d'optimisation

#### 6 Mesures identifiées d'amélioration de l'EE d'une centrale au charbon

- Optimisation du convoyage du charbon
- Amélioration du débit des ventilateurs de soufflage et de tirage
- Amélioration de la commande des pompes d'alimentation de chaudière
- Moteurs à haut rendement et vitesse variable
- Commande optimisée des turbines
- Régulation avancée de la température de vapeur
- Stabilisation de l'allure de chauffe et optimisation de la combustion
- Réduction de l'excès d'oxygène pour combustion dans la chaudière
- Amélioration de la régulation de pression/niveau d'eau d'alimentation
- Amélioration du système d'alimentation électrique (transformateurs élévateurs et auxiliaires)
- Réduction des fuites
- Réduction des pertes thermiques
- Optimisation thermique du refroidissement

#### 5 Retour sur investissement des actions d'amélioration de l'efficacité énergétique



Pour notre exemple de centrale au charbon, les mesures méritant des investissements en vue d'améliorer l'EE, très représentatives du process de production, sont inventoriées en → 6.

Ces propositions techniques ne seront pas les seules à doper le rendement énergétique des centrales; l'amélioration des pratiques opérationnelles, tant au niveau de la gestion du site que de son exploitation, a un rôle à jouer. Les leviers d'EE sont ici multiples :

- Arrêt manuel des équipements inutiles
- Repérage et isolement des équipements contre-performants

- Déploiement d'une stratégie efficace de remplacement de l'éclairage ;
- Élaboration d'une politique de remplacement des équipements basée sur une analyse du cycle de vie (ACV) ;
- Mise en place d'une maintenance prédictive ;
- Établissement d'un programme de définition des objectifs d'EE.

##### Plan directeur

Les gisements identifiés en phase précédente permettent de dresser un programme d'actions d'amélioration assorties chacune de bénéfices bien compris

et quantifiables. Ce plan directeur, généralement élaboré par ABB et son client, débouche sur une « feuille de route » et un cahier des charges fourni garantissant la mise en œuvre la plus économique de ces gisements d'économies d'énergie. Le client peut d'ores et déjà engager certaines de ces mesures simples et rapides, sans l'aide d'ABB. Si bon nombre de ces propositions peuvent se concrétiser avec les technologies clés d'ABB, d'autres font appel à des entreprises tierces.

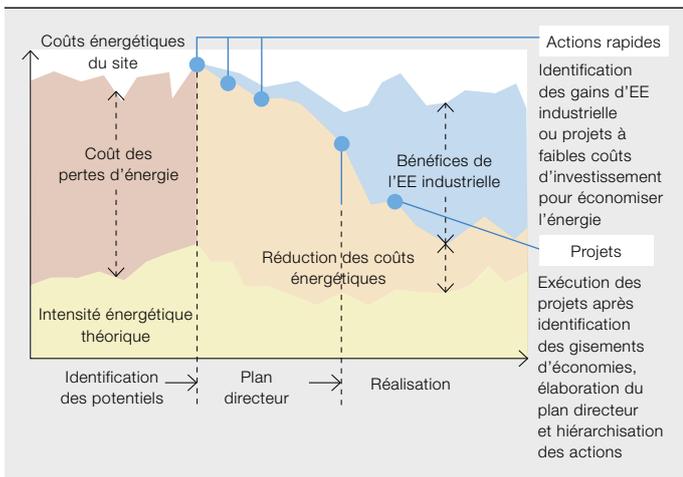
##### Réalisation

Cette phase d'exécution des propositions identifiées au préalable est généralement menée par ABB et son client ou, selon les moyens requis pour atteindre les objectifs visés, par ABB et des partenaires technologiques appropriés, voire d'autres équipementiers.

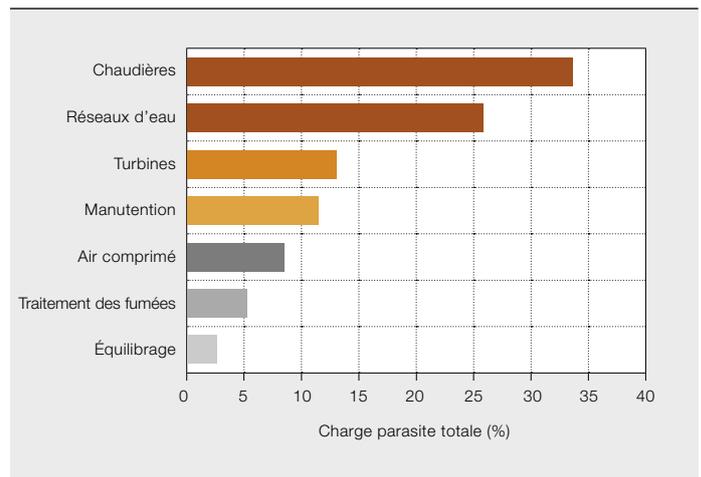
##### Engagement de résultats

Toute démarche d'amélioration de l'EE est vaine si les bénéfices ne sont pas visibles au quotidien. Il est donc primordial de mettre en œuvre les bons outils pour enregistrer et mettre en évidence les améliorations obtenues dans toutes les zones concernées du site. Cette information est cruciale pour l'ensemble des actions visant la technique de production, le contrôle-commande, la supervision et le choix des objectifs, ou les comportements et pratiques.

## 7 Étude des coûts énergétiques avec la méthode ABB



## 8 Contribution des différents postes de consommation énergétique d'une centrale



Dans toutes les régions du globe et, notamment, dans les économies en expansion du Moyen-Orient, de l'Inde et de la Chine, la demande d'électricité croît deux fois plus vite que la demande d'énergie primaire.

La réussite de la démarche, en particulier pour les centrales au charbon, dépend largement du mode d'exploitation du site; les unités fonctionnant en régime établi ont peu de potentiel d'optimisation tandis que celles fonctionnant souvent à charge partielle sont des candidates toutes désignées pour ces exercices d'identification des pistes d'amélioration de l'efficacité énergétique → 7.

Dans notre exemple de centrale de 500 MW, le rendement thermique peut gagner près de 8 % tout en abaissant les émissions de gaz à effet de serre de 8 %, compte tenu de l'augmentation de capacité de la centrale. Cette valeur se répartit plus ou moins entre les différentes zones du site, selon leur contribution respective à la charge parasite de la centrale → 8.

Ces résultats sont à porter au crédit de la force d'action et de la flexibilité d'ABB dans la recherche de la meilleure solution possible pour doper l'efficacité énergétique des centrales d'énergie.

### Werner Janik

ABB Power Generation  
Mannheim (Allemagne)  
werner.janik@de.abb.com

### Joseph Lauer

ABB Process Automation  
Montréal (Canada)  
joseph.lauer@ca.abb.com

### Photo p. 62

Malgré le fort taux de croissance des renouvelables, leur intégration massive fait toujours l'objet de recherches.



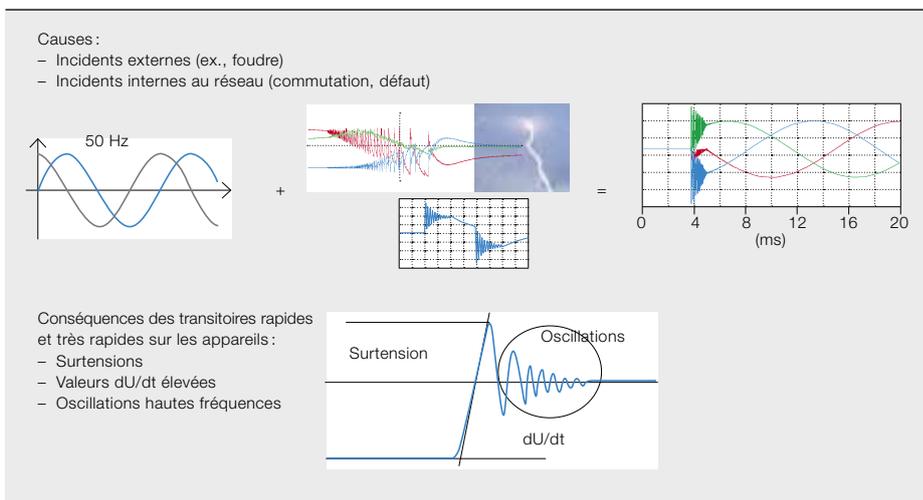
# Protection éclair

ABB aide les transformateurs de distribution à surmonter les tensions transitoires rapides

WOJCIECH PIASECKI, MAREK FLORKOWSKI, MAREK FULCZYK, PAWEL KLYS, EGIL STRYKEN, PIOTR GAWAD – Le coup de foudre n'est pas du goût de tout le monde, et encore moins des appareils électriques! Ce que redoute l'équipement, ce n'est pas tant le pic de tension qui peut l'endommager mais la montée rapide et brutale de la tension. Il arrive que ces transitoires, nettement supérieurs aux valeurs normalisées, atteignent plusieurs mégavolts (MV) en quelques microsecondes ( $\mu$ s). Or l'isolant des enroulements des transformateurs et des moteurs n'a pas vocation à

résister à ces phénomènes et risque des dégâts irréremédiables en l'absence de protection supplémentaire. Même si chaque appareil peut supporter des hausses de tension normales, celles-ci sont responsables de 35 % des ruptures diélectriques du matériel électrique [1]. Première solution: revoir entièrement la conception du matériel pour le rendre plus endurant. La seconde, plus simple, consiste à ajouter un composant de protection contre ces ondes de choc, qui n'affectera pas le fonctionnement normal. Telle est l'option retenue par ABB.

## 1 Transitoires dans les réseaux électriques



Dans les réseaux électriques, les transitoires produisent des surtensions et des oscillations qui se superposent aux tensions et courants de phase.

épreuve l'isolant haute tension, avec un risque de claquages, d'effet de couronne ou de décharges partielles → 2.

n'est pas une protection suffisante pour les transformateurs de distribution standard [4].

Les composantes hautes fréquences du spectre de tension de choc → 1 entraînent une très grande dispersion de la tension, engendrant des contraintes locales sur le système d'isolant bien supérieures à celles subies en fonctionnement normal. De plus, les structures internes complexes des appareils électriques s'apparentant à des circuits multi-résonants, les hautes fréquences risquent aussi d'entraîner une amplification locale. Ces contraintes peuvent alors fortement entamer la durée de vie de l'appareil et provoquer des courts-circuits internes.

La tension de choc que peut supporter le matériau isolant dépend largement du temps de montée de l'onde, facteur généralement pris en compte lors du choix de l'isolant d'un moteur électrique. L'isolant de type sec des machines électriques tournantes alimentées en haute fréquence par des convertisseurs électroniques requiert une attention particulière. Leurs constructeurs spécifient souvent les limites admissibles en amplitude de la tension de choc et les temps de front correspondants. Le principal danger provient des surtensions dont le temps de montée est inférieur à  $1 \mu\text{s}$  [2], entraînant une distribution initiale non linéaire de la tension le long du bobinage. Cette dispersion met à rude

Les transformateurs de distribution n'échappent pas à l'exigence croissante d'une meilleure tenue au coup de foudre. La solution : une exécution spéciale des enroulements, qui augmente inévitablement les coûts de conception et de fabrication. Les transformateurs exposés à de fréquentes décharges atmosphériques sont tout particulièrement visés. Les gestionnaires de réseaux réclament souvent la conformité à une norme d'essai draconienne qui soumet les transformateurs à des surtensions à front raide : la norme finlandaise SFS 2646 [3] stipule une élévation de tension ( $dU/dt$ ) de  $2 \text{ MV}/\mu\text{s}$  et l'installation d'un éclateur de protection contre les surtensions à proximité du transformateur. Or le temps de réponse d'un éclateur étant relativement long, la tension aux bornes du transformateur peut (en conditions de test) atteindre des niveaux nettement supérieurs au niveau d'isolement au choc (« tension de choc ») de l'appareil. De plus, la  $dU/dt$  élevée de la forme d'onde entraîne une très grande dispersion initiale de la tension dans un enroulement classique et donc une sollicitation locale excessive du système d'isolant → 3. Les essais confirment que l'éclateur

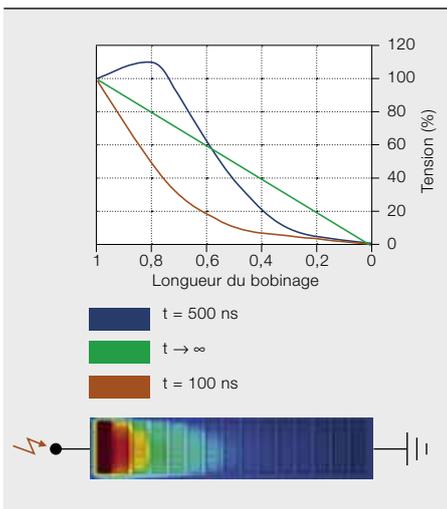
La solution habituelle consiste à modifier la conception des enroulements en leur ajoutant des écrans électrostatiques pour lisser la distribution de tension initiale ; si elle évite les contraintes excessives imposées à l'isolant par des valeurs de  $dU/dt$  élevées, elle complique la conception et la fabrication du transformateur. De plus, la surtension de crête atteignant tout de même l'enroulement du transformateur, l'isolant doit être dimensionné de façon à supporter les surtensions supérieures à la tension de choc normale.

**Protection par filtre série SmartChoke**  
ABB évite ce développement spécifique en installant, en amont de l'appareil à protéger, un filtre série (souvent appelé « bobine ») qui fournit une caractéristique

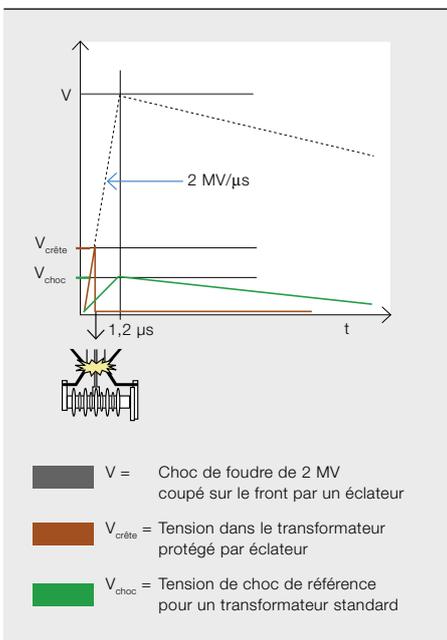
Le principal danger provient des surtensions dont le temps de montée est inférieur à  $1 \mu\text{s}$ , entraînant une distribution initiale non linéaire de la tension le long du bobinage.

impédance-fréquence appropriée → 4. Ainsi, le dispositif est quasiment transparent à 50/60 Hz tout en éliminant les composantes de très hautes fréquences.

## 2 Distribution initiale non linéaire de la tension le long du bobinage

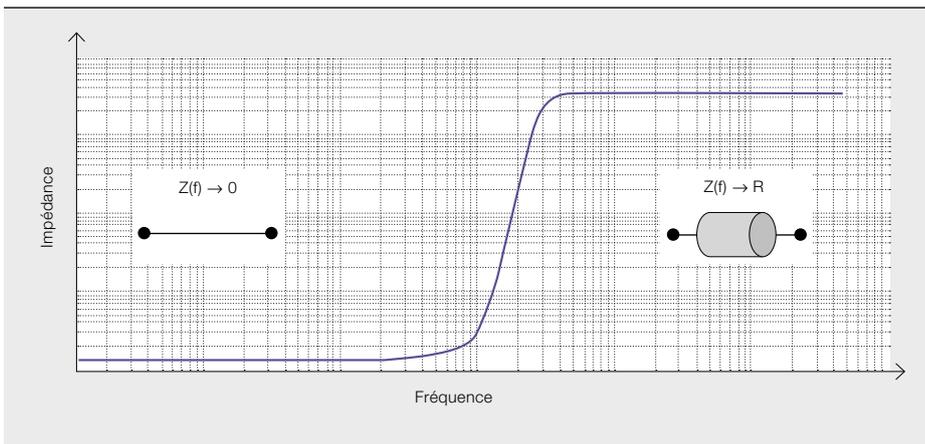


## 3 Impact d'un choc de foudre coupé sur le front dans un transformateur



La forme d'onde de tension de choc normale (en vert) sert de référence.

## 4 Représentation idéale de la caractéristique impédance-fréquence de la bobine série



Des essais ont prouvé que cette solution réduisait efficacement la  $dU/dt$  résultant de transitoires associés aux phénomènes de réamorçage et de préamorçage dans un disjoncteur. Le filtre externe monté en série, couplé à un petit condensateur shunt, ramène  $dU/dt$  à un niveau sûr tout en supprimant les oscillations haute fréquence qui suivent habituellement ces transitoires [5].

Ce dispositif offrant une excellente réduction des transitoires  $dU/dt$  induits par la commutation, ABB s'est demandé si pareille approche ne pouvait pas aussi servir à atténuer les transitoires  $dU/dt$  hachés de choc de foudre, qui sont le lot des transformateurs de distribution montés sur poteau. ABB a de surcroît cherché à intégrer le dispositif au transformateur.

Le filtre série offre ainsi une alternative aux enroulements spéciaux assortis d'écrans électrostatiques pour égaliser la distribution de tension aux hautes fréquences. Combinée à la capacité propre du transformateur (à haute fréquence, la caractéristique d'un enroulement peut être représentée par sa capacité de surtension), la bobine série forme un filtre passe-bas. Cette capacité varie selon le type et la taille de l'appareil (de un à quelques nanofarads par phase pour les transformateurs à huile).

On peut ensuite optimiser la réponse en fréquence de ce filtre par une sélection

judicieuse des valeurs  $R$  et  $L$ . Il faut en outre vérifier le bon comportement de la bobine en régime normal de fonctionnement et sa tenue à l'essai de court-circuit.

Selon le rapport entre  $R$ ,  $L$  et  $C$ , la réponse du circuit peut être apériodique ou comprendre des composantes oscillatoires. Si la résistance est inférieure à la valeur critique  $R_c$ , la composante périodique est nulle et la tension de sortie est une combinaison de fonctions exponentielles.

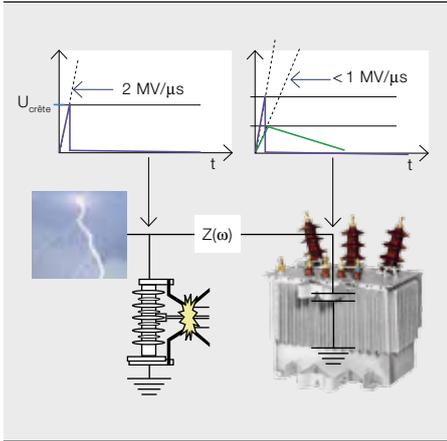
Le choix d'une valeur appropriée pour la résistance d'amortissement est donc crucial si l'on veut faire chuter  $dU/dt$  tout en évitant les dépassements et oscillations de tension à l'aval de la bobine → 5.

Dans ce cas, la capacité  $C$  équivaut à la capacité phase-terre du transformateur. Les limites de cette capacité pour une classe donnée de transformateur étant connues, on peut optimiser les valeurs de  $R$  et  $L$  pour englober tous les trans-

**Montée en série à l'amont de l'équipement à protéger, la bobine fournit une caractéristique impédance-fréquence appropriée.**

formateurs types d'une catégorie. La figure → 3 illustre la situation idéale où un éclateur coupe un choc de foudre de 2 MV. L'équipement non protégé (transformateur sur poteau, par exemple) subi-

**5 Protection du transformateur de distribution contre les valeurs de dU/dt élevées par filtre série**



**6 Traversée de transformateur avec filtre SmartChoke intégré**

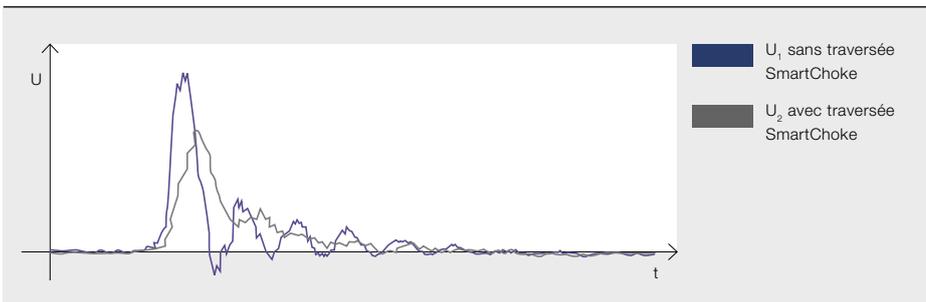


rait une tension phase-terre à une valeur de crête supérieure à 270 kV avec une dU/dt de 2 MV/μs. Lorsque la bobine série est montée en amont de l'appareil à protéger, on observe une réduction non seulement de dU/dt mais aussi de la valeur crête de la tension de choc atteignant le transformateur.

**Transformateur protégé par SmartChoke**

Pour accroître la protection contre les transitoires dU/dt élevés, ABB a intégré la bobine SmartChoke aux traversées de ses nouveaux transformateurs de distribution → 6; ainsi, les forts transitoires dU/dt sont filtrés avant d'atteindre l'enroulement.

**7 Mesure expérimentale de la réduction des surtensions et dU/dt**



Les paramètres de cette bobine encastree dans les traversées de transformateurs moulées en résine époxyde sont

**8 Transformateur ABB protégé par SmartChoke et résistant à des valeurs dU/dt élevées.**

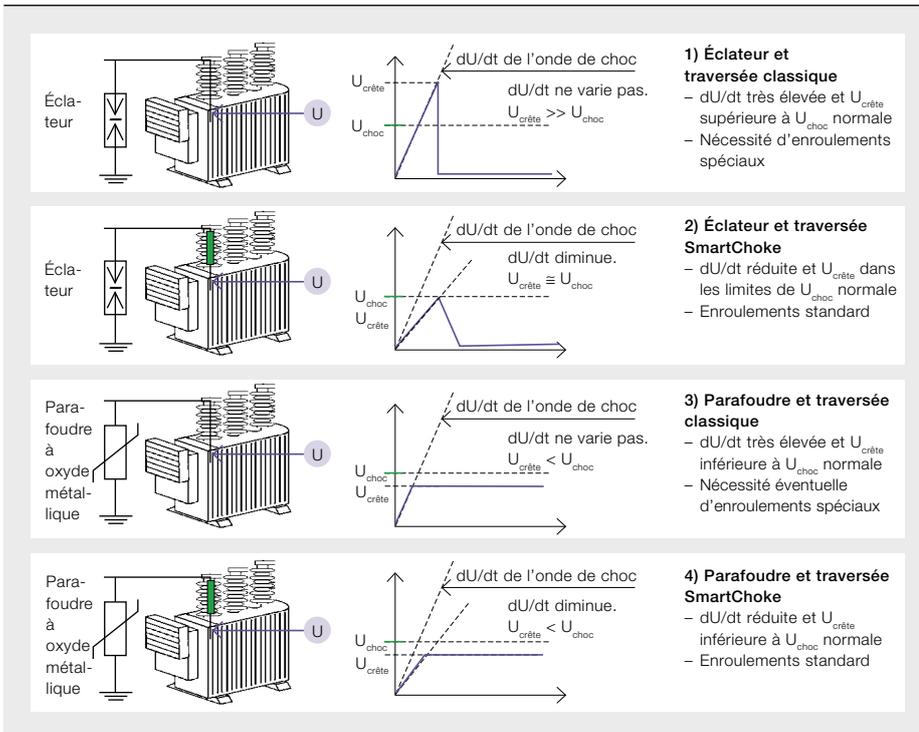


**Le choix d'une valeur appropriée pour la résistance d'amortissement est crucial pour réduire au maximum dU/dt.**

sélectionnés de façon qu'un même type de traversée serve à protéger toutes les tailles classiques de transformateurs de distribution sur poteau.

Des essais ont montré que la réduction de dU/dt est plus du double de celle obtenue avec des traversées standard. La surtension de crête a aussi beaucoup diminué → 7.

Le laboratoire haute tension de l'université de technologie d'Helsinki à Espoo (Finlande) a certifié la conformité SFS 2646 d'un transformateur à traversée SmartChoke → 8. Les essais ont démontré que le transformateur à enroulements classiques et bobines intégrées aux traversées pouvait, lorsqu'il était en outre protégé par un éclateur 2 x 40 mm, supporter en toute sécurité un choc de foudre de 2 MV/μs.



Des essais ont montré que la réduction de dU/dt est plus du double de celle obtenue avec des traversées standard.

**Protection renforcée**

L'utilisation d'une bobine en amont de l'appareil à protéger offre une alternative intéressante à la modification complexe de l'appareil. Même si la bobine diminue dU/dt et, par conséquent, la valeur crête de l'onde coupée sur le front, rappelons que sa fonction première est de réduire la dU/dt d'un transitoire occasionné par un choc de foudre. Ce dispositif vient donc en complément de la protection classique par éclateur ou parafoudre à oxyde métallique → 9.

**Wojciech Piasecki**

**Marek Florkowski**

**Marek Fulczyk**

ABB Corporate Research

Cracovie (Pologne)

wojciech.piasecki@pl.abb.com

marek.florkowski@pl.abb.com

marek.fulczyk@pl.abb.com

**Paweł Kłys**

ABB Power Products, Distribution Transformers

Lodz (Pologne)

pawel.klys@pl.abb.com

**Egil Stryken**

ABB Power Products, Distribution Transformers

Drammen (Norvège)

egil.stryken@no.abb.com

**Piotr Gawad**

ABB Power Products, Apparatus

Przasnysz (Pologne)

piotr.gawad@pl.abb.com

**Bibliographie**

[1] Agrawal, K. C., *Industrial Power Engineering and Applications Handbook*, Newnes, 2001.

[2] IEEE Working Group, « Impulse voltage strength of AC rotating machines », *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100(8), p. 4041–4052, août 1981.

[3] Norme finlandaise SFS 2646, *Pole mounted substation*, 29 juin 1987.

[4] Burrage, L. M., Shaw, J. H., McConnell, B. W., « Distribution transformer performance when subjected to steep front impulses », *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 5(2), avril 1990.

[5] Glinkowski, M., Piasecki, W., Florkowski, M., Fulczyk, M., Arauzo, F., « SmartChoke – Protecting power equipment from fast transients », *IEEE PES Transmission and Distribution Conference*, Chicago (États-Unis), mai 2008.



# Valeurs partagées

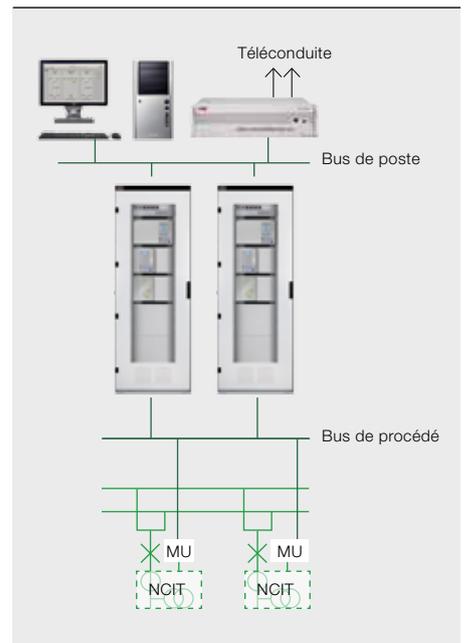
ABB installe le premier bus de procédé conforme à la norme CEI 61850-9-2 de communication dans les postes électriques

STEFAN MEIER – La norme internationale CEI 61850, adoptée en 2004, a marqué une nouvelle ère technologique dans la communication et l'interopérabilité des systèmes d'automatisation de postes ; elle confirme aujourd'hui son avancée avec une partie 9-2 consacrée à l'échange de valeurs analogiques échantillonnées sur Ethernet. En intégrant cette technologie à ses automatismes de postes, ABB capitalise sur plus de 10 ans d'expérience dans les

capteurs de courant et de tension bénéficiant des plus récents progrès de la communication entre postes. Il est désormais possible de raccorder des équipements primaires haute tension (HT) aux dispositifs de protection, de surveillance et de commande éprouvés d'ABB en vue d'optimiser la fiabilité et la disponibilité des postes. ABB emboîte le pas de la CEI 61850-9-2 LE avec la modernisation d'un poste mis en service en 1999.

Un bus de procédé véhicule les données échangées entre équipements primaires (transformateurs de mesure, par exemple) et appareillages secondaires (IED<sup>2</sup>) d'un système d'automatisation de postes. Ce réseau optique achemine des valeurs analogiques (mesures de courant et de tension) mais aussi des données numériques (indications de position de l'appareillage) et des commandes d'ouverture/fermeture des disjoncteurs et sectionneurs, lesquelles ne font toutefois pas partie des spécifications habituelles d'un bus de procédé. Dans les postes classiques, les liaisons sont encore aujourd'hui réalisées en fil à fil, sur câblage cuivre. La fibre optique a le double avantage d'éviter ces grandes longueurs de câble et d'accroître la sécurité de fonctionnement des équipements en isolant le primaire du secondaire → 1.

## 1 Architecture de communication d'un système de contrôle-commande de poste électrique



Les capteurs ELK-CP sont constitués de bobines de Rogowsky<sup>3</sup> redondantes pour la mesure du courant et de deux diviseurs capacitifs indépendants pour la mesure de la tension. L'absence d'huile en fait un équipement écologique et extrêmement sûr. La redondance totale des capteurs (électronique comprise) donne deux systèmes de protection parallèles et radicalement indépendants, qui renforcent la disponibilité du secondaire. La possibilité de remplacer l'électronique des capteurs au cas par cas, sans avoir besoin d'arrêter tout le système, écourte et sécurise les réparations, sans le risque de manipuler des pièces sous tension → 2.

des équipements secondaires des postes hybrides, dont les instruments de terrain reliés au bus de procédé. Au centre des priorités figuraient la mise en conformité avec la normalisation internationale et, plus particulièrement, l'implantation d'un bus de procédé permettant de transférer les valeurs analogiques échantillonnées, selon la CEI 61850-9-2 LE → 3.

La mise en service de six premiers postes d'extérieur intégrant à la fois des transformateurs de mesure non conventionnels « NCIT<sup>1</sup> » et un « bus de procédé » CEI 61850 d'ABB, précurseur du domaine, remonte à 1999. Cette technologie de postes hybrides, destinée à l'énergéticien australien Powerlink Queensland, s'appuyait sur les modules de coupure et de connexion intelligents

Cette première mondiale, confiée à ABB pour un poste électrique iPASS, est en bonne voie.

### Le bus CEI 61850-9-2 LE

La CEI 61850 normalise l'exécution des fonctions de contrôle-commande et protection, et des services de communication entre les différents équipements raccordés au réseau local du poste. C'est le premier référentiel international à soutenir et à pérenniser l'interopérabilité d'IED de constructeurs différents. Sa mise en œuvre gagne rapidement du terrain<sup>4</sup>.

ABB a joué un rôle important dans l'élaboration de la norme et contribue encore de

## La publication de la CEI 61850 ouvre un nouveau chapitre sur la description des fonctionnalités, échanges et interfaces entre équipements de postes électriques.

iPASS d'ABB. L'électronique intégrée aux commandes du disjoncteur, du sectionneur et du sectionneur de terre des modules iPASS pouvait communiquer à l'aide d'un bus de procédé optique propriétaire. Ces modules étaient en outre équipés du capteur de tension et de courant ELK-CP d'ABB, également raccordé au bus de procédé.

Plus de 300 de ces capteurs ABB équipent aujourd'hui les postes de Powerlink et aucune défaillance des convertisseurs primaires n'a été constatée en plus de dix ans de service. Ce retour d'expérience permet d'établir la

de bon fonctionnement (MTBF) de l'électronique de mesure à près de 300 ans, preuve de l'extraordinaire fiabilité et disponibilité de l'instrumentation, même sous le rude climat australien!

### Chantier de modernisation

Powerlink s'est lancé dans un projet de mise à niveau incluant le remplacement

#### Notes

- 1 *Non Conventional Instrument Transformer*
- 2 *Intelligent Electronic Device*: dispositif électronique intelligent de protection et contrôle-commande d'un poste électrique
- 3 Dispositif de mesure du courant alternatif constitué d'un enroulement toroidal traversé en son centre par un câble conducteur; la sortie du capteur délivre une tension proportionnelle à la dérivée du courant.
- 4 Cf. *Special Report IEC 61850, Revue ABB, 2010.*

près à sa mise au point et à son déploiement. Depuis l'installation du premier projet multiconstructeur au monde en 2004, ABB a fourni plus de 1 000 systèmes communiquant sur bus de poste conforme CEI 61850, dans quelque 70 pays.

La consécration de la CEI 61850 au niveau poste, pour le transfert de données entre équipements de tranche, a donné un coup d'accélérateur aux communications orientées procédé, entre capteurs/actionneurs et appareils de conduite et protection. En complétant la description de tous les échanges utiles de signaux à temps critique entre procédé et tranche (niveaux 0 et 1 de la hiérarchie fonctionnelle du poste), la partie 9-2 de la norme vise principalement l'échange de mesures échantillonnées sur réseau Ethernet.

Concrètement, la CEI 61850 stipule le transfert obligatoire d'échantillons analogiques par le biais de concentrateurs «MU» (*Merging Units*) qui corrélient et fusionnent les données analogiques provenant de chaque phase ou point de mesure du poste avant de les transmettre sur Ethernet aux interfaces d'accès aux équipements de protection et contrôle-commande. Avec son «CP-MUP» conforme CEI 61850, ABB est le premier à se doter d'un concentrateur certifié par l'association UCA<sup>5</sup>.

La CEI 61850-9-2 autorise l'échange normalisé de signaux provenant d'un instrument de mesure non conventionnel; au passage, elle reprend les nombreux avantages de la technologie NCIT: précision exceptionnelle sur toute l'étendue de mesure, compacité et sécurité surclassant celle des équipements classiques.

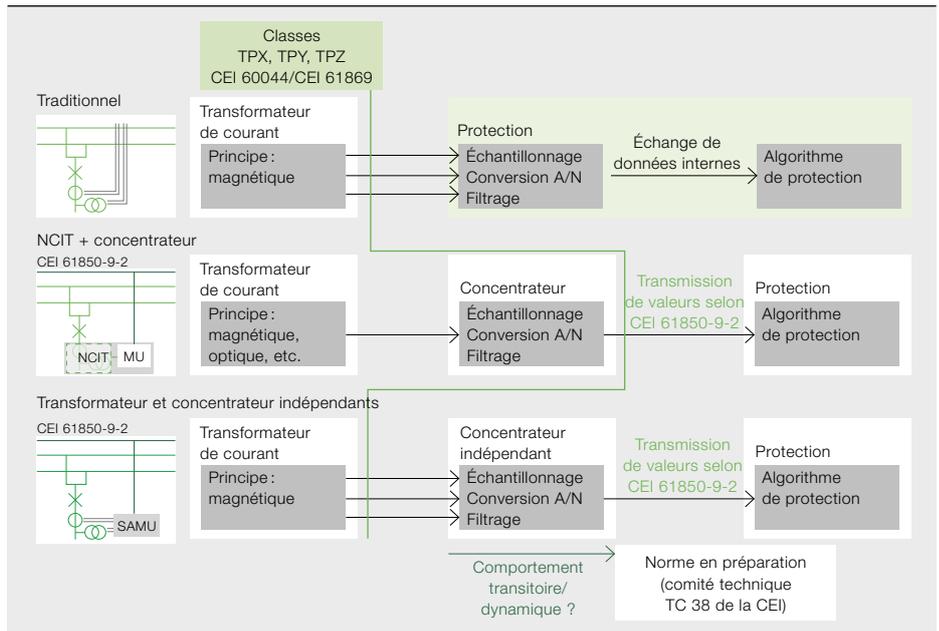
Pour faciliter la mise en conformité avec la partie 9-2 de la norme, l'UCA a élaboré une « directive de mise en œuvre de l'interface numérique aux transformateurs de mesure » qui donne des compléments d'information sur la norme et en tire une version allégée, désignée CEI 61850-9-2 «LE» (*Light Edition*), faisant aujourd'hui autorité.

Les concentrateurs étant spécialement conçus pour un type précis de transformateur de mesure non conventionnel, ils constituent une seule entité que l'on peut développer et tester dans sa forme globale, ce qui permet de définir le comportement de toute la chaîne de mesure au niveau du port CEI 61850.

## 2 Capteurs combinés (courant/tension) ELK-CP3 et concentrateur CEI 61850-9-2 LE



## 3 Normalisation de la réponse en régime transitoire et des interfaces de communication



Ils se distinguent en cela des concentrateurs indépendants «SAMU» (*Stand-Alone Merging Units*) raccordés à des TC<sup>6</sup> et TT<sup>7</sup> classiques, qui échantillonnent les signaux analogiques pour les transmettre au bus de procédé. Or cette conversion analogique-numérique joue inévitablement sur la réponse en régime transitoire de la chaîne de mesure. Le comportement dynamique du SAMU échappe au domaine d'application de la CEI 61850 mais les comités techniques et groupes d'études de la CEI et du Cigré s'y intéressent; leurs travaux déboucheront sur une nouvelle mouture de la norme CEI 61869 sur les transformateurs de mesure → 3.

### Migration réussie

Dans le projet de modernisation de Powerlink, ABB met à profit sa longue expérience des transformateurs de mesure non conventionnels pour remplacer

La fibre optique évite les grandes longueurs de câble cuivre et accroît la sécurité de fonctionnement des équipements.

### Notes

- 5 Association à but non lucratif regroupant des utilisateurs et constructeurs du monde entier pour les aider à développer des normes de communication temps réel destinées à des secteurs industriels partageant les mêmes exigences.
- 6 Transformateur de courant
- 7 Transformateur de tension

#### 4 Système d'automatisation de poste dans une configuration à un disjoncteur et demi avec l'une des deux protections redondantes

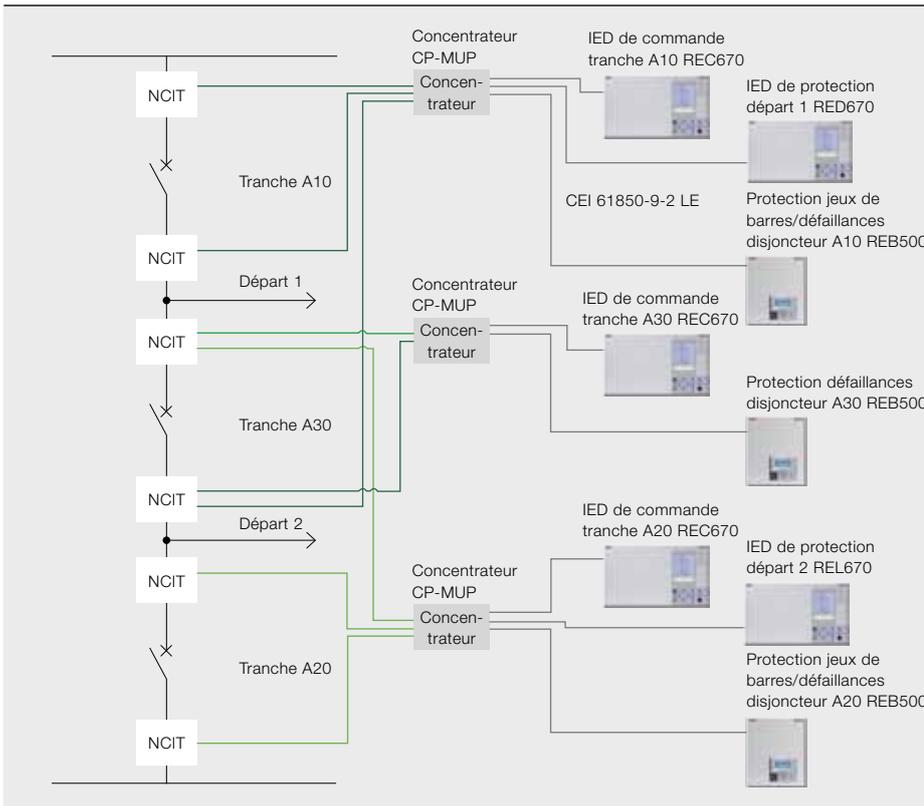


ABB a joué un rôle important dans l'élaboration de la norme et participe encore activement à sa mise au point et à son déploiement.

le bus de procédé d'origine par la technologie CEI 61850. Le nouveau système conforme aux exigences normatives gèrera les communications aux niveaux procédé et poste.

Ce sera l'occasion pour ABB d'utiliser son système d'automatisation de postes SAS600, des IED de la gamme Relion® 670, ainsi que sa protection de jeux de barres et contre les défaillances du disjoncteur à architecture décentralisée REB500. Tous ces équipements se raccorderont au bus de procédé CEI 61850-9-2 LE pour recevoir les mesures échantillonnées des concentrateurs CP-MUP d'ABB, lesquels s'interfaceront aux capteurs existants par une nouvelle électronique d'instrumentation. Les modifications de l'appareillage primaire seront ainsi réduites au minimum → 5.

Un système d'automatisation de postes avec schéma à un disjoncteur et demi, semblable à celui utilisé pour la modernisation du système secondaire de notre projet australien, est illustré en → 4. Grâce à la redondance intégrée des transformateurs de mesure non conventionnels d'ABB, un second système totalement indépendant de concentrateurs et d'IED

permet de satisfaire aux exigences de redondance du client.

Des mesures et contrôles supplémentaires ont été réalisés pour valider le bien-fondé de cette nouvelle technologie de composants et concepts applicables au projet Powerlink.

Plusieurs installations pilotes équipées de transformateurs de mesure non conventionnels et d'IED raccordés au bus de procédé ont été mises en service pour se roder à cette nouvelle norme de communication en conditions réelles. Citons notamment la mise à niveau d'un départ d'un poste Powerlink de 275 kV avec une nouvelle électronique de capteurs, des concentrateurs et des IED de protection Relion® d'ABB. Au-delà de l'aide apportée au client pour gagner en confiance et en savoir-faire, l'installation a aussi fourni des informations cruciales sur la stabilité et la longévité des équipements pilotes par rapport aux dispositifs conventionnels ou non.

Tous les équipements de protection et de contrôle-commande d'ABB subissent de rigoureux tests de conformité produits et système, au sein du centre de validation certifié UCA d'ABB<sup>8</sup>. Le concept a lui aussi été testé sur le terrain pour le projet de mise à niveau du système secondaire de Powerlink, sous la houlette des experts des deux partenaires. Le comportement du système dans diverses conditions de défaut fut l'objet d'une attention toute particulière.

Le système a montré une fiabilité conforme aux spécifications, sans jamais réagir à l'excès ni provoquer de déclenchements intempestifs qui, s'ils survenaient, pourraient entraîner la paralysie du réseau électrique.

Durant la simulation des diverses conditions de défaillance potentielles, la surveillance continue et détaillée de tous les composants du SAS600 fut capitale pour identifier rapidement et précisément les défauts. Ce suivi permanent réduit énormément les besoins de maintenance périodique et facilite beaucoup les interventions en guidant le personnel du poste dans la localisation précise des défauts.

#### Note

<sup>8</sup> Lire aussi « Verified and validated: ABB has its own verification and validation center », *Special Report IEC 61850, Revue ABB*, p. 23-28, 2010.



### Un bus éprouvé et évolutif

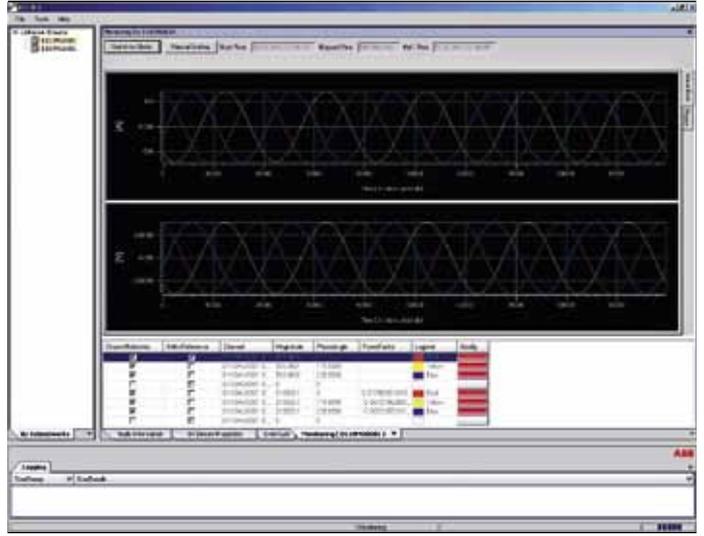
Le remplacement croissant du câblage cuivre par la fibre optique et la définition d'un modèle d'information CEI 61850 pour les échanges de données entre équipements de poste ouvrent de nouveaux débouchés aux outils de test intelligents qui facilitent la mise en service et la maintenance des systèmes d'automatisation.

ABB n'a pas tardé à proposer sa « boîte à outils de diagnostic » intégrée ITT600<sup>9</sup> pour aider les utilisateurs à tirer pleinement parti des avantages de la CEI 61850.

L'analyseur ITT600 masque la complexité sous-jacente de la norme et fournit au personnel chargé des essais et de la maintenance une vue claire des données du système. Il facilite, par exemple, le

importants lorsque les mesures sont fournies par les transformateurs de mesure non conventionnels reliés par liaison optique aux concentrateurs ; le cas échéant, toutes les sorties des TC et TT classiques sont contournées et l'analyse se déroule intégralement sur le réseau CEI 61850-9-2. Partant de sa longue expérience de l'intégration de la CEI 61850 et du développement des outils de test appropriés, ABB développe à l'heure actuelle un analyseur de mesures échantillonnées d'une grande richesse fonctionnelle → 6.

L'analyse d'échantillons sur le bus de procédé prouve tout son intérêt par rapport à la mesure de courant et de tension classique dès qu'il faut accéder aux points de mesure : ces valeurs étant disponibles sur le bus, plus besoin d'accéder aux



composants sous tension ni de court-circuiter et d'ouvrir les bornes du TC ! En connectant le port Ethernet de l'analyseur au bus de procédé ou directement au concentrateur, l'ingénieur de maintenance récupère sans mal la tota-

lité des valeurs échantillonnées. Comparé à l'analyse ampèremétrique ou voltmétrique, l'analyseur CEI 61850-9-2 d'ABB affiche rapidement les données, auparavant inaccessibles en direct : valeurs de courant et de tension de toutes les phases en simultané, diagrammes de phaseurs et détails des télégrammes transmis. Ces informations dressent un véritable bilan

de santé du système tout en signalant, par exemple, les parties en test.

### Évolutivité

En exploitant le plein potentiel du concept de bus de procédé et de sa définition CEI 61850, les données binaires peuvent aussi transiter sur le réseau optique qui relie équipements primaires et IED. L'implantation de modules d'E/S numériques à proximité du primaire permet de s'affranchir quasiment du câblage cuivre, avec l'atout supplémentaire de pouvoir isoler électriquement les niveaux procédé et tranche, et surveiller en continu tous les signaux.

Grâce à une mise en œuvre aboutie de la normalisation CEI 61850, au niveau du poste comme du procédé, et à une expérience de longue date de la technologie des capteurs, ABB bâtit des solutions intelligentes et durables répondant aux exigences de fiabilité, de performance et de sécurité de ses clients qui peuvent ainsi maximiser les profits tirés de leurs actifs.

### Stefan Meier

ABB Power Systems  
Baden (Suisse)  
stefan.meier@ch.abb.com

### Note

- <sup>9</sup> Lire aussi « A testing environment : ABB's comprehensive suite of software testing and commissioning tools for substation automation systems », *Special Report IEC 61850*, *Revue ABB*, p. 29-32, 2010.

## Tous les équipements et systèmes de protection et de contrôle-commande d'ABB subissent de rigoureux tests de conformité dans son centre de validation certifié UCA.

contrôle de cohérence de l'installation et de la description de configuration du poste, ou l'analyse des échanges entre les IED et la conduite du poste.

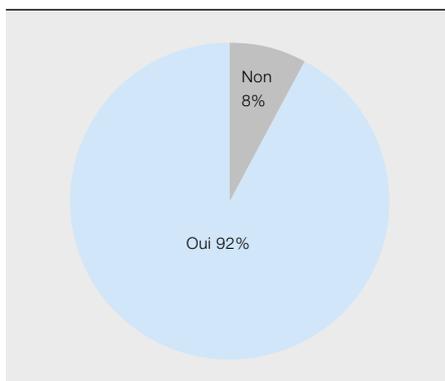
L'introduction du bus de procédé véhiculant les valeurs analogiques échantillonnées a permis d'étoffer cette boîte à outils. Ces ajouts sont particulièrement

# Enquête de satisfaction

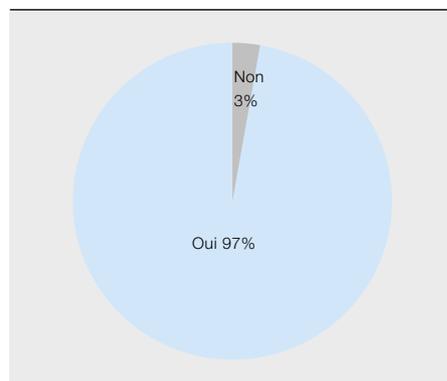
## Le verdict de nos lecteurs

La Rédaction de la *Revue ABB* et toute l'équipe de *ABB Group R&D and Technology* vous remercient d'avoir consacré du temps à notre questionnaire de cet automne. Vos réponses donnent le ton de notre ligne éditoriale. Nous sommes ravis de voir que la majorité de nos lecteurs s'intéresse aussi aux articles qui dépassent leur domaine d'expertise et fait maints usages de la *Revue ABB*, preuve de sa pluridisciplinarité! Même si l'enquête fut diffusée en cinq langues dans le monde entier, nos gagnants viennent d'Extrême-Orient et d'Asie du Sud-Est. Toutes nos félicitations à Gary-Hua Guan (Chine), Barton-XingPing Liu (Chine), Giridhar Sharma (Inde), Sheng Zhang (Chine) et Feni-Nurdiana Masrani (Malaisie), qui recevront chacun une lampe torche solaire et une clé USB 4 Go.

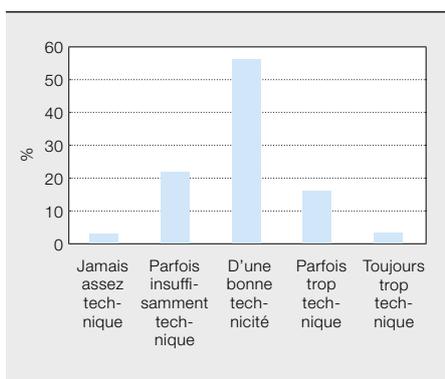
1 Lisez-vous des articles de la *Revue ABB* ne relevant pas de votre ou vos domaine(s) d'expertise ?



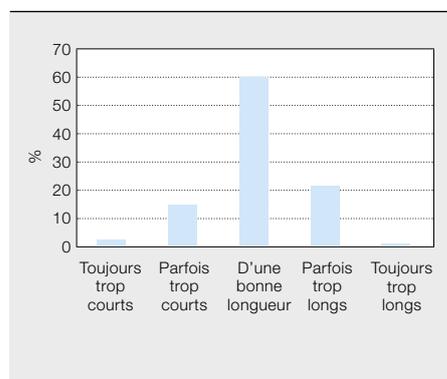
2 Recommanderiez-vous la *Revue ABB* à un collègue ?



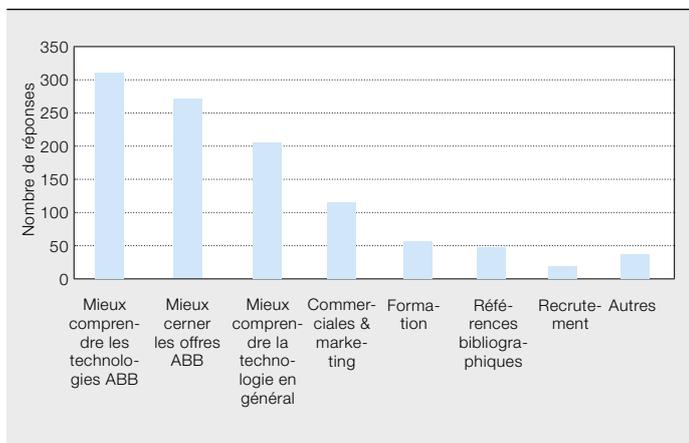
3 Trouvez-vous la *Revue ABB* ?



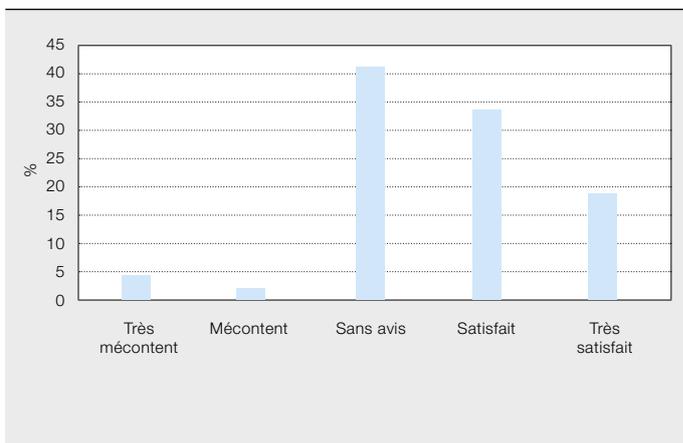
4 Estimez-vous les articles ?



5 À quelles fins utilisez-vous la *Revue ABB* (réponses à choix multiples) ?



6 Le premier numéro de 2010 a été révisé pour mieux refléter la stratégie de marque d'ABB. Vous en êtes :



Nombre total de répondants : 494

## Rédaction

### Peter Terwiesch

Chief Technology Officer  
Group R&D and Technology

### Clarissa Haller

Head of Corporate Communications

### Ron Popper

Head of Corporate Responsibility

### Eero Jaaskela

Head of Group Account Management

### Friedrich Pinnekamp

Vice President, Corporate Strategy

### Andreas Moglestue

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

## Édition

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

ABB Technology Ltd.

ABB Review/REV

Affolternstrasse 44

CH-8050 Zürich

Suisse

La Revue ABB paraît quatre fois par an en anglais, français, allemand, espagnol et chinois. Elle 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 de la revue.

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 ©2011

ABB Asea Brown Boveri Ltd.

Zurich (Suisse)

## Impression

Vorarlberger Verlagsanstalt GmbH  
AT-6850 Dornbirn (Autriche)

## Maquette

DAVILLA Werbeagentur GmbH  
AT-6900 Bregenz (Autriche)

## Traduction française

Dominique Helies  
dhelies@wanadoo.fr

## Avertissement

Les avis exprimés dans la présente publication n'engagent que leurs auteurs et sont donnés uniquement à titre d'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](http://www.abb.com/abbreview)

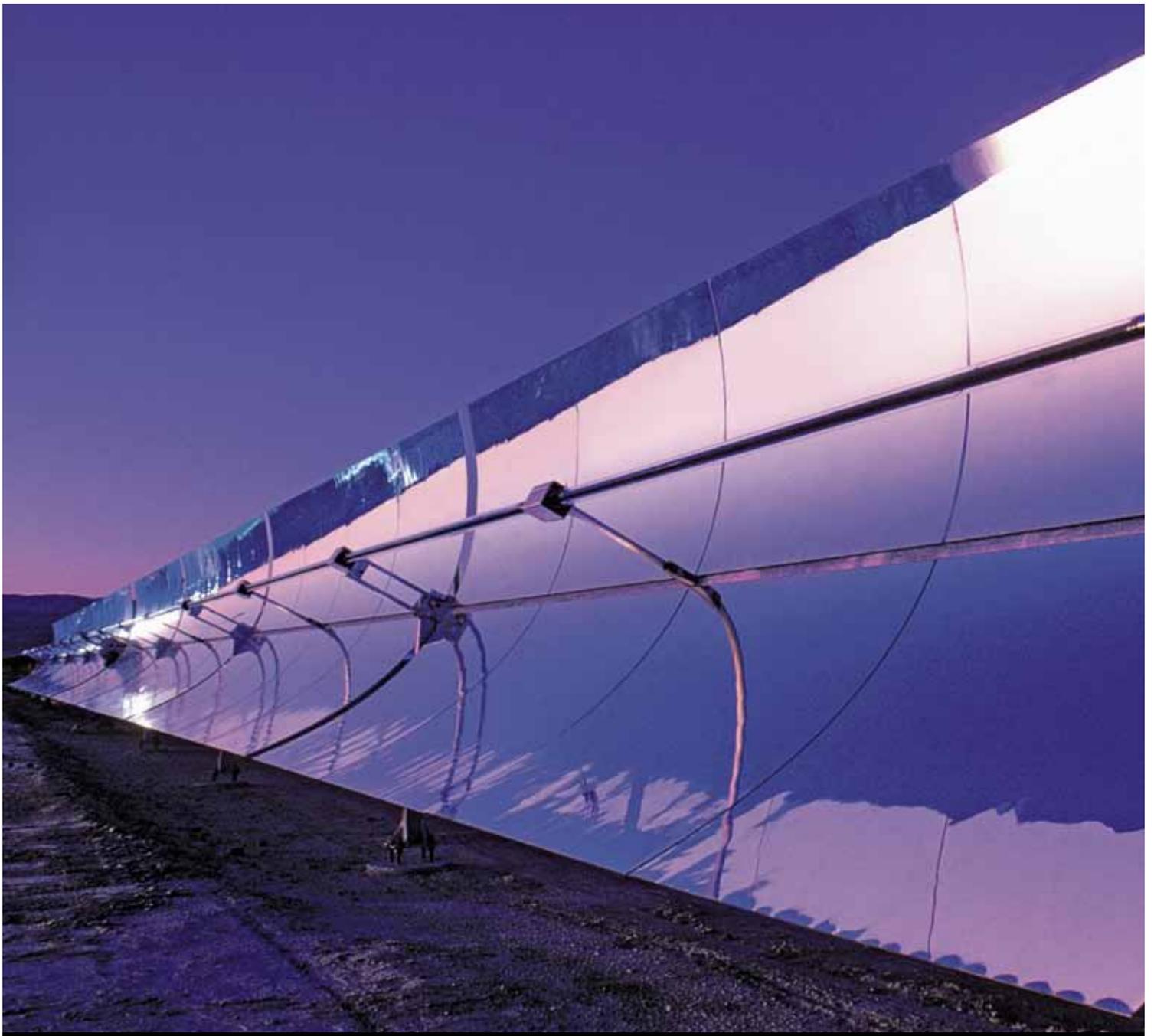


Dans le numéro 2/11

# Bonnes conduites

Selon les estimations de l'EIA (*Energy Information Administration*), institut de statistiques du ministère de l'Énergie des États-Unis, le pétrole représente environ 36 % de l'énergie primaire consommée dans le monde et en constitue la première source ; le gaz naturel occupe la 3<sup>ème</sup> place (derrière le charbon) avec environ 23 %. Ces deux hydrocarbures couvrent près de 60 % des besoins énergétiques de la planète, soit l'équivalent de plus de 100 millions de barils/jour. Garantir la continuité de l'approvisionnement est primordial pour l'économie, l'industrie et d'innombrables aspects de l'activité humaine. Malgré l'essor des énergies renouvelables et du nucléaire, et les progrès de l'efficacité énergétique, la demande de pétrole et de gaz devrait poursuivre durablement sa croissance.

ABB fournit de nombreuses technologies qui consolident la chaîne de valeur pétro-gazière et l'assistent dans la quasi-totalité de ses opérations : exploration, extraction, transformation et transport. Le numéro 2/2011 de la *Revue ABB* se penchera sur certaines contributions du Groupe à cette passionnante filière.



## Raccorder l'énergie renouvelable au réseau ?

L'électricité produite par l'eau, le soleil et le vent est plus abondante dans les zones reculées comme les montagnes, les déserts ou la haute mer. Les technologies de l'énergie et de l'automation d'ABB permettent d'approvisionner environ 70 millions de personnes en raccordant l'énergie renouvelable aux réseaux électriques, parfois sur de longues distances. Nos efforts pour exploiter cette énergie renouvelable rendent les réseaux électriques plus intelligents et permettent de protéger l'environnement ainsi que de lutter contre le changement climatique. [www.abb.com/betterworld](http://www.abb.com/betterworld)

Naturellement.