

ABB

4 | 16
fr

review

Recharge de batteries en 15 secondes 8

Petite histoire de la grande traction ferroviaire 16

Record du monde du tunnel 35

Téléassistance en mer 44

La revue
technologique
du Groupe ABB

Transports



125

YEARS SERVING
THE WORLD FROM
SWITZERLAND
www.abb.com

Power and productivity
for a better world™



Les transports et leurs infrastructures sont l'une des applications les plus visibles et les plus tangibles de la technologie. En couverture, l'entrée du tunnel de base du Saint-Gothard, inauguré cette année, et sur cette page, le bus électrique TOSA: deux projets phares qui tracent la voie du progrès dans ce numéro d'ABB review.



En piste

- 6 La ville prend l'air**
Plaidoyer pour l'électrification des transports publics urbains

- 8 La charge fantastique**
Optimisation des batteries de bus électrique à recharge ultrarapide

- 13 Coulée verte**
Les bornes de recharge rapide en courant continu/alternatif
ABB Terra 53 passent au vert

- 16 L'électrification de la grande traction ferroviaire**
Une longue tradition ABB

- 25 Programme minceur**
Par son moindre poids, le transformateur de traction Effilight® réduit
les pertes électriques et la consommation d'huile jusqu'à 70 %

- 30 À l'assaut des montagnes**
Efficacité énergétique des trains Allegra

- 35 Effet tunnel**
Le tunnel de base du Saint-Gothard bien protégé grâce aux appareillages
moyenne tension ZX0 d'ABB et aux protections de câbles PMA

- 40 Percée au Pôle Nord**
Alimentation électrique, propulsion et automatisation du plus moderne
brise-glace portuaire au monde

- 44 Téléservices en mer**
Le nouveau portail ABB de surveillance et d'intervention maritimes

Au programme

- 50 Automation & Power World 2017**
Le monde de l'automatisation et de l'énergie tient salon à Houston

Simulation

- 51 Pertes & profits**
Prédire les pertes parasites supplémentaires et optimiser le blindage de la
cuve des transformateurs de puissance avec la simulation par éléments finis

Protection et progrès

- 57 Des éoliennes mieux protégées**
Stratégies de commutation et de protection basse tension

- 63 Protection suprême**
Prévenir les amorçages d'arc pour améliorer la sécurité électrique

- 67 Méga saut de puce**
Les dernières évolutions des composants IGCT de forte puissance

Disponibilité et productivité

- 72 Grid4EU**
Préfiguration des réseaux électriques de demain

- 79 Ascension robotique**
Les robots intelligents exploitent la montée en puissance de l'Internet
des objets, des services et des personnes pour passer dans le « nuage »

- 84 Solaire-diesel : mariage consommé**
L'électricité renouvelable s'invite dans les microréseaux

Rétrospective

- 90 Index 2016**
Tous les articles de l'année

Transports high-tech



Bazmi Husain

Chers lecteurs,

Déjà majoritaires en 2014 (54 %), les citoyens devraient constituer les deux tiers de la population mondiale en 2050. Or la densification des centres urbains soulève des enjeux sociétaux et environnementaux, et de nouvelles questions, dont celle des transports. Avec l'explosion démographique, de plus en plus de véhicules se disputent le bitume des villes tout en contribuant à la pollution. Au niveau local, leurs rejets polluants sont préjudiciables à la santé et à la qualité de vie des habitants. À l'échelle mondiale, les transports sont responsables de près d'un quart des émissions de CO₂ liées à l'activité humaine. Conscients de ces enjeux, les pouvoirs publics mettent en œuvre des mesures pour « verdir » les modes de transport.

À la pollution s'ajoute la congestion des centres-villes. Ces nuisances se doublent d'un poids économique : perte de temps et de productivité pour les personnes, rupture de la chaîne d'approvisionnement pour les marchandises.

Heureusement, nombreuses sont les réponses aux défis de la mobilité urbaine, des véhicules hybrides ou électriques aux métros de grande capacité.

Si les questions d'électrification et d'efficacité énergétique sont au centre des développements ABB, les compétences du Groupe ne s'arrêtent pas là : il est aux avant-postes de

la révolution numérique qui permet aux actifs et systèmes industriels de partager des données, de gagner en performance, d'être suivis à la trace et même dépannés à distance.

Dans d'autres domaines, peut-être moins souvent associés au nom d'ABB, les innovations vont aussi bon train : le transport maritime, les téléservices et la recharge de véhicules électriques, etc. Citons l'exemple de la charge « flash » ; comprenez le raccordement et l'alimentation ultrarapide d'un bus électrique en différents points de son itinéraire, ce qui permet d'alléger le pack de batteries, donc le véhicule, et de rendre ce moyen de transport plus concurrentiel. Au terme d'essais concluants, ABB vient de signer un contrat de fourniture du premier système de recharge flash de bus électrique au monde pour la bonne marche des transports genevois, en Suisse. Un succès sur toute la ligne...

Puisse cette nouvelle édition d'*ABB review* vous faire partager, aux côtés d'ABB, la grande aventure du transport électrique !

Bazmi Husain
Directeur des technologies
du Groupe ABB





La ville prend l'air

Plaidoyer pour
l'électrification des
transports publics
urbains

TIMOTHY PATEY, RETO FLUECKIGER, ALESSANDRO ZANARINI, JAN POLAND, DAVID SEGBERS, PHILIPPE NOISSETTE, BRUCE WARNER – Le développement durable des villes est une question centrale pour l'avenir de notre planète. Selon les projections des Nations unies, la population citadine, de 54 % en 2014, grimpera à 66 % en 2050 [1]. Dans le même temps, le monde devrait recenser 9,7 milliards d'individus, qui auront de plus en plus d'exigences en matière de mobilité. Or les transports urbains sont d'ores et déjà sources d'embouteillages et de pollution. Il est donc primordial de mettre l'accent sur la durabilité des infrastructures de transport pour préserver l'écologie, l'économie et le cadre de vie des villes de demain.

0,648 g/km en 1992 (Euro 1) à 0,018 g/km en 2013 (Euro 6) pour le transport routier [6]. Cette mesure a amélioré la qualité de l'air au cours des 20 dernières années, une tendance qui devrait se poursuivre à l'avenir. Toutefois, pour que les transports urbains atteignent un jour l'objectif « zéro émission », il faut électrifier la totalité du système.

Dans une perspective mondiale, cette électrification massive contribuera à atténuer le changement climatique, à condition que le réseau électrique accueille une forte proportion de renouvelables dans son mix énergétique.

La progression de l'urbanisation et de la démographie, tout comme les défis liés à l'augmentation du trafic, accentuent la pression en faveur de la neutralité carbone et de la pureté de l'air. Les villes préfèrent désormais la construction de réseaux de métros, de trams et de bus électriques à celle de grands axes routiers.

Le bus du XXI^e siècle

La ville de Genève, en Suisse, a franchi une étape majeure vers l'électrification complète de son réseau de transport urbain. Son bus 100 % électrique TOSA (Trolleybus avec Optimisation du Système d'Alimentation) est affranchi de la ligne aérienne de contact. La recharge itinéraire ultrarapide « flash » permet de limiter l'encombrement et la masse des batteries embarquées, et d'alléger le véhicule. Le temps de charge en fin de parcours est également réduit, ce qui constitue un atout non négligeable aux heures de pointe. La recharge flash par « biberonnage » se fait en toute sécurité, en 15 à 20 secondes seulement, le temps de laisser monter ou descendre des passagers.

L'absence de ligne aérienne a des vertus esthétiques mais aussi économiques ; elle diminue les coûts d'installation tout en offrant une plus grande flexibilité d'itinéraire pendant les travaux de voirie. Les coûts de maintenance, qui représentent une part considérable des dépenses d'exploitation d'une ligne traditionnelle, sont également réduits. Le bus TOSA et plus précisément ses batteries font l'objet de l'article en p. 8–12 de cette édition d'*ABB review*.

La nouvelle flotte de bus tout électriques TOSA peut remplacer les lignes jusqu'ici exploitées au diesel. La technologie est

aujourd'hui pleinement opérationnelle, comme en témoigne la ville de Genève.

TOSA est un exemple parmi tant d'autres des solutions novatrices globales d'ABB : le Groupe se charge d'électrifier les systèmes de transport public en fournissant à la fois les équipements de traction embarqués et les infrastructures de recharge. Le progrès de l'électrification, sous quelque forme que ce soit, est un puissant levier pour réduire les émissions et atteindre la neutralité carbone dans tous les modes de transport. Tel est le fil conducteur de ce numéro d'*ABB review*.

Timothy Patey

Reto Flueckiger

Jan Poland

Alessandro Zanarini

ABB Corporate Research

Baden-Dättwil (Suisse)

timothy.patey@ch.abb.com

reto.flueckiger@ch.abb.com

jan.poland@ch.abb.com

alessandro.zanarini@ch.abb.com

David Segbers

ABB Discrete Automation & Motion

Turgi (Suisse)

david.segbers@ch.abb.com

Philippe Noisette

Bruce Warner

ABB Power Grids

Genève (Suisse)

philippe.noisette@ch.abb.com

bruce.warner@ch.abb.com

Bibliographie

- [1] Nations unies, *World Population Prospects*, 2014.
- [2] Agence internationale de l'énergie (AIE), *Transport, Energy and CO₂: Moving Toward Sustainability*, 2009.
- [3] United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), *Report of the Conference of the Parties on its fifteenth session, held in Copenhagen from 7 to 19 December 2009, Part Two: Action taken by the Conference of the Parties at its fifteenth session*, 2009.
- [4] Meinshausen, M., et al., « Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C », *Nature* 458, p. 1158–1162, 30 avril 2009.
- [5] McGlade, C., Ekins, P., « The geographical distribution of fossil fuels unused when limiting global warming to 2°C », *Nature* 517, p. 187–190, 8 janvier 2015.
- [6] Cooper, E., et al., « Exhaust emissions of transit buses », rapport *EMBARQ's Sustainable Urban Transportation Fuels and Vehicles (SUTFV) program*, 2015.

Les transports sont aujourd'hui responsables de près d'un quart des émissions mondiales de CO₂ [2]. Dans le cadre de la lutte contre le changement climatique, des traités comme le Protocole de Kyoto (1997), l'Accord de Copenhague (2009) et plus récemment celui de Paris (2016) ont fixé à 2 °C l'augmentation maximale de la température moyenne du globe par rapport à celle de l'ère préindustrielle [3]. Mais pour avoir 50 % de chances de tenir cet objectif d'ici à la fin du siècle, les émissions de CO₂ entre 2011 et 2050 doivent être limitées à 1 100 gigatonnes [4].

L'enjeu est de taille. La pollution atmosphérique potentielle due à la combustion des réserves d'énergie fossile carbonée dépasserait de plus de trois fois ce seuil [5] ! D'où l'urgence de mettre en place des politiques de lutte contre le réchauffement climatique.

À l'échelon local, le souhait de nombreuses villes de respirer un air plus pur pousse aussi au changement. L'Union européenne a pour cela resserré les normes d'émission de particules de

Photo p. 6

L'électrification des transports, une bouffée d'air pour la ville.



La charge fantastique

Optimisation des batteries de bus électriques
à recharge ultrarapide

TIMOTHY PATEY, RETO FLUECKIGER, JAN POLAND, DAVID SEGBERS, STEFAN WICKI –
Avec ses six lignes de trolleybus et quatre de tramway, la régie des transports genevois (TPG) fait déjà amplement usage de la traction électrique. Elle va encore plus loin sur la voie de l'électromobilité zéro émission avec sa ligne 23, prête à accueillir une flotte de bus 100 % électriques.



Prise en charge

En route pour l'électrification à zéro émission

Un prototype de trolleybus électrique TOSA (Trolleybus avec Optimisation du Système d'Alimentation) a été présenté à Genève en 2013. Ce véhicule est équipé d'un système de recharge ultrarapide « flash » qui permet de recharger les batteries en moins d'une seconde. Le prototype a été développé par ABB et est destiné à être utilisé sur la ligne 23 de Genève.

La récupération de l'énergie de freinage réduit le gaspillage d'énergie et permet de prolonger l'autonomie du véhicule. Le système de recharge flash est compatible avec les infrastructures existantes et ne nécessite pas de modifications majeures des lignes de tramway.

Un précédent numéro d'ABB review avait déjà rendu compte du démonstrateur de bus électrique TOSA rechargé par « biberonnage », expérimenté en 2013 à Genève (Suisse).

Ce prototype ayant donné des résultats concluants, l'exploitant a décidé de transformer l'essai en juillet 2016, en commandant à ABB 13 stations de recharge flash ainsi que les équipements de traction (convertisseurs et moteurs) destinés aux 12 bus de la ligne 23, qui relie l'aéroport à la périphérie genevoise.

2 Atribus équipé d'une station de recharge flash: grâce au système de biberonnage, le bus « pompe » 600 kilowatts en 15 secondes.



ABB vient de remporter plus de 14,5 millions d'euros de commandes des TPG pour la fourniture de la technologie de recharge ultrarapide « flash » et des équipements de traction embarqués sur 12 bus 100 % électriques TOSA (Trolleybus avec Optimisation du Système d'Alimentation) → 1. Comparée aux lignes de bus alimentés au gazole, cette solution évite le rejet de 1000 tonnes de CO₂ par an.

ABB va ainsi déployer et installer 13 stations de recharge flash sur le parcours du bus → 2, auxquelles s'ajouteront 3 stations d'alimentation en tête de ligne et 4 au dépôt. Sa technique de transfert d'énergie est la plus rapide au monde : le véhicule à l'arrêt se connecte au point de charge en moins d'une seconde et ponctionne 600 kilowatts (kW) du réseau électrique pour « recharger ses accus » en 15 secondes. Au terminus, le plein d'énergie ne prend que 4 à 5 minutes.

Électrification des transports publics

Pour la traction électrique des bus urbains, ABB a développé une plateforme modulaire → 3 adaptée à toutes

ABB va déployer 13 stations de recharge flash itinérante, ainsi que 3 stations d'alimentation en tête de ligne et 4 au dépôt.

les applications de mobilité électrique, du traditionnel trolleybus aux bus à recharge rapide ou flash en courant continu (CC).

Au cœur de cette plate-forme figurent les puissants moteurs à aimants permanents ABB refroidis par eau, ainsi que le convertisseur ultracompact BORDLINE CC200 → 4, qui peut piloter jusqu'à deux moteurs de traction et tous les auxiliaires du bus. Ce convertisseur gère égale-

ment la recharge flash ponctuelle aux arrêts de bus, tout comme la recharge rapide CC au terminus. Sur un trolleybus électrique, il est complété d'un convertisseur d'entrée CC-CC à double

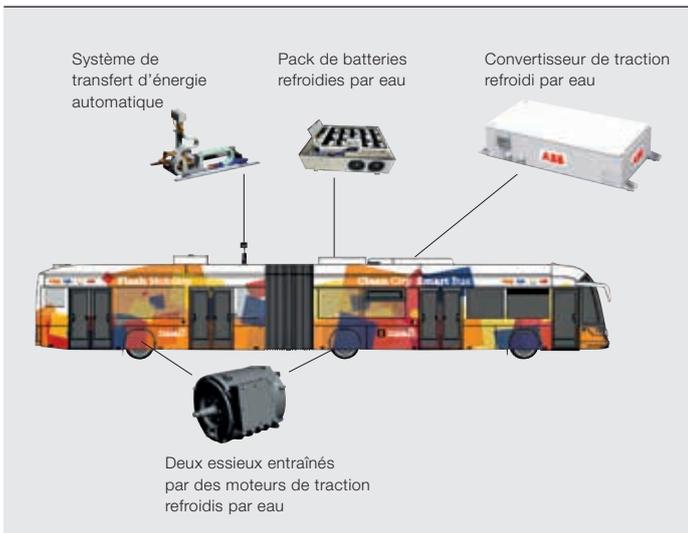
isolation. L'ajout d'une batterie à ce groupe motopropulseur permet au bus de s'affranchir des lignes aériennes de contact.

Questions de charge

Les utilisateurs de téléphone mobile le savent bien : sans batterie, l'appareil n'a plus d'utilité. Idem pour un bus ou un tram électrique : pas question de rouler sans batterie ! Or cette batterie, il faut bien la remplacer au bout d'un moment. Reste à savoir quand. Tout l'enjeu des

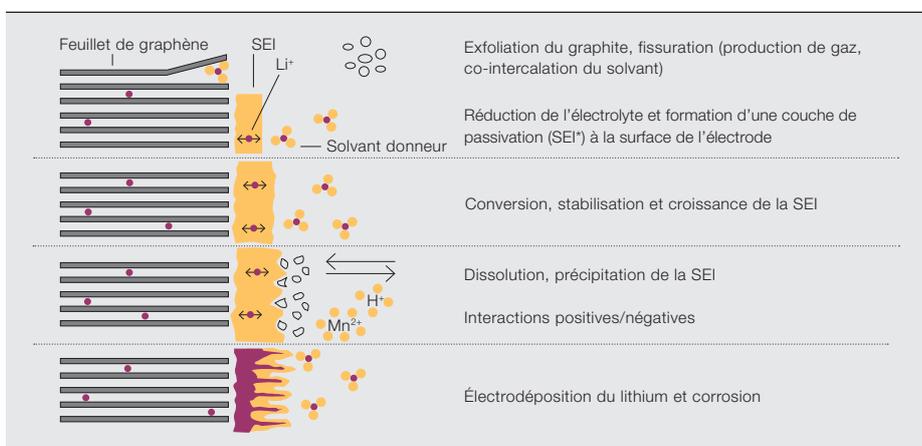
Photo p. 8

La ville de Genève s'apprête à remplacer les bus diesel de sa ligne 23 par des bus 100 % électriques TOSA à recharge ultrarapide.



Les utilisateurs de téléphone mobile le savent bien : sans batterie, plus d'appareil !

5 Principales réactions physico-chimiques responsables du vieillissement des batteries Li-ion¹



*Solid Electrolyte Interphase: interphase solide entre l'électrolyte et le graphite, conséquence de la réduction de l'électrolyte et de la dégradation du graphite

ingénieurs ABB est donc de prédire cette échéance et de spécifier des caractéristiques constructives garantissant la fourniture d'énergie sur toute la durée de vie du produit et du système.

Le poids de l'expérience

Une batterie est « morte » quand elle ne fournit plus l'énergie requise pour la période prescrite. Concrètement, deux phénomènes simultanés compromettent son aptitude à débiter assez de courant : la baisse de la capacité (Ah) et l'augmentation de la résistance interne (Ω). En cause: la décomposition chimique et mécanique des matériaux constitutifs de la batterie → 5.

La difficulté est donc de prévoir le vieillissement de la batterie, c'est-à-dire la vitesse à laquelle elle se dégradera. Une première méthode consiste à tester la

batterie en la chargeant et en la déchargeant dans diverses conditions pour quantifier la perte de capacité et l'augmentation de résistance. Problème, on ne prend pas en compte tous les cas d'usage du bus électrique: les variables en jeu sont en effet trop nombreuses (température, état de charge, profondeur de décharge/charge, courant), la durée et le nombre d'expériences requises pour englober toutes ces conditions d'exploitation bien trop élevés.

La solution pour estimer la durée de vie de la batterie tient dans un modèle renseigné par des résultats expérimentaux et une solide compréhension des grands mécanismes physico-chimiques qui opèrent au sein de la batterie. Il s'agit là d'une méthode « semi-empirique » en ce qu'elle conjugue empirisme et expérience. Les modèles basés sur les propriétés phy-

siques ne conviennent pas au regard de la diversité et de la complexité des phénomènes physico-chimiques, trop nombreux pour permettre des calculs efficaces. Pour gagner du temps, on a tout intérêt à mener une série d'expérimentations bien pensées dont les résultats serviront à créer un modèle. Construire un bon modèle, c'est d'abord concevoir les bonnes expériences.

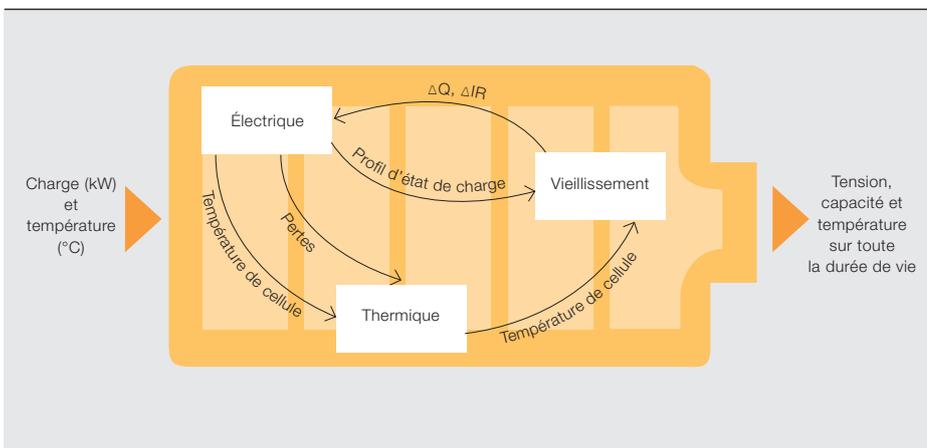
Étape 1 : expérimentation

On exécute ici une batterie de tests dans des conditions variables de température, de profondeur de décharge, d'état de charge et de courant, puis on mesure la perte de capacité et l'augmentation de

Note

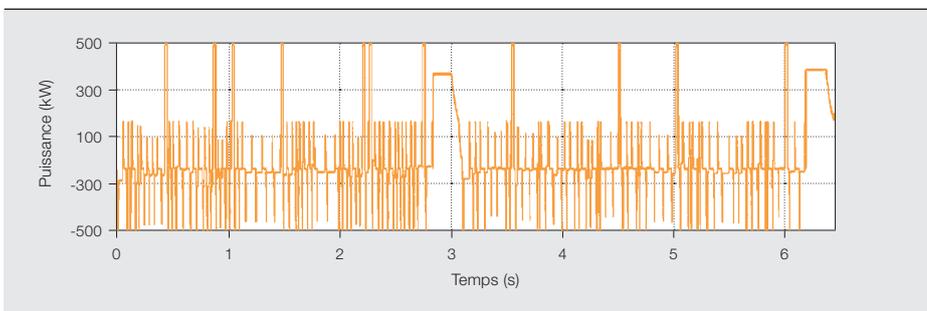
1 Vetter, J., et al., « Ageing mechanisms in lithium-ion batteries », *Journal of Power Sources*, 147(1-2), p. 269-281, 2005.

6 Représentation simplifiée d'un modèle électrique, thermique et de vieillissement d'une batterie Li-ion



Interaction des variables entre modèles : par exemple, une variation de capacité (ΔQ) et de résistance interne (ΔIR) modifie le modèle électrique, qui fait varier le profil d'état de charge, lequel modifie le modèle de vieillissement.

7 Exemple de courbe de charge d'une batterie pour un trajet aller-retour de 12 km avec 13 stations de recharge flash et 2 aux terminus.



Principale difficulté pour intégrer la batterie : prédire la vitesse à laquelle elle se dégradera.

résistance. Cela permet de prédire le vieillissement de la batterie au fil du temps, de l'utilisation et de certaines sollicitations (charges/décharges).

Étape 2 : modélisation

Si une batterie lithium-ion est un système électrochimique complexe, on peut néanmoins en approcher la réponse électrique avec un certain nombre de résistances et de condensateurs. Chaleur et état d'usure modifient ces composants, comme l'enseignent les modèles thermique et de vieillissement.

Le bus électrique étant une application de puissance, les pertes par effet Joule (I^2R) sont prévalentes et conditionnent les températures de peau et de cœur de la cellule

en fonctionnement ; ces variables sont cruciales pour affûter les modèles électrique et de vieillissement.

Le modèle de vieillissement est basé

sur les résultats d'expériences, et la mesure de la perte de capacité et de l'augmentation de résistance tirée des nombreux événements possibles de charge/décharge.

Le résultat est un modèle de batterie combinant sous-modèles électrique, thermique et de vieillissement, dont l'interaction permet de prédire l'évolution dans le temps de la variation de capacité (Q) et de la résistance interne (IR), à une charge et une température données → 6.

Étape 3 : vérification

Les expériences menées au niveau de la cellule alimentent et vérifient le modèle à l'aide de profils de charge réalistes. Il s'agit d'un processus itératif impliquant plusieurs affinements successifs.

Construire un bon modèle, c'est d'abord concevoir les bonnes expériences.

Étape 4 : mise en place du modèle

Une fois validé, le modèle devient un outil clé d'analyse de scénario. Les paramètres de la batterie (température, tension, énergie et puissance crête) ont tous une influence sur le dimensionnement du système. Sans prétendre dicter la taille de la batterie, la modélisation renseigne les décideurs et concepteurs sur la façon dont les dimensions et le mode de refroidissement jouent sur les performances du bus.

Exemple applicatif

Ce scénario met en œuvre un bus articulé de 25 t pouvant transporter 80 passagers. Son parcours de 12 km est jalonné de 13 stations de recharge flash d'une puissance de 600 kW en 20 s ; la recharge de 400 kW au terminus dure 4 à 5 min. Une courbe de charge type de la batterie est illustrée en → 7.

Cette batterie répond au cahier des charges suivant :

- Durée de vie : 10 ans ;
- Tension de charge mini : 600 V (alimentation du moteur et des auxiliaires, adaptation à l'infrastructure de recharge) ;
- Température de cellule maxi : 60 °C (sûreté de fonctionnement au fil de l'évaporation de l'électrolyte au-dessus de 80 °C) ;
- Puissance de charge : 600 kW en 20 s (flash), 400 kW en 5 min (terminus) ;
- Énergie : 46 kWh (trajet aller complet, avec énergie de secours pour les cas exceptionnels).

8 Trois conceptions de batterie pour un trajet urbain de 12 km avec recharge flash

Critères de conception	« Faible énergie »	« Fort refroidissement »	« Forte énergie »
Chimie de la cellule	Titanate de lithium	Titanate de lithium	Titanate de lithium
Débit de décharge maxi autorisé en continu [C]	6	6	6
Débit de décharge maxi autorisé pendant 20 s [C]	8	8	8
Nombre de cellules en série/parallèle	314/4	314/4	375/4
Énergie [kWh]	58	58	69
Tension mini [V]	630	630	750
Puissance nominale en continu [kW]	400	400	480
Puissance nominale pendant 20 s [kW]	580	580	690
Masse de la batterie (système de refroidissement inclus) [kg]	~1600	~1600	~2000
Température de refroidissement [°C]	25	15 (active)	25

« C » : vitesse à laquelle une batterie se décharge, soit « 1 C » = décharge complète en 1 h, « 10 C » = décharge en 1/10^e d'heure (ou 6 minutes)

9 Calcul de modèle pour trois conceptions de batterie sur un trajet urbain de 12 km avec recharge flash (« DDV » : début de vie ; « FDV » : fin de vie)

	« Faible énergie »		« Fort refroidissement »		« Forte énergie »	
	DDV	FDV	DDV	FDV	DDV	FDV
FDV	-	6 ans	-	12 ans	-	10 ans
Capacité	100 %	83 %	100 %	80 %	100 %	80 %
Résistance	100 %	200 %	100 %	170 %	100 %	185 %
Énergie	58 kWh	48 kWh	58 kWh	46 kWh	69 kWh	55 kWh
Plage de tension	690-850 V	590-850 V	690-850 V	630-850 V	840-1010 V	770-1010 V
Débit de décharge [C] au terminus (en continu)	5,3	6,2	5,3	6	5,4	5,6
Débit de décharge [C] flash (pendant 20 s)	8	8,5	8	8,3	6,8	7
Température crête au sein de la cellule	57 °C	86 °C	43 °C	58 °C	44 °C	57 °C
Rendement de la batterie	90 %	80 %	90 %	85 %	92 %	86 %

Trois configurations furent étudiées avec les modèles thermique, électrique et de vieillissement → 8 pour prévoir la durée de vie et la fin de vie de la batterie (soit 80 % de la capacité initiale ou 200 % de la résistance initiale). Les résultats sont donnés en → 9.

Dans le cas « Faible énergie », la recharge flash de 600 kW s'avère impossible en fin de vie car elle dépasse la limite de puissance du pack de batteries (avec un débit de décharge maxi de 8). On pourrait alimenter le bus pendant un certain temps avec uniquement la recharge au terminus mais l'augmentation de la résistance serait alors trop élevée (210 %), avec pour dangereuses conséquences une température qui grimperait à plus de 80 °C au sein de la cellule et une tension mini inférieure à 600 V, donc insuffisante

pour alimenter le moteur et les auxiliaires.

Dans la configuration « Fort refroidissement », la batterie ne convient que pour la charge au terminus ; la recharge flash de 580 kW, pour sa part, franchit les limites de puissance du pack. La température de refroidissement, plus basse, est néanmoins suffisante pour maintenir des plages de tension et de température sûres pendant les 12 ans d'exploitation de la batterie. Preuve s'il en est que la température de la batterie joue sur la durée de vie du système.

La batterie « Forte énergie » est la seule des trois à pouvoir assurer aussi bien la recharge flash que celle au terminus. Dans le premier cas, il faut mettre en série des cellules supplémentaires, ne

serait-ce que pour augmenter la tension et abaisser le courant afin de répondre aux exigences de puissance sur toute la durée de vie de la batterie. En outre, cette configuration (375/4) garantit une plage sûre de température tout au long des 10 années de fonctionnement de la batterie.

Pour ces trois scénarios, le recours à la modélisation est un moyen simple de démontrer l'impact de la conception de la batterie sur le maintien des performances et de la fiabilité du système en fin de vie. Il faut ensuite procéder à d'autres itérations pour trouver la solution optimale et réduire les risques.

Qui plus est, le modèle de batterie renseigne le transporteur sur la manière dont la conception de la batterie influe sur le choix d'une recharge flash ponctuelle ou au terminus. D'ailleurs, qui connaît mieux sa ville, ses besoins et ses itinéraires que l'exploitant ? Celui-ci est donc le mieux à même de trancher entre l'une et l'autre solution. Le modèle de batterie est un précieux outil d'accompagnement pour choisir le système le plus approprié.

Timothy Patey

Reto Flueckiger

Jan Poland

ABB Corporate Research
Baden-Dättwil (Suisse)
timothy.patey@ch.abb.com
reto.flueckiger@ch.abb.com
jan.poland@ch.abb.com

David Segbers

Stefan Wicki

ABB Discrete Automation & Motion
Turgi (Suisse)
david.segbers@ch.abb.com
stefan.wicki@ch.abb.com



Coulée verte

Les bornes de recharge rapide en courant continu/alternatif ABB Terra 53 passent au vert

ALEKSANDAR RADOSAVLJEVIC, MERSIHA VELIC HAJDARHODZIC, MICHELLE KIENER – Le Parc national de la Krka, situé à quelques kilomètres de la ville de Šibenik, au sud de la Croatie, est l'une des merveilles naturelles de la Dalmatie, connue dans le monde entier pour ses cascades spectaculaires que la rivière a creusées dans le plateau karstique. Le territoire fourmille de monuments historiques et de vestiges industriels, comme la centrale hydroélectrique de Jaruga construite en 1895, qui fut la première à produire

du courant alternatif en Europe, et la seconde au monde, deux jours seulement après la mise en marche de celle de Nikola Tesla sur les chutes du Nagara. Pour préserver cet héritage naturel et culturel, le parc s'est doté de cinq véhicules électriques (VE) et de quatre stations de recharge rapide CC/CA équipées de bornes Terra 53 CJG d'ABB. La première unité, installée à Lozovac près de Šibenik et de la centrale de Jaruga, est en service depuis septembre.



Ce parc national de 109 km² héberge une flore et une faune d'une exceptionnelle richesse (plantes endémiques, multiples espèces de poisson, batraciens, oiseaux et reptiles), évoluant au milieu d'obstacles, de grottes, de barrages, de gradins et autres formations géologiques de calcaire ou « travertin ». Un cadre magnifique que les gestionnaires du parc ont à cœur de préserver. Le recours à des véhicules 100 % électriques et hybrides rechargeables, ainsi que le déploiement d'infrastructures de recharge CC rapide s'inscrivent tout naturellement dans cette démarche. Une première borne est déjà opérationnelle à Lozovac → 1. Une deuxième équipera le nouveau centre d'information à Laškovića, qui surplombe les chutes de Roški slap, et les suivantes seront implantées en des endroits stratégiques du site.

Un engagement environnemental fort

Le Parc national de la Krka s'est engagé à réduire les émissions de CO₂, la pollution sonore, la consommation de carburant et les dépenses de maintenance. Pour inviter les visiteurs à participer à ces efforts, les bornes de recharge seront

accessibles à tous les possesseurs de VE. Elles peuvent recharger deux véhicules à la fois, en 30 à 90 minutes, et s'accompagnent de services en ligne qui permettent de se connecter facilement à différents systèmes logiciels et plateformes de paiement sur Internet. Cette connectivité ouvre également la voie à

Modulaire et multistandard, la borne ABB Terra 53 CJG de 50 kW comporte une, deux ou trois prises de recharge rapide des véhicules électriques.

la télésurveillance, à la télémaintenance et à des fonctionnalités d'assistance complémentaires. Les bornes fonctionnent à des températures comprises entre -35 °C et +50 °C.

Grandeur nature

Cette initiative fait partie du programme « Green Line » lancé par le ministère de l'Écologie croate et le Fonds pour la protection de l'environnement et l'efficacité énergétique destiné aux organismes publics de gestion des espaces protégés et parcs naturels de Croatie.

« C'est là un grand progrès pour préserver et valoriser le patrimoine naturel de la Croatie, et nous sommes très fiers d'adhérer à ce projet pilote en faveur de la mobilité électrique. Nous espérons que son essor permettra à un nombre croissant de citoyens de devenir directement acteurs de la protection de l'environnement à travers l'achat de véhicules électriques », se félicite Krešimir Šakić, directeur de l'Institution publique pour la gestion du parc national de la Krka.

Modulaire, la borne ABB Terra 53 CJG de 50 kW comporte une, deux ou trois

prises de recharge rapide ; multistandard (charge rapide CCS, conformité CHAdeMO et charge CA accélérée), elle est parfaitement adaptée aux besoins de chaque client. Elle permet également la recharge ultrarapide et trouve toute sa place au cœur des stations-service et des agglomérations à fort trafic.

Premières mondiales

La première borne du projet, raccordée en septembre 2016, a pour particularité d'être la première infrastructure de recharge ABB à équiper un parc national dans le monde. De même, le Parc national de la Krka est l'un des premiers en Europe à

Photo p. 13

Le Parc national de la Krka, un oasis de 109 km² au cœur du comitat de Šibenik-Knin, en Dalmatie.

2 Le Parc national de la Krka se situe à 18 km au nord de la plus ancienne centrale électrique en courant alternatif au monde et à 100 km au sud du lieu de naissance de Nikola Tesla.



déployer des infrastructures de recharge pour VE.

Le lieu est coutumier des grandes premières. Il est situé à proximité de la ville de Šibenik, qui fut la première à être éclairée à l'électricité en 1895 (quelques maisons et 340 éclairages publics), grâce à la centrale de Jaruga. Autre originalité émouvante : la ville natale de Tesla, Smiljan, n'est qu'à une centaine de kilomètres de là → 2.

Qu'aurait donc pensé Tesla à la vue de ces nouvelles installations en courant continu ? On se plait à imaginer qu'au-delà des luttes partisans, il aurait apprécié les efforts accomplis pour préserver ce site naturel et ses alentours. Car au Parc de la Krka, nul écho de « guerre des courants ». Seule résonne l'ambition d'installer des infrastructures durables dans un écrin de verdure où le léger sifflement

La borne raccordée en septembre 2016 est la première infrastructure de recharge ABB à équiper un parc national dans le monde.

d'un moteur de VE ne vient en rien troubler la quiétude et la propreté naturelle des lieux.

Nous tenons à remercier toute l'équipe du Parc, en particulier Krešimir Šakić, Joško Baljkas et Katia Župan.

Aleksandar Radosavljevic
Mersiha Velic Hajdarhodzic
ABB EV Charging Infrastructure
Zagreb (Croatie)
aleksandar.radosavljevic@hr.abb.com
mersiha.velic@hr.abb.com

Michelle Kiener
ABB review
Baden-Dättwil (Suisse)
michelle.kiener@ch.abb.com



Historique

L'électrification de la grande traction ferroviaire

Une longue tradition ABB

NORBERT LANG – L'histoire a ses paradoxes: n'est-il pas étonnant que, bien longtemps avant les premiers signes de « globalisation », la technique ait progressé en parallèle dans différents pays occidentaux, malgré leurs disparités géographiques, économiques et culturelles ? Il en est ainsi de l'électrification et de la traction ferroviaires. La décision d'électrifier le chemin de fer dépendait en grande partie de la richesse du pays en ressources houillères ou hydroélectriques. D'où la multiplicité de filières et techniques nationales qui n'ont pourtant pas empêché la naissance de nombreuses innovations remarquables par leur universalité.

Question de fréquence

Saviez-vous que l'un des cofondateurs de la Fabrique de Locomotives et de Machines suisse SLM → 2, en 1871, fut Charles Brown père (1827–1905), dont le nom se perpétue encore aujourd'hui dans l'un des « B » d'ABB ? Constructeur de locomotives de montagne et à vapeur, l'entreprise détient alors, depuis des décennies, le quasi-monopole de la partie mécanique (carrosserie, châssis et organes de roulement) des locomotives électriques suisses. Les deux fils Brown, Charles Eugène Lancelot (futur cofondateur de BBC) et Sidney, sont de la partie: ils conçoivent la première locomotive de grande ligne électrique pour la liaison Berthoud–Thoune de 40 km → photo p. 16. Il s'agissait d'une loco de fret, à deux vitesses constantes (17,5 et 35 km/h), alimentée en alternatif triphasé à 40 Hz. La transmission utilisait des engrenages droits qu'il fallait changer à l'arrêt; deux gros moteurs asynchrones entraînaient les deux essieux à l'aide d'un arbre intermédiaire et de bielles d'accouplement. La tension de la ligne aérienne de contact était limitée à un maximum légal de 750 V.

En 1903, la Compagnie de l'Industrie Électrique et Mécanique (CIEM), prédécesseur d'ABB Sécheron, électrifie le chemin de fer à voie étroite reliant St-Georges-de-Commiers à La Mure, en France; l'alimentation est en continu, à une tension exceptionnellement élevée pour l'époque de 2400 V, sous fil de contact aérien double. Presque simultanément, mais chacun de leur côté, les Ateliers de Construction Oerlikon (MFO) et BBC lancent un grand projet d'électrification du réseau exploité par les Chemins de Fer Fédéraux suisses (CFF).

À l'origine, l'alternatif monophasé

De 1905 à 1909, les Ateliers Oerlikon entreprennent des essais de traction monophasée à 15 kV, 15 Hz, sur un tronçon de l'ancien réseau ferré helvétique Nationalbahn reliant Zurich-Seebach à Wettingen (aujourd'hui partie intégrante du réseau suburbain zurichois). La première locomotive Oerlikon est équipée d'un groupe tournant et de moteurs de traction à courant continu (CC) → 3. Une seconde machine est ajoutée en 1905 → 4: elle conserve la même disposition d'essieux B'B' mais les bogies sont tous deux équipés d'un moteur monophasé à excitation série de 180 kW, directement alimenté par le changeur de

1 Premiers jalons

- 1890: un prédécesseur de l'entreprise genevoise ABB Sécheron équipe Clermont-Ferrand des premiers tramways électriques français.
- 1892: le premier chemin de fer à crémaillère électrique (500 V continu) voit le jour au Mont Salève, près de Genève.
- 1894: les Ateliers Oerlikon livrent les premiers trams électriques zurichois.
- 1896: les premiers trams électriques BBC font leur apparition à Lugano, en Suisse. L'entreprise suédoise ASEA, fondée en 1883 et devancière du groupe ABB, lance son activité Traction électrique avec des voitures de tram.
- 1898: BBC équipe les dessertes Stansstaad–Engelberg et Zermatt–Gornergrat, ainsi que la ligne qui grimpe au col du Jungfraujoch, à 3 500 m d'altitude.
- 1901: ASEA fournit des trams électriques à la ville de Stockholm.

prises du transformateur. La commande par jeu de prises échelonnées sur les enroulements du transformateur allait devenir par la suite la méthode classique de pilotage des locomotives à courant

« Le véhicule à traction électrique, sans doute le plus harmonieux et le plus bel assemblage de composants électromécaniques, ne cesse de poser au génie humain de nouveaux et passionnants défis de conception. »

Karl Sachs

alternatif, jusqu'à l'essor de l'électro-
nique de puissance. Les essieux étaient entraînés par un réducteur, un arbre intermédiaire et des bielles d'accouplement. La vitesse maximale plafonnait à 60 km/h. Les moteurs utilisaient un stator

Pour la plupart des constructeurs ferroviaires, les dispositifs et systèmes d'électrification puisent leurs origines dans le tramway. En 1890, un prédécesseur d'ABB Sécheron, à Genève, fournit à la ville de Clermont-Ferrand les premiers trams électriques français → 1, ouvrant la voie à l'électrification des lignes de montagne à crémaillère. En 1898, un autre pionnier d'ABB, Brown, Boveri et C^{ie} (BBC), équipe plusieurs chemins de fer de montagne, comme la célèbre ligne de la Jungfrau qui se hisse au col du Jungfraujoch, à 3500 m d'altitude; la voie ferrée est d'abord électrifiée en courant triphasé à 40 Hz, avant de passer à la fréquence industrielle de 50 Hz.

Dès leurs premières heures, les voies ferrées locales et de montagne connaissent de fulgurants progrès techniques. Pour autant, cet article se consacrera essentiellement aux développements des grandes lignes ferroviaires à voie normale (écartement de 1435 mm).

Photo p. 16

Première locomotive de grande ligne électrique pour la liaison Berthoud-Thoune (1899)

3 Première locomotive d'essai Oerlikon à groupe tournant et moteurs de traction à courant continu



4 Seconde locomotive d'essai Oerlikon à moteurs monophasés (1905)



Walter Boveri s'opposa à l'exploitation des concessions publiques et réseaux de chemins de fer suisses à différentes fréquences ; son objection déboucha sur le compromis du 16²/₃ Hz.

2 Quelques grands noms et sigles du rail

ASEA	Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget, Västerås, Suède (1983–1987) ; ASEA fusionne avec BBC en 1988 pour former Asea Brown Boveri (ABB).
BBC	Brown, Boveri et C ^o , Baden, Suisse (1891–1987)
BLS	Chemin de fer du Bern–Lötschberg–Simplon, Spiez, Suisse
CFF	Chemins de fer Fédéraux suisses
CIEM	Compagnie de l'Industrie Électrique et Mécanique
DB	Deutsche Bahn, entreprise nationale des chemins de fer allemands
MFO	Ateliers de Construction Oerlikon (1876–1967), repris par BBC.
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen, chemins de fer fédéraux autrichiens
SAAS	Société Anonyme des Ateliers de Sécheron, Genève, Suisse (1918–1969), reprise par BBC.
SJ	Statens Järnvägar, entreprise nationale des chemins de fer suédois, devenue société publique à responsabilité limitée en 2001.
SLM	Schweizerische Lokomotiv- und Maschinenfabrik, Winterthur, Suisse, fondé en 1871 et acquis par ADtranz en 1998.

à pôles saillants et une commutation de champ à décalage de phases. Cette machine rencontra un tel succès que la première locomotive fut adaptée en conséquence. De décembre 1907 à 1909, tous les trains réguliers de cette ligne passèrent à la traction électrique. Néanmoins, la haute tension n'autorisait pas l'emploi de ligne aérienne de contact centrée sur la voie : l'alimentation électrique se faisait par un fil latéral, fixé sur des poteaux en bois. Le contrat prévoyait de retirer ce fil au terme des essais et de restituer la ligne à la traction vapeur, qui ne sera électrifiée qu'en 1942. Cette expérience eut néanmoins un grand retentissement.

Le monophasé à fréquence spéciale pour le Simplon

Fin 1905, BBC se charge d'électrifier, à ses frais et à ses risques, les 20 km du tunnel monovoie subalpin du Simplon reliant Brigue (Haut-Valais suisse), à

Iselle (Italie), en cours d'achèvement. Lever le risque d'intoxication des voyageurs par le monoxyde de carbone des locos à vapeur, en cas de panne du convoi dans ce long tunnel, était le premier argument justifiant l'électrification. Pourtant, il ne restait que six mois avant l'inauguration de l'ouvrage. L'électrification fut réalisée en triphasé à 16²/₃ Hz, sous une tension de 3 kV fournie par deux centrales électriques situées de part et d'autre du tunnel. Ce système électrique fut repris pour la ligne de la Valteline (nord de l'Italie), les lignes franchissant le col du Brenner (entre l'Autriche et l'Italie) et du Monte Giovi (province de Florence), ainsi que celle longeant le littoral méditerranéen italien. Le parc d'origine comprenait deux locomotives Ae 3/5 (1'C 1') → 5 et deux Ae 4/4 (0-D-0), à moteurs asynchrones. Le réglage de la vitesse se faisait à l'aide des pôles commutables du stator. Les moteurs lents, montés en bas de caisse, entraînaient les essieux par



des bielles d'accouplement multiples. Ces machines développaient une puissance unihoraire de 780 kW (Ae 3/5) et 1200 kW (Ae 4/4), à la vitesse maxi de 75 km/h. En attendant l'achèvement de toutes les locomotives, trois machines de réalisation équivalente furent empruntées au chemin de fer de la Valteline.

À l'époque, le moteur asynchrone alternatif s'était déjà révélé avantageux pour la traction ferroviaire, par sa robustesse et sa simplicité d'entretien, en l'absence de collecteurs. Mais il n'était pas exempt d'inconvénients : par exemple, un réglage de la vitesse à graduation grossière, du fait de la commutation des pôles, et la ligne de contact à deux fils de l'alimenta-

sonne le glas du triphasé sur la ligne du Simplon avec sa conversion en monophasé 15 kV, à 16 $\frac{2}{3}$ Hz → 6.

L'électrification du Lötschberg

Avec des déclivités de 2,2 à 2,7 % et des rayons de courbure de 300 m, la ligne alpine qui relie Thoune à Brigue *via* Spiez, exploitée par le Chemin de fer du Lötschberg (BLS) et achevée en 1913, se caractérise par un profil très tourmenté. Dès l'esquisse du projet, il est question d'électrifier le tunnel à deux voies. En 1910, le BLS opte pour le 15 kV à 15 Hz, déjà éprouvé lors des essais réalisés sur la petite ligne Seebach–Wettingen, qu'il porte ensuite à 16 $\frac{2}{3}$ Hz. Le BLS traçait ainsi la voie de l'électrification du Saint-Gothard mais aussi

des réseaux ferrés allemand, autrichien et suédois qui se rallièrent à ce système.

En 1910, Oerlikon et SLM fournissent au BLS un prototype de locomotive de 1250 kW avec une

configuration d'essieux C-C → 7. Au terme d'essais fructueux, le BLS passe commande de plusieurs locos Be 5/7 (1'E1') de 1800 kW, dont la première est livrée en 1913. En 1930, la Société Anonyme des Ateliers de Sécheron (SAAS) vend au BLS la première de six Ae 6/8 (1'Co) (Co1') mettant à profit l'entraînement individuel des essieux à arbre creux : une conception couronnée de succès puisque ces engins tiraient encore de lourds trains de voyageurs et de marchandises bien après la Seconde Guerre mondiale !

1904 voit la création, en Suisse, d'un comité fédéral d'études pour l'électrification du chemin de fer en vue « d'examiner et de clarifier les conditions techniques et financières préalables à l'instauration de la traction électrique sur les lignes ferroviaires suisses ». Plusieurs systèmes d'électrification font alors l'objet d'études approfondies, s'appuyant sur de récentes réalisations. Résultats et conclusions sont régulièrement publiés. En 1912, le comité préconise d'unifier la grande traction ferroviaire suisse autour du courant monophasé sous ligne de contact aérienne de 15 kV, à environ 15 Hz.

Le Saint-Gothard

Confrontés à la grave pénurie de charbon causée par la Grande Guerre, les CFF décident en 1916 d'électrifier le réseau ferroviaire du Gothard en reprenant le système d'alimentation qui avait fait ses preuves sur la ligne du Lötschberg. Ils demandent alors à des constructeurs, électrotechniciens et mécaniciens suisses, de fournir des prototypes de locomotives, avec d'éventuels contrats à la clé. Trois centrales hydroélectriques alimentées par des barrages de hautes chutes (Amsteg, Ritom et La Barberine) sont immédiatement mises en chantier pour produire le courant nécessaire aux locomotives traversant le Gothard.

C'est alors que Walter Boveri, cofondateur de BBC, s'insurge contre l'exploitation des concessions publiques et chemins de fer suisses à différentes fréquences ; relayée par d'autres détracteurs, son opposition débouche sur le compromis du 16 $\frac{2}{3}$ Hz (soit le tiers de la fréquence industrielle de 50 Hz).

Boveri propose également d'équiper les locomotives de redresseurs à vapeur de mercure, qui ont déjà donné satisfaction dans l'industrie. Or l'époque n'est pas encore à ces dispositifs « statiques » dont les volumineuses cuves de mercure auraient difficilement supporté les rudes conditions d'exploitation du rail.

L'électrification du Gothard progresse à une telle vitesse que le temps manque pour tester convenablement les locomotives d'essai. Il faut passer commande au plus vite ! L'électricien BBC et le mécanicien SLM fournissent 40 locomo-

Sans collecteurs, le moteur asynchrone offre des qualités de robustesse et de simplicité d'entretien pour la traction ferroviaire.

tion triphasée qui compliquait les aiguillages. Le moteur triphasé devait donc rester minoritaire en traction ferroviaire jusqu'à une date récente où les convertisseurs à électronique de puissance ont pu combler ses lacunes sans compromettre ses points forts.

En 1908, les CFF reprennent l'installation : en 1919, deux autres locomotives sont ajoutées et l'électrification s'étend jusqu'à Sion ; un second tunnel voit le jour en 1921. Pour autant, l'année 1930

L'électrification des chemins de fer nationaux suédois débuta avant le premier conflit mondial.

7 Locomotive d'essai des chemins de fer du Lötschberg (1910)



tives de trains de voyageurs (1'B)(B1') et Oerlikon/SLM, 50 locos de fret (1'C)(C1'). Ces deux types de machines sont équipés de quatre moteurs sur châssis entraînant les essieux par un arbre intermédiaire et des bielles d'accouplement. Développant une puissance unihoraire de 1500 et 1800 kW, à une vitesse maxi de 75 et 65 km/h, ces engins ont su répondre aux cahiers des charges des exploitants ferroviaires et passer à la postérité : les locomotives du Saint-Gothard sont en effet devenues l'archétype des véhicules de traction ferroviaire suisses. C'est surtout le cas de la version de fret longue de 20 m à châssis articulé (qui facilite le franchissement des courbes), surnommée « crocodile » pour sa livrée verte → 8. Ces machines de légende assurèrent un service ininterrompu pendant près de 60 ans, tout en étant copiées sous bien des formes dans différents pays ; elles demeurent aujourd'hui la pièce de collection incontournable de tout passionné de modélisme ferroviaire.

La signature Sécheron

En 1921/1922, Sécheron fournit six locomotives Be 4/7 (1'Bo 1')(Bo') au chemin de fer du Gothard. Elles sont équipées de quatre essieux entraînés individuellement par une transmission à ressorts et arbre creux Westinghouse → 9. Malgré leurs bonnes caractéristiques de fonctionnement, ce furent les seuls exemplaires commandés par les CFF, qui n'étaient pas convaincus par la commande individuelle

des essieux. Pour leurs trajets moins montagneux, les CFF commandent 26 locomotives de voyageurs Ae 3/5 (1'Co1') ; dotées de la même transmission à arbre creux, elles atteignent 90 km/h. D'une masse de 81 t, ces machines sont nettement plus légères que leurs concurrentes. Suivent dix unités similaires, baptisées Ae 3/6 III, à disposition d'essieux 2'Co 1'. Ces trois types d'engins de traction, plus connus sous le vocable générique de « Machines Sécheron », ont surtout circulé en Suisse occidentale. La dernière était encore en service au début des années 1980 pour remorquer les trains de transport de véhicules dans les tunnels du Saint-Gothard et du Lötschberg.

ASEA et le secteur ferroviaire

Comme en Suisse, l'électrification des chemins de fer nationaux suédois débuta avant la Première Guerre mondiale. De 1911 à 1914, la ligne de transport de minerai de fer *Malm-banan*, longue de 120 km, est électrifiée. Elle achemine principalement le minerai de fer du gisement de Kiruna, dans le grand Nord lapon, au port norvégien de Narvik, libre de glace toute l'année grâce au *Gulf Stream*. La Suède dispose aussi d'immenses ressources hydroélectriques. La centrale de Porjus alimente cette ligne ferroviaire en monophasé 15 kV à 16 2/3 Hz (auparavant

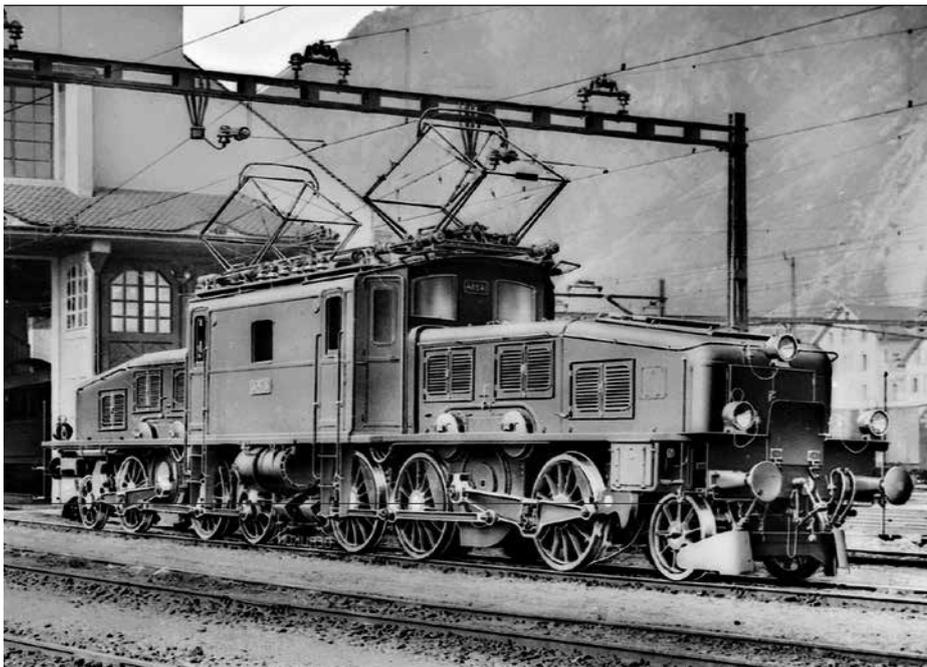
15 Hz). Vers 1920, l'électrification a gagné Lulea via Gellivare, sur le Golfe de Botnie. Le tronçon norvégien de la ligne est électrifié en 1923. Dans cette région, les montagnes culminent à des altitudes moyennes et les rampes de 1 à 1,2 % sont bien inférieures aux déclivités des traversées alpines suisses. Néanmoins, le fort tonnage des trains chargés de magnétite impose de lourdes contraintes aux locomotives. ASEA fournit la partie électrique des 12 locomotives articulées de 1200 kW (1'C)(C1') et équipées d'une transmission à bielles latérales, ainsi que deux locomotives de vitesse similaires de 600 kW (2' B 2'). Dix machines à quatre essieux de 650 kW pour le transport rapide de marchandises leur sont adjointes, principalement utilisées en tandem. En 1925, la grande ligne de la compagnie nationale Statens Järnvägar (SJ)

Les Crocodiles, locomotives emblématiques de la ligne du Gothard

de 460 km reliant Stockholm à Göteborg est électrifiée, ASEA fournissant les locomotives 1'C1' de 1200 kW.

Le succès de la commande individuelle des essieux

Après avoir inauguré la traction électrique sur la ligne du Gothard, les CFF



La conception d'un moteur CA mono-phasé est comparable à celle de son homologue CC, à une réserve près : le réglage de la vitesse ou de la puissance est plus simple en continu.

étendent son rayon d'action aux chemins de fer de plaine et de montagne jurassienne. Vers 1927, la transversale reliant le lac de Constance, à l'est, au lac de Genève, à l'ouest, est électrifiée. BBC et SLM développent les locomotives de voyageurs Ae 3/6 II (2'Co1') mettant en œuvre une nouvelle technique d'entraînement individuel des essieux. Cette « transmission Büchli », du nom de son inventeur, reposait sur le principe suivant : le moteur de traction, solidaire du châssis, attaque par un pignon une couronne dentée située en porte-à-faux, à l'extérieur de l'essieu moteur, qui transmet l'effort de traction à des leviers secteurs et biellettes qui, par l'intermédiaire de manetons, entraînent la roue motrice → 10. 114 unités de ce type circulèrent sur le réseau des CFF. Leurs performances permirent de porter le plafond de vitesse de 90 à 110 km/h. Ce succès confirma la puissance de l'industrie électrotechnique suisse et déboucha sur de nombreuses commandes et contrats de concession pour des locomotives similaires en Allemagne, en Tchécoslovaquie, en France, en Espagne et au Japon. Au total, quelque 1000 véhicules à transmission BBC-Büchli ont été construits.

Néanmoins, les trains de grandes lignes, plus longs et plus lourds, exigent des locos surpuissantes pour franchir les rampes du Gothard et du Simplon. S'inspirant du concept précédent et de la transmission Büchli, 127 locomotives

Ae 4/7 (2'Do1') sont mises sur les rails de 1927 à 1934. Ces machines, malgré une esthétique dénigrée par un célèbre designer suisse de l'époque, ont fait partie, des décennies durant, du parc des CFF et de la ligne du Gothard. La dernière a circulé sur une ligne régulière jusque dans les années 1990.

Les locomotives à bogies de l'après-guerre

Les locomotives décrites jusqu'ici sont majoritairement équipées d'essieux porteurs et d'essieux moteurs, héritages de leurs ancêtres à vapeur. 1944 est une année de rupture technologique pour BBC/SLM avec la fourniture au BLS des premières locomotives à bogies Ae 4/4 (Bo'Bo') de grande puissance, dont les quatre essieux sont tous moteurs. Ces machines de 3000 kW pouvaient atteindre 120 km/h. Dès lors, la quasi-totalité des entreprises ferroviaires opte pour cette réalisation. En 1946, les CFF reçoivent la première des 32 locomotives rapides et légères Re 4/4 I, auxquelles succéderont 174 machines bien plus puissantes, les Re 4/4 II destinées aux trains express et toujours en service. D'une masse de 81 t et d'une puissance de 4000 kW, elles peuvent rouler à 140 km/h.

Le Suédois ASEA s'intéresse à son tour aux locomotives à bogies. La première Ra à disposition Bo'Bo' → 11 fait son entrée sur le réseau en 1955 : ses côtés de caisse moulurés, ses fenêtres en forme

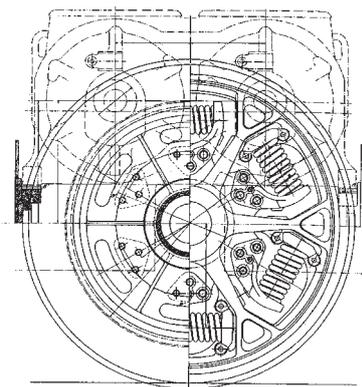
de hublot et son « nez » arrondi ne sont pas sans rappeler les dernières tendances du design américain. Comme ses sœurs helvétiques, elle est équipée de bogies bimoteurs. Légère (60 t), elle atteint 150 km/h. Cette locomotive fut couronnée de succès et resta en ordre de marche jusque dans les années 1980. L'année 1962 marque l'avènement de la première locomotive à redresseurs Rb, suivie par les machines à thyristors Rc en 1967 qui s'exportent aussi en Autriche (type 1043) et aux États-Unis (AEM-7) où elles sont construites sous licence General Motors.

Du redresseur au convertisseur

Sous l'angle conceptuel, un moteur à courant alternatif (CA) monophasé s'apparente beaucoup à un moteur CC. Pourtant, ce dernier se plie avec davantage de souplesse et de simplicité aux exigences de réglage en vitesse ou en puissance. Quand certains pays choisirent d'électrifier leurs grandes lignes en courant continu à 1,5 ou 3 kV, d'autres cherchèrent à acquérir des locomotives embarquant des redresseurs pour convertir l'alternatif en continu. L'un des inconvénients de l'électrification CC est que la tension réseau doit être relativement basse puisqu'il est impossible d'utiliser des transformateurs. D'où une augmentation des pertes en ligne qui oblige à multiplier et à rapprocher les points d'injection du courant (sous-stations). Les constructeurs ferroviaires ont donc longtemps cherché à concilier traction CC

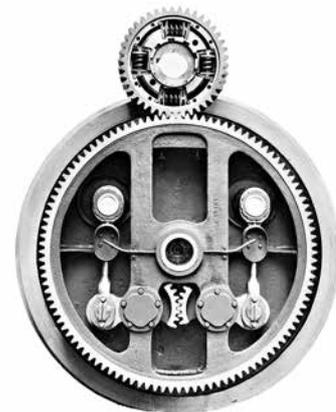
De nos jours, ABB a conclu des alliances stratégiques avec plusieurs grands constructeurs de matériel roulant et fournit des composants de haute technologie pour une foule d'applications.

9 Entraînement Sécheron à ressorts et arbre creux



Des ressorts logés dans la roue motrice découplent le déplacement de l'essieu de celui du moteur, réduisant l'usure de la voie.

10 Transmission unilatérale BBC-Büchli 12395



À l'intérieur de la roue dentée, un système de bielles et d'engrenages permet la transmission du couple et le libre débattement de l'essieu moteur.

et électrification CA, comme l'atteste la première locomotive Oerlikon de la desserte Seebach-Wettingen (cf. p. 17). Il faut attendre l'avènement du tube monoanodique à vapeur de mercure dans le vide et impulsion d'allumage, encore appelé « ignitron » ou « excitron », pour produire en grandes séries des locomotives à redresseurs (surtout aux États-Unis et dans certains pays du bloc soviétique).

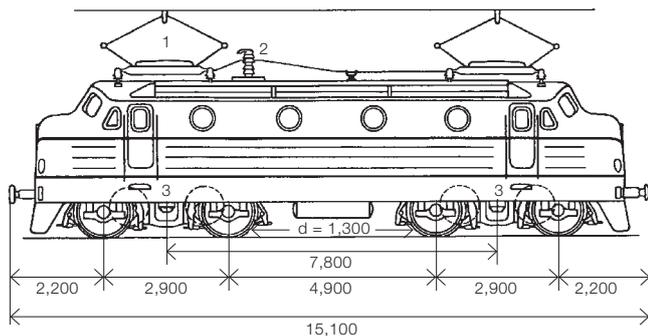
La révolution des semi-conducteurs devait changer la donne avec les composants statiques qui ne tardèrent pas à appareiller les nouvelles locomotives. De 1965 à 1983, le BLS acquiert 35 locomotives Re 4/4 de la série 161 → 12. Au lieu de l'alternatif monophasé, les moteurs de traction sont alimentés en courant continu à travers un redresseur simple alternance et une inductance de lissage. Le redresseur statique à pont de diodes refroidi par bain d'huile ponctionne son alimentation du changeur de prises du transformateur. Ces locomotives possédaient deux moteurs par bogie, placés en parallèle pour réduire le risque de patinage sur les fortes rampes. Capables de développer une puissance unihoraire avoisinant 5 MW, elles ont fait un parcours sans faute ! Une machine fut modifiée pour recevoir des convertisseurs à thyristors et testée avec succès sur la ligne autrichienne du Semmering. L'entreprise ferroviaire ÖBB passa alors commande à la filiale viennoise d'ABB de 216 locomotives de même réalisation (1044).

L'association convertisseurs de fréquence-moteurs asynchrones s'est révélée particulièrement avantageuse. Elle permettait de réaliser un entraînement très uniforme, foncièrement indépendant du type d'alimentation fournie par le fil de contact. Cette évolution amorce la standardisation et la construction de véhicules « polymorphes », aptes à circuler sous différents systèmes de tension et fréquence pour tracter les trains internationaux. De plus, l'emploi de moteurs asynchrones triphasés robustes, sans collecteurs, permet d'économiser sur la maintenance tout en offrant une plus grande puissance massique : les moteurs peuvent alors être soit plus petits, soit plus puissants. Parmi les locos BBC et ABB utilisant cette motorisation, citons l'E120 de la Deutsche Bahn (DB), la Re 4/4 de la ligne Lac de Constance-Toggenburg et de l'entreprise ferroviaire suisse Sihltal Zürich Uetliberg Bahn (SZU), ainsi que les Re 450 et Re 460 des CFF et la Re 465 du BLS.

La grande vitesse

Entre 1989 et 1992, la DB met en service 60 trains rapides interurbains ICE (*Inter-City Express*), dérivés de l'E120. ABB prend part à leur développement. L'ICE1 est composé de deux motrices à moteurs asynchrones triphasés commandés par convertisseurs et de 11 à 14 voitures voyageurs intermédiaires. Une rame d'essai atteint 280 km/h sur la nouvelle ligne Hambourg-Francfort.

11 Locomotive à bogies Ra d'ASEA, construite pour le compte des chemins de fer suédois.



En 1990, ABB livre à SJ le premier exemplaire des 20 trains à caisses inclinables X2000 pour le service express entre Stockholm et Göteborg. Avec leurs convertisseurs à thyristors blocables par la gâchette (GTO) et leurs moteurs asynchrones, ils peuvent atteindre 200 km/h. Aujourd'hui ces trains circulent également sur d'autres grandes lignes suédoises, réduisant jusqu'à 30 % le temps de parcours.

Rationaliser le secteur

Aux yeux du grand public, il n'est pas d'autre produit de l'industrie mécanique et électrotechnique aussi prestigieux et emblématique que le matériel roulant ferroviaire. Aussi les pouvoirs publics avaient-ils coutume de privilégier les fournisseurs nationaux pour équiper leurs chemins de fer, malgré quelques exportations. Néanmoins, ce principe commença à être battu en brèche au tournant des années 1980 et 1990. Tout d'abord, la préfabrication des pièces permettait de réduire considérablement les délais d'approvisionnement. Ensuite, ces sous-ensembles préfabriqués pouvaient être montés presque partout ! Bref, cette évolution, combinée à l'ouverture du marché à la concurrence, poussait les industriels à passer d'une stratégie de fabrication complète d'un produit destiné à un marché local à la fourniture de composants visant un marché mondialisé.

ABB et ferroviaire : les grands tournants

En 1988, la fusion d'ASEA et de BBC en ABB a pour effet de regrouper les activités Systèmes de transport de chacun en une société autonome du groupe ABB.

En 1996, ABB et Daimler Benz fusionnent leur branche ferroviaire sous la dénomination ABB Daimler-Benz Transportation (ADtranz). Cette nouvelle entité acquiert les entreprises suisses SLM et Schindler Waggon en 1998. L'année suivante, ABB vend l'activité à DaimlerChrysler, qui cédera par la suite sa branche ferroviaire à Bombardier. Aujourd'hui, ABB ne construit donc plus de véhicules moteurs complets mais continue de fournir les différents composants ultraperformants répondant aux dures exigences de la traction ferroviaire.

Depuis 2002, ABB entretient des partenariats stratégiques avec Stadler Rail, constructeur de matériel roulant de stature internationale, né d'une petite entreprise suisse spécialisée à l'origine dans les locomotives diesel et à accumulateurs pour le service des manœuvres et les lignes industrielles. L'entreprise est à présent un grand fournisseur de trains de voyageurs accouplés en « unité multiple » (UM), mais aussi de trams, de métros et d'autres types de véhicules pour des clients du monde entier. Ces dernières années, ABB a mis au point de nouveaux composants pour différentes tensions et fréquences de la caténaire, et pour la traction diesel-électrique. ABB fournit les transformateurs, convertisseurs de traction, systèmes d'alimentation embarqués et chargeurs de batteries des trains Stadler.

De nos jours, ABB a conclu des alliances stratégiques avec d'autres grands constructeurs mondiaux de matériel roulant et fournit des composants de haute technologie taillés pour les plus fortes exi-

12 Locomotive à redresseurs Re 4/4 série 161 du BLS (1965)



gences d'une multitude d'applications. Porté par la même passion qui a animé ses pères fondateurs, le Groupe reste l'un des chefs de file du marché ferroviaire en perpétuelle croissance.

Cet article est la mise à jour d'une précédente parution (*Revue ABB*, 2/10) pour fêter les 125 ans d'innovation ABB.

Norbert Lang

Archiviste
ABB Suisse
nl@norbertlang.ch

Bibliographie

- Bugli, R. W., *Electrifying Experience: A Brief Account of The ASEA Group of Sweden 1883–1983*, 1983.
- Haut, F. J. G., *Die Geschichte der elektrischen Triebfahrzeuge*, vol. 1, 1972.
- Huber-Stockar, E., *Die Elektrifikation der Schweizer Bundesbahnen*, 1928.
- Machefert-Tassin, et al., *Histoire de la traction électrique*, 2 volumes, 1980.
- Sachs, K., *Elektrische Triebfahrzeuge*, 3 volumes, 1973.
- Schneeberger, H., *Die elektrischen und Dieseltriebfahrzeuge der SBB*, vol. I : Baujahre 1904–1955, 1995.
- Teich, W., *BBC-Drehstrom-Antriebstechnik für Schienenfahrzeuge*, Mannheim (Allemagne), 1987.
- *ABB review*, 1988–2016.
- *ASEA Journal* (édition anglaise), 1924–1987.
- *BBC Mitteilungen*, 1914–1987.
- *BBC Nachrichten*, 1928–1943, 1950–1987.
- *Bulletin Oerlikon*, 1921–1970.
- *Bulletin Sécheron*, 1929–1972.



Programme minceur

Par son moindre poids, le transformateur de traction Effilight® d'ABB réduit les pertes électriques ainsi que la consommation d'huile jusqu'à 70 %

TOUFANN CHAUDHURI, MARIE-AZELINE FAEDY, STÉPHANE ISLER, MICHELLE KIENER – Alors que le train est d'ores et déjà plus rapide que l'avion pour parcourir l'Europe [1], le record mondial de vitesse a été battu l'an dernier par un train japonais sur un tronçon d'essai : 603 km/h pendant 10,8 s, soit 170 m par seconde. Si la vitesse a toujours bonne presse auprès du public, les professionnels du rail – concepteurs, designers et constructeurs – savent que la masse d'un engin ferroviaire est un critère tout aussi crucial. Le nouveau transformateur de traction Effilight® d'ABB est jusqu'à 20 % plus léger qu'un transformateur de traction classique : une économie qui peut être « réinvestie » dans le circuit magnétique et les enroulements pour ainsi doper de 50 % le rendement énergétique. Lorsqu'une star perd du poids, la nouvelle voyage encore plus vite qu'un TGV de dernière génération. Reste à faire connaître la perte de poids du transformateur Effilight avec autant de célérité !

Photo ci-contre

Le transformateur de traction Effilight® d'ABB a été commercialisé au salon InnoTrans 2016 qui s'est tenu en septembre, en Allemagne.

Sachant qu'un transformateur de traction occupe un espace précieux et alourdit le train, on a tout intérêt à en réduire l'encombrement et la masse. Or la physique a ses lois imparables : le circuit magnétique du transformateur doit être dimensionné pour supporter le champ magnétique. De surcroît, les contraintes de poids dégradent le rendement de l'appareil puisque la quantité de cuivre et d'acier embarquée doit être limitée. À bord d'un train traditionnel tiré par une locomotive, un transformateur lourd n'est pas forcément pénalisant car il contribue à l'adhérence des roues sur les rails : la force de traction maximale que la locomotive peut produire sans perte d'adhérence est limitée par sa masse. Sur les lignes de voyageurs, la tendance est aujourd'hui aux rames à unités multiples, où la chaîne de traction n'est plus regroupée dans la locomotive mais répartie sur toute la longueur du train, dans les voitures de passagers [2]. Si cette multiplication a bien des avantages en matière d'adhérence et d'accé-

lération, elle pose aussi des contraintes spécifiques en termes de volume et d'emplacement des transformateurs embarqués, et de nuisances sonores ; il faut en effet libérer un maximum de places voyageurs tout en faisant la chasse aux décibels.

On n'arrête pas le progrès

Présenté début 2016, Effilight a été commercialisé en septembre dernier, à l'occasion du salon InnoTrans → [photo p. 24](#). Sur le plan technique, c'est surtout l'iso-

ABB a mis au point un concept de transformateur hybride : l'enroulement baigne dans une petite cuve d'huile tandis que le circuit magnétique est à l'air libre.

lation qui distingue Effilight d'un transformateur classique. Dans ce dernier, la partie active est totalement immergée dans une imposante cuve d'huile, ce qui est loin d'être idéal en termes de masse et d'encombrement. Pour Effilight, ABB a mis au point un concept original de transformateur hybride : l'enroulement baigne

Le passage de l'idée aux essais en conditions réelles a pris environ trois ans.



dans une petite cuve d'huile tandis que le circuit magnétique reste à l'air libre.

Le poids en question

La masse de l'appareil est donc primordiale. Sa valeur maximale admissible est imposée par le constructeur du train qui doit lui-même se soumettre aux contraintes de charge par essieu dictées par l'exploitant du réseau ferré. Trop de poids et c'en est fini de l'homologation et de l'autorisation de rouler !

Réduire la masse de l'appareil est ce qui a présidé au développement d'Effilight. Le parc installé de transformateurs de traction ABB isolés dans l'huile (plus de 40 000) affiche une durée de vie remarquable. Mais comment mettre ces appareils au régime ? Des débats animés entre chercheurs ABB ont fait jaillir une idée : et si l'on n'immergeait dans l'huile que le strict nécessaire ? Les ingénieurs décidèrent de tout remettre à plat, puis de réfléchir au moyen de séparer la partie active du transformateur de son circuit magnétique.

Il fallut près de trois ans pour passer de l'idée aux essais en réel. On commença par réaliser de petits prototypes, qui furent ensuite agrandis au fil des améliorations jusqu'à construire et tester de grands prototypes. Les plus gros obstacles à surmonter avaient trait à des questions d'intégration mécanique, de contraintes diélectriques et de champ magnétique.

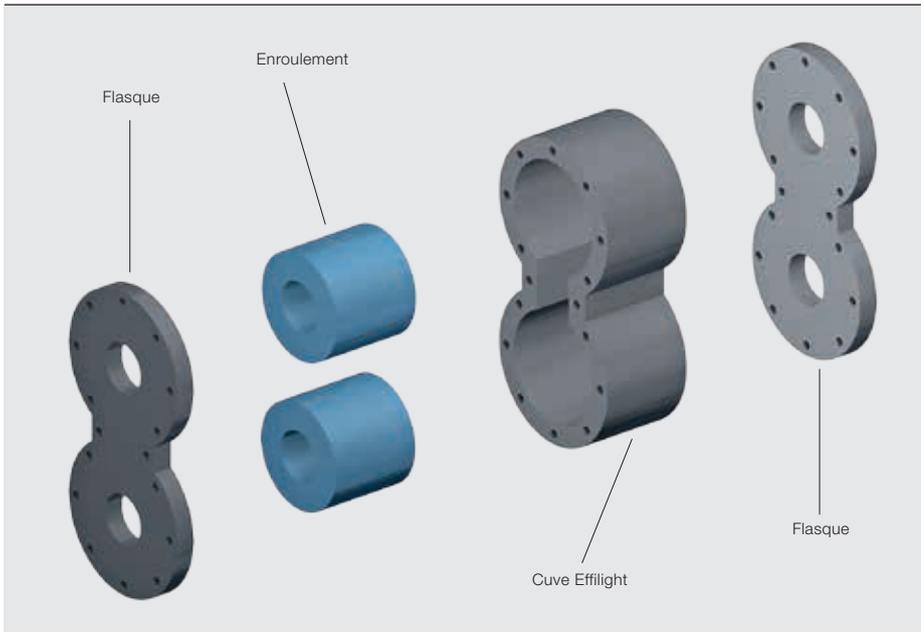
Principales difficultés rencontrées ? L'intégration mécanique, les contraintes diélectriques et le champ magnétique.

S'ensuivirent des essais de type complets, notamment pour tester la tenue aux chocs et aux vibrations, puis des essais climatiques sur plusieurs mois. Le prototype fut soumis à des manœuvres rapides et des montées en température quotidiennes, qu'il endura sans broncher ! La perte de poids aidant, le transformateur gagne aussi en rendement puisque qu'il est alors possible d'ajouter du cuivre pour réduire la résistance des enroulements. À masse égale, les pertes de l'engin peuvent fondre de moitié.

Zéro fuite

Effilight est l'exemple type d'une solution ou d'un produit qui apparaît après coup d'une telle évidence qu'on s'étonne de ne pas y avoir pensé plus tôt ! Encore fallait-il que la technologie soit à la mesure de l'inventivité humaine. Avoir l'idée de sortir le circuit magnétique de l'huile était une chose, la concrétiser en était une autre. Restait à savoir com-

2 Éclaté du dispositif d'étanchéité de la cellule



Seuls les enroulements sont immergés, ce qui permet de réduire jusqu'à 70 % le volume d'huile par rapport à un transformateur classique.

3 Prototype d'essai

Paramètres	Prototype Efflight 1,1 MVA-15 kV	Transformateur de référence 1,1 MVA-15 kV	Économies
Masse totale	3150 kg	3450 kg	-9 %
Pertes (à 75 °C)	57,2 kW	84,5 kW	-33 %
Huile	200 kg	573 kg	-65 %
Longueur	1944 m	1995 m	-
Largeur	2500 m	2524 m	-
Hauteur	851 mm	834 mm	-

ment garantir l'étanchéité totale de la « cellule » (enveloppe de la partie active) capacité n'est plus à démontrer, renforcent l'étanchéité.

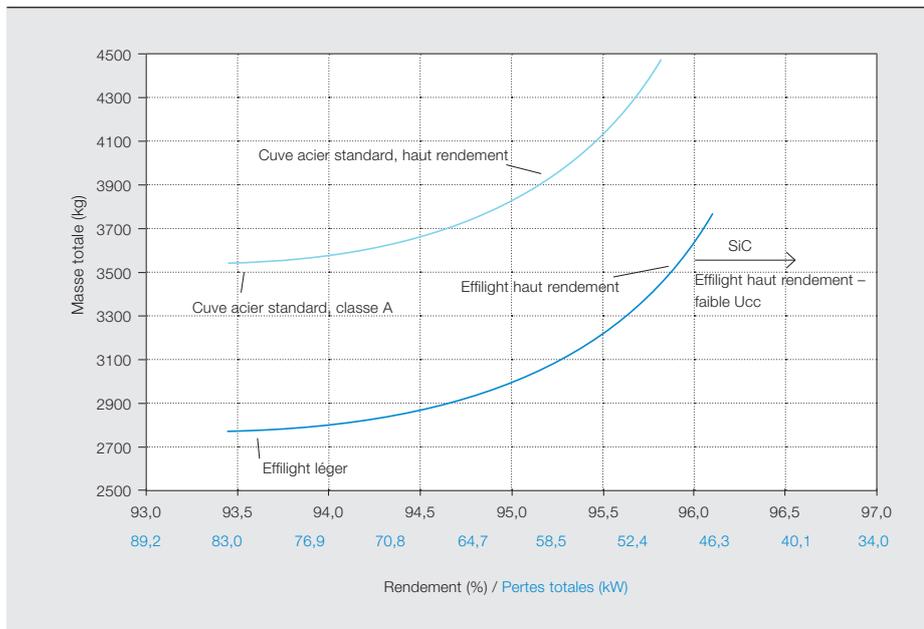
Le prototype subit des essais de type complets, dont deux de tenue aux chocs et aux vibrations, suivis d'essais climatiques durant plusieurs mois.

avec un circuit magnétique à l'extérieur. ABB développa pour cela un concept de « cuve dans la cuve », où la cellule est encapsulée dans une autre enveloppe → 2. Des joints toriques, dont l'effi-

ciacité n'est plus à démontrer, renforcent l'étanchéité. À présent, seuls les enroulements étant isolés et refroidis dans l'huile, ce volume peut fondre de 70 % par rapport à celui d'un transformateur classique. Autre avantage, l'appareil s'allège de 20 %, ce qui permet d'utiliser des enroulements plus lourds en fils de cuivre plus épais. De quoi diviser par deux les pertes et améliorer de 50 % le rendement → 3.

À présent, seuls les enroulements étant isolés et refroidis dans l'huile, ce volume peut fondre de 70 % par rapport à celui d'un transformateur classique. Autre avantage, l'appareil s'allège de 20 %, ce qui permet d'utiliser des enroulements plus lourds en fils de cuivre plus épais. De quoi diviser par deux les pertes et améliorer de 50 % le rendement → 3.

4 Un compromis entre masse et rendement



Aucune adaptation des enroulements ni de l'enveloppe n'est nécessaire pour modifier l'emplacement de montage.

À chaque application, sa solution

Dans un transformateur de forte puissance, le volume d'huile n'est pas un paramètre aussi crucial que la quantité de cuivre ou d'acier utilisée ; il y a donc des cas où Effilight ne permet pas de gagner sur le facteur poids. C'est dans le domaine des faibles puissances qu'il révèle tout son potentiel. En effet, le facteur de remplissage (rapport de la masse de cuivre et d'acier sur la masse totale du transformateur) est inversement proportionnel à la puissance de l'appareil → 4.

Un modèle de polyvalence

Même si son prototype a été construit et testé pour un montage en toiture → 1, le transformateur Effilight est de conception modulaire. Autrement dit, aucune adaptation des enroulements ni de l'enveloppe n'est nécessaire pour modifier l'emplacement de montage (dessous de caisse ou compartiment de l'appareillage) → 6, 7. Cela se traduit par des économies d'échelle et des garanties de reproductibilité pour les constructeurs, ainsi qu'une plus grande facilité de maintenance pour les exploitants. Autre avantage, le même transformateur peut être installé sur divers équipements d'une flotte, ce qui réduit d'autant les coûts de formation du personnel.

5 Atouts d'Effilight

Puissance	15 kV/16 ² / ₃ Hz	25 kV/50 Hz
1 MVA	Jusqu'à -20 %	-
2 MVA	Entre -10 et -15 %	-20 %
3 MVA	Jusqu'à -10 %	-15 %
4 MVA	-	Jusqu'à -10 %

5a Perte de poids moyenne

Puissance	15 kV/16 ² / ₃ Hz	25 kV/50 Hz
1 MVA	Jusqu'à +50 %	-
2 MVA	Entre +20 et +30 %	Jusqu'à +50 %
3 MVA	Jusqu'à +20 %	Entre +20 et +40 %
4 MVA	-	Jusqu'à +20 %

5b Gain de rendement moyen

Effilight ayant des fonctions de protection et des exigences de maintenance identiques à celles d'un transformateur classique, il peut se substituer à l'existant sans modifier les procédures et systèmes en place.

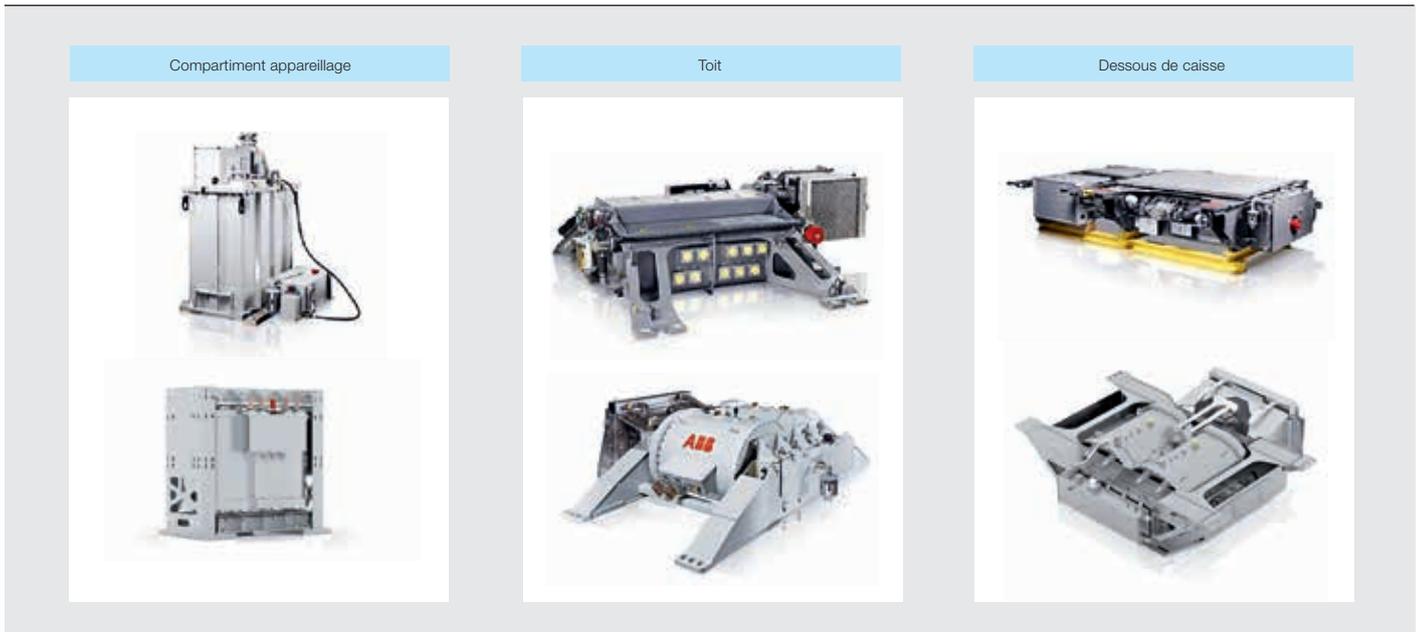
L'avenir sur rail

Aujourd'hui, les transformateurs de traction ABB alimentent plus de 50 % du matériel roulant mondial, et sont le

Le remplacement d'un transformateur par Effilight ne change en rien les procédures ou systèmes de protection et de maintenance en place.

choix privilégié des constructeurs et exploitants ferroviaires. En conservant son isolation dans l'huile, Effilight garantit la même durée de vie que n'importe quel transformateur ABB : 40 ans. La perte de poids et le gain de rendement → 5 procurent aux clients des marges de liberté sans précédent : il est possible d'adapter la solution aux

6 Emplacements de montage



7 Transformateurs de traction à haut rendement : comparatif des technologies

Paramètres	Classique	Effilight
Version allégée		✓
Option 25 kV	✓	✓
Refroidissement par circulation d'air		✓
Montage sur toit	✓	✓
Montage en compartiment appareillage	✓	✓
Montage sous caisse	✓	✓
Durée de vie	40 ans	40 ans

besoins de plates-formes ferroviaires spécifiques, un allègement de 10 %, par exemple, autorisant des rendements de +20 à +30 %. Malgré son poids plume, Effilight pèse lourd en termes de longévité, d'efficacité et de puissance. Le dernier-né de la lignée de transformateurs de traction ABB est décidément promis à un brillant avenir !

Toufann Chaudhuri

Marie-Azeline Faedy

Stéphane Isler

ABB Sécheron SA

Genève (Suisse)

toufann.chaudhuri@ch.abb.com

marie-azeline.faedy@ch.abb.com

stephane.isler@ch.abb.com

Michelle Kiener

ABB review

Baden-Dättwil (Suisse)

michelle.kiener@ch.abb.com

Bibliographie

- [1] Peterson, B., « It's Quicker to Travel by Train Than Plane in Europe Right Now », *Condé Nast Traveler*, disponible en ligne sur : www.cntraveler.com/stories/2016-04-11/its-quicker-to-travel-by-train-than-plane-in-europe-right-now, 11 avril 2016.
- [2] Claessens, M., *et al.*, « PETIT ... mais puissant », *Revue ABB*, 1/12, p. 11-17.

À l'assaut des montagnes

Efficacité énergétique des trains Allegra

BEAT GUGGISBERG, THOMAS HUGGENBERGER, HARALD HEPP – Si le rail compte parmi les modes de transport les moins énergivores, ce n'est pas une raison pour s'arrêter en si bon chemin! En Suisse, les trains Allegra de la compagnie RhB (*Rhaetische Bahn*) affichaient déjà une grande sobriété énergétique, qu'un récent projet a encore améliorée.

Photo

Un train Allegra sur la ligne de l'Albula, inscrite au patrimoine mondial de l'UNESCO.







Les Chemins de fer rhétiques RhB, dans le sud-est de la Suisse, exploitent un réseau de 384 kilomètres dans les Alpes. Ils desservent des stations de montagne prisées comme Davos, Klosters ou Saint-Moritz, et transportent quelque 10 millions de passagers par an. Certains tronçons franchissent des ouvrages d'art monumentaux (viaducs vertigineux → photo p. 31 et tunnels sinueux), inscrits au patrimoine mondial de l'UNESCO. Les RhB ne sont pas qu'un chemin de fer touristique: le réseau assure la desserte locale et le transport de marchandises toute l'année. Dans certaines zones où les routes sont régulièrement fermées par la neige en hiver, la voie ferrée est le seul mode de transport viable.

Dans le cadre d'un programme de modernisation de la flotte entamé en 2010, les RhB ont acheté 20 nouveaux trains Allegra en unités multiples, fabriqués par Stadler; ABB a fourni le matériel électrique compact, notamment les transformateurs de traction et les convertisseurs → 2. Ces trains ont été conçus pour rouler dans les conditions exigeantes du réseau RhB: courbes serrées, fortes pentes, rudesse climatique, convois longs et lourds.

Comme souvent, les besoins de puissance furent dimensionnés pour répondre aux exigences de fonctionnement les plus sévères: lorsqu'un train lourd gravit une pente raide, par exemple, la puissance de traction doit être maximale. Certes, la plupart du temps, les conditions d'exploitation sont plus clémentes, avec des charges plus légères ou des voies moins pentues; par contre, le rendement risque de ne pas être optimal. C'est pourquoi les RhB ont lancé un projet d'étude et d'amélioration du rendement énergétique global.

Moteurs

La puissance développée par un moteur de traction correspond au produit du flux magnétique par le courant générateur de couple dans le stator, deux facteurs qui contribuent aux pertes. À forte puissance, les pertes dues au courant sont majoritaires: le moteur fonctionne généralement au flux maximal, le courant servant à commander la sortie. Cependant, à moindre puissance, réduire le flux peut améliorer le rendement. Chaque doublet vitesse/couple a une valeur optimale qui dépend des paramètres du moteur.

Bus commun continu (CC)

Normalement, un convertisseur de traction fait varier la fourniture de puissance

en maintenant la tension aussi constante que possible sur le bus CC et en modulant le courant de sortie. La totalité de la tension du bus CC n'est en fait nécessaire qu'à plein régime; elle peut donc être abaissée à des puissances plus faibles. Les chercheurs ont identifié les valeurs optimales pour différents cas de figure selon la puissance, l'effort de traction et les variations de la tension caténaire. Les calculs ne se sont pas limités au convertisseur; ils ont aussi tenu compte des pertes dans le transformateur et les moteurs dues aux séquences de commutation.

Un moteur de plus ou de moins

À plein régime, le train a besoin de tous ses moteurs de traction. Toutefois, à moindre puissance, utiliser un nombre

En 2010, les RhB ont lancé un projet d'amélioration du rendement énergétique global.

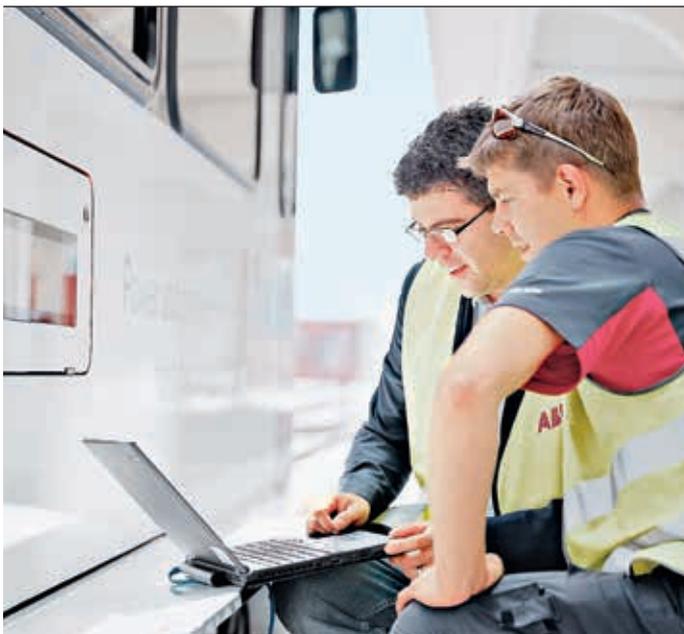
réduit de moteurs (et de convertisseurs associés) judicieusement choisis et déconnecter les autres s'avère plus efficace.

Vu la fréquence des courbes, les deux essieux d'un bogie doivent toujours exercer les mêmes forces de traction ou de freinage afin de garantir un bon comportement dynamique du train.

2 Un train Allegra aux couleurs d'ABB pour fêter les 125 ans du Groupe en Suisse.



3 Tests logiciels réalisés de septembre 2014 à septembre 2015.



La commande doit donc être optimisée au niveau de chaque bogie plutôt que de chaque essieu.

Mise en œuvre

La partie logicielle concernera à la fois le système de contrôle-commande au niveau du véhicule et l'électronique de puissance chargée de piloter chaque bogie et ses convertisseurs de traction.

Outre l'amélioration de la consommation d'énergie en traction, les mesures adoptées prennent aussi en compte l'impact sur l'adhérence pour l'optimiser.

Électrification en continu

La majorité du réseau RhB est électrifiée en 11 kV/16 2/3 Hz, mais les 62 km de la ligne de la Bernina, qui relie Saint-Moritz à Tirano, sont alimentés en courant continu (CC) à 1000 V. Certaines unités Allegra sont conçues pour ne circuler que sur des lignes en courant alternatif (CA), quand d'autres sont bi-tension. Les mesures décrites ici concernent principalement l'alimentation CA. Sur la partie CC, les gains sont plus modestes : il est en effet impossible d'optimiser la tension du bus CC puisqu'elle est directement fournie par la caténaire.

D'après les calculs, convertir ce tronçon en CA n'améliorerait pas le bilan énergétique. La ligne de la Bernina comportant de plus fortes déclivités (jusqu'à 7 %), les locomotives tournent plus souvent

à plein régime, ce qui limite les gains d'optimisation réels.

Économies

Les modifications logicielles furent mises en œuvre et testées entre septembre 2014 et septembre 2015 → 3.

Les économies d'énergie ainsi réalisées atteignent 950 MWh par an pour l'ensemble des 20 trains, soit environ 2 % de la consommation électrique totale des RhB. Preuve tangible de l'optimisation, les moteurs chauffent moins en fonctionnement.

Les gains ne se limitent pas à la consommation énergétique : les composants tels que convertisseurs, moteurs, semi-conducteurs et isolants étant moins sollicités, leur durée de vie et fiabilité opérationnelles devraient aussi augmenter.

Cet article est tiré de la publication « Reduktion des Traktionsenergiebedarfs der Allegra-Triebwagen der RhB », Meyer, M., Heck, A., et al., *Schweizer Eisenbahn-Revue*, 2/16.

Grâce aux modifications logicielles, les économies d'énergie atteignent 950 MWh par an pour l'ensemble des 20 trains.

Beat Guggisberg

Thomas Huggenberger

Harald Hepp

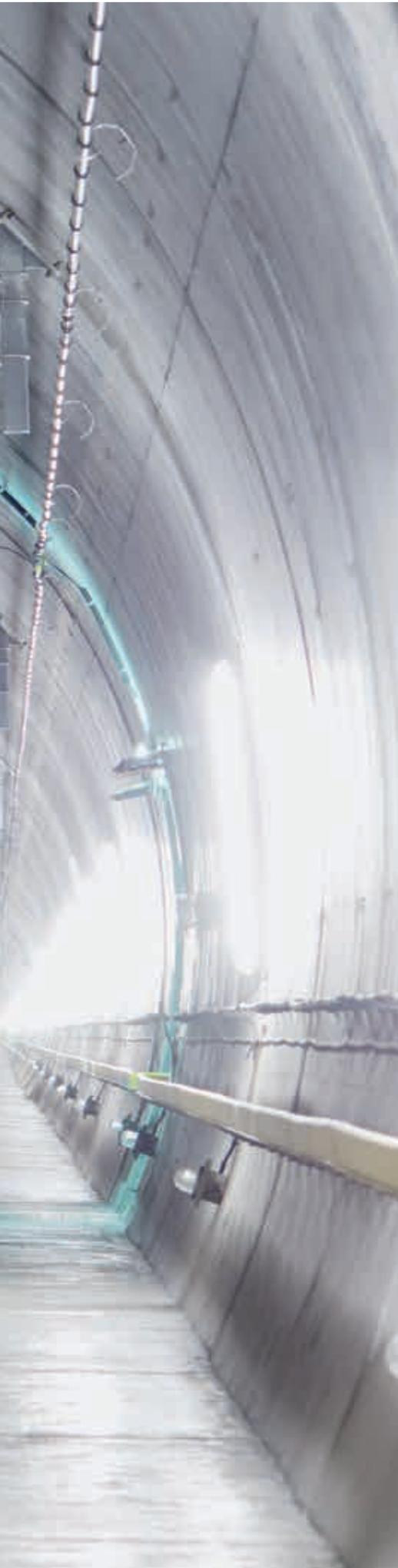
ABB Discrete Automation & Motion
Turgi (Suisse)

beat.guggisberg@ch.abb.com

thomas.huggenberger@ch.abb.com

harald.hepp@ch.abb.com





Effet tunnel

Le tunnel de base du Saint-Gothard bien protégé grâce aux appareillages moyenne tension ZX0 d'ABB et aux protections de câbles PMA

ANDREAS BEINAT, FELIX INGOLD – Le Saint-Gothard, le plus long tunnel ferroviaire au monde, a été inauguré un an plus tôt que prévu, en juin 2016. Les contributions d'ABB à ce chantier pharaonique, entamé en 1993 avec les premiers sondages géologiques, furent nombreuses : citons par exemple les plus de 800 appareillages d'interruption moyenne tension (MT) qui alimentent l'ouvrage ou les kilomètres de protection de câbles PMA (société du groupe ABB) pour le système d'éclairage du tunnel.

Photo

Une infrastructure électrique intelligente et fiable sécurise l'exploitation des deux tubes parallèles de 57 kilomètres qui forment le tunnel de base du Saint-Gothard. Indispensable pour un projet de 9 milliards d'euros !



Au terme de vingt ans de travaux, le tunnel de base du Saint-Gothard (TBG) a ouvert en juin 2016. Il a pour vocation d'augmenter la capacité de fret ferroviaire → 1 sur l'axe Rotterdam-Bâle-Gênes tout en raccourcissant les temps de transport voyageurs entre le nord et le sud de la Suisse. Lorsqu'il fonctionnera à pleine capacité, ce seront jusqu'à 250 trains par jour qui franchiront le massif du Saint-Gothard. Sans le professionnalisme et l'efficacité de tous les partenaires du projet, le tunnel n'aurait jamais pu entrer en service avec un an d'avance sur le calendrier défini en 2008.

C'est encore en 2008 que Balfour Beatty Rail, membre du consortium Transtec et chargé par le maître d'ouvrage AlpTransit Gotthard SA des installations électrotechniques du tunnel, fait appel à ABB pour fournir les appareillages MT 50 Hz qui alimenteront les systèmes de climatisation, de ventilation, d'éclairage, de signalisation, de communication et de sécurité.

Six années ont suffi à ABB pour accomplir ces travaux d'Hercule : en août 2014, des représentants de Balfour Beatty Rail et d'ABB fêtaient la livraison des 875 appareillages MT sur le site de Schattdorf, en Suisse.

Conditions extrêmes

Les deux tubes du TBG sont reliés tous les 325 mètres par des galeries de liaison transversales → 2 qui servent également de voies d'évacuation d'urgence, une sur deux étant électrifiée. ABB a ainsi fourni des appareillages à isolation gazeuse MT de type ZX0, qu'il a fallu adapter aux conditions locales extrêmes. En effet, les tunnels ferroviaires posent une multitude de problèmes, au premier chef les matériaux d'abrasion qui sont arrachés des rails au passage des trains.

Appareillage ZX0

Les appareillages d'interruption et les disjoncteurs étant des éléments clés de la sécurité et de la souplesse opérationnelle de l'installation, ABB devait s'assurer que sa fourniture répondait aux dures exigences du tunnel. Par sa structure modulaire et compacte, le ZX0 affiche une disponibilité maximale pour fournir et répartir l'énergie en continu, ce qui en fait la solution idéale pour le TBG. Il est en outre fiable, facile à configurer, à exploiter et à entretenir.

L'isolation gazeuse du ZX0 offre de nombreux atouts, notamment une sécurité maximale. Les parties sous tension, par exemple, sont totalement inaccessibles pour protéger le personnel de

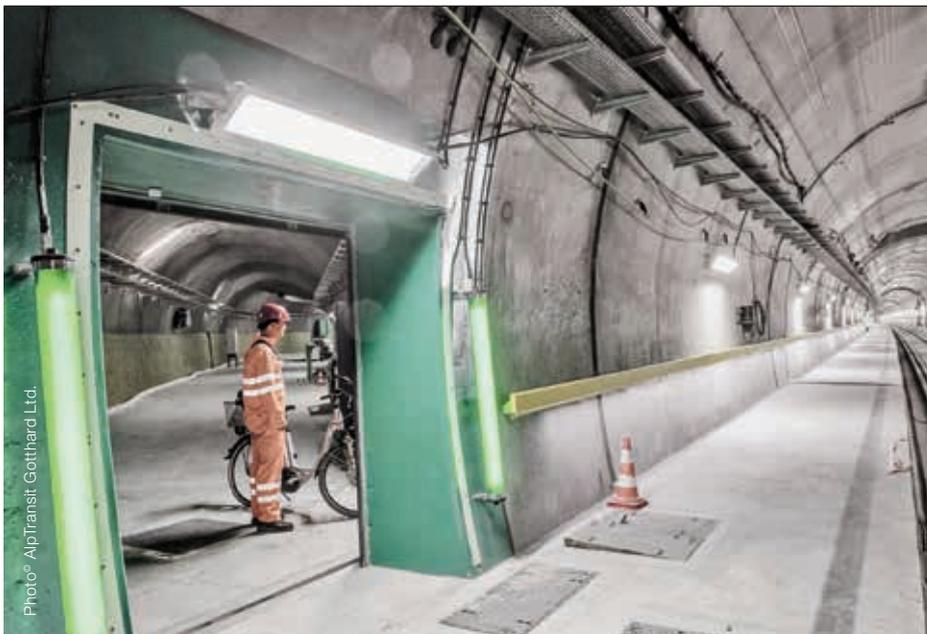
Les appareillages MT d'ABB protègent les systèmes de climatisation, de ventilation, d'éclairage, de signalisation, de communication et de sécurité du tunnel.

tout contact fortuit lors du montage et de la mise en service de l'appareillage. Tous les éléments MT sont regroupés dans une cuve étanche pour éviter la manipulation de gaz sur le site. Ils sont protégés des influences externes et n'exigent aucune maintenance, ce qui réduit le danger et le risque d'accident.

Cette étanchéité préserve tous les composants du vieillissement, d'où une baisse du coût total de possession. Le ZX0 constitue donc une solution performante et économique sur la totalité du cycle de vie.

Essais poussés

Les conditions particulières dans le tunnel allaient mettre l'intégrité du ZX0 à rude épreuve. C'est pourquoi ABB a conçu



Modulaire et compact, le ZX0 constituait la solution idéale pour le TBG.

une armoire de commande locale protégée IP65, totalement étanche aux poussières et aux projections d'eau, et capable de supporter les variations de pression induites par le passage des trains.

Les galeries transversales servant aussi de voies d'évacuation d'urgence, les exigences en termes de résistance d'arc et de protection contre les défauts d'arc sont beaucoup plus strictes que d'ordinaire, même dans les zones à accès restreint. Le ZX0 intègre donc un dispositif spécial de décharge de pression qui élimine tout danger pour les personnes.

Surveillance rapprochée

ABB a aussi livré 500 unités multifonctions REF542*plus* destinées à protéger, commander, mesurer et surveiller le réseau dans tout le tunnel. Ce contrôleur de cellules MT localise sans délai n'importe quel défaut et en transmet immédiatement la nature et l'emplacement au système de contrôle-commande du tunnel afin de garantir une alimentation stable et ininterrompue.

Il est également possible d'accéder à distance, par réseau local Ethernet, aux programmes et données de protection enregistrés dans l'appareil. La protection à distance est multiniveau: le REF542*plus* est capable de déconnecter individuellement n'importe quel tronçon de réseau en défaut. L'accès distant s'effectue de manière très pratique par navigateur web classique; l'opérateur

peut ainsi se connecter partout et à tout moment, en respectant les précautions de sécurité.

La fonction d'alerte par SMS facilite encore la tâche des équipes d'intervention. Dès que le REF542*plus* enregistre un événement, il envoie une notification par SMS sur le mobile de l'agent d'astreinte, qui peut alors se connecter à l'Internet et accéder au REF542*plus* pour analyser le défaut à distance et trouver le correctif.

L'analyse de la fréquence des défauts dans un réseau de distribution électrique permet d'en réduire l'occurrence. Le REF542*plus* utilise à cet effet le GPS d'une manière originale: non pas comme outil de géolocalisation, mais comme signal de synchronisation en continu de son horloge interne. Les défauts sont ainsi horodatés avec une précision meilleure que 1 ms, un atout pour en évaluer les causes, puis transmis au centre de commande pour analyse.

Fourniture ABB

Outre l'appareillage à isolation gazeuse, ABB a également fourni les équipements d'alimentation et de commande du système de ventilation de 15,6 MW, le plus puissant au monde. La totalité du contrôle-commande, y compris les

unités d'activation et de pilotage des ventilateurs et des capteurs des tunnels, ainsi que les détecteurs d'incendie, sont de fourniture ABB. Un gestionnaire de scénarios pilote les galeries d'aériage en fonction d'événements prédéfinis.

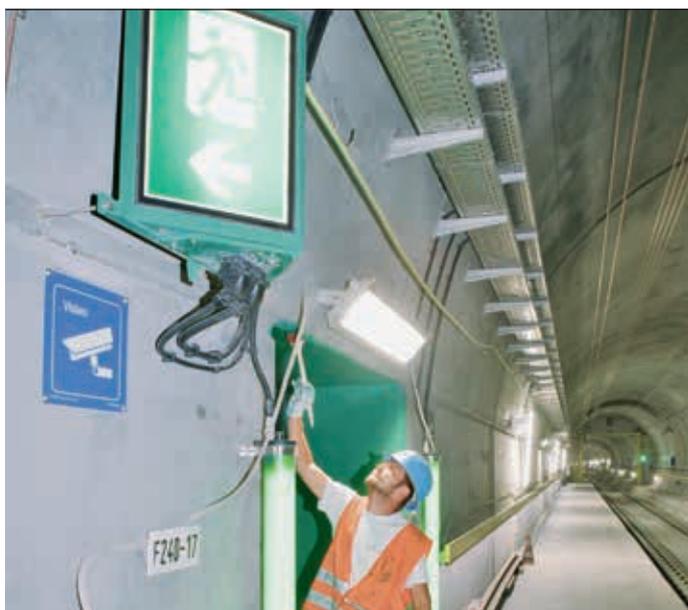
Fiabilité extrême

Tout l'équipement décrit ci-dessus est tributaire d'une alimentation fiable. La longueur et la profondeur hors normes du tunnel engendrent des conditions climatiques exceptionnelles: la température de l'air y dépasse parfois 40 °C tandis que l'hygrométrie peut atteindre 70 % en raison des fréquents lavages au jet d'eau moyenne pression. Qui plus est, tous les équipements constituant

Toutes les parties sous tension de l'appareillage sont inaccessibles, pour la plus grande sécurité du personnel.

l'infrastructure du tunnel doivent afficher une excellente tenue au feu. Or bon nombre des produits du marché ne sont pas à la hauteur de telles exigences de sécurité et de fiabilité.

Alpiq Burkhalter Bahntechnik AG, autre membre du consortium Transtec, a demandé à PMA ABB, qui compte parmi les leaders mondiaux de la protection



Alpiq Burkhalter Bahntechnik voulait une protection de câbles flexible, facile à installer et totalement étanche.

spéciale de câbles, de lui fournir un système complet pourvu d'excellentes caractéristiques de tenue au feu (inflammabilité, densité des fumées et toxicité) et un indice de protection élevé (IP68 et IP69K) pour résister au nettoyage moyenne pression.

Ce n'était pas la première fois qu'Alpiq Burkhalter Bahntechnik utilisait du matériel PMA dans des tunnels, mais les défis du chantier du Saint-Gothard étaient tels que la société avait besoin ici d'une solution flexible, facile à installer et totalement close pour protéger les câbles de cet environnement hostile.

Protection polyamide

PMA ABB a pour cela mis au point une formulation spéciale en polyamide de haute qualité, qui offre une excellente résistance aux UV, aux intempéries et aux chocs. Le polyamide se distingue par une faible inflammabilité et des dégagements de fumées et de gaz toxiques réduits en cas d'incendie, autant de caractéristiques primordiales pour ce projet.

Les produits PMA ont d'abord été soumis à des essais poussés sur des installations de petite taille, sous des ponts et dans des tunnels. Les résultats ont été

si convaincants qu'Alpiq Burkhalter Bahntechnik n'a pas tardé à passer commande de 21 kilomètres de gains VAMLT → 3 et de plus de 21 000 raccords avec presse-étoupe BVNZ et colliers serre-câbles BFH-0 → 5 pour le système d'éclairage des 57 km de tunnel. Par la suite, ce furent plus de 10 000 plots de balisage lumineux et 450 éclairages de secours qui furent équipés de protections PMA → 4, 6.

Un tunnel à toute épreuve

Les systèmes de protection de câbles en polyamide de PMA affichent d'excellentes propriétés de résistance mécanique (tenue à l'écrasement et aux impacts de charges lourdes) ainsi qu'une grande flexibilité. Sans risque de corrosion, ils possèdent un degré de protec-

Pour le ZX0, ABB a conçu une armoire de commande locale étanchéifiée IP65 (poussières et projections d'eau).

tion élevé contre l'eau et la poussière, paramètre crucial dans le TBG. En plus de bien résister, entre autres, aux agressions chimiques (agents nettoyants, par exemple) et aux UV, ils ne craignent ni les rongeurs ni les températures extrêmes. Les protections de câbles PMA ABB



bénéficient d'une longue durée de vie et d'un service client toujours présent.

Un tel projet de notoriété mondiale, aux défis technologiques sans équivalent, constitue une vitrine idéale de l'excellence des produits ABB.

Les protections de câbles en polyamide PMA ABB affichent une excellente résistance mécanique, une grande flexibilité et un indice de protection élevé contre l'eau et la poussière.



Andreas Beinat

ABB Medium Voltage Products
Baden (Suisse)
andreas.beinat@ch.abb.com

Felix Ingold

ABB Electrification Products
Uster (Suisse)
felix.ingold@ch.abb.com

Lecture complémentaire

Jenni, R., *et al.*, « La Suisse sur les rails »,
Revue ABB, 2/10, p. 31–34.

Percée au Pôle Nord

Alimentation électrique, propulsion et automatisation ABB du plus moderne brise-glace portuaire au monde

ANTHONY BYATT – Pour tirer le maximum de puissance des moteurs marins, tels que ceux équipant les brise-glaces, il faut des turbocompresseurs. Le vaste portefeuille « turbo » d'ABB pour le marché maritime s'enrichit aujourd'hui du *Power2 800-M* destiné au plus performant brise-glace de tous les temps, en construction aux chantiers navals de Vyborg, en Russie.

Photo

Le turbocompresseur ABB de dernière génération *Power2 800-M* fournit toute la puissance nécessaire aux brise-glaces du Grand Nord.





font qu'un brise-glace est bien plus lourd qu'un navire transocéanique de même gabarit.

En outre, les forces titanesques transmises par la banquise et la nature souvent imprévisible de la glace dérivante sont autant de dangers et de pièges pour les brise-glaces. Il existe pour cela plusieurs parades : grandes quantités d'eau chaude et d'air comprimé projetées sous la glace pour la disloquer, pompage rapide de l'eau des ballasts latéraux pour faire rouler le bâtiment d'un bord à l'autre et le dégager, entre autres.

On comprend alors que ces navires aient besoin d'un maximum de puissance et donc de turbocompresseurs !

Avec sa vaste gamme de solutions de suralimentation pour le marché maritime, ABB équipe aujourd'hui un brise-glace portuaire de dernière génération, en chantier à Vyborg (Russie). Le Groupe fournira également l'alimentation électrique et les automatismes du navire.

Quand l'explorateur britannique John Franklin part à la recherche d'un passage maritime par le nord-ouest arctique, en 1845, qui aurait imaginé la fonte accélérée de la banquise un siècle et demi plus tard ? Au point qu'aujourd'hui de gros navires de commerce transitent régulièrement le long des côtes canadiennes et sibériennes. Ces nouveaux couloirs maritimes ont presque raccourci de moitié la distance Europe du Nord-Asie et les eaux arctiques restent libres de glace plus longtemps, allongeant d'autant la saison de navigation.

L'augmentation du trafic maritime sur la route du Nord a pour corollaire le développement de la flotte de brise-glaces. Outre la robustesse propre à leur fonction, ces navires ont trois caractéristiques fondamentales : une coque renforcée, une forte étrave et un puissant appareil propulsif qui leur permet de monter sur la banquise pour écraser la glace sous leur poids. Une manœuvre entravée par l'impressionnante masse du bâtiment → 1 et ses membrures spéciales destinées à résister à la pression de la glace. De même, la proue, la poupe et la ligne de flottaison sont flanquées d'épaisses plaques d'acier spécialement choisi pour ses performances à basse température. Tous ces traits distinctifs

Le moteur principal sera doté du turbocompresseur Power2 800-M d'ABB, système de suralimentation bi-étagé le plus évolué de l'industrie, garant d'un rendement propulsif maximal.

Concentré de puissance

L'espace étant compté dans la salle des machines, ABB a conçu le turbo le plus compact de sa catégorie : le gain de place est de 20 % par rapport aux solutions bi-étagées classiques. C'est là un

Le moteur principal sera équipé du turbocompresseur bi-étagé Power2 800-M pour un rendement propulsif maximal.

remarquable atout pour un brise-glace dont la coque renforcée occupe traditionnellement beaucoup plus de place que sur un navire marchand.



La cartouche extractible de Power2 800-M permet d'intervenir sur la machine en deux étapes, au lieu de six auparavant, facilitant la maintenance et réduisant les coûts d'immobilisation et d'entretien.

Sur le moteur du brise-glace, le turbocompresseur Power2 800-M améliorera la souplesse de manœuvre, économisera le carburant et réduira sensiblement les polluants atmosphériques (jusqu'à 60 % d'oxydes d'azote en moins), au profit d'une navigation respectueuse de l'écosystème arctique.

Avec ses étages basse et haute pression, Power2 800-M autorise des rapports de pression d'air supérieurs : jusqu'à 12 au lieu de 8 pour la précédente génération. De même, son rendement dépasse 75 % quand celui d'un turbocompresseur monoétagé plafonne à 65–70 % ; c'est le seul turbo à afficher ces performances dans le domaine des gros moteurs.

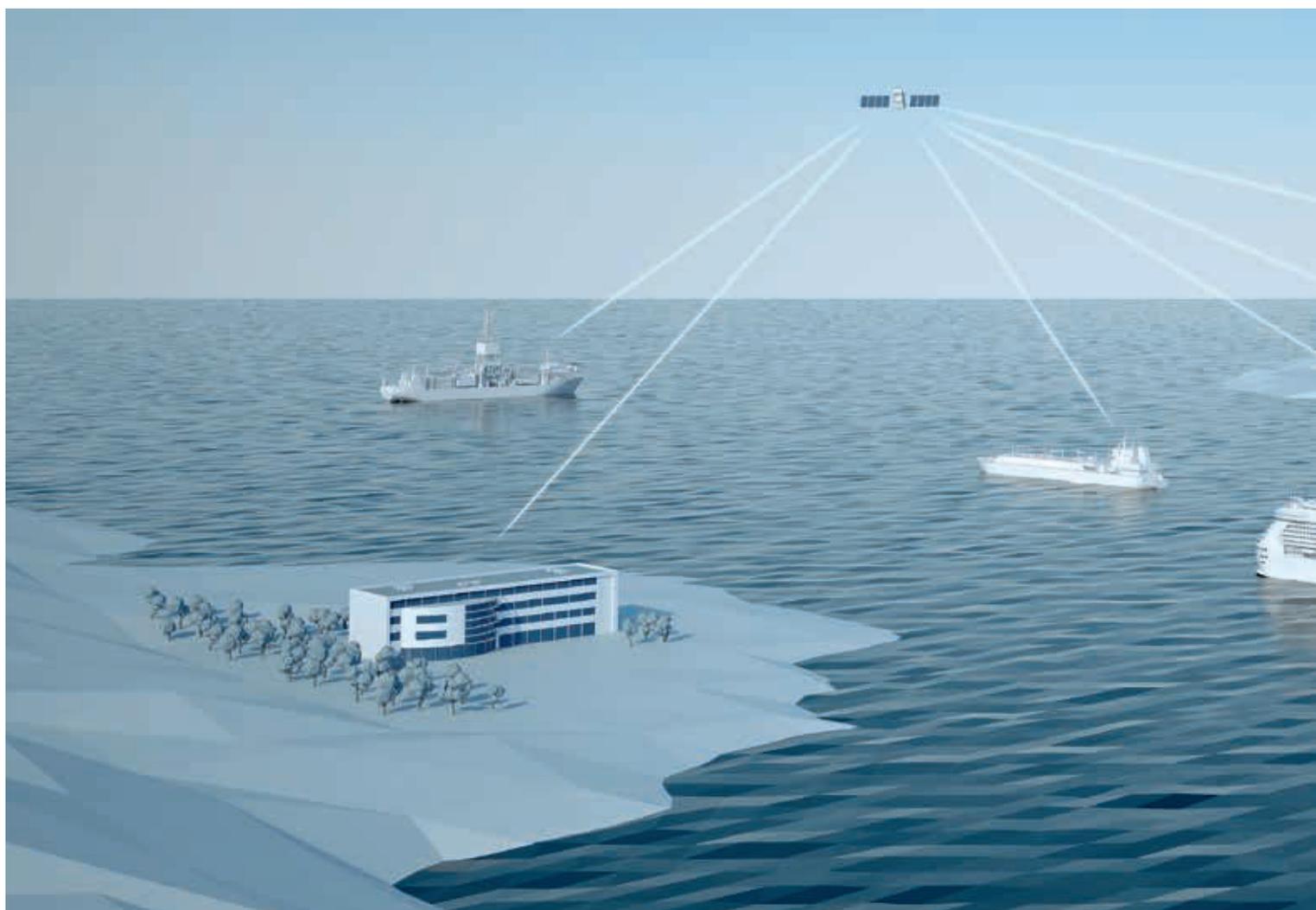
Power2 800-M répond au besoin de nouvelles technologies de moteurs pour navires combinant solutions traditionnelles et innovations dans les combustibles marins. Cette application illustrera les gains en rendement et en densité de puissance dont bénéficient aujourd'hui les moteurs quatre temps fonctionnant sur une large plage de profils de charge

et soumis à la pression accrue de la réglementation antipollution. Une fois le brise-glace construit, mis en service et exploité dans les eaux portuaires gelées, le turbocompresseur Power2 800-M d'ABB mettra toute sa puissance en action pour ouvrir les routes polaires.

Power2 800-M
est le turbo le plus
compact de sa
catégorie.

Anthony Byatt
Rédacteur indépendant

Contact ABB :
Magdalena Okopska
magdalena.okopska@ch.abb.com



Téléservices en mer

Le nouveau portail ABB de surveillance et d'intervention maritimes

MARIA RALPH, VERONIKA DOMOVA, PETRA BJÖRNDAL, ELINA VARTIAINEN, GORANKA ZORIC, RICHARD WINDISCHHOFER, CHRISTOPHER GANZ – Les systèmes d'automatisation, de surveillance et de contrôle-commande à distance ont investi des pans entiers de l'industrie au cours des dernières décennies. Des secteurs comme la défense, l'énergie, le nucléaire, le ferroviaire, l'exploitation minière, le pétrole et le gaz, l'aérospatial, mais aussi les autorités portuaires, les concessions autoroutières et les services d'urgence utilisent massivement des techniques et centres de téléconduite pour gérer leurs opérations et parcs d'équipements. Sur fond de « 4^e révolution industrielle » [1], voici que prennent corps les trois grands enjeux de la transformation numérique de la société [2]: l'automatisation, la gestion globale de l'information et de la connaissance, la surveillance et le pilotage optimisés de tout ce qui nous entoure. Tels sont les leviers d'innovation ABB pour bâtir des solutions de téléassistance plus « intelligentes », taillées pour les entreprises maritimes.



ABB bâtit des solutions de télé-assistance « intelligentes », taillées pour le domaine maritime.

Le diagnostic et le dépannage en mer sont des activités traditionnelles d'ABB. Pourtant, avec l'avènement des capteurs communicants, des services en ligne (*cloud*) et des communications par satellite, les applications de télédiagnostic et de télé-dépannage, encore sporadiques cette dernière décennie, sont devenues monnaie courante. Grâce aux possibilités de connexion à distance avec les équipements maritimes et de collecte des données des capteurs embarqués, les ingénieurs ABB ont aujourd'hui les moyens de résoudre à point nommé les problèmes rencontrés par les clients du secteur. Ils peuvent ainsi porter assistance à plusieurs navires, sans avoir à se déplacer sur site, tout en faisant participer les techniciens du client à l'opération. Dans la pratique, dès que surgit un problème, une équipe virtuelle réunissant toutes les expertises nécessaires

Les ingénieurs ABB sont en mesure de porter assistance à plusieurs clients à la fois, sans avoir à se déplacer.

est rapidement constituée pour partager les informations pertinentes et aider le client à « redresser la barre » bien plus vite que par le passé.

Cette téléassistance nécessite de faire évoluer les pratiques de travail et d'améliorer les outils mis à la disposition des intervenants. Il faut notamment permettre aux ingénieurs support de dialoguer facilement et rapidement avec des collègues du monde entier, de visualiser l'ensemble des données client pour

obtenir une vue complète de la situation et d'avoir toute la documentation utile sous la main. Le portail de services et de données maritimes en ligne développé par ABB Marine suit ce cap. Il a vocation à doter les intervenants à distance de moyens plus efficaces pour analyser les informations indispensables au diagnostic du problème et au dépannage du client. Il leur fournit les données cruciales qui permettront d'obtenir un instantané de chaque situation, de chaque navire comme de toute une flotte, pour en dégager le contexte et lever à temps les écueils rencontrés.

Identification des besoins

Dans tout type d'assistance client, le facteur temps est capital. Le diagnostic rapide et la résolution efficace des pannes sont la priorité des ingénieurs support ABB. Encore faut-il être « outillé » pour cela.

Photo

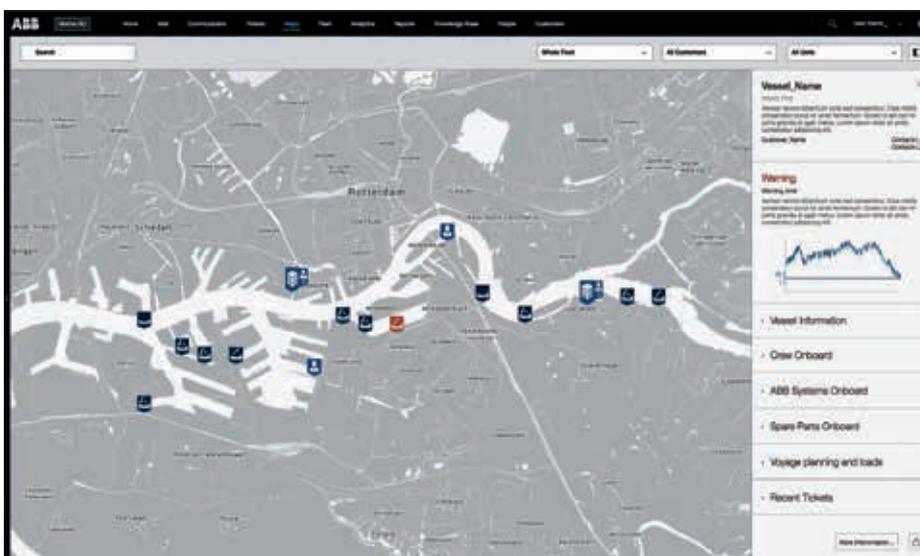
ABB met le cap sur la connectivité maritime.

L'équipe technique du client est impliquée dans la résolution du problème.

1 Tableau de bord



2 Carte marine interactive



La conception de solutions d'assistance optimales oblige à comprendre parfaitement la manière dont ces ingénieurs travaillent. C'est en les consultant et en les observant à pied d'œuvre que l'on peut s'imprégner de leurs pratiques et appréhender leurs objectifs, leurs besoins et leurs préoccupations. Ces informations sont autant de clés pour concevoir une nouvelle solution de dialogue homme-machine. Le prototype développé par ABB s'est donc appuyé sur les conclusions de ces entretiens et observations, à savoir :

- Contexte de la recherche de pannes : pour envisager toutes les solutions possibles, les ingénieurs de téléassistance ont besoin de rassembler un maximum d'informations pertinentes sur le problème posé ; or il n'est pas facile pour les techniciens du navire de transférer rapidement les informa-

tions contextuelles (vidéos, images, etc.) à l'ingénieur distant en charge de l'intervention, tout comme il n'est pas aisé pour ce dernier de faire des suggestions à l'équipage ;

- Dissémination de l'information : les données utiles au diagnostic et au dépannage ne sont pas toutes regroupées dans un endroit facile d'accès ; résultat, les ingénieurs consacrent beaucoup de temps « à la pêche aux infos » ;
- Difficulté de localisation et de coordination d'un technicien local assez qualifié et proche du navire pour intervenir rapidement en personne.

Principes de conception

Ces besoins étant identifiés, ABB a mis au point un nouveau prototype de portail de coordination des services et des flottes maritimes avec des techniques modernes

Le diagnostic rapide et la résolution efficace des pannes client sont la priorité des ingénieurs support ABB.

5 Outil analytique



L'outil *Analytics* → 5 est un espace de travail personnalisable qui permet d'agencer l'information à l'écran en fonction de ses préférences ou habitudes (ajout ou suppression de données, annotations), mais aussi de collaborer avec d'autres compétences à distance pour être épaulé dans la résolution de cas particuliers. Le volet analytique est un moyen de creuser l'information en appariant les formes et en marquant les données pour trouver des similitudes et des relations entre signaux importants. Cela permet d'affiner les comparaisons pour éclairer la prise de décisions.

Tous bénéfécies

Ce prototype procure aux ingénieurs support une vision globale et intuitive de l'état des navires dont ils ont la charge. L'accès à la bonne information, dans un format facilement compréhensible, leur permet de cerner la situation du navire en difficulté, d'être secondés par des experts et de gagner ainsi en réactivité et en efficacité.

Horizon dégagé

La solution ABB met une information pertinente, intuitive et facilement assimilable à la disposition des ingénieurs support pour mieux décider en connaissance de cause. C'est là une nouvelle illustration de l'engagement ABB dans la réalisation et l'offre de solutions et de services haut de gamme dédiés à ses grands domaines d'activité et processus métier.

Maria Ralph

Veronika Domova

Petra Björndal

Elina Vartiainen

Goranka Zoric

ABB Corporate Research

Västerås (Suède)

maria.ralph@se.abb.com

veronika.domova@se.abb.com

petra.bjorndal@se.abb.com

elina.vartiainen@se.abb.com

goranka.zoric@se.abb.com

Richard Windischhofer

ABB Marine and Ports

Billingstad (Norvège)

richard.windischhofer@fi.abb.com

Christopher Ganz

ABB Group Technology Management

Zurich (Suisse)

christopher.ganz@ch.abb.com

Bibliographie

- [1] Schwab, K., *The Fourth Industrial Revolution : what it means, how to respond*, disponible en ligne sur : <https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond/>, 14 janvier 2016.
- [2] Zuboff, S., *In the Age of the Smart Machine : The Future of Work and Power*, Basic Books, New-York, 1988.



Automation & Power World 2017

Connect. Collaborate. Outperform.

13–16 mars 2017 | George R. Brown Convention Center | Houston (États-Unis)
Un rendez-vous à ne pas manquer.

Rejoignez des milliers d'industriels au salon international ABB consacré à l'innovation et à la formation aux technologies de l'énergie et de l'automatisation.
Inscription gratuite pour les clients ABB et les professionnels.
Renseignez-vous sur www.abb.com/apw.

Connect. Collaborate. Outperform.

En mars 2017, le monde de l'automatisation et de l'énergie tient salon à Houston (Texas, États-Unis)

STEPHANIE JONES – Depuis 2009, *ABB Automation & Power World* est le rendez-vous par excellence des professionnels de l'énergie, de l'automatisation industrielle, des transports et des infrastructures en Amérique du Nord. L'édition 2017 aura lieu du 13 au 16 mars, au *George R. Brown Convention Center*, à Houston.

Automatization & Power World (APW) est pour ses milliers de visiteurs l'occasion de se former, de rencontrer d'autres professionnels et de découvrir en avant-première toute l'offre technologique ABB regroupée sur un seul site → 1. Quatre jours durant, des experts du Groupe, des grands noms de l'industrie ainsi que des partenaires techniques et commerciaux viendront échanger et débattre des recettes du succès dans un monde en perpétuel mouvement.

Les participants peuvent d'ores et déjà créer leur parcours de visite en choisissant parmi des centaines d'ateliers, d'interventions de personnalités de l'industrie, de conférences et de formations pratiques sur des sujets ciblés, animés par des experts, des utilisateurs et des hommes de métier.

L'espace *Technology & Solution Center* abritera le plus vaste portefeuille de produits, solutions et services ABB en Amérique du Nord. Les visiteurs auront directement accès aux dernières innovations, tant matérielles que logicielles, dans les domaines de l'énergie et de l'automatisation. Mieux, des experts ABB seront là pour informer, expliquer, répondre aux questions, partager connaissances et savoir-faire.

Ce rendez-vous sera aussi l'occasion de nouer de précieux contacts. Des tables rondes aux sessions plénières sur des thématiques industrielles pointues, en passant par des séances quotidiennes de réseautage, les participants pourront débattre avec les spécialistes de leur domaine et des homologues d'autres secteurs confrontés aux mêmes enjeux pour témoigner de leurs expériences.

1 Le *Technology & Solution Center* vous invite à découvrir la plus vaste panoplie de technologies ABB.



APW est un événement incontournable, qui plus est gratuit pour les clients ABB et autres professionnels de l'industrie. Ne manquez pas ce temps fort de l'automatisation et de l'énergie, du 13 au 16 mars 2017!

Inscription, programme et infos pratiques sur <http://new.abb.com/apw>.

Stephanie Jones
ABB Inc.
Houston (Texas, États-Unis)
stephanie.m.jones@us.abb.com



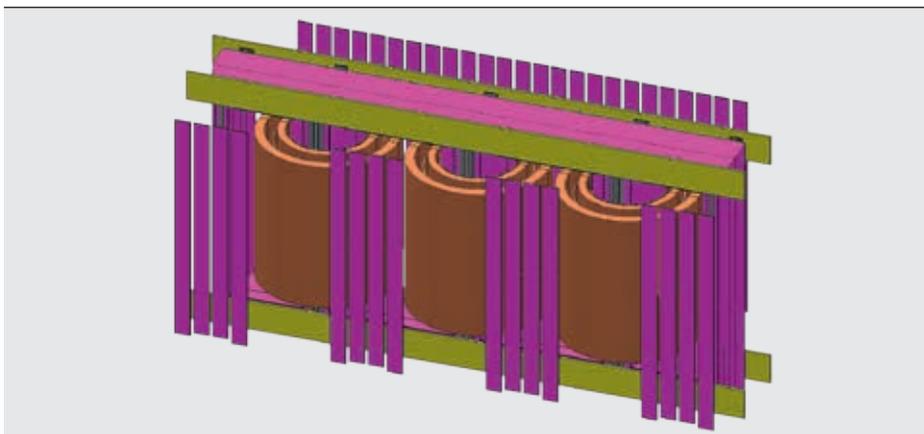
Pertes & profits

Prédire les pertes parasites supplémentaires et optimiser le blindage de la cuve des transformateurs de puissance avec la simulation par éléments finis

JANUSZ DUC, BERTRAND POULIN, MIGUEL AGUIRRE, PEDRO GUTIERREZ – Optimiser le blindage de la cuve d'un transformateur de puissance est un aspect délicat de la conception de l'appareil; cela suppose en effet de réduire les pertes parasites engendrées dans les parties métalliques exposées aux champs magnétiques. À l'heure actuelle, des méthodes de simulation permettent d'explorer des conceptions originales, inenvisageables autrement. C'est le cas notamment du calcul par éléments finis (EF) des pertes et de la distribution de température, qui a servi à étudier plusieurs configurations de blindage du transformateur. La simulation numérique ne se contente pas de réduire les coûts et le temps passé sur chaque unité; elle améliore la compréhension des processus physiques à l'œuvre. En outre, les résultats fournis par les simulations 3D sont très proches des valeurs mesurées. Grâce à cette expérience, ABB a pu à la fois renforcer la confiance dans la méthode des éléments finis (MEF) et la transposer aux futures générations d'appareils.

La méthode des éléments finis (MEF) est un puissant outil très utilisé pour résoudre les problèmes de conception.

1 Modélisation du transformateur, sans les parois de la cuve



Le transformateur de puissance est un élément central du système électrique [1]. Sa fiabilité opérationnelle et son rendement ont un impact économique considérable sur les réseaux de transport et de distribution [2], ce qui explique l'ampleur des efforts déployés pour en optimiser la conception [3].

Dans un transformateur, améliorer le rendement revient souvent à réduire les pertes. Les pertes dues à la charge apparaissent dans les conducteurs et les pièces magnétiques. Les enroulements et les jeux de barres sont le siège de pertes par résistance et par courants de Foucault ; les structures métalliques exposées aux champs magnétiques (cuve, bridage du noyau, etc.) engendrent des pertes supplémentaires [4].

La procédure décrite dans cet article est couramment utilisée par les ingénieurs ABB pour la fabrication de grands transformateurs de puissance immergés.

La MEF est une méthode efficace pour trouver des solutions pratiques. Des essais sur des dizaines de transformateurs de petite, moyenne et grande puissance ABB dans le monde entier fournissent des valeurs statistiques qui permettent de déterminer les paramètres de simulation. À partir de mesures en labo-

ratoire, les chercheurs d'ABB ont constitué une bibliothèque de matériaux dédiée à ces calculs. Par rapport aux autres outils et méthodes analytiques de calcul

des pertes supplémentaires, la MEF est celle qui offre la plus grande précision.

Calculs par éléments finis

La MEF est un puissant outil pour résoudre les problèmes de conception. Largement utilisée aussi bien pour développer un nouveau produit que pour le perfectionner, elle permet de vérifier la proposition des concepteurs et de l'adapter aux spécifications client [5]. Elle repose sur la création d'un modèle discrétisé de l'appareil, assorti des propriétés de matériaux adéquates.

Les logiciels de simulation peuvent résoudre les problèmes élémentaires de répartition du champ électromagnétique à l'aide d'équations de Maxwell dans un domaine fini de l'espace, borné par des conditions aux limites appropriées. Les simulations décrites ci-après ont été réalisées avec un logiciel de calcul par EF du commerce.

Effet de peau

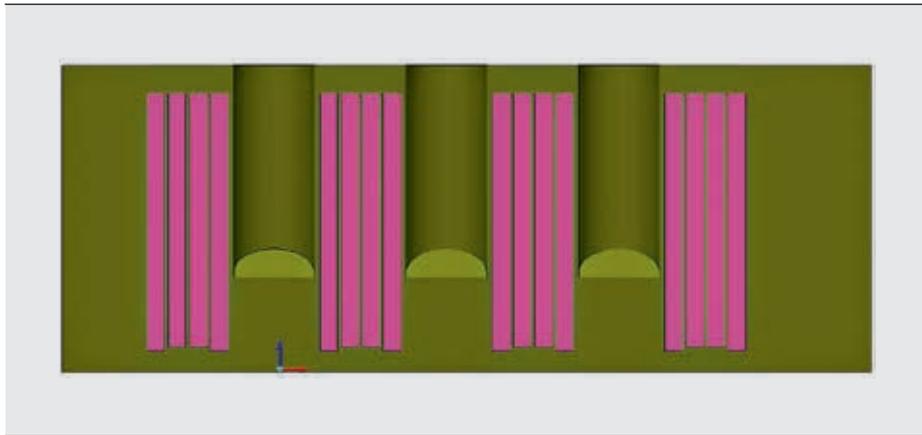
L'épaisseur des tôles d'acier dépasse de loin la capacité de pénétration du champ magnétique. Afin de représenter correctement dans un modèle numérique la

La MEF oblige à créer un modèle discrétisé de l'appareil, incluant les propriétés de matériaux adéquates.

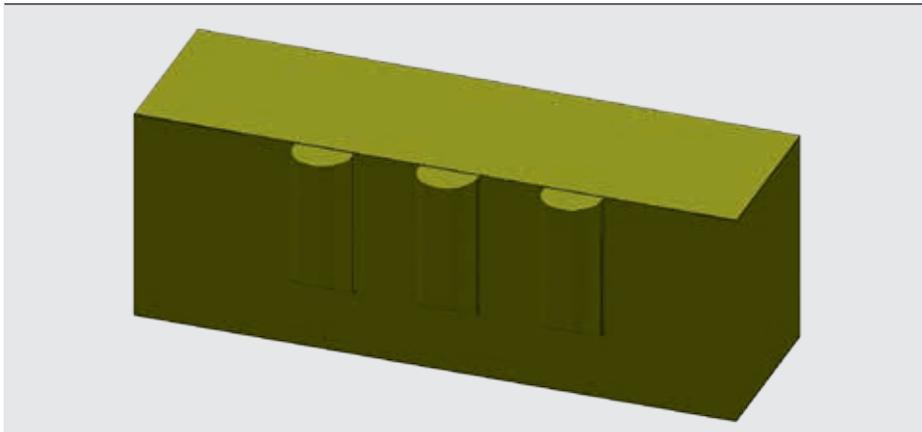
Photo p. 51

Transformateur de 502 MVA complètement achevé et assemblé (cuve, traversées, conservateur d'huile et système de refroidissement), à l'essai dans l'usine ABB de Cordoue (Espagne).

faible pénétration du champ magnétique, il faut utiliser un nombre impressionnant de petits éléments à proximité de la surface de chaque composant constitué



La méthode *SIBC* (*Surface Impedance Boundary Conditions*) permet de calculer les pertes supplémentaires d'un transformateur avec bien moins d'éléments finis.



de matériau magnétique : une charge de calcul bien supérieure à la puissance des ordinateurs actuels !

De nombreux logiciels de calcul par EF ont la solution. En première approximation, on considère que tous les courants de Foucault, et donc les pertes, se produisent au voisinage de la surface des matériaux magnétiques conducteurs. Le phénomène peut alors être traité comme une condition aux limites plutôt qu'un calcul de volume.

Conditions aux limites de l'impédance de surface

La méthode *SIBC* (*Surface Impedance Boundary Conditions*) est un cas particulier de conditions aux limites approchées, appliquée aux grandeurs électromagnétiques à l'interface conducteur-isolant. Elle permet de calculer les pertes supplémentaires d'un transformateur à l'aide d'un nombre bien plus petit d'éléments finis [6].

Cette méthode fut appliquée aux éléments magnétiques et conducteurs du transformateur (jonctions, cuve et brides de serrage).

Simulations électromagnétiques

Dans le cadre de cette étude, on utilisa un autotransformateur ABB triphasé MVA de 380/110/13,8 kV, ainsi qu'un modèle de simulation 3D simplifié, se résumant aux principaux éléments constitutifs du transformateur : noyau, enroulements, jonctions, bridage, cuve et blindage magnétique sur les parois haute tension (HT) et basse tension (BT) → 1.

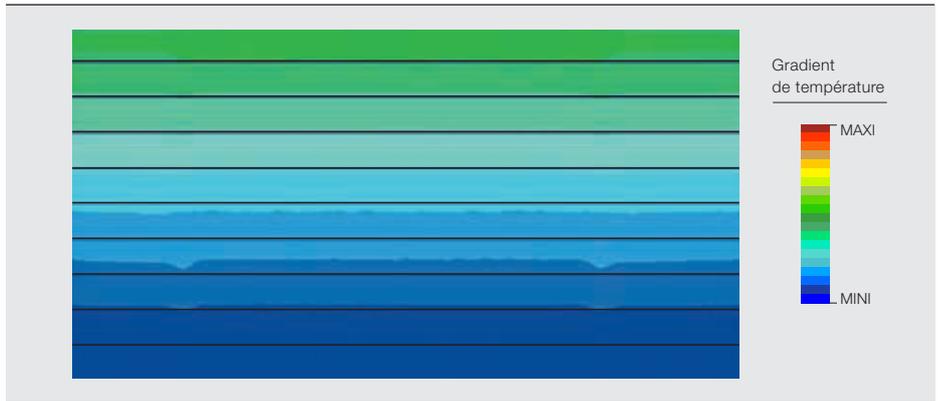
Blindage magnétique

À pleine charge, les enroulements de transformateur sont sources d'importants flux et pertes parasites, responsables de l'échauffement des pièces métalliques. Pour les éviter, les parois de la cuve sont équipées de shunts magnétiques → 2, éléments en acier feuilleté ferromagnétique qui canalisent le flux émanant de l'extrémité des enroulements et font blindage.

Dans notre cas, la paroi HT de la cuve présente trois bossages → 3 pour recevoir les trois traversées HT. On ne s'intéresse ici qu'à l'optimisation des shunts de la paroi HT car aucun point chaud n'est détecté côté BT → 4.

Le projet mit en œuvre des simulations magnéto-thermiques couplées, très utiles pour l'analyse des machines électriques de type moteur et transformateur.

4 Distribution de la température le long de la paroi BT du transformateur (conception initiale)



5 Pertes supplémentaires dans le modèle initial du transformateur étudié

Élément	Pertes relatives (%)
Circuit magnétique	41,1
Brides	19,1
Plaques de jonction	4,2
Cuve (paroi HT)	25,6 (16,2)
Shunts	10
Total	100

Calcul des pertes supplémentaires

Les premiers calculs se basent sur la conception initiale du blindage → 2, à la seule fréquence de 60 Hz. Le tableau → 5 récapitule les pourcentages de répartition des pertes supplémentaires. Les pertes survenant dans la paroi HT de la cuve représentent environ 16% des pertes supplémentaires totales dans les éléments de construction du modèle étudié.

Calcul de la distribution de température

Le projet met en œuvre des simulations magnétothermiques couplées, très utiles pour l'analyse des machines électriques de type moteur et transformateur.

Pour évaluer la température des composants, il faut bien définir les coefficients de transfert thermique par convection entre ces derniers et leur environnement, et ce pour chaque surface d'intérêt du modèle. La simulation s'appuie sur les hypothèses suivantes : distribution linéaire

de la température de l'huile le long des parois internes de la cuve (la valeur mini correspondant à la température de l'huile

Dans la conception initiale, c'est au niveau des bossages de la paroi HT que sont observées les températures les plus élevées.

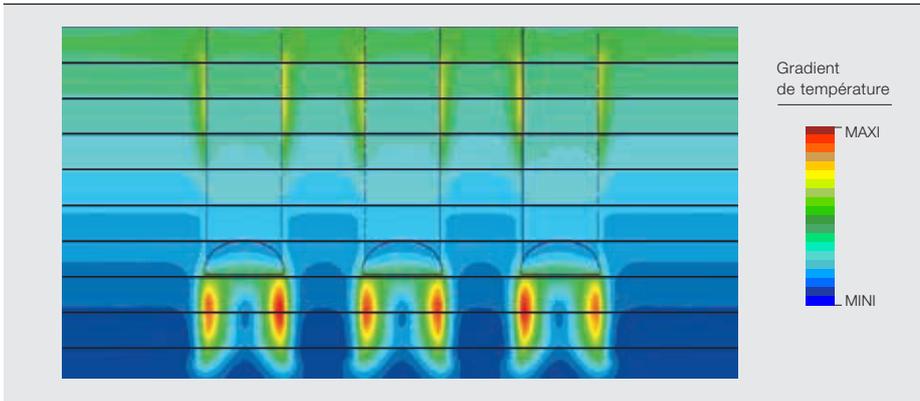
en partie inférieure, et la valeur maxi, à celle en partie supérieure), et température de l'air constante et uniformément répartie sur toute la hauteur de la cuve.

Dans la conception initiale → 6, c'est en dessous des bossages de la paroi HT que sont observées les températures les plus élevées ; l'échauffement dépassant le seuil admissible, ces zones doivent être blindées. Par contre, les valeurs maximales de distribution de la température pour la paroi BT restent acceptables → 4.

Optimisation du blindage magnétique

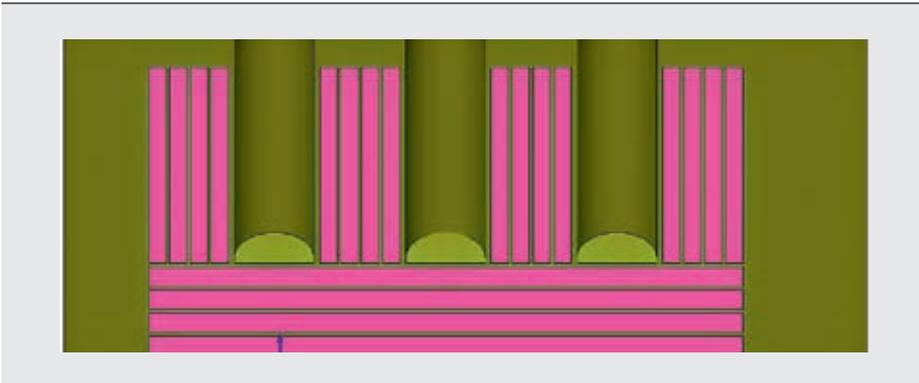
Cette tâche fut confiée à des ingénieurs expérimentés qui calculèrent plusieurs

6 Distribution de la température le long de la paroi HT du transformateur (conception initiale)



Les pertes supplémentaires totales ont diminué de 11,3 % et les pertes dans les shunts, de l'ordre de 24 %.

7 Blindage magnétique de la cuve côté HT dans la conception optimisée du transformateur



8 Pertes supplémentaires dans le modèle optimisé du transformateur étudié

Élément	Pertes relatives (%)
Circuit magnétique	41,2
Brides	18,9
Plaques de jonction	3,6
Cuve (paroi HT)	17,4 (7,8)
Shunts	7,6
Total	88,7

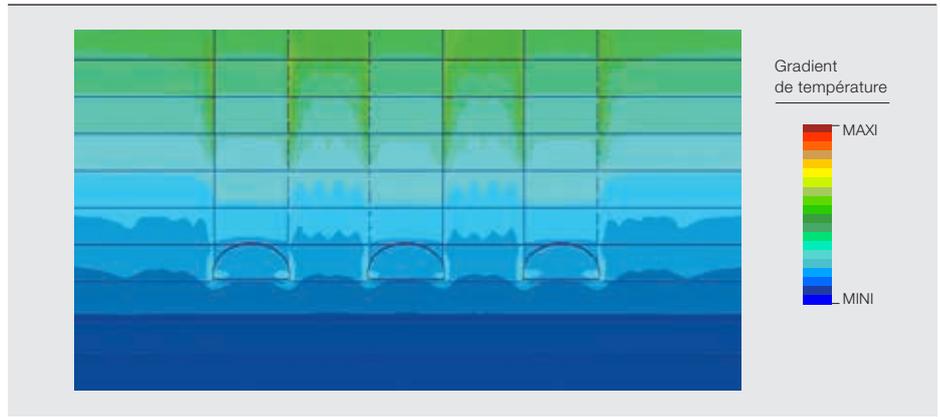
dispositions de shunts afin de trouver la configuration offrant la meilleure protection avec le moins de pertes : les shunts

L'essai d'échauffement a confirmé les températures de cuve prédites par l'analyse 3D.

verticaux furent raccourcis, et des shunts horizontaux ajoutés pour protéger les zones présumées de points chauds → 7.

Le tableau → 8 présente les résultats obtenus pour la version optimisée, par rapport aux 100 % de pertes supplémentaires totales de la conception initiale → 5 : ces pertes ont diminué de 11,3 %, la plus forte baisse étant observée au niveau de la paroi HT (52 %), et les pertes dans les shunts ont chuté d'environ 24 %. Ces modifications sont donc un important facteur de réduction de la température dans la cuve du transformateur. À noter que les températures les plus hautes sont localisées sur les montants des bossages, en partie supérieure de la cuve, et que les points chauds ont disparu → 9.

La simulation électromagnétique est un précieux auxiliaire de développement et de conception des transformateurs de puissance.



Bilan

Lors de la recette définitive, les pertes en charge ne s'écartèrent pas de plus de 1 % des valeurs estimées par la simulation ABB; les pertes supplémentaires finales (écart entre les pertes en charge mesurées et les pertes dans les enroulements estimées), quant à elles, dépassèrent de 5 % celles calculées par MEF.

L'essai d'échauffement confirma les prédictions de l'analyse 3D concernant la température de la cuve; il ne donna lieu à aucun dégagement gazeux dans l'huile, attestant l'absence de surchauffe localisée, à l'intérieur de la cuve.

Simulation toute puissante

La simulation électromagnétique est un précieux auxiliaire de conception et de développement des transformateurs de puissance. Les logiciels de calcul par EF, associés aux modèles numériques adéquats, ont permis de comparer plusieurs solutions de blindage et de prédire les pertes supplémentaires avec précision, dans les marges de l'incertitude de mesure.

La méthode utilisée pour optimiser les shunts de la cuve est pratique, peu coûteuse et facile à mettre en œuvre.

L'analyse magnétothermique couplée fournit des informations importantes sur le comportement électro-magnéto-thermique des transformateurs.

Il est fort probable qu'un ingénieur d'études n'aurait jamais osé une telle configuration de blindage sans avoir pu tirer parti des enseignements de la simulation 3D. Cette approche a plus d'un atout: elle permet non seulement de simuler différentes solutions mais aussi

d'améliorer la conception de l'appareil en réduisant les pertes supplémentaires et en augmentant le rendement.

Janusz Duc

ABB Corporate Research
Cracovie (Pologne)
janusz.duc@pl.abb.com

Bertrand Poulin

ABB Transformers
Varenes (Québec, Canada)
bertrand.f.poulin@ca.abb.com

Miguel Aguirre

Pedro Gutierrez
ABB Transformers
Cordoue (Espagne)
miguel.aguirre@es.abb.com
pedro-antonio.gutierrez@es.abb.com

Bibliographie

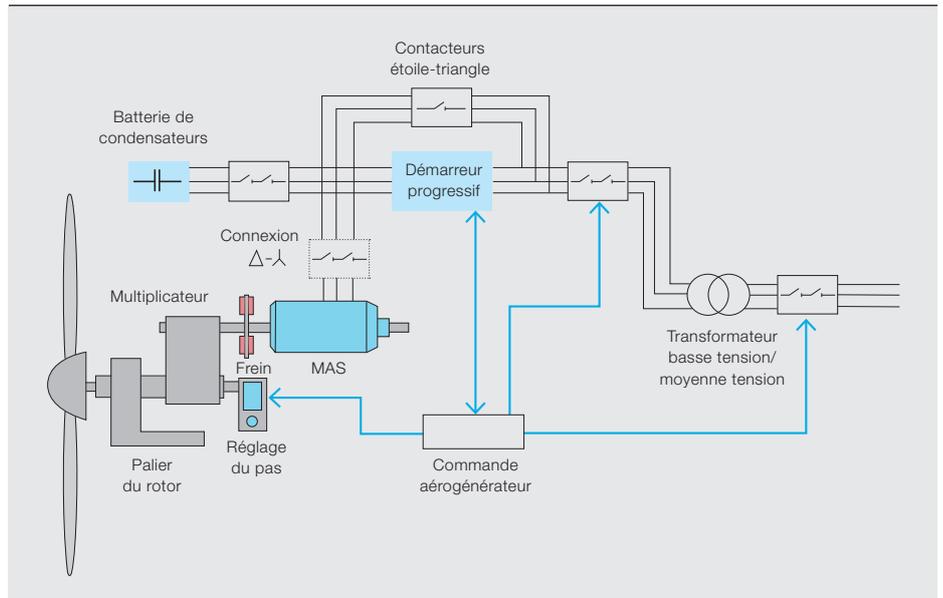
- [1] Magdaleno-Adame, S., *et al.*, « Hot spots mitigation on tank wall of a power transformer using electromagnetic shields », *actes International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, p. 2235–2238, 2014.
- [2] Turowski, J., *Zjawiska elektrodynamiczne w ciałach ferromagnetycznych, Elektrodyynamika techniczna*, 3^e édition, Varsovie (Pologne), p. 375, 2014.
- [3] Takahashi, N., *et al.*, « Optimal design of tank shield model of transformer », *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 36, n° 4, p. 1089–1093, 2000.
- [4] Szary, D., *et al.*, « Copie conforme: simulation électromagnétique des transformateurs », *ABB review*, 3/13, p. 39–43.
- [5] Preis, K., *et al.*, « Thermal-electromagnetic coupling in the finite-element simulation of power transformer », *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, n° 4, p. 999–1002, 2006.
- [6] Higuchi, Y., Koizumi, M., « Integral equation method with surface impedance model for 3D eddy current analysis in transformers », *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 36, n° 4, p. 774–779, 2000.



Des éoliennes mieux protégées

Stratégies de commutation et de protection basse tension

ANTONIO FIDIGATTI, PAOLO BARONCELLI, MARCO CARMINATI, ENRICO RAGAINI – Il existe différentes architectures de systèmes éoliens, ou « aérogénérateurs », dont le comportement électrique, propre à chacune, oblige à adopter des méthodes de commutation et de protection spécifiques. Cet article passe en revue les trois technologies d'aérogénérateurs les plus utilisées et les paramètres déterminants dans le choix des composants de commutation et de protection.



Le parc éolien mondial compte aujourd'hui plus de 150 000 aérogénérateurs, dont plus de 90 % produisent à basse tension (≤ 1000 V).

Enjeux de la protection et du contrôle-commande

Les protections et commandes électriques indispensables pour sécuriser le fonctionnement de ces moulins à vent des temps modernes doivent remplir des exigences contradictoires : rendement de conversion, continuité de production, déconnexion sur défaut, tenue aux conditions climatiques et aux sollicitations mécaniques, compacité et nécessité de limiter les conséquences des défauts dans l'espace exigu de la nacelle.

Rendement de conversion

Le vent pouvant changer brutalement de direction et de force, voire tomber complètement, la chaîne de conversion électromécanique doit être capable de s'adapter rapidement aux variations brusques de la production. Ces aléas obligent à manœuvrer fréquemment des actionneurs

(pour régler le pas d'orientation des pales, par exemple) qui multiplie à leur tour les connexions et déconnexions du circuit d'alimentation, au risque de provoquer la surchauffe des composants.

Continuité de production

Cette exigence, indissociable d'une fiabilité élevée sur toute la durée opérationnelle de l'éolienne, est d'autant plus forte que toute intervention physique sur la structure est difficile. Une bonne stratégie consiste ici à limiter l'usage des composants à leur mission première (protection pour les disjoncteurs, commutation pour les contacteurs, etc.) plutôt que de leur ajouter des fonctions secondaires. Autre impératif : des tolérances généreuses.

Déconnexion sur défaut

La nécessité de garantir un comportement linéaire même en cas de perturbations sur le réseau a donné lieu à la définition de règles de raccordement, ou « code réseau », obligatoires. Dans bien des cas, la gestion du flux de puissance réactive, en régime normal ou perturbé, impose un grand nombre de manœuvres aux dispositifs de connexion des batteries de condensateurs et des filtres.

Tenue climatique et mécanique

Une éolienne subit de fortes contraintes climatiques et mécaniques : vibrations de plusieurs millimètres d'amplitude, températures chutant en dessous de -25 °C lorsque chauffage et dégivrage sont arrêtés en période d'inactivité, ou grim pant à $+50$ °C quand les dissipateurs thermiques fonctionnent en surcharge.

Les protections doivent fonctionner dans un grand nombre de conditions électriques tout en distinguant correctement et rapidement les situations normales des situations de défaut.

Le vieillissement de la structure soumise à cet environnement de même que la fréquence des manœuvres, la salinité, l'humidité, la pollution, etc., sont autant de paramètres à intégrer dans les calculs de durée de vie.

Compacité

Les exigences de compacité et de légèreté, compte tenu de l'exiguïté de la nacelle, et le besoin de minimiser les efforts mécaniques sur la structure sont d'autres facteurs qui poussent au compromis entre le gain de place et le surdimensionnement de l'équipement néces-

Photo p. 57

Il n'y a pas d'aérogénérateur sans dispositifs de commutation et de protection. Comment la conception de la machine influence-t-elle sur le choix de ces composants ?

2 Caractéristiques des composants de commutation et de protection d'une MAS à vitesse fixe

	Circuit principal	Circuit auxiliaire
Courant de charge (A)	≤ 1800	≤ 320
Tension (V)	≤ 690	≤ 690
Fréquence (Hz)	50-60	50-60
Courant présumé de court-circuit (kA)	≤ 35 à 690 V	
Classe de charge suivant [2]	Résistive	Inductive, MAS ou transformateur
Appel de courant au démarrage	Non	Oui
Durée de vie (années)	20	20
Nbre de manœuvres mécaniques avec isolement électrique des sources de tension (maintenance ou hors service)	100-1 000	< 1 000
Nbre de manœuvres mécaniques de connexion/déconnexion génératrice-réseau ou de reconfiguration (ou de manœuvres électriques à faible courant)	10 000-100 000	-
Nombre de manœuvres électriques	< 100 (déclenchements ou arrêts d'urgence)	< 100 (déclenchements ou arrêts d'urgence)
Protection contre les surcharges et les courts-circuits	Oui	Oui
Optimum	Disjoncteur + contacteur	Disjoncteur

Une bonne stratégie est de s'en tenir à l'usage premier des composants plutôt que de leur ajouter des fonctionnalités secondaires.

saire pour garantir un rendement élevé et la continuité de service.

Défauts dans la nacelle

Ces défauts sont problématiques: le système de commande et de protection, au-delà de son rôle de prévention et de limitation des conséquences désastreuses de ces défauts dans un espace restreint, doit garantir que les transitoires électriques n'endommagent pas la mécanique, qui représente près de 80 % du coût de l'aérogénérateur. D'où plusieurs exigences parfois antagoniques :

- Éviter les déclenchements intempestifs mais aussi les surtensions dangereuses ;
- Fonctionner à haute vitesse pour réduire l'effort et la fatigue mécanique sur la transmission, ainsi que le risque d'incendie ;
- Détecter la petite contribution de la génératrice au courant de court-circuit ;
- Identifier correctement les lignes d'alimentation en défaut sur les circuits auxiliaires après un défaut électrique non critique afin d'accroître la disponibilité de production ;
- Limiter l'énergie de défaut (et disjoncter rapidement à faible courant) pour protéger les composants fragiles comme le système de bagues et balais ;
- Isoler et sécuriser les parties défectueuses ;
- Isoler et mettre le système en sécurité durant les opérations de maintenance, tout en alimentant les auxiliaires.

Les composants de commande et de protection doivent donc avoir quatre caractéristiques fondamentales, par ordre d'importance :

- Grande fiabilité de manœuvre ;
- Maintenance réduite ;
- Compacité et légèreté ;
- Coût.

Or ces exigences sont souvent incompatibles et obligent à faire des arbitrages en matière de protection et de commutation. L'optimum repose sur trois grandes technologies d'aérogénérateurs :

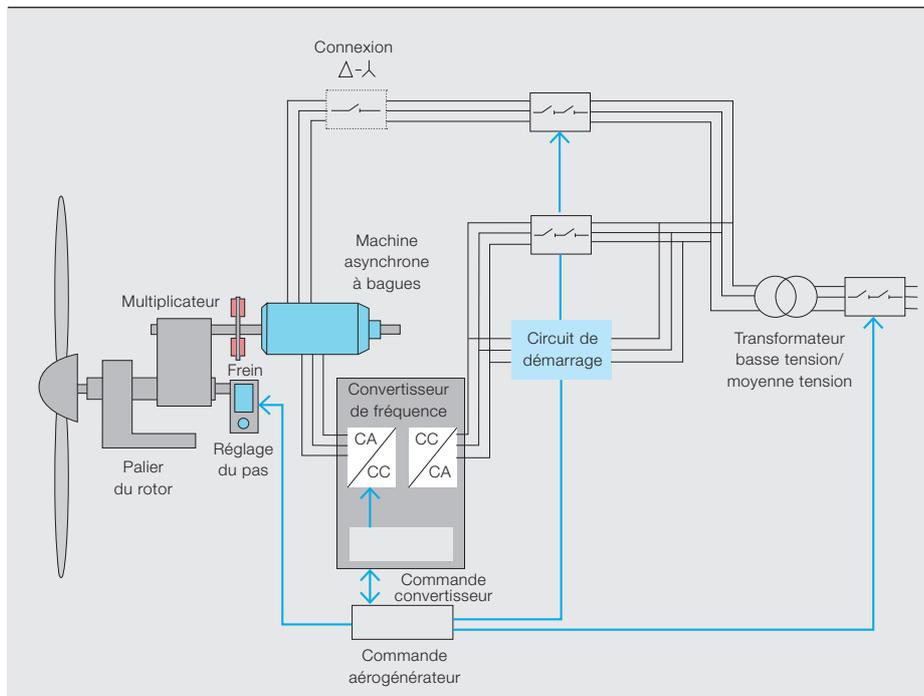
- La machine asynchrone (MAS) à vitesse fixe, directement couplée au réseau → 1 ;
- La machine asynchrone à rotor excité à fréquence variable ou « double alimentation » (MADA), directement connectée au réseau → 3 ;
- La machine synchrone ou asynchrone à aimants permanents (MAP), interfacée au réseau par un convertisseur de fréquence dimensionné à 100 % de la puissance nominale → 5.

Solution asynchrone à vitesse fixe

Cette configuration de MAS sans balais, couplée au réseau, ne permet que de très faibles écarts de la vitesse de synchronisme. La puissance réactive est fournie par des batteries de condensateurs, fréquemment commutées [1]. Les phases de démarrage de la génératrice sont gérées par un démarreur progressif doté de contacteurs en parallèle, qui ne se ferment que lorsque le régime établi est atteint. La connexion étoile-triangle

Le vieillissement de la structure de même que la fréquence des manœuvres, la salinité, l'humidité, la pollution, etc., doivent être pris en compte dans les calculs de durée de vie.

3 Système aérogénérateur basé sur la machine asynchrone à double alimentation MADA



aux enroulements de la génératrice est la norme pour la bonne gestion des différents régimes de vent. On peut également multiplier le nombre de pôles pour étendre la plage de fonctionnement → 2. Cette configuration électrique a l'avantage d'être simple et très efficace, mais elle comporte aussi des inconvénients :

- La plage de vitesse de production, réduite, est inadaptée aux gisements de vent variable ;
- La tenue à une condition de surcharge de longue durée impose de surdimensionner les composants du circuit principal ;
- La commande par gradins des contacteurs sur les condensateurs peut engendrer des surtensions ; très souvent, l'interaction avec le démarreur progressif pose problème ;
- Le système est incapable de suivre les perturbations rapides du réseau sans déconnexion.

Résultat, cette configuration ne convient qu'aux aérogénérateurs de petite et moyenne puissance, installés sur un réseau accueillant une faible part de production éolienne (< 5%).

Solution asynchrone à double alimentation

On emploie ici une génératrice asynchrone à bagues dont le circuit rotorique est alimenté à fréquence variable → 3. Cette configuration autorise de plus grandes

variations de la vitesse de rotation que la MAS à vitesse fixe puisque la fréquence d'excitation du rotor permet de compenser les écarts de la vitesse de synchronisme [1]. En général, le circuit d'excitation, dans lequel le flux d'énergie peut être bidirectionnel (méthode européenne), est dimensionné à 20–30 % des caractéristiques nominales du circuit principal → 4. Le convertisseur régule la vitesse de la génératrice et le facteur de puissance, ce qui permet d'étendre la plage de vitesse pour la production de courant et d'injecter du réactif pour soutenir le réseau. Dans certains cas, la connexion étoile-triangle à la génératrice sert à bien gérer les différents régimes de vent avec des valeurs de courant de rotor optimisées au regard de la durée de vie du système bagues-balais.

Les avantages sur la solution à vitesse fixe sont multiples :

- La vitesse variable augmente la production en kilowattheures ;
- L'utilisation d'un petit convertisseur, dimensionné à un tiers de la puis-

sance nominale, permet de fournir du réactif au réseau en conditions normales et anormales avec un bon réglage de la tension et du facteur de puissance ;

- Le rendement de conversion total est élevé.

Le système de contrôle-commande et de protection doit garantir que les transitoires électriques n'endommagent pas la mécanique, qui représente environ 80 % du coût de l'aérogénérateur.

En contrepartie,

- le couplage direct génératrice-réseau transmet les perturbations du réseau à la chaîne électromécanique, réduisant la capacité du système à rester connecté ;
- le rotor à bagues et balais nécessite beaucoup d'entretien, ce qui en fait le maillon faible du système.

Vitesse variable et convertisseur complet

Dans cette configuration → 5, la vitesse de rotation peut varier sur une large plage

4 Caractéristiques des composants de commutation et de protection d'une MADA

	Circuit principal	Circuit d'excitation	Circuit de démarrage
Courant de charge (A)	≤ 4 000	≤ 630	≤ 5
Tension (V)	≤ 1 000	≤ 690	≤ 690
Fréquence (Hz)	50-60	50-60	50-60
Courant présumé de court-circuit (kA)	≤ 30 à 1 000 V	≤ 50 à 690 V	≤ 50 à 690 V
Classe de charge suivant [2]	Résistive	MAS	MAS
Appel de courant au démarrage	Non	Non	Oui
Durée de vie (années)	20	20	20
Nbre de manœuvres mécaniques (ou électriques à faible courant) avec isolement électrique des sources de tension (maintenance ou hors service)	100-1 000	< 1 000	-
Nbre de manœuvres mécaniques de connexion/déconnexion génératrice-réseau ou de reconfiguration (ou de manœuvres électriques à faible courant) avec isolement électrique des sources de tension	10 000-100 000	1 000-10 000	-
Nombre de manœuvres électriques	< 100 (déclenchements ou arrêts d'urgence)	< 100 (déclenchements ou arrêts d'urgence)	< 10 000 (insertion du circuit d'excitation)
Protection contre les surcharges et les courts-circuits	Oui	Oui	Oui
Optimum	Moins de 1 manœuvre/jour : disjoncteur ; plus de 1 manœuvre/jour : disjoncteur + contacteur *	Disjoncteur coordonné avec contacteur en parallèle avec le circuit de démarrage	Disjoncteur + contacteur

* Les aérogénérateurs tournant plus souvent dans la plage de vitesse basse que dans la plage nominale, les commutations sont fréquentes (2 000 à 5 000 cycles/an, selon le type de machine) et font des contacteurs la meilleure solution technique.

puisque les variations de fréquence sont compensées par un convertisseur interposé entre la génératrice et le réseau [1]. Lorsque le convertisseur est dimensionné pour la pleine puissance convertie, il découple la génératrice et le système électromécanique du réseau → 6 : toute la puissance produite passe dans le réseau par le biais du convertisseur. Celui-ci régule également la vitesse et le couple de la génératrice, selon trois modes, haute vitesse, moyenne vitesse et basse vitesse, chacun utilisant des solutions multiplicateur-génératrice différentes. Nombreux sont les atouts de la vitesse variable par rapport à la vitesse fixe :

- Absence de connexion électrique directe entre génératrice et réseau, ce qui réduit les chocs mécaniques sur la structure lors des défauts réseau et renforce la conformité au code réseau ;
- Fonctionnement sur toute la plage de vitesse pour accroître la production d'énergie annuelle ;
- Maîtrise de la puissance active et pleine production de puissance réactive.

Cette configuration emploie souvent des disjoncteurs, à de multiples fins :

- Découpler et isoler en toute sécurité, en fonctionnement normal ou en maintenance ;
- Protéger : lors d'un défaut impliquant le convertisseur ou les éléments situés entre la génératrice et le convertisseur

(câbles de raccordement, par exemple), le disjoncteur est le seul dispositif à même de détecter le court-circuit de manière sûre et de se déconnecter de la source de puissance. Il faut pour cela des déclencheurs spécialement conçus pour la fréquence variable et capables de fonctionner dans les conditions climatiques spécifiées ;

- Assurer la redondance de la déconnexion de la génératrice.

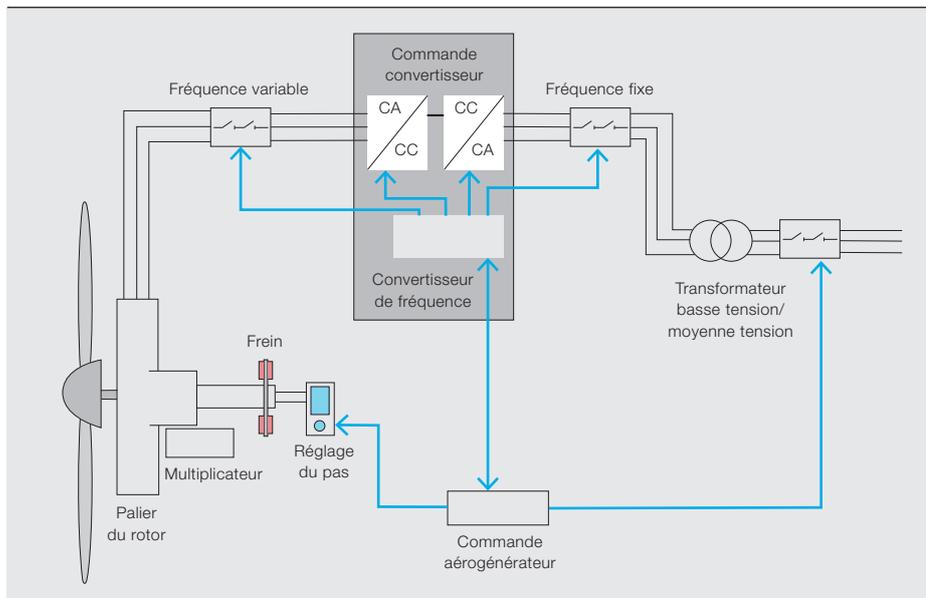
Vent nouveau

Choisir des composants de commutation et de protection adaptés à un système éolien donné est fondamental pour en stabiliser le fonctionnement et minimiser les conséquences des défauts.

La protection des aérogénérateurs et des autres systèmes de production d'énergie renouvelable fait l'objet d'intenses travaux de recherche-développement auxquels ABB prend activement part. Depuis quelques années, ABB propose une panoplie de solutions à fréquence variable qui protègent les centrales dans les domaines de l'éolien, du petit hydraulique, de l'énergie houlomotrice et de la traction électrique. Les disjoncteurs Tmax VF et Emax VF (1–200 Hz) en sont d'excellents exemples.

Il faut des équipements compacts, compte tenu de l'espace limité, et légers pour solliciter le moins possible la structure.

5 Système aérogénérateur basé sur la machine à fréquence variable avec convertisseur complet



6 Caractéristiques des composants de commutation et de protection d'une machine pilotée en vitesse variable

	Circuit principal, côté convertisseur	Circuit principal, côté réseau	Circuit auxiliaire
Courant de charge (A)	≤ 5 000 ou $n \times 700-1600$	≤ 5 000 ou $n \times 700-1600$	≤ 250
Tension (V)	≤ 1 000	≤ 690	≤ 690
Fréquence (Hz)	1-16, 30-80, 40-140	50-60	50-60
Courant présumé de court-circuit (kA)	≤ 15 à 1 000 V*	≤ 50 à 690 V	
Classe de charge suivant [2]	Résistive	Résistive	MAS
Appel de courant au démarrage	Non	Non	Oui
Durée de vie (années)	20	20	20
Nbre de manœuvres mécaniques (ou électriques à faible courant) avec isolement électrique des sources de tension (maintenance ou hors service)	100-1 000	< 1 000	< 1 000
Nbre de manœuvres mécaniques de connexion/déconnexion génératrice-réseau ou de reconfiguration (ou de manœuvres électriques à faible courant) avec isolement électrique des sources de tension	- (En général, la génératrice reste connectée au convertisseur.)	1 000-100 000 (selon stratégies de commande)	-
Nombre de manœuvres électriques	< 100 (déclenchements ou arrêts d'urgence)	< 100 (déclenchements ou arrêts d'urgence)	> 100 (déclenchements ou arrêts d'urgence)
Protection contre les surcharges et les courts-circuits	Oui	Oui	Oui
Optimum	Disjoncteur (si protection nécessaire des câbles de raccordement ou du commutateur d'onduleur). Interrupteur-sectionneur + protection externe présents	Moins de 1 manœuvre/jour: disjoncteur ; plus de 1 manœuvre/jour: disjoncteur + contacteur	Disjoncteur

* Selon la puissance et la configuration de l'installation

Les points forts de cette nouvelle gamme de disjoncteurs pour la fréquence variable sont les suivants :

- Compatibilité avec tous les types d'aérogénérateurs, même en sur-vitesse, grâce à une haute tension assignée (jusqu'à 1 000 V) ;
- Conception standardisée du tableau électrique, quel que soit le marché ciblé ;
- Gestion optimisée des stocks avec le double marquage CEI/UL.

Cette nouvelle famille de déclencheurs, associée à des capteurs de courant optimisés, garantit une protection de grande précision sur une plage de fréquence élargie. Elle bénéficie de contacts d'arc et de chambres de coupure évolués, à haut pouvoir d'interruption sur toute la plage de fréquence, dans un encombrement identique à celui des disjoncteurs classiques.

Les dispositifs de protection et de commutation ne cessent de progresser, notamment pour tirer parti de la puissance de l'Internet et du *Cloud*, et permettre une commande à distance optimale, partout et à tout moment.

Cet article est inspiré de la communication IEEE « Selection of low voltage switching and protection devices in wind power generators », Fidigatti, A., Baroncelli, P., Carminati, M., Ragaini, E., *IEEE Industry Applications Society (IAS) Annual Meeting*, Orlando (Floride, États-Unis), p. 1-5, 2011.

Antonio Fidigatti

Paolo Baroncelli

Marco Carminati

Enrico Ragaini

ABB Electrification Products

Bergame (Italie)

antonio.fidigatti@it.abb.com

paolo.baroncelli@it.abb.com

marco.carminati@it.abb.com

enrico.ragaini@it.abb.com

Bibliographie

[1] « Wind power plants », *ABB Technical Application Papers No. 13*, document n° 1SDC007112G0201, disponible en ligne sur le centre de téléchargement ABB : <http://www.abb.com/abblibrary/DownloadCenter/>

[2] Norme CEI 60947-1, *Appareillages à basse tension - Partie 1 : règles générales*, 2014.



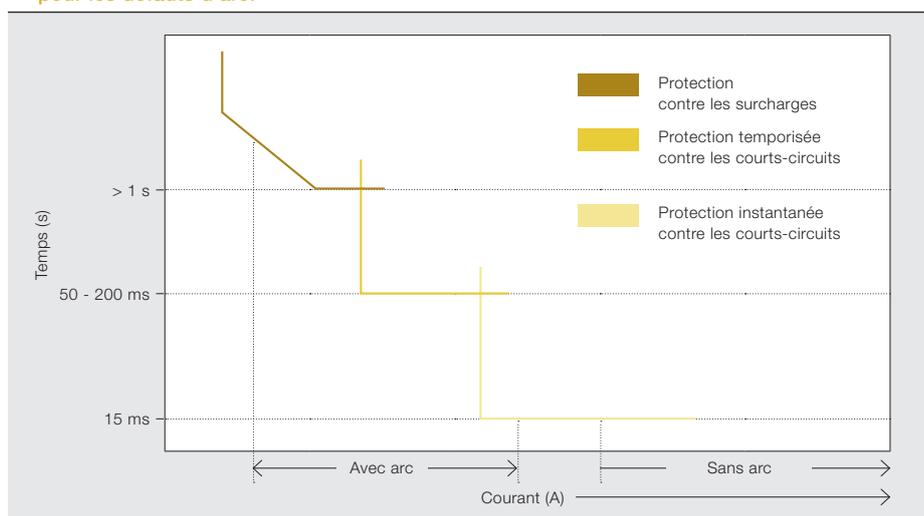
Protection suprême

Prévenir les amorçages d'arc pour améliorer la sécurité électrique

PAVLO TKACHENKO, ANDREAS VON LAKO – L'amorçage d'un arc compte parmi les plus graves incidents susceptibles de se produire dans une installation électrique. La température de la déflagration (20 000 °C), mais aussi l'énergie libérée et les éclats de matière projetés alentour peuvent entraîner des blessures, voire la mort, et des dommages matériels importants. Or les méthodes classiques de protection contre les courts-circuits sont trop lentes pour

remédier. Depuis plus de 35 ans, le dispositif de surveillance Arc Guard System™ d'ABB protège des défauts d'arc les personnes et les installations de 110–240 VCA/CC. Avec sa nouvelle version TVOC-2-48, Arc Guard est dorénavant disponible dans la plage de tension 24–48 VCC. Pour renforcer encore la sécurité, les armoires électriques ABB subissent des essais sévères de tenue à l'arc interne, comme le stipule le guide technique CEI 61641.

1 Les méthodes classiques de protection contre les courts-circuits sont beaucoup trop lentes pour les défauts d'arc.



Aussi rare soit-il, l'amorçage d'un arc est un événement extrêmement grave. Lorsqu'un défaut dans un matériel électrique génère un arc, ce dernier dégage de la chaleur et de la lumière. Dans la majorité des cas, il est imputable à une erreur humaine : matériaux conducteurs accidentellement laissés dans les appareillages lors de la fabrication, de l'installation ou de la maintenance ; défauts de matériau ou de qualification du personnel ; absence de mesures empêchant la pénétration de petits animaux (rongeurs, reptiles, etc.) ; utilisation d'un appareillage inadapté à l'application, qui provoque un échauffement et, à terme, un défaut d'arc interne ; conditions anormales d'emploi ; exploitation incorrecte ; manque de maintenance.

Le bruit d'un arc électrique est assourdissant : plus de 160 dB ! Or l'Agence américaine de santé et de sécurité au travail (OSHA) fixe le seuil admissible à 115 dB pendant 15 minutes maximum. En passant de l'état solide à l'état vapeur, le cuivre se dilate d'un facteur de 67 000:1, soit nettement plus que l'eau (40 000:1) à titre de comparaison. De même, les éclats et le métal en fusion projetés par l'arc peuvent atteindre la vitesse de 1600 km/h. Ce rayonnement énergétique intense à très hautes températures, de l'ordre de 20 000 °C, est capable de vaporiser les matériaux environnants. Il peut aussi être absorbé par les objets métalliques portés par les personnes situées à proximité, la chaleur extrême du métal causant alors de graves brûlures.

Pas moins de 65 % des accidents d'arc se produisant sur un appareillage d'interruption ont lieu pendant une intervention humaine.

Les victimes étant souvent classées par les établissements hospitaliers parmi les grands brûlés, il est difficile d'établir des statistiques propres aux dommages causés par les arcs. Il n'empêche : un seul défaut d'arc, c'est déjà un accident de trop !

Les méthodes habituelles de protection contre les courts-circuits ne sont pas adaptées aux conditions d'apparition d'un arc. Et pour cause : l'arc fait office de résistance qui limite les surintensités, entraînant par là même, dans bien des cas, un déclenchement bien trop tardif de la protection de charge → 1.

Arc Guard

Voilà bientôt 40 ans qu'ABB a développé le système Arc Guard pour parer au défaut d'arc et en limiter notablement les dégâts. Dès qu'il détecte un arc électrique, le dispositif ouvre le disjoncteur en amont de la zone en défaut, sectionnant

Arc Guard utilise des capteurs lumineux à fibre optique pour détecter le début de l'arc et envoyer un signal au mécanisme de déclenchement du disjoncteur.

rapidement l'appareillage. La nouvelle version TVOC-2-48 ajoute au régime de fonctionnement actuel en 110-240 VCA/CC la plage de tension 24-48 VCC.

Arc Guard est équipé de capteurs lumineux qui détectent le début d'amorçage et envoient directement un signal au déclencheur du disjoncteur. Il s'écoule à peine une milliseconde entre la détection de l'arc et l'envoi du signal de déclenchement ; avec un disjoncteur moderne,

Photo p. 63

Avec sa nouvelle version TVOC-2-48, Arc Guard System™ d'ABB étend la protection contre les défauts d'arc à la plage de tension 24-48 VCC. Le respect des exigences CEI 61641 améliore encore la sécurité des armoires électriques.



La nouvelle version TVOC-2-48 ajoute au régime de fonctionnement en 110–240 VCA/CC la plage de tension 24–48 VCC.

le temps total de réaction peut être inférieur à 50 ms.

La transmission se fait par fibre optique, choisie pour sa rapidité mais aussi pour son immunité électromagnétique, en particulier en cas de défaut électrique. Il est alors possible de moderniser le câblage existant sans se préoccuper des problèmes de diaphonie ou de sécurité liée à la conductivité électrique.

Un seul Arc Guard TVOC-2-48 peut intégrer de base jusqu'à 10 capteurs lumineux et être relié à deux extensions accueillant chacune 10 autres capteurs → 2; les trois unités ont la possibilité de partager les informations de détection de courant. Les capteurs sont étalonnés de manière à présenter la même sensibilité lumineuse. Leur positionnement n'a guère d'importance dans la mesure où leur lentille ultra-grand angle assure un vaste champ de vision. L'installation de l'ensemble est somme toute très facile.

Afin d'éviter les déclenchements intempestifs causés par le soleil ou le flash d'un appareil photo, le détecteur d'arc peut être associé à un capteur de courant qui ne déclenchera qu'en cas de surintensité.

Arc Guard garantit la sécurité du personnel même lorsque la porte de l'armoire est ouverte. Sa conception conforme au niveau d'intégrité de sécurité fonctionnelle SIL 2 en fait l'un des dispositifs de limitation d'arc les plus fiables du marché.

Certains assureurs recommandent l'emploi de ces appareils qui réduisent les coûts d'immobilisation et les dégâts, et en tiennent compte dans le calcul des primes d'assurance. Cette protection est aujourd'hui obligatoire dans de nom-

Depuis longtemps conscient du danger des accidents d'arc, ABB a développé Arc Guard il y a presque 40 ans.

breux pays. La directive européenne Basse Tension (BT), par exemple, impose de prendre des mesures pour éviter les dégâts causés par l'échauffement lié à l'amorçage d'arc.

Les normes à la rescousse

La série de normes CEI 61439 définit les règles et exigences en matière d'interface, de conditions d'exploitation, d'exécution, de performance et de vérification des ensembles d'appareillage BT. Le but est de garantir la sécurité en situations normales et anormales de fonctionnement (surtension, surcharge ou courants de court-circuit, par exemple). Par contre, ces normes sont muettes sur la présence d'un défaut d'arc dans l'ensemble d'appareillage.

La fibre optique fut choisie pour sa rapidité et son immunité électromagnétique, en particulier en cas de défaut électrique.

Les tableaux doivent pour cela se référer au guide CEI 61641 «pour l'essai en conditions d'arc dues à un défaut interne». S'agissant d'un rapport technique, et non d'une norme, l'essai en question n'a pas de caractère obligatoire. Il vérifie la protection des personnes et des installations suivant sept critères :

1) Pendant l'arc, les portes et capots correctement verrouillés ne s'ouvrent pas et restent en place, offrant un indice de protection minimal IP1X normalisé

ser le risque de blessures corporelles par brûlure directe.

4) Les indicateurs ne prennent pas feu (exception faite des indicateurs qui s'enflamment par brûlure de la peinture ou des étiquettes).

5) Le circuit de protection des parties accessibles de l'enveloppe reste efficace, conformément à la norme CEI 61439-2.

6) L'arc est confiné dans sa zone d'amorçage ; il ne se propage pas aux autres zones de l'ensemble. Les gaz chauds et les suies peuvent affecter les appareils voisins, tant qu'un simple nettoyage suffit pour y remédier.

7) Après élimination du défaut ou isolement/démontage des unités fonctionnelles de la zone concernée, l'ensemble peut fonctionner en mode secours. Pour cela, on réalise un essai de tenue en tension selon la CEI 61439-2 (2011) mais avec une tension d'essai égale à 1,5 fois la tension assignée d'emploi pendant 1 min. Est toléré un flambage des portes et des capots de l'unité testée ou de ses voisines, à condition qu'elles retrouvent rapidement un indice minimum de protection IPXXB conforme CEI 60529. En dehors de la zone d'essai définie par le fabricant, toutes les unités doivent rester pleinement fonctionnelles sur les plans mécanique et électrique, sans dégradation majeure par rapport à leur état antérieur.

Les critères 1 à 5 assurent la protection des personnes, les critères 1 à 6, la protection des personnes et de l'ensemble, et enfin les critères 1 à 7, la protection des personnes et de l'ensemble en fonctionnement restreint.

System pro E power est la solution ABB de tableaux de distribution. Avec un courant assigné allant jusqu'à 6300 A et un courant de court-circuit jusqu'à 120 kA, elle satisfait aux exigences d'essais CEI 61641. Elle est classée «B», aux termes de la norme, car elle remplit les critères 1 à 6 de tenue à l'arc. L'ajout du TVOC-2-48 lui permet de satisfaire à la totalité des critères 1 à 7.

Pour parer au danger majeur que constituent les arcs électriques pour le personnel et l'installation, ABB double la mise en associant le tableau de distribution System pro E power, conçu et testé dans les règles de l'art, et la protection d'arc rapide et efficace Arc Guard System.

La solution ABB associant tableau de distribution System pro E power et détection Arc Guard réduit au minimum le risque d'arc.

CEI 60529. Ce critère minimise le risque de blessures corporelles graves dues aux impacts de portes, capots, etc. et assure un niveau minimal de protection contre les contacts accidentels avec des parties sous tension.

2) Aucune pièce d'une masse supérieure à 60 g n'est éjectée de l'ensemble, sauf à être délogée et à tomber entre l'ensemble et les indicateurs. Cela minimise le risque de blessures.

3) L'arc, par combustion ou autres effets, ne crée pas d'ouverture dans les parties extérieures de l'enveloppe en dessous de 2 m de hauteur, sur les côtés déclarés accessibles : de quoi minimi-

Pavlo Tkachenko

ABB Electrification Products
Bergame (Italie)
pavlo.tkachenko@it.abb.com

Andreas von Lako

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

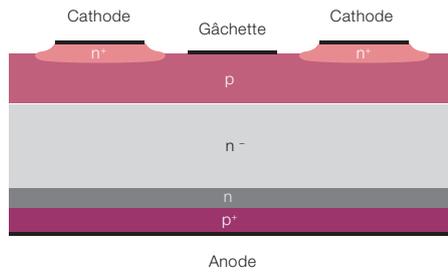


Méga saut de puce

Les dernières évolutions des composants IGCT de forte puissance

UMAMAHESWARA VEMULAPATI, MUNAF RAHIMO, MARTIN ARNOLD, TOBIAS WIKSTRÖM, JAN VOBECKY, BJÖRN BACKLUND, THOMAS STIASNY – Au milieu des années 1990, ABB a étoffé son offre de composants semi-conducteurs de puissance avec le thyristor intégré commuté par la gâchette IGCT (*Integrated Gate-Commutated Thyristor*). Comme son aîné, le thyristor blocable par la gâchette GTO (*Gate Turn-Off*), l'IGCT est un interrupteur électronique entièrement commandable qui s'accommode très bien des forts courants et hautes tensions des applications de grande puissance. Il surpasse son prédécesseur sur plusieurs plans: temps de blocage, encombrement, niveau d'intégration, densité de puissance, etc. Des atouts qui en font le composant de prédilection des variateurs industriels moyenne tension, mais aussi des convertisseurs éoliens, des compensateurs statiques de puissance réactive (STATCOM), des interconnexions électriques, etc. Cette technologie a connu un progrès rapide ces dix dernières années.

1 Thyristor IGCT



1a Structure d'un IGCT asymétrique



1b Vue de dessus d'une pastille IGCT de 91 mm



1c Pastille IGCT dans boîtier pressé hermétique avec commande de gâchette intégrée

Un IGCT s'apparente en bien des points à un GTO : tous deux sont fondamentalement des thyristors commandés à l'allumage et à l'extinction par un signal de gâchette. Mais l'IGCT a d'autres aptitudes : il peut tenir de plus fortes hausses de tension, ce qui l'affranchit du circuit d'aide à la commutation (*snubber*), et ses pertes par conduction sont plus faibles ; son blocage est également plus rapide et plus facile à commander, et l'espace occupé sur la pastille de silicium réduit. Qui plus est, il bénéficie d'un contact de gâchette massif, qui diminue l'inductance, et d'un circuit de commande intégré [1] → 1.

Les vingt dernières années ont vu l'IGCT s'imposer dans les applications électroniques de forte puissance. Le composant est aujourd'hui disponible dans la plage de tension assignée de 4,5 à 6,5 kV et décliné en trois versions ayant chacune ses avantages et inconvénients :

- L'IGCT asymétrique ne peut pas bloquer les tensions inverses de plus de quelques dizaines de volts, ce qui le cantonne à des applications où ce niveau de tension ne se produit jamais

(alimentations à découpage, par exemple) ou oblige à lui ajouter une diode antiparallèle pour conduire dans le sens inverse. C'est néanmoins le composant qui affiche les plus fortes puissances pour une même surface de silicium ;

- L'IGCT à conduction inverse *RC-IGCT* (*Reverse-Conducting*) intègre sur la même pastille une diode, avec l'inconvénient d'occuper une surface qui pourrait davantage servir à la commutation ;
- L'IGCT symétrique ou à blocage inverse *RB-IGCT* (*Reverse-Blocking*) est par nature capable de bloquer les tensions inverses, mais il ne conduit que dans le sens direct.

Quoi qu'il en soit, la mise en boîtier pressé hermétique du composant a depuis longtemps prouvé sa fiabilité opérationnelle en matière de protection et de cycles de charge du semi-conducteur de puissance. Constituée de quelques couches de matériaux judicieusement empilées, cette technologie évite les lacunes (manques de brasure, décollement des fils de métallisation) de ses concurrentes.

Amélioration des performances

Au cours des dix dernières années, la technologie IGCT a accompli de grands progrès visant surtout à diminuer les

pertes par conduction et à augmenter la densité de puissance → 2. Les gains en puissance passent par une réduction des pertes et/ou une hausse des températures de service, qui doivent beaucoup à l'élargissement de l'aire de sécurité pour accroître le courant de blocage. Le diamètre de la pastille est ainsi passé de 91 à 150 mm avec une structure monolithique qui regroupe toutes les fonctionnalités dans un seul composant au lieu de deux (IGCT + diode).

Haute puissance : HPT-IGCT

L'IGCT classique est surtout limité par le courant maximal de blocage commandable, et non par les pertes ou les contraintes thermiques. C'est pourquoi l'introduction de la technologie haute puissance *HPT* (*High-Power Technology*) [2] a été saluée comme une avancée majeure dans l'amélioration des performances de l'aire de sécurité, propice à de nouveaux développements.

La technologie HPT-IGCT permet donc d'augmenter jusqu'à 40 % le courant maxi de blocage à 125 °C. Le composant intègre une base *p* ondulée (perfectionnement de la base *p* classique), qui garantit une avalanche dynamique uniforme et contrôlée offrant une plus grande homogénéité sur le diamètre de la pastille en phase de blocage → 3. Cette conception a fait ses preuves pour des IGCT de tension atteignant 6,5 kV ; lors d'essais, des HPT-IGCT de 4,5 kV sur pastille de 91 mm ont bloqué des courants supérieurs à 5 kA, en résistant à des conditions extrêmes avec une forte inductance parasite.

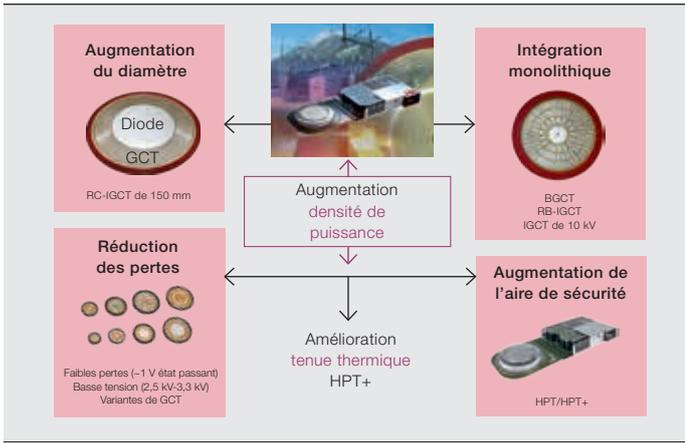
Intégration monolithique : RB-IGCT

Dans certains cas (disjoncteurs électroniques à courant continu, applications en courant alternatif ou onduleurs à

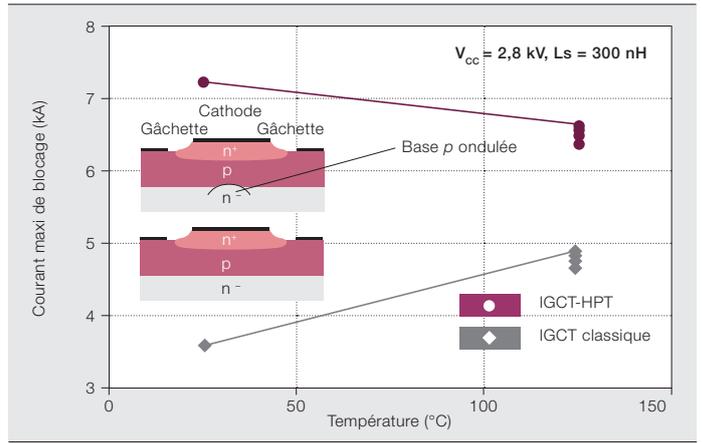
Photo p. 67

L'invention de l'IGCT a bousculé les règles de conception en électronique de puissance. Ici, un IGCT d'ABB avec sa commande de gâchette.

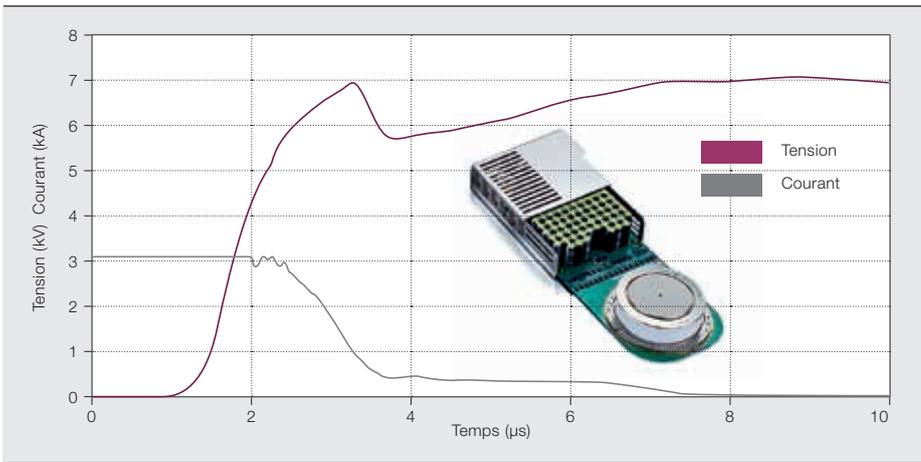
2 Facteurs de réduction des pertes et d'augmentation de la puissance des IGCT



3 Résultats expérimentaux du courant de blocage commandable maximal d'un IGCT-HPT par rapport à un IGCT classique



4 IGCT de 10 kV sur pastille de 91 mm et formes d'onde de tension/courant de blocage à 3,3 kA/5,5 kV et 125 °C



source de courant, par exemple), il faut un dispositif de commutation à blocage symétrique. Même si l'on peut avoir recours à un IGCT asymétrique connecté en série avec une diode rapide, la solution privilégiée est un IGCT symétrique sur une structure monolithique. Sachant que le composant se distingue des autres IGCT par des exigences et modes de fonctionnement propres, il faut optimiser sa conception pour assurer les performances en blocage inverse avec de faibles pertes et une commutation robuste. Des RB-IGCT de 6,5 kV pour onduleurs à source de courant et de 2,5 kV pour disjoncteurs CC bidirectionnels ont été développés. Un RB-IGCT de 2,5 kV et 91 mm de diamètre, par exemple, a présenté une chute de tension à l'état passant n'excédant pas 0,9 V au courant assigné de 1 kA et un courant de blocage maximal commandable atteignant 6,8 kA sous 1,6 kV, à 125 °C dans les deux cas [3].

Haute tension : IGCT 10 kV

Disposer d'IGCT de tension assignée comprise entre 8,5 et 10 kV permettrait de réaliser un onduleur à trois niveaux sans mise en série pour des tensions de ligne de 6 à 6,9 kV. De conception mécanique simple, le dispositif gagne en souplesse de commande et en fiabilité par rapport à la mise en série de deux composants de 4,5 ou 5,5 kV. Pour prouver la faisabilité du concept [4], des IGCT de 10 kV ont été réalisés en technologie HPT, avec des résultats probants → 4.

Haute température : HPT+

Un moyen d'accroître la puissance de sortie d'un convertisseur est d'augmenter la température nominale du semi-conducteur utilisé. Certes, en régime continu, les capacités du système de refroidissement peuvent limiter cette hausse; par contre, en régime intermittent à haute puissance, la solution est envisageable en perfectionnant la technologie HPT-IGCT. Aussi a-t-on optimisé le profil de dopage de la base p ondulée

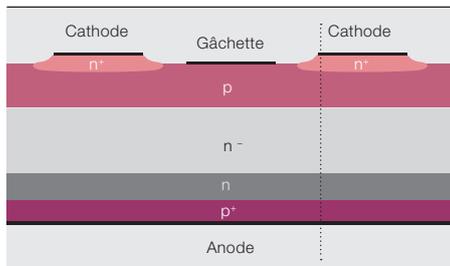
Au cours de dix dernières années, la technologie IGCT a accompli d'immenses progrès sur deux fronts : réduction des pertes par conduction, accroissement des densités de puissance.

pour avoir une aire de sécurité complète sur toute la plage de température allant jusqu'à 140 °C. De même, les interfaces internes (métallisations sur la pastille, par exemple) ont été améliorées pour accroître la tenue à la fatigue thermomécanique. Ce développement « HPT+ » est en cours de vérification; les premières conclusions, prometteuses, montrent des progrès indéniables par rapport à la technologie HPT [5].

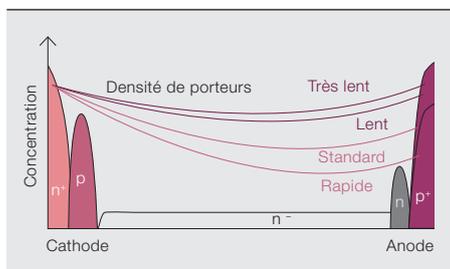
Réduction des pertes par conduction

Depuis quelques années, la tendance est aux topologies de convertisseurs multi-niveaux, très répandues en électronique de puissance. Ces dispositifs fonctionnent souvent à de très faibles fréquences de commutation tout en nécessitant des valeurs de courant admissible et/ou des performances élevées. Avec ses faibles pertes par conduction héritées du thyristor et son fonctionnement en régime de commutation dure, l'IGCT est tout désigné pour ces applications. Reste à l'optimiser encore pour faire chuter la tension

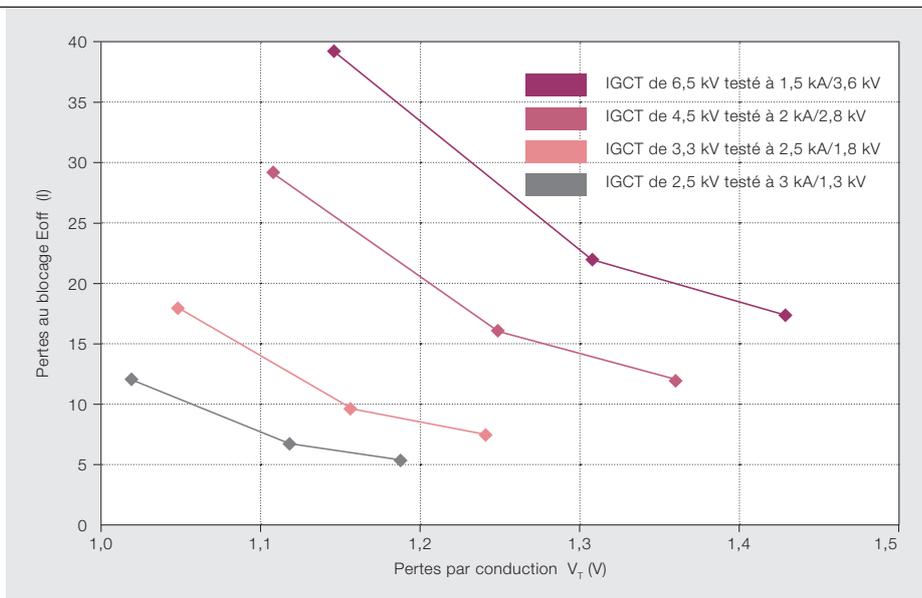
5 Conception améliorée de l'anode



5a Structure de l'IGCT



5b Profils de dopage du composant et des porteurs de charge en a'-a



5c Courbes de composants IGCT de différentes classes de tension-courant sur pastille de 91 mm à 125 °C

Les gains en puissance sont la conséquence de la réduction des pertes et/ou de la hausse des températures de service, dues en grande partie à l'élargissement de l'aire de sécurité du composant qui permet d'accroître le courant de blocage.

à l'état passant (~1 V) par une meilleure conception de l'anode → 5 tout en conservant de bonnes performances globales.

Sachant qu'une topologie multiniveau laisse une marge de liberté dans le choix de la tension du dispositif, plusieurs simulations et expériences furent menées sur une large plage de classes de tension [6]. Les résultats → 5c renseignent les concepteurs sur les moyens d'optimiser leurs convertisseurs au regard des pertes minimales totales pour une topologie et des calibres de tension et courant donnés.

Les premiers prototypes de RC-IGCT de 3,3 kV eurent pour objet de valider les résultats des simulations. On procéda à trois différents essais d'injection à l'anode (A1, A2 et A3) pour vérifier les très faibles pertes par conduction du composant, même à des courants plus élevés, avec des pertes par commutation raisonnables [7].

Grande surface: RC-IGCT de 150 mm

La montée en puissance passe inévitablement par de plus gros diamètres de silicium. En offrant plus de souplesse évolutive, la technologie HPT permet de surpasser le standard de 91 mm. Les tout récents prototypes de RC-IGCT 4,5 kV de 150 mm en technologie HPT+ permettront de réaliser des onduleurs à trois niveaux d'environ 20 MW, sans mise en série ou parallèle [8] → 6.

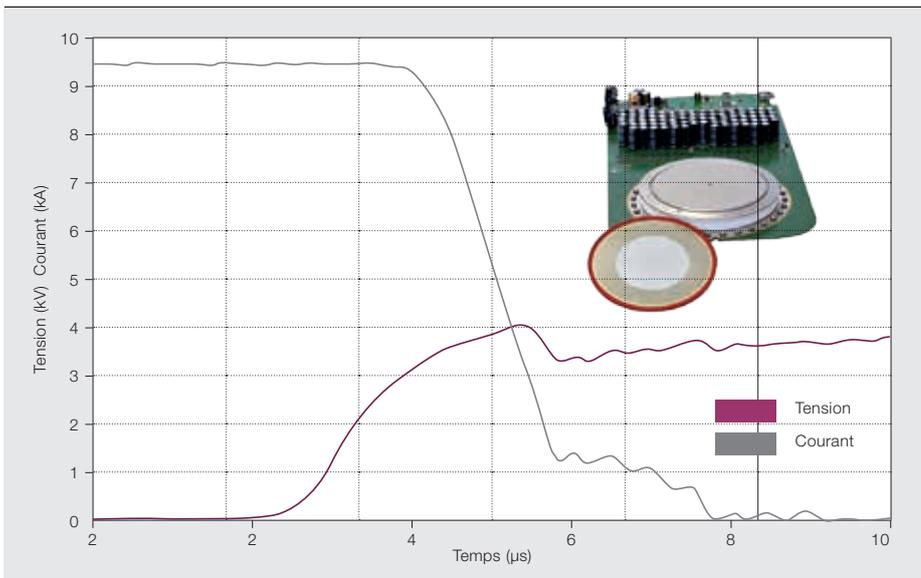
IGCT bimode

Le RC-IGCT classique améliore l'intégration du composant au niveau procédé et réduit le nombre de pièces au niveau système, deux facteurs qui vont dans le sens d'une fiabilité accrue. Nous l'avons vu → 2, thyristor GCT et diode sont ici intégrés sur une même pastille tout en étant dissociés; l'utilisation de la surface de silicium est donc limitée à la région GCT en fonctionnement thyristor, et à la région diode en mode diode. D'où la mise au point d'un nouveau dispositif totalement intégré: le thyristor commuté par la gâchette « bimode » BGCT (*Bimode Gate-Commutated Thyristor*). Celui-ci réunit GCT et diode dans une structure interdigitée qui occupe le même volume de silicium dans les deux modes de fonctionnement, chaque segment se comportant comme une cathode GCT ou une anode diode [9] → 7.

En plus de mieux utiliser les régions diode et GCT, cette interdigitation cumule d'autres avantages sur l'intégration RC-IGCT classique: meilleure répartition thermique, recouvrement inverse plus doux, courant de fuite réduit. Des expérimentations menées sur des prototypes de BGCT de 4,5 kV et des pastilles de diamètres 38 et 91 mm ont confirmé ces atouts [10].

Cet article n'est qu'un aperçu des potentialités des dernières innovations IGCT. Les concepteurs de systèmes à électronique de puissance voient s'ouvrir de

6 RC-IGCT de 4,5 kV sur pastille de 150 mm et formes d'onde de tension/courant de blocage à 9,5 kA/2,8 kV et 125 °C



Umamaheswara Vemulapati

ABB Corporate Research
Baden-Dättwil (Suisse)
umamaheswara.vemulapati@ch.abb.com

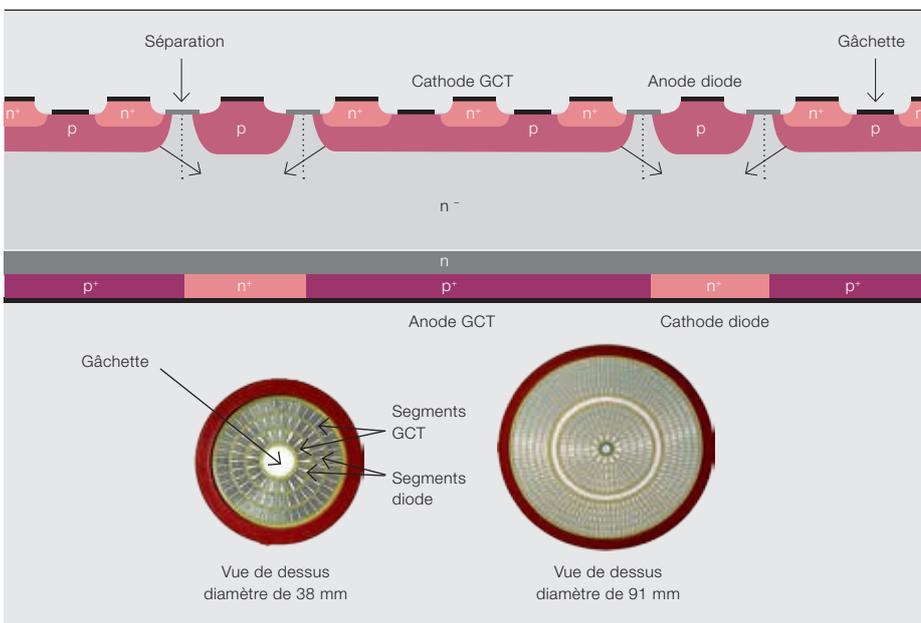
Munaf Rahimo

Tobias Wikström
Jan Vobecky
Björn Backlund
Thomas Stiasny
ABB Semiconductors
Lenzburg (Suisse)
munaf.rahimo@ch.abb.com
tobias.wikstroem@ch.abb.com
jan.vobecky@ch.abb.com
bjoern.backlund@ch.abb.com
thomas.stiasny@ch.abb.com

Martin Arnold

Ancien collaborateur ABB

7 Coupe schématisée d'un BGCT et des prototypes de 4,5 kV sur pastilles de 38 et 91 mm



Bibliographie

- [1] Klaka, S., *et al.*, « The Integrated Gate-Commutated Thyristor: A New High-Efficiency, High-Power Switch for Series or Snubberless Operation », *actes PCIM Europe*, Nuremberg (Allemagne), 1997.
- [2] Wikström, T., *et al.*, « The Corrugated P-Base IGCT – a New Benchmark for Large Area SQA Scaling », *actes ISPSD*, Jeju (Corée du Sud), p. 29–32, 2007.
- [3] Vemulapati, U., *et al.*, « Reverse blocking IGCT optimised for 1 kV DC bi-directional solid state circuit breaker », *IET Power Electronics*, vol. 8, n° 12, p. 2308–2314, 2015.
- [4] Nistor, I., *et al.*, « 10 kV HPT IGCT rated at 3200 A, a new milestone in high power semiconductors », *actes PCIM Europe*, Stuttgart (Allemagne), p. 467–471, 2010.
- [5] Arnold, M., *et al.*, « High-Temperature Operation of HPT+ IGCTs », *actes PCIM Europe*, Nuremberg (Allemagne), 2011.
- [6] Rahimo, M., *et al.*, « Optimization of High Voltage IGCTs towards 1V On-State Losses », *actes PCIM Europe*, Nuremberg (Allemagne), p. 613–620, 2013.
- [7] Vemulapati, U., *et al.*, « 3.3 kV RC IGCTs Optimized for Multilevel Topologies », *actes PCIM Europe*, Nuremberg (Allemagne), p. 362–369, 2014.
- [8] Wikström, T., *et al.*, « The 150 mm RC-IGCT: a device for the highest power requirements », *actes ISPSD*, Waikoloa (Hawaï), p. 91–94, 2014.
- [9] Vemulapati, U., *et al.*, « The concept of Bi-mode Gate-Commutated Thyristor – A new type of reverse-conducting IGCT », *actes ISPSD*, Bruges (Belgique), p. 29–32, 2012.
- [10] Stiasny, T., *et al.*, « Experimental results of a Large Area (91 mm) 4.5 kV «Bi-mode Gate-Commutated Thyristor» (BGCT) », *actes PCIM Europe*, Nuremberg (Allemagne), 2016.

La plate-forme haute puissance HPT (High-Power Technology) est saluée comme une avancée majeure dans l'amélioration des performances de l'aire de sécurité de l'IGCT.

fabuleuses perspectives de progrès avec des composants optimisés, des températures de service accrues, des fonctions de conduction et de blocage inverses améliorées, des pertes réduites à l'état passant et une plage de tension élargie, sur des diamètres de silicium de 150 mm, voire plus.



Grid4EU

Préfiguration des réseaux électriques de demain

GUNNAR BJÖRKMAN, PETER NOGLIK, ERIK HAMRIN, JIRI NEDOMLEL – Placé sous l'égide de la Commission européenne, le projet Grid4EU est un vaste programme de démonstrateurs de réseaux « intelligents » (*Smart grids*) qui a réuni, de novembre 2011 à janvier 2016, six grands distributeurs et une vingtaine de partenaires du secteur (fournisseurs d'énergie, équipementiers et chercheurs).

Le but est d'expérimenter et de valider systématiquement, en vraie grandeur, les nouveaux concepts et technologies permettant d'identifier et de lever les verrous techniques et économiques, sociétaux et environnementaux, institutionnels et réglementaires au déploiement des solutions d'avenir.



Au cours des dernières décennies, la pénétration croissante de la production intermittente d'origine renouvelable (EnR) dans le réseau de distribution européen a eu pour effet de multiplier les obstacles au maintien de la stabilité et de la fiabilité du système. Par ailleurs, la Commission européenne s'est fixée l'objectif à l'horizon 2030 de couvrir au moins 40 % de sa consommation avec les EnR: une ambition qui nécessite une révision en profondeur des modes de gestion de la distribution électrique.

Grid4EU s'inscrit parfaitement dans cette démarche. C'est à ce jour le plus important projet de démonstrateurs *Smart grids* à grande échelle financé par la Commission européenne, dans lequel ABB a joué un rôle de premier plan en qualité d'équipementier et de développeur de systèmes.

Photo p. 72

Le projet Grid4EU fut l'occasion pour ses contributeurs de mieux saisir les enjeux liés à l'évolution du réseau électrique européen.

Chacun des six gestionnaires de réseaux de distribution (GRD) du projet a travaillé avec des partenaires industriels et scientifiques → 1 pour expérimenter en situation réelle le potentiel d'évolutivité, de répliquabilité et de rentabilité de solutions innovantes de réseaux intelligents sur des sites pilotes aux caractéristiques climatiques, topologiques, démographiques et réglementaires différentes.

Les GRD ont systématiquement expérimenté, en vraie grandeur, les enjeux de l'intégration massive des EnR, comme la gestion dynamique et interactive de l'offre et de la demande qui vise à transformer le consommateur, aujourd'hui passif, en véritable acteur de ses choix énergétiques et maître de sa consommation. En fin de compte, il s'agit d'accroître la fiabilité, la flexibilité et la résilience du réseau.

Ce projet est parti de deux constats :

- Les réseaux existants sont équipés d'actifs à longue durée de vie, qu'il est impossible d'arrêter ou difficile de moderniser ;

- Les GRD européens évoluent dans des contextes techniques, économiques, sociétaux et réglementaires très variables d'un pays à l'autre.

ABB a pris part à trois démonstrateurs Grid4EU. Trois démonstrateurs complémentaires, coordonnés par IBERDROLA (Espagne), Enel (Italie) et ERDF, ont permis d'étudier les questions transverses d'évolutivité, de répliquabilité et de bénéfices économiques pour l'ensemble des projets. Le détail et les conclusions de ces expérimentations sont synthétisés dans

Le projet Grid4EU a réuni six gestionnaires de réseaux de distribution (GRD) européens et une vingtaine de partenaires industriels et académiques.

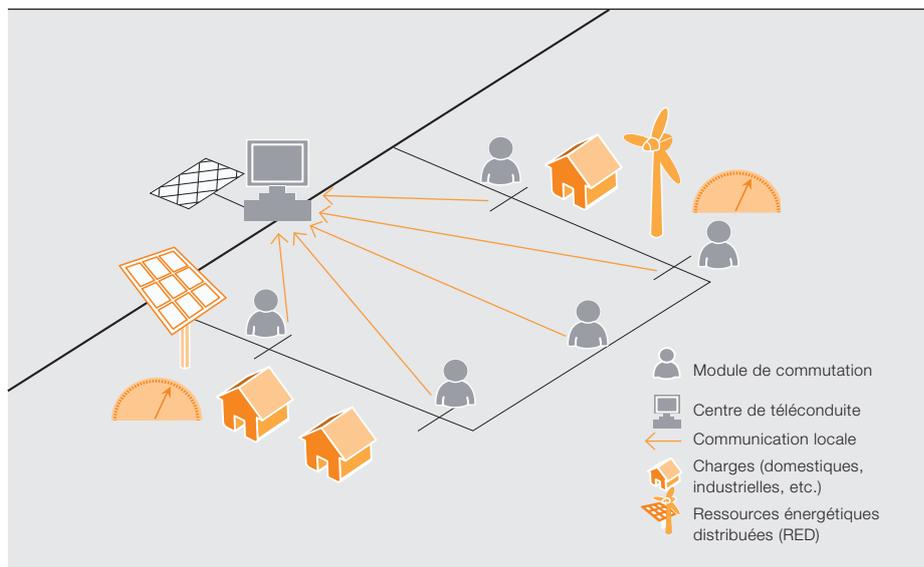
le document *Grid4EU Final Report*, téléchargeable sur le site www.grid4eu.eu.

Démonstrateur 1

Ce projet mené par le distributeur allemand RWE, avec le soutien d'ABB et de l'université technique de Dortmund, s'est concentré sur la gestion optimisée du réseau moyenne tension (MT) par une automatisation accrue et des capacités

Les GRD ont expérimenté en conditions réelles les méthodes de gestion dynamique de l'offre et de la demande d'électricité.

2 Périmètre du projet



de reconfiguration automatique du système. L'objectif était triple :

- Développer les automatismes de réseau MT en favorisant l'intégration des ressources énergétiques distribuées (RED) ;
- Fiabiliser le réseau en accélérant la reprise de service sur incident tout en évitant les surcharges et en stabilisant la tension ;
- Réduire les pertes réseau.

La petite ville de Reken, en Rhénanie du Nord-Westphalie, land le plus peuplé d'Allemagne, fut le lieu d'élection de ce démonstrateur. Deux raisons à cela : la production EnR y était déjà d'environ 20 % supérieure à la charge maximale, avec un fort potentiel d'intégration ; par contre, rares étaient les outils de surveillance ou les automatismes de réseau en place. Ces arguments faisaient de Reken l'illustration type des difficultés auxquelles se heurtent de nombreux distributeurs en Europe.

Le premier objectif était d'accroître le niveau d'automatisation des réseaux MT avec un système « multi-agent autonome » *MMS (Multi-Module System)* constitué de modules décentralisés, certains équipés de commutateurs, qui fournissent des mesures et des prévisions de charge à quelques heures. Le module central, dans les postes primaires, collecte toutes les données utiles et déclenche des actions de commutation pour déplacer le point de sectionnement et remplir les objectifs. Cette commutation autonome inaugure un nouveau principe de fonc-

tionnement : la reconfiguration dynamique de la topologie → 2.

Dans le cadre de cette expérimentation, ABB fut responsable du développement des équipements secondaires et des transmissions sécurisées. L'automatisme de téléconduite RTU540 → 3, assisté des multimètres 560CVD11 et 560CVD03, fut la composante principale de son offre.

Ces modules furent intégrés à plusieurs types de poste secondaire → 4 et le centre de conduite correspondant, dans les postes primaires, fut équipé de cinq RTU560CMU05 en rack.

Le logiciel du système MMS fut développé par l'université de Dortmund avec ABB. Pour garantir le maximum de flexibilité, il fut entièrement programmé à l'aide d'automates industriels. Prérequis important, les fonctionnalités devaient être testées avant les premiers essais sur site. On procéda donc à une simulation sur cible physique réelle (technologie *hardware-in-the-loop*) utilisant le même nombre de modules que sur le terrain et connectée à une simulation complète du réseau.

Les premiers résultats ont montré que MMS permettait de reporter l'extension du réseau de Reken d'au moins trois à quatre ans et de réduire les pertes de 28 %. Un bilan concluant qui laisse entrevoir une seconde installation MMS chez RWE.



Les premiers résultats de l'expérimentation menée à Reken montrent que le système MMS d'ABB peut reporter l'extension du réseau d'au moins trois à quatre ans et réduire les pertes de 28 %.

Démonstrateur 2

Ce projet du Suédois Vattenfall visait à améliorer la surveillance d'un réseau basse tension (BT). La solution mise en œuvre s'est appuyée sur la plate-forme MicroSCADA Pro d'ABB, avec les modules de gestion de la distribution DMS600 et d'historisation SYS600. Cette pile logicielle rapatrie et affiche les données des automatismes distants RTU équipant les postes secondaires et des compteurs communicants installés chez les clients.

En combinant ces informations, le système est à même de produire des bilans sur la qualité de la desserte, de détecter les pannes et d'estimer les pertes techniques et non techniques de distribution. Il permet également d'inclure dans DMS600 les alertes transmises par les compteurs du client afin d'aviser instantanément les opérateurs des incidents sur site. Les RTU communiquent à l'aide de modems internes GPRS et envoient leurs données au centre de téléconduite sous protocole CEI 60870-5-104.

Cette démonstration fut l'occasion de moderniser plus de 100 postes avec des automatismes ABB en coffret, robustes, économiques et faciles à installer. Concrètement, un seul type de coffret convient à un large éventail de types de postes. Une gamme de coffrets compacts a été spécialement conçue pour le projet.

Tout opérateur surveillant des réseaux BT veut disposer d'informations pertinentes, significatives et facilement assimilables. Dans ce démonstrateur, les opé-

rateurs du GRD ont été appelés à choisir les fonctionnalités primordiales pour leur tâche → 5. C'est notamment le cas de la détection de pannes, qui renseigne sur l'état des postes, des groupes, voire de chaque phase des groupes d'un poste → 6. Une fonction de comparaison entre l'énergie livrée et l'énergie facturée, ainsi qu'une plate-forme d'évaluation des données de qualité électrique font également partie de la fourniture.

Grâce à ce démonstrateur, les partenaires du projet ont prouvé qu'il était possible de développer et de procurer aux exploitants de réseaux BT des outils de surveillance efficaces et économiques. L'analyse coûts-bénéfices réalisée par le GRD montre que le système contribue activement à diminuer de 5 à 12 % la durée moyenne des coupures (indice SAIDI).

Les résultats de ce démonstrateur jetteront les bases de l'engagement d'ABB dans le prochain projet *Upgrid* de développement des réseaux électriques du futur et du déploiement de son offre Automatismes de réseau en Suède.

Démonstrateur 5

La finalité de ce projet piloté par ČEZ Distribuce en République tchèque était de valider le concept de réseau intelligent dans la ville de Vrčlabí, suivant quatre axes prioritaires : l'exploitation en mode îloté, la mesure de la qualité de l'onde, la gestion des défauts dans les réseaux MT et BT, l'impact de la recharge des batteries de véhicules électriques



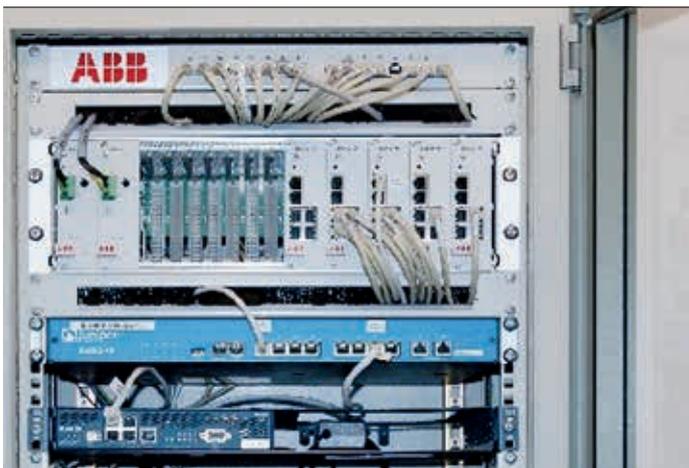
4a Nouveau poste compact intelligent



4b Armoire dédiée abritant le nouvel appareillage et l'«intelligence» ajoutée au poste existant



4c Remplacement de l'appareillage existant dans un poste à couloir de manœuvre



4d RTU maître dans un poste primaire

Le démonstrateur Grid4EU suédois a prouvé la viabilité technique et économique des outils de surveillance du réseau basse tension.

sur le réseau de distribution. Il fallut pour cela mettre en place des dispositifs télécommandés et une infrastructure permettant des communications rapides et des modifications dans le superviseur SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) pour appuyer les opérations automatisées. L'équilibrage de l'offre et de la demande en fonctionnement îloté ainsi que le passage du mode connecté en îlotage, et vice versa, furent assurés par un système automatisé.

La gestion automatisée des défauts MT minimise l'impact sur les clients grâce un nouvel équipement installé dans six transformateurs de distribution, à Vrchlábí, équipés de disjoncteurs, de RTU et de dispositifs électroniques intelligents *IED* (*Intelligent Electronic Devices*) ou « points de déconnexion ». D'autres transformateurs de distribution de « non-déconnexion » sont dotés de sectionneurs coupe-charge, de RTU et d'indicateurs de courant de défaut sur les départs MT. L'automatisa-

tion du niveau MT nécessita la mise en œuvre de voies de communication et d'une logique dans le superviseur local. Au total, 27 transformateurs de distribution nouvellement reconstruits furent équipés de composants permettant d'exécuter les fonctionnalités du démonstrateur.

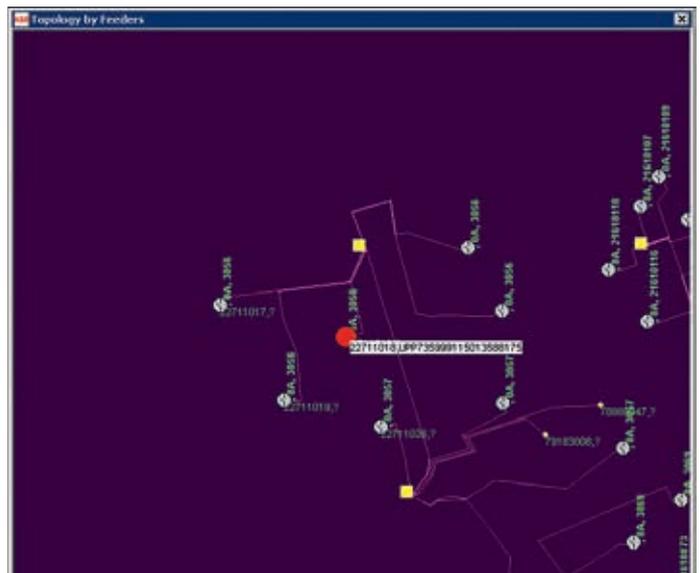
L'objectif est de minimiser le nombre de clients touchés par les pannes de courant. Dans l'idéal, ces nouvelles fonctionnalités supprimeront les coupures et écourteront notablement la durée de localisation et d'isolement des défauts ; ce gain de temps a d'ores et déjà atteint 85 %, selon des essais de simulation basés sur 18 mois de relevés de défauts.

La fonction d'îlotage fut la solution choisie pour les régions fragilisées par leur situation géographique ou leurs conditions climatiques (« péninsules électriques », par exemple). Elle fut d'abord testée à 10 kV, puis sur le réseau MT à 35 kV dans la zone urbaine de Vrchlábí,

5 Liste déroulante permettant à l'opérateur de naviguer parmi les alarmes compteurs et de trier les événements horodatés du réseau BT.

Code	LV customer code	LV network	State	Time Stamp
UPF73599115013691647	2259532	<S5000075	Meter down	2015-11-09 21:46:4
UPF73599115014105909	72493181	<S5000085	Meter down	2015-11-09 21:59:23
UPF73599114971957874	70303073	<S5000014	Meter down	2015-11-09 22:01:2
UPF73599114971958475	70303073	<S5000014	Meter down	2015-11-09 22:04:3
UPF73599115013649844	72494950	<S5000010	Overcurrent phase 1	2015-11-09 22:12:0
UPF73599114971888959	72494969	<S5000038	Overcurrent phase 2	2015-11-09 22:33:07
UPF73599114971957981	70303073	<S5000014	Meter down	2015-11-09 22:36:3
UPF73599115014105145	72501790	<S5000017	Meter down	2015-11-09 22:36:3
UPF73599114971910985	72228362	<S50000107	Overcurrent phase 1	2015-11-09 22:40:2
UPF73599115013399999	72497238	<S5000032	Overcurrent phase 1	2015-11-09 22:45:2
UPF73599115013660315	72494073	<S5000073	Overcurrent phase 3	2015-11-09 23:15:3
UPF73599114972173635	75634105	<S5000038	Overcurrent phase 3	2015-11-09 23:24:2
UPF73599115013580179	22711018	<S5000064	Meter down	2015-11-09 23:50:1
UPF73599115014236457	22711018	<S5000064	Meter down	2015-11-09 23:51:5
UPF73599115013660802	72493969	<S5000073	Overcurrent phase 3	2015-11-09 23:58:11
UPF73599114972141900	74819495	<S5000058	Meter down	2015-11-09 23:58:4
UPF73599114971958452	70303073	<S5000014	Meter down	2015-11-10 00:00:3
UPF73599115014127237	72493156	<S5000017	Overcurrent phase 2	2015-11-10 00:14:4
UPF73599115014130695	72493154	<S5000015	Overcurrent phase 3	2015-11-10 00:21:2
UPF73599115013777005	72504450	<S5000013	Device tampering	2015-11-10 00:25:11
UPF73599115013992215	72496006	<S5000132	Overcurrent phase 1	2015-11-10 00:29:4
UPF73599114971864090	71704430	<S5000075	Meter down	2015-11-10 00:39:5
UPF73599115013886629	22809309	<S5000070	Phase loss phase 2	2015-11-10 02:33:4
UPF73599114972141900	74819495	<S5000058	Meter down	2015-11-10 02:53:9
UPF73599114972141909	74819495	<S5000058	Meter down	2015-11-10 04:02:5

6 Affichage des compteurs clients dans DMS600; un point rouge signale un événement.



après unification du réseau, l'alimentation électrique étant alors assurée par une unité de cogénération de 1,56 MW installée dans la zone d'îlotage. But de la manœuvre: tester la capacité d'un réseau prédéfini à se découpler du réseau MT environnant en cas de défaut au niveau supérieur de tension et à maintenir l'équilibre au sein de l'îlot. Plusieurs prérequis conditionnent la réussite de l'îlotage: raccordement d'une production d'énergie suffisante, adaptation des réglages de protection, existence d'une infrastructure de communication et déploiement des automatismes. L'équipement doit donc être capable

- de déconnecter l'îlot en question;
- d'équilibrer sa production et sa consommation pendant toute la durée du défaut;
- de reconnecter cette zone au réseau MT classique.

Ce fonctionnement en îloté fut validé par deux essais concluants, le premier réalisé en juin 2014 à 10 kV, et le second en juin 2015 à 35 kV, après reconstitution du réseau et unification des niveaux de tension au sein de Vrchlaby.

Le projet Grid4EU a prouvé, en conditions réelles, la maturité des technologies de réseau électrique intelligent dans une grande diversité de situations et de conditions climatiques dans toute l'Europe. Au-delà des nouvelles fonctionnalités de *Smart grids*, Grid4EU s'est intéressé de près à leur déploiement à grande échelle. Mais nombreux restent

les enjeux en matière d'évolutivité, de réplication et de viabilité économique (ratio coûts-bénéfices). Telles furent les conclusions des représentants des six démonstrateurs européens réunis à Paris en janvier 2016 pour dresser le bilan de l'opération: « *Il faut passer à l'offensive et investir dans les réseaux de demain. Les plus grands défis sont d'ordre économique et humain, notamment la mobilisation des personnels. Pour autant, ces difficultés seront surmontées et les investissements engagés.* ».

On retiendra de cette expérience la très bonne coopération entre les GRD et les partenaires complémentaires du projet, objectif qui a sans doute présidé à l'initiative de la Commission européenne. Pour le groupe ABB, les investissements dans ce chantier stratégique et les partenariats noués à cette fin dopèrent son chiffre d'affaires. L'afflux de commandes, en lien direct avec sa contribution, en est la meilleure démonstration.

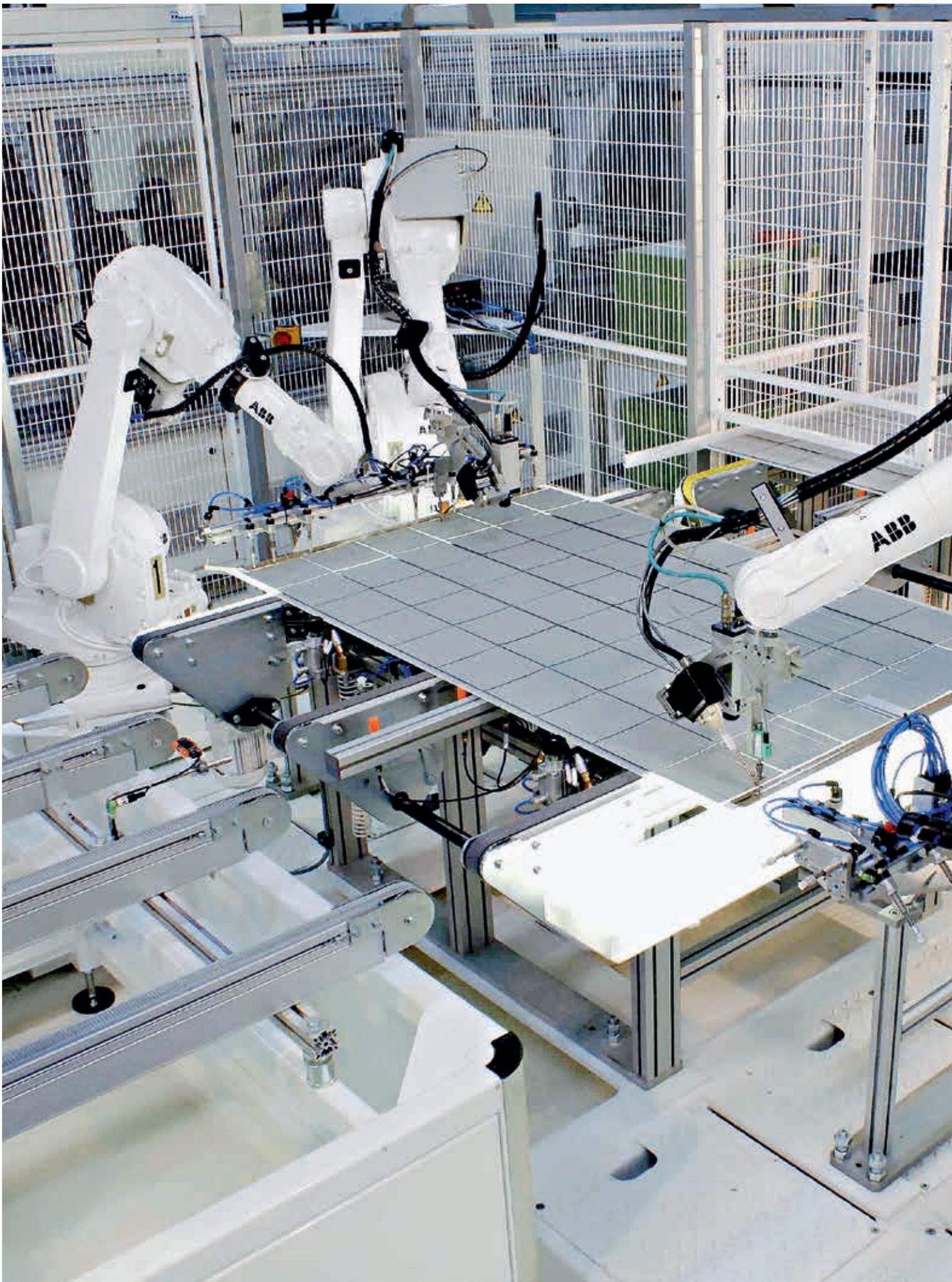
Ce travail fut cofinancé par la Commission européenne dans le cadre du programme Grid4EU et du 7^e programme-cadre (FP7) de l'Union européenne pour la recherche et l'innovation, au titre de la convention de subvention n° ENER/FP7/268206.

Gunnar Björkman
Ancien collaborateur ABB
et coordonnateur Grid4EU pour ABB

Peter Noglik
ABB Corporate Research
Ladenbourg (Allemagne)
peter.noglik@de.abb.com

Erik Hamrin
ABB Grid Automation
Västerås (Suède)
erik.hamrin@se.abb.com

Jiri Nedomlel
ABB Grid Automation
Trutnov (République tchèque)
jiri.nedomlel@cz.abb.com





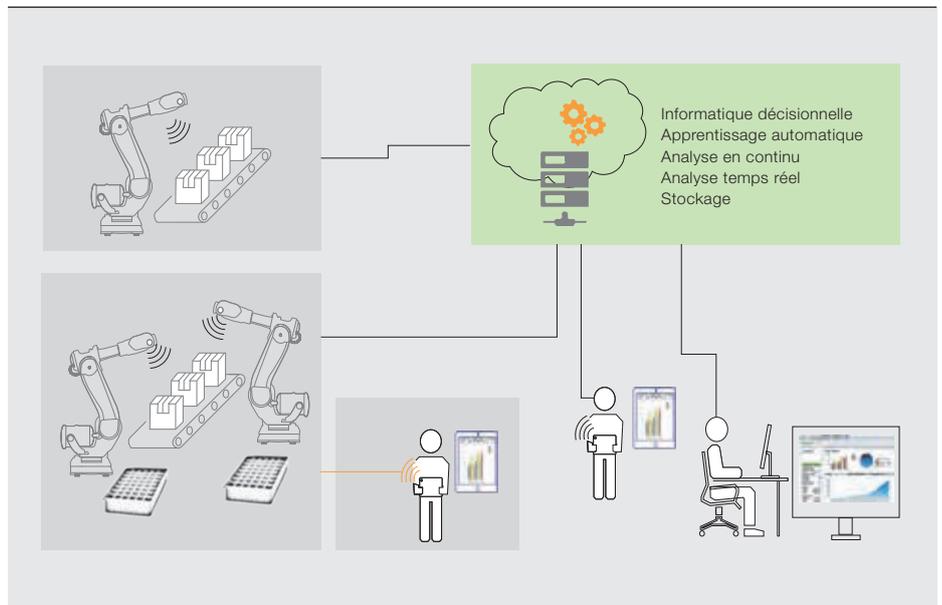
Ascension robotique

Les robots intelligents exploitent la montée en puissance de l'Internet des objets, des services et des personnes (IoTSP) pour passer dans le « nuage »

HONGYU PEI-BREIVOLD, KRISTIAN SANDSTRÖM, LARISA RIZVANOVIC, MARKO LEHTOLA, SAAD AZHAR, ROGER KULLÄNG, MAGNUS LARSSON – Nul doute que, dans un futur proche, nos systèmes de production industriels seront de plus en plus robotisés. Mais pour qu'advienne cette mutation, le poids de l'intervention humaine dans la configuration des tâches automatisées doit nettement s'alléger. En d'autres termes, les robots auront à résoudre eux-mêmes les problèmes et à s'adapter à la dynamique de leur environnement de travail. L'Internet des objets, des services et des personnes (IoTSP) peut y contribuer en facilitant l'émergence de modèles technologiques et économiques innovants qui feront de la diffusion massive des données, de l'analyse temps réel et de l'apprentissage automatique (*machine learning*) une réalité.

Photo

L'IoTSP permettra d'accomplir une bien plus grande variété de tâches robotiques.



A en croire les prévisions [1], l'usage de la robotique en production et en automatisation devrait connaître une croissance exponentielle, et le marché exploser. C'est du moins ce que laisse entrevoir la multiplication des applications d'automatismes mettant en œuvre des robots manufacturiers.

Aujourd'hui, les robots exécutent avec une grande précision des tâches répétitives complexes (soudage, peinture, construction automobile ou certains types d'assemblage). Cette robotisation pourrait en principe profiter à bien d'autres processus de fabrication ou de montage, mais la réalité se heurte à plusieurs obstacles, comme de courtes durées de campagne ou des environnements de production insuffisamment maîtrisés. Dans nombre de cas, l'être humain reste maître de la situation. Pour étendre leur champ d'application, les robots doivent donc gagner en flexibilité, en facilité de programmation et en autonomie. De plus, si les robots doivent exploiter de manière plus intelligente les données que leur procurent à la fois les opérateurs et l'environnement de production, il leur faut aussi transmettre en retour des informations qu'ils auront su analyser, traiter et transformer en connaissances accessibles et facilement assimilables, même par des non-spécialistes.

Internet des objets et Cloud, technologies clés

Avec l'Internet des objets (IoT) et le Cloud, il est déjà possible de faire remonter d'importants flux continus de données de capteurs et d'autres appareils vers les centres de calcul pour y être analysées en temps réel, filtrées, triées, classées et agrégées.

Les informations ainsi traitées peuvent alimenter différents services cloud, comme les outils d'informatique décisionnelle qui transforment les données brutes en tableaux et graphiques pour fournir un instantané de la production. Des solutions d'apprentissage automatique peuvent également exploiter ces données à des fins prédictives pour l'optimisation des procédés ou la maintenance, par exemple. Ces puissants services évolutifs, capables d'analyser des masses de données dans les datacenters, sont d'ores et déjà disponibles en nombre.

Ce traitement analytique doit bien évidemment respecter les impératifs de sécurité, de sûreté et d'intégrité complète des données, tout en préservant les niveaux requis de fiabilité et de disponibilité.

L'IoT et le cloud permettront de démultiplier les performances des robots en « délocalisant » dans les datacenters la plupart des capacités de stockage, d'analyse et de calcul massif de données. De quoi répondre aux exigences futures de la robotique intelligente, sans surcoût ni augmentation de la puissance de traitement locale.

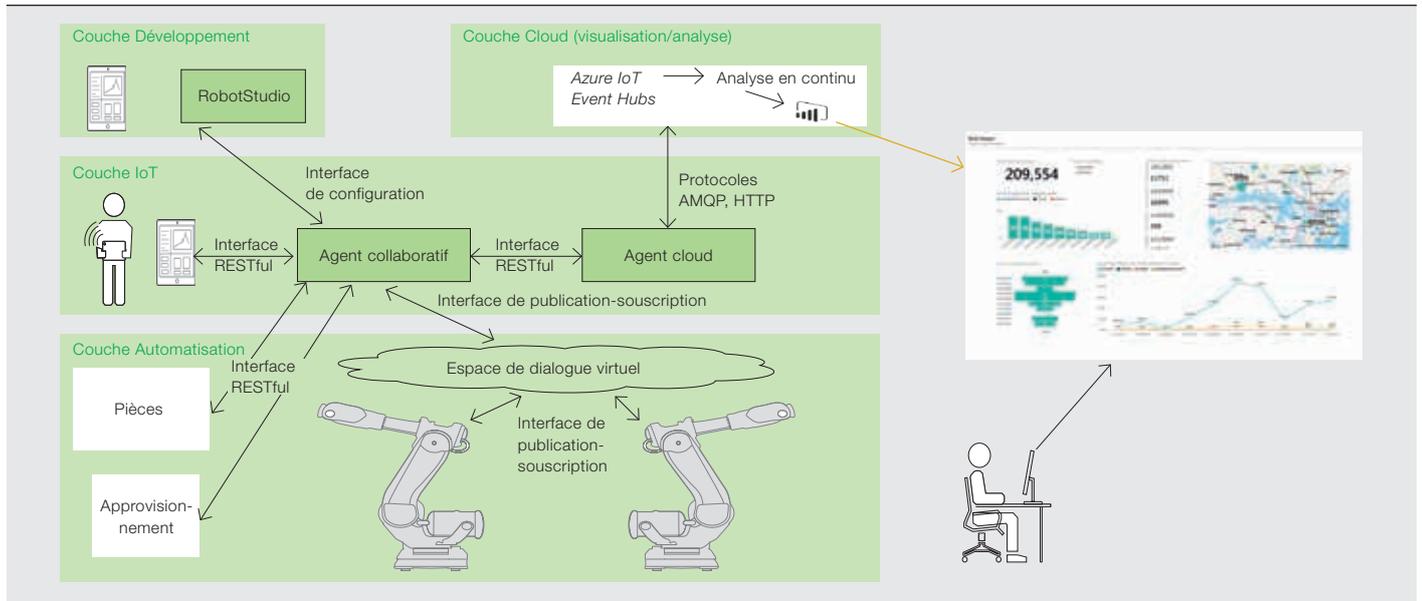
L'argumentation par l'exemple

L'exemple suivant illustre la manière dont l'IoTSP d'ABB peut améliorer les performances opérationnelles de la production robotisée. Dans une cellule d'assem-

La robotique industrielle pourrait profiter à de nombreuses tâches de production ou d'assemblage qui restent difficiles à automatiser.

blage de petites pièces, deux robots travaillant en tandem sont alimentés par des ravitailleurs distincts ; ils saisissent les pièces, les assemblent et les déposent sur un convoyeur. L'opérateur ou le responsable de fabrication peut suivre l'état de la production sur son terminal mobile, partout et à tout moment, et obtenir des informations sur les équipements de la cellule. Il peut également surveiller les indicateurs clés de performance (KPI) prédictifs pour décider des actions de maintenance.

2 Architecture évolutive de la plate-forme de collaboration ABB



Pour étendre leur champ d'application, les robots doivent être plus flexibles, plus faciles à programmer, plus autonomes.

En cas d'anomalie soudaine (ralentissement brutal de l'approvisionnement en pièces, par exemple), les robots, les ravitailleurs et le convoyeur échangent des informations et adaptent leur cadence en conséquence ; l'opérateur en est averti sur son terminal mobile. Si les performances de production restent dans les tolérances, il peut décider de ne pas interrompre la chaîne. Si un ravitailleur est en panne, il a la possibilité de vérifier les KPI des appareils et de faire rapidement intervenir un technicien pour remplacer l'équipement défectueux. Le système peut continuer à fonctionner en l'état jusqu'au dépannage et éviter ainsi un arrêt brutal de la production, toujours coûteux.

Stratégie

Ce scénario exige des organes de commande et des réseaux de capteurs/actionneurs capables de gérer en temps réel comme en prédictif le comportement du système robotisé. Il faut également des services robotiques intelligents

qui, déployés avec l'IoT, améliorent les performances opérationnelles de l'atelier. La réponse à ce faisceau d'exigences passe notamment par

- le partage de données entre robots et autres appareils connectés de la cellule de production ;
- l'hébergement, en bordure de réseau ou dans les armoires de commande, d'applications robotiques temps réel avec une très faible latence prédictible ;
- la connexion à un datacenter distant pour exécuter les traitements de l'informatique décisionnelle et de l'analyse de données massives.

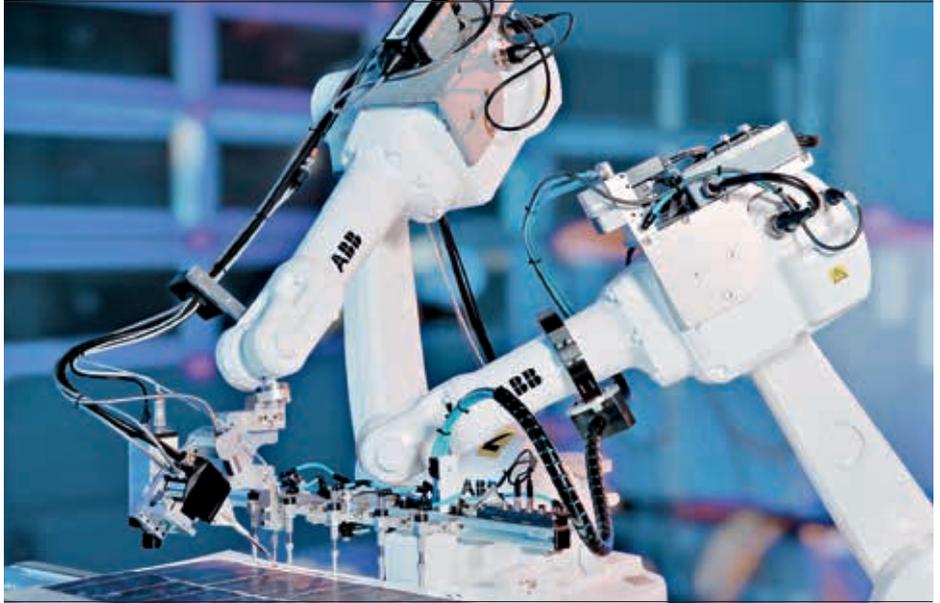
Les clients bénéficient ainsi de services complémentaires dans le cloud, tels que l'accès facile aux données de production et leur visualisation. De plus, le recours à des infrastructures cloud offrant plus de souplesse aux ressources de calcul et au stockage permet de développer de nouveaux services robotiques pointus, centrés sur l'informatique décisionnelle et l'analyse de données → 1. C'est le cas, par exemple, de l'apprentissage automatique ou de l'analyse pointue des gros volumes de données collectées par les robots pendant toute leur durée d'exploitation.

Intelligence collective

Pour concrétiser cette approche, ABB a conçu une plate-forme évolutive de collaboration et de partage d'informations entre robots connectés, autres équipements productifs et opérateurs → 2.

L'Internet des objets, des services et des personnes (IoTSP) transformera le quotidien des utilisateurs et apportera de l'intelligence aux opérations industrielles.

3 La plate-forme collaborative d'ABB facilite le paramétrage des robots.



Une fois mise en place, cette plate-forme facilitera la configuration de l'installation robotisée → 3, notamment la détection des robots, leur connexion en vue de leur collaboration et de la fourniture de services.

Au niveau Automatisation, les robots échangent les données temps réel par le biais d'une couche logicielle intermédiaire de type DDS (*Data Distribution Service*), par exemple, selon le principe de « publication-souscription » : un appareil publie des informations sur un sujet donné aux destinataires abonnés au service de diffusion.

Ceux-ci n'ont pas besoin de connaître la provenance des informations puisque le message renferme également des données contextuelles leur indiquant ce qu'ils doivent en faire.

Ces informations (position, cadence, etc., dans l'exemple de nos deux robots et leurs ravitailleurs) sont échangées dans un espace de dialogue virtuel.

Le principe de publication-souscription peut ne pas convenir à tous les équipements de la cellule : certains appareils de fournisseurs tiers, par exemple, sont bridés par des droits d'accès insuffisants ou une puissance de calcul limitée. Ils ont néanmoins la possibilité d'interagir avec les robots et les autres dispositifs en passant par une interface *RESTful*

(*REpresentational State Transfer*) allégée, moins gourmande en bande passante que les autres architectures web, qui simplifie la connexion avec des clients divers. Cette interface est fournie par un agent collaboratif de la couche IoT, qui peut être déployé sur n'importe quel constituant de la cellule de production (armoire de commande comprise) équipé de l'interface de publication-souscription. L'interface *RESTful* est exploitée aussi bien par les différents terminaux mobiles qui surveillent la cellule de production

L'IoTSP accroît l'agilité de la production et accélère l'innovation.

que par un agent cloud, lequel dialogue ou interagit avec la couche Cloud sous protocoles AMQP (*Advanced Message Queuing Protocol*) et HTTP.

La couche Cloud multiplie l'offre de services en interconnectant les appareils de la cellule robotisée ou en connectant celle-ci au cloud. Pour cette plate-forme collaborative, ABB a choisi la suite Microsoft Azure IoT [2] qui propose une vaste palette de fonctionnalités, dont la collecte en continu, l'analyse temps réel, l'apprentissage automatique, le stockage et la visualisation. ABB en a profité pour mettre au point un service de pilotage et d'affichage des données de production. La solution se compose d'un client IoT, d'un concentrateur d'événements *Event Hubs*, d'un outil d'analyse de don-

La couche Cloud de l'architecture collaborative d'ABB développe l'offre de services en interconnectant les appareils de la cellule de production ou en connectant celle-ci au « nuage ».

nées en continu et d'une solution d'informatique décisionnelle en self-service *Power BI*. Les données robotiques transmises au hub par l'agent cloud sont récupérées par le service analytique qui exécute la logique de traitement en continu, dans un langage simple de type SQL. Les résultats de l'analyse sont ensuite transférés à Power BI, qui assure le suivi et la visualisation des données de production.

La couche Développement héberge à la fois des applications de configuration simplifiée sur le Web et de configuration évoluée des robots et autres équipements productifs RobotStudio.

Appréhender le futur

L'utilisation de la technologie IoT pour connecter les objets, les services et les personnes va transformer le quotidien des utilisateurs et insuffler de l'intelligence dans la production industrielle. Imaginez que les petites pièces de notre exemple soient dotées de radio-étiquettes permettant de transmettre certains types d'informations aux robots et aux opérateurs (schémas CAO, descriptifs d'articles, consignes de manipulation, etc.). En cas de changement de série, la diffusion de ces informations pourrait alors servir à

revoir la planification des mouvements de saisie du robot avec les préhenseurs disponibles : une tâche qui s'effectue encore aujourd'hui manuellement et hors ligne.

IoT et technologies cloud permettent de répondre aux exigences futures de la robotique intelligente, sans surcoût ni augmentation de la puissance de traitement locale.

L'idée force de l'loTSP est d'obtenir des informations sur les appareils et l'environnement productif, d'analyser les données issues des mondes réel et virtuel pour optimiser les opérations, et d'améliorer les services aux utilisateurs. En procurant de nouveaux services logiciels et expériences à l'utilisateur final, sur la base des informations extraites d'une multitude d'objets connectés, l'loTSP est un vecteur d'agilité industrielle et un accélérateur d'innovation.

Hongyu Pei-Breivold

Kristian Sandström

Larisa Rizvanovic

Marko Lehtola

Saad Azhar

ABB Corporate Research

Västerås (Suède)

hongyu.pei-breivold@se.abb.com

kristian.sandstrom@se.abb.com

larisa.rizvanovic@se.abb.com

marko.lehtola@se.abb.com

saad.azhar@se.abb.com

Roger Kulläng

Magnus Larsson

ABB Robotics

Västerås (Suède)

roger.kullang@se.abb.com

magnus.larsson@se.abb.com

Bibliographie

- [1] Modern Materials Handling, « *Industrial robotics market expected to reach \$41 billion by 2020* », disponible en ligne sur : http://www.mmh.com/article/industrial_robotics_market_expected_to_reach_41_billion_by_2020, 28 octobre 2015.
- [2] Microsoft Azure IoT Suite, <https://www.microsoft.com/en-us/server-cloud/internet-of-things/azure-iot-suite.aspx>



Solaire-diesel : mariage consommé

L'électricité renouvelable s'invite dans les microréseaux

CRAIG BLIZARD, ZOHEIR RABIA – Les solutions hybrides solaire-diesel constituent aujourd'hui un important segment de marché clairement favorisé par la baisse des coûts de fabrication du photovoltaïque (PV). Dans un contexte mondial de chute des prix des modules PV et de renchérissement des carburants, le couplage PV-diesel s'avère de plus en plus une alternative viable et rentable à l'extension du réseau électrique principal et aux mini-réseaux de distribution locale fonctionnant au diesel seul.



La forte dépendance des pays d'Afrique subsaharienne, d'Amérique latine et d'Asie du Sud-est aux onéreux systèmes de production diesel, de même que des facteurs déterminants comme l'éloignement géographique, l'insularité et la topographie des lieux font de l'hybridation PV-diesel la solution idéale pour l'électrification des régions et infrastructures isolées.

La solution hybride PV-diesel d'ABB, bâtie autour de son système de contrôle-commande PVD et de ses onduleurs solaires, vient en complément de l'existant pour maximiser les économies de carburant et réduire les coûts et heures de fonctionnement des groupes électrogènes. La baisse de prix des modules PV est un autre « plus » qui garantit un retour sur investissement rapide.

Photo

Le système hybride photovoltaïque-diesel d'ABB fabrique la production d'énergie des sites reculés.

L'hybride PV-diesel se pose en alternative convaincante aux mini-réseaux uniquement alimentés au diesel. Dans le monde entier, des dizaines de gigawatts

S'appuyant sur la maîtrise et les atouts du système Microgrid Plus d'ABB, la solution hybride PV-diesel vise l'économie et la simplicité de mise en œuvre.

(GW) produits par les microréseaux diesel isolés pourraient ainsi bénéficier de l'intégration des énergies renouvelables (EnR). Ce marché recèle un immense potentiel économique dans les années à venir.

Microréseaux

On entend par « microréseau » un petit réseau électrique autosuffisant qui dessert un groupe de consommateurs au

sein d'un campus universitaire, d'une base militaire, d'une commune, etc. Cet ensemble de ressources et de charges pilotées et coordonnées à l'échelle locale

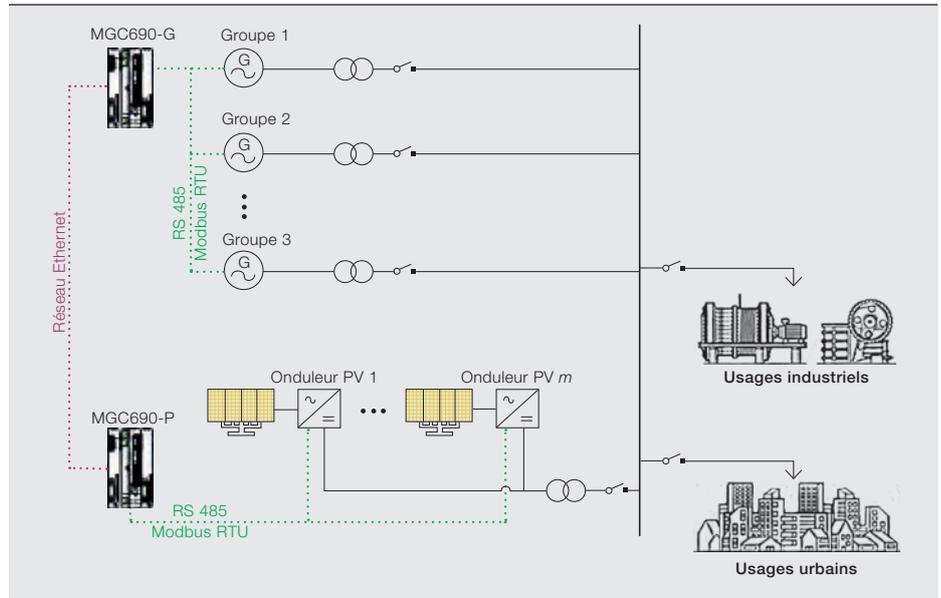
peut tirer son énergie du réseau national auquel il est interconnecté, ou ne rien prélever ni injecter sur ce dernier et fonctionner alors en mode « îloté ».

Le concept n'est certes pas nouveau, mais ce n'est

qu'aujourd'hui qu'il suscite un réel intérêt commercial. À l'ère industrielle, les réseaux électriques centralisés qui alimentaient un grand nombre de consommateurs à partir d'une seule source d'énergie primaire étaient économiquement plus avantageux que les microréseaux ; quelle municipalité, école ou autre collectivité locale pouvait alors se permettre de construire et de gérer ses propres cen-

Une pénétration solaire en crête de 30 à 50 % est envisageable, ce qui permet de compenser avec les EnR jusqu'à 15 % de combustibles fossiles sur un an.

1 Schéma de principe d'une centrale PV-diesel alimentant des charges industrielles et urbaines



trales de production et infrastructures de distribution ? Les microréseaux n'étaient pas assez rentables pour pourvoir aux besoins énergétiques journaliers. En cas d'urgence ou de coupure de courant, l'usage était de recourir à des sources d'appoint comme les groupes électrogènes. Aujourd'hui, les microréseaux qui s'efforcent d'intégrer et de gérer efficacement les EnR gagnent en importance et s'affirment comme une solution pertinente et économique pour assurer au quotidien l'approvisionnement en électricité.

Expertise ABB

Avec plus de 30 projets aboutis à son actif, ABB cumule dans ce domaine plus de 25 années de recherche-développement, d'investissement et d'innovation. Ces efforts se concrétisent dans les automatismes de centrales destinés aux filières de production conventionnelles et renouvelables, ainsi que dans les technologies de stabilisation du réseau et de stockage d'énergie.

Hybridation

L'offre Microgrid Plus d'ABB est une plate-forme d'automatisation dédiée à la gestion des systèmes de production et de stockage d'énergie, à la fois d'origine fossile et renouvelable (diesel, gaz, géothermie, hydroélectrique, éolien, solaire). Les produits Microgrid Plus d'ABB s'emploient à gérer efficacement les microréseaux en garantissant un parfait équilibre entre qualité et sécurité d'approvisionnement, ainsi qu'un usage optimal des EnR.

La solution PVD d'ABB est le dernier ajout à la palette d'automatismes de microréseaux associant champs PV et groupes diesel. S'appuyant sur la connaissance et les atouts du système Microgrid Plus, elle a été pensée dans un double objectif d'économie et de simplicité de mise en œuvre, qui se traduit à la fois par la réduction du nombre de composants et la simplification radicale du modèle de réalisation de projet.

Minimiser les coûts étant la priorité des concepteurs, l'utilisateur final peut déployer une solution complète d'automatisation prête à l'emploi, se caractérisant par des bibliothèques prédéveloppées, des frais de mise en service sur site réduits au minimum et un petit nombre de composants. Le tout sans compétence particulière, ni surcoût de développement technique du projet.

Sur le plan des performances, la solution a été conçue pour des technologies EnR dont le taux de pénétration se situe dans la moyenne : une pénétration PV en crête d'environ 30–50 % est envisageable, permettant de compenser jusqu'à 15 % de carburant sur un an, soit un bilan net EnR-énergie fossile clairement avantageux.

Qui plus est, la solution offre une méthode cohérente, simple et efficace de déploiement et de paramétrage des systèmes de contrôle-commande pilotant diverses configurations de centrales (1 à 16 groupes et 1 à 32 onduleurs) pour répondre à un large éventail de besoins clients → 1.



Onduleurs solaires ABB

Une installation hybride PV-diesel peut aussi bien utiliser des onduleurs « de chaînes » ou *string* que des onduleurs centraux. La solution PVD associe des onduleurs string triphasés TRIO → 2 et des onduleurs centraux PVS → 3. Leur interfaçage avec le système PVD a été testé et validé.

Ces onduleurs font partie de la gamme complète de produits et de services ABB couvrant toute la filière solaire (production,

Avec leurs nombreuses protections électriques et mécaniques, les onduleurs centraux sont conçus pour durer au moins 20 ans.

transport et distribution), que ce soit au sein de systèmes de panneaux PV raccordés au réseau ou de systèmes hybrides.

Gamme TRIO

Les onduleurs TRIO 20.0 et 27.6 constituent la solution la plus performante tant pour les applications PV tertiaires que pour les grandes centrales au sol. Ces onduleurs string conviennent parfaite-



ment au photovoltaïque installé sur les bâtiments des petites et moyennes entreprises, des entrepôts ou encore des établissements hôteliers et sites touristiques implantés en territoire isolé.

Leur refroidissement par convection naturelle et leur protection IP65 sont gages de sécurité de fonctionnement pour une utilisation en extérieur dans des conditions climatiques extrêmes.

Outre leur fiabilité éprouvée, leur rendement élevé (jusqu'à 98,2 %) et leur large plage de tension d'entrée, les onduleurs TRIO font preuve d'une grande souplesse de configuration et d'adaptation à une multitude d'installations PV. Deux optimiseurs de puissance solaire *MPPT* (*Maximum Power Point Tracking*) indépendants leur permettent de récupérer le maximum d'énergie de champs PV répartis selon deux orientations différentes. Qui plus est, une boîte de jonction débrochable facilite et accélère leur mise en place.

À ce jour, des onduleurs TRIO d'une puissance cumulée d'environ 4 GW ont été installés dans le monde entier pour alimenter les clients de sites isolés.

Onduleurs centraux PVS 800

Optimisés pour les parcs PV de plusieurs mégawatts de capacité, au service notamment de l'industrie lourde et de l'exploitation minière, ces onduleurs centralisés sont particulièrement appréciés des intégrateurs de systèmes et des exploitants pour leur performance et leur retour sur investissement maximal sur tout le cycle de vie de l'installation.

L'onduleur PVS 800 repose sur des composants ABB qui ont fait leur preuve dans les applications et environnements

les plus contraignants. Fiabilisé par ses nombreuses protections électriques et mécaniques, il est conçu pour fonctionner au moins 20 ans.

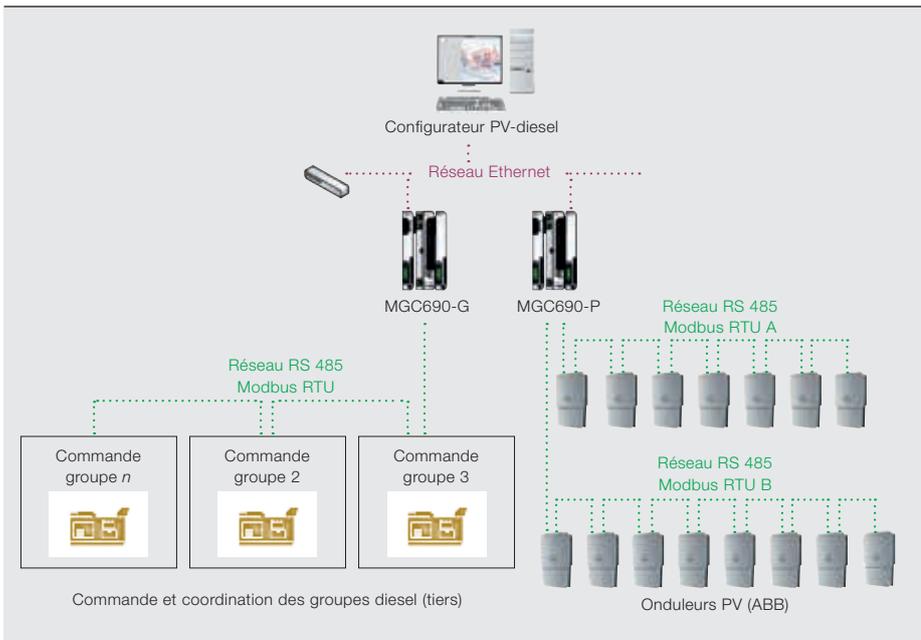
Proposés dans des puissances de 100 à 1000 kW, les onduleurs centraux d'ABB se démarquent par de hautes performances globales (rendement élevé, faible consommation auxiliaire, fiabilité éprouvée) et par l'offre complète de services ABB bâtie sur un réseau mondial de professionnels.

Optimisation technico-économique

Pour faciliter son insertion dans les installations industrielles nouvelles et existantes, la solution PVD intègre des contrôleurs MGC690 classés en deux catégories fonctionnelles: MGC690-G pour automatiser la coordination des groupes diesel, MGC690-P pour gérer la production photovoltaïque → 4.

La mise en service et la configuration sur site sont facilitées par un outil dédié qui accompagne l'utilisateur dans l'exécution de tâches élémentaires (paramétrages, changements de mode de commande, par exemple) → 5. Il est également possible de suivre en temps réel l'état du système et de visualiser des indicateurs clés de performance, sans passer par un superviseur SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*). Si le client veut toutefois un système de supervision, un SCADA sur mesure peut lui être fourni.

Les contrôleurs MGC690 d'ABB se composent de matériels et de logiciels de contrôle-commande robustes et fiables, rompus aux strictes exigences de l'automatisation de sites industriels. Les microréseaux pilotés par MGC690 se



distinguent par des boîtiers haute densité montés sur rail DIN, une architecture système flexible, des performances élevées, un contrôle-commande en temps réel et des communications haut débit sur Ethernet.

Les messages entre contrôleurs MGC690-G et MGC690-P transitent par une connexion Ethernet dédiée à 100 Mbit/s, qui évite de perturber ou d'interrompre l'infrastructure de communication en place. Les transmissions entre automates et niveau terrain empruntent pour leur part des liaisons RS 485 Modbus RTU, préaccordées dans le contrôleur.

L'architecture système embarquée des MGC690 permet à la solution PVD d'exécuter la totalité de la logique de contrôle-commande en moins de 100 millisecondes. Grâce à sa faible consommation électrique et à sa large plage de température de service, le MGC690 peut se loger dans des enveloppes étanches, sans ventilateurs, volets d'aération, filtres à air ni autre équipement de ventilation forcée. Finie la maintenance des systèmes de refroidissement ! Les coûts de fonctionnement des équipements de contrôle-commande sont aussi nettement revus à la baisse, à la grande satisfaction de l'exploitant.

En somme, la solution PVD d'ABB, ses contrôleurs MGC690 et ses onduleurs solaires string ou centraux sont les garants

Le système PVD d'ABB utilise des contrôleurs MGC690 pour bâtir une plate-forme matérielle et logicielle robuste et fiable répondant aux exigences de l'automatisation globale de centrales d'énergie.

d'un pilotage rapide, précis et continu des microréseaux hybrides PV-diesel, propre à stabiliser et à fiabiliser l'approvisionnement électrique du client. C'est là une alternative fiable, performante, économique et vite rentabilisée aux microréseaux ou extensions de réseau principal alimentés par énergies fossiles.



Craig Blizard

ABB Power Grids and Grid Automation
Product Group Microgrids & Distributed Generation,
Business Unit
Gênes (Italie)
craig.blizard@it.abb.com

Zoheir Rabia

ABB Discrete Automation & Motion
Terranuova Bracciolini (Italie)
zoheir.rabia@it.abb.com

Rédaction

Bazmi Husain

Chief Technology Officer
Group R&D and Technology

Ron Popper

Head of Corporate Responsibility

Christoph Sieder

Head of Corporate Communications

Ernst Scholtz

R&D Strategy manager
Group R&D and Technology

Andreas Moglestue

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

Édition

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

ABB 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 directement la rédaction.

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

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

Impression

Vorarlberger Verlagsanstalt GmbH
AT-6850 Dornbirn (Autriche)

Maquette

DAVILLA AG
Zurich (Suisse)

Traduction française

Dominique Helies
dhelies@wanadoo.fr

Avertissement

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

ISSN : 1013-3119

www.abb.com/abbreview



Dans le numéro 1117

Dessine-moi l'innovation

Il n'y a de réelle *percée* technologique que lorsque l'innovation permet d'accomplir des tâches jusqu'ici irréalisables ou d'améliorer l'existant. Entendons par là l'obtention d'un même résultat ou de meilleures performances avec plus de facilité, moins de moyens et moins d'argent, mais aussi toujours plus de sécurité, de respect de l'environnement et de partage de l'information.

Le premier numéro d'ABB review en 2017 sera justement consacré aux innovations du Groupe pour doper l'activité de ses clients en matière d'exploitation, de fonctionnalité, d'écologie ou de sécurité. Parmi les produits illustrant ces avancées, citons un détecteur de fuite pour conduites d'hydrocarbures, des capteurs sans fil pour l'automatisation de l'habitat, un remplaçant du SF₆ plus écoppatible pour l'appareillage à isolation gazeuse et une nouvelle gamme de robots.



À vos tablettes

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



Gardez le contact

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

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

Innovation



- 6 Avant-première**
Le meilleur de l'innovation ABB en 2016
- 12 L'électricité pour tous**
Transformateurs simplifiés pour applications de faible puissance
- 18 Se déformer sans céder**
Des transformateurs ABB à cuve souple pour diminuer les risques d'explosion
- 23 Protection rapprochée**
Comment protéger des défauts les microréseaux en courant continu basse tension comportant des générateurs photovoltaïques ?
- 30 Les variateurs au banc**
Optimiser les solutions moteur et variateur dans le nouveau laboratoire d'essais ABB
- 34 Tour de force**
Des moteurs électriques sans terres rares pour des solutions d'entraînement écoénergétiques
- 41 Au quart de tour**
Amortissement des oscillations de torsion à l'intersection des variateurs de fréquence et des systèmes mécaniques élastiques
- 49 Visionnaire**
La visualisation 3D au service de la production
- 53 ABB met la main à la pâte**
Stabiliser et optimiser la production de pâte à papier de qualité avec la commande avancée ABB
- 60 Alarmer, informer, guider**
Une plus grande efficacité opérationnelle par la gestion du cycle de vie des systèmes d'alarme
- 65 Vers le papier connecté**
Un projet de recherche ABB pour extraire des descriptions orientées objets des schémas de tuyauterie et d'instrumentation
- 70 Enquête de satisfaction**
Le verdict de nos lecteurs

Agroalimentaire



- 6 À votre santé !**
ABB met les bouchées doubles
- 9 Données massives en rayon**
La révolution de l'Internet des objets dans l'agroalimentaire
- 14 Quand le MES s'en mêle**
Un outil de suivi et de pilotage ABB pour « vitaminer » la production de la société DSM Nutritional Products
- 17 Formule gagnante**
L'usine 4.0 et l'Internet des objets, des services et des personnes permettent à la suite logicielle *Automation Builder* d'ABB de virtualiser rapidement la production manufacturière
- 20 Sûrs et durables**
Les rouages du lavage haute pression
- 24 Palettisation rapide**
Le robot IRB 460 cartonne
- 28 Cocktail d'innovations**
Des solutions ABB pour tous les goûts
- 30 De l'élevage à l'assiette**
Services de maintenance et d'exploitation ABB chez Marine Harvest
- 34 La recette du succès**
Jumeler débitmétrie massique et densimétrie
- 37 Du pareil au même**
Garantir un produit de qualité constante avec l'instrumentation ABB
- 40 La crème de l'instrumentation**
Des mesures précises et fiables pour l'industrie laitière
- 45 Le poids de l'alimentation**
Des applications à plein régime avec l'ASI durcie *PowerLine DPA* d'ABB
- 50 À l'unisson**
Les variateurs ABB font l'harmonie dans l'industrie alimentaire
- 52 125 ans d'ABB**
L'innovation suisse par excellence
- 55 Semi-conducteurs**
L'électronique de puissance ABB, d'hier à aujourd'hui
- 61 Le chantier de l'intégration**
Technologies de l'information et de la production conjuguent leurs données avec les services *Decathlon* d'ABB
- 68 AirPlus™**
Une alternative au SF₆ pour l'isolement et la coupure dans les appareillages électriques
- 73 Amortir les résonances**
Des méthodes de régulation ABB stabilisent le fonctionnement des convertisseurs réseau basse tension

Double anniversaire



- 7 **ABB, une entreprise en mouvement**
125 ans d'histoire jalonnée d'innovations
- 13 **Forces vives**
100 ans de recherche ABB
- 16 **L'innovation ABB en première ligne**
- 17 Variateurs de vitesse électroniques
- 19 Démarreurs progressifs
- 21 Des moteurs électriques au top
- 23 **Courant continu haute tension**
La technologie CCHT fait s'envoler le transport électrique
- 24 Transport massif d'électricité avec HVDC Light®
- 27 Sectionneur ultrarapide pour disjoncteur CCHT hybride
- 29 Câble CCHT extrudé
- 31 **Transformation tous azimuts**
Progrès dans l'isolation des transformateurs et les changeurs de prises pour applications de fortes puissances
- 32 Le changeur de prises fait le vide
- 35 La recherche fondamentale au secours des transformateurs convertisseurs CCHT
- 38 **Microréseaux**
Pour une énergie propre, fiable et bon marché
- 41 **Une bio du robot**
Petite histoire de la robotique industrielle
- 45 **Brasse coulée**
ABB et le brassage électromagnétique
- 49 **Mining 2.0**
Le nouveau filon de la mine
- 55 **Cure d'amaigrissement dans l'éolien marin**
Un nouveau concept ABB de plate-forme CCHT deux fois plus légère et affranchie du courant alternatif
- 57 **Au faite des économies**
Le stockage de l'énergie solaire s'invite à domicile
- 62 **Valoriser le stockage**
Étude de cas d'un microréseau batteries-diesel raccordé au réseau principal

Transports



- 6 **La ville prend l'air**
Plaidoyer pour l'électrification des transports publics urbains
- 8 **La charge fantastique**
Optimisation des batteries de bus électrique à recharge ultrarapide
- 13 **Coulée verte**
Les bornes de recharge rapide ABB Terra 53 CC/CA passent au vert
- 16 **L'électrification de la grande traction ferroviaire**
Une longue tradition ABB
- 25 **Programme minceur**
Par son moindre poids, le transformateur de traction Efflight® réduit les pertes électriques et la consommation d'huile jusqu'à 70 %
- 30 **À l'assaut des montagnes**
Efficacité énergétique des trains Allegra
- 35 **Effet tunnel**
Le tunnel de base du Saint-Gothard bien protégé grâce aux appareillages moyenne tension ZXO d'ABB et aux protections de câbles PMA
- 40 **Percée au Pôle Nord**
Alimentation électrique, propulsion et automatisation du plus moderne brise-glace portuaire au monde
- 44 **Téléservices en mer**
Le nouveau portail ABB de surveillance et d'intervention maritimes
- 50 **Automation & Power World 2017**
Le monde de l'automatisation et de l'énergie tient salon à Houston
- 51 **Pertes & profits**
Prédire les pertes parasites supplémentaires et optimiser le blindage de la cuve des transformateurs de puissance avec la simulation par éléments finis
- 57 **Des éoliennes mieux protégées**
Stratégies de commutation et de protection basse tension
- 63 **Protection suprême**
Prévenir les amorçages d'arc pour améliorer la sécurité
- 67 **Méga saut de puce**
Les dernières évolutions des composants IGCT de forte puissance
- 72 **Grid4EU**
Préfiguration des réseaux électriques de demain
- 79 **Ascension robotique**
Les robots intelligents exploitent la montée en puissance de l'Internet des objets, des services et des personnes (IoTSP) pour passer dans le « nuage »
- 84 **Solaire-diesel : mariage consommé**
L'électricité renouvelable s'invite dans les microréseaux
- 90 **Index 2016**
Tous les articles de l'année



Partenaire majeur



Pour creuser les pistes d'avenir, l'innovation ABB est déjà sur les rails

Au cœur des Alpes suisses, le chantier du plus long tunnel ferroviaire au monde touche à sa fin. Bientôt, 260 trains de marchandises et 65 de voyageurs franchiront chaque jour ses 57 kilomètres à une allure de 250 km/h, raccourcissant prodigieusement le temps de parcours sous le massif du Saint-Gothard. Une prouesse technologique dans les entrailles de la montagne, à laquelle ont œuvré les experts ABB avec des infrastructures sur mesure, un réseau de distribution électrique écoproformant et le plus puissant système de ventilation d'air frais jamais construit.

