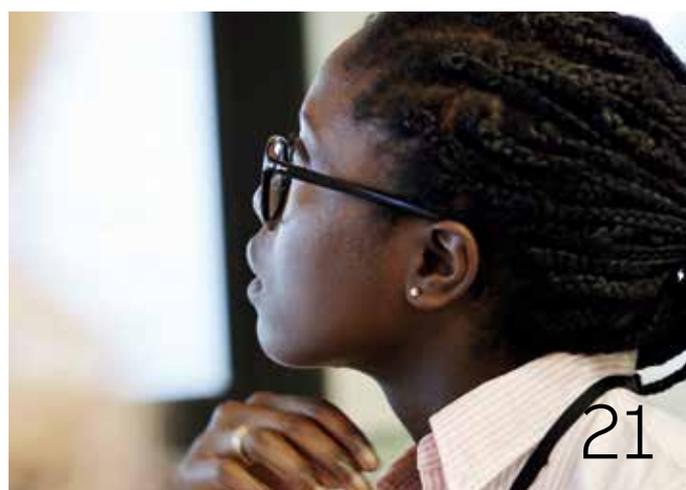


review

03|2018 fr

Algorithmes et matériaux



-
- 08–25 Algorithmes et matériaux
 - 26–43 Mutations
 - 44–61 Numérique et analytique



46

Stabiliser la tension dans l'industrie



14

Isolation thermoplastique



28

TXplore inspecte les transformateurs

Le CCHT prend le large

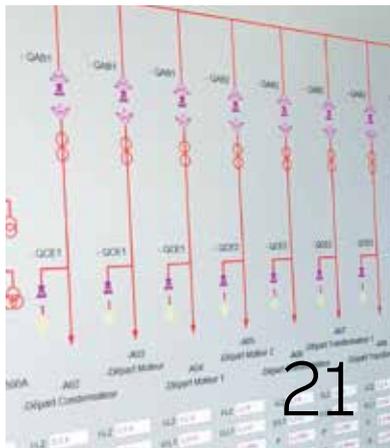


36



Modéliser les onduleurs solaires ABB

Automatiser la distribution électrique



05 Éditorial

Algorithmes et matériaux

- 08 Les FACTS stabilisent le réseau minier
- 14 Isolation thermoplastique
- 21 Automatiser la distribution électrique

Mutations

- 28 TXplore inspecte les transformateurs
- 36 Le CCHT prend le large

Numérique et analytique

- 46 Stabiliser la tension dans l'industrie
- 52 Modéliser les onduleurs solaires ABB
- 58 Sécuriser le numérique

Le mot du moment

- 62 Chiffrement quantique

63 Publication ABB



—
La révolution numérique, portée par la masse de données disponibles et l'éclairage qu'elles apportent, modifie très concrètement la conception et la gestion des actifs industriels. Découvrez dans ce numéro d'*ABB Review* quelques exemples de technologies génératrices de valeur ajoutée pour les clients du Groupe.

Nous restons à l'écoute de vos suggestions sur abb.com/abbreview.

ÉDITORIAL

Algorithmes et matériaux



Chers lecteurs,

L'industrie est à l'aube d'une révolution sans précédent : à la primauté donnée aujourd'hui aux configurations « en dur » des usines et parcs d'équipements succède le règne de la (trans)portabilité des données ou des connaissances sur le procédé. Grâce à la révolution numérique, à l'intelligence artificielle et au déploiement des services dans le Cloud, l'information s'affranchit des contraintes physiques.

Ce numéro d'*ABB Review* s'intéresse à l'apport de l'intelligence numérique dans l'industrie et la science des matériaux : techniques de simulation de pointe appliquées à la conception de produits, inspection et analyse d'équipement par des robots, pilotage avancé de la production, etc.

Si le numérique dope la productivité des entreprises, il les rend hélas plus vulnérables aux cyberattaques. Dans ce domaine aussi, ABB prend les devants afin d'offrir à ses clients le meilleur de la cybersécurité et du chiffrement quantique.

Bonne lecture,

A handwritten signature in red ink, appearing to read 'Bazmi Husain'. The signature is stylized and fluid.

Bazmi Husain
Directeur des technologies



Algorithm et matéri





nes

aux

Les industriels doivent pouvoir s'appuyer sur des technologies à la performance éprouvée pour leurs équipements critiques. La recherche ABB, nourrie de l'analyse des données collectées sur le terrain, développe et teste des matériaux innovants, destinés par exemple à remplacer l'isolant papier des enroulements de transformateur ou à faire disparaître le réducteur mécanique des entraînements de broyeur.

- 08 Les FACTS stabilisent le réseau électrique minier
- 14 Des transformateurs de puissance à isolation thermoplastique
- 21 La distribution électrique goûte aux douceurs de l'automatisation ABB



ALGORITHMES ET MATÉRIAUX

Les FACTS stabilisent le réseau électrique minier

Les mines sont aujourd'hui équipées de gigantesques broyeurs de minerais alimentés en énergie par de tout aussi imposants entraînements sans réducteur. Leurs exploitants privilégiant la montée en puissance de l'existant à la création de nouveaux sites, de plus en plus d'entraînements sollicitent un réseau électrique déjà bien chargé. Les systèmes de transport flexible en courant alternatif FACTS sont LA solution ABB pour remédier à cette instabilité.



Jose Luis Olabarrieta Rubio
ABB Ring Motors
Trapagarán (Espagne)

jose-luis.olabarrieta@es.abb.com

L'industrie minéralurgique utilise plusieurs types de broyeurs : le broyeur à boulets est un cylindre à la paroi interne particulièrement résistante à l'abrasion tournant autour d'un axe horizontal, dans lequel des boulets ou des galets (pierre, métal ou caoutchouc) sont mêlés à la masse à broyer ; entraînés par la rotation, les boulets tombent sur la matière, l'écrasent et la réduisent en poudre. Les broyeurs autogènes (AG) fonctionnent sur



Pablo Eguia
Department of Electrical Engineering, université du Pays basque Lejona (Espagne)

Les entraînements sans réducteur sont des moteurs à haut rendement commandés en vitesse variable, qui constituent la solution la plus performante pour les broyeurs de fortes puissances.

le même principe mais sans corps broyants étrangers : le minerai se broie de lui-même, par chute des fragments les uns sur les autres d'une certaine hauteur et par attrition mutuelle... quitte à ajouter des sphères d'acier si le minerai est trop dur ou abrasif. Le broyage est alors « semi-autogène » (SAG). Si ces différents équipements





01

—
01 Les sociétés minières préfèrent souvent étendre l'existant qu'ouvrir de nouveaux sites. Les dispositifs FACTS d'ABB permettent d'ajouter des machines énergivores, comme les imposants entraînements de broyeurs sans réducteur (photo) qui équipent la mine d'or et de cuivre Esperanza au Chili, sans dégrader la stabilité du réseau électrique local.

peuvent réaliser l'intégralité de l'opération de fragmentation, ils n'en constituent souvent qu'une première étape, relayés par un deuxième étage mettant en œuvre un broyeur à boulets.

Ces mastodontes sont entraînés par trois grands types de machines électriques : asynchrones (réputées bon marché mais de faible rendement du fait des pertes engendrées par le réducteur), synchrones (limitées en puissance à environ 9 MW par pignon), ou moteurs sans réducteur. Les entraînements sans réducteur sont des moteurs synchrones à haut rendement commandés en vitesse variable, capables de développer jusqu'à 30 MW. Ils constituent la solution la plus performante pour les broyeurs de fortes

puissances →1, notamment au regard de leur coût global. Le moteur est alimenté par un cycloconvertisseur qui abaisse directement la fréquence du courant alternatif (CA), sans passer par un circuit continu intermédiaire [1].

Cette configuration a l'immense avantage de supprimer toutes les pièces mécaniques d'un entraînement de broyeur classique (couronne, pignon, réducteur, accouplement, arbre et paliers de moteur), améliorant ainsi la performance énergétique, la fiabilité et l'endurance du système, ainsi que la disponibilité du procédé.

—
02 Consommation de puissances active et réactive au démarrage (1200 s) d'un entraînement de broyeur semi-autogène

—
03 Chute de la tension nominale d'environ 1,4 % sur les bus d'alimentation après démarrage d'un nouveau moteur (1200 s)

Extension

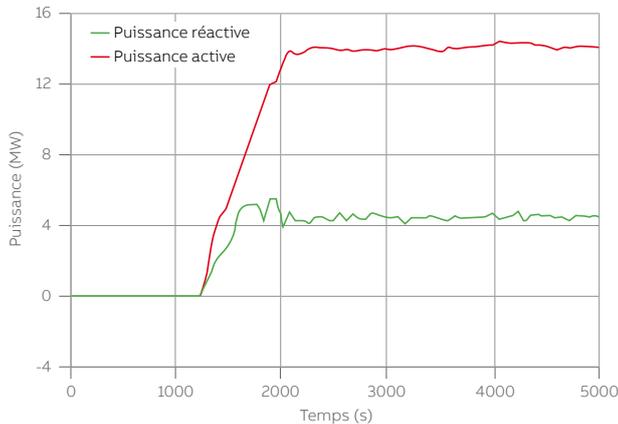
La prospection et l'exploitation d'un nouveau gisement sont des procédures longues et complexes qui obligent à multiplier les études techniques et d'impact, mais aussi les démarches administratives (permis d'exploration, demande de titre minier, déclaration de travaux), autorisations et autres agréments (construction, abattage à l'explosif, etc.). Aussi les sociétés minières préfèrent-elles souvent accroître la productivité de l'existant qu'ouvrir de nouveaux sites. Une mine comporte en général un ou deux broyeurs SAG et deux à quatre broyeurs à boulets ; son extension donne lieu à l'installation d'un équipement supplémentaire de chaque type.

—
Les systèmes FACTS d'ABB reposent sur des dispositifs à électronique de puissance commandables qui augmentent la capacité de transport, la marge de stabilité et les performances dynamiques du réseau.

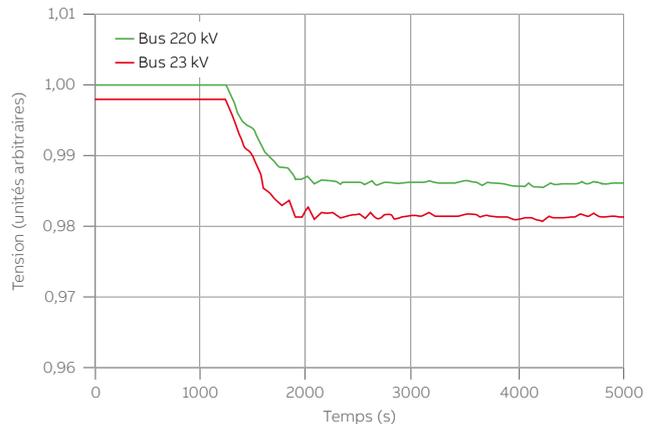
Vulnérabilités du réseau électrique

Il est un critère prépondérant dans l'ajout de nouveaux broyeurs à l'infrastructure en place : la robustesse du réseau électrique, c'est-à-dire sa capacité à maintenir la tension et la fréquence constantes, indépendamment des perturbations de la charge et du système lui-même. Tous les réseaux ne bénéficient pas de générateurs synchrones qui satisfont aux besoins de puissance mais aussi de stabilité de la tension et de la fréquence ; ceux qui en sont dépourvus sont donc naturellement vulnérables aux excursions de fréquence et de tension pouvant survenir à la moindre perturbation (démarrage de moteur, petite variation de charge). Cette fragilité inhérente aux réseaux miniers se manifeste par une puissance de court-circuit réduite (principalement résistive) et un faible rapport résistance/réactance.

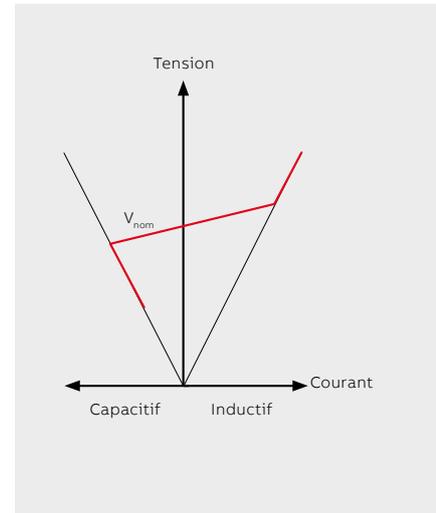
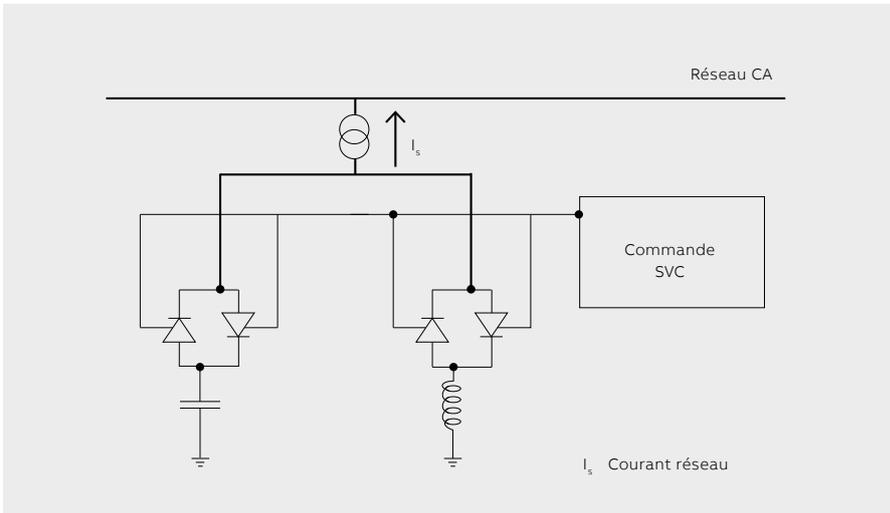
Qui plus est, les mines sont souvent implantées dans des sites reculés en bout de ligne, qui sont autant de « culs-de-sac électriques » à l'alimentation fragile, aléatoire et imprévisible. La consommation de puissance active et réactive des entraînements de broyeurs sans réducteur, des générateurs, des lignes et des transformateurs induit des chutes de tension et une baisse de qualité du courant →2,3. La stabilité en tension est alors capitale pour sécurité et fiabiliser l'approvisionnement électrique [2].



02

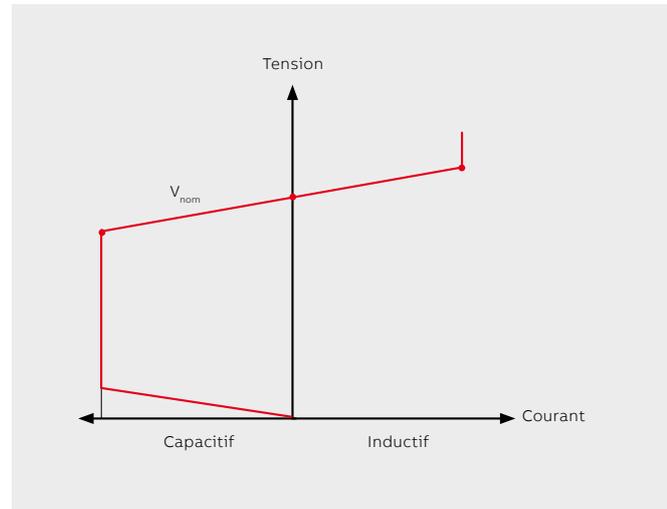
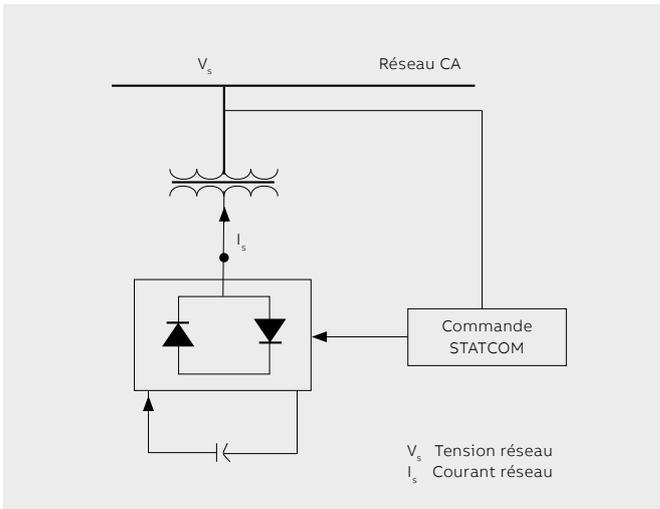


03



04

05



06

07

— 04 Principe de la compensation statique shunt SVC

— 05 Courbe V-I d'un SVC illustrant une régulation en pente autour de la tension nominale V_{nom} , dans la plage de fonctionnement normal définie par les courants inductif I_{Lmax} et capacitif I_{Cmax} du SVC (dépendants de la tension du réseau)

— 06 Principe de la compensation statique shunt STATCOM

— 07 Courbe V-I d'un STATCOM illustrant la fourniture de courants capacitif et inductif (indépendants de la tension du réseau)

Systèmes FACTS

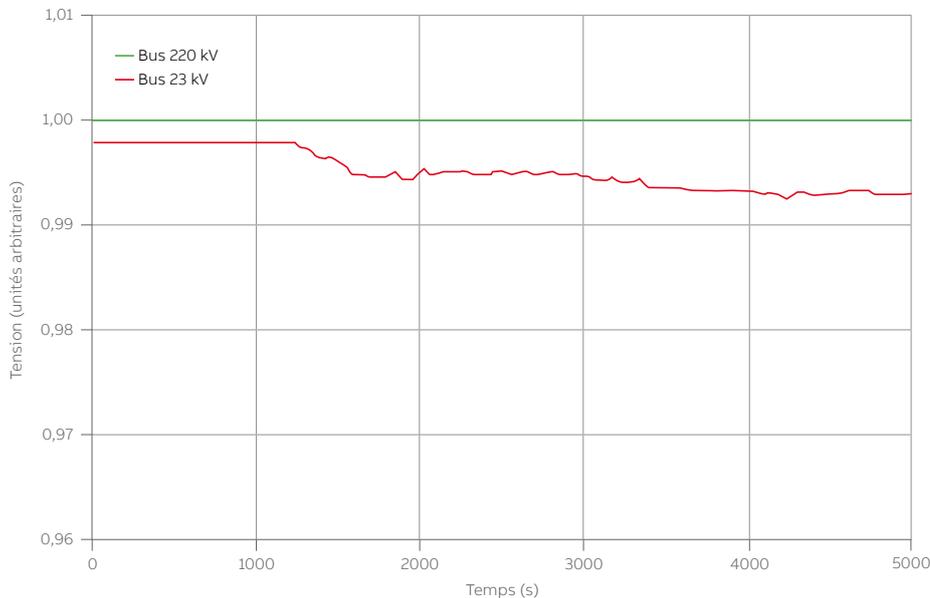
Dans un réseau électrique CA, les capacités de transport sont réduites par des instabilités transitoires et des limites thermiques, de tension et de courant de court-circuit. Les FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*) d'ABB reposent sur des dispositifs à électronique de

SVC et STATCOM sont les compensateurs parallèles les plus utilisés dans le secteur minier.

puissance commandables qui augmentent la capacité de transport, la marge de stabilité et les performances dynamiques du réseau [3-5], et y injectent de la puissance réactive ou inductive.

Au-delà de cette compensation de réactif, les FACTS contribuent à la régulation de la tension et à la maîtrise des transits. Ils sont classés en deux catégories :

- Les compensateurs statiques parallèles SVC (*Static Var Compensator*) à thyristors et STATCOM (*STATic COMpensator*) à GTO, capables de régler dynamiquement aussi bien la fourniture que l'absorption de réactif ;
- Les compensateurs série, dont les plus importants sont le compensateur série commandé par thyristor et le compensateur statique synchrone (tous deux plus connus sous les abréviations anglo-saxonnes TCSC et SSSC), qui augmentent ou réduisent la réactance de transfert de la ligne à la fréquence assignée.



08

—
08 Simulation des tensions de bus après démarrage et en fonctionnement nominal d'un nouvel entraînement de broyeur sans réducteur avec un STATCOM installé sur le bus de 220 kV

—
09 Injection de puissance réactive par FACTS

Bibliographie

- [1] Symonds, A., Laylabadi, M., « Cycloconverter Drives in Mining Applications », *IEEE Industry Applications magazine*, novembre-décembre 2015.
- [2] Pontt, J., *et al.*, « Current issues on high-power cycloconverter-fed gearless motor drives for grinding mills », *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 9-11 juin 2003.
- [3] Systèmes FACTS d'ABB, disponible (en anglais) sur : <http://new.abb.com/facts>.
- [4] Hingorani, N. G., Gyugyi, L., *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, Wiley-IEEE Press, 1999.
- [5] Bimal, K. B., *Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends*, p. 126, Academic Press, 2006.

Ces dispositifs équipent les postes électriques, les réseaux ferroviaires, les complexes miniers, les stations de conversion des liaisons à courant continu haute tension (CCHT), les centrales d'énergie renouvelable, etc., du monde entier. Les compensateurs parallèles (*shunt*) totalisent une puissance d'environ 95 000 MVA, et les compensateurs série de 360 000 MVA.

Le secteur minier privilégie les SVC et STATCOM, qui sont installés le plus souvent sur le même bus que les entraînements de broyeurs sans réducteur. Les objectifs de la compensation shunt sont au nombre de trois :

- Garantir les transits contractuels en équilibrant la puissance réactive ;
- Maintenir la qualité de la fourniture en dépit des fortes fluctuations de la charge ;
- Améliorer la stabilité statique ou transitoire.

—
Un STATCOM peut compenser la chute de tension consécutive à l'installation d'un nouvel entraînement de broyeur sans réducteur.

Compensateur statique SVC

Un SVC associe des condensateurs commutés par thyristors (TSC) et des inductances commutées (TSR) ou commandées (TCR) par thyristors. Le dispositif se comporte comme une réactance variable connectée en parallèle →4. Il injecte ou absorbe de la puissance réactive pour réguler l'amplitude de la tension au point de raccordement avec le réseau CA. La commande coordonnée fait varier le réactif en sortie de SVC, modulant en permanence les courants capacitifs et inductifs du système →5.

Compensateur statique synchrone STATCOM

Un STATCOM équivaut à une source de tension commandable derrière une réactance →6. Ce compensateur shunt est capable de produire ou d'absorber de la puissance réactive dans la plage de variation capacitive et inductive pour agir sur certains paramètres du transit d'électricité dans le réseau →7.

Les FACTS dans la mine

Il est donc possible de compenser la chute de tension provoquée par la présence d'un nouvel entraînement de broyeur sans réducteur à l'aide d'un compensateur parallèle, de type STATCOM, choisi tout particulièrement pour sa capacité à fournir un courant capacitif ou inductif, indépendant du niveau de tension. La puissance du dispositif est déterminée comme suit :

$$\Delta U(\%) = Q/S_{cc} * 100$$

avec

$\Delta U(\%)$: pourcentage du niveau de tension à compenser par rapport à la tension nominale ;
 Q : puissance réactive du FACTS ;
 S_{cc} : puissance de court-circuit du bus accueillant le dispositif.

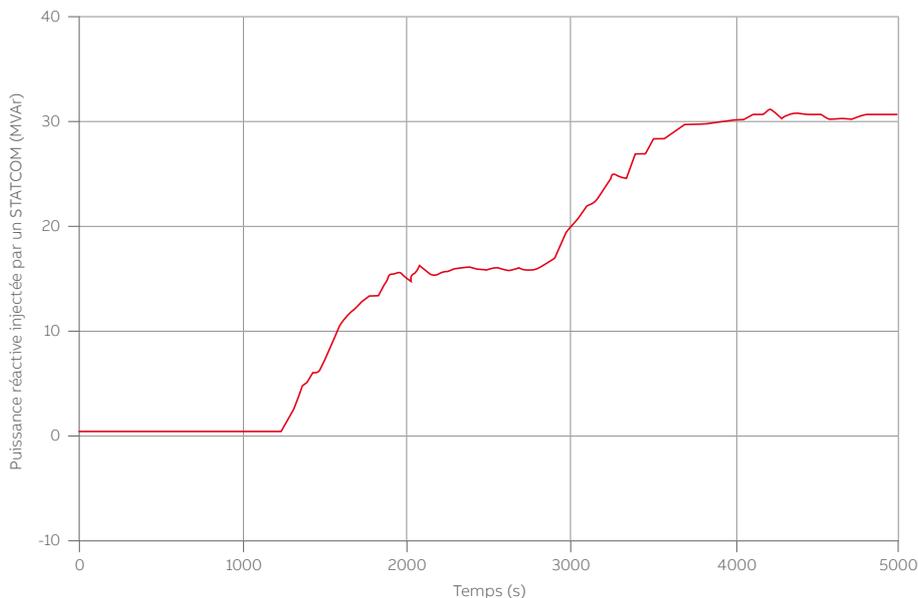
Un STATCOM dimensionné à 40 MVAR est ainsi capable de compenser 4 % de la tension nominale sur un bus dont la puissance de court-circuit s'élève à 1000 MVA et de corriger n'importe quel creux de tension engendré, notamment, par les démarrages de moteur. Le graphe →8 trace une simulation des tensions de bus après le

—
Grâce à l'offre FACTS d'ABB, l'ajout de nouveaux entraînements et de leurs équipements ne risque plus d'affaiblir le réseau électrique de la mine.

démarrage et pendant le fonctionnement nominal des nouveaux entraînements de broyeur sans réducteur équipés d'un STATCOM sur le bus de 220 kV. Le démarrage du premier entraînement, à 1200 s, consomme de la puissance active et réactive, et fait chuter la tension de 1,4 %. La commande STATCOM réagit en injectant du réactif →9 pour compenser la tension du bus 220 kV, mais aussi, par voie de conséquence, celle du bus 23 kV et la maintenir au-dessus de 99 % de la

tension nominale. À la mise en route d'un second entraînement, à 2800 s, le STATCOM fournit encore plus de puissance réactive pour compenser la nouvelle chute de tension. Ces deux injections successives stabilisent la tension du réseau.

L'ajout d'un entraînement de broyeur sans réducteur permet aux exploitants miniers d'augmenter la production et la productivité du site, sans avoir à investir massivement dans un nouveau complexe. Grâce à l'offre de dispositifs FACTS d'ABB, l'ajout de nouveaux entraînements et de leurs équipements ne risque plus d'affaiblir le réseau électrique de la mine. Les compensateurs statiques de puissance réactive, de type SVC ou STATCOM par exemple, ont tout pour renforcer les capacités de transport des réseaux fragiles. ●



ALGORITHMES ET MATÉRIAUX

Des transformateurs de puissance à isolation thermoplastique

ABB a développé un nouvel isolant thermoplastique pour les entretoises radiales des transformateurs à huile. Le recours au moulage par injection, amélioré par des empreintes ajustables, a permis de baisser les coûts et délais de production. Les essais ont prouvé les excellentes propriétés de ce matériau, qui s'impose comme un substitut viable au carton comprimé.

Adam Michalik
Renata Porębska
Corporate Research Center
Cracovie (Pologne)

adam.michalik@pl.abb.com
renata.porebska@pl.abb.com

Su Zhao
Orlando Girlanda
Harald Martini
Corporate Research Center
Västerås (Suède)

su.zhao@se.abb.com
orlando.girlanda@se.abb.com
harald.martini@se.abb.com

Claire Pitois
ABB Product Group
Västerås (Suède)

claire.pitois@se.abb.com

La gamme de transformateurs ABB est la plus fiable au monde, mais aussi la plus complète : la diversité des appareils, composants et services garantit une réponse optimisée à chaque besoin des clients. ABB investit dans l'innovation produit

—
En 2011, le Centre de recherche institutionnel d'ABB a débuté un projet transversal visant à trouver de nouveaux matériaux pour les entretoises des transformateurs.

et procédé afin d'adapter son offre →1 à la dynamique du marché. Actuellement, le Groupe s'intéresse à l'emploi de nouveaux matériaux et à l'amélioration des procédés de fabrication →2 pour rester en tête de la course.



—
01 Les transformateurs de puissance ABB sont le fruit de plus d'un siècle d'expertise.

Petite mais robuste

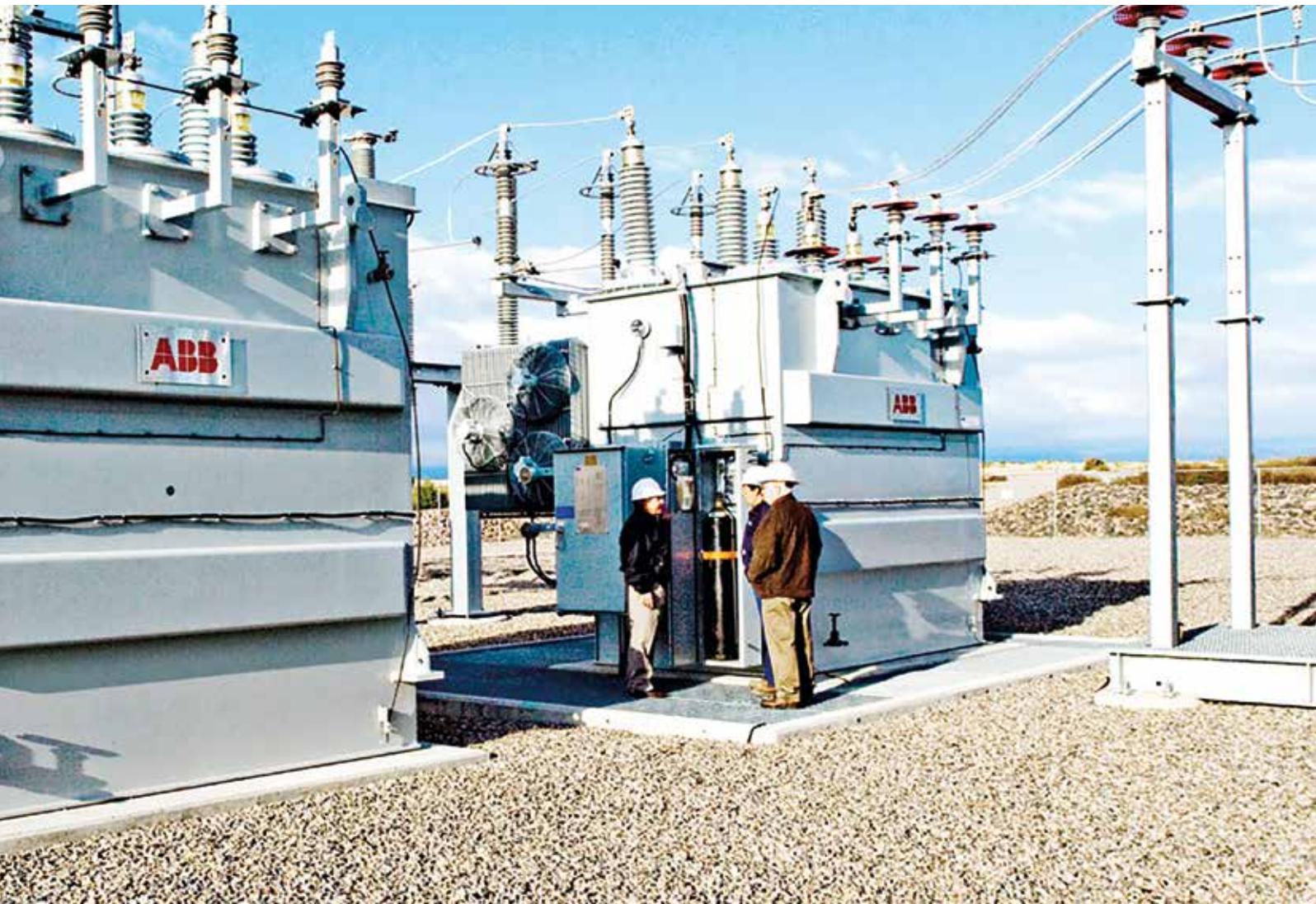
L'entretoise radiale est l'un des éléments essentiels de l'isolation d'un transformateur à colonnes immergé dans l'huile. Ce petit composant se glisse au cœur des enroulements pour assurer un bon écartement entre spires →3. Il doit supporter une charge mécanique constante, due aux forces de serrage, mais aussi des contraintes électrodynamiques en cas de court-circuit. Sans compter que sa température de fonctionnement

—
Les entretoises thermoplastiques, avec leur excellente fiabilité et stabilité dimensionnelle, garantissent la performance pérenne des enroulements de transformateur.

peut atteindre 98 à 110 °C [1,2] et subir ponctuellement de fortes hausses causées par d'éventuelles surcharges. Dernière exigence : l'huile du transformateur ne doit pas interagir avec l'entretoise.

Depuis près d'un siècle, le carton comprimé est le matériau de choix pour les entretoises et isolants de transformateurs. Ses caractéristiques et sa légèreté conviennent parfaitement aux sollicitations mécaniques et électriques intenses de ces appareils. C'est pourquoi, pendant longtemps, il n'est apparu ni techniquement ni économiquement pertinent de s'intéresser à d'autres matériaux [3]. Aujourd'hui, du petit transformateur de distribution au gros transformateur de puissance, presque tous utilisent l'isolant cellulosique. Seuls les transformateurs spéciaux, fonctionnant à des températures très élevées [4,5] ou exigeant une sécurité renforcée, comme les transformateurs de traction, font appel à des isolants synthétiques à base d'aramide, matériau apprécié pour sa tenue mécanique, thermique et diélectrique.

01





02

L'ère du plastique

ABB, qui emploie depuis des décennies l'isolation papier, estime que l'heure est venue d'élargir le choix du matériau. Les plastiques modernes, avec leur remarquable endurance mécanique et thermique (valeurs élevées d'indice relatif de température, de résistance à la compression et de température de fléchissement) ouvrent la voie à des applications inédites et sont de sérieux candidats à la double fonction de support et d'isolant pour transformateurs. Les procédés de fabrication ont par ailleurs beaucoup gagné en simplicité et en efficacité énergétique, ce qui augmente d'autant l'intérêt du plastique.

En règle générale, le plastique absorbe très peu l'humidité ambiante ; certains thermoplastiques ont même un degré d'absorption massique inférieur à 1 %, un avantage décisif quand on sait que la présence de molécules d'eau dans l'isolant dégrade ses propriétés électriques et l'ensemble entretoises-enroulements. C'est pourquoi les entretoises et autres isolants en papier subissent un double séchage, d'abord après l'étape de bobinage, puis juste avant leur imprégnation d'huile [6]. L'évaporation de l'eau peut néanmoins

—
Le recours à de nouveaux matériaux comme le plastique offre une promesse de gain au niveau du séchage et du dimensionnement, et donc de fabrication plus efficiente.

entraîner un rétreint du matériau, qui doit être pris en compte lors du dimensionnement de l'isolant afin d'obtenir la taille souhaitée après séchage : des étapes gourmandes en temps, en main-d'œuvre et en énergie [6]. Le recours à de nouveaux matériaux comme le plastique promet de réduire ou de supprimer ces différents postes, et donc d'améliorer l'efficacité de la production.



Fort de plus d'un siècle d'expérience dans le développement et la production de transformateurs sur de nombreux sites, ABB a conscience que son savoir-faire et son expertise en matière d'isolation sont autant d'avantages sur des marchés aussi concurrentiels que le ferroviaire ou l'énergie, entre autres. Par leurs excellentes propriétés thermiques et leur très faible absorption d'eau, certains plastiques sont le matériau parfait pour les entretoises radiales. En limitant ou en supprimant l'étape de séchage initial, voire celle de dimensionnement, ils peuvent beaucoup rationaliser la production. La hausse du rendement productif et la baisse des coûts de fabrication offrent ainsi des économies non négligeables aux clients.

—

Le comportement des transformateurs avec entretoises thermoplastiques a été validé dans des conditions de fonctionnement extrêmes, comme un court-circuit dans le réseau.

Propriétés des thermoplastiques

En 2011, la recherche institutionnelle ABB a débuté un projet transversal visant à identifier un matériau capable d'améliorer les caractéristiques constructives et fonctionnelles des entretoises de transformateurs de puissance et donc de se

substituer avantageusement au papier. Les équipes ont également planché sur la mise au point d'une technique de fabrication plus rapide, plus fiable et moins coûteuse, sans sacrifier la précision.

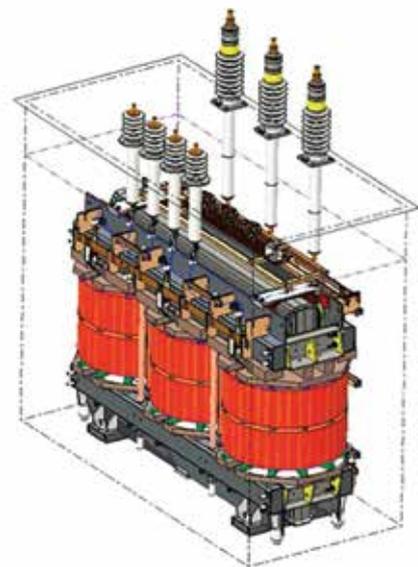
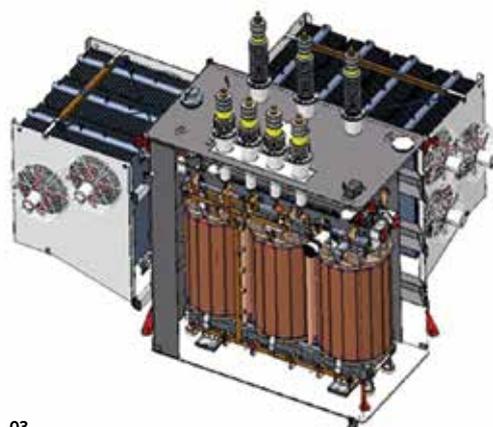
Les thermoplastiques constituaient le candidat idéal : au-delà de leur simplicité de production, leur structure moléculaire leur permet d'être fondus puis remoulés plusieurs fois sous l'action de la chaleur. De plus en plus fréquemment rencontrés en basse tension, ils se fraient depuis peu un chemin en moyenne et haute tension, où ils remplacent l'enrobage époxy des pôles encastrés, garantissant renfort mécanique et isolation électrique.

—

02 Fabrication des transformateurs de puissance ABB à Monselice (Italie)

—

03 Isolation et enroulements internes de transformateurs



Paradoxalement, au regard de la diversité des thermoplastiques disponibles, leur emploi dans les transformateurs de puissance a rarement fait l'objet d'études de faisabilité. Une fois testés, ces matériaux ont pourtant montré d'excellentes caractéristiques : stabilité mécanique en régime

Les transformateurs conçus et optimisés pour des applications bien précises exigent un mode de production flexible.

de charge, voire de surcharge, compatibilité chimique avec l'huile ou bonne résistance à la dégradation en cas d'interaction, faible hygroscopicité et rigidité diélectrique. Les entretoises thermoplastiques fabriquées par ABB ont été insérées dans les enroulements →4 et soumises à des essais qui ont confirmé leur exceptionnelle fiabilité et stabilité dimensionnelle →5, gage de longévité mécanique de l'ensemble.

Les essais thermiques ont également été probants : la bonne résistance aux hautes températures réduit d'autant le risque d'une défaillance induite par un point chaud dans l'enroulement. Les entretoises thermoplastiques contribuent ainsi à la robustesse des transformateurs.

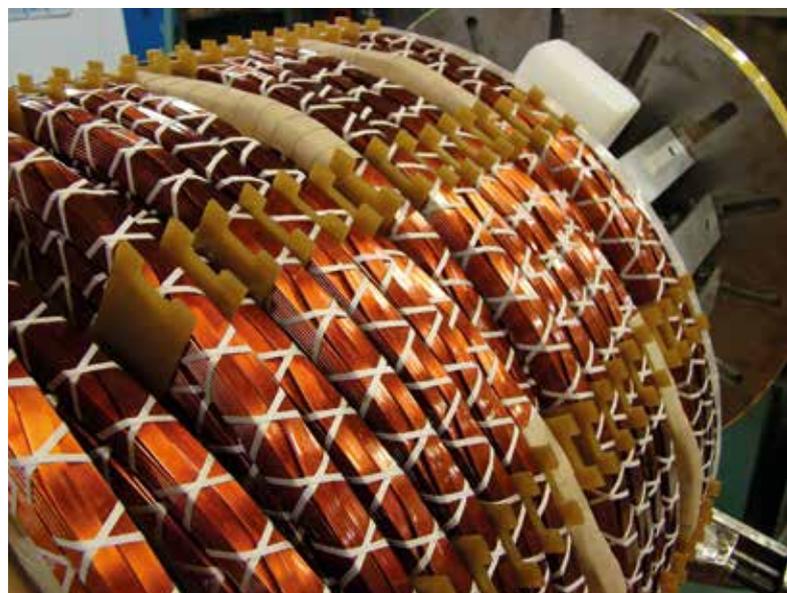
Procédé de fabrication

ABB avait besoin d'une méthode de fabrication suffisamment rapide et flexible pour à la fois produire les volumes requis (plusieurs milliers d'entretoises par transformateur) et s'adapter rapidement aux dimensions et spécifications client. Il fallait en outre garantir une précision, une homogénéité et une reproductibilité sans faille de la production.

Le moulage par injection, procédé classique de mise en forme des thermoplastiques et de production en grandes séries de pièces uniformes, n'en est pas moins d'une grande technicité en raison de la diversité des entretoises à fabriquer. On injecte un polymère liquide dans un moule spécial qui ne permet de produire qu'une seule dimension de composant. Or les transformateurs « taillés » sur mesure pour des applications bien précises ont besoin d'un mode de production flexible pour s'adapter aux différentes dimensions d'enroulement et d'entretoises.



04a



04b

—
04 Les entretoises thermoplastiques sont empilées avant d'être placées dans les enroulements du transformateur.

04a Entretoises radiales thermoplastiques

04b Amélioration de la stabilité mécanique et de l'isolation électrique des enroulements

—
05 Montage

05a Entretoises en place

05b Enroulement prêt à fonctionner



05a



05b

ABB a développé à cet effet une presse réglable →6, dont les parois mobiles permettent d'ajuster la longueur de l'entretoise dans une plage prédéfinie couvrant toutes les dimensions de transformateurs de puissance. Dotée de nombreuses empreintes, la presse peut produire plusieurs composants par cycle d'injection (moins d'une minute).

—
La presse à injection d'ABB a des parois mobiles qui permettent d'ajuster la longueur de l'entretoise.

Les concepteurs d'ABB ont mis à profit leur savoir-faire et leur expérience de la simulation multiphysique avancée pour élaborer l'outil, évitant les nombreuses itérations de rigueur et écourtant le processus. Enfin, l'optimisation des paramètres de fabrication a permis de ramener les tolérances d'épaisseur de l'entretoise à $\pm 0,015$ mm pour garantir une production précise ainsi qu'un prototype homogène et reproductible.

Essais en fonctionnement

L'étude rigoureuse des transformateurs de puissance équipés d'enroulements espacés par des entretoises thermoplastiques a donné des résultats exemplaires. Ces appareils ont réussi la totalité des essais de type et individuels, y compris ceux d'échauffement, de surcharge et de rigidité diélectrique. Leur comportement a été validé dans des conditions de fonctionnement extrêmes, comme un court-circuit dans le réseau : ces essais complets ont été couronnés de succès, tout comme les contrôles visuels des parties actives et de chaque enroulement.



06

—
06 La presse à injection d'ABB permet d'ajuster la longueur des entretoises radiales aux exigences du client.

Bibliographie

[1] Norme IEEE C57.12.00, *General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*, 2015.

[2] Norme CEI 60076, *Transformateurs de puissance – Parties 1 à 7*, 2011.

[3] Norme CEI 60641, *Carton comprimé et papier comprimé à usages électriques – Parties 1 à 3*, 2004.

[4] Norme CEI 60076-14, *Transformateurs de puissance – Partie 14 : Transformateurs de puissance immergés dans du liquide utilisant des matériaux isolants haute température*, 2013.

[5] Norme IEEE C57.154, *Design, Testing, and Application of Liquid-Immersed Distribution Power, and Regulating Transformers Using High-Temperature Insulation Systems and Operating at Elevated Temperatures*, 2018.

[6] Heathcote, M. J., *The J & P Transformer Book: A Practical Technology of the Power Transformer*, 12^e édition, Newnes : Oxford, 1998.

L'avenir est au thermoplastique

L'offre de transformateurs de puissance ABB s'enrichit de modèles équipés d'entretoises radiales thermoplastiques. Les clients du Groupe

—
La gamme de transformateurs de puissance ABB équipés d'entretoises radiales thermoplastiques répond à tous les besoins des clients du Groupe.

sont ainsi assurés de trouver le composant ad hoc répondant aux exigences du marché. C'est le cas notamment aux États-Unis, où les transformateurs ABB sans isolation cellulosique, associés à ce nouveau produit, s'affranchissent de la phase de séchage.

Les chercheurs du Groupe ont su tirer parti des nouveaux matériaux disponibles pour mettre au point un produit fiable et économique qui garantit la stabilité mécanique et l'isolation électrique des enroulements de transformateurs. Le procédé de fabrication a été simplifié, perfectionné et rationalisé grâce à de nouvelles machines modulaires qui permettent de supprimer certaines étapes, sans rogner sur la qualité et la fiabilité du produit. Bien au contraire, celui-ci s'en trouve amélioré, au bénéfice des clients !

L'utilisation réussie des thermoplastiques ne se cantonne pas à cette première application mais ouvre la voie aux matériaux de pointe qui façonneront les transformateurs du futur. ●

ALGORITHMES ET MATERIAUX

La distribution électrique goûte aux douceurs de l'automatisation ABB

Par sa conception d'avant-garde et ses outils de visualisation, le système ABB d'automatisation de la distribution électrique aide Sucrivoire à améliorer la productivité et la sécurité de son site.



Benjamin Kabeya
ABB Technology SA
Yamoussoukro
(Côte d'Ivoire)

benjamin.kabeya@ci.abb.com

En moins d'un demi-siècle, la Côte d'Ivoire a vu sa production annuelle de sucre, quasiment nulle en 1970, atteindre quelque 200 000 tonnes ! L'un des principaux acteurs de ce marché en plein essor est la société Sucrivoire, ancienne entreprise d'État récemment privatisée au profit du groupe agro-industriel ivoirien Sifca. Sucrivoire fabrique et commercialise un sucre de canne de

qualité, aux multiples débouchés : confection de sirops, pâtisserie, fabrication de médicaments... Ses 11 000 hectares de plantation produisent aujourd'hui 110 000 tonnes de sucre par an, et ambitionnent 118 000 tonnes à l'horizon 2020.

01



Ces gros volumes et une implantation essentiellement monosite font de la disponibilité un paramètre clé de la sucrerie, en particulier lors des pics de production saisonniers.

—
Contre les coupures de courant, Sucrivoire a opté pour le dernier cri de la technologie ABB d'automatisation de la distribution électrique.

Or ce que craignent avant tout les exploitants, c'est la coupure électrique ! Pour y remédier, Sucrivoire a opté pour la dernière innovation ABB en matière d'automatisation de la distribution.

Ce nouveau système associe technologies numériques, dispositifs éprouvés et extensions logicielles pour surveiller et afficher le synoptique de l'installation électrique →2,3, mais aussi les listes d'alarmes et les écrans de tendances reflétant le fonctionnement de l'usine. Ces informations permettent aux opérateurs de limiter les coupures ou de rétablir rapidement le courant pour minimiser les arrêts machines. Par sa flexibilité, cette nouvelle technologie ABB fournit des mesures précises et rapides des paramètres clés de la fabrication, au bénéfice de la productivité et de la sécurité du site.

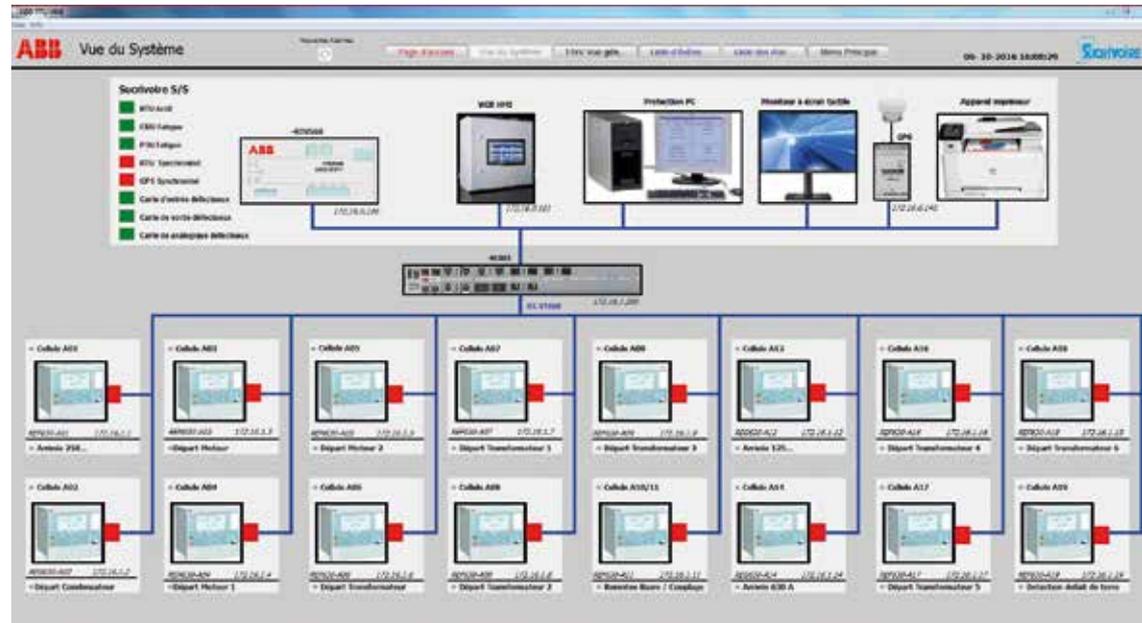
02



—
01 Le nouveau système ABB d'automatisation de la distribution associe technologies numériques, appareils classiques et extensions logicielles pour visualiser et surveiller l'installation électrique.

—
02 Synoptique de l'infrastructure électrique pour une exploitation optimisée

—
03 Vue du système



03

RTU540

Au cœur du système ABB figure l'unité de commande et de protection RTU540, qui concilie anciennes et nouvelles technologies, dispositifs existants et nouveaux protocoles de communication dans un seul boîtier compact. L'unité intègre des fonctions d'automatisme et de dialogue opérateur avancées, reliées à une mosaïque d'écrans affichant l'état des disjoncteurs et sectionneurs de la sucrerie, ainsi que les mesures, listes d'alarmes et tendances de production. Son boîtier métallique haute qualité peut au besoin accueillir des modules d'entrées/sorties pour libérer de l'espace dans l'armoire de commande. L'intelligence embarquée assure le tri et l'interprétation rapide des données de façon à afficher en priorité les informations cruciales ; les données moins importantes passent au second plan pour éviter toute pollution visuelle.

—
Le système affiche l'état des disjoncteurs et sectionneurs de la sucrerie, ainsi que les mesures, listes d'alarmes et tendances de production.

Simple à configurer, la RTU540 évolue avec la topologie de l'usine en affichant toujours une vue générale des données électriques capitales.



UniGear Digital ZS1

Autre amélioration apportée à l'infrastructure électrique de la sucrerie : l'appareillage d'interruption moyenne tension (MT) isolé dans l'air a été remplacé par le tableau de distribution UniGear ZS1, qui fait partie de la solution innovante UniGear Digital d'ABB. Celle-ci se fonde sur l'intégration optimisée, dans un même

—

UniGear Digital repose sur une intégration optimisée des capteurs de courant et de tension, des IED dernier cri et des outils de communication CEI 61850 dans le tableau MT.

tableau MT, des capteurs de mesure de courant et de tension, des dispositifs électroniques intelligents IED (*intelligent electronic device*) dernier cri et de la communication numérique dans les postes électriques CEI 61850. Par son approche « taille unique », UniGear Digital évite de remplacer les composants MT primaires en cas d'évolution de la charge. D'où un gain de temps et d'argent en phases de planification et de réalisation de projet. Le transformateur de mesure étant supprimé, les pertes énergétiques en fonctionnement sont également réduites. Qui plus est, l'insertion de tous les composants MT dans des coffrets anti-arc renforce la sécurité de l'opérateur.

Relion®

Le système d'automatisation de la distribution mis en œuvre chez Sucrivoire comprend aussi des relais de la gamme Relion d'ABB →4, qui offre le plus large éventail de produits de protection, de commande, de mesure et de supervision de réseaux électriques destinés aux applications CEI et ANSI. Pour garantir l'interopérabilité et la pérennité des solutions, les produits Relion ont été conçus dans le respect des exigences de la norme CEI 61850.



04a

—
04 Dispositifs
électroniques intelligents
Relion (gamme RTU540)

04a Module
RTU540CMD01 avec unité
de communication et
alimentation large plage
à isolation galvanique
dans boîtier métallique
monté sur rail DIN

04b Module 540CID01 :
similaire au 540CMD01
mais avec borniers
d'entrées/sorties

ABB Ability™

Les produits ABB utilisés dans l'usine Sucrivoire s'appuient sur la plate-forme industrielle ABB de technologies, services et solutions numériques qui améliorent la connaissance du système, étoffent ses capacités et accroissent les performances délivrées par la connectivité de tous les dispositifs reliés, du simple composant à l'équipement en bordure de réseau, et jusqu'au Cloud.

—
La gamme Relion offre un large éventail de produits de protection, de commande, de mesure et de supervision des réseaux électriques pour applications CEI et ANSI.

—
La solution ABB a beaucoup amélioré la fiabilité et l'efficacité du réseau électrique de la sucrerie.

Étendue de la fourniture ABB

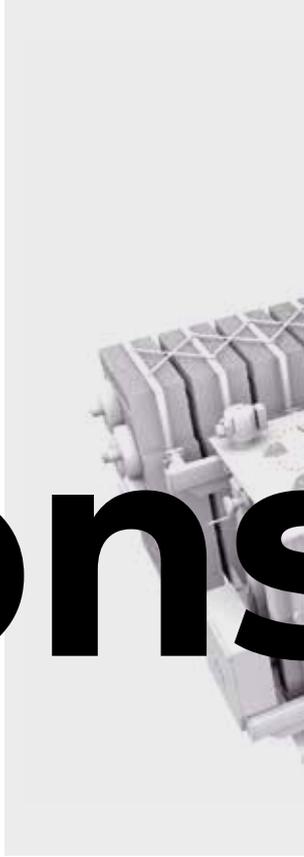
L'offre ABB s'étend bien au-delà des produits équipant l'usine Sucrivoire : du simple système d'automatismes à la solution d'automatisation élaborée, en passant par l'intégration des renouvelables et le stockage d'énergie par batterie, le Groupe propose aussi bien de nouveaux projets que des modernisations, en privilégiant performance et rentabilité. Les résultats obtenus par Sucrivoire parlent d'eux-mêmes : réseau électrique beaucoup plus fiable et efficace, vision complète et maîtrisée de l'infrastructure électrique, productivité accrue et sécurité renforcée. Un avant-goût de réussite pour les ambitieux objectifs de production des Ivoiriens. ●

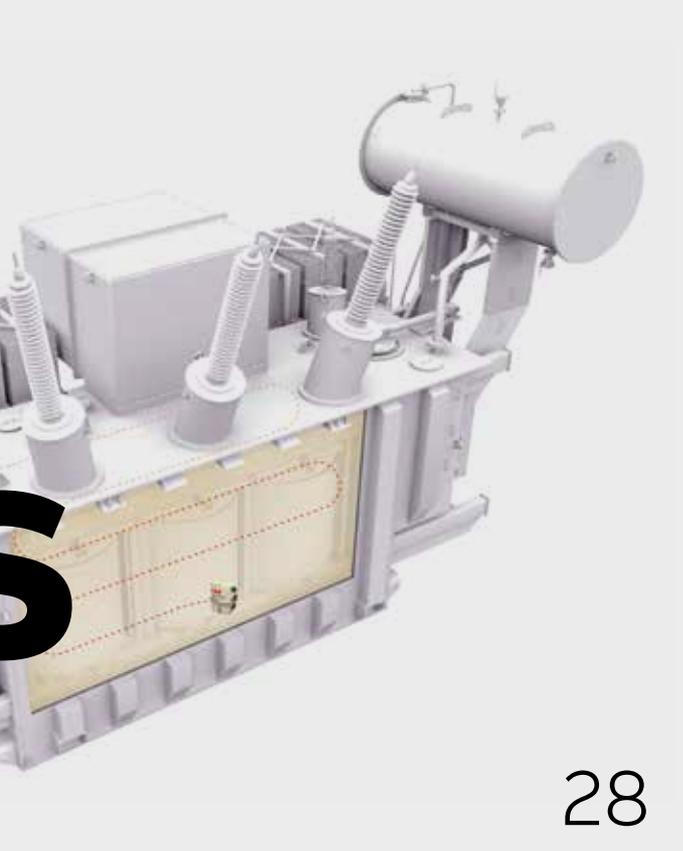


04b



Mutations





28

Envoyer un robot affronter l'environnement hostile de la cuve d'un transformateur immergé dans l'huile pour en connaître l'état ou améliorer le raccordement au réseau terrestre de l'éolien offshore : ABB est sur tous les fronts pour sécuriser l'alimentation et la distribution d'électricité.

- 28 Le robot TXplore d'ABB plonge au cœur des transformateurs
- 36 CCHT pour éolien marin : une technologie au point



36

MUTATIONS

Le robot TXplore d'ABB plonge au cœur des transformateurs

Avec son nouveau système TXplore, ABB révolutionne l'inspection des transformateurs immergés dans l'huile. Des essais poussés ont démontré qu'une solution numérique « robotisée » était nettement moins chère, plus sûre et plus instructive qu'une inspection réalisée par un humain.

Gregory Cole
Harshang Shah
ABB US Corporate
Research Center,
Mechatronics and
Sensors
Bloomfield
(États-Unis)

gregory.a.cole@
us.abb.com
harshang.shah@
us.abb.com

Craig Stiegemeier
ABB Transformer
Remanufacturing and
Engineering Services
Saint-Louis
(États-Unis)

craig.stiegemeier@
us.abb.com

Jamie Stapleton
ABB Transformers
Business Unit
Worthing
(Royaume-Uni)

jamie.stapleton@gb.abb.
com

Si le suivi d'état des transformateurs immergés dans l'huile fait largement appel à des méthodes non intrusives pour identifier les défauts et éviter les pannes [1], certains contrôles de routine ou d'urgence exigent encore une inspection interne : c'est le cas notamment à la suite d'un choc de foudre, pour cerner l'emplacement ou la gravité d'une ou de plusieurs défaillances, ou

—
La durée d'inspection d'un transformateur est habituellement de trois jours, avec un coût humain et matériel considérable !

encore pour une maintenance planifiée [2]. Or l'opération est coûteuse et risquée, tant pour le transformateur que pour le personnel. L'appareil doit être vidé de son huile minérale et celle-ci stockée en sécurité avant qu'un technicien spécialisé ne pénètre dans la cuve. L'inspection requiert en outre la présence d'une équipe médicale et d'autres spécialistes. L'ensemble de la procédure mobilise le personnel et arrête l'équipement pendant trois jours en moyenne, ce qui représente un coût humain et matériel considérable.

—
01 Le robot téléguédé TXplore se déplace de façon autonome grâce à ses hélices et à son correcteur de poussée d'Archimède. Des projecteurs garantissent des images de qualité.



01

ABB, qui a déjà mené à bien plus de 200 000 projets de ce type, est un chef de file mondial de la fabrication, de la surveillance et de la maintenance des transformateurs. Le Groupe a beaucoup fait

—
En 2012, ABB propose un concept de système robotisé téléguédé, capable de fonctionner de manière fiable et efficace dans l'environnement sensible et toxique d'un transformateur.

pour, d'une part, réduire le temps d'immobilisation des transformateurs ainsi que le coût et les risques humains comme matériels de ces essais, d'autre part, améliorer l'exploitation des données collectées. Fin 2012, ABB a proposé un concept de

système robotisé téléguédé, capable de fonctionner de manière fiable et efficace dans l'environnement sensible et toxique d'un transformateur, en se substituant à l'opérateur. Afin d'offrir une plus-value aux énergéticiens, le robot doit pouvoir se déplacer et inspecter l'intérieur du transformateur sans compromettre l'intégrité du matériel ni de l'huile diélectrique, mais aussi collecter des données et des images de qualité, et les envoyer aux experts distants pour évaluation. Une équipe pluridisciplinaire d'ingénieurs et de chercheurs ABB a relevé le gant : de leurs efforts conjoints est né le robot submersible TXplore →1.

Concept innovant

Les transformateurs de puissance sont des actifs coûteux et critiques, dont la conception et la fabrication font appel à des techniques pointues.

—
Le robot TXplore est capable de se déplacer pour collecter des images et vidéos haute résolution sans risquer de rester bloqué ou d'endommager le transformateur.

Au cours de leur durée de vie, ils doivent surmonter de nombreux incidents : surtensions, courants de court-circuit, échauffement des enroulements, contaminations, etc. La dissipation de chaleur, vitale pour la survie du transformateur, est assurée par la circulation d'huile. Tout objet pénétrant dans l'appareil, tel le robot, doit donc absolument préserver l'intégrité du diélectrique. C'est à cet effet qu'ABB a conçu TXplore →2.

Caractéristiques et fonctionnalités

Une fois préparé, ce robot peut inspecter un transformateur déconnecté avec l'aide de seulement deux personnes →3 : un technicien sur site qui paramètre le robot, le place dans la cuve et l'en sort à la fin, ainsi qu'un téléopérateur en charge du pilotage, de la collecte des données et de la communication avec le client ou les spécialistes.

TXplore se déplace sans problème dans le transformateur →4 afin d'y collecter des images et vidéos haute résolution : l'absence de câble lui évite de rester bloqué ou d'endommager le transformateur et ses composants. Sa forme et ses dimensions assurent un excellent compromis entre facilité de navigation et robustesse, lui permettant d'inspecter toutes les zones d'intérêt telles que traversées, câbles, changeurs de prises, socle du noyau, isolant, etc. Le robot submersible est en outre équipé de systèmes de sécurité redondants et a subi une batterie d'essais thermiques et environnementaux qui garantissent sa capacité à fonctionner dans des conditions extrêmes.

02



—
02 TXplore permet d'inspecter un transformateur de puissance immergé sans vider l'huile.

—
03 L'inspection d'un transformateur requiert la présence de deux personnes uniquement : le pilote et le technicien sur site en charge de l'appareil.



Responsable de l'appareil



Inspection robotisée



Pilote



03

Il est construit de manière à ne transmettre aucune contamination chimique ou physique à l'huile minérale, une exigence incontournable lors de toute intervention à l'intérieur du transformateur. Sa coque est en matériau plastique haute performance qui minimise le risque de couplage électrique ou de dommage structurel au transformateur tout en résistant à des milieux hostiles et des températures élevées.

—
Une inspection TXplore ne mobilise que deux personnes : un technicien sur site et un pilote.

TXplore génère directement des images haute résolution qu'il peut envoyer à un expert n'importe où dans le monde. Ses équipements radio redondants évitent qu'un défaut de transmission ne fausse la manœuvre. Son architecture système →5 peut intégrer de nouvelles fonctionnalités au fur et à mesure des progrès technologiques et des nouvelles exigences des clients, dont TXplore facilite la transition numérique.

L'atout robotique

Les deux principales exigences d'une inspection de transformateur sont la sécurité du personnel et l'intégrité de l'appareil. Le robot est conçu pour offrir une grande fluidité de navigation et de communication. Le synoptique →6 met en regard les étapes d'une inspection robotisée et celles d'une inspection humaine classique (intrusive). TXplore pouvant plonger dans l'huile, il rend superflues les manipulations du fluide (camion-citerne, équipement de vidange ou pompe à vide) ainsi que la présence de personnel pour transvaser l'huile, un classique des inspections traditionnelles. Autre avantage : en envoyant un robot et non un opérateur dans l'appareil, on peut se passer des équipes médicales ou de sécurité environnementale. Après préparation du transformateur, l'intervention de TXplore n'exige que deux personnes : un pilote et un technicien sur site. Le robot s'acquitte de sa tâche en moins d'une journée, contre trois ou plus pour une inspection humaine. Un gain de temps, d'argent et de personnel indéniable !



Essais et validation

Le système complet et ses sous-ensembles ont subi des essais de fuite, de navigation, de résistance thermique, de stabilité chimique et de contamination potentielle en laboratoire et sur des installations de test, avant de passer à la présérie en conditions quasi réelles. Après plus de

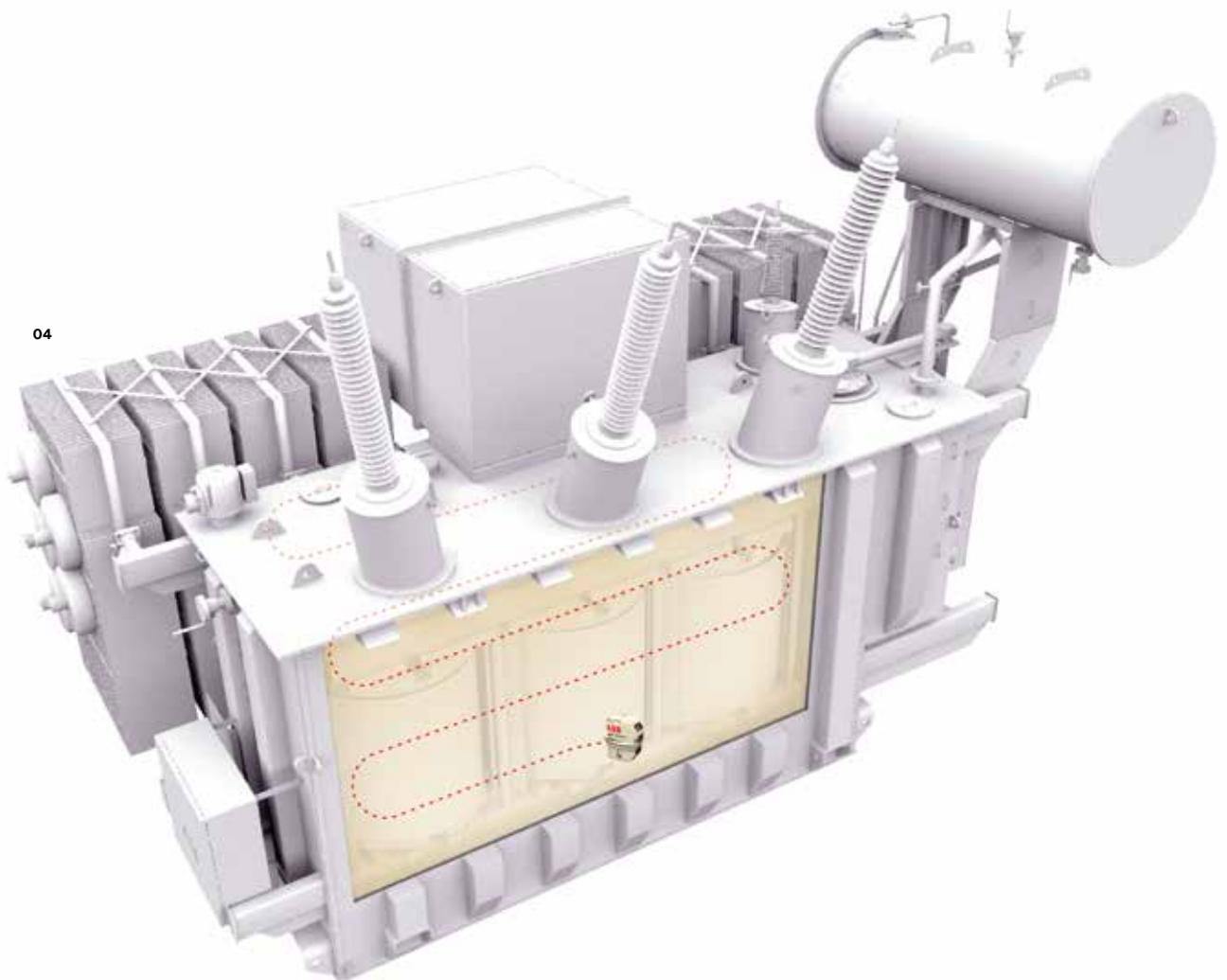
L'inspection d'un transformateur peut se dérouler en moins d'une journée.

96 heures d'exposition à diverses températures et à une pression plus de deux fois supérieure aux valeurs attendues sur site, aucune fuite n'a été observée. Les robots ont été immergés dans sept cuves différentes afin de s'assurer que le système de vision était suffisamment stable pour garantir une orientation et une navigation correctes, et offrir des images d'excellente qualité.

Pour évaluer l'impact du prototype sur l'huile minérale, un protocole original a été imaginé : deux cuves ont été remplies, la première d'huile fortement contaminée, noircie et comportant des particules (issue d'un transformateur en service) et la seconde d'huile propre, dont les caractéristiques avaient été relevées au préalable. Par ailleurs, les deux cuves présentaient une grande différence de température : -5 °C contre +27 °C.

Le robot a été immergé dans la première cuve pendant six heures, avant d'être sorti, nettoyé et préparé selon la procédure mise au point par ABB. Puis il a été placé dans la seconde cuve pendant une longue période, au bout de laquelle des techniciens ont prélevé et analysé des échantillons d'huile afin de déterminer s'il y avait eu contamination ou non. Les graphes →7 présentent les résultats comparés aux mesures initiales. Tant au niveau de la contamination de l'huile que de la température, l'immersion du robot dans la

04

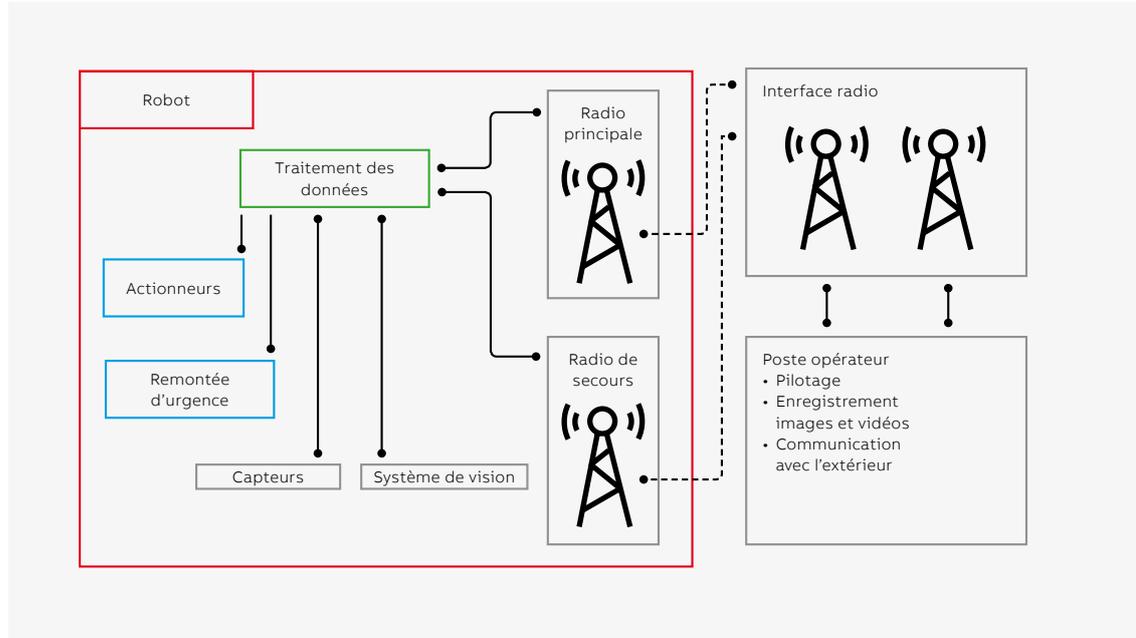


04 Exemple de parcours de TXplore à l'intérieur du transformateur

05 Architecture du système (commandes électriques et mécaniques, dispositifs de collecte de données)

06 Procédure actuelle d'inspection humaine d'un transformateur par rapport au projet d'inspection robotisée

07 Les résultats expérimentaux confirment l'absence de contamination particulière de l'huile du transformateur par l'immersion du robot.

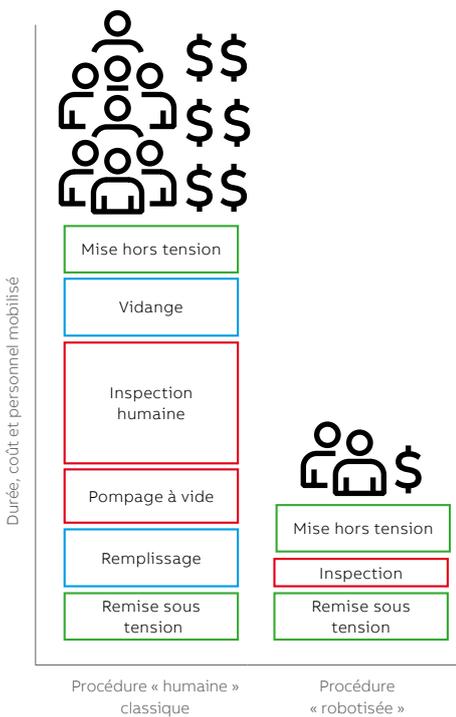


05

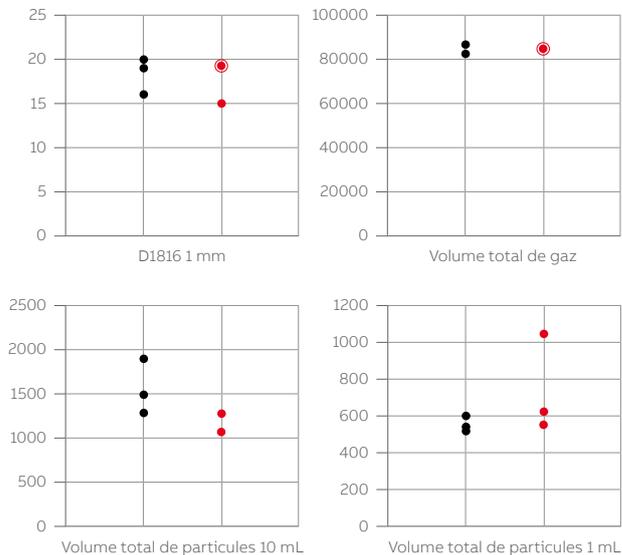
deuxième cuve n'a eu presque aucun impact sur la qualité de l'huile. La procédure d'inspection permet donc de préserver l'intégrité du fluide.

Le système de propulsion des engins sous-marins téléguidés est souvent à l'origine de phénomènes de cavitation (formation de bulles). Les concepteurs d'ABB ont eu soin d'éviter ce désagrément. À l'aide d'un stroboscope, ils ont enregistré des images de l'hélice du robot tournant à toutes les fréquences possibles. Aucune formation de bulles n'a été observée, même dans les foyers d'apparition de la cavitation, comme le bord d'attaque des pales ou l'espace entre hélice et carter.

Le robot a ensuite été testé en présérie dans diverses conditions et à différentes températures.



06



07



08a



08b

Dans tous les cas, la durée d'inspection a été ramenée à moins de deux heures. TXplore a pris des clichés nets et précis →8, qui ont été transmis au client avec un rapport d'inspection détaillé. Toutes les informations pertinentes peuvent être partagées en quasi temps réel avec des experts du monde entier. Le client a ainsi accès aux meilleurs spécialistes du diagnostic

—

En 2017, ABB réussit à inspecter l'intérieur d'un transformateur de poste électrique sans manipuler l'huile.

pour résoudre la moindre difficulté. L'inspection robotisée TXplore lui garantit la maîtrise du calendrier de fonctionnement ou de maintenance du transformateur.

Étude de cas

En 2016, ABB a mené une campagne d'inspection robotisée dans son usine de transformateurs de puissance de Saint-Louis (Missouri, États-Unis) ainsi que sur un poste électrique vital pour l'alimentation des installations de test haute tension. Le comportement sur le terrain a confirmé les résultats des essais.

Par ailleurs, une démonstration d'inspection de cuve par robot téléguidé, à l'occasion d'ABB Customer World (Houston, Texas) en mars 2017, a attiré l'attention de l'énergéticien American Electric Power (AEP). Celui-ci souhaitait inspecter l'un de ses gros transformateurs de puissance destiné à être retiré du service. À l'été 2017, l'équipe de développement ABB a amené le robot ainsi que les dispositifs de commande et d'enregistrement jusqu'au poste concerné, où se trouvait un transformateur âgé de plus d'un demi-siècle. TXplore a réussi à inspecter l'intérieur de ce dernier sans aucune manipulation d'huile, démontrant au passage ses qualités de mobilité, de visualisation et de collaboration, tant locale que distante, ainsi que la faisabilité globale de l'intervention →9.

Commercialisation

Ces projets pilotes ont fourni des informations précieuses tant sur le prototype que sur ses performances, entraînant quelques modifications de conception en vue d'améliorer la fiabilité, la longévité et la tenue de TXplore à la haute température de l'huile. Les essais et inspections sur les premiers robots de production s'étant terminés en février 2018, le robot a pu être lancé à l'occasion de la Foire de Hanovre, en avril. ABB a reçu les premières commandes de pilote final le 1^{er} mars, mai 2018 marquant le début des inspections en conditions réelles. TXplore peut à présent

—
08 Clichés pris par TXplore dans un transformateur tombé en panne au bout de 20 années de service

08a Le client soupçonnait le changeur de prises d'être à l'origine du défaut, ce qu'infirmait cette photo TXplore.

08b TXplore identifie la source de la panne : une défaillance entre deux enroulements.

—
09 Étapes de l'inspection TXplore

09a Inspection téléguidée à l'intérieur d'un transformateur immergé dans l'huile

09b TXplore ne mobilise que deux techniciens : l'un pour organiser et gérer l'inspection sur site, l'autre pour le piloter.

09c Le technicien plonge TXplore dans la cuve du transformateur.

09d TXplore se déplace facilement dans l'huile, sans le moindre risque pour le personnel.

Bibliographie

[1] Carlzon, L., Fazlagic, A., Lorin, P., *ABB Service Handbook for Transformers*, Boss, P., Frimpong, G., Turner, M., 2007.

[2] Sun, H.-C., Huang, Y.-C., Huang, C.-M., « A review of dissolved gas analysis in power transformers », *Energy Procedia*, vol. 14, p. 1220-1225, 2012.

inspecter n'importe quel transformateur immergé assez grand pour accueillir le robot. Grâce à la montée en charge de la production, ABB disposera bientôt d'une flotte de robots pour effectuer ses interventions de maintenance.

—
Savoir se déplacer dans l'huile et cartographier l'ensemble de la cuve du transformateur n'est pas le moindre des atouts de TXplore.

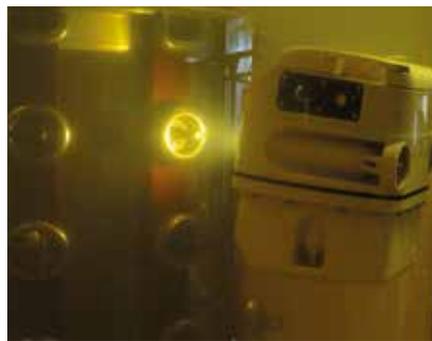
Sécurité et connectivité

Le recours à un robot d'inspection a de nombreux avantages : nul besoin d'équipement lourd ni d'équipe de supervision de l'opération, temps d'immobilisation très courts (moins d'une journée en général), coûts réduits, sans compter la possibilité de disposer de données opérationnelles

sur l'appareil inspecté. Mais les principaux atouts du robot téléguidé sont sa capacité à plonger directement dans l'huile, à cartographier l'intérieur du transformateur et à envoyer les résultats de l'inspection vers un poste distant. Et tout cela sans danger puisqu'aucun humain n'a besoin de pénétrer dans la cuve. ABB va plus loin en intégrant le robot et ses données d'inspection à la plateforme ABB Ability™ pour bâtir les services et solutions numériques de demain.

ABB anticipe une fois de plus les besoins accrus du marché en matière de sécurité et de réduction des coûts. La collecte et la gestion robotisées des données d'inspection accélèrent la transition numérique des clients du Groupe et confortent leur avance concurrentielle. ●

09a



09c

09b



09d

MUTATIONS

CCHT pour éolien marin : une technologie au point

L'éolien en mer est la filière de production d'énergie renouvelable qui connaît la plus forte expansion. Les parcs éoliens étant implantés loin des côtes, leur raccordement au continent nécessite des liaisons en courant continu à haute tension (CCHT), dont ABB a une longue expérience. Quels défis cette technologie a-t-elle dû relever ces dix dernières années pour arriver à maturité ?



Athanasios Krontiris
HVDC Connections,
ABB Power Grids
Mannheim (Allemagne)

athanasios.krontiris@
de.abb.com

Avec un taux de croissance annuelle de 13 % en moyenne ces cinq dernières années et une puissance installée cumulée de 540 GW en 2017, l'énergie éolienne a indéniablement le vent en poupe →1,2. La progression est encore plus spectaculaire pour l'éolien en mer (+ 28 %), qui ne représente pourtant que 3,5 % de la capacité de production →3. Si les parcs marins (offshore) se concentrent en mer du Nord, les projets foisonnent partout dans le monde, notamment en Amérique du Nord, en Extrême-Orient et en Inde.



Peter Sandeberg
HVDC Connections,
ABB Power Grids
Ludvika (Suède)

peter.sandeberg@
se.abb.com

La montée en puissance de l'éolien offshore a pour contrepartie des distances de plus en plus élevées au continent et aux points de connexion à terre.

Cette montée en puissance a sa contrepartie : les éoliennes offshore sont de plus en plus éloignées des côtes et des points de connexion à terre, compliquant la tâche des concepteurs et des exploitants.



—
01 La production éolienne en mer a progressé de presque 30 % en 2017.

Alternatif ou continu ?

Le choix du courant alternatif (CA) ou continu (CC) pour raccorder les parcs marins au réseau électrique dépend principalement de la puissance assignée, de la distance à la côte puis à un poste de raccordement suffisamment robuste (jusqu'à 100 km), le point d'atterrissage étant souvent situé au milieu de territoires peu peuplés pâtissant d'un réseau de transport faible.

Au premier avantage de l'alternatif, à savoir le faible coût du poste électrique, s'oppose l'inconvénient des pertes capacitives qui augmentent avec la tension et la longueur du câble. Au-delà d'une distance « critique », comprise entre 100 et 150 km selon le type de câble, il n'est plus possible de transférer de puissance active. La solution habituelle est d'élever la tension ; or la puissance réactive augmentant avec le carré de la tension, cela réduit d'autant la longueur de câble.

Le principal argument favorable aux liaisons en continu est le faible coût des câbles. Ces derniers n'étant chargés que lorsqu'ils sont sous tension, et la capacité totale de transit pouvant servir au transfert de puissance, les pertes en ligne sont, à partir d'une certaine distance, inférieures à celles de l'alternatif. Ces facteurs compensent le surcoût des convertisseurs.

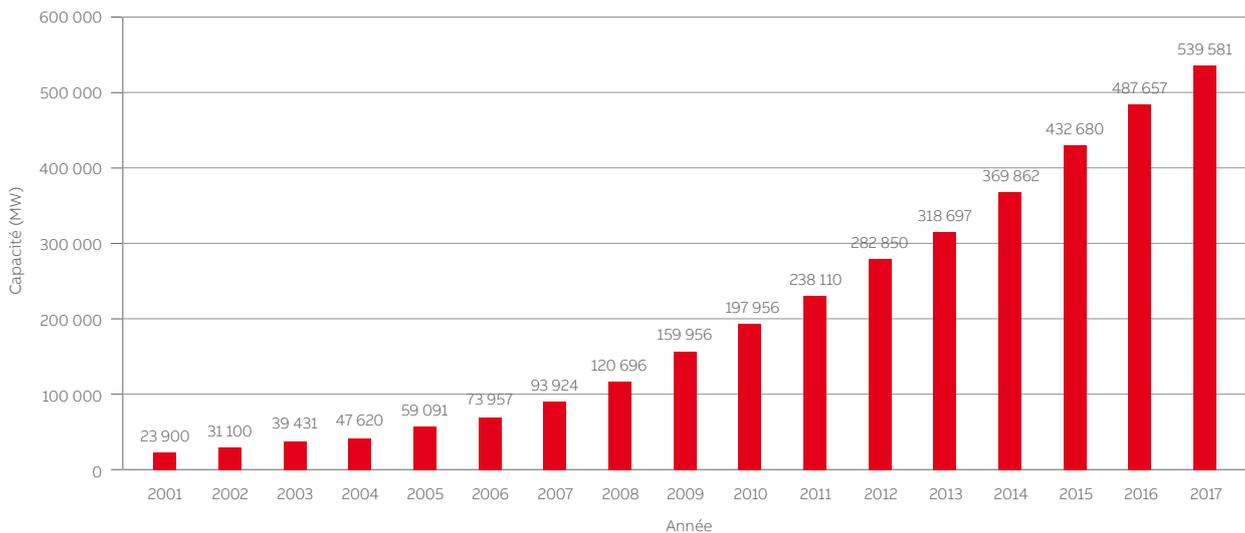
Autre atout : les câbles CCHT isolés au polyéthylène réticulé sont plus légers, donc plus faciles et moins chers à poser en mer. Leur faible masse linéaire permet de transporter de plus grandes longueurs, réduisant ainsi le nombre de jonctions, le temps d'installation et les risques de défauts.

Le transport CC pour accroître les puissances assignées et les distances est donc une solution concurrentielle, tant au plan de l'investissement initial que des coûts d'exploitation.

État des lieux

À l'heure actuelle, 40 des quelque 92 parcs offshore installés en Europe affichent une capacité nominale (puissance maintenue à pleine charge) supérieure à 200 MW et près du tiers est raccordé au réseau par une liaison CCHT, que ce soit de façon unitaire ou groupée. Sept connexions CCHT sont opérationnelles, et trois autres en cours de réalisation. Toutes sont situées au sud-est de la mer du Nord (baie Allemande) et exploitées par le gestionnaire de réseau de transport germano-néerlandais TenneT. D'autres projets essaient partout dans le monde, l'avenir à court et moyen terme du CCHT pour la connexion de l'éolien marin s'annonce radieux.





02

Configurations

La topologie la plus simple est le raccordement direct, en point à point, de deux convertisseurs, l'un en mer et l'autre sur le continent →4a. Jusqu'à présent, toutes les liaisons CCHT de l'éolien offshore étaient de ce type.

—
Un système hybride constitué d'une plate-forme ou *hub* mutualise la production de plusieurs parcs offshore pour interconnecter plusieurs réseaux terrestres.

Depuis quelque temps, l'intérêt se porte sur une nouvelle topologie →4b-4d : un système hybride constitué d'une plate-forme ou *hub*, voire d'une île artificielle, mutualise la production de plusieurs parcs offshore pour interconnecter, à partir de cette gigantesque « multiprise », des réseaux terrestres relevant d'une ou de plusieurs zones synchrones. Cette solution convient aussi bien aux connexions CA que CC, même si, en mer du Nord, les distances à la côte sont prohibitives en alternatif. En continu, la plate-forme est interconnectée au parc soit par plusieurs liaisons parallèles point à point →4b, soit par un système CCHT multiterminal →4c.

Avantages des réseaux intercontinentaux

Contrairement à une seule connexion de parc offshore à la côte, tributaire de l'intermittence du vent local, l'interconnexion avec d'autres réseaux électriques augmente considérablement l'utilisation de la liaison.

La coordination à l'échelle internationale de la mise en place de l'infrastructure de transport pourrait être un autre facteur de réduction des coûts. Les échanges d'électricité sur les marchés internationaux en seraient aussi facilités.

Enfin, la solution autorise une extension progressive du réseau et un ajout par phases de capacité de transport, pour accroître rapidement la fourniture d'énergie. Elle permet aussi de faire évoluer l'existant, d'incorporer de nouvelles technologies à mesure que le parc se déploie et d'échelonner les investissements.

Le premier « interconnecteur » offshore au monde est en construction en mer Baltique pour relier en courant alternatif les parcs éoliens danois Kriegers Flak A et B à leurs homologues allemands Baltic 1 et 2. La synchronisation des réseaux des pays scandinaves et de l'Europe continentale est assurée par une station de conversion CCHT dos à dos d'ABB →4d, au point d'atterrissage de Bentwisch (Allemagne). ABB fournit également le contrôleur maître chargé de piloter à l'optimum tous les actifs de la solution. Cette expérience opérationnelle devrait beaucoup contribuer au déploiement du concept.

—
02 Capacité installée cumulée dans le monde (2001-17)

—
03 Capacité offshore mondiale

03a Capacité cumulée par pays (2016-17)

03b Capacité annuelle cumulée (2011-17)

Réalisations ABB

La livraison réussie de trois liaisons CC pour l'éolien offshore →5 n'aurait pas été possible sans les immenses progrès réalisés par ABB et ses partenaires dans le développement du CCHT et la conception de la plate-forme.

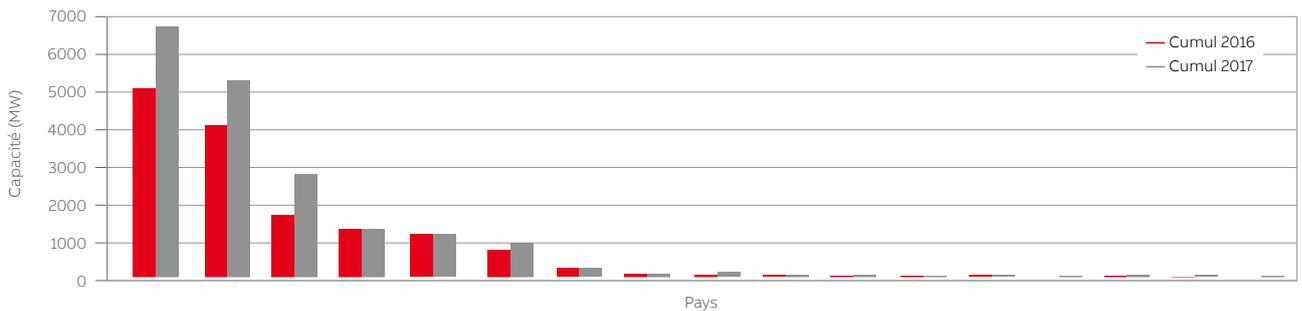
—
La compacité des équipements HVDC Light garantit l'efficacité économique de l'infrastructure au large.

La technologie HVDC Light® d'ABB à base de convertisseurs à source de tension a été déterminante : en régulant la tension et la fréquence du réseau CA îloté en mer, la station de conversion offshore transfère automatiquement au réseau CA terrestre le maximum de puissance

active produite par les éoliennes, tout en stabilisant la tension alternative et la fréquence du réseau marin. De même, la compacité des équipements HVDC Light garantit l'efficacité économique de l'infrastructure au large.

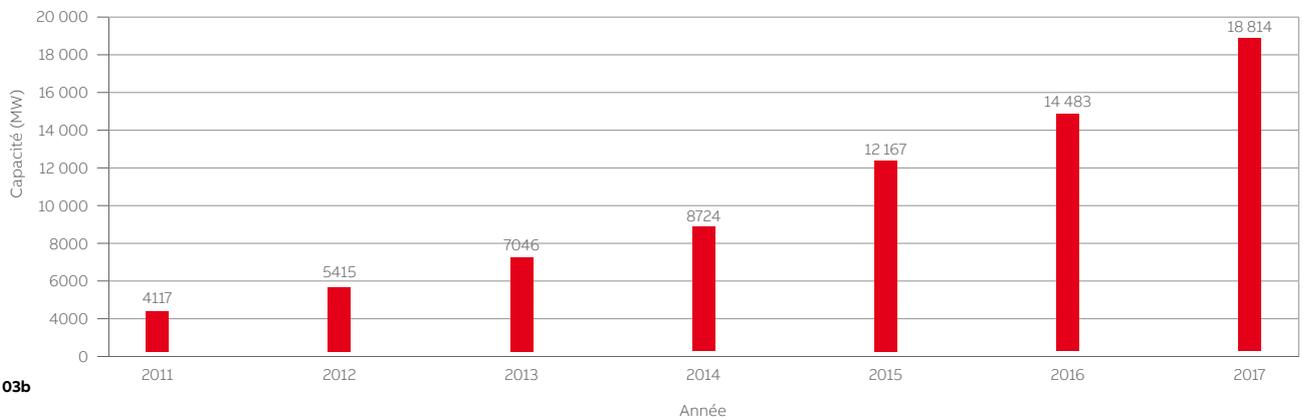
De pionnier à leader

Une implantation en mer a son lot de contraintes de conception spécifiques qui la distinguent des projets CCHT classiques : conditions climatiques, absence de référentiel normatif régissant les systèmes et composants CCHT offshore, accessibilité des parcs, limites de l'exploitation en milieu marin, gestion périlleuse des interfaces, entre autres. Sans compter qu'un réseau CA îloté est loin de se comporter comme un réseau de transport classique.



	Royaume-Uni	Allemagne	Chine	Danemark	Pays-Bas	Belgique	Suède	Vietnam	Finlande	Japon	Corée du Sud	États-Unis	Irlande	Taiwan	Espagne	Norvège	France	Total
Cumul 2016	5156	4108	1627	1271	1118	712	202	99	32	60	35	30	25	0	5	2	0	14 483
Progression 2017	1680	1247	1161	0	0	165	0	0	60	5	3	0	0	8	0	0	2	4331
Cumul 2017	6836	5355	2788	1271	1118	877	202	99	92	65	38	30	25	8	5	2	2	18 814

03a



03b

Environnement offshore

Nombreux sont les écueils du transport CCHT en mer : sollicitations mécaniques des ouvrages dues aux vibrations, températures extrêmes, humidité excessive, pollution saline, météo marine, difficultés d’acheminement, de stockage et de manutention des équipements. Autant d’obstacles qu’une conception soignée permet de surmonter.

—
ABB a développé et mis en œuvre avec succès des concepts novateurs de gestion du réseau offshore îloté en régime normal et perturbé.

Principes et règles de conception

Les deux premières plates-formes abritant les stations de conversion CCHT pour l’offshore reposaient sur une structure tubulaire classique (*jacket*) supportant les installations de surface (*topsides*). Le projet DolWin2 a bénéficié de l’étroite collaboration d’ABB et d’un chantier naval norvégien pour développer un concept innovant de plate-forme semi-submersible robuste, évolutive, facile à transporter →6, à installer et à exploiter sans lourds

engins de levage. Une fois en place, la structure gravitaire se dépose lentement sur les fonds marins par remplissage de ballasts avec l’eau de mer, à laquelle on substitue ensuite des graviers pour sceller l’ouvrage →7.

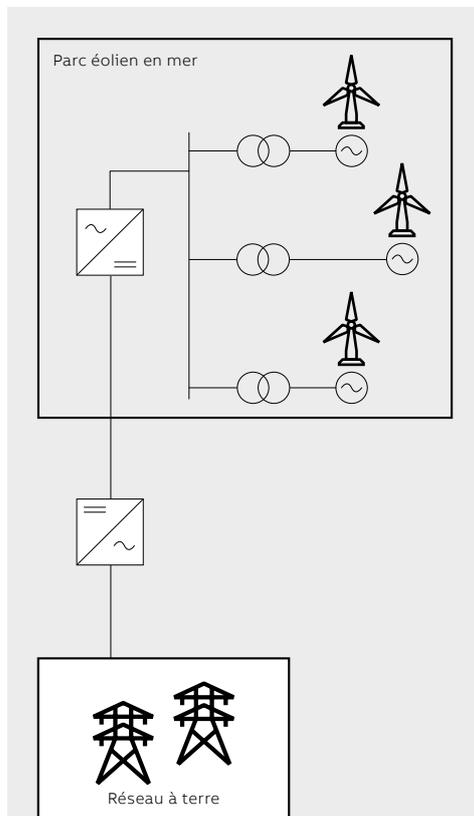
L’offshore a de strictes exigences de conception qui doivent être approuvées par un organisme de certification. Un étroit partenariat avec un concepteur de plates-formes reconnu est crucial pour écourter le chantier et réduire les risques.

Modes d’exploitation

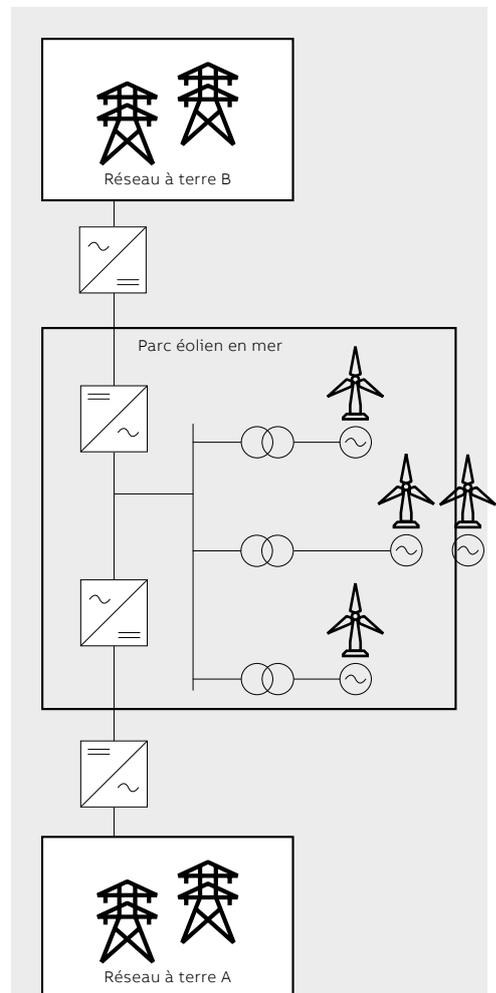
ABB a développé et mis en œuvre avec succès des concepts novateurs de gestion du réseau offshore îloté en régime normal et perturbé. L’une de ses innovations tient dans l’installation d’une imposante résistance de freinage à commande électronique (hacheur CC) pour stabiliser le réseau en mer en cas de perturbations dans le réseau à terre.

TenneT a su tirer les leçons des toutes premières connexions à l’éolien offshore pour améliorer les règles de raccordement au réseau. Le logiciel de régulation flexible et modulaire d’ABB pour les systèmes de transport en courant continu CCHT et en courant alternatif FACTS a facilité la mise en œuvre de ces nouveaux « codes réseau » sur les liaisons en service.

04a



04b



—
04 Différents schémas de raccordement de l'éolien marin

04a Liaison point à point

04b Plate-forme offshore à plusieurs liaisons CCHT

04c Plate-forme offshore à liaison CCHT à extrémités multiples

04d Plate-forme offshore à liaisons CA et stations CCHT dos à dos (interconnexion Danemark-Allemagne Kriegers Flak Combined Grid Solution)

Particularités offshore

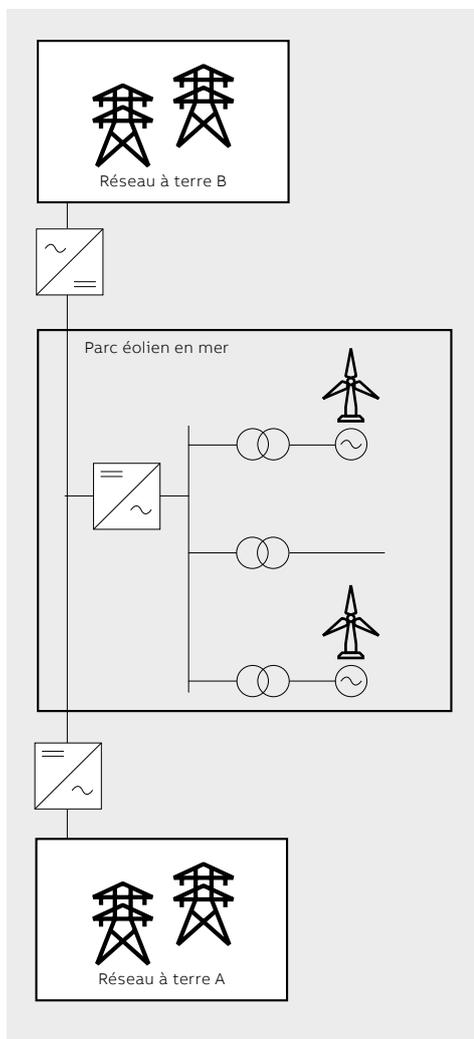
Un réseau CA en mer se différencie des réseaux électriques classiques, avec leurs lignes de transport, leurs charges et leurs grosses génératrices synchrones, par la présence de machines asynchrones, de câbles sous-marins et de nombreux transformateurs élévateurs et aérogénérateurs rapprochés.

—
Le logiciel de régulation flexible et modulaire d'ABB pour les systèmes CCHT et FACTS a facilité la mise en œuvre de nouveaux « codes réseau » sur les liaisons en service.

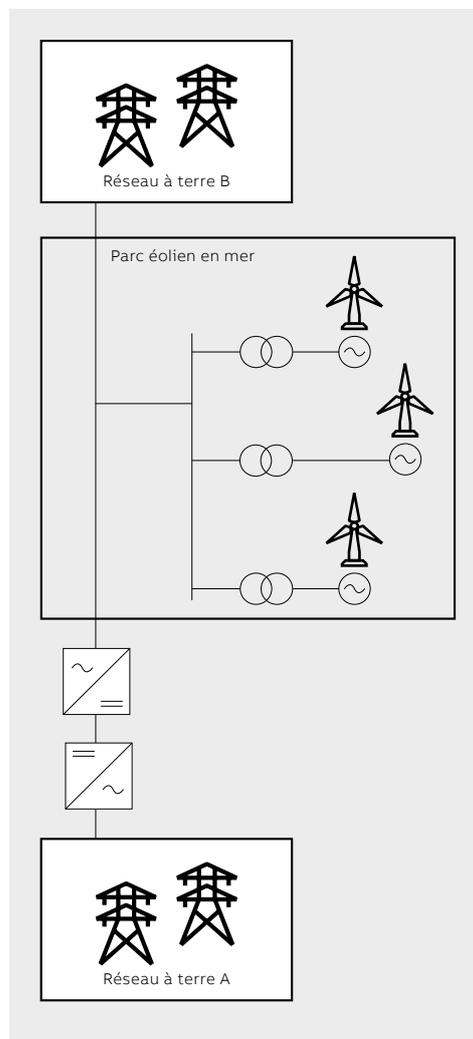
L'absence de machines synchrones fait que l'inertie du système est faible, voire nulle. Celui-ci peut alors subir de fortes excursions de fréquence et de déphasage en cas de délestage de charge consécutif à un défaut CA en mer ou à terre.

D'où la difficulté pour la boucle à verrouillage de phase des commandes d'aérogénérateurs de suivre avec précision la tension du réseau. Si un défaut se produit dans le réseau terrestre, le hacheur CC fait rempart en absorbant l'excédent de puissance éolienne impossible à rapatrier à terre, évitant la propagation du défaut en mer. Associé à la régulation de fréquence et de tension du convertisseur CCHT offshore, le dispositif garantit la stabilité du réseau marin. Pour parer aux défauts survenant au large, il importe de concevoir avec soin la commande de la liaison CCHT et des aérogénérateurs.

04c



04d



	BorWin1	DolWin1	DolWin2
Client (pays)	TenneT (Allemagne)	TenneT (Allemagne)	TenneT (Allemagne)
Mise en service	2009	2013	2014
Puissance assignée (MW)	400	800	916
Tension CA en mer (kV)	155	155	155
Tension CC (kV)	±150	±320	±320
Tension CA à terre (kV)	380	380	380
Longueur des câbles terrestres (km)	2 x 75	2 x 90	2 x 90
Longueur des câbles sous-marins (km)	2 x 125	2 x 75	2 x 45
Constructeur de la plate-forme	Heerema Fabrication Group (Pays-Bas)	Heerema Fabrication Group (Pays-Bas)	Aibel AS (Norvège)
Conception	Fondation type <i>jacket</i>	Fondation type <i>jacket</i>	Structure gravitaire
Parcs raccordés	Bard Offshore 1	Borkum West II MEG Offshore 1 Borkum Riffgrund 1	Merkur Offshore Trianel Borkum Borkum Riffgrund 1

05

Autres difficultés : les résonances engendrées par la capacité élevée des câbles sous-marins et par l'inductance des câbles et des transformateurs sont mal amorties, en particulier au tout début de la mise sous tension du système CA, lorsque la production éolienne est faible ou inexistante.

— Le hacheur CC absorbe l'excédent de puissance éolienne offshore impossible à rapatrier à terre, évitant la propagation du défaut en mer.

De même, la proximité électrique des transformateurs, source d'interaction en phase de mise sous tension des appareils au démarrage du

06



—
05 Systèmes CCHT d'ABB pour le raccordement de l'éolien offshore

—
06 La plate-forme CCHT DolWin2 en route vers sa destination, à 45 km des côtes allemandes

—
07 Plate-forme installée

parc, peut induire des surtensions harmoniques temporaires, accroître les contraintes sur les enroulements et faire dysfonctionner les protections différentielles et contre les surintensités. La mise en route d'un réseau offshore CA n'a donc rien de facile. En partenariat avec TenneT, ABB a mis au point des remèdes à ces instabilités : commutation commandée (en un point donné de l'onde), filtrage des harmoniques au niveau du convertisseur CCHT offshore, ajout de filtres, etc.

—

Force est de maintenir l'équilibre entre une conception robuste et éprouvée, et des innovations propres à réduire encore le coût de l'éolien en mer.

L'intérêt de la normalisation

Au cours de la dernière décennie, l'industrie a tiré de nombreux enseignements de la conception et de l'exploitation des liaisons CCHT pour l'éolien offshore, qui ont abouti à une collection de recommandations et de codes réseaux.

Si la normalisation est un puissant moyen d'harmoniser les meilleures pratiques des fournisseurs, elle ne doit pas entraver les avancées techniques qui font aujourd'hui débat comme le raccordement direct des aérogénérateurs au convertisseur CCHT offshore sans passer par les transformateurs élévateurs installés sur les plates-formes. Force est de maintenir l'équilibre entre une conception robuste et éprouvée, et des innovations propres à réduire encore le coût de l'éolien en mer.

Dans le sillage du vent

La rapide progression de l'éolien offshore ces dix dernières années est appelée à se poursuivre, à la faveur d'économies d'échelle dopées par la fourniture d'aérogénérateurs et de parcs toujours plus puissants, qui réclameront davantage de liaisons CCHT. La maturité technologique de la filière, confortée par les retours d'expérience positifs des systèmes en exploitation, permet de réduire les risques et de sécuriser la mise en œuvre efficace et opportune des connexions au réseau. De son côté, ABB poursuivra son rôle d'innovateur du CCHT pour construire des réseaux plus robustes et plus performants, dans le respect de l'environnement. ●

07





Numérique

et analytique



le que



Là où l'analogique ne connaît le risque que sous forme de probabilité, le numérique sait le quantifier et, partant, le gérer. La palette d'outils numériques ABB stabilise l'alimentation électrique, modélise les onduleurs solaires à des fins de simulation, ou harmonise par le haut les mesures de cybersécurité au sein du Groupe : autant de risques et donc de mauvaises surprises en moins !

- 46 Stabiliser la tension dans l'industrie
- 52 Modéliser les onduleurs solaires ABB pour simuler les réseaux électriques
- 58 Sécuriser le numérique

NUMÉRIQUE ET ANALYTIQUE

Stabiliser la tension dans l'industrie

L'industrie est le pilier de nombreuses économies. Malheureusement, dans certains pays, la stabilité du réseau électrique laisse à désirer au point d'arrêter la production. Les dispositifs de protection PCS100 d'ABB garantissent la continuité de la fourniture, même en cas de chute brutale de tension.



Bruce Bennett
ABB Power Conditioning
Napier (Nouvelle-Zélande)

bruce.bennett@nz.abb.com

Les industriels cherchent depuis des années à améliorer la productivité tout en baissant les coûts de fabrication. Des objectifs qui, en vertu de la loi des rendements décroissants, sont de plus en plus difficiles à atteindre. De nombreuses sociétés renforcent donc l'automatisation de leurs procédés pour rester dans la course. Cette tendance se traduit par une banalisation du parc de machines, voire de toute l'usine.

En dépit de leur rendement supérieur, les nouvelles machines sollicitent toujours plus les réseaux de production, de transport et de distribution d'électricité.

Toujours plus d'électricité

Des décennies de production au plus juste ont donné naissance à de grands principes d'économie immuables, comme la réduction des rebuts par la minimisation des pannes ou l'abandon des activités sans valeur ajoutée. L'irruption du numérique dans l'industrie, favorisée par la montée en puissance de calcul, permet d'accéder à des analyses plus pointues,

à des données plus fournies rapatriées de capteurs plus nombreux, à des automatismes plus performants (robotique tactile, par exemple) et à des informations plus détaillées sur la performance des machines.

Toutes ces innovations technologiques consomment beaucoup d'énergie. Quand la fourniture électrique est irrégulière ou hors spécifications, les appareils sont sujets à des dysfonctionnements risquant de compromettre la fiabilité, la précision, voire l'exactitude des





01

—
01 Les outils de production modernes ont besoin d'une alimentation fiable, en particulier dans les pays en développement où l'émergence d'un secteur industriel peut faire décoller une économie essentiellement agricole.

données. Une variation de tension, même très brève, peut endommager irrémédiablement une machine ou mettre à l'arrêt un élément de la chaîne →1, quand ce n'est pas tout le site. Au-delà des pertes de production, des retards de livraison, des dégâts matériels, etc., ces incidents sont lourds de conséquences. Par exemple, dans un secteur comme l'agroalimentaire où la production se déroule en atmosphère contrôlée, le nettoyage, la décontamination et la remise en route du process peuvent prendre des heures.

La montée en charge de la production va de pair avec l'augmentation du nombre et de la taille des machines qui, en dépit de leur rendement éventuellement supérieur, sollicitent encore plus les réseaux de production, transport et distribution électrique. Conséquence : la stabilité du réseau se dégrade et le risque de perturbation, donc de coupure, augmente.

Ces arrêts intempestifs peuvent coûter très cher à l'industriel (jusqu'à 4 % de son chiffre d'affaires [1]), annulant tous les gains de productivité, de coût unitaire de production ou de qualité escomptés.

Gamme PCS100 d'ABB

Aucun réseau n'est immunisé contre les défauts d'alimentation, qui peuvent prendre diverses formes (panne générale, transitoires, fluctuations de fréquence ou harmoniques), même si les chutes brutales ou « creux » de tension constituent 90 % des instabilités pénalisant les sites de production. Ces perturbations ont le plus souvent des causes exogènes (vent violent, orage, neige ou givre, anomalies sur le réseau de transport, erreurs de forage, etc.) sur lesquelles l'industriel n'a aucune prise : d'où l'importance de prévoir une protection adéquate !

Régulation de tension en continu, protection contre les creux de tension ou alimentation de la charge en cas de panne : la gamme PCS100 corrige et stabilise l'onde électrique.

Les solutions ABB de conditionnement de puissance protègent les machines, lignes de production ou sites entiers des perturbations électriques. Les produits de la gamme PCS100 garantissent une alimentation toujours conforme aux prescriptions, réduisant le risque d'interruption du procédé ou de casse machine. Régulation en continu, protection contre les creux ou alimentation de la charge en cas de coupure : les récepteurs du site client disposent d'une onde de tension « propre », équilibrée, sans déphasage.

PCS100 AVC-20

Le conditionneur actif de tension en ligne PCS100 AVC-20 régule la tension d'entrée à 100 % de sa valeur nominale, même face à des variations permanentes de ± 20 % de la tension réseau. Par exemple, si le réseau électrique d'un site est sous-dimensionné par rapport aux besoins, le branchement de fortes charges fait souvent chuter la tension bien en-dessous de sa plage nominale sur une période allant d'une minute à plusieurs heures.

Le PCS100 AVC-20 d'ABB régule la tension d'entrée à 100 % de sa valeur nominale, même face à des variations permanentes de ± 20 % de la tension réseau.



— 02 À l'image de l'AVC-40, les produits de la gamme PCS100 d'ABB sont incontournables dans les pays où le réseau électrique est faible mais aussi dans le monde développé, où le plus petit gain de productivité peut se traduire en avantage concurrentiel.

Ces creux surviennent fréquemment pendant les pics de consommation où le soutirage d'électricité est maximal. Si une chute de 20 % se produit sur un réseau 400 V triphasé, l'AVC-20 est capable de relever la tension à sa valeur nominale pendant toute la durée de la perturbation pour épargner les charges en aval. De la même manière, il peut absorber une surtension de 20 % maxi si la tension réseau grimpe rapidement suite à l'arrêt d'un gros consommateur.

Cette régulation de tension est continue, mais aussi extrêmement rapide : le retour à la normale s'effectue généralement en moins de 20 millisecondes, soit la durée d'un cycle sur un réseau 50 Hz.

PCS100 AVC-40

L'AVC-40 →2, destiné aux sites subissant de fortes chutes de tension, est capable de pallier en moins de 18 ms un creux de 40 % de la tension nominale, soit 240 V pour un réseau 400 V. À ce niveau, la durée de compensation est toutefois limitée à 30 s en raison des contraintes thermiques. En continu, il régule des écarts de ± 10 % et corrige les creux de tension mono/biphasés ainsi que les déphasages associés.

Branché en permanence sur le réseau de distribution, l'AVC-40 fonctionne sans batterie ni autre dispositif de réserve d'énergie.

—
Le PCS100 AVC-40 peut rectifier un creux de tension de 40 % de la valeur nominale.

PCS100 UPS-I

L'alimentation sans interruption (ASI) PCS100 UPS-I d'ABB →3 protège les sites industriels secourus, en cas de défauts et de pannes du réseau principal, par une seconde ligne haute tension ou un groupe électrogène, par exemple.





03

Si la tension réseau passe sous un seuil prédéfini ou disparaît complètement, l'ASI prend le relais avant que l'alimentation de secours n'entre en action. Le contrôleur UPS-I utilise le dispositif de stockage d'énergie (batteries ou supercondensateurs) raccordé pour maintenir les charges sous tension. Il gère le basculement vers la source secondaire puis la reconnexion au réseau une fois la tension rétablie dans la plage admissible.

—

Si la tension réseau passe sous un seuil prédéfini ou disparaît complètement, la PCS100 UPS-I prend le relais avant que l'alimentation de secours n'entre en action.

Les batteries de l'UPS-I assurent 30 s minimum d'autonomie à pleine charge, soit plus qu'il n'en faut pour démarrer et raccorder la plupart des groupes de secours. Si le site est alimenté par deux réseaux de transport, par exemple deux lignes de 110 kV depuis des centrales différentes, les supercondensateurs maintiennent la charge pendant 2 s maximum, le temps de l'inversion de sources automatique.

Dans tous les cas, les consommateurs sont alimentés dès le début de la défaillance réseau et jusqu'à ce que la source de secours soit opérationnelle. L'UPS-I gère le basculement et synchronise sa sortie avec les paramètres du réseau.

—

La PCS120 MV peut être raccordée à un réseau de distribution 11/22 kV et protéger un site entier.

Protection moyenne tension PCS120 MV

La gamme PCS100 d'ABB, avec des valeurs assignées allant de 150 à 3600 kVA, protège machines, lignes ou sites des perturbations électriques les plus fréquentes. Au fur et à mesure que les charges et leur complexité augmentent, les industriels doivent revoir à la hausse leurs stratégies de protection et opter pour des conditionneurs de tension fiables et plus puissants. C'est pourquoi ABB propose une nouvelle ASI moyenne tension pouvant être raccordée à un réseau de distribution 11 ou 22 kV et capable de protéger un site entier : la PCS120 MV →4. Les unités, d'une puissance nominale de 2,25 MVA, peuvent être montées en parallèle pour assurer le niveau de protection maximal supporté par les dispositifs de commutation.

—
03 Alimentation sans interruption PCS100 UPS-I

—
04 Alimentation sans interruption moyenne tension PCS120 MV

—
Bibliographie

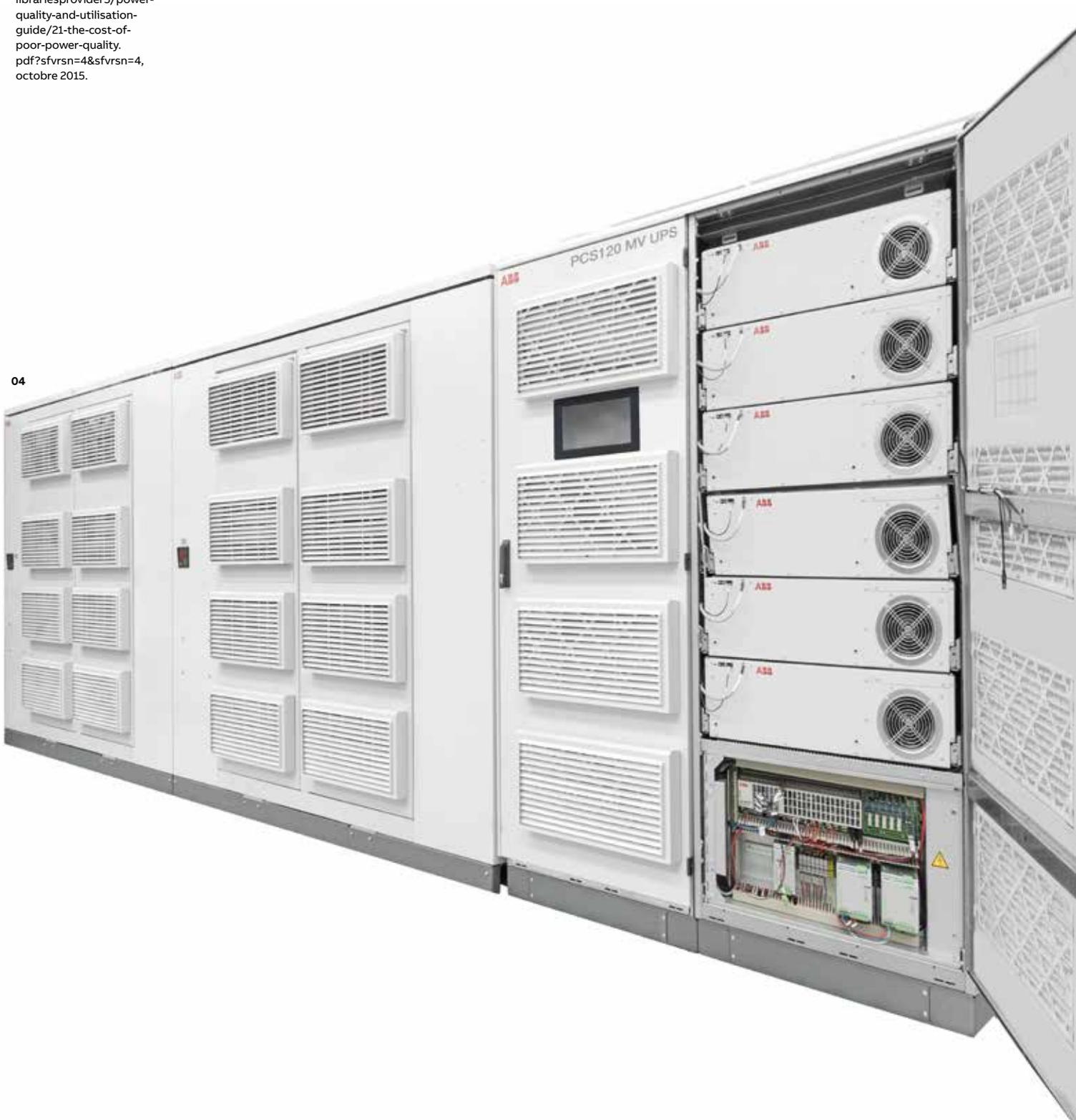
[1] Copper Development Association, *The Cost of Poor Power Quality*, Publication European Copper Institute, disponible sur : <http://admin.copperalliance.eu/docs/librariesprovider5/power-quality-and-utilisation-guide/21-the-cost-of-poor-power-quality.pdf?sfvrsn=4&sfvrsn=4>, octobre 2015.

L'ASI utilise une réserve d'énergie semblable à celle de la PCS100 UPS-I et gère les sources d'alimentation secondaires. Très bien adaptée aux grandes charges industrielles devant être protégées dans leur totalité, la PCS120 MV s'adresse tout naturellement aux exploitants de datacenters.

Pour demeurer compétitifs, les sites industriels modernes ont de plus en plus recours à l'automatisation et à l'électronique.

Les produits de conditionnement de tension ABB aident les ingénieurs et responsables de production à éviter les coûteux arrêts intempestifs tout en protégeant le matériel sensible des dégâts occasionnés par les imperfections du réseau de distribution. Pour l'industriel, c'est la garantie de voir ses procédés complexes et exigeants se dérouler sans interruption ni perturbation, et de garder ainsi une longueur d'avance sur la concurrence. ●

04



NUMÉRIQUE ET ANALYTIQUE

Modéliser les onduleurs solaires ABB pour simuler les réseaux électriques

Avec leur large plage de puissances et de tensions assignées, les onduleurs solaires d'ABB ont besoin d'un outil de modélisation rapide, précis, intuitif et, qui plus est, compatible avec les logiciels d'analyse et de simulation des grands réseaux. La plate-forme *Universal Framework* remplit toutes ces exigences.

Piotr Mars
Miłosz Miśkiewicz
Paweł Błaszczuk
Tomasz Kuczek
ABB Corporate Research
Cracovie (Pologne)

piotr.mars@
pl.abb.com
milosz.miskiewicz@
pl.abb.com
pawel.blaszczuk@
pl.abb.com
tomasz.kuczek@
pl.abb.com

La très forte contribution du solaire photovoltaïque (PV) à la production d'énergie renouvelable est appelée à se confirmer dans les années à venir. Dès lors, la richesse de l'offre de produits dédiée à cette filière sera déterminante pour la croissance d'ABB.

L'offre Onduleurs solaires d'ABB couvre une large gamme de puissances à différents niveaux de tension.

Son vaste catalogue comporte notamment des onduleurs solaires destinés à des applications de production PV couvrant une large plage de puissances assignées à différents niveaux de tension :



—
01 Onduleur solaire
PVS980

- Onduleurs « de chaînes » (*string*) de 2 à 60 kW, aussi bien pour le résidentiel que pour la production distribuée ou les réseaux industriels à grande échelle ;
- Onduleurs centraux de 100 à 2300 kW et stations clé en main (onduleurs et équipements associés), adaptés aux grandes centrales solaires tertiaires.

La solution ABB : Universal Framework

La vaste palette applicative des onduleurs solaires ABB oblige à disposer d'un outil numérique universel capable à lui seul de modéliser avec rapidité, précision et intuitivité le comportement de ces appareils dans tous les cas d'usage possibles. C'est la vocation de la plateforme de simulation Universal Framework qui, couplée à l'onduleur central PVS980 →1, s'intègre dans plusieurs logiciels d'analyse et de simulation des réseaux électriques →2.

La solution ABB repose sur la création de bibliothèques de liens dynamiques DLL (*Dynamic Link Libraries*) qui modélisent à l'aide d'algorithmes le contrôle-commande du PVS980 et son raccordement au réseau électrique. Des études montrent que les modèles de comportement de type « boîte noire » élaborés par Universal Framework donnent les mêmes résultats numériques, quel que soit le logiciel mis en œuvre (PSCAD, MATLAB, DigSILENT PowerFactory, PSS®E).

L'outil élaboré au fil des ans par ABB satisfait aujourd'hui à toutes les exigences de la conception et de l'analyse des réseaux. Simple d'utilisation, il s'adapte sans peine aux nouveaux impératifs et aux différents environnements du client.

—
ABB propose un outil universel de modélisation rapide, précise et intuitive du comportement des onduleurs pour toutes les applications de système électrique.

Le respect des règles

Dans chaque pays, le raccordement des onduleurs au réseau est régi par un corpus de règles d'exploitation sûre et efficace de l'ensemble du système électrique, ou « codes réseaux ». [1] La conformité à ces critères établis par le gestionnaire de réseau est fondamentale pour toute simulation. L'outil Universal Framework fournit aujourd'hui un modèle numérique suffisamment précis pour caractériser les grandeurs électriques des équipements réels sous différents régimes de fonctionnement.

01



Les codes réseaux décrivent le fonctionnement des équipements et des modèles de référence en temps normal, mais aussi, en cas de défaut, la mise à disposition de puissances active et réactive. Le modèle d'onduleur construit par Universal Framework doit renseigner sur la quantité de puissance active fournie au réseau, en fonction de l'alimentation en énergie primaire, tant à une consigne donnée que sur modification de la fréquence du réseau. La régulation de puissance réactive à différents points de consigne est quant à elle déterminée par une courbe caractéristique de qualité du courant.

Le modèle doit également suivre la capacité de l'onduleur à supporter un écart soudain de la tension réseau de son amplitude nominale pendant un temps donné et, au-delà, l'aptitude de l'appareil à déclencher. Autre aspect pris en compte : l'injection de courant réactif pour renforcer la tenue du réseau à un creux de tension. Des mesures ont confirmé les bonnes performances de la simulation Universal Framework dans ces conditions de défaut. Le certificat de validation, très souvent demandé par le client, est une précieuse valeur ajoutée à la solution ABB.



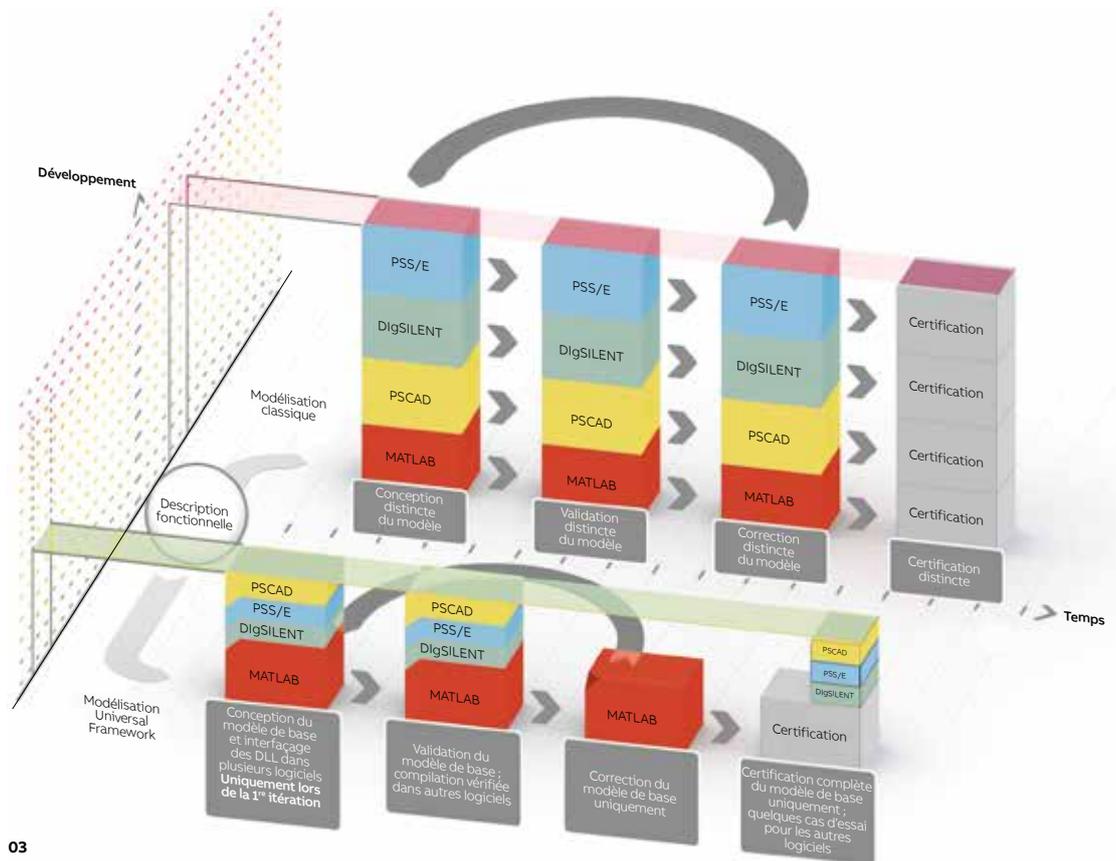
Le modèle doit renseigner sur la quantité de puissance active fournie au réseau en fonction de l'alimentation primaire en énergie.

L'universalité pour principe

L'outil Universal Framework doit avant tout être capable de simuler la totalité des scénarios d'exploitation soumis aux codes réseaux. Les deux grandes composantes de la simulation sont la source d'énergie PV et l'onduleur.

—
02 Logo de la plate-forme
Universal Framework

—
03 Comparaison
Universal Framework/
modélisation classique



03

La première est simulée à l'aide d'un modèle mathématique ou physique du panneau solaire, et de deux paramètres fondamentaux : l'irradiation et la température. L'utilisateur peut, à partir des données constructeur, caractériser le panneau dans Universal Framework et créer à volonté des modules PV virtuels pour simuler plusieurs niveaux de puissance d'entrée. Il est possible d'inclure cette partie dans une DLL, mais cela n'a rien d'obligatoire puisque le client peut vouloir connecter un modèle externe de champ PV.

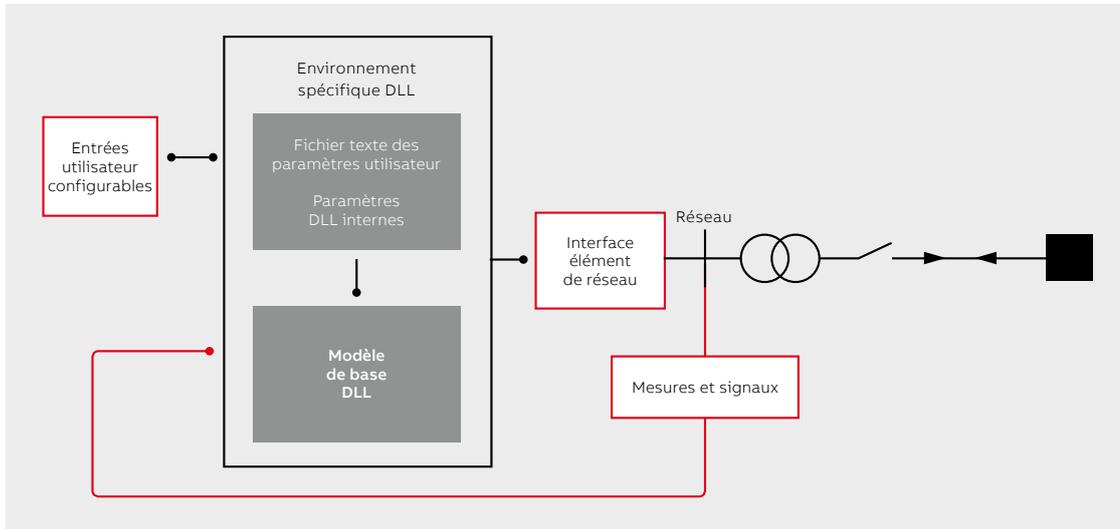
La simulation de l'onduleur consiste en une représentation mathématique de l'appareil et de ses algorithmes de contrôle-commande, avec des fonctions comme l'extraction maximale de puissance de la centrale PV, la synchronisation et le soutien du réseau (notamment par injection de réactif), le réglage de tension ainsi que la régulation de puissance active et réactive, ou encore la réalimentation après une coupure brève. Universal Framework simule les transitoires électromagnétiques et les interfaces d'entrées/sorties en valeur efficace pour prendre en compte les différents types de simulation utilisés par le client.

Chaque client ayant son environnement de simulation, il est souhaitable de transcrire un modèle de base unique en différents modules fonctionnels. On peut ainsi recourir à un modèle élémentaire MATLAB/Simulink pour générer des blocs DLL qui constitueront autant de modèles externes distincts dans le logiciel tiers

—
Universal Framework simule la totalité des scénarios d'exploitation soumis aux codes réseaux.

(DigSILENT PowerFactory, PSCAD ou PSS/E, par exemple). La démarche est entièrement automatisée avec une plate-forme commune se chargeant de générer le code fonctionnel du modèle. Le code interfaçant Universal Framework et le logiciel de simulation tiers (*wrapper*) est fourni et encapsulé dans le modèle final.

Parmi les autres fonctionnalités exigées de l'outil, citons l'automatisation des essais, l'édition de rapports et les tests de régression du modèle qui aident les développeurs à construire, éprouver et déboguer le modèle.



04

Universal Framework facilite également le test rétroactif (*backtesting*) du modèle DLL dans MATLAB/Simulink, indispensable pour valider le code généré. Le bloc DLL peut être testé dans le même environnement que le modèle de base. Il est en outre possible de livrer aux clients utilisant MATLAB/Simulink les modèles construits sous forme de boîte noire, ce qui a le grand avantage de protéger la propriété intellectuelle d'ABB. Le modèle complet peut alors être envoyé au client dans PSCAD, PowerFactory ou PSS/E, sans rien dévoiler des algorithmes internes.

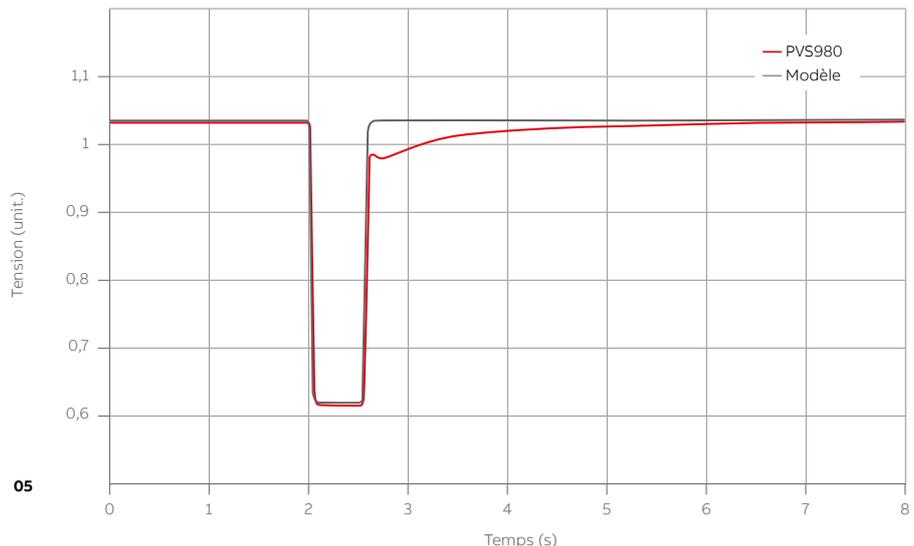
Les manuels étant fournis, le client est en mesure de reproduire aisément les résultats afin de valider la conformité de l'onduleur au code réseau. Par rapport à la méthode classique, l'ensemble du processus de développement et de certification du modèle gagne beaucoup à privilégier Universal Framework →3.

Tributaire du logiciel de simulation employé, la mise en œuvre du modèle DLL n'est pas aussi simple qu'il n'y paraît ; chaque simulateur a ses propres solveurs, méthodes de calcul,

interfaces de signaux et bibliothèques d'éléments ! La plate-forme universelle y remédie par l'intermédiaire d'un « environnement spécifique DLL » →4 stipulant une interface dédiée au logiciel. Cette solution permet au modèle DLL de coopérer avec le réseau électrique en pilotant

—
Par sa simplicité, sa souplesse et sa polyvalence, la plate-forme de modélisation d'ABB promet d'importantes réductions de coût par rapport aux outils classiques.

l'élément spécifique au logiciel, à partir des mesures rapatriées et des entrées utilisateur configurables. Les paramètres propres au modèle de base DLL sont récupérés d'un fichier texte externe, commun à tous les logiciels de simulation.



05

—
04 Interfaçage du modèle DLL dans différents logiciels de simulation

—
05 Comparaison mesure/simulation de la valeur efficace de la tension directe phase-phase pendant un défaut symétrique

—
06 Comparaison mesure/simulation de la valeur efficace du courant direct pendant un défaut symétrique

—
07 Exemple de référentiel pour la conception d'un système à 8 onduleurs photovoltaïques

Bibliographie

[1] Romero, I., Daniel, J., et al., « De nouvelles règles du jeu », *ABB Review* 4/2015, p. 50-55.

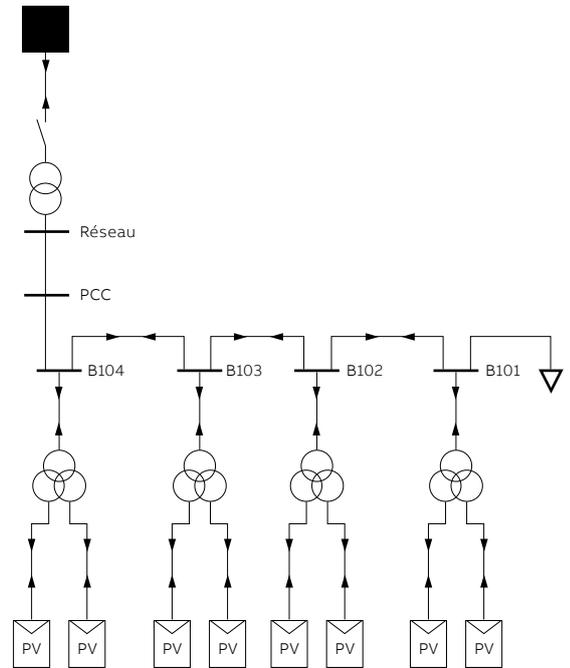
Validation du modèle

Le modèle ainsi développé a été confronté à l'expérimentation en laboratoire pour vérifier sa réponse à plusieurs scénarios de code réseau et situations de défaut. Les courbes de tension et de courant →5,6 montrent une nette convergence PVS980/modèle en régimes établi (avant défaut), perturbé (défaut en cours) et transitoire. Les divergences après défaut sont dues au courant d'appel du transformateur, qui n'est pas pris en compte dans la modélisation. Pour autant, l'erreur reste dans les tolérances.

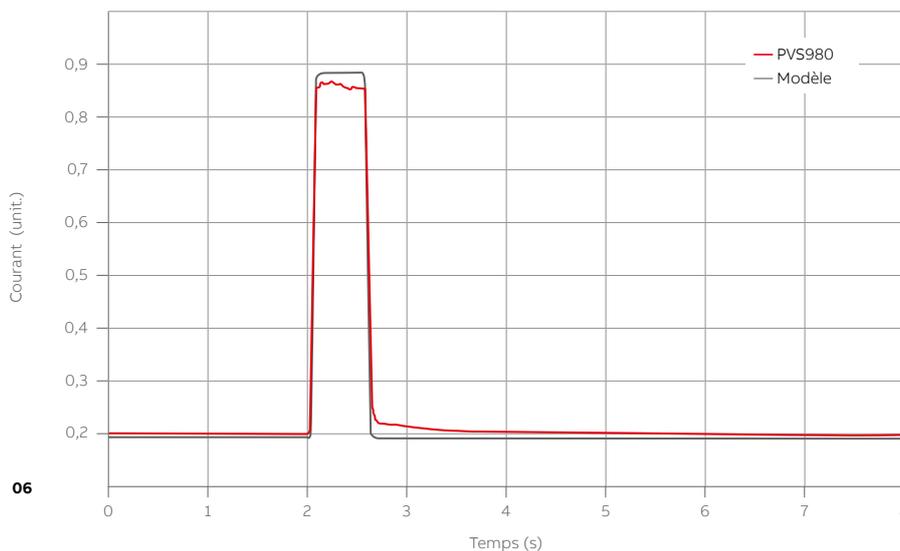
Une fois validés, ces modèles peuvent servir de référentiel à d'autres études englobant l'ensemble du réseau client →7. La partie réseau utilise des bibliothèques spécifiques au logiciel et inclut généralement les transformateurs de puissance et de distribution, les câbles ainsi que les impédances du réseau au point de couplage commun (PCC).

Polyvalence

Universal Framework a donné satisfaction à d'autres produits de l'offre Onduleurs solaires d'ABB, confirmant ainsi son universalité. L'outil est compatible avec une panoplie de logiciels d'analyse de réseaux électriques et réutilisable pour différentes catégories de produits comme les onduleurs d'aérogénérateurs, les compensateurs statiques de puissance réactive STATCOM et les variateurs moyenne tension. Ce modèle universel peut en outre s'étendre à d'autres logiciels de simulation gérant une interface DLL, sur demande client. Par sa simplicité, sa souplesse et sa polyvalence, la plate-forme de modélisation d'ABB promet d'importantes réductions de coût par rapport aux outils classiques. ●



07



06

NUMÉRIQUE ET ANALYTIQUE

Sécuriser le numérique

En matière de sécurité informatique, trop d'entreprises manquent encore d'une vision d'ensemble et se contentent d'empiler système sur système. Une telle négligence a un coût : la facture mondiale de la cybercriminalité pourrait avoir doublé d'ici cinq ans. ABB, avec une base installée de plus de 70 millions d'appareils connectés, 70 000 systèmes de commande numériques et 6000 solutions logicielles d'entreprises, a conscience de l'enjeu. Son Conseil de cybersécurité rassemble toute l'expertise du Groupe afin d'avoir une visibilité maximale des menaces potentielles et d'harmoniser la mise en œuvre des mesures de sécurité entre les différentes divisions.



Satish Gannu
ABB Industrial
Automation
San Jose
(Californie, États-Unis)

satish.gannu@us.abb.com

Dans une récente étude [1], le cabinet britannique Juniper Research estime que la cybercriminalité (vol de données) coûtera 8000 milliards de dollars aux entreprises dans les 5 prochaines années. La multiplication des attaques s'explique par deux phénomènes : la généralisation de l'accès à Internet et la difficulté qu'ont les entreprises à suivre l'évolution rapide de la technologie, des menaces et des mesures de protection.

—
La cybercriminalité devrait coûter 8000 milliards de dollars aux entreprises dans les cinq prochaines années.

Selon Juniper Research, les vols de données vont presque doubler entre 2017 et 2020, passant de 2,8 à 5 milliards. La cybersécurité devient donc une exigence de plus en plus critique, a fortiori quand les entreprises se contentent



de juxtaposer systèmes hérités et nouveaux, sans vision d'ensemble de l'architecture ou de la sécurité de leur réseau.

Dispositifs omniprésents

Avec une base installée de plus de 70 millions d'appareils connectés, 70 000 systèmes de commande numériques et 6000 solutions logicielles d'entreprises, ABB prend la question très au sérieux. Interlocuteur privilégié des industriels, le Groupe crée depuis 40 ans des solutions numériques sécurisées pour des secteurs aussi sensibles que le pétrole et le gaz ou la production et la distribution d'énergie, où la moindre interruption a des répercussions dramatiques sur l'activité économique et l'environnement.

Coup de semonce

La faille de cybersécurité découverte en 2010 sur le site iranien d'enrichissement d'uranium de Natanz et baptisée Stuxnet fut un choc pour les industriels – et le monde entier.

ABB crée depuis 40 ans des solutions numériques sécurisées pour ses clients des secteurs sensibles.

Stuxnet a mis au grand jour les vulnérabilités d'un grand nombre de dispositifs, aucune entreprise n'étant à l'abri. Aucun équipement ABB n'a été affecté, mais l'incident a déclenché un cycle de réflexion en interne.



Conseil de cybersécurité du groupe ABB



01

Renforcement de la disponibilité opérationnelle

La réponse d'ABB à cette situation fut d'harmoniser les initiatives, jusqu'alors locales et isolées, au niveau institutionnel. C'est ainsi qu'est né le Conseil de cybersécurité du Groupe →1, qui est depuis devenu un organe à part entière chargé de renforcer en permanence la disponibilité opérationnelle d'ABB.

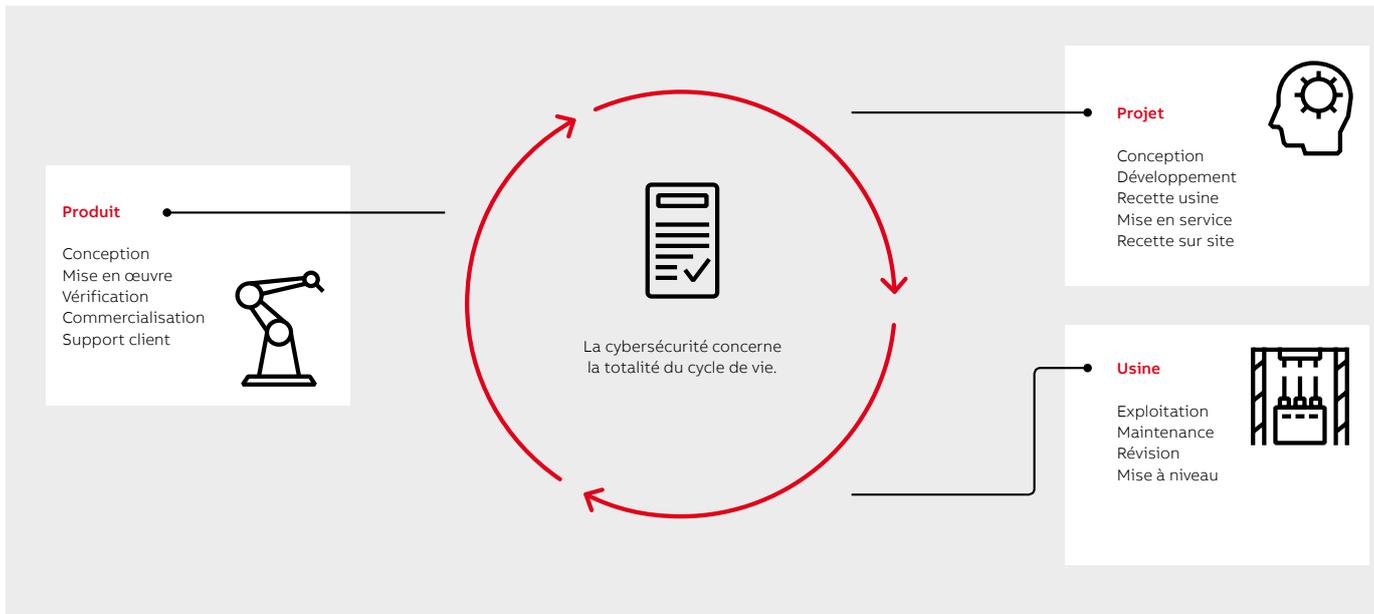
Le Conseil de cybersécurité d'ABB travaille à préserver l'excellence de la démarche cybersécuritaire dans toute l'entreprise.

Le Conseil rassemble l'expertise de divers services (R&D, architecture des SI, droit et communication) pour préserver l'excellence de la démarche cybersécuritaire dans toute l'entreprise.

Outre des partenariats avec des dizaines d'universités, il participe aussi aux travaux de normalisation de la plate-forme Industrie 4.0 et de l'Industrial Internet Consortium. Enfin, le Conseil garantit l'homogénéité des standards de cybersécurité, tant au sein d'ABB que parmi les sous-traitants, qui doivent offrir les mêmes garanties que le Groupe lui-même.

Cybersécurité holistique

Au fil des années, la cybersécurité est devenue un élément constitutif du portefeuille ABB, des études et du développement au support, en passant par la maintenance →2.



02

—
01 Le Conseil de cybersécurité d'ABB a pour mission de renforcer la disponibilité opérationnelle du Groupe.

—
02 ABB a une vision holistique de la cybersécurité qui couvre toute la chaîne de valeur, de la conception et du développement à la maintenance en passant par le support client.

Bibliographie

[1] Juniper Research, *Cybercrime to cost global business over \$8 trillion in the next 5 years*, disponible sur : [https://www.juniperresearch.com/press/press-releases/cybercrime-to-cost-global-business-over-\\$8-trn](https://www.juniperresearch.com/press/press-releases/cybercrime-to-cost-global-business-over-$8-trn), mai 2017.

ABB continue de chercher des moyens d'améliorer la sécurité et la fiabilité de son offre par divers biais :

- Modélisation des menaces et revues de conception de sécurité ;
- Formation des développeurs logiciels à la sécurité ;
- Tests d'intrusion internes et externes intégrés aux procédures d'assurance qualité.

La cybersécurité en automatisation industrielle est promise au même avenir que l'informatique d'entreprise : avec ses mises à jour logicielles automatiques, antivirus et correctifs pour enrayer la montée des menaces, elle fait désormais partie intégrante du quotidien. ABB innove sans relâche pour élargir l'éventail de fonctions de sécurité de ses produits et services, et aider ses clients à sécuriser leurs infrastructures critiques. ●

—
ABB innove sans relâche pour élargir l'éventail de fonctions de sécurité de ses produits et services, et aider ses clients à sécuriser leurs infrastructures critiques.

LE MOT DU MOMENT

Chiffrement quantique

La sécurité des systèmes critiques, comme le contrôle aérien ou les réseaux électriques, passe par un chiffrement extrêmement sûr et sans latence. La physique quantique est une solution.

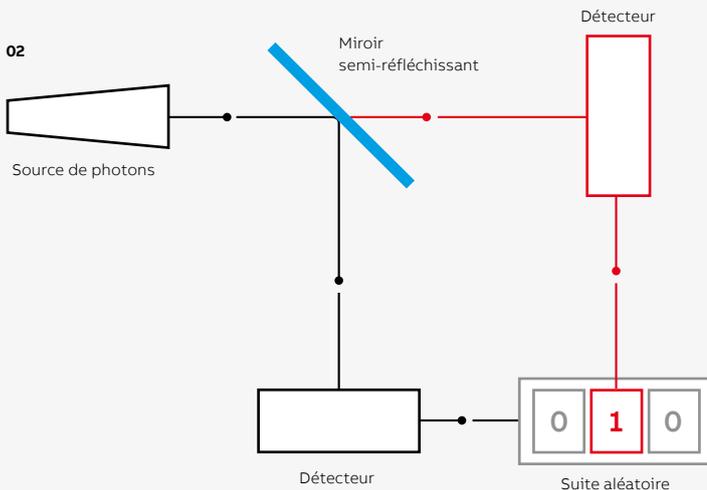


Rouven Floeter
ABB Power Systems,
Grid Automation
Baden (Suisse)

rouven.floeter@
ch.abb.com

Conséquence de la révolution numérique, les entreprises industrielles sont de plus en plus interconnectées et les échanges de données explosent. Certains procédés stratégiques ayant besoin d'un niveau de protection élevé, leur sécurité doit être revue de fond en comble.

Protéger physiquement une liaison de transmission ne suffit pas à la rendre invulnérable : certaines méthodes permettent de contourner les mesures de sécurité ou d'intercepter les données sans contact physique avec le câble.



01

Pour chiffrer les données, la cryptographie utilise une suite interminable de chiffres, plus simplement appelée « clé ». Si un tiers intercepte la communication, il peut certes récupérer et enregistrer les bits qui constituent le message mais, sans la clé, la puissance de calcul nécessaire pour « casser » le code est trop grande pour que l'opération ait une chance de réussir.



—
01 Carte de chiffrement
quantique SECU1 d'ABB

—
02 La physique quantique
permet de créer des
clés aléatoires pour
des systèmes vraiment
non déterministes.

La transmission s'effectue en deux temps : chiffrement des données puis échange des clés. Le chiffrement classique (dit « asymétrique ») à l'aide de grands nombres aléatoires va bientôt atteindre ses limites. En effet, les ordinateurs qui génèrent ces nombres étant déterministes, le résultat n'est pas réellement aléatoire : un ordinateur suffisamment puissant, quantique par exemple, peut donc déchiffrer les clés. Le chiffrement quantique adopte une approche résolument nouvelle, qui utilise les propriétés physiques de la lumière.

Prenons l'exemple d'un photon projeté sur une surface semi-réfléchissante : il peut soit la traverser, soit être réfléchi, mais pas les deux à la fois. En positionnant deux détecteurs de façon à enregistrer ces deux catégories de photons, puis en combinant leurs sorties, on obtient une suite binaire parfaitement aléatoire →2.

Passons maintenant à l'échange des clés. En cryptographie quantique, c'est l'orientation du champ électrique d'un photon (sa polarisation) qui transmet l'information. Les photons sont générés avec une polarisation aléatoire, que modifie toute tentative d'interception de la clé.

L'émetteur et le destinataire du message détectent le changement d'état et savent donc

qu'ils sont « écoutés ». Le processus de génération de clé et d'échange reprend alors au début. Cette méthode de chiffrement quantique, qui renforce grandement la sécurité des communications, a déjà été validée en conditions réelles.

Reste que, pour un système critique, la meilleure technique de chiffrement n'a guère d'intérêt si elle ne remplit pas les critères de performance (latence, gigue ou perte de paquets) et de disponibilité de l'infrastructure de communication. Il convient donc d'évaluer avec précision ces critères.

En 2017, ABB a fait l'acquisition des activités réseau de Keymile, un fournisseur technologique leader de solutions de télécommunication et de chiffrement quantique pour infrastructures sensibles. En fait notamment partie la carte de chiffrement SECU1 →1 qui s'installe à l'interface du dispositif et du réseau pour sécuriser la communication sans latence. ●

Publication ABB

Rédaction

Bazmi Husain
Chief Technology Officer
Group R&D and Technology

Adrienne Williams
Senior Sustainability
Advisor

Christoph Sieder
Head of Corporate
Communications

Reiner Schoenrock
Technology and Innovation
Communications

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

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

Édition

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

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

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

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

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

Édition et droits d'auteur
©2018
ABB Switzerland Ltd.
Baden (Suisse)

Impression

Vorarlberger
Verlagsanstalt GmbH
6850 Dornbirn
(Autriche)

—
Maquette
DAVILLA AG
Zurich (Suisse)

PAO

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

Traduction française

Cléa Blanchard
clea.blanchard@gmail.com

Avertissement

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

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

ISSN : 1013-3119

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



À vos tablettes

Retrouvez
l'appli
ABB Review
sur notre site
abb.com/abbreviewapp.

Gardez le contact

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

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



Dans le numéro 04/2018
Systemes autonomes

À l'usine physique, qui abrite les lignes de production, la révolution numérique substitue une usine « virtuelle », faite de compétences, d'outils et de systèmes gagnant en intelligence avec le temps. L'industrie doit alors réinventer ses méthodes, acteurs et lieux de fabrication. Notre prochain numéro offrira un avant-goût de la mise en œuvre de certains concepts révolutionnaires par les clients du Groupe.