

review

04|2019 fr

Électromobilité



- 06–43 Électromobilité
- 44–79 Productivité



Photo: TenneT

Co-simulation des disjoncteurs



Infrastructures de recharge

Formule E : sur la piste électrique





**Apprentissage automatique
et autonome**

05 **Éditorial**

Électromobilité

- 08 **Formule E : sur la piste électrique**
- 14 **Tout électrique aux chutes du Niagara**
- 18 **Le navire à hydrogène**
- 24 **La recharge en ligne de mire**
- 30 **L'avenir du réseau électrique**
- 38 **Infrastructures de recharge**

Productivité

- 46 **Apprentissage automatique
et autonome**
- 52 **Suivi d'état et optimisation**
- 56 **Prototypage virtuel de
l'instrumentation**
- 64 **Optimisation d'actifs**
- 68 **Co-simulation des disjoncteurs**
- 74 **Suivi de performances et supervision**

Le mot du moment

80 **Hybride**

81 **Publication ABB**

82 **Index 2019**



ABB peut s'appuyer sur plus d'un siècle d'expérience du génie électrique pour lui inventer de nouveaux usages. Frôlant la vitesse de la lumière, les électrons sont les vecteurs de technologies qui évoluent elles-mêmes à vive allure. Bienvenue à bord du bolide de l'innovation !



ÉDITORIAL

Électromobilité



Chers lecteurs,

Responsable de 20 % des émissions de CO₂ d'origine anthropique, le secteur du transport est à ce titre un sérieux candidat à la décarbonation et à l'électrification. Partis de zéro il y a quelques années, les véhicules électriques représentent aujourd'hui 5 % du parc mondial, et bien plus dans certains pays : en Norvège par exemple, plus de 50 % des nouvelles immatriculations sont des motorisations électriques, et ce n'est que le début.

Le passage des combustibles fossiles à l'électrique ne se limite pas à remplacer une source d'énergie par une autre ; il s'agit de créer une infrastructure radicalement nouvelle, de la gestion des ressources énergétiques à la construction de bornes de recharge.

La mobilité électrique ne se cantonne pas non plus à la voiture. ABB participe à l'électrification du rail depuis ses débuts. L'électromobilité investit aussi le marché des transports en commun, et même de la navigation. Découvrez dans ce numéro d'*ABB Review* le transport « zéro émission » et bien d'autres sujets.

Bonne lecture,

A handwritten signature in red ink, appearing to read 'Bazmi Husain'.

Bazmi Husain
Directeur des technologies



Électromo



bilité



14

La révolution de la mobilité électrique s'apparente à une course technologique dont les gagnants seront les entreprises, la société et l'environnement. Les solutions ABB contribuent à nous fournir toujours plus d'électricité à l'endroit et au moment où nous en avons besoin, et aident les bolides de Formule E à franchir la ligne d'arrivée en beauté.

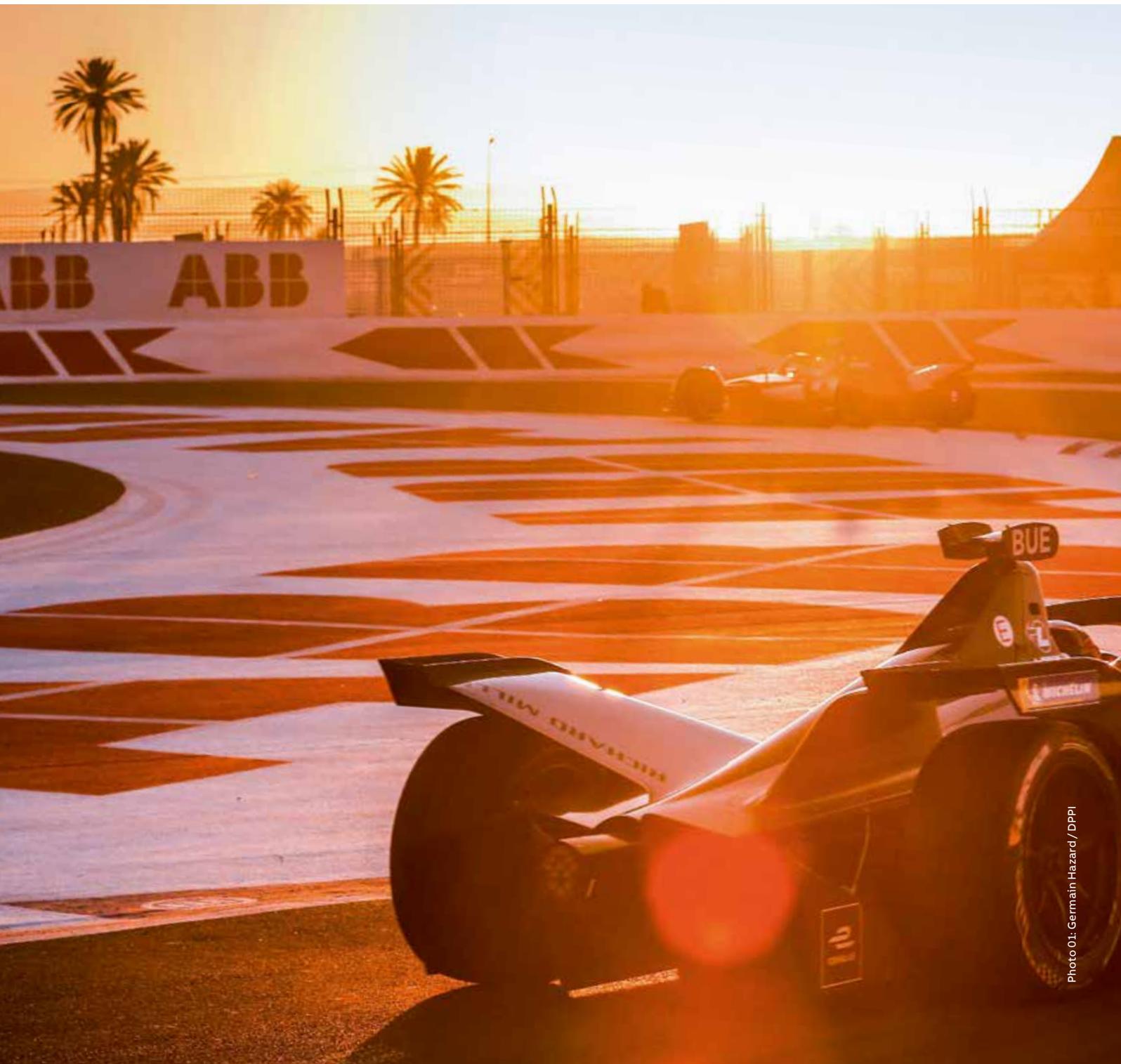
- 08 Formule E : sur la piste électrique
- 14 Vogue l'électrique aux chutes du Niagara
- 18 Le navire à hydrogène... « QRV »* ?
- 24 Bus électrique : la recharge en ligne de mire
- 30 L'avenir du réseau à l'ère de la mobilité électrique
- 38 Infrastructures de recharge : quand innovation rime avec collaboration



08

ÉLECTROMOBILITÉ

Formule E : sur la piste électrique



01



Le championnat de course automobile électrique ABB FIA Formule E offre non seulement un spectacle à couper le souffle mais aussi une plate-forme d'essai et de démonstration des nombreuses possibilités offertes par le numérique et la mobilité électrique.



Anthony Rowlinson
Asea Brown Boveri Ltd
Zurich (Suisse)

anthony.rowlinson@ch.abb.com



02

	Gen2 (saison 5)	Gen1 (saisons 1-4)
Vitesse de pointe (km/h)	280	225
Accélération 0-100 km/h (s)	2,8	3,0
Puissance en mode Course (kW)	200	180
Puissance maxi en mode Attaque (kW)	250	-
Capacité de la batterie (kWh)	54 (course complète)	28 (changement de voiture à mi-course)
Tension de la batterie (V)	900	700
Poids de la batterie (kg)	385	320
Poids minimum de la voiture (kg)	900	880
Durée de la course	45 min + 1 tour	Selon circuit

03

La révolution de l'électromobilité touche tous les modes de transport dans le monde entier : outre les véhicules électriques connectés qui se multiplient sur nos routes, citons les prototypes d'avions électriques, les ferrys autonomes, les bus à recharge rapide, entre autres.

Mais il est un événement qui remporte la palme de l'innovation technologique : le championnat ABB FIA de Formule E. Depuis sa première édition à Pékin en 2014, ce sont 22 pilotes des plus talentueux qui s'affrontent circuit après circuit pour le titre. ABB est sponsor principal du championnat depuis janvier 2018 →1.

Un silence assourdissant

Le plus surprenant dans une course de Formule E ? Le bruit, ou plutôt, l'absence de bruit. La première course de voitures 100 % électriques procède d'une idée qui secoue les fondements mêmes du sport mécanique, que l'on pense souvent indissociable du vrombissement de bolides propulsés par des moteurs thermiques surpuissants, réglés comme des horloges suisses à 20 000 tr/min.

Depuis ses débuts, la Formule E promeut une tout autre voie avec des véhicules électriques à batteries et des transmissions également électriques - à haut rendement qui s'appuient sur le *nec plus ultra* de l'électromobilité !

—
La Formule E ABB FIA met en compétition 22 des meilleurs pilotes mondiaux au volant de petits bijoux de technologie automobile.

Résultat : sur des circuits de plus en plus implantés au cœur des grandes métropoles, nul rugissement sous le capot, mais un léger sifflement strident, caractéristique des chevaux électriques →2.

—
01 Une Nissan e.Dams en action sur le circuit de Marrakech (Maroc) pendant le championnat 2019

—
02 Adieu au vacarme assourdissant des moteurs de F1 ! Les véhicules électriques, ici lors de l'ePrix de Santiago du Chili, allient prouesses technologiques et absence de bruit.

—
03 Comparatif des voitures de 1^{re} et 2^e génération

—
04 Vue éclatée d'une Formule E équipée de batteries de 2^e génération

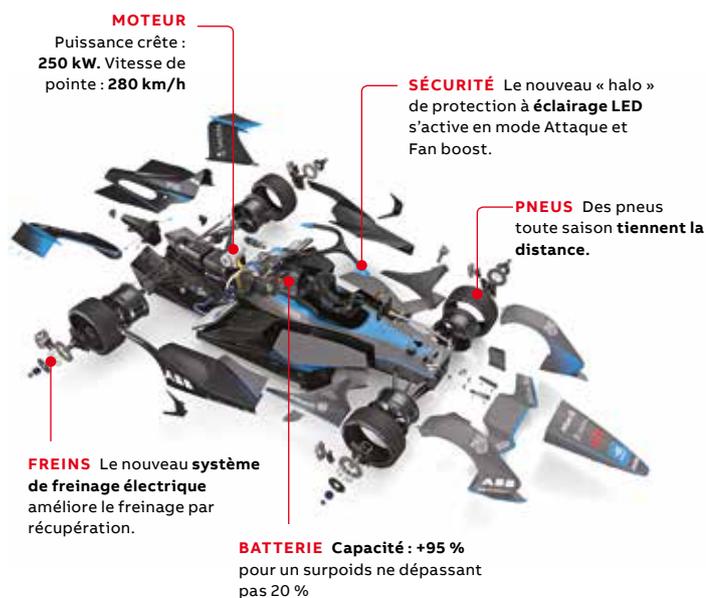
—
05 Jean-Éric Vergne au volant d'une DS E-Tense « Gen2 » de l'écurie franco-chinoise DS Techeetah en 2019 à Hong-Kong

La vitesse supérieure

En à peine cinq ans, la Formule E ABB est passée du statut d'audacieuse start-up sur un créneau de niche, moquée aussi bien par les purs et durs de ce sport que par les barons les moins visionnaires de l'industrie automobile, à celui de rendez-vous incontournable auquel se bousculent les grands constructeurs dans l'espoir de « verdir » leur blason. Si Audi, BMW, Nissan et Jaguar font déjà la course en tête, leurs écuries seront rejointes l'an prochain par les géants historiques du secteur que sont Porsche et Mercedes-Benz.

—
L'épreuve offre un panorama des dernières avancées en matière d'électrification, de transports urbains et de mobilité connectée.

Pourquoi un tel engouement ? Parce que le championnat ABB de Formule E cadre parfaitement avec les questions de plus en plus pressantes de durabilité, d'efficacité énergétique, de lutte contre la pollution de l'air et la congestion urbaine. L'épreuve, tout en étant viscéralement sportive, offre un panorama des dernières avancées dans de nombreux domaines : technologies d'électrification, transports urbains, mobilité connectée, ville « intelligente » et production d'énergie renouvelable.



04



05

« E » comme électrique

Les courses alignent 11 équipes de 2 voitures électriques chacune, conduites par 22 stars du volant dont une bonne partie vient des rangs de la Formule 1.

Chaque équipe utilise une variante personnalisée du même modèle de base : un monoplace à cockpit ouvert, doté d'une coque de protection en fibre de carbone, résistante aux impacts, qui accueille le pilote. La suspension s'appuie sur cet élément central, tandis qu'une carrosserie aérodynamique recouvre la motorisation : deux aspects communs à l'ensemble des monoplaces actuels.

Si la Formule E ne se distingue guère sur ce plan, c'est à l'arrière de la voiture que se déploie toute sa spécificité. Là, point de réservoir, de moteur à combustion ni de boîte de vitesses semi-automatique, mais une imposante batterie à haute capacité, un ou deux moteurs et une transmission à un seul rapport. Tout ce qui fait le « E » de la Formule E ABB.

—
Derrière le pilote se déploie tout ce qui fait la spécificité d'une voiture de course électrique.

Batteries

Les batteries sont fabriquées et fournies par McLaren Applied Technologies (MAT), société sœur de la célèbre écurie McLaren. Identiques pour l'ensemble des véhicules, elles jouent un rôle décisif dans la performance.

La batterie de nouvelle génération est plus encombrante et plus lourde (385 kg) que celle qui équipait les voitures des quatre premières saisons, et affiche une tension de 900 V, soit 200 V de plus que la précédente. Sa puissance crête de 250 kW (environ 340 chevaux) autorise 280 km/h en vitesse de pointe.



06

07



08

—
06 La plus grande capacité de la batterie de deuxième génération évite le changement de voiture à mi-course.

—
07 Le nouveau système électronique de freinage régénératif améliore encore la performance des voitures.

—
08 La version de course du Jaguar I-PACE utilise les chargeurs ABB pour refaire « le plein d'électrons » entre deux courses.

Au-delà des chiffres, la véritable innovation réside dans la capacité de cette batterie à alimenter le moteur de la voiture pendant toute une course. Ce n'était pas le cas lors des saisons précédentes, si bien que les pilotes effectuaient la première moitié de la course dans une voiture et en changeaient à mi-parcours pour récupérer une batterie chargée.

Même si ce spectacle participait à l'attraction de la Formule E ABB, il braquait aussi les projecteurs sur le principal frein à l'achat d'une électrique pour nombre de conducteurs : l'autonomie. Cette crainte n'a plus lieu d'être avec les batteries de deuxième génération dont la densité énergétique a augmenté de 95 % pour un gain de masse de seulement 20 % →6. Une prouesse qui fait de la Formule E ABB la vitrine des progrès rapides de la motorisation électrique.

Ces batteries « Gen2 » sont conçues dans l'optique d'une gestion thermique optimisée. Les cellules lithium sont en effet particulièrement sensibles à la température : trop froide, celle-ci dégrade leur rendement ; trop chaude, elle réduit la durée de vie. Les concepteurs se sont donc attachés à homogénéiser le refroidissement entre les différentes cellules qui constituent la batterie.

Terrain idéal

Derrière leur ligne agressive et stylée, les Formule E cachent un concentré d'innovations et d'expérimentations techniques. Le championnat est pour cela l'occasion idéale d'éprouver les nouvelles technologies développées par les écuries, comme le double moteur (un pour chaque roue arrière) visant à améliorer le rendement de la chaîne de transmission et de traction.

Tous les véhicules embarquent des systèmes de récupération de l'énergie produite lors des nombreuses décélération brusques qui jalonnent la course. Jusqu'à l'an dernier, c'était le pilote qui « dosait » ce freinage régénératif. Cette saison, une unité de commande électronique améliore le système →7 : un exemple parlant des technologies de gestion d'énergie de pointe qui sont si utiles aux constructeurs pour mettre au point les modèles de série.

En charge

L'expertise ABB profite également à la course Jaguar I-PACE eTROPHY qui se déroule en parallèle de 10 épreuves de Formule E.

—
La capacité de la batterie a quasiment doublé pour un surpoids de seulement 20 %.

Dans la foulée, le SUV 100 % électrique I-PACE a été élu voiture de l'année 2019 au Salon de New York par 86 journalistes spécialisés venant de 24 pays, quelques semaines après avoir été également primé en Europe. La version de course de l'I-PACE →8 utilise une variante dédiée du chargeur en courant continu Terra 53 d'ABB. Les ingénieurs du Groupe ont réussi à reconditionner un chargeur Terra standard en un module sur roues suffisamment compact et maniable pour être transporté d'un circuit à un autre. À mi-saison, les nouveaux chargeurs affichaient toujours zéro défaillance.

La Formule E vit une période passionnante tant sur le plan sportif, avec une compétition palpitante, que sur le plan technologique, où d'autres collaborations ABB se profilent.

À la fois banc d'essai et vitrine de la mobilité électrique, c'est un championnat à nul autre semblable. Comme le résume si bien le pilote de l'écurie Nissan e.Dams Sébastien Buemi, vainqueur de la deuxième saison et ambassadeur ABB : « *Courir en Formule E ABB, c'est comme prendre le volant pour l'avenir.* » •

ÉLECTROMOBILITÉ

Vogue l'électrique aux chutes du Niagara

La technologie zéro émission d'ABB propulsera les deux nouveaux traversiers *Maid of the Mist* 100 % électriques pour mener en douceur et en silence des milliers de touristes au pied des chutes du Niagara. Une première aux États-Unis !



Priscila Faester
ABB Inc. Marine and Ports
Miramar (États-Unis)

priscila.faester@
us.abb.com

Rien d'étonnant à ce que ce site emblématique accueille les derniers progrès du génie électrique puisque c'est ici même, en pleine « guerre des courants » opposant Thomas Edison, partisan du continu (CC), et Nikola Tesla, promoteur de l'alternatif (CA), que Georges Westinghouse décida de construire en 1896 l'une des premières grandes centrales hydroélectriques et lignes de transport CA du continent nord-américain pour éclairer la ville de Buffalo, distante d'une quarantaine de kilomètres. Quelques années plus tard, l'électricité produite par les chutes illuminait de nombreux quartiers et avenues de New York, dont Broadway. L'heure de gloire avait sonné pour Tesla.



Edward Schwarz
ABB Inc. Marine and Ports
Miramar (États-Unis)

edward.schwarz@
us.abb.com

Plus de 120 ans après les premiers pas du génie électrique, les chutes du Niagara redeviennent le berceau de l'innovation.

ABB a très tôt pris part à cette saga légendaire [1] : dès 1891, Charles Brown et Walter Boveri fondent Brown Boveri & C^{ie} (BBC) pour aider General Electric, la société créée par Edison, à contrer la domination du courant alternatif. Ironie du sort, près d'un siècle plus tard, ABB rachète à son tour l'activité Transport et Distribution de Westinghouse.

Aujourd'hui, plus de 120 ans après ces percées électrotechniques, les chutes du Niagara redeviennent le berceau de l'innovation : la technologie zéro émission d'ABB propulsera la nouvelle génération de navires 100 % électriques *Maid of the Mist*, qui amènent chacun plus de 500 visiteurs au pied des trois chutes du Niagara, côtés américain et canadien. Cette excursion est l'une des attractions touristiques les plus populaires en Amérique du Nord, mais aussi la plus ancienne.

Fonctionnant uniquement sur batteries, les deux catamarans →1 longs de 28 mètres seront les premières embarcations tout électriques construites aux États-Unis. Un progrès sur les bateaux électriques habituellement équipés de groupes diesel pour alimenter les auxiliaires à bord ou manœuvrer en l'absence de propulsion électrique.

Tourisme zéro émission

Merveilles de la nature, les chutes du Niagara se marient mal avec les émanations, bruits et vibrations des motorisations diesel. Ces nouveaux bateaux électriques, qui entreront en service fin 2019, promettent une navigation douce, silencieuse et écologique, en osmose avec les éléments →2.



01

— 01 Vue d'artiste des deux nouveaux bateaux électriques de conception modulaire *Maid of the Mist*. Les modules ont été construits dans un chantier naval, puis amenés sur site par camion et grutés (non sans difficulté en raison de la topographie du lieu) dans l'atelier d'assemblage en bordure de rivière. Leur coque en alliage d'aluminium de catégorie marine 5086 H116 leur garantit une bonne résistance à la corrosion.

Chargement à quai

Chaque année, les *Maid of the Mist* emmènent en excursion 1,6 million de touristes. À quai, leurs batteries lithium-ion pourront se recharger en sept minutes entre chaque voyage, soit le temps de débarquement et d'embarquement des passagers. Cette recharge rapide suffira à alimenter les deux moteurs d'une puissance totale de 400 kW. Chaque excursion de 30 min consomme environ 38 kWh. Les deux packs de batteries haute capacité de 316 kWh se rechargent à 100 % la nuit et finissent la journée avec encore 80 % de charge. Naturellement, il s'agit d'une électricité « verte », d'origine hydraulique.

— La recharge rapide de 7 minutes suffit à maintenir la propulsion électrique des bateaux par deux moteurs totalisant 400 kW.

Le tout-électrique pour tous

Créée en 1846, la société *Maid of the Mist* est encore aujourd'hui une entreprise familiale de renommée mondiale, bien décidée à prouver la viabilité commerciale de la navigation électrique. Si ses nouveaux bateaux comptent parmi les tout premiers à propulsion entièrement électrique, d'autres types d'embarcations vont leur emboîter le pas : transbordeurs, chalands fluviaux, remorqueurs portuaires et dragues, etc. La marine marchande est en effet l'une des grandes responsables des émissions de dioxyde de carbone (3 à 5 % du total mondial) et d'oxydes d'azote (plus de 5 %).

S'il est encore difficile à l'heure actuelle de construire des navires de haute mer tout électriques, force est de constater que les équipements gagnent en compacité et en performance, ouvrant la voie à nombreuses possibilités impensables il y a quelques années. Le vaisseau électrique et autonome pointe à l'horizon...

Dans la mouvance du transport électrique

ABB propose des solutions de mobilité électrique pour d'autres marchés que le transport maritime. Début 2019, le Groupe avait vendu plus de 10 000 chargeurs CC ultrarapides dans 73 pays. Et des stations de recharge de forte puissance comme la Terra HP d'ABB sont prêtes à alimenter les batteries de plus grande capacité des véhicules d'aujourd'hui et de demain.

Dans le monde entier, ABB aide les acteurs du transport à offrir des services de bus électrique qui réduisent l'impact des activités humaines sur l'environnement. Le Groupe est aussi l'un des fondateurs des standards de recharge CHAdeMO et CCS, ainsi que le précurseur des bornes de recharge rapide CC (2010), du déploiement de chargeurs à l'échelle d'un pays (2012) et des réseaux de recharge de bus électrique en Europe (2016).

En avant toute !

L'électrification marine gagne de l'intérêt dans le monde entier à mesure que l'Organisation maritime internationale (OMI) durcit ses règles, notamment en vue de réduire dès le 1^{er} janvier 2020 la teneur limite en soufre des combustibles marins. Dans ce contexte, les opérateurs du

transport maritime se tournent vers l'hydrogène, domaine qu'investit la recherche ABB en participant par exemple au projet MARANDA [2], cofinancé par l'Union européenne. La conception et la mise en œuvre d'une pile à combustible (PAC) à membrane échangeuse de protons de 165 kW sur le navire de recherche *Aranda* servira à tester la production d'une électricité non polluante à très faible empreinte acoustique et vibratoire. ABB fournira la technologie de conversion d'énergie entre la PAC et la centrale électrique du navire.

—
Des stations de recharge de forte puissance comme la Terra HP d'ABB alimenteront les batteries haute capacité du futur.

ABB a également signé avec Ballard Power System, numéro un mondial des solutions énergétiques propres à technologie hydrogène, un protocole d'entente pour mettre au point la prochaine génération de PAC dédiées au transport maritime durable [3,4].



—
02 Le *Maid of the Mist* s'approche des chutes du Niagara (côté américain). À l'avenir, les visiteurs pourront profiter du panorama sans pollution ni bruit ni vibration.

—
03 Premier ferry électrique islandais, dessiné par Polarkonsult



03

Bibliographie

[1] Siegrist, D., « ABB, une entreprise en mouvement, 125 ans d'histoire jalonnée d'innovations », *ABB Review* 3/2016, p. 7-12.

[2] Kajava, M., « MARANDA – Aranda goes hybrid », *ABB Marine & Ports, Generations*, p. 122-123, disponible sur : <http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AK-K107045A7585&Language-Code=en&Document-PartId=&Action=Launch>, décembre 2017.

[3] *ABB et Ballard Power Systems s'unissent pour développer une centrale électrique de piles à combustible sans émission pour l'industrie du maritime*, disponible sur : <https://new.abb.com/news/detail/5421/abb-et-ballard-power-systems-s'unissent-pour-developper-une-centrale-electrique-de-piles-a-combustible-sans-emission-pour-l'industrie-du-maritime>, Zurich, juin 2018.

[4] Vanska, K., et al., « Le navire à hydrogène... QRV* ? », *ABB Review* 4/2019, p. 18-23.

Cette solution devrait accélérer la généralisation des solutions de navigation électrique zéro émission, en plus de permettre aux armateurs de répondre aux impératifs croissants de dépollution de leurs opérations.

—
Le projet MARANDA vise à concevoir et à mettre en œuvre une pile à combustible à membrane échangeuse de protons de 165 kW sur le navire de recherche *Aranda*.

Les deux partenaires comptent faire passer la capacité des PAC existantes de l'ordre du kilowatt à celui du mégawatt, puissance nécessaire à la propulsion des géants des mers. Capable de débiter 3 MW, le nouveau système se logera dans un seul module, d'un encombrement équivalent à celui d'un moteur marin classique à combustibles fossiles.

Cap vers la navigation écologique

La technologie des batteries vient également en appui des navires zéro émission qu'ABB a déjà motorisés en Europe, comme le premier ferry électrique islandais →3. Ce transbordeur, opérationnel depuis peu, embarque 550 passagers et 75 véhicules pour une traversée (parfois houleuse) de 13 km entre le port de Landeyjahöfn et l'île de Vestmann. ABB a fourni les appareils propulsifs et les batteries de 3 MWh mais aussi les génératrices, transformateurs, tableaux de commande, ainsi que les systèmes de gestion d'énergie et de contrôle du stockage électrique. Des bornes dédiées Onboard DC Grid™ rechargent à quai les batteries en seulement 30 min, par une connexion CC. À la différence des deux traversiers du Niagara, le ferry dispose d'un groupe diesel de secours, dont il ne fera sans doute que rarement usage.

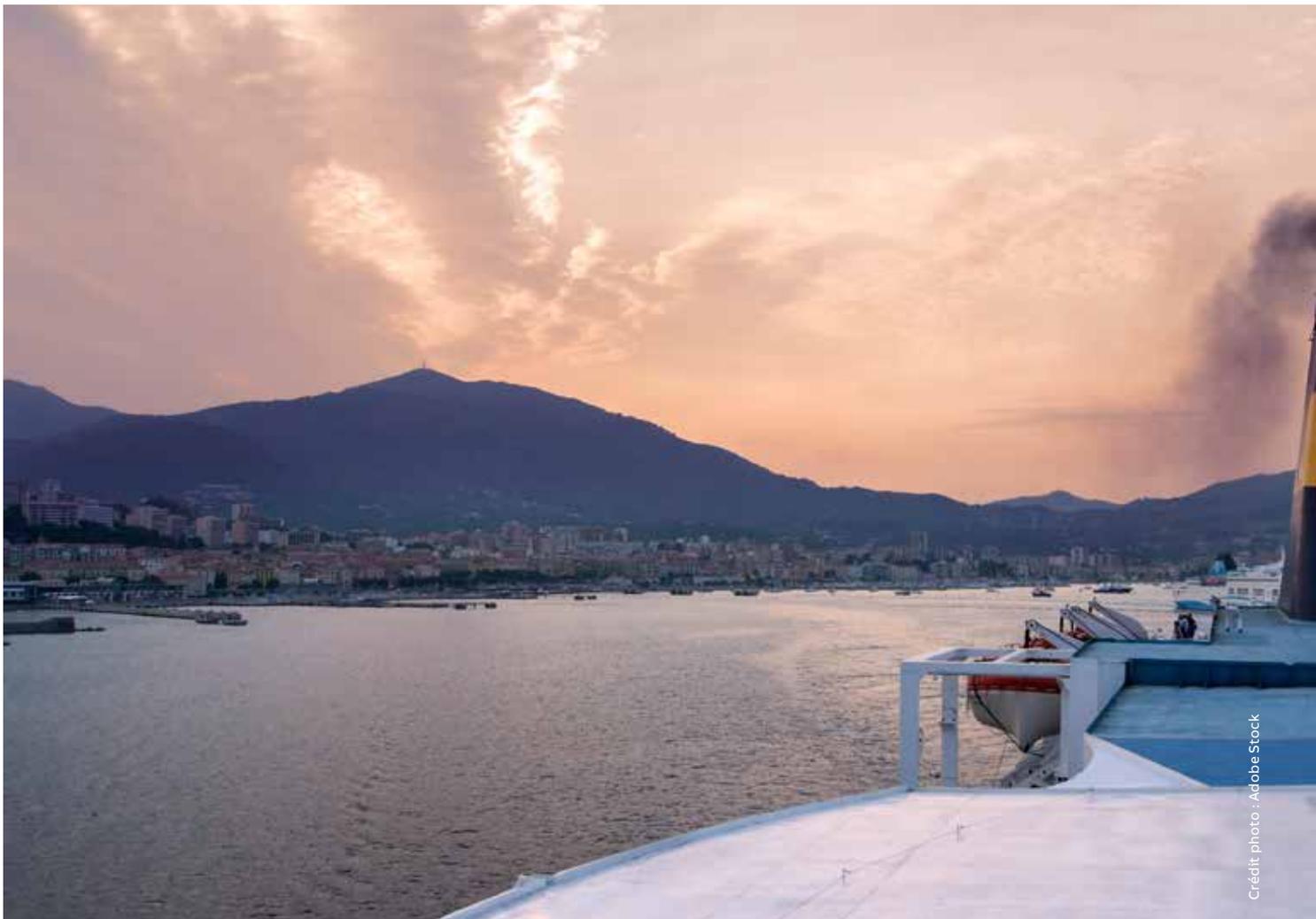
Ces exemples d'avancées dans l'électromobilité, portées par le riche catalogue ABB de solutions d'électrification marine et son engagement en faveur d'une énergie propre et durable, préfigurent une nouvelle ère des transports. La réduction de la pollution aux chutes du Niagara n'est pas seulement un enjeu environnemental pour préserver ce cadre d'exception ; elle est la preuve que les mobilités du futur sont d'ores et déjà à notre portée. •

ÉLECTROMOBILITÉ

Le navire à hydrogène...

« QRV »* ?

Le transport maritime recherche des solutions alternatives aux combustibles fossiles pour répondre aux besoins croissants et diversifiés du secteur. La pile à hydrogène pourrait bientôt réduire radicalement les gaz à effet de serre (GES) émis par les navires. Combinée à des technologies de batteries plus matures, elle améliore la densité énergétique et l'endurance des embarcations, ouvrant la voie à une navigation « zéro émission ».



Crédit photo : Adobe Stock

* Signaux de service employés par les opérateurs radio en navigation maritime et en aéronautique. Le code QRV signifie « Êtes-vous prêt ? » et QUK « Pouvez-vous m'indiquer l'état de la mer observée à... (lieu ou coordonnées) ? ».



— En avril 2018, le Comité de protection du milieu marin (MEPC) de l'Organisation maritime internationale a adopté une première stratégie visant à réduire les gaz à effet de serre émis par les navires. La décarbonation du secteur, sur le moyen et long terme, passe par de nouveaux systèmes propulsifs et des carburants zéro émission ou presque.

—
Klaus Vanska
Sami Kanerva
 ABB Marine & Ports
 Helsinki (Finlande)

klaus.vanska@fi.abb.com
 sami.kanerva@fi.abb.com

Jostein Bogen
 ABB Marine & Ports
 Billingstad (Norvège)

jostein.bogen@no.abb.com

George Skinner
 Ballard Power Systems
 Vancouver (Canada)

L'Organisation maritime internationale (OMI) ambitionne de réduire de 50 % les émissions de GES d'ici à 2050 [1]. Un objectif qui ne pourra être atteint en se limitant à un ou deux combustibles alternatifs, d'autant que chaque substitut a aussi ses marchés et usages propres. Il faudra accompagner les clients dans l'étude des différentes alternatives et le choix, difficile, de la solution la plus adaptée à leurs besoins. Agrocarburant, biomasse (dont valorisation énergétique des déchets), soleil, vagues, vent : autant de sources d'énergie possibles dont la disponibilité dépend de la région, de la demande, des modes d'exploitation et de commercialisation, entre autres.

L'électricité d'origine renouvelable peut servir à produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. Les carburants synthétiques comme l'ammoniac, le méthane ou le méthanol, encore largement issus de ressources fossiles, pourraient aussi être tirés de cette électricité verte. Les moteurs à combustion interne, technologie parfaitement maîtrisée, restent compatibles avec les carburants alternatifs comme l'ammoniac, moyennant le plus souvent quelques modifications. Les piles à combustible (PAC) proposent une autre voie. Le coût des combustibles fabriqués à partir d'énergie verte serait sensiblement identique, la différence venant de leur utilisation et de leur disponibilité.

—
 La pile à combustible améliore la densité énergétique et l'endurance des navires, ouvrant la voie à une navigation « zéro émission ».

De nouvelles pistes pour la mobilité durable

Aucune alternative ne va sans contraintes. Par exemple, l'hydrogène a une densité énergétique faible ; son transport et son stockage exigent de le comprimer et de le refroidir à très basses températures ; l'ammoniac, très corrosif, doit aussi être refroidi, tandis que le méthanol est toxique. Sans compter que chacun a ses propres techniques de transport et de stockage. La panacée n'existe pas. Plusieurs pays anticipent l'essor de la demande et s'intéressent à la production d'hydrogène à partir



01

de diverses sources d'énergie, selon la géographie : solaire pour les Émirats arabes unis, géothermie pour l'Islande. Reste à résoudre le problème du transport de l'énergie jusqu'au lieu d'utilisation.

ABB et Ballard Power Systems viennent de signer un protocole d'accord sur le développement de piles à combustible nouvelle génération pour l'industrie maritime →1. Conçues, développées et validées conjointement, ces PAC devraient accélérer l'adoption de solutions de mobilité durables et aider les armateurs à répondre à une demande croissante de transport maritime propre. L'ambition d'ABB et de Ballard est d'optimiser les technologies existantes afin de faire passer la capacité des PAC du kilowatt au mégawatt : une solution pionnière adaptée aux grands navires →2. D'une puissance de 3 MW, le nouveau système tient dans un module de la taille d'un moteur marin traditionnel.

Innovateur et fournisseur mondial de solutions vertes, Ballard Power Systems déploie depuis le début des années 1980 des systèmes de piles à hydrogène destinés à un usage terrestre. C'est à la faveur de son rôle de conseiller auprès de l'Armée canadienne que Ballard s'est intéressé à l'hydrogène en mer.

« Les sous-marins de la Marine canadienne sont équipés de PAC depuis 1993, explique George Skinner, expert en sécurité chez Ballard. Ce seul fait démontre l'absence de danger de l'hydrogène : un tube d'acier immergé à des centaines de mètres, c'est bien le dernier endroit où l'on veuille embarquer un carburant dangereux ! »

Si l'hydrogène peut faire peur, il n'est pas forcément plus dangereux que d'autres carburants ; il est juste différent →3. « L'hydrogène a une énergie explosive plus faible par unité de volume, un point d'ignition plus bas et une vitesse de combustion et de dispersion plus élevée, rappelle George Skinner. Très inflammable, il requiert une prévention efficace des fuites, l'installation de systèmes de détection performants et une ventilation suffisante en permanence. Le Code international de sécurité pour les navires utilisant des gaz ou d'autres combustibles à faible point d'éclair [2] régit déjà son usage, et DNV GL anticipe une amélioration des conduites. De nouvelles règles et normes sont à l'étude. »

—
Objectif : réaliser un système de production d'énergie à sécurité intrinsèque en mer, à l'instar de ce qui se fait à terre.

Acteur majeur de l'assurance qualité et de la gestion des risques, DNV GL a publié en janvier 2018 les premières règles pour les navires à hydrogène, calquées sur les référentiels d'autres secteurs utilisateurs de longue date. Pour George Skinner, « elles reprennent les grands principes applicables au gaz naturel liquéfié et à d'autres combustibles à faible point d'éclair. Les techniques de manipulation sont bien connues et la technologie est rodée. Le véritable défi est de développer l'infrastructure ».

—
01 ABB et Ballard Power Systems se sont associés pour mettre au point des piles à combustible zéro émission destinées au transport maritime.

—
02 Principe d'une pile à membrane échangeuse de protons (PEM)

L'objectif est d'obtenir un système de production d'énergie intrinsèquement sûr en mer, à l'instar de ce qui se fait à terre. Les PAC affichent une longue durée de vie et nécessitent peu de maintenance. Il n'empêche : « *L'hydrogène souffre à tort d'une image négative, liée à l'incendie qui provoqua la destruction du dirigeable allemand Hindenburg le 6 mai 1937, ainsi qu'à la bombe H (pour hydrogène), pourtant basée sur une réaction nucléaire, déplore George Skinner. Mais aujourd'hui, il est omniprésent dans l'industrie, l'aérospatiale et le transport* ».

Le croisiériste Viking Cruises a consulté la NASA, utilisatrice depuis des décennies du combustible, pour en savoir plus sur l'avitaillement. De même, les PAC du laboratoire de Ballard Power fonctionnent à l'hydrogène liquide. « *Nous sommes livrés deux fois par semaine depuis 20 ans. Approvisionner un navire en mer, c'est en gros la même chose, rien de bien sorcier* », ajoute-t-il dans un sourire.

« *Ensuite, tout n'est que souplesse. L'hydrogène est un vecteur énergétique, produit à partir de nombreuses sources (soleil, gaz, vent, eau, etc.).*

Le Danemark en est un bon exemple : le surplus régulier d'énergie éolienne est converti en hydrogène pour une utilisation ultérieure. »

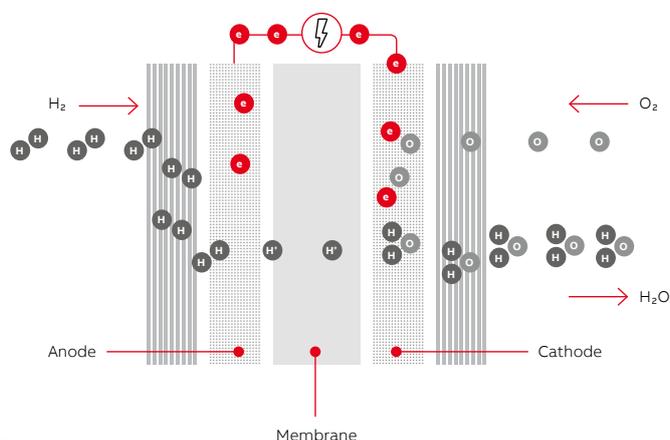
Autant de fabuleuses opportunités en mer, selon lui. « *Les volumes transportés mobiliseront les acteurs de l'énergie ; les infrastructures portuaires suivront et pourront approvisionner en hydrogène d'autres modes de transport (fret routier ou passagers). L'usage marin de l'hydrogène sera un catalyseur majeur de son développement économique. Les navires de croisière devraient adopter d'abord une solution hybride, le recours à la PAC étant réservé aux servitudes à quai et à la navigation dans les fjords. Mais l'hydrogène pourrait bien un jour assurer aussi l'alimentation électrique du bateau, y compris sa propulsion, et la production d'eau pour divers usages à bord.* »

—
La combinaison de PAC et de batteries est essentielle à la vision « électrique, numérique, connectée » de l'avenir du transport maritime chez ABB.

HYBRIDship

La combinaison de PAC et de batteries est essentielle à la vision « électrique, numérique, connectée » de l'avenir du transport maritime chez ABB. Le Groupe mène à Trondheim (Norvège) des essais avec le laboratoire SINTEF Ocean pour optimiser les interactions PAC-batteries sur de courtes traversées (bac, ferry) et valider leur intégration en salle des machines par les chantiers navals Fiskerstrand. Ces travaux alimenteront aussi les futures révisions des règles gouvernant l'emploi de l'hydrogène à bord des navires.

Lancé en 2017 sous la houlette de Fiskerstrand Holding, le projet HYBRIDship est soutenu par le programme d'accélération technologique « Pilot-E », financé par le Conseil de la recherche norvégien, Innovation Norway et l'entreprise publique Enova. Il s'appuie sur le savoir-faire d'ABB dans le domaine de l'intégration système, la longue expérience de SINTEF Ocean dans la propulsion marine et l'expertise de SINTEF Industry en matière de PAC. Un ferry à hydrogène transportant des passagers sur une ligne intérieure sera opérationnel fin 2020 →4.



DÉMYSTIFIER L'HYDROGÈNE

- L'hydrogène est l'élément le plus léger de l'univers. Il est insipide, inodore et non toxique.
- Une pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEM) laisse passer les protons mais pas les électrons, lesquels assurent la production électrique.
- Plus légère et plus compacte que son homologue à oxyde solide, la PEM fonctionne à plus basse température.
- L'hydrogène se disperse très vite dans l'air et tombe rapidement sous le seuil d'inflammabilité.
- Sa puissance de détonation est plus faible que celle d'autres combustibles courants.
- Sa combustion très rapide limite considérablement le temps d'exposition du personnel et des installations à la chaleur ou aux flammes.
- La chaleur rayonnée émise par un feu d'hydrogène est faible.
- Le seuil d'auto-inflammation de l'hydrogène est élevé, mais l'énergie nécessaire pour l'enflammer extrêmement faible, d'où l'importance des raccordements et d'une mise à la terre.
- L'hydrogène est converti directement en électricité et en chaleur, sans combustion.

L'alimentation par batteries jouera assurément un rôle crucial pour atteindre le zéro émission dans les fjords norvégiens à partir de 2026.

Le programme conjoint ABB/SINTEF s'intéressera aussi à l'avitaillement en hydrogène et aux infrastructures de soutage.

Les essais simuleront les conditions caractéristiques d'une ligne régulière, sur un trajet de 10 kilomètres, pour tester la robustesse des systèmes de propulsion par PAC en usage intensif. Ce projet représente une étape importante dans l'utilisation concrète de l'hydrogène pour la propulsion marine. Il permettra notamment de définir la configuration optimale de la salle des machines pour accueillir les PAC et la cohabitation au quotidien avec d'autres systèmes à bord.

Le développement conjoint ABB/SINTEF s'intéressera aussi à l'avitaillement en hydrogène et aux infrastructures de soutage. Les résultats devraient accélérer les travaux de l'Autorité maritime norvégienne visant à actualiser la réglementation sur le combustible hydrogène.

Demain, le navire autonome

Non polluantes, les PAC conviennent également au transport autonome. Exemptes de pièces mobiles, elles n'exigent qu'une maintenance minimale, à l'inverse de la mécanique des groupes motopropulseurs actuels. Elles s'intègrent bien dans une solution 100 % autonome puisqu'elles peuvent fonctionner plus longtemps sans intervention humaine sur site.

—
03 Les atouts de l'hydrogène

04 Le premier ferry zéro émission, équipé de PAC, devrait entrer en service sur une ligne intérieure norvégienne fin 2020.

—
Exempte de pièces mobiles et peu gourmande en maintenance, la PAC est le mode de propulsion idéal du navire autonome.

Compte tenu du calendrier réglementaire, les carburants alternatifs devraient faire leur apparition en mer dès 2025. Les PAC à hydrogène issu de sources renouvelables et le stockage de l'énergie par batteries assureront ainsi un transport 100 % propre. Alors, le bulletin météo marine ? « QUK »* ? Temps clair, mer belle. On appareille ! •

La recherche de carburants marins alternatifs n'est pour le moment qu'au stade du pilote. Aiguillonnés par le durcissement de la réglementation sur les émissions polluantes, les programmes de R&D et les projets lancés par des compagnies pionnières donnent le cap. Les croisiéristes s'intéressent aussi de plus en plus à la faisabilité de la technologie hydrogène, au premier chef pour des servitudes zéro émission dans les ports.

—
Bibliographie

[1] Note de l'Organisation maritime internationale pour le Dialogue Talanoa de la CCNUCC, *ADOPTION OF THE INITIAL IMO STRATEGY ON REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS AND EXISTING IMO ACTIVITY RELATED TO REDUCING GHG EMISSIONS IN THE SHIPPING SECTOR*, disponible (en anglais) sur : https://unfccc.int/sites/default/files/resource/250_IMO%20submission_Talanoa%20Dialogue_April%202018.pdf

[2] Organisation maritime internationale, *International Code of Safety for Ship Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels (IGF Code)*, disponible (en anglais) sur : <http://www.imo.org/en/OurWork/Safety/SafetyTopics/Pages/IGF-Code.aspx?> consulté le 10 juillet 2019.



04

ÉLECTROMOBILITÉ

Bus électrique : la recharge en ligne de mire

Dans l'exploitation de lignes de bus électriques, aux itinéraires et horaires fixes, la question de l'autonomie n'est pas cruciale. L'enjeu est plutôt de garantir la rapidité et l'efficacité des recharges de batteries, clés d'un coût de fonctionnement réduit. Quels sont alors les paramètres incontournables d'une telle solution ?



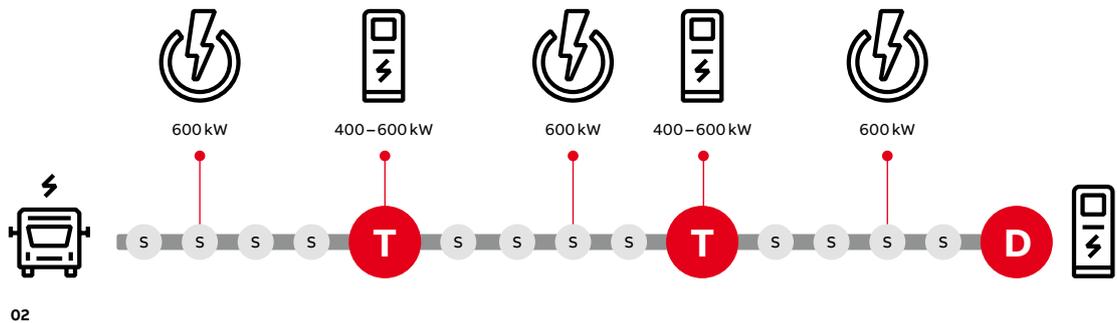


— 01 En 2016, ABB a été mandaté par les Transports publics genevois et le constructeur suisse HESS pour équiper 12 bus électriques TOSA de systèmes embarqués de recharge ultrarapide ; des véhicules aussi souples d'utilisation que leurs homologues diesel.



Alexandre McCraw
ABB Ltd.
Baden (Suisse)

alexandre.mccraw@
ch.abb.com



Quelle distance un bus électrique peut-il parcourir sans être contraint de recharger ses batteries ? La question est d'importance quand il s'agit d'une voiture électrique dont l'intérêt est précisément de permettre à ses occupants de se déplacer à loisir partout. Mais cette exigence ne concerne pas les bus, qui suivent un itinéraire précis, avec des arrêts déterminés à horaires fixes, connus de tous. L'enjeu n'est donc pas tant l'autonomie que la vitesse et la fréquence auxquelles les batteries peuvent se recharger. Voyons ci-après comment un système de recharge rapide réduit le coût global de fonctionnement d'une ligne de bus électriques et quelles sont les grandes composantes d'une telle solution.

Des coûts d'exploitation maîtrisés

Abaisser le coût global de possession d'une ligne de bus signifie exploiter le strict minimum de véhicules, ce qui nécessite de reproduire à l'identique les caractéristiques d'une flotte diesel : horaires, temps de battement, nombre de bus et de conducteurs, capacité de transport de passagers.

Maîtriser le coût global signifie exploiter le strict nombre de véhicules nécessaires.

Quelle que soit la source d'énergie utilisée, la maintenance d'une flotte coûte cher. À l'inverse, celle de l'infrastructure, une fois en place, est nettement moins onéreuse, pour une durée d'exploitation plus longue. Ainsi, pour le transporteur, l'équation est simple : optimiser le nombre de véhicules en maximisant l'utilisation de l'infrastructure et en utilisant un seul format de batterie permet de diminuer le coût global.

Plusieurs stratégies de recharge

Les différentes méthodes employées aujourd'hui – recharge de nuit au dépôt ou d'appoint

(« biberonnage ») au terminus de la ligne – sont tributaires de la durée de recharge du véhicule et des exigences de ponctualité.

La recharge au dépôt nécessite une capacité de batterie suffisante pour effectuer un parcours complet. Or des batteries volumineuses réduisent la capacité d'emport tout en augmentant le coût (jusqu'à 45 % de la facture) et le poids du véhicule.

Dans le cas du biberonnage à des stations situées aux terminus, il faut pouvoir recharger les batteries en profitant du battement entre deux courses successives. Ce laps de temps sert normalement au repos des conducteurs mais aussi de tampon pour résorber les éventuels retards. Aux heures de pointe, où il est plus court, l'exploitant est souvent face à un dilemme : respecter les horaires quitte à se contenter d'une recharge partielle, ce qui expose les batteries à une décharge profonde, ou faire fi de la ponctualité au profit d'une recharge complète. Respecter ces deux contraintes (temps de recharge suffisant et ponctualité) passe par un plus grand nombre de véhicules et de conducteurs, mais aussi de stations de recharge aux terminus et dépôts. Ce surcroît de ressources induit des besoins supplémentaires en espace et en énergie, ainsi qu'un surcoût. En résumé, un temps de recharge trop long dégrade la ponctualité de la ligne mais aussi sa rentabilité.

Un compromis

À Genève et à Nantes, les municipalités ont pris la mesure des arbitrages imposés par les différents systèmes de recharge. Toutes deux ont mis en place un réseau de bus électriques qui optimise le nombre de véhicules tout en tirant le meilleur parti des possibilités de recharge. Malgré des contextes d'exploitation et des réseaux électriques différents, les villes ont adopté des principes similaires.

Le biberonnage, par exemple, n'a pas seulement lieu au terminus et au dépôt, mais aussi tout au long

—
02 Déroulé des différents points de recharge d'un bus : arrêts réguliers (S), terminus (T) et dépôt (D)

—
03 Recharge embarquée, comparée à la recharge classique

du parcours, pendant la montée et la descente des passagers →1,2. Cette recharge ultrarapide, dite « par opportunité », présente les avantages suivants :

- Maintien des batteries à un niveau de charge élevé ;
- Diminution des longues périodes de recharge ;
- Allongement de la durée de vie des batteries en leur évitant la décharge profonde.

Le véhicule se recharge en cours de route aux heures de pointe, au terminus pendant les heures creuses.

Avantages d'un système de recharge embarqué

À Nantes comme à Genève, les portiques de recharge, ou « totems », implantés au terminus ou le long du parcours, délivrent 400 à 600 kW afin de maximiser le niveau de charge à chaque passage. Cette infrastructure n'est efficace que si elle est couplée à des batteries capables d'absorber une telle puissance →6. Aussi les véhicules sont-ils équipés de batteries à l'oxyde de titanate de lithium (LTO), dont le débit de charge/décharge atteint « 10C ». À noter que plus cette valeur normalisée est élevée, plus le débit est important. C'est là un atout majeur de la solution ABB : peu importe sa capacité, une batterie trop lente à l'utilisation ou à la recharge s'avère inutile.

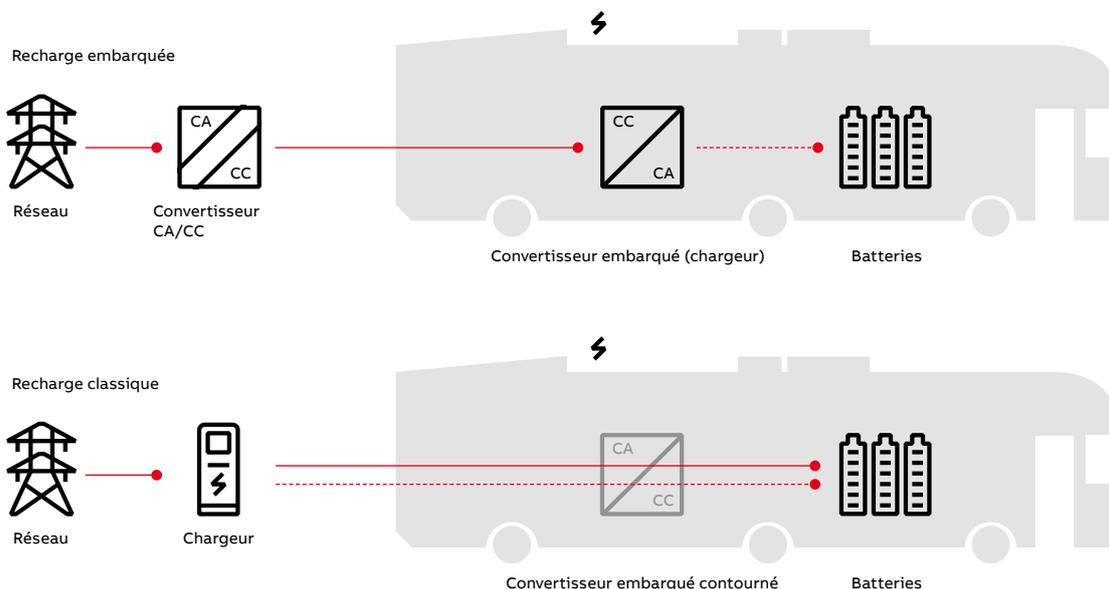
Autre attribut commun aux bus nantais et genevois, la recharge embarquée →3 : les bus captent le courant continu fourni par les caténaires, qu'un convertisseur à bord transforme en courant alter-

natif pour alimenter les auxiliaires et les moteurs. En inversant le flux de puissance entre batterie et moteur, il est possible d'utiliser ce courant continu pour charger les batteries.

Ainsi la recharge n'interrompt-elle pas la communication entre la batterie et le chargeur embarqué, vitale pour le bon fonctionnement du bus. Les échanges entre véhicule et chargeur se résument à un simple contrôle du contact physique, sans autre information supplémentaire.

—
À Genève comme à Nantes, le biberonnage n'a pas seulement lieu au terminus et au dépôt, mais aussi tout au long du parcours.

Nos deux réseaux urbains utilisent aussi le même système de pantographe rapide : il faut moins d'une seconde pour connecter le bus au chargeur →4,5. Grâce au pré-déploiement du pantographe à l'approche d'un point de recharge et à l'alignement automatique avec le totem, le conducteur ne voit aucune différence avec les autres arrêts. Chaque seconde ainsi gagnée contribue à réduire le nombre de points de recharge ultrarapide le long du trajet ainsi que la durée d'immobilisation au terminus. Avantages pour l'exploitant : plus de souplesse, une meilleure régulation du trafic aux heures de pointe et, grâce à une taille de



—
04 Le pantographe du bus assure une recharge rapide aux arrêts et au terminus.

—
05 Totem accumulateur d'énergie à Genève. Le réseau nantais, pour sa part, n'a pas besoin de stockage d'énergie aux arrêts de bus.

—
06 Principaux composants d'un réseau de bus électriques

—
07 Recharger vite et souvent est une excellente stratégie pour minimiser les coûts d'exploitation et garantir la ponctualité en toutes circonstances et par tous les temps.

batterie commune à tous les véhicules, la possibilité de réaffecter un bus à d'autres lignes pour répondre à l'évolution de la demande.

Ponctualité garantie

Adopter la bonne méthode de recharge des batteries permet de maîtriser les coûts de fonctionnement des bus électriques. La recharge au dépôt nécessite des batteries plus volumineuses et plus chères, qui limitent la capacité de transport ; le biberonnage tend rapidement à rogner sur les temps de battement et exige plus de véhicules et d'infrastructures pour maintenir la ponctualité. La meilleure façon de respecter les horaires aux heures de pointe ou par mauvais temps, par exemple, tout en évitant l'envolée du coût global, est de recharger le plus rapidement et le plus souvent possible, comme c'est le cas à Genève et à Nantes →7.

—
Les réseaux de bus genevois et nantais utilisent le même système de pantographe rapide : la connexion bus-point de charge se fait en moins d'une seconde.

Pour l'exploitant, le critère clé n'est pas l'autonomie des véhicules, mais bien la ponctualité. Une recharge bien pensée garantit un coût global maîtrisé tout en relevant le défi de l'écologie, au bénéfice de tous. •

04



Points de recharge ultrarapide sur le parcours



Batteries LTO



Infrastructure haute capacité



Recharge embarquée



Pantographe rapide

06



05



07

ÉLECTROMOBILITÉ

L'avenir du réseau à l'ère de la mobilité électrique

À l'horizon 2040, l'Europe devra avoir mis en place un train de mesures qui permettront de répondre à la hausse de la consommation de pointe, corollaire de la généralisation des véhicules électriques. Anticipant cette évolution, ABB a mené une analyse approfondie des besoins énergétiques futurs des grands pays européens et dressé un état des lieux des problématiques liées au développement de mobilités plus vertes et moins énergivores. Il en a déduit une série de recommandations relatives au transport et à la distribution d'électricité.

Thierry Lassus
ABB Sécheron
Power Grids – Segment
Transportation
Genève (Suisse)

thierry.lassus@
ch.abb.com

Alexandre Oudalov
Adrian Timbus
Power Grids Business
Zurich (Suisse)

alexandre.oudalov@
ch.abb.com
adrian.timbus@
ch.abb.com

Il faut remonter au moins quatre générations en arrière pour trouver une révolution équivalente à celle qui se profile actuellement dans les transports. Il y a quelque 120 ans, difficile d'imaginer que les véhicules à moteur allaient remplacer les fiacres et les chevaux ; pourtant, dès 1908, New York comptait autant d'automobiles en circulation que de chevaux (100 000).

Cette transition ne s'est pas résumée à l'abandon d'une force motrice au profit d'une autre, elle a aussi impliqué la construction d'une infrastructure entièrement nouvelle. Par exemple, il a fallu développer et industrialiser la production de goudron et de carburant, paver les rues, mettre en place un système de marquage et de signalisation, définir un code de la route, etc., avant de pouvoir vraiment utiliser voitures et camions. La société aussi a dû s'adapter : adieu garçons d'écurie, charrons, forgerons, bourreliers, maréchaux-ferrants et selliers ; place aux pompistes, aux ingénieurs, aux mécaniciens et aux ouvriers des chaînes de montage.

Dans l'Union européenne, la pollution atmosphérique coûte quelque 100 milliards d'euros par an à l'assurance maladie.

Aujourd'hui, notre société vit les prémices d'un changement de paradigme tout aussi profond : le remplacement du moteur thermique et des combustibles fossiles par la mobilité électrique. Au fur et à mesure que cette dernière s'imposera comme premier mode de déplacement pour la population, les entreprises et les régies publiques, il deviendra de plus en plus urgent d'investir dans des infrastructures et des technologies à même de faciliter et d'accompagner la transition. L'un des enjeux stratégiques sera la fourniture du courant nécessaire au chargement des millions de véhicules électriques à batterie (VEB) qui prendront bientôt la route.

Moteurs de changement

La transition vers la mobilité électrique procède de trois grandes priorités. La première est de réduire nos émissions de gaz à effet de serre. Dans le contexte de la lutte contre le changement climatique, 174 pays ont signé en 2016 l'Accord de Paris qui prévoit de limiter la hausse des températures bien en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels. Le secteur des transports, qui représente aujourd'hui 28 % des émissions de CO₂ en France, devra notamment avoir ramené ses émissions à 29 % en dessous de leur niveau de 2015 à l'horizon 2028.

Il est en outre tout aussi urgent de réduire les autres types d'émissions et de polluants nocifs pour la santé



01

— 01 Les technologies qui sous-tendent le virage de l'électromobilité sont celles qui rendront possible la fourniture d'une puissance suffisante pour recharger les futurs millions de véhicules électriques, comme cette borne de recharge rapide.

comme pour l'économie. Or la pollution atmosphérique aux oxydes d'azote et aux particules fines est en grande partie imputable aux transports. L'Agence européenne pour l'environnement estime à 391 000 par an le nombre de décès prématurés causés par les particules fines dans l'Union européenne [1]. Mais la pollution atmosphérique a aussi un impact économique : le coût pour l'assurance maladie est supérieur à 100 milliards d'euros par an, sans parler de la baisse des rendements agricoles ou de la dégradation des bâtiments et ouvrages de génie civil exposés à ces polluants.

Troisième moteur de cette transition : la qualité de vie et l'attractivité des villes et des régions. Au-delà de la pollution atmosphérique et sonore, les bouchons dans les centres urbains sont synonymes de pertes de temps et de productivité. L'amélioration de l'intermodalité, des véhicules autonomes ainsi que les progrès en matière de synchronisation et d'optimisation de la gestion du trafic grâce à la communication entre les véhicules et l'infrastructure routière, aideront à alléger ces contraintes et à attirer les sociétés, start-ups et créatifs, qui veulent des transports efficaces et un environnement sain.

Relations et interactions entre VEB et réseau électrique

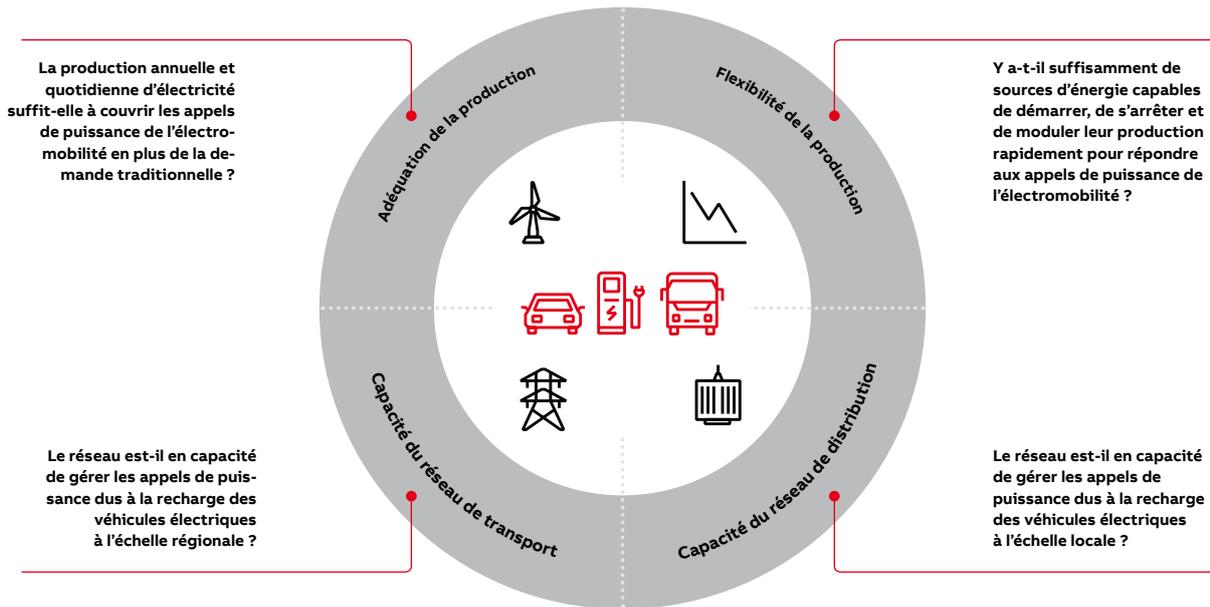
Conscient des pressions environnementales, sociales et économiques qui favorisent les systèmes de

transport électriques alimentés par les énergies renouvelables (EnR), ABB a analysé en profondeur plusieurs scénarios anticipant la demande énergétique en 2020, 2030 et 2040 – période qui devrait voir la mobilité électrique s'imposer progressivement -, en Allemagne, en France et au Royaume-Uni.

ABB a mené une analyse approfondie des besoins énergétiques futurs en Allemagne, en France et au Royaume-Uni.

Cette enquête nous permet de conclure que, si la production énergétique actuelle peut la plupart du temps couvrir la consommation due à la recharge des VEB, certaines configurations, par exemple lors des pics de consommation ou lorsque l'offre d'EnR est limitée, risquent de conduire à des situations de pénurie ou de surcharge des réseaux de transport et de distribution actuel →2.

Le maintien de la stabilité et de la continuité de service passera par une mise à niveau et une expansion des réseaux régionaux et transfrontaliers qui faciliteront les échanges d'EnR entre régions dont les productions sont complémentaires.



02

—
02 Les grands enjeux d'une transition réussie vers la mobilité électrique : flexibilité, capacité, adaptabilité

03 La mobilité électrique sur terre, en mer et dans les airs

Des solutions existent pour limiter la menace que la généralisation de l'électromobilité fait peser sur les réseaux : par exemple, déplacer la recharge des VEB en heures creuses ou en période de production EnR excédentaire. Les infrastructures pour bus électriques sont déjà capables de piloter la recharge nocturne au dépôt de manière à ne pas recharger tous les véhicules en même temps [2] →3,4.

Ces technologies pourraient se généraliser à l'ensemble des VEB. L'étalement des recharges dans le temps réduirait le risque de surcharge du réseau au moment du basculement en heures creuses ; il faudra pour cela mettre en place des incitations financières (tarif réduit par exemple) encourageant la charge des véhicules à des heures plus tardives.

Les systèmes de stockage d'énergie seront également appelés à jouer un rôle de premier plan dans l'infrastructure électrique, notamment avec l'importance croissante de l'énergie d'origine renouvelable. Au niveau des réseaux de distribution, des systèmes de stockage de petite taille allègent considérablement la puissance instantanée transitée sur le réseau en étalant les soutirages dans le temps. Le nombre de technologies de stockage, à petite ou grande échelle, en cours de développement ou de lancement commercial ne cesse d'augmenter.

D'autres solutions à l'étude envisagent d'utiliser les batteries des véhicules électriques pour former un réseau de stockage décentralisé. Une voiture étant généralement à l'arrêt 95 % du temps, il semble

logique de vouloir en faire une réserve d'énergie mobilisable pour soutenir le réseau en période de pointe. Cette option, qui nécessite une technologie de recharge bidirectionnelle, pourrait réduire le coût global d'un VEB, le propriétaire de ce dernier étant libre de revendre de l'électricité au réseau au moment opportun.

Des solutions à l'étude envisagent de créer un réseau de stockage décentralisé alimenté par les batteries des véhicules électriques.

Autre possibilité : récupérer les batteries du véhicule en fin de vie pour les réutiliser dans des applications de stockage stationnaire, où elles permettraient de déplacer la consommation en dehors des périodes de pointe.

La gestion centralisée des bornes de recharge peut aussi contribuer au déploiement de l'électromobilité. Une centrale électrique virtuelle se compose de plusieurs actifs décentralisés de production ou de stockage : bornes, points de consommation, ouvrages de production et systèmes de stockage. Un programme informatique optimise et hiérarchise la consommation de l'ensemble. C'est grâce à une telle plate-forme que l'énergéticien allemand Stadtwerke Trier garantit la recharge des VEB à partir d'électricité 100% renouvelable.

SUR TERRE, EN MER, DANS LES AIRS

— Les premiers bus électriques de la ville de Genève : aux arrêts, des bornes rechargent partiellement les batteries en un temps record, diminuant d'autant la durée de recharge au terminus.

ABB investit massivement dans la recherche-développement pour lever les obstacles associés à l'électrification des transports. Le Groupe se concentre sur l'amélioration de l'efficacité énergétique des technologies embarquées et des solutions de recharge, tout en s'attachant à identifier et à développer de nouvelles offres de services permises par la numérisation du secteur.

Ferroviaire

L'apport d'ABB concerne tous les modes de transport, dont le rail. Ce sont des produits ABB qui ont permis au TGV d'atteindre 575 km/h en 2007. En 2012, le Groupe a déployé à Philadelphie (États-Unis) le premier système de récupération d'énergie de freinage basé sur un système de stockage électrique sur batterie. C'est également ABB qui a électrifié en Suisse le Gothard, le plus long tunnel ferroviaire du monde, en 2016.

Bus, voitures et bateaux

Les technologies ABB contribuent à la réduction des émissions de CO₂ dans le secteur du transport individuel et collectif. Le Groupe a ainsi mis au point, en étroite collaboration avec les autorités genevoises, le premier bus électrique utilisant sa technologie de recharge ultrarapide TOSA (« Trolleybus Optimisation Système Alimentation ») [1]. Des bornes rechargent partiellement les batteries du bus aux arrêts, diminuant d'autant la durée de recharge au terminus. Une technologie récompensée par le trophée Smart Awards à l'occasion du salon Smart Grid Paris 2014.

Depuis, ABB n'a cessé d'innover en matière de recharge ultrarapide, avec l'une des premières bornes de 150 kW aux États-Unis, la première borne de 350 kW au monde et le premier bus électrique de 24 mètres de long [2]. Sans oublier le premier ferry 100 % électrique entre la Suède et le Danemark, qui se recharge à quai en moins de 10 minutes.

En 2016, dans le cadre d'un partenariat avec Volvo, ABB a automatisé deux systèmes de recharge rapide destinés aux bus de la capitale wallonne, Namur, qui effectuent en quelques minutes des recharges ponctuelles de forte puissance, à chaque terminus. En plus d'éviter les retours au dépôt, cette technologie permet de réduire l'encombrement et la masse des batteries, donc d'embarquer plus de passagers. Le temps gagné se traduit par un plus grand nombre de trajets par bus. Depuis ce pilote, ABB a vendu 10 500 chargeurs en courant continu ultrarapides dans 73 pays [3].

Avion

Il y a quelques années seulement, qui aurait pensé pouvoir faire le tour du monde dans un aéronef fonctionnant à l'énergie solaire ? C'est ce qu'a accompli *Solar Impulse*, né de la rencontre entre deux aventuriers et une équipe d'ingénieurs et de scientifiques ABB. •

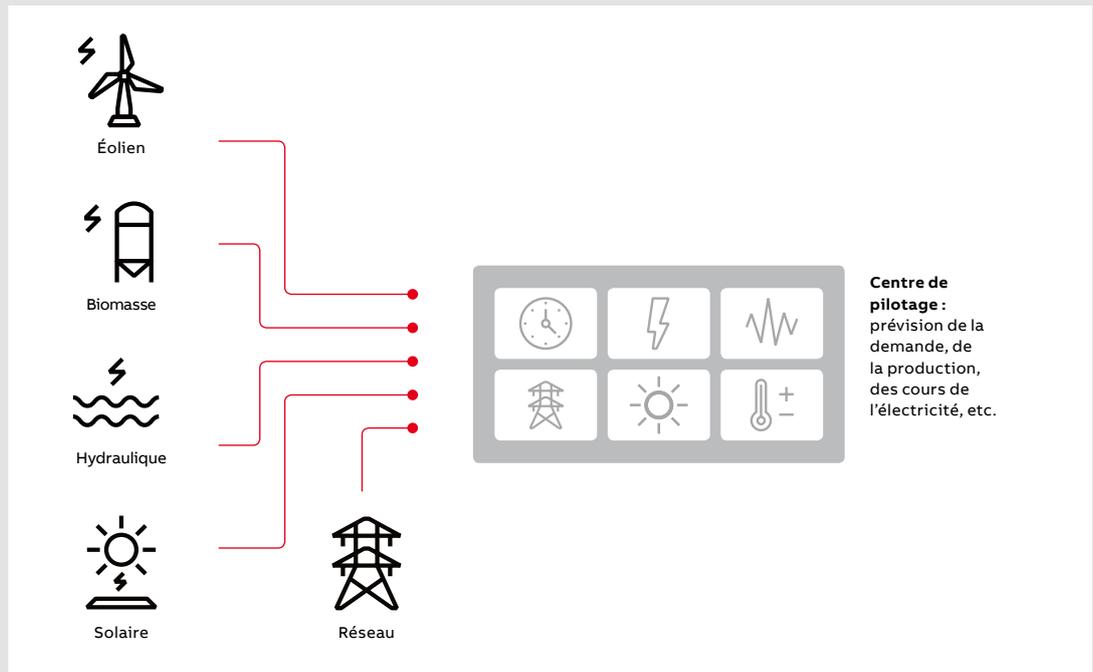
Bibliographie

[1] McCraw, A., « La recharge en ligne de mire », *ABB review* 4/2019, p. 24–28.

[2] <https://new.abb.com/news/detail/4948/abb-fourmit-des-chargeurs-a-haute-puissance-pour-les-installations-inaugurales-delectrify-america>

[3] <https://new.abb.com/news/detail/24231/abb-to-supply-high-power-charging-for-new-era-of-e-mobility-in-scandinavia>





(R)ÉVOLUTION DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE

— Une centrale virtuelle fournit à l'exploitant une toute nouvelle « boîte à outils » pour optimiser la fourniture électrique sur un ensemble d'actifs.

L'essor de la mobilité électrique doit s'accompagner de progrès technologiques au niveau du réseau, lui-même déjà bousculé par l'injection massive d'énergie d'origine renouvelable. Nous présentons ci-dessous trois exemples d'innovations.

Recharge séquentielle dans les dépôts de bus

Les bus de demain seront électriques. La recharge de leurs batteries représentant un énorme appel de puissance, elle se déroulera en majorité aux heures où la demande en électricité est faible. Soucieux d'optimiser leur investissement, les exploitants des flottes électriques auront tout intérêt à recharger plusieurs bus sur une même borne. Pour répondre à ce besoin de mutualisation, ABB a développé des bornes d'une capacité de 150 kW, capables de charger trois bus d'affilée. Ce procédé de « recharge séquentielle » peut être programmé à distance. La puissance de charge est ainsi lissée sur toute la nuit, et les véhicules sont complètement chargés en début de journée.

Stockage d'énergie pour étaler les besoins de puissance

Dans le cadre de l'électrification d'une ligne de bus à Genève (Suisse), ABB a intégré des bat-

teries à certains arrêts équipés de bornes de recharge ultrarapide. Ces batteries font office de tampon : entre deux passages de bus, elles se rechargent à la puissance de 50 kW, tout en étant capables de débiter 600 kW en une vingtaine de secondes. Cette innovation révolutionnaire réduit la demande de pointe et donc la sollicitation du réseau de distribution local à moins de 10 % de sa valeur. Le concept pourrait s'étendre à bien d'autres domaines, par exemple les stations de recharge rapide des véhicules électriques. Atouts supplémentaires, ces batteries améliorent la qualité de la fourniture électrique, offrent un soutien de tension et une réserve de puissance.

Gestion centralisée des stations de recharge

Une centrale virtuelle agrège stations de recharge, sites de production et de consommation ainsi que systèmes de stockage électrique. L'exploitant dispose ainsi d'une toute nouvelle boîte à outils qui lui permet de réagir aux aléas et d'optimiser la fourniture sur un ensemble d'actifs. C'est ainsi que l'un des plus grands « agrégateurs » allemands est en mesure de garantir une recharge de véhicules électriques 100 % d'origine renouvelable, en plus de fournir des services système tels que réglage de tension et réserve de puissance. •

—
04 (R) Évolution du réseau électrique

05 Prévisions de pénurie électrique en Allemagne les jours de faible production d'origine renouvelable

Préconisations

L'infrastructure actuelle de production, de transport et de distribution électrique devrait pouvoir répondre à la demande de demain, moyennant quelques ajustements et renforcements dont le coût et l'impact sur la continuité de fourniture resteront raisonnables.

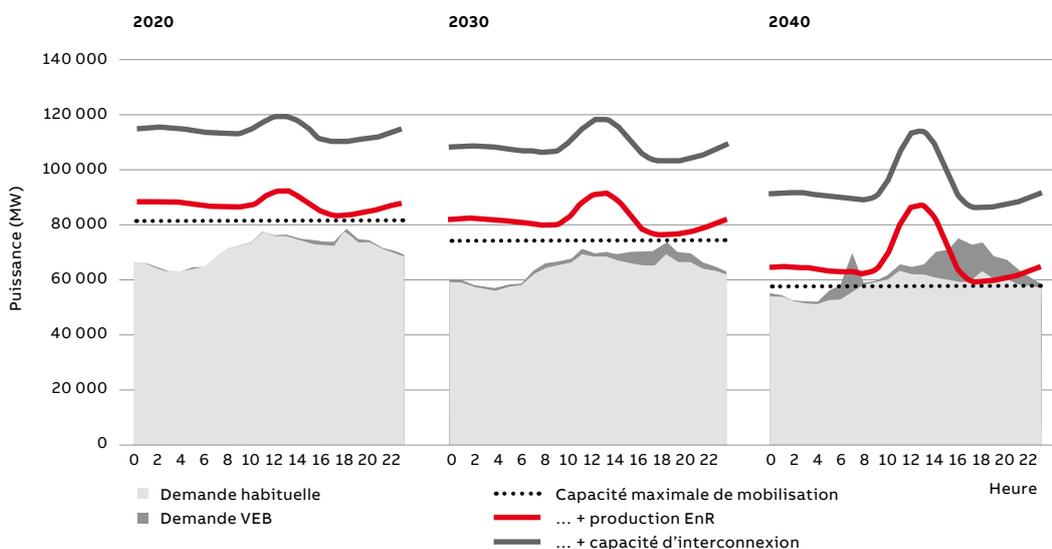
Toute évolution de la production devra tenir compte du nécessaire besoin de flexibilité →5. Par exemple, les centrales à gaz à cycle ouvert peuvent être démarrées et arrêtées quasi instantanément sans dégradation du matériel, à la différence de celles à cycle combiné ou des centrales au charbon. Leur flexibilité en fait une source d'appoint pour suppléer les productions de base et EnR lors des pics de consommation.

Les réseaux de transport continueront à se développer dans les années à venir, principalement pour accompagner l'essor des EnR. Le numérique →6,7 y joue déjà un rôle majeur, appelé à s'accroître. Prolonger et renforcer l'existant faciliteront l'intégration des EnR tout en améliorant la capacité d'adaptation aux nouveaux usages de consommation.

Les réseaux de distribution, notamment à destination du tertiaire, évolueront progressivement pour fournir la puissance appelée par les VEB, en particulier dans les lieux susceptibles d'accueillir un grand nombre de ces véhicules en charge.

De plus, les solutions de stockage émergentes pourront être déployées en des endroits stratégiques, choisis en fonction des besoins locaux et régionaux, afin de soulager les systèmes de production, de transport et de distribution. Les décideurs doivent continuer à encourager l'innovation technologique afin de limiter les perturbations réseau causées par les bornes de recharge.

—
Une centrale virtuelle agrège de nombreux actifs dont elle optimise et hiérarchise la consommation.

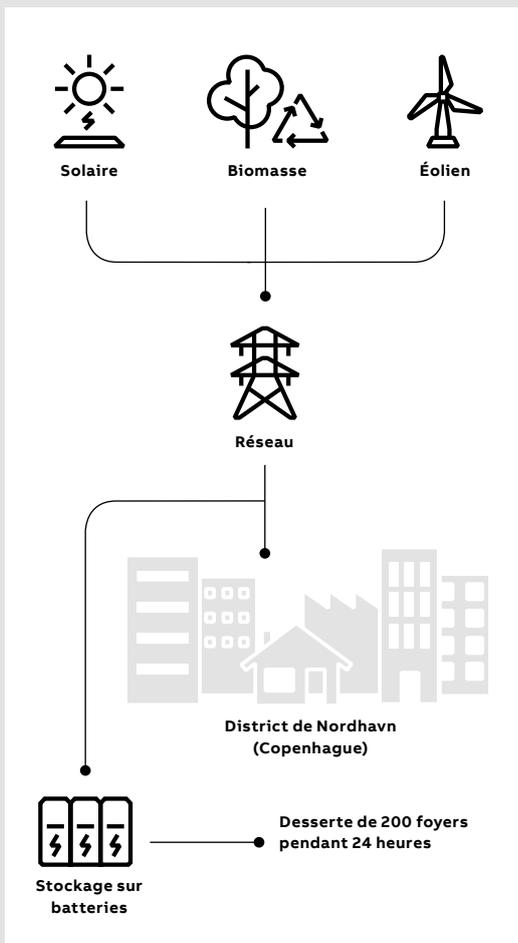




06a

—

UNE SECONDE VIE POUR LES BATTERIES, PLUS DE STABILITÉ POUR LE RÉSEAU DU FUTUR



06b

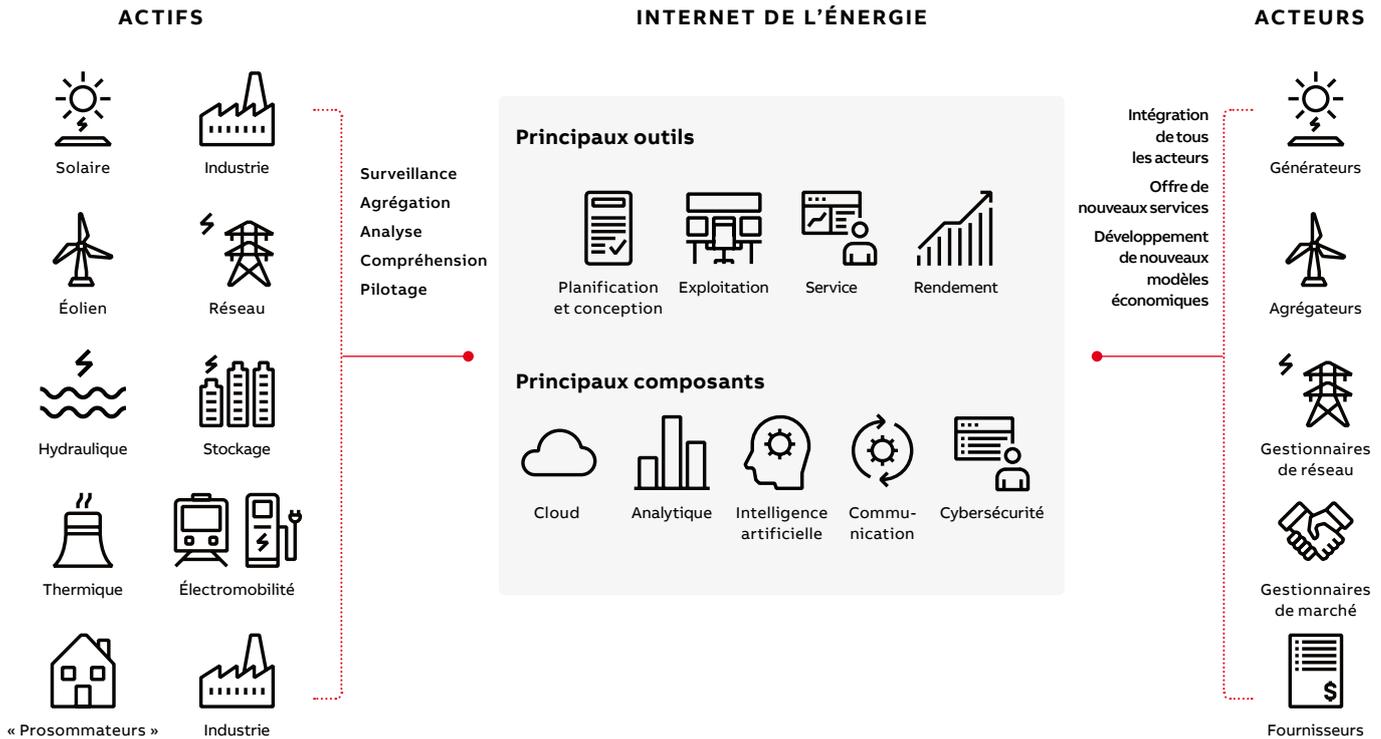
Avant que les véhicules autonomes et partagés ne deviennent monnaie courante, la plupart des véhicules électriques connaîtront sûrement le même destin que leurs homologues conventionnels : autrement dit, ils passeront 95 % de leur temps dans un garage ou sur une place de parking. Quant aux bus, camions et autres utilitaires municipaux ou commerciaux, même si leur taux d'utilisation est plus élevé, ils connaissent aussi de longues périodes d'arrêt. Tous ces véhicules, à supposer qu'ils fonctionnent sur batterie, ont un point commun : ils peuvent servir de réserve de puissance et donc de soutien au réseau →6a. Ce nouvel usage réduirait en outre les coûts de possession des véhicules et d'exploitation du réseau en évitant le démarrage des centrales de pointe.

Autre intérêt, une fois le véhicule électrique retiré du service, la batterie pourra avoir une seconde vie dans des applications stationnaires →6b, qui elles-mêmes contribueront à la stabilité du réseau et à la qualité de la fourniture.

Bien entendu, ces batteries pourraient aussi servir de stockage local ou déporté pour la production d'énergie d'origine solaire, éolienne, ou de toute autre source renouvelable. Les batteries des véhicules électriques constituent donc un réservoir quasi inépuisable d'électricité verte. •

—
06a Solution ABB de stockage sur batteries au Danemark

—
06b Ce système ABB intégré au laboratoire EnergyLab Nordhavn à Copenhague s'appuie sur des batteries stationnaires pour stocker l'électricité renouvelable et la réinjecter dans le réseau aux heures de pointe. Demain, cette solution pourra utiliser les batteries récupérées des véhicules électriques en fin de vie.



07

06 Une seconde vie pour les batteries

07 La numérisation des réseaux électriques est appelée à jouer un rôle croissant dans le développement d'un « Internet de l'énergie ».

Prochaines étapes

L'avènement progressif de l'électromobilité ne va pas surcharger les réseaux actuels de façon dramatique, ni du jour au lendemain. En Allemagne par exemple, la consommation supplémentaire due aux VEB devrait atteindre 0,3 % en 2020, et entre 10 et 12 % en 2040, selon l'évolution de divers facteurs (démographie, taille du parc automobile, parcours moyen et kilométrage total par véhicule, etc.). Un parc mondial tout électrique entraînerait à l'horizon 2040 une hausse de 5 à 20 % de la demande totale, selon les pays.

Si tous les véhicules en circulation dans le monde étaient électriques, la demande totale en électricité augmenterait de 5 à 20 % en 2040.

Bibliographie

[1] <https://www.eea.europa.eu/highlights/air-pollution-still-too-high>

[2] Muehlon, F., « Infrastructures de recharge : quand innovation rime avec collaboration », *ABB Review* 4/2019, p. 38-43.

Tout bien considéré, construire l'infrastructure de recharge nécessaire aux millions de VE qui prendront la route dans les décennies à venir sera un chantier immense... mais pas insurmontable. Planification et préparation seront les maîtres-mots d'un déploiement maîtrisé, au niveau tant financier que technologique, et donc d'un essor rapide et ordonné de l'électromobilité. •

ÉLECTROMOBILITÉ

Infrastructures de recharge : quand innovation rime avec collaboration

L'essor du marché électrique stimule l'innovation dans la motorisation et les infrastructures de recharge. ABB se maintient à l'avant-garde en investissant dans sa R&D interne et en collaborant avec des partenaires experts.



Frank Muehlon
ABB E-Mobility Infrastructure Solutions
Heidelberg (Allemagne)

frank.muehlon@
de.abb.com

La montée en puissance du véhicule électrique (VE) est inéluctable : selon certaines estimations, le nombre de VE en circulation pourrait atteindre 559 millions, soit un tiers du parc automobile mondial [1]. Cette transition vers le transport durable est déjà bien entamée. En témoigne la forte demande en solutions de recharge publiques ou privées : à ce jour, ABB a déjà vendu plus de 10 500 chargeurs rapides en courant continu (CC) dans 73 pays. Le Groupe est également partenaire des régies de transports en commun qui souhaitent réduire leur empreinte écologique, dans le monde entier.

—
ABB s'appuie sur sa longue expérience technologique et sa forte culture de la R&D pour rester à l'avant-garde de la mobilité électrique.

L'innovation et le développement de nouvelles solutions sont les deux piliers de la stratégie d'ABB en faveur du développement durable et de la réduction des émissions, qui implique d'investir le champ de l'électromobilité. Le Groupe s'appuie sur son expertise technologique et sa forte culture de la R&D pour mettre au point des

solutions d'avant-garde. Il est notamment l'un des fondateurs des deux standards de recharge CHAdeMO et CCS, ainsi que le précurseur des bornes de recharge rapide CC (2010), du déploiement de chargeurs à l'échelle d'un pays (2012) et des réseaux de recharge de bus électrique en Europe (2016).

Façonner la mobilité durable

Pour ABB, mettre en place des transports durables passe par trois impératifs.

Premièrement, la filière doit poursuivre et renforcer ses investissements, tant dans les batteries (augmentation de l'autonomie et de la performance) que dans les infrastructures de recharge pour satisfaire à la demande croissante. Or la situation est encore loin d'être satisfaisante dans de nombreux pays : aux États-Unis, notamment, la vente de 200 000 VE en 2017 ne s'est pas accompagnée d'un déploiement équivalent de points de recharge. Ce déséquilibre suscite la défiance du consommateur et l'angoisse de la panne sèche, deux freins majeurs à l'adoption de l'électromobilité. Pour y faire face, ABB s'est associé à Electrify America (filiale du groupe Volkswagen of America) qui possède et exploite un grand parc d'infrastructures pour VE aux États-Unis et au Canada. Les deux partenaires ambitionnent de créer le plus grand réseau de recharge rapide jamais mis en place à l'échelle du continent.



01

—
01 Partout dans le monde, les municipalités remplacent les bus diesel par des bus électriques et utilisent des infrastructures de recharge ABB. Le premier bus autonome 100 % électrique, d'une longueur de 12 m, qui circule à Singapour, est issu d'un partenariat entre ABB et Volvo.

Le second impératif est celui de la standardisation et de l'interopérabilité. L'industrie automobile doit pour cela tirer la leçon de l'électrification des transports publics, qui s'est considérablement développée dès lors que le nombre de standards de recharge a baissé. La clé du succès consiste à reproduire cette approche sur le marché de la voiture particulière. C'est là où une étroite collaboration entre les acteurs s'avère cruciale.

Enfin, il faut évoluer vers un écosystème énergétique « zéro émission ». Cela passe par le déploiement d'une infrastructure électrique fiable, peu coûteuse à entretenir, qui permette aux villes de répondre sereinement aux pics de demande. Corollaire : le réseau électrique doit devenir sûr, flexible, communicant et, localement, auto-suffisant grâce à l'intégration de différentes sources d'énergie et de technologies domotiques pour gérer la recharge, et à l'accroissement de la

capacité des batteries de VE. L'énergie stockée dans ces dernières pourrait alors être revendue au réseau, faisant du résidentiel et du tertiaire des moteurs de la révolution énergétique. Dans ce contexte, ABB développe un chargeur CC domestique bidirectionnel tout en collaborant étroitement avec des agrégateurs d'énergie à la création de solutions d'infrastructure fiables.

—
Nous devons évoluer vers un écosystème énergétique zéro émission.



02

Le chargeur de forte puissance, piste d'avenir

Actuellement, la croissance du marché de l'électromobilité (utilitaires comme voitures de tourisme) est dictée par la rapidité et la puissance de charge, qui sont néanmoins bridées par la capacité des batteries actuelles. Les bornes CC restent en effet trop puissantes pour la plupart des véhicules de série, situation susceptible d'évoluer avec la sortie imminente de la Porsche Taycan, première sportive capable de « carburer » à cette puissance.

Quand la batterie du véhicule ne peut absorber ce niveau de charge, des bornes de forte puissance comme la Terra HP d'ABB s'adaptent à sa capacité : un gage de compatibilité avec la prochaine génération de VE. Capable de débiter 350 kW, la Terra HP procure 200 km d'autonomie à un véhicule en 8 minutes, soit à peine plus que la durée d'un plein d'essence.

Le chargeur Terra HP confère 200 km d'autonomie à un véhicule électrique en à peine plus de temps que nécessaire pour faire un plein d'essence.

Pour les véhicules utilitaires, la charge plafonne à 600 kW. Mais ABB est confiant dans la marge de progrès : le mégawatt pointe à l'horizon. Le Groupe a investi 10 millions de dollars dans un nouveau centre de R&D, inauguré en septembre 2019, pour stimuler l'innovation ABB dans le segment en pleine expansion des bus électriques.



03

—
02 Championnat de Formule E 2019 à Marrakech : une Nissan e.Dams en pleine action

—
03 Chargeur Terra CC d'ABB développé spécialement pour le Jaguar I-PACE eTROPHY

La puissance de la collaboration

Le progrès technologique ne va pas sans étroite collaboration, puissant levier de l'innovation dans le secteur des VE. ABB joint ainsi ses forces à celles d'autres acteurs de premier plan pour repousser les limites de la technologie et développer de nouvelles solutions. La dynamique du secteur appelle en effet une coopération d'une ampleur inédite. Dans cette perspective, ABB continue de nouer des partenariats avec des équipementiers (OEM) et des exploitants de bornes de recharge pour répondre aux besoins actuels et futurs, et ainsi pérenniser la croissance du marché. Les premiers fruits de ces travaux sont déjà visibles, tel le premier bus 100 % électrique et autonome au monde, long de 12 m. Conçu avec l'université de Technologie de Nanyang (NTU), l'Autorité des transports terrestres de Singapour et Volvo Buses →1, ce projet phare entend démontrer la faisabilité d'une ligne régulière de bus zéro émission et illustrer les progrès remarquables réalisés dans la propulsion électrique et autonome des véhicules de transport en commun.

À la pointe de l'innovation

ABB ne cesse d'étendre le champ des possibles de la mobilité électrique, en étant notamment partenaire officiel du championnat de Formule « E » FIA →2. Cette course est un terrain d'essai idéal pour éprouver l'électrification et la numérisation de l'automobile, ainsi qu'une vitrine pour le grand public.

La recharge rapide des voitures en est la parfaite illustration : les nouvelles Formule E « Gen2 » atteignent 280 km/h et accélèrent de 0 à 100 en 2,8 s, grâce notamment à des batteries plus performantes. Certes plus lourdes que celles du modèle aligné lors des quatre premières saisons, ces batteries ont vu leur capacité presque doubler, de 28 à 54 kWh, pour un gain de masse de seulement 20 %, la voiture passant de 320 à 385 kg. Une évolution qui permet de faire toute la course (45 min) avec une seule charge.

Ces innovations gagnent aussi le marché grand public. Par exemple, le Jaguar I-PACE eTROPHY aligne des versions de course du SUV de série éponyme, lui-même rechargeable aux bornes classiques. Pour passer de la berline familiale au bolide de compétition, les experts ABB ont dû redoubler d'ingéniosité. À la clé, une solution permettant de recharger rapidement jusqu'à 20 voitures de course I-PACE lors des temps d'arrêt séparant les essais, les qualifications ou les courses, dans la dizaine de villes et sur les quatre continents où se déroule une saison.

La nouvelle batterie a presque doublé sa capacité pour un surpoids de 20 % seulement.

L'option technologique qui s'est imposée d'emblée était celle du chargeur rapide CC →5. Néanmoins, avec leurs 2,2 m de haut, ces bornes normalement installées sur la voie publique ne tiennent pas dans la soute des avions de ligne qui transportent concurrents et matériel d'un site de course à l'autre. ABB a réussi à reconditionner son chargeur rapide Terra CC en un appareil sur roues ne dépassant pas 1,5 m de haut →3,4.

Un bel exemple de la manière dont innovation et collaboration permettent de répondre aux défis soulevés par la mobilité électrique.

Paré pour l'avenir

Le marché est porteur de promesses pour nombre d'acteurs : constructeurs automobiles et équipementiers, fournisseurs de systèmes de recharge, énergéticiens et professionnels

des énergies renouvelables. Certaines sociétés, notamment de grands fournisseurs d'énergie et des OEM, se lancent dans une diversification effrénée pour investir ces nouveaux maillons de la chaîne de valeur, en particulier dans l'exploitation des stations de recharge. En Europe, par exemple, ABB est le principal partenaire technologique et fournisseur du consortium de la recharge rapide IONITY regroupant BMW, Daimler, Ford et Volkswagen (avec Audi et Porsche), qui ambitionne de déployer et d'exploiter quelque 400 stations dans 24 pays européens d'ici à 2020.

Innovation et collaboration permettent de répondre aux défis de l'électromobilité.

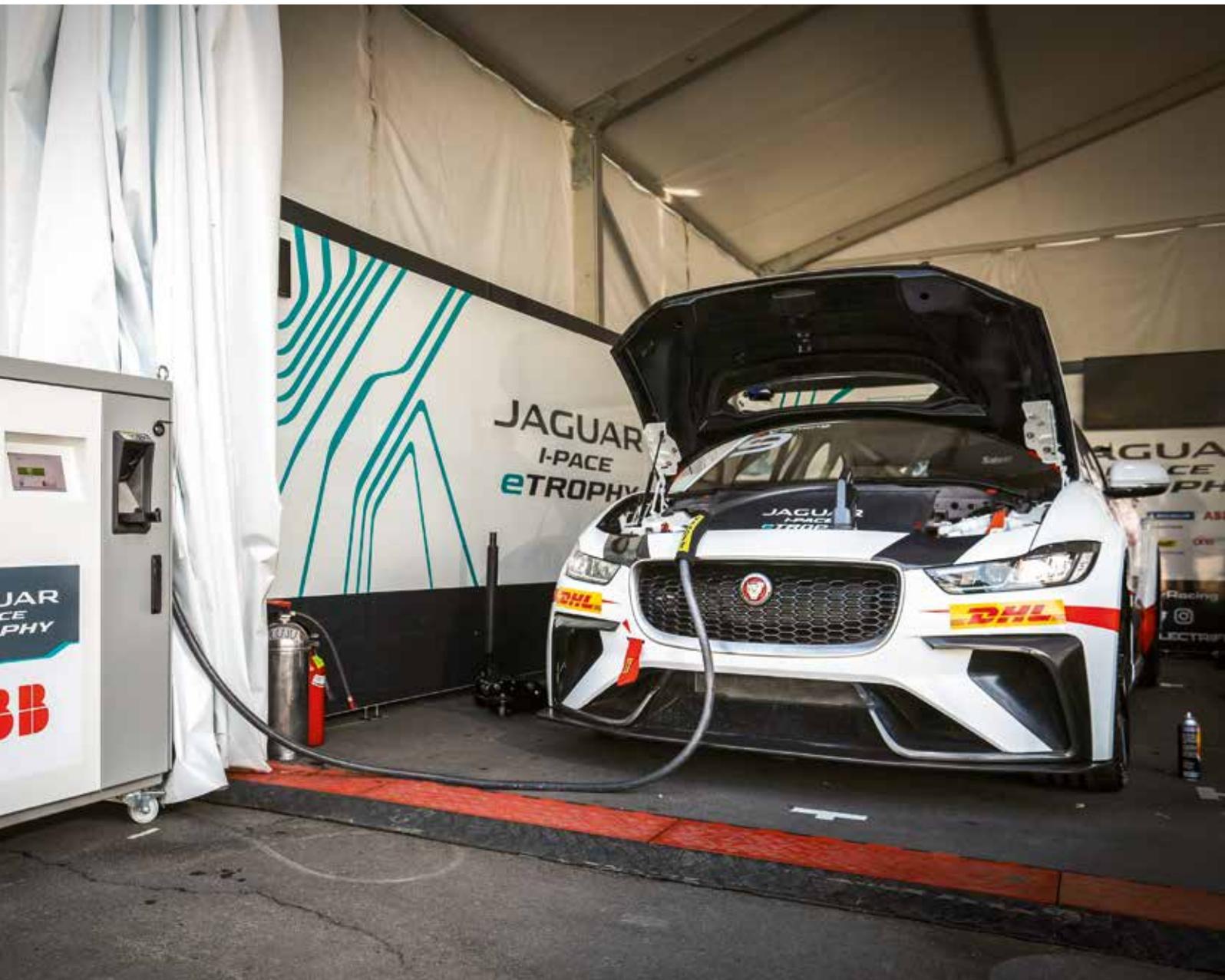
Pendant européen d'Electrify America, dont ABB est aussi un partenaire technologique privilégié, IONITY est le chef de file de la recharge à haute puissance. Rien que par leur taille et leur expertise technologique, les membres du consortium sont plus que de simples clients pour ABB : ce sont des partenaires de choix résolument engagés dans le déploiement de la mobilité électrique. Nul doute que cette approche collaborative, assortie d'investissements permanents dans l'innovation, façonnera la mobilité électrique de demain. •

Bibliographie

[1] <https://www.connaissancesdesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/globale-voutlook2018.pdf>



04



04 Le chargeur Terra CC au travail

05 Les voitures de course électriques I-PACE de Jaguar peuvent aussi utiliser des bornes ABB classiques pour recharger rapidement leurs batteries.



05



Productiv



Crédit photo: TenneT



ité



52

Les nouveaux outils apportés par le numérique décuplent la productivité et la fiabilité des systèmes électriques, et promettent un meilleur pilotage des procédés industriels. Les progrès de la numérisation éclairent littéralement le présent, mais aussi l'avenir.

- 46 Quand l'apprentissage automatique s'affranchit de l'homme
- 52 Suivi d'état optimisé pour les organes de transmission
- 56 Systèmes de détection : du réel au virtuel
- 64 Pour des actifs « branchés » et optimisés
- 68 La co-simulation donne du souffle à la commande de disjoncteurs
- 74 La supervision au service du suivi de performances



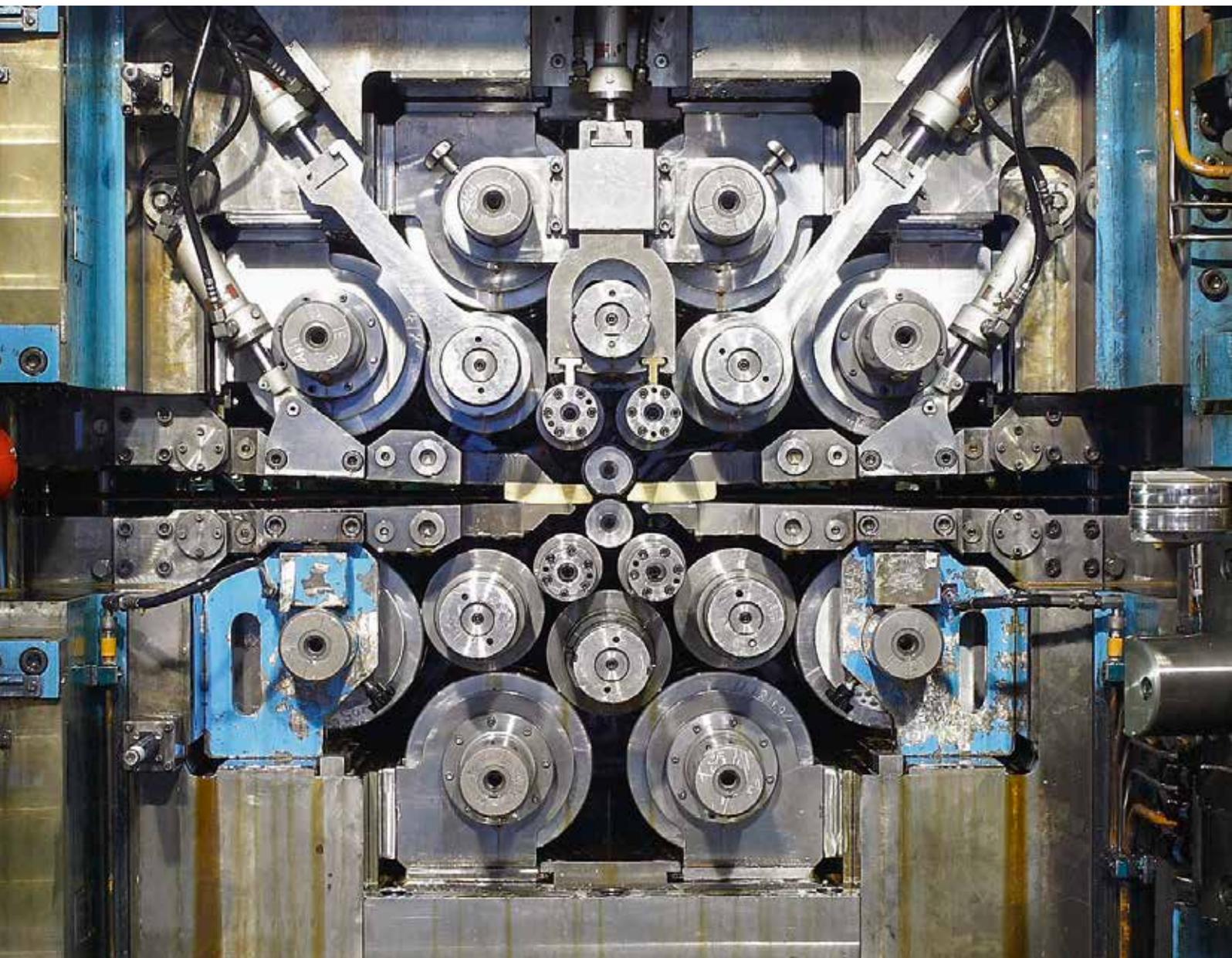
64

PRODUCTIVITÉ

Quand l'apprentissage automatique s'affranchit de l'homme

Les systèmes d'automatisation industrielle s'appuient sur des jumeaux numériques pour modéliser les relations entre les entrées et les sorties du procédé. Il y a encore peu, maintenir un jumeau numérique en permanence à jour représentait une charge de travail disproportionnée ; heureusement, les derniers progrès de l'intelligence artificielle changent la donne.

01



Un système de contrôle-commande industriel a pour mission d'assurer la sécurité, la stabilité, la flexibilité et l'efficacité de l'exploitation. Il garantit aussi la qualité du produit fabriqué en déplaçant sa variabilité du système réglé (procédé) au système réglant (capteurs, régulateurs et actionneurs). Le jumeau numérique est en cela un outil incomparable.

Pour les professionnels de la régulation industrielle, le principe du jumeau numérique n'est pas une nouveauté puisque même la plus élémentaire des analyses de stabilité s'appuie sur un modèle mathématique, généralement une fonction de transfert, pour représenter la relation entrée-sortie d'un système.

D'autres concepts d'automatique comme l'observabilité et la « commandabilité » font également appel au potentiel de l'analyse basée sur modèle. C'est pourquoi la perspective de disposer en permanence d'une représentation à jour de ces relations d'entrées-sorties suscite autant d'engouement auprès des spécialistes du process, en particulier ceux en charge de systèmes dont la performance, voire la configuration, sont extrêmement variables et aléatoires. Encore récemment, cette idée relevait de la science-fiction ou n'était envisageable qu'au prix d'efforts démesurés ; mais les récentes avancées de l'intelligence artificielle (IA) promettent d'y remédier →1.

Jumeau numérique contre modèle mathématique

La régulation de procédé a recours à la modélisation mathématique dans deux cas principaux : pour les calculs associant physique et connaissance du domaine, et pour ceux à base de données. Ce découpage n'est pas toujours aussi tranché : la plupart des modèles physiques contiennent des options de paramétrage qui s'appuient sur les données du procédé (« boîte grise »), tandis que les modèles à base de données (« boîte noire ») utilisent souvent des ordres ou formulaires (systèmes du premier ordre avec retard) faisant appel à l'empirisme ou à la connaissance du domaine.

Quelle que soit la méthode retenue, il est d'usage de confier à des ingénieurs chevronnés des essais sur site ou une analyse des données historiques afin de configurer le modèle spécifiquement pour l'application, qu'il s'agisse d'un simple capteur logiciel, pour calculer les variations kappa de la pâte à papier, par exemple, ou d'une commande prédictive par modèle pour réguler une centrale à cycle combiné avec gazéification intégrée. Hélas, un site industriel évolue en permanence : les catalyseurs des réacteurs chimiques se salissent,

les compresseurs ou turbines s'encrassent, les échangeurs thermiques se colmatent... La réalité diverge alors du modèle prédictif.

Le jumeau numérique, de son côté, est un modèle mathématique tenu en permanence à jour, qui peut très bien se passer du traditionnel bataillon d'analystes et de régulateurs pour ajuster les paramètres du modèle.

Jumeau numérique classique : le défi de la complexité

Classiquement, toute évolution d'un système, par exemple le dépôt de coke sur un turbo-compresseur, doit être connue et modélisée à l'avance. Or, plus ce système est complexe, plus il est difficile d'établir les équations correspondantes ainsi que d'identifier les états associés et les paramètres à calculer. Cette tâche exigeant des ingénieurs aussi qualifiés qu'expérimentés, le coût de la solution s'envole, au détriment de sa viabilité commerciale.

L'art d'identifier les systèmes

La phase consistant à rechercher le modèle d'un système dynamique, à partir de l'observation du comportement des entrées-sorties, est appelée « identification système » [1]. Les techniques d'identification de modèles boîte noire se sont généralisées dans l'industrie. Par rapport à la modélisation boîte grise, la boîte noire repose davantage sur des descriptions mathématiques et un grand nombre de mesures (approche algorithmique) que sur le savoir-faire et l'expertise (approche cognitive).

Un jumeau numérique est un modèle mathématique du procédé en permanence à jour.

La méthode n'est toutefois pas dénuée d'inconvénients. Actuellement, elle utilise une batterie d'essais en boucle ouverte et monovariables afin de générer les données nécessaires à l'identification du modèle. En plus d'être chronophage, elle n'est pas toujours réalisable s'il est impossible de passer sans danger les boucles de régulation concernées en manuel.

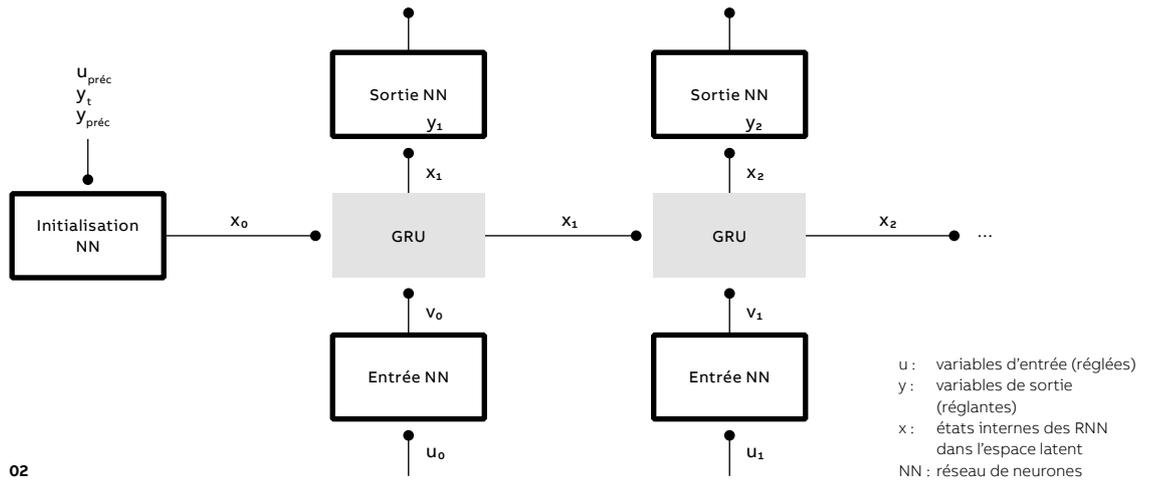
En outre, les modèles à réponse indicielle ou impulsionnelle peuvent reproduire en partie le comportement dynamique non linéaire d'une sortie – retards, par exemple – mais ils doivent être superposés de façon linéaire pour représenter un comportement multivariable. Ils ne peuvent donc récupérer que des relations linéaires entre entrées et sorties en régime statique.

—
01 Les progrès de l'intelligence artificielle promettent de bouleverser la régulation industrielle. C'est le cas notamment dans la métallurgie avec, par exemple, ce laminoir à cylindres multiples.

—
Mehmet Mercangoez
Andrea Cortinovis
ABB Corporate Research
Baden-Dättwil
(Suisse)

mehmet.mercangoez@
ch.abb.com
andrea.cortinovis@
ch.abb.com

Luis Dominguez
Digital ABB
Baden-Dättwil
(Suisse)



Autre limitation de ces modèles rudimentaires : ils ne peuvent pas représenter un comportement instable en boucle ouverte. Des méthodes plus évoluées, comme l'identification des sous-espaces, permettent certes d'obtenir des modèles réellement multivariés, mais qui n'en demeurent pas moins intrinsèquement linéaires, donc incapables de représenter correctement les retards ou les conditions de saturation. L'option consistant à utiliser plusieurs modèles pour représenter la dynamique du système et tenir compte de ses non-linéarités est compliquée et représente un surcroît de travail.

Quand l'« apprentissage de variétés » rencontre les réseaux de neurones récurrents

ABB a opté pour une nouvelle méthode de réalisation des jumeaux numériques dans l'industrie de transformation, avec le cahier des charges suivant :

- Minimiser ou éliminer le développement manuel ou l'intervention d'un spécialiste ;
- Pouvoir construire les modèles sans essai sur site en boucle ouverte, de préférence à partir des historiques d'exploitation ;
- Égaler ou surpasser la précision de ses prédécesseurs.

Le deuxième point est assurément le plus contraire aux fondamentaux scientifiques, puisqu'aucun algorithme ni calcul ne peuvent extraire une information si celle-ci ne se trouve pas dans les données. Si le système n'a pas rencontré certaines conditions d'exploitation, les capacités de prédiction du modèle généré seront limitées en l'absence des données nécessaires.

Pour remplir ce cahier des charges, ABB s'est appuyé sur les dernières avancées de l'IA, en particulier l'apprentissage automatique.

Utiliser des réseaux de neurones pour modéliser des systèmes non linéaires n'est pas une nouveauté dans la régulation de procédé. Dès les années 1990,

des chercheurs ont étudié la possibilité d'utiliser des réseaux multicouches sans rétroaction ainsi que leurs dérivés, avec couches masquées, pour estimer le comportement d'un site industriel [2]. Ils ont toutefois buté sur la complexité calculatoire de la méthode. De plus, les réseaux prédictifs de l'époque n'étaient intrinsèquement pas optimisés pour la modélisation de systèmes dynamiques ; depuis, les progrès accomplis par les réseaux de neurones récurrents (RNN) ou à mémoire à long et court terme (LSTM) ont amélioré la représentation de ces systèmes. Aujourd'hui, l'utilisation des RNN pour modéliser les systèmes dynamiques de la commande de procédé fait l'objet de nombreuses publications.

ABB a testé une nouvelle méthode de construction de jumeaux numériques pour l'industrie de transformation.

L'apprentissage de variétés est une autre avancée ayant contribué à la solution ABB. L'analyse en composantes principales (ACP) et la réduction de dimension sont deux techniques fréquemment utilisées dans l'automatisation des systèmes de production, notamment pour le suivi d'état et la détection de défaut.

Elles reposent sur le postulat qu'une unité de production continue a beau être par définition multidimensionnelle, ses nombreuses mesures partagent la même physique sous-jacente et sont donc corrélées. Là encore, les méthodes linéaires utilisées peinaient le plus souvent à saisir les processus non linéaires, en dépit de quelques aménagements au succès relatif. Les progrès dans les réseaux de neurones artificiels et leur application à la construction d'auto-encodeurs variationnels ont donné un coup d'accélérateur à ces techniques.

— 02 Schéma fonctionnel de l'algorithme d'IA utilisé pour prédire le comportement d'un procédé continu à partir des valeurs futures des entrées

— 03 Validation des prédictions (sur un horizon de N prochains instants) du modèle de machine à papier. Les points gris indiquent le rafraîchissement des mesures ; les prédictions non corrigées, correspondant à un nouveau rafraîchissement des données et historiques de mesure, se situent entre les carrés rouges. Les axes des ordonnées sont normalisés.

L'auto-encodeur variationnel est un réseau de neurones composé d'un encodeur et d'un décodeur. Il permet de compacter les données pour en réduire la dimension, puis de les restituer dans leur dimension d'origine en conservant le maximum d'informations.

Le jumeau numérique d'ABB pourra apprendre la dynamique du procédé dans l'espace de faibles dimensions créé par l'auto-encodeur.

Le jumeau numérique conçu par ABB pourra apprendre la dynamique du procédé dans l'espace de faibles dimensions créé par l'auto-encodeur, qui prend généralement la forme d'un réseau de neurones sans rétroaction. À la différence des configurations habituellement proposées dans la littérature, ABB suggère d'ajouter une couche supplémentaire pour initialiser les états des « neurones récurrents à porte » (GRU) qui constituent le réseau et servent à capter la dynamique du système. Les couches d'entrée figurant en →2 ne

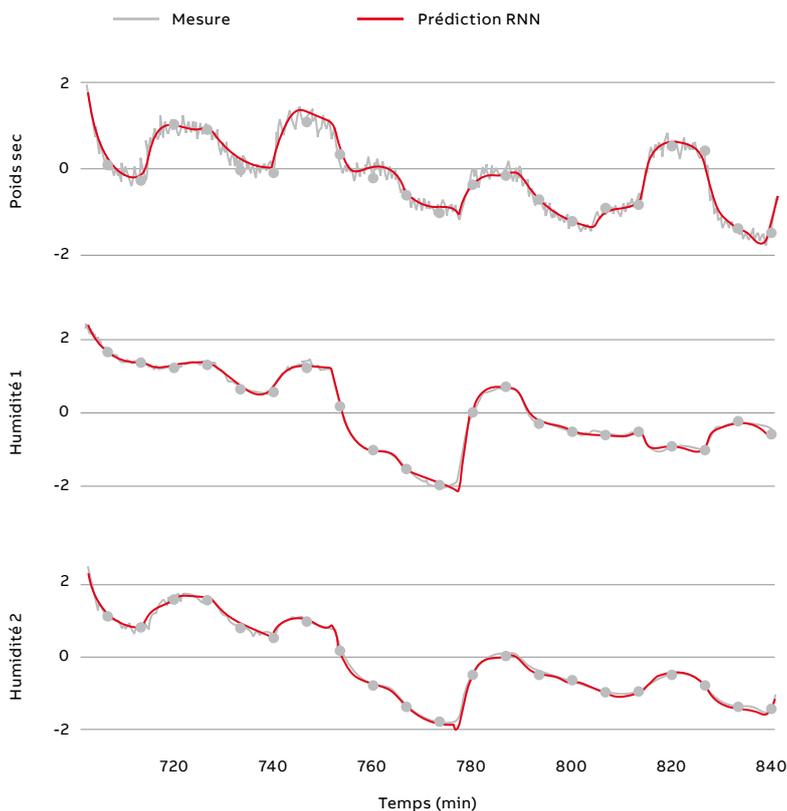
sont représentées que pour compléter le graphe ; dans une régulation type, les entrées sont déjà réduites au minimum et ne présentent ni corrélation ni dépendance physique. Il n'est donc pas nécessaire de les mapper dans un espace latent de plus faible dimension.

Baptême du feu

L'approche ABB a été appliquée à un système complexe pilotant le sens de marche d'une machine à papier (MAP) [3,4]. Une telle machine est le siège d'interactions intenses entre les nombreux capteurs des cadres de balayage et les multiples jeux d'actionneurs, interactions qui influent sur les caractéristiques du papier. Qui plus est, du fait du différentiel de temps de réponse et de déplacement entre les actionneurs et les mesures dans la zone de balayage des capteurs, les feuilles de papier risquent de se rétracter plus ou moins, et donc de présenter des largeurs différentes. Généralement, compte tenu de ces retards, le régulateur applique des actions de commande anticipatrice qui éliminent les fluctuations de grammage et d'humidité des feuilles lors du changement de qualité papier.

Le modèle comparé aux données de production à des fins de validation comportait trois entrées (débit de pâte, pression de vapeur 1 et 2), trois sorties (poids sec, teneur en humidité 1 et 2) ainsi que trois facteurs perturbateurs (teneur en cendres ou écoulement d'air de rétention, écoulement du kaolin et vitesse de la MAP). La présente étude de cas vise à suivre la consigne sur les trois sorties, en supposant les perturbations mesurées. La principale difficulté réside dans la complexité du système : grand nombre d'états, multiples retards et bruit de mesure s'ajoutent aux signaux de sortie.

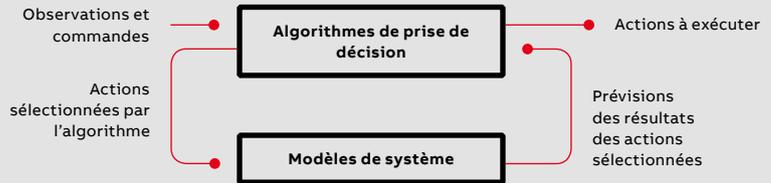
Les données d'apprentissage ont été fournies par un simulateur de MAP haute fidélité présentant plusieurs variations de la valeur de consigne en sortie et des signaux d'entrée et de sortie enregistrés. Les changements de consigne s'effectuent en direct ; autrement dit, aucun prétraitement n'est requis pour filtrer le fonctionnement à l'état stable. Du bruit supplémentaire autocorrélé est ajouté sur chaque sortie afin d'augmenter le réalisme de la configuration. Des jeux de données indépendants, inédits dans l'apprentissage, sont générés aux fins de validation.



PRISE DE DÉCISION AUTOMATIQUE : COMMENT ÇA MARCHE ?

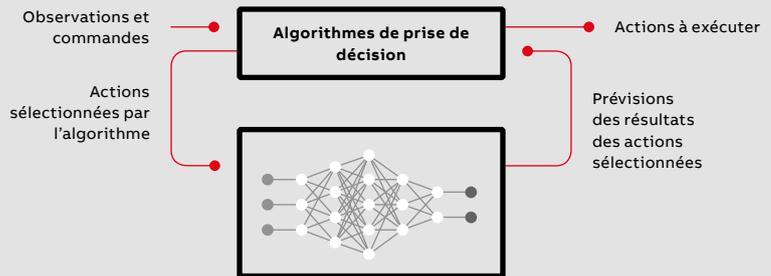
Méthode classique

Les systèmes classiques de prise de décision automatique reposent sur des modèles mathématiques construits par l'homme pour représenter la réalité. En réponse à une observation ou à une commande, le système examine tout le champ des actions possibles et, à l'aide du modèle mathématique, en détermine les conséquences sur un horizon de prédiction. L'algorithme met ensuite en œuvre l'action la mieux adaptée à la commande.



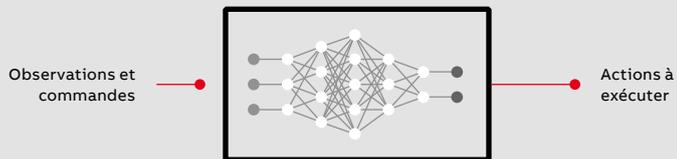
Méthode « intelligente »

À la différence de la méthode classique, l'approche présentée dans cet article fait appel à l'intelligence artificielle (IA) pour établir un modèle du système, lequel reste compatible avec les algorithmes de prise de décision classique. En plus de prédire les conséquences des actions futures, le modèle les optimise pour obtenir les résultats et comportements désirés.



Demain, l'autonomie ?

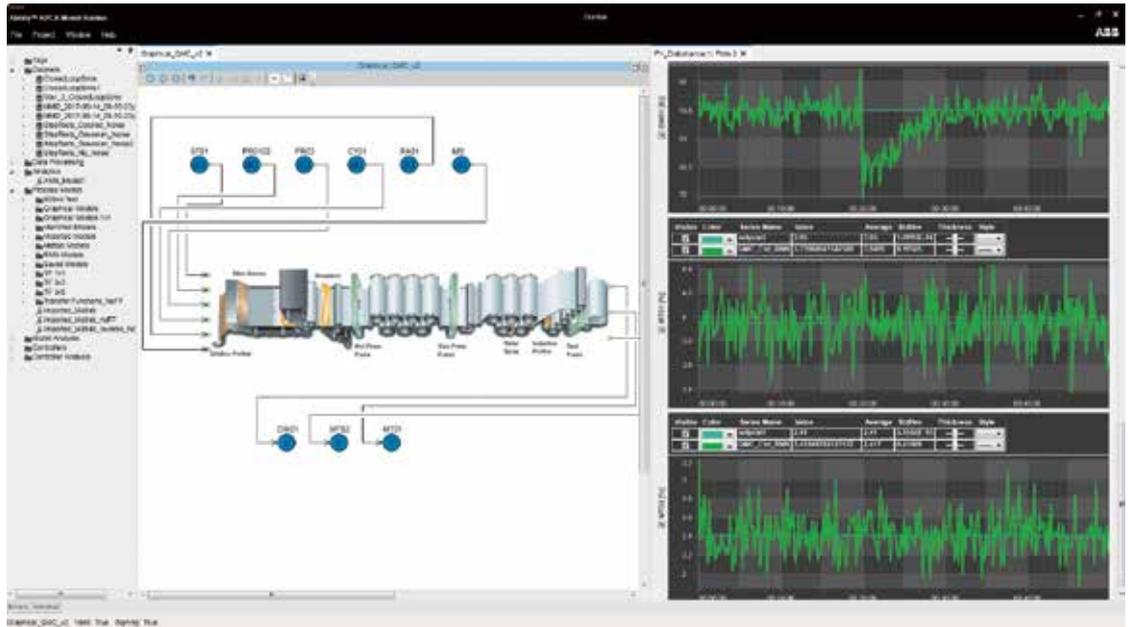
Ces deux méthodes calculent en temps réel les actions à exercer en réponse aux observations ou changements de commande. La construction des modèles, dans le premier cas, ou leur entraînement, dans le second, doivent se dérouler à part ou hors ligne. Une autre approche se dessine : elle fait également appel à l'IA pour déterminer les meilleures actions répondant aux observations et aux commandes, mais en plus elle laisse l'IA passer directement à l'action. Cela aurait notamment l'avantage de faire émerger des stratégies inédites, affranchies des contraintes des méthodes de construction de modèle classiques.



Les techniques d'apprentissage évoquées ici permettraient de réaliser des jumeaux numériques servant de « terrain de jeu » aux algorithmes d'IA pour bâtir des stratégies sur la base de réalités simulées.

04 Principe de la prise de décision autonome

05 Suite ABB Ability APCA utilisée pour la commande prédictive par modèle (à base de réseaux de neurones récurrents et d'auto-encodeurs variationnels) du sens de marche d'une machine à papier. APCA prend également en charge la modélisation graphique (premiers principes), la régression linéaire et non linéaire, l'analyse en composantes principales, les réseaux de neurones artificiels et les machines à vecteurs de support.



05

Bibliographie

[1] Ljung, L., « Perspectives on system identification », *Annual Reviews in Control*, vol. 34, n° 1, p. 1-12, 2010.

[2] Hornik, K., et al., « Universal approximation of an unknown mapping and its derivatives using multilayer feed forward networks », *Neural networks*, vol. 3, n° 5, p. 551-560, 1990.

[3] Chen, S.-C., et al., « Use a Machine's full capability », *Pulp & Paper International*, vol. 51, p. 39-42, mars 2009.

[4] Chen, S.-C., et al., « Multivariable CD control applications », *International Paperworld IPW*, p. 16-20, octobre 2008.

[5] Lanzetti, N., et al., « Recurrent Neural Network based MPC for Process Industries », *Actes de la 18^e European Control Conference*, Naples, 2019.

[6] Dominguez, L., Gallestey, E., « Commande avancée et modélisation analytique en automatisation industrielle », *ABB Review 2/2018*, p. 38-45.

Le modèle de RNN est créé dans Keras, les traitements d'arrière-plan sont exécutés dans TensorFlow. L'apprentissage des neurones GRU repose sur la technique de « rétropropagation à travers le temps » (BPTT), assez gourmande en puissance de calcul.

Les graphes →3 ainsi que les mesures quantitatives confirment la bonne performance du RNN sur le jeu de validation inconnu. Autrement dit, le réseau de neurones est capable d'apprendre la dynamique du système, retards compris. Les prédictions obtenues peuvent éclairer la prise de décision et contribuer à la commande en boucle fermée par modèle ou, à l'avenir, au fonctionnement autonome →4.

État de l'art

Cette réalisation ABB n'est qu'une première étape vers la création de jumeaux numériques évolués pour l'industrie de process. Certaines fonctionnalités sont déjà abouties, comme la construction de modèles dynamiques multivariables non linéaires d'une grande précision, à partir de données process en boucle fermée [5] ; d'autres sont encore à l'étude comme le réentraînement automatique des modèles et le paramétrage autonome des structures sous-jacentes des réseaux de neurones associés. Le choix de l'architecture – nombre de GRU ou de couches de l'auto-encodeur variationnel par exemple – reste pour le

moment manuel et privilégie la maîtrise des environnements d'apprentissage profond à la connaissance des domaines technologiques. L'optimisation des hyperparamètres permet de s'affranchir de cette contrainte.

Les prédictions éclairent la prise de décision et contribuent à la commande en boucle fermée par modèle ou, à l'avenir, au fonctionnement autonome.

La suite logicielle ABB Ability™ Advanced Process Control (APCA) offre une panoplie d'outils pour simplifier le déploiement des régulateurs avancés et des modèles analytiques de procédé [6]. Ces derniers peuvent s'appuyer soit sur un modèle de connaissance (premiers principes), soit sur les données process, pour être ensuite exécutés dans APCA. Le système de modélisation présenté dans cet article, ainsi que les auto-encodeurs et les réseaux de neurones récurrents, ont été intégrés à la suite APCA pour être mis à la disposition des clients d'ABB →5. Le Groupe continue d'enrichir l'offre de fonctionnalités APCA afin d'améliorer de manière tangible la sécurité, la disponibilité, la qualité, l'efficacité et la flexibilité des process. •

PRODUCTIVITÉ

Suivi d'état optimisé pour les organes de transmission

Les transmissions électriques sont des briques essentielles de bon nombre d'installations industrielles. À ce titre, elles ne souffrent aucune interruption de service. La solution de suivi d'état ABB Ability™ Condition Monitoring aide les clients du Groupe à améliorer la disponibilité de leurs actifs. *ABB Review* a rencontré Sönke Kock pour en savoir plus.

AR *ABB Review (AR)* : Bonjour Sönke. Pouvez-vous tout d'abord vous présenter ?

SK Sönke Kock (SK) : Je suis responsable numérique (*Digital Leader*) de l'activité Entraînements d'ABB à l'échelle mondiale. L'innovation numérique est essentielle dans ce domaine.

AR Commençons par le commencement : qu'est-ce qu'une transmission électrique et pourquoi est-ce si important ?

SK L'industrie et le BTP font un grand usage de

convoyeurs à bande, de pompes, d'agitateurs, de ventilateurs, etc., pour déplacer ou transformer les matières premières. Ces tâches nécessitent des chaînes de transmission électriques, composées de variateurs, de moteurs, de paliers, d'accouplements, d'engrenages et de pompes, selon différentes configurations. Ces organes sont essentiels pour l'industrie mais aussi notre quotidien : sans eux, pas d'ascenseur, de tapis roulant ni de pression au robinet ! Afin d'éviter ce genre de désagrément, de panne voire de situation dangereuse, nous avons tout intérêt à surveiller de près l'état de ces équipements mécaniques et électriques.



AR Et c'est le cas actuellement ?

SK Pas vraiment. Le suivi d'état traditionnel des organes de transmission est tellement coûteux qu'il est réservé aux applications les plus critiques. En effet, installer un système de suivi complet est une opération complexe, parfois plus onéreuse que les organes de transmission eux-mêmes ! Sans compter que l'installation et la maintenance du matériel de surveillance et des logiciels associés relèvent de prestataires spécialisés ; l'addition grimpe très vite. C'est pourquoi, plutôt que d'avoir un dispositif de surveillance à demeure, les industriels se contentent souvent d'une campagne semestrielle ou annuelle de mesures de vibration. Une solution certes plus économique mais qui comporte de longues plages de temps entre les mesures, et donc des risques de dysfonctionnement. De plus, comme le personnel doit s'approcher des machines tournantes pour la maintenance, il y a danger pour sa sécurité.

AR Comment ABB résout-il ce casse-tête ?

SK Avec la solution ABB Ability Condition Monitoring →1.

AR Pouvez-vous nous en dire plus ?

SK Grâce à la démocratisation des capteurs sans fil connectés via l'Internet des objets, il est possible de transmettre en continu des données pour un coût dérisoire par rapport à celui d'un système de suivi d'état classique. Notre solution est hébergée dans le cloud sur la plate-forme numérique unifiée ABB Ability, ce qui garantit la disponibilité permanente des données sans investissement important. Nos clients ont ainsi accès à une offre complète couvrant l'ensemble de leurs actifs, du terrain à la périphérie de réseau, mais aussi à un service mondial rapide et à une maintenance proactive, entre autres avantages. Mieux informés sur leur



Sönke Kock

ABB Motion

Ladenbourg (Allemagne)

parc et leur procédé, ils peuvent en améliorer la sécurité, la fiabilité et l'efficacité, et ainsi atteindre des sommets de disponibilité et de productivité.

AR Quel est le périmètre de la solution ABB ?

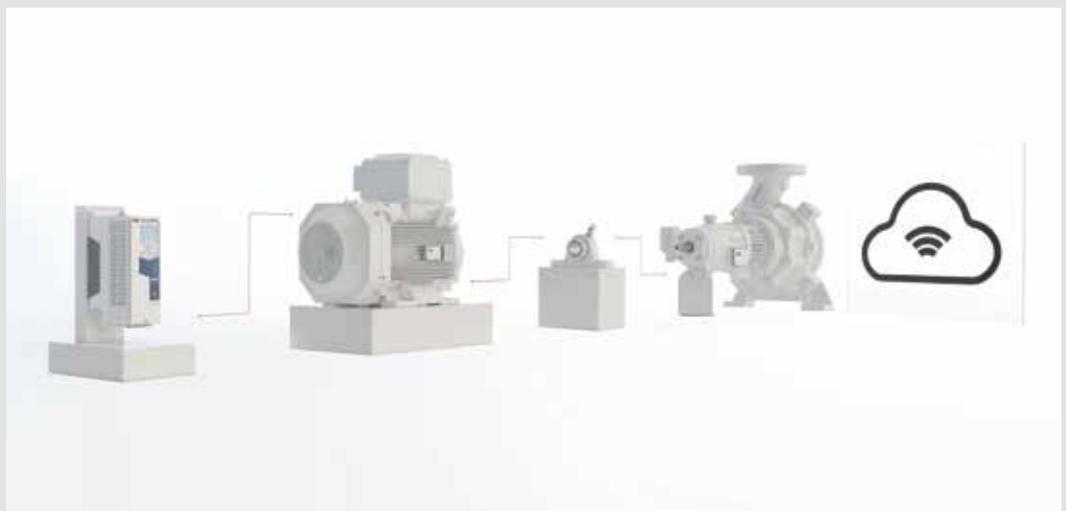
SK Pour le moment, elle couvre la chaîne variateurs, moteurs, paliers et pompes →2. Prenons les variateurs : le suivi d'état ABB fournit des informations temps réel sur tout ce qui se passe dans le convertisseur de fréquence connecté : disponibilité, conditions ambiantes, défauts, entre autres. De quoi détecter très tôt un dysfonctionnement potentiel et prendre les mesures de maintenance adéquates.

AR Je suppose que les capteurs connectés ont eux aussi un rôle à jouer ?

SK Oui, nous pouvons équiper un moteur classique du capteur ABB Ability Smart Sensor pour le transformer en un dispositif communicant sans fil →3. Monté sur un moteur basse tension, par exemple, le capteur autorise une télésurveillance via une application qui donne accès au portail Internet

—
01 Le suivi d'état ABB destiné aux organes de transmission améliore la performance, la fiabilité et l'efficacité des actifs industriels.

—
02 La solution ABB rend les variateurs, moteurs, paliers et pompes « communicants » pour une analyse et un suivi approfondis.





03a



03b

de la solution. Ces précieuses informations permettent à l'exploitant d'anticiper les problèmes et donc d'améliorer la disponibilité tout en réduisant sa facture énergétique.

AR Ces capteurs ont-ils d'autres usages ?

SK En effet, ils peuvent par exemple nous renseigner sur l'état des paliers prémontés, qui sont des composants critiques de la chaîne de transmission et constituent à ce titre des indicateurs avancés de son état global. Les données transmises par les capteurs intelligents servent aussi à surveiller la température des pompes, les phénomènes de cavitation ou encore l'état des roulements, afin d'éviter tout dysfonctionnement ou engorgement de la pompe.

AR Quels sont les autres avantages du suivi d'état ABB Ability pour organes de transmission ?

SK Les transmissions numériques sont un ticket d'entrée pour aborder la surveillance numérique ; le faible coût de la solution permet au client de la tester pour se faire une opinion, généralement positive. De plus, les moteurs, paliers et pompes n'ont pas besoin d'être câblés séparément : autant de sources d'erreurs potentielles éliminées, ainsi qu'une installation et une mise en service accélérées. Enfin, le dispositif est facile à utiliser et à intégrer, compatible avec les produits de n'importe quel constructeur, évolutif et flexible.

AR Cette solution peut-elle déboucher sur un suivi d'état complet ?

SK Tout à fait. Là où les précédentes solutions se contentaient de fournir des données ponctuelles sur l'état de chaque composant, nous pouvons désormais surveiller en continu toute la chaîne. Un suivi complet et peu onéreux qui maximise la disponibilité et l'efficacité opérationnelle.

AR Si la solution est à ce point complète, alors le client doit-il d'emblée installer un système de suivi pour tout son site ?

SK Pas du tout ! Notre solution est évolutive. On peut tout à fait commencer par équiper un seul élément de la chaîne cinématique – moteur, palier ou pompe – et l'intégrer au système de surveillance, puis ajouter d'autres « briques » au gré des besoins, à la manière d'un Lego ! Les données recueillies sont envoyées vers une plate-forme connectée, aussi simple à configurer qu'à faire évoluer, et accessible par un portail web ou une application mobile →4. Le déploiement, rapide et flexible, peut tout aussi facilement concerner un seul maillon (moteur, par exemple) que l'ensemble de la chaîne. Le client a ainsi la possibilité de tester diverses configurations avant d'investir dans la solution de suivi d'état qui colle à ses besoins.

AR Y a-t-il déjà des entreprises qui utilisent ce suivi d'état ABB Ability ?

SK Effectivement, dans le monde entier, nous avons des clients qui optimisent ainsi la surveillance de leur parc. Citons par exemple l'énergéticien suédois Uppsala Vatten och Avfall, dont les opérateurs ont accès à des rapports et à des indicateurs temps réel de l'état des groupes de pompage : fiabilité, utilisation, consommation de courant ou charge. En Norvège, la société minière Glencore Nikkelverk a intégré la solution ABB aux groupes de pompage d'eau salée qui assurent le refroidissement de sa raffinerie de nickel. Disposer de plus d'informations sur la température des variateurs autorise des comparaisons avec les données fournies par d'autres solutions de surveillance.

AR D'autres exemples ?

SK Oui, là encore dans le monde entier. En Finlande, le sidérurgiste SSAB utilise la télé-assistance ABB Ability Remote Assistance, un service proposé en complément de l'offre ABB Ability Digital Powertrain, pour améliorer la fiabilité des variateurs les plus critiques de sa fonderie. La télésurveillance ABB a déjà permis de détecter précocement un défaut sur l'un des entraînements à vitesse variable.

L'entreprise agroalimentaire Olam International a également monté des capteurs communicants ABB Ability sur les moteurs de plusieurs de ses

—
03 Capteur communicant ABB Ability

03a Le capteur transforme n'importe quel dispositif (ici un palier prémonté) en un équipement connecté ; la transmission sans fil assure une détection précoce des problèmes potentiels.

03b Il s'installe et se retire en un tournemain.

—
04 Le portail ABB Ability affiche une vue unifiée des principaux paramètres opérationnels de chaque actif.

—
05 Le groupe agroalimentaire Olam International a pu améliorer la disponibilité de ses moteurs en les équipant de capteurs communicants ABB.



04



05

sites. Chocolaterie à Singapour, laiterie en Malaisie ou sucrerie en Indonésie, toutes ces usines bénéficient d'une maintenance prédictive grâce à la surveillance à distance des moteurs →5. Les arrêts de production ont nettement diminué et la durée de vie du système s'est allongée. Le client est enchanté de la solution ABB, qu'il trouve de loin supérieure à toutes les méthodes précédemment employées en termes de fiabilité et de disponibilité des actifs.

En Italie, le plus grand simulateur de chute libre au monde, Aero Gravity, fait aussi appel au suivi d'état ABB Ability Condition Monitoring pour garantir une sécurité maximale. Ce service cloud s'appuie sur des données collectées en continu et des indicateurs associés aux paramètres clés des variateurs, qui fournissent une vue d'ensemble du système et signalent les points exigeant une attention particulière. Les techniciens du client ont pour cela accès à toute une palette d'outils de diagnostic et d'analyse en ligne.

AR Justement, parlons de la formation du personnel. Le système est-il compliqué à faire fonctionner ?

SK Les informations d'état de tous les composants instrumentés sont rassemblées sur le tableau de bord du portail utilisateur. Un système de feux tricolores intuitif (vert : OK ; jaune : vigilance requise ; rouge : problème majeur) permet aux opérateurs ou techniciens de maintenance d'avoir une vision d'ensemble. Bien entendu, ils peuvent également consulter le détail de chaque paramètre, par exemple vibrations, vitesse, température ou consommation énergétique.

AR La solution se résume-t-elle à une offre de maintenance « intelligente » ?

SK Absolument pas. Supposons que vous êtes responsable d'une grosse station de pompage. Grâce à la vision transparente et globale des points de fonctionnement et sollicitations de l'ensemble des composants de vos groupes de pompage, vous êtes à même de sélectionner le régime de marche qui maximisera la durée de vie des actifs tout en minimisant la consommation énergétique du site. Il ne s'agit pas seulement de prédire une défaillance, mais d'assurer un fonctionnement optimal et durable.

AR Quelles sont les prochaines étapes ?

SK Nous avons présenté la solution ABB Ability Digital Powertrain à la Foire de Hanovre 2019 et ce lancement a monopolisé nos efforts de ces derniers mois. Toutefois, nous travaillons déjà sur des améliorations et des extensions. Peut-être reviendrai-je bientôt vous en parler !

AR Merci pour cet entretien, Sönke •

PRODUCTIVITÉ

Systemes de détection : du réel au virtuel

Le prototypage virtuel de systemes combinant plusieurs technologies de capteurs optimise et accélère le développement et la commercialisation de nouveaux produits. Voyons les nombreux atouts de cette méthode de conception par co-simulation, à l'aide d'exemples tirés de la mesure haute tension, de la détection de défaut d'arc électrique et de la protection électronique contre les surcharges.

—
01 Les sites de production modernes multiplient les systemes constitués d'une pléthore de capteurs « multitechnologies » qui doivent interagir. La virtualisation s'impose ici pour accélérer le développement produit, gagner en précision et en exactitude.

De nos jours, il n'est pas rare que les systemes industriels mêlent un grand nombre de composants complexes et hétérogènes →1 qui mettent en œuvre plusieurs disciplines (logiciel, optique, électrique, thermique ou mécanique), à différentes échelles de temps. Optimiser leur conception impose des méthodologies permettant de cosimuler l'interaction des constituants sans utiliser de prototypes physiques. Un enjeu pluridisciplinaire qui conduit au déploiement du prototypage virtuel et de la simulation « système », ou « réseau ».

—
Le prototypage virtuel vise à réduire le nombre de prototypes physiques liés à de nouveaux développements et technologies.

Dans ce cadre, c'est un ensemble prédéfini de règles, un peu comme les lois de Kirchhoff pour les systemes électriques, qui simulent l'interaction des différents blocs de conception. Cette méthode se distingue de la simulation par éléments finis qui prend en compte les moindres composantes d'un problème.

—
Yannick Maret
Matija Varga
Stefano Maranò
ABB Corporate Research
Baden-Dättwil
(Suisse)

yannick.maret@ch.abb.com
matija.varga@ch.abb.com
stefano.maranò@ch.abb.com

Francisco Mendoza
ABB Corporate Research
Ladenbourg
(Allemagne)

francisco.mendoza@de.abb.com

Joris Pascal
Ancien collaborateur ABB





Le prototypage virtuel a pour premier objectif de réduire le nombre de prototypes physiques nécessaires aux nouveaux développements produit pour en accélérer la mise sur le marché →2.

Plaidoyer pour le prototypage virtuel

La profusion de composants hétérogènes dans l'instrumentation industrielle est bien illustrée par l'évolution des systèmes de mesure en haute tension, où les transformateurs de courant ou de tension classiques cèdent le pas aux transformateurs de mesure non conventionnels.

Certes, le transformateur classique réalise des mesures précises mais il n'est pas sans inconvénients : limitation de la dynamique de mesure liée à la saturation du noyau ferromagnétique avec la montée en charge du réseau, échauffement dû aux courants de Foucault, faible réponse transitoire aux événements critiques (court-circuit, surtension),

risque de fuite, d'incendie ou encore d'explosion en cas d'isolant papier ou huile. Sans compter que l'appareil est volumineux, lourd et onéreux ! Le transformateur non conventionnel remédie à ces défauts en utilisant d'autres principes de mesure, comme l'électro-optique, les inductances dans l'air, etc.

Reste que le développement d'un nouvel appareil exige des connaissances en physique (composants optiques, organes mécaniques, par exemple), en électronique (mise en forme du signal, communication) et en mathématiques (traitement du signal). Une pluridisciplinarité qui tient à l'architecture même du transformateur, dont les éléments constitutifs ne se contentent plus d'une simple connexion passive mais doivent interagir en boucle fermée.

Le prototypage virtuel considère un système complexe dans sa globalité.

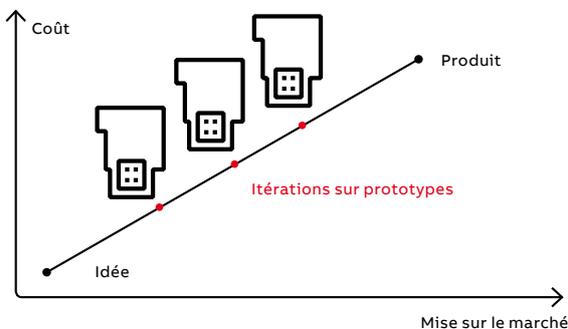
Pour cela, il faut traiter la complexité du système dans sa globalité ; c'est tout l'intérêt du prototype virtuel qui permet aux développeurs de tester, de vérifier et d'améliorer la conception d'un produit comme un tout cohérent et non plus un assemblage d'unités hétérogènes.

Les bénéfices de la virtualisation

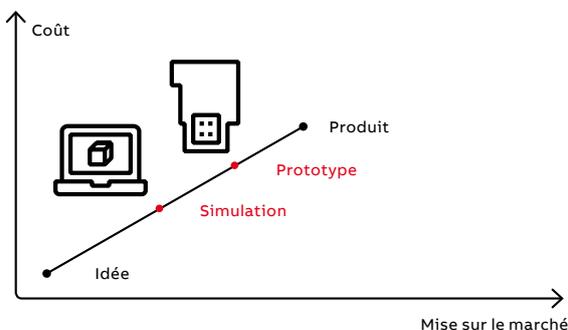
Le prototypage virtuel permet de décomposer le flot de conception de manière objective et optimale. Concrètement, il assiste les concepteurs dans leur décision d'implanter telle ou telle tâche dans le matériel ou le logiciel, et de traiter les signaux en analogique ou en numérique.

Le prototypage virtuel aide par ailleurs à affecter correctement les spécifications système à chaque module en facilitant l'étude de la précision globale de l'instrumentation et de la propagation des erreurs d'un module à l'autre. Il permet aussi de détecter les erreurs plus facilement, en amont du cycle de développement, et de vite évaluer l'impact sur l'ensemble du système de la modification d'un module, pour en optimiser le coût par exemple.

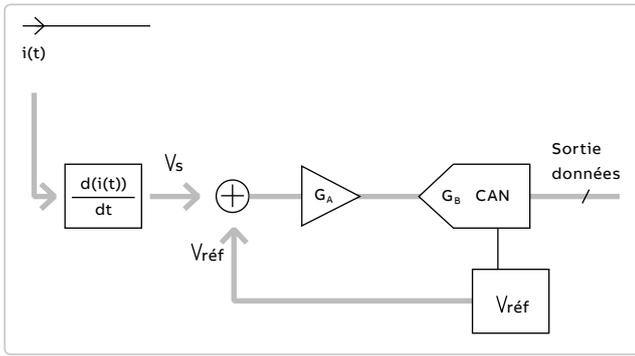
En réutilisant les modèles, le prototypage virtuel accélère les nouveaux développements. Pour cela, l'idéal est de regrouper et de mutualiser les composants étudiés dans des bibliothèques facilement accessibles aux ingénieurs ou aux outils de conception automatique des futurs projets.



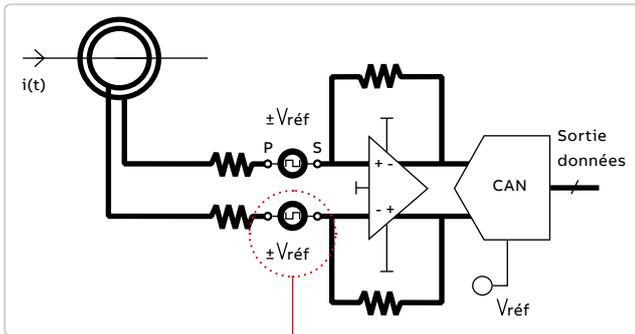
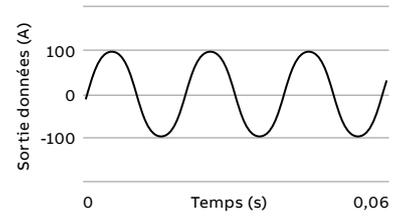
02a



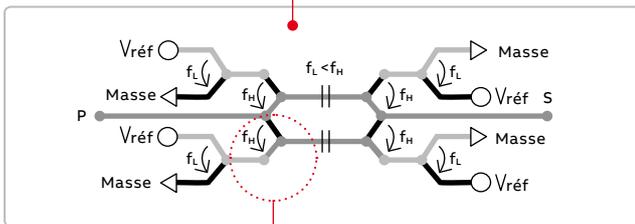
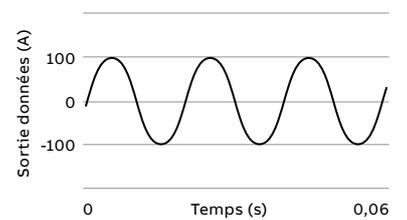
02b



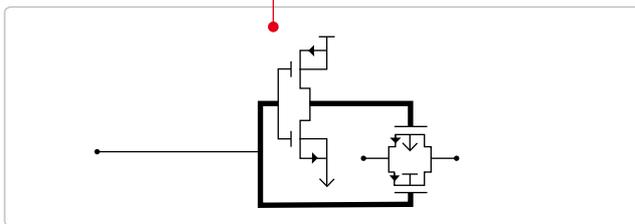
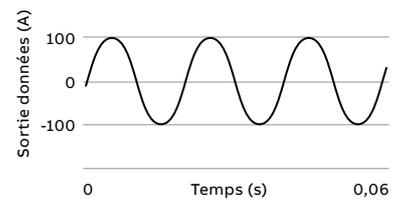
VHDL-AMS :
comportement
global



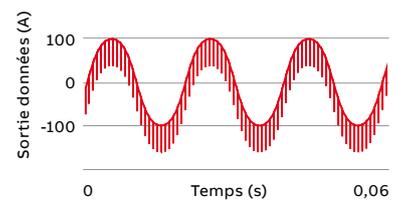
Capteur : modèle
physique
CAN, ampli :
comportement
Commutateurs :
VHDL-AMS
structurel



Commutateurs :
fabricant CI
Modèle SPICE
VHDL-AMS/SPICE



Modèle de
transistor
VHDL-AMS



Niveau d'abstraction

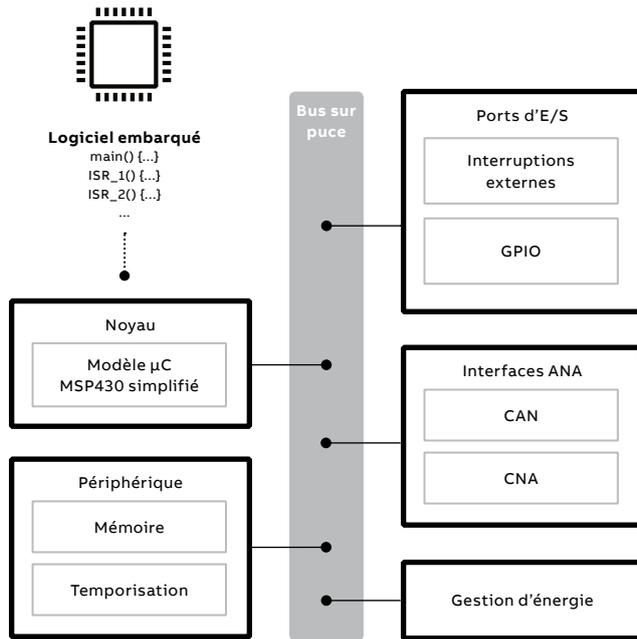
03

02 Le prototypage virtuel diminue les coûts, les délais de mise sur le marché et le nombre d'itérations de prototypes.

02a Prototypage traditionnel

02b Prototypage virtuel

03 Différents niveaux de détail d'un convertisseur réseau auto-calibrant pour transformateur de mesure non conventionnel à bobine de Rogowski



04

Autre intérêt : la collaboration entre catégories de produits. Un modèle de capteur de courant, par exemple, peut être réutilisé dans un prototype virtuel de disjoncteur qui servira à son tour à modéliser l'application cliente.

Le prototypage virtuel permet alors une compréhension des besoins du client qui va bien au-delà de la simple conformité normative, par exemple lorsque ces exigences débordent régulièrement du champ des spécifications système. Dans ce cas, la réutilisabilité du prototype aide ABB à comprendre l'impact de ces évolutions hors spécifications, à les chiffrer et à en aviser le client. Des contraintes applicatives qui peuvent être prises en compte dans les futurs développements.

Méthodologie

Il existe plusieurs outils de prototypage virtuel. Celui utilisé par ABB pour le développement de capteurs s'appuie sur le langage de description de matériel VHDL-AMS, normalisé IEEE 1076. « AMS » est en fait une extension du VHDL dédiée à la modélisation de signaux analogiques et mixtes, qui est exécutée sur des simulateurs manipulant des signaux à temps continu et à temps discret. Le simulateur étant de type événementiel, seul un changement de valeur du signal déclenche le calcul d'un

nouveau point de fonctionnement. Le traitement des signaux mixtes logiques/analogiques gagne ainsi en rapidité. ABB emploie également SystemC, langage IEEE 1666 basé sur un ensemble de bibliothèques créées en C++ pour modéliser et simuler les architectures embarquées combinant matériel numérique et logiciel. L'élaboration de prototypes virtuels tenant compte de cette mixité oblige à co-simuler des modèles SystemC et VHDL-AMS.

Le langage VHDL-AMS facilite l'usage de méthodes de conception descendante ou ascendante, voire des deux. Cette souplesse permet à l'équipe projet d'entamer une partie du processus de conception avec des modèles de haut niveau qu'elle affinera au fil du développement (approche descendante).

—
En réutilisant les modèles, le prototypage virtuel accélère les nouveaux développements.

En parallèle, si une partie de l'équipe dispose d'emblée de modèles détaillés d'autres constituants, elle peut les utiliser en l'état ou les simplifier à un plus haut niveau de modélisation pour écourter le temps de simulation (approche ascendante).

VHDL-AMS gère d'office une multitude de descriptions de composants et donc de niveaux d'abstraction et de détail pour un modèle donné. La figure →3 illustre cette aptitude dans le cas d'un convertisseur côté réseau auto-calibrant pour transformateur de mesure non conventionnel à bobine de Rogowski. L'auto-calibrage s'effectue par injection dans l'électronique d'un signal carré à haute fréquence d'amplitude très stable. Le logiciel calcule les coefficients de calibrage, qu'il utilise pour corriger la mesure basse fréquence. Ce principe a d'abord été testé par simulation avec un haut niveau d'abstraction. Le premier prototype a bien fonctionné mais la mesure était entachée de parasites haute fréquence. Ce phénomène a pu être reproduit par simulation en augmentant le niveau de détail des transistors des commutateurs analogiques qui génèrent le signal carré. ABB a ensuite utilisé le prototype virtuel pour identifier et valider les mesures correctives adéquates (filtrage analogique, en l'occurrence).

—
04 Modèle de simulation de microcontrôleur dans SystemC

—
05 À partir d'un modèle d'installation domestique comprenant câbles, charges et défaut d'arc, dont on fait varier les paramètres, on obtient un ensemble fourni de données de courant et de tension. Reproduire cette même configuration avec des mesures réelles serait très coûteux et chronophage, si ce n'est impossible.

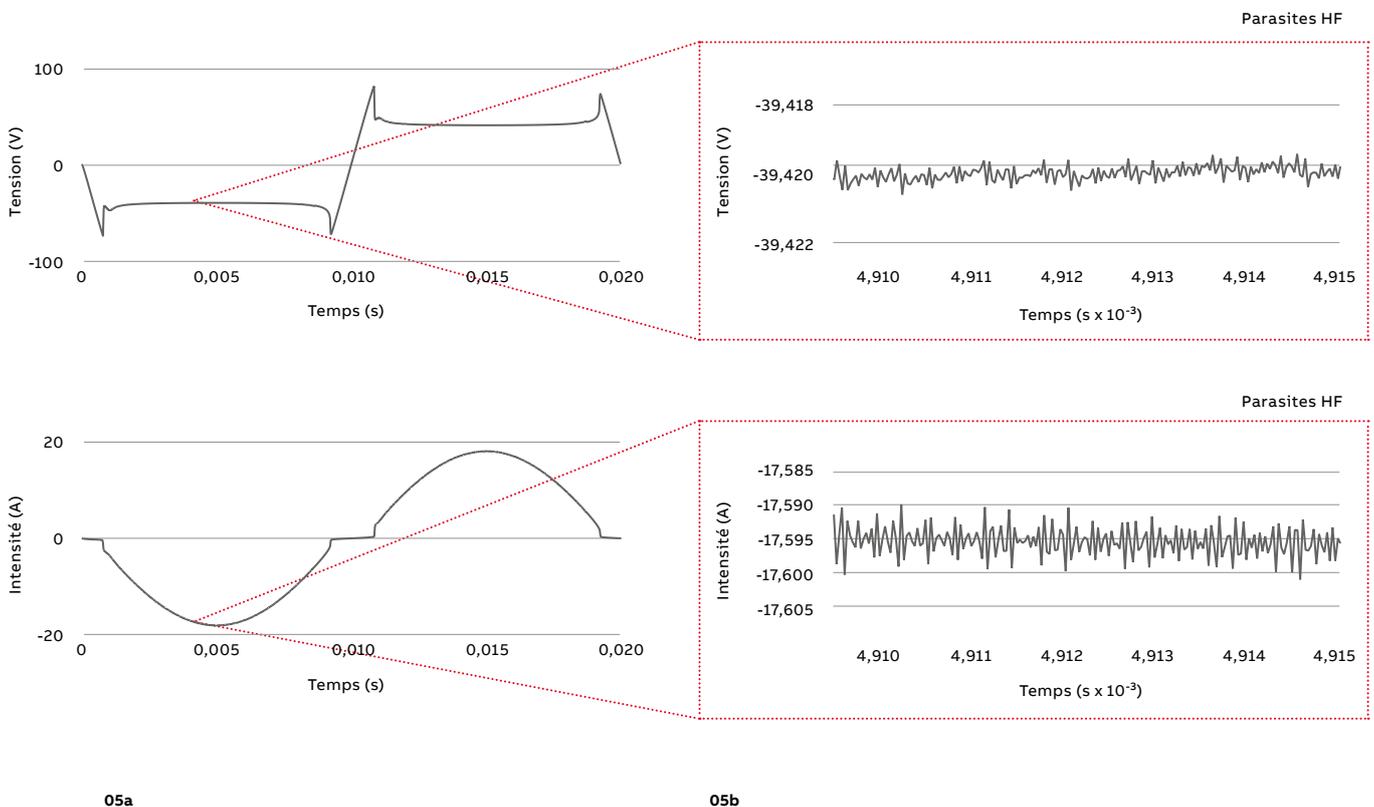
05a Tension d'arc simulée

05b Courant d'arc simulé

SystemC est un outil de description de modèles de simulation de composants logiques, tels que microcontrôleurs, convertisseurs analogiques-numériques (CAN), unités de stockage, émetteurs-récepteurs, etc. →4. Son haut niveau d'abstraction facilite grandement la création et la réutilisation des composants par rapport aux langages comme VHDL. Ces composants sont regroupés pour bâtir des prototypes virtuels capables de reproduire le comportement de plates-formes matérielles réelles et d'exécuter des logiciels natifs. Les développeurs ont ainsi la possibilité de coder et de déboguer le logiciel bien avant de disposer de prototypes en dur.

—
Les prototypistes peuvent lancer une partie du processus avec des modèles de haut niveau qui s'affineront au fil de l'avancement du projet.

On peut envisager cette virtualisation dès que les modèles de haut niveau sont disponibles pour l'ensemble des principaux constituants, c'est-à-dire idéalement très tôt dans le cycle de développement, pour donner une idée claire du produit à l'étude, faciliter sa concrétisation et guider les concepteurs dans leurs choix architecturaux.



Simulation d'un détecteur d'arc

Ce dispositif a pour vocation de couper le circuit sur détection d'un arc électrique, limitant ainsi le risque d'incendie. Constitué d'un disjoncteur électromécanique, de capteurs et d'un microcontrôleur, il est capable de différencier les arcs dangereux des signaux de fonctionnement du parc électrodomestique (outillages, pompes, transmissions CPL, par exemple). Pour autant, il peine à éviter les déclenchements intempestifs provoqués par certains appareils bas de gamme.

Pour simuler les différents signaux de courant et de tension traités par un détecteur d'arc en fonctionnement normal ou anormal, ABB a créé un modèle VHDL-AMS d'installation électrodomestique comprenant des câbles, différents types de charges et un défaut d'arc, assortis de plusieurs schémas électriques, charges et emplacements de défaut préparamétrés →5.



06a



06b

Le modèle de haut niveau de la partie détection utilise une fonction de transfert mesurée, approchée par une transformée de Laplace sous forme de fractions rationnelles. L'algorithme de détection d'arc du microcontrôleur est tiré d'un script MATLAB utilisé pour la simulation.

—
 Les développeurs sont en mesure de coder et de déboguer le logiciel bien avant de disposer de prototypes en dur.

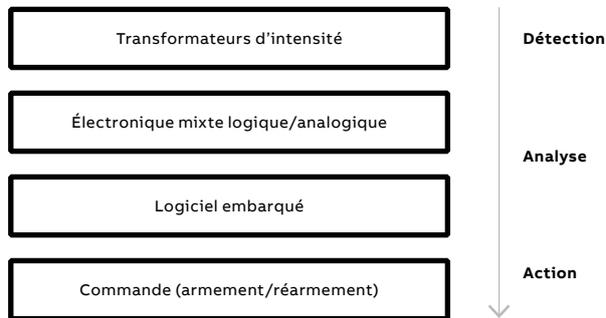
Ce double prototypage virtuel (détection anti-arc et installation électrique) permet de tester différents scénarios et de suivre l'état de l'appareil tout en explorant les détails d'un déclenchement ou d'un non-déclenchement. Grâce au niveau de précision et de personnalisation de ce banc d'essai virtuel, il est possible d'étudier de nouveaux principes de détection, dispositifs électroniques et algorithmes, mais aussi d'évaluer les dernières exigences normatives sans passer par un prototype physique ou des essais en laboratoire. Les validations se font ensuite sur prototype réel.

Simulation d'un relais de surcharge électronique

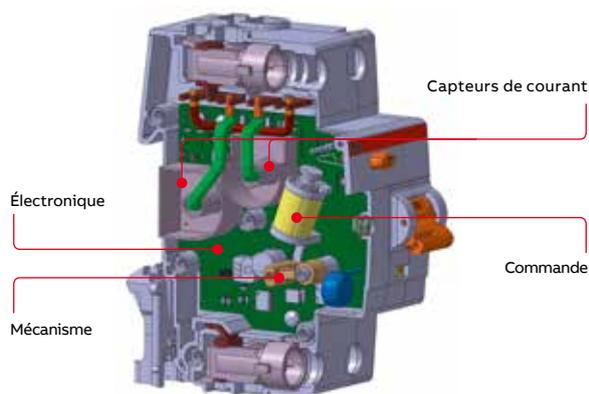
Ce dispositif s'appuie sur un transformateur d'intensité pour mesurer les courants d'un moteur. Le relais déclenche en cas de coupure de phase ou d'élévation anormale et prolongée du courant consommé, assurant une protection fiable et précise du moteur.

Les développeurs ont utilisé un premier prototype de relais contenant des composants numériques semblables à ceux figurant en →4 pour tester et valider les fonctionnalités d'un nouvel algorithme de détection. La simulation de chaque scénario d'essai ne dure que quelques minutes, cela a facilité l'adaptation et l'amélioration algorithmiques par itérations.

À un stade ultérieur du développement, un prototype virtuel plus complet et évolué a servi à tester toute la chaîne d'instrumentation. Pour cela, il a fallu simuler les transformateurs d'intensité, l'électronique analogique et numérique, ainsi que les logiciels embarqués →6. Des simulations de Monte-Carlo ont alors permis de comprendre les effets des écarts-types dans les résistances, les condensateurs, les tensions de sortie du régula-



06c



06d

— 06 Détecteur d'arc électrique et relais de surcharge sont deux produits ABB typiques de la conception multidomaine.

06a Détecteur d'arc

06b Relais de surcharge

06c Domaines d'application

06d Intérieur d'un détecteur d'arc avec les différents domaines concernés

teur, les tensions de décalage des ampli opérationnels, etc., sur la précision de calcul du délai de déclenchement du relais. Leurs résultats ont fourni de précieuses informations et aidé à identifier et à résoudre les failles de conception bien plus vite que la normale. Fini les campagnes d'essais en laboratoire : les tests à différents points et températures de fonctionnement ne prennent désormais que quelques heures.

— Les résultats de simulation fournissent de précieux éclairages sur le produit et aident à identifier et à résoudre les failles de conception en amont.

À mesure que les outils de modélisation progressent et que les bibliothèques de modèles s'étoffent et gagnent en précision, le prototypage virtuel est amené à reproduire de plus en plus fidèlement le comportement réel d'un dispositif, ce qui lui ouvre bien d'autres perspectives d'emploi. Une évolution portée par le raccourcissement des cycles de vie produit qui impose à la quasi-totalité de l'industrie moderne, d'accélérer le développement et la mise en production. •

Remerciements

La méthodologie exposée dans cet article et sa mise en œuvre sont le fruit d'une collaboration entre Juergen Becker, du Karlsruhe Institute of Technology (département d'informatique FZI), Alain Vachoux et Juan Sebastián Rodríguez Estupiñán, de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), ainsi que Jean-Baptiste Kammerer et Simon Paulus, de l'université de Strasbourg (Unistra).

PRODUCTIVITÉ

Pour des actifs « branchés » et optimisés

— Une étude de marché ARC Advisory classe ABB leader mondial des logiciels de gestion d'actifs destinés aux entreprises de production, de transport et de distribution électrique.



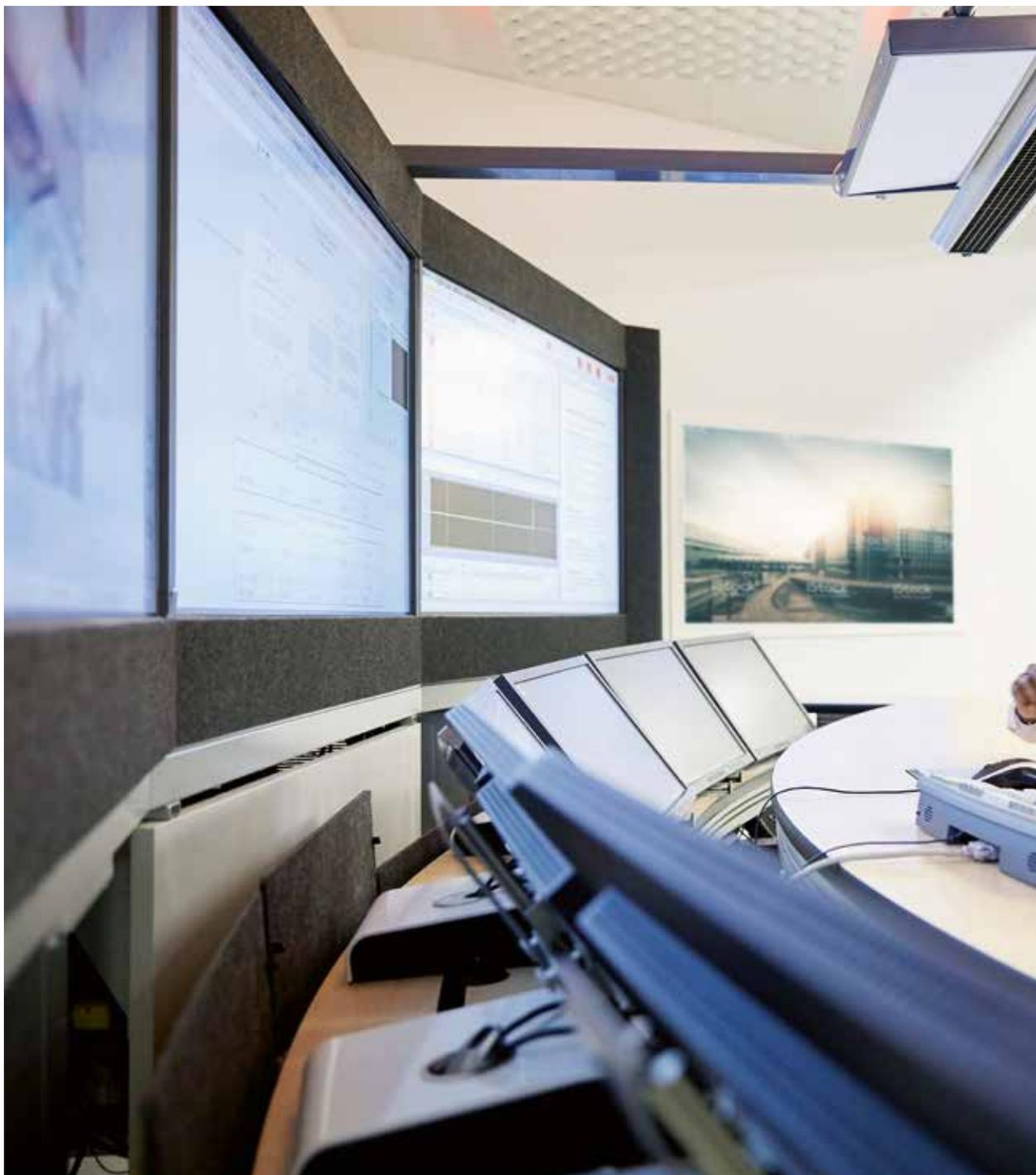
Matt Zafuto
Enterprise Software
Grid Automation
Broomfield (États-Unis)

matthew.zafuto@
us.abb.com



John Finney
Grid Automation
Zurich (Suisse)

john.finney@ch.abb.com



Dopé par la montée en puissance de l'apprentissage automatique, le nouveau logiciel Ability™ Ellipse® d'ABB vise à unifier les fonctionnalités des solutions de gestion des actifs, des effectifs et des performances de l'entreprise. Son déploiement annonce une révolution dans les métiers de la maintenance préventive et prédictive.



Le réseau électrique se complexifie de jour en jour ; en témoigne le développement des compteurs communicants et des commandes intelligentes, mais aussi des sources d'énergie décentralisées comme le solaire et l'éolien. Le futur confirmera cette évolution avec l'essor des véhicules électriques et des bâtiments à énergie positive, qui cumulent les trois fonctions de consommation, stockage et production énergétique.

Avec Ability™ Ellipse® d'ABB, les énergéticiens disposent d'une solution rationnelle et unifiée pour la gestion, la maintenance et la surveillance de leurs actifs.

À cette complexité croissante s'ajoute une augmentation exponentielle des données, déjà surabondantes : autant de difficultés à résoudre que d'opportunités à saisir ! Il est en effet manifeste que les méthodes de gestion d'actifs traditionnelles ne suffiront pas. En revanche, l'utilisation efficace des données, à grand renfort d'automatisation et de numérisation, laisse augurer une vision plus précise et globale du monde réel.

C'est dans cette perspective qu'ABB a annoncé le lancement de sa suite logicielle Ability Ellipse au profit des énergéticiens qui veulent optimiser leurs actifs et réduire les coûts de maintenance, les défaillances de matériel ainsi que les pannes de réseau.

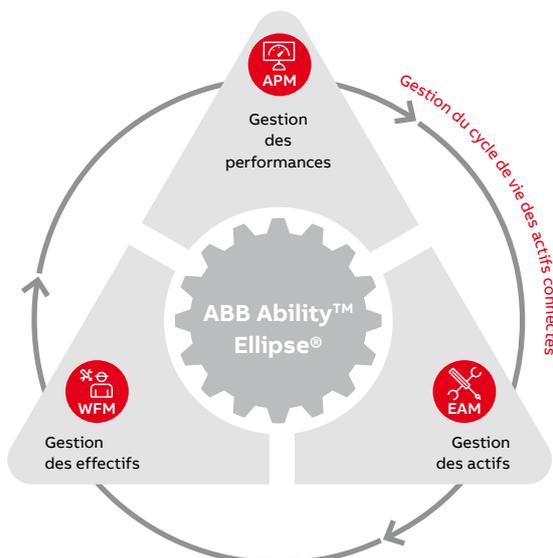
« Nous comprenons parfaitement les enjeux de performance et de complexification du réseau auxquels se heurte l'industrie électrique, assure Massimo Danieli, responsable de l'activité Grid Automation d'ABB. »

Avec Ability Ellipse, la filière peut dorénavant compter sur une solution rationnelle et unifiée embrassant tout le cycle de vie des actifs connectés (gestion, maintenance, surveillance) pour rendre le réseau plus robuste, plus intelligent, plus respectueux de l'environnement. »

La suite logicielle intègre des modèles d'apprentissage automatique.

Porté par la révolution algorithmique

Au fondement de ces avancées figurent de puissants algorithmes d'apprentissage automatique qui s'invitent de plus en plus dans l'évaluation et la gestion des performances et des risques liés aux actifs. S'appuyant sur les masses de données remontées des capteurs connectés ainsi que sur les fonctions de communication optimisées par l'Internet des objets et la technologie Microsoft Azure, les algorithmes sont fin prêts pour se nourrir et apprendre de ces données, généraliser à partir d'expériences passées et en dégager des règles... sans l'intervention, ou presque, d'un être humain. Ces outils d'intelligence artificielle sont aujourd'hui regroupés dans la solution ABB Ability Ellipse, qui procure à l'industrie lourde des solutions de planification et d'ordonnancement de la maintenance, ainsi que de renouvellement du parc de machines.

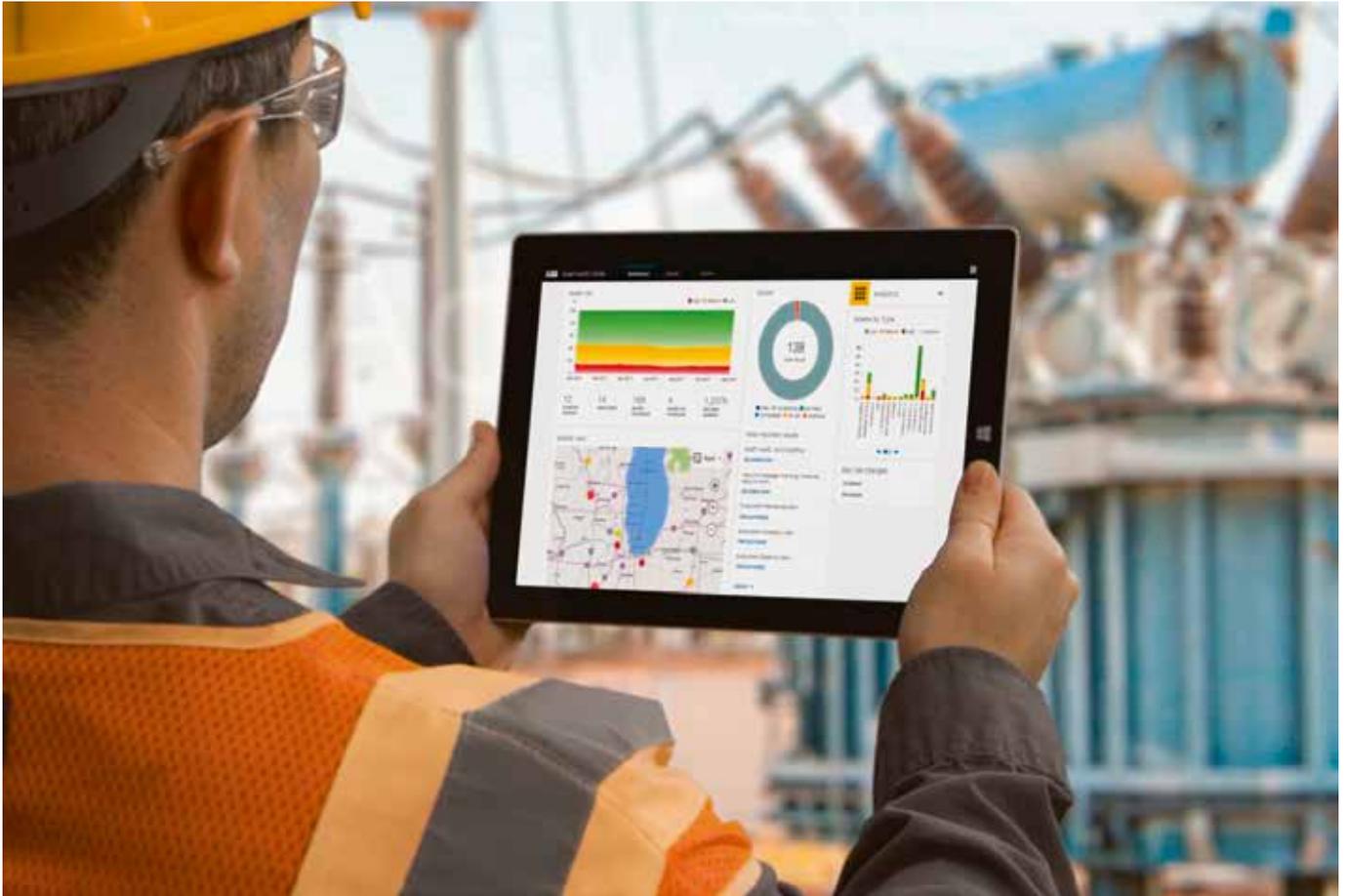


La nature holistique des données récoltées et traitées par apprentissage automatique permet de casser les silos d'informations mais aussi de rationaliser les opérations et les stratégies. « *Le talon d'Achille de la transformation numérique dans le secteur de l'énergie est l'inaptitude à unifier les applications et les données*, souligne Kevin Prouty, vice-président Energy & Manufacturing Insights chez IDC. *Il faut à l'évidence commencer par lever les barrières de l'approche par silos pour décloisonner la gestion des actifs et des effectifs dans l'entreprise. La gestion des performances devenant un pivot de la transformation du réseau, il est vital que les acteurs de la filière gèrent leurs ressources matérielles et humaines comme un tout.* »

C'est précisément ce que permet la solution Ability Ellipse →1. ABB compte 1,3 million d'actifs en production, analysés chaque jour en environnement client. Lors d'un essai en conditions réelles, l'algorithme d'apprentissage automatique Ellipse a été capable de prédire la défaillance imminente de gros transformateurs de puissance, à partir de données de décharges partielles, et ce suffisamment tôt pour éviter la catastrophe. Un progrès considérable quand on sait que, jusqu'à présent, la prédiction des défaillances de transformateurs relevait plutôt du quitte ou double ! Cet exemple parmi d'autres montre bien comment l'industrie électrique a pu, à partir des données collectées sur les appareils, remédier au dysfonctionnement de manière proactive, sans risquer la panne →2.

Autre utilisation pilote intéressante : l'apprentissage machine appliqué à l'évaluation et à la gestion des performances des aiguillages et moteurs qui permettent aux trains de changer automatiquement de voie. Les industriels du ferroviaire s'efforcent d'améliorer la prédiction des détériorations matérielles pour pallier le déclenchement sur défaut ou après défaut des alarmes actuelles. Aidées en cela par l'apprentissage automatique, des techniques évoluées de reconnaissance des formes sont désormais en mesure d'identifier les équipements défectueux et d'alerter très tôt la maintenance pour une intervention ciblée.

Ces deux cas illustrent le potentiel de la prédiction fondée sur l'apprentissage automatique en matière de sécurité, de réduction des coûts, de gestion des performances et d'atténuation des risques.



02

— 01 Les trois piliers de la gestion d'actifs ABB Ability Ellipse pour un réseau fort, intelligent et écologique

— 02 ABB Ability Ellipse relie les équipes de terrain aux systèmes de gestion d'actifs et d'analyse prédictive de l'entreprise. Proposée en version « sur site » ou « à la demande » (mode SaaS), la solution vise l'industrie électrique et autres secteurs dotés d'équipements lourds comme les renouvelables, les transports et la mine.

Bibliographie

[1] Enterprise Asset Management Global Market Analysis 2017-2022, disponible sur : <https://www.arcweb.com/market-studies/enterprise-asset-management>

Chef de file

ARC Advisory, cabinet américain de recherche et de conseil en technologies pour l'industrie, les infrastructures et les villes, a récemment classé ABB numéro un mondial des fournisseurs de solutions de gestion d'actifs destinées aux entreprises de production, de transport et de distribution électrique [1].

Cette première place vaut également pour la gestion d'équipements et d'ouvrages électriques (lignes, postes, pylônes, etc.), mais aussi d'actifs miniers et d'équipes de maintenance sur site en Asie.

« La division Power Grids d'ABB est aux avant-postes des solutions numériques dans le domaine de l'énergie, déclare Ralph Rio, vice-président d'ARC Advisory. Une réussite qui doit beaucoup à sa grande expertise de la filière et à ses nombreuses réalisations au service des énergéticiens du monde entier. Notre enquête a montré que le marché mondial de la gestion d'actifs d'entreprise a bondi de 11 % en 2017 ! Cette forte progression devrait se poursuivre, ce qui est de bon augure pour ABB puisque l'énergie est le plus vaste marché de gestion d'actifs d'entreprise au monde. »

— ABB Ability Ellipse promet de révolutionner la maintenance préventive et prédictive.

En unifiant les fonctionnalités de gestion des actifs, des effectifs et des performances des équipements, la solution ABB Ability Ellipse entend révolutionner la maintenance préventive et prédictive. « Notre offre est parfaitement adaptée aux besoins de l'industrie électrique, et notre leadership réaffirme durablement notre position de partenaire privilégié de toute la chaîne de valeur », conclut M. Danieli. ●

PRODUCTIVITÉ

La co-simulation donne du souffle à la commande de disjoncteurs

Le développement de la prochaine génération d'actionneurs de disjoncteurs passe par la compréhension des phénomènes mécaniques, électriques et électromagnétiques en jeu, ainsi que de leurs interactions. À cette fin, la co-simulation accélère le développement et améliore la qualité du produit.

—
Thorsten Schindler
Arda Tüysüz
Christian Simonidis
ABB Corporate Research
Ladenbourg (Allemagne)

thorsten.schindler@
de.abb.com
arda.tueysuez@
de.abb.com
christian.simonidis@
de.abb.com

La production d'origine renouvelable (EnR), solaire et éolienne en tête, connaît actuellement une croissance rapide sous l'effet de l'urgence climatique et de notre soif d'énergie. Toutefois, sa nature intermittente complique la tâche des gestionnaires des réseaux de transport et de distribution d'électricité [1] →1, qui doivent trouver des solutions prêtes à déployer tout comme élaborer des stratégies à moyen et long terme.

—
Le disjoncteur moyenne tension VM1 d'ABB ne nécessite aucune maintenance et se prête à de multiples applications.

C'est par exemple le cas de l'Allemand TenneT qui ne cesse d'alerter sur la hausse spectaculaire du nombre d'interventions d'urgence destinées à stabiliser le réseau [2]. Les principaux responsables en sont la fluctuation de la demande au fil de la journée dans le sud de l'Allemagne, mais surtout le

caractère particulièrement aléatoire de la production éolienne dans le nord du pays et l'insuffisance des capacités de transit nord-sud, qui n'augmentent pas assez rapidement.

Les appareils de coupure électromagnétiques peuvent contribuer à résoudre certains problèmes qualitatifs, comme la multiplication des commutations synchrones capacitives, liée à l'insertion de dispositifs de compensation, ou encore la reconnaissance et la mise en forme du transit de puissance. Par rapport à une commande classique, les dispositifs électromagnétiques comportent moins de pièces et se caractérisent par une mécanique plus simple, ainsi qu'une fiabilité, une qualité et une longévité exceptionnelles. Ils s'adaptent en outre à une multitude de situations. Ainsi, le disjoncteur moyenne tension (MT) VM1 d'ABB →2 n'exige aucune maintenance et convient à de multiples usages et secteurs industriels, de la production et la distribution d'électricité (postes de transformation) à la chimie, la métallurgie et l'automobile, sans oublier l'alimentation électrique des aéroports, des bâtiments, etc. [3].

—
01 La part croissante des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique met le réseau à rude épreuve, en particulier les disjoncteurs qui équipent les postes. La co-simulation mécanique-électrique-magnétique optimise la conception des disjoncteurs.



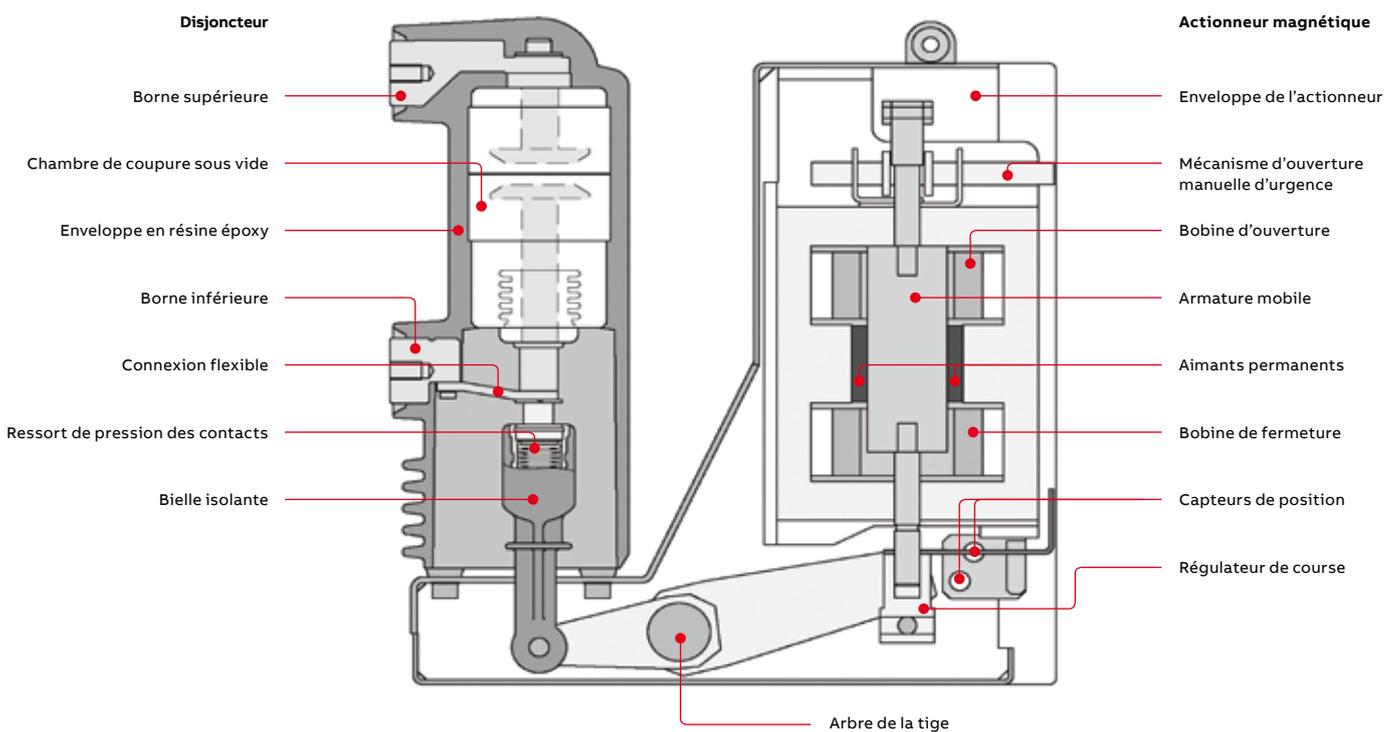


02

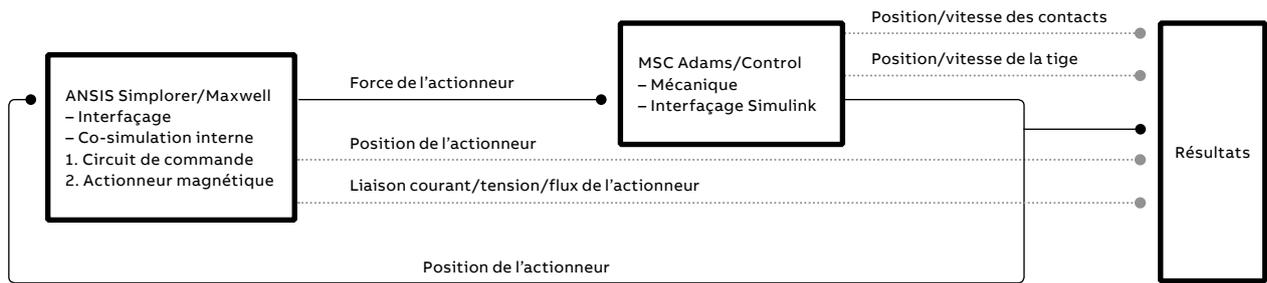
Ses composants →3, à savoir l'actionneur magnétique linéaire, le circuit électronique de commande, le condensateur (réserve d'énergie pour la manœuvre), l'arbre central (raccordé aux trois pôles de la chambre de coupure sous vide) et les capteurs de position de commutation, se répartissent en trois sous-ensembles : le disjoncteur à proprement parler avec ses trois pôles, l'actionneur et la tige de liaison entre ces deux composants. Grâce aux bobines d'ouverture et de fermeture, l'ouverture, la fermeture, le verrouillage et le déverrouillage se font avec un seul actionneur.

La physique de l'actionneur magnétique étant de nature transitoire, il convient d'étudier à la fois ses aspects mécaniques et électromagnétiques.

La manœuvre de fermeture exige que l'actionneur transmette son mouvement de translation à la tige en 45 à 60 millisecondes. La force qu'il subit en retour est la somme des forces de compression des ressorts de contacts et des forces d'inertie, projetées dans l'axe de l'actionneur. La principale source d'énergie est fournie par un condensateur



03



04

—
02 Disjoncteur moyenne tension VM1 d'ABB

—
03 Schéma du disjoncteur VM1

—
04 Déroulement de la co-simulation

préchargé à $100-400 V_{CC}$, tension qui est ensuite appliquée à l'enroulement concerné de l'actionneur par le circuit de commande.

La physique de l'actionneur magnétique étant par nature transitoire, il convient d'étudier à la fois les composantes mécaniques et électromagnétiques du dispositif tant pour comprendre son fonctionnement global que pour optimiser sa robustesse et son efficacité. D'où l'intérêt d'une plate-forme de co-simulation pour concevoir ces actionneurs.

Co-simulation et couplage électromagnétique-mécanique

Pour développer un actionneur MT, on utilise généralement soit un simple modèle mécanique de la tige et de la séparation des contacts intégré au logiciel de conception électromagnétique, soit une courbe de force/position quasi statique, dérivée de ce même logiciel et associée à une modélisation mécanique pointue. Aujourd'hui, les outils de simulation dynamique multicorps, comme MSC Adams, et leurs extensions dédiées à la modélisation des déformations, frottements et jeux, sont incontournables.

Pour précis et robustes qu'ils soient, les disjoncteurs sont sensibles à ces mécanismes qui, s'ils sont négligés, risquent de fausser les calculs. Il fallait donc un environnement de co-simulation transitoire couplant un modèle électromagnétique quasi transitoire à pas de temps par éléments finis, pour l'actionneur, et un modèle mécanique multicorps, pour les autres éléments du disjoncteur. Le modèle d'actionneur utilise le logiciel de simulation de champs magnétiques ANSYS Maxwell tandis que le couplage avec la modélisation mécanique multicorps MSC Adams se fait dans ANSYS Simplorer (logiciel de simulation multidomaine), Simulink

(environnement de programmation graphique pour MATLAB) et MSC Adams/Control (extension contrôle-commande). La figure →4 schématise les principales composantes de cette plate-forme et le déroulement de la co-simulation : le modèle magnétique transmet la force de l'actionneur au modèle mécanique, qui lui renvoie le déplacement linéaire de l'actionneur.

—
Les modèles paramétriques des pôles, de la tige et de l'enveloppe sont enregistrés dans une bibliothèque pour réutilisation ultérieure.

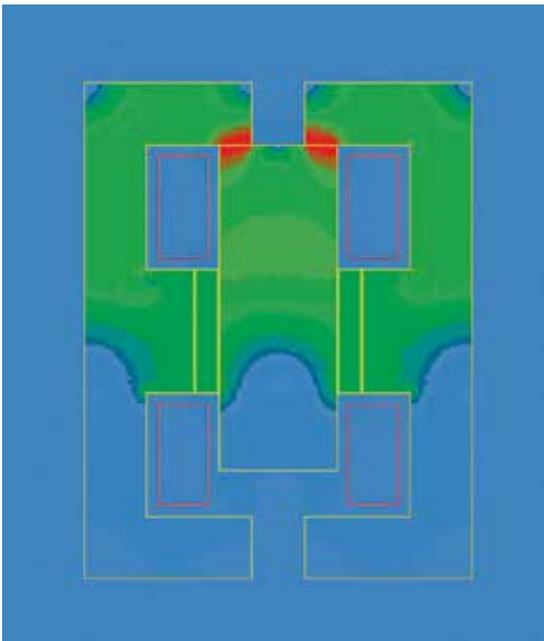
MSC Adams/Control : simulation multicorps et couplage

La simulation multicorps d'un disjoncteur doit s'appuyer sur une modélisation systématique et complexe des jonctions (frottement et jeu inclus), dans MSC Adams →5 par exemple. Il peut être judicieux de représenter les modèles des pôles, de la tige et de l'enveloppe sous forme paramétrique afin de pouvoir les réutiliser dans une bibliothèque validée par les ingénieurs. Les paramètres physiques sont tirés des exécutions réelles.

Le modèle de couplage définitif est obtenu dans MSC Adams/Control. Le signal d'entrée est donné par la variable force, tandis que le signal de sortie correspond à *minima* au déplacement de l'armature ; l'espace entre contacts, la vitesse de la chambre de coupure, ainsi que la vitesse et la position de la tige sont aussi des paramètres d'intérêt →7.



05



06

ANSYS Maxwell/Simplorer : simulation électromagnétique et couplage

Le modèle magnétique par éléments finis de l'actionneur VM1 →6 est exécuté en 2D pour limiter la complexité calculatoire sans pour autant rogner sur la précision de la modélisation des performances de l'actionneur. Les bobines étant en fil fin, il est possible de négliger les effets de peau et de proximité, ce qui simplifie d'autant le calcul. Par contre, au risque de compliquer la résolution numérique, on tient compte de la saturation magnétique partielle du noyau, à l'aide d'une courbe de magnétisation précise, car c'est là un paramètre important du fonctionnement de l'actionneur.

—
Par rapport au calcul traditionnel en quasi-statique de la force de l'actionneur, la co-simulation dynamique prend en compte le couplage dynamique et les courants de Foucault.

Le pas de temps est défini par ANSYS Simplorer, couplage avec MSC Adams inclus. Le modèle magnétique ANSYS Maxwell est inséré sous forme de bloc de co-simulation transitoire dans Simplorer, qui joue le rôle de simulateur « maître ». Pour le circuit électrique, mieux vaut utiliser un interrupteur dépendant de l'état, qui se ferme après décroissance des vibrations initiales du modèle mécanique (garantie de retour à l'état stable initial) et s'ouvre à une certaine valeur de la course totale (gage de souplesse de commande et de réduction de la consommation énergétique). Simplorer permet également de mettre en œuvre une commutation plus pointue, dépendante de l'état, pour modéliser des commandes et schémas différents, et de concevoir des actionneurs plus « pilotables ».

MATLAB/Simulink : couplage et post-traitement

Toute la chaîne logicielle, telle que la perçoit MATLAB/Simulink, est représentée en →4. La co-simulation démarre dans MATLAB avec le post-traitement de l'ensemble des variables d'intérêt issues des simulations mécaniques et électromagnétiques. Toutes les intégrations ANSYS Maxwell/Simplorer, MSC Adams et MATLAB/Simulink s'exécutent en parallèle, dans l'intervalle de communication spécifié. Dans tous les cas, quand il y a un couplage avec ANSYS Simplorer, c'est Simplorer qui orchestre cette co-simulation de haut vol.

—
05 Modèle dynamique multicorps dans MSC Adams

—
06 Modèle électromagnétique dans ANSYS Maxwell

—
07 Cinématique du comportement attendu du disjoncteur à la fermeture, fournie par MSC Adams et ANSYS Maxwell aux fins de vérification

Résultats

Que peut-on attendre de la co-simulation dynamique d'un actionneur électromagnétique linéaire ?

Par rapport au calcul classique, en quasi-statique, de la force de l'actionneur, la co-simulation dynamique prend en compte deux phénomènes supplémentaires, à savoir le couplage dynamique et les courants de Foucault, qui ont pour effet d'augmenter les pertes au niveau de la force de l'actionneur. Seule la co-simulation dynamique permet de représenter un niveau de force réaliste, parfois deux à trois fois inférieur à celui traité par la simulation traditionnelle quasi statique qui aura tendance à surestimer, par exemple, les vitesses de fermeture, faussant la conception de la commande électromagnétique de disjoncteur.

—
La plate-forme de co-simulation a démontré tout son intérêt, en particulier pour les actionneurs électromagnétiques moyenne tension.

Co-simulation des actionneurs électriques

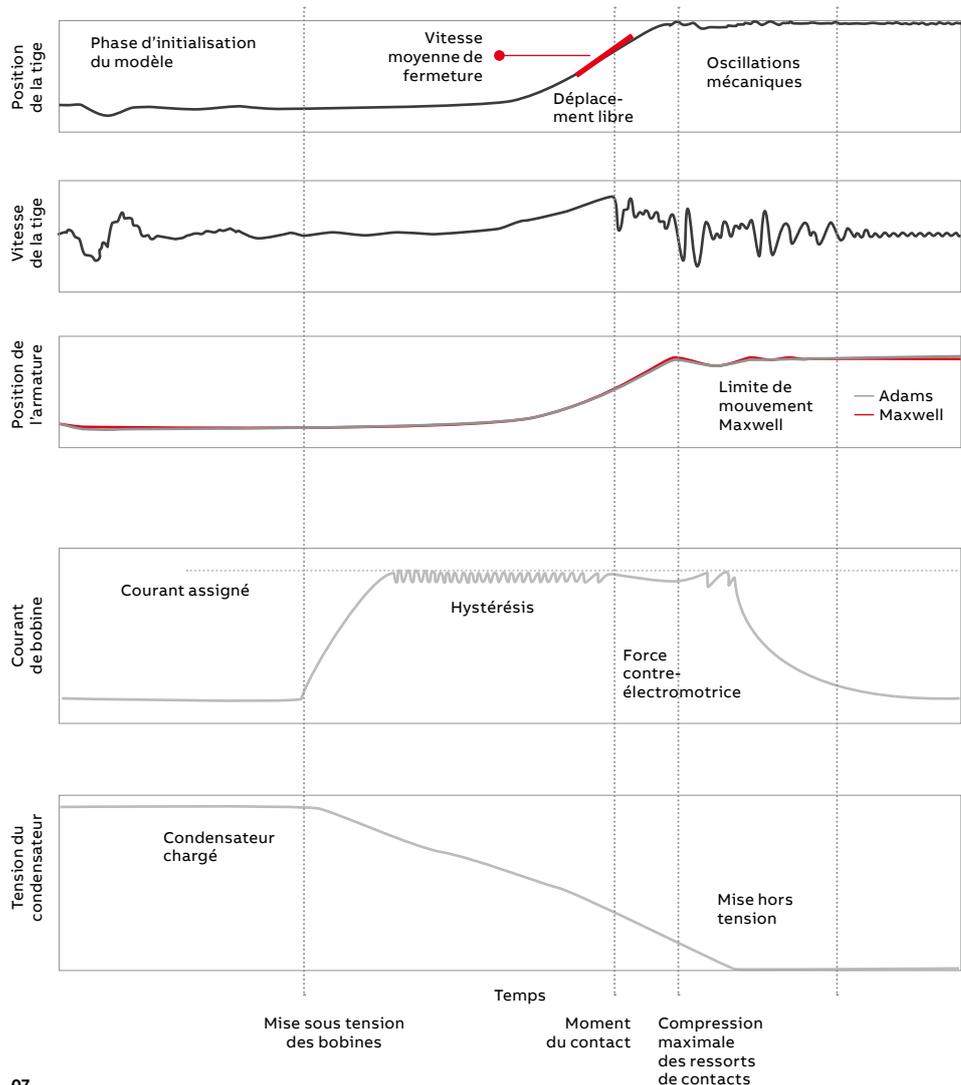
Si cette plate-forme de co-simulation a démontré tout son intérêt, en particulier pour les actionneurs électromagnétiques MT, elle peut facilement s'appliquer à n'importe quel type de couplage mécanique/magnétique nécessaire à la conception de commandes électriques. Elle ouvre ainsi la voie à un développement rapide et automatisé des actionneurs qui équiperont les appareillages du réseau électrique du futur. •

Bibliographie

[1] Agence allemande de l'énergie (dena), *dena Ancillary Services Study 2030 - Security and reliability of a power supply with a high percentage of renewable energy*, Berlin, 2014.

[2] *Focus Online*, « Stromnetz unter Druck - Betreiber zahlten 2017 fast eine Milliarde Euro für Noteingriffe », disponible (en allemand) sur : https://www.focus.de/immobilien/energiesparen/foerderung-in-energie-wende-fehlt-stromnetz-unter-druck-betreiber-meldet-rekordkosten-fuer-noteingriffe_id_8180597.html

[3] Brochure de la gamme VMI d'ABB, disponible sur : <https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentId=1VCP000157%20-%202018&LanguageCode=fr&DocumentPartId=&Action=Launch>



PRODUCTIVITÉ

La supervision au service du suivi de performances

Partie intégrante d'un équipement de poste classique, le nouveau système de surveillance de transformateur par modèles d'ABB s'affiche sur son superviseur MicroSCADA PRO. Cette innovation, testée sur site, offre une évaluation ininterrompue des performances de l'appareil en fonctionnement tout en détectant ses défauts imminents.

—
Tord Bengtsson
Nilanga Abeywickrama
Robert Saers
Subrat Sahoo
 ABB Corporate Research
 Västerås, (Suède)

tord.bengtsson@
 se.abb.com
 nilanga.abeywickrama@
 se.abb.com
 robert.saers@
 se.abb.com
 subrat.sahoo@
 se.abb.com

Dans notre monde connecté, les clients veulent toujours plus de fiabilité. Encore faudrait-il qu'ils disposent facilement d'informations d'état sur leur parc de machines → 1,2, y compris celles qui ne sont pas habituellement surveillées comme les transformateurs. C'est dans cette optique qu'ont été développées plusieurs méthodes de surveillance visant à détecter les défauts imminents des transformateurs de puissance et autres équipements du réseau électrique. ABB propose à cet effet une vaste gamme de produits et solutions [1].

Pour autant, quelques écueils subsistent : l'installation de systèmes de surveillance modernes ne va pas sans matériel spécialisé et divers logiciels propriétaires. De même, le suivi d'état fait habituellement appel à des modèles d'évaluation basés sur des données remontées de capteurs dédiés (gaz dissous, température, pertes diélectriques, décharges partielles, etc.).

Enfin, les transformateurs de puissance ayant un taux de défaillance d'environ 1 % par an [2-4], ils sont pour la plupart surveillés manuellement lors d'inspections périodiques hors tension. La rareté des mesurages est un frein considérable à la réactivité des opérateurs ou à leur capacité à rapprocher un relevé d'un défaut.

Suivi de performances

Conscients de ces limitations, les experts d'ABB ont envisagé d'utiliser à cette fin le matériel

de poste classique, avec un transformateur en exploitation, en complément des systèmes actuels de surveillance sous tension. Une solution aux multiples avantages :

- Fini les équipements spécialisés ou les ajouts de matériel ;
- Le superviseur (SCADA) du poste peut faire office d'outil d'analyse, d'affichage, d'alerte et de journalisation des événements. Son intégration complète avec toutes les autres fonctionnalités du poste autorise la communication avec les systèmes de hiérarchie supérieure.

Dans ces conditions, l'information extraite n'est pas seulement pertinente pour un grand nombre de scénarios de défaut connus, mais sert aussi évaluer la façon dont l'actif surveillé accomplit sa tâche : c'est l'essence même du suivi de performances.

—
 ABB a développé deux applications de surveillance intégrées à son logiciel de supervision MicroSCADA Pro.

Sur cette base, ABB a développé deux applications phares, l'une pour suivre les performances d'un transformateur de puissance, l'autre pour surveiller les manœuvres d'un changeur de prises. Toutes deux sont intégrées à son système de supervision



01

— 01 Opérateurs et ingénieurs ABB utilisent le dernier cri du suivi de performances d'actifs pour garantir aux clients une fiabilité optimale.

MicroSCADA Pro dont elles utilisent les outils de communication, d'affichage et d'alerte. L'installation de ces applications et la configuration des relais de protection sont les seules modifications à apporter pour disposer des mesures nécessaires.

Transformateur de puissance

Le suivi de performances analyse tous les courants et tensions en entrée et en sortie d'appareil pour en déduire le rapport de transformation, l'impédance de court-circuit et la perte de puissance [5-7]. Ces valeurs, directement comparables à celles figurant sur la plaque signalétique et aux résultats de la recette usine, sont faciles à interpréter. De même, la réactivité ou « sensibilité » estimée de la mesure aux changements est conforme à la précision requise des essais hors tension [8,9]. Le système de surveillance d'ABB permet de détecter les défauts majeurs d'un transformateur avec une très grande sensibilité (spires en court-circuit, déformation des enroulements, courants de Foucault, etc.). La mesure de la perte de puissance en charge avertit les opérateurs de n'importe quel changement d'état de l'appareil bien plus vite qu'avec une surveillance thermique. De quoi diminuer la fréquence des essais traditionnels hors tension.

Les nouvelles mesures sont également comparées aux relevés antérieurs. On peut ainsi déceler des variations soudaines de performance du transformateur (même minimes) et, suite à un défaut

par exemple, mener une comparaison avant/après incident. Il est également possible de repérer les conditions du système électrique qui influent sur la performance du transformateur, comme un retour de puissance de la production d'énergie renouvelable.

—
Le système de surveillance de transformateur ABB détecte avec une grande sensibilité les courts-circuits entre spires, les déformations d'enroulements et les courants de Foucault.

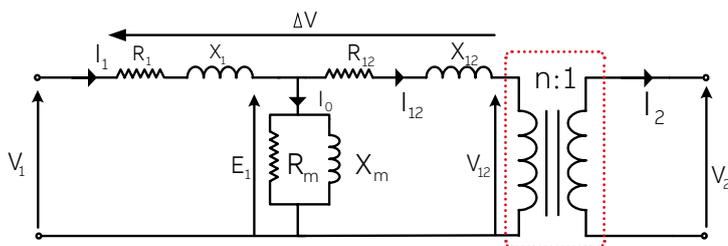
Surveillance par modèles

Le système de suivi des performances échantillonne les formes d'onde de courant et de tension en régime établi, à l'entrée et à la sortie du transformateur, plusieurs fois par heure. Au départ, ces observations servent à paramétrer un modèle simple de transformateur. La contribution de la magnétisation (paramètres R_m et X_m) peut être dissociée des impédances d'enroulements en effectuant des mesures dans plusieurs conditions de charge. Tous les paramètres du modèle sont alors définis →3.

Cela étant, le système de surveillance fournit en permanence de nouvelles estimations pour déceler d'éventuels changements.



02



03

Chaque mesure est comparée aux prédictions du modèle, ce qui permet de détecter des variations soudaines de performance aussi vite que le permet la cadence de mesurage.

Seule réserve : la précision limitée. Les transformateurs de tension et de courant affichent une plage de précision de 1 % ; or la perte de puissance d'un appareil moderne est classiquement moindre. Les nombreux essais sur site effectués par ABB montrent qu'un transformateur de mesure est plus sensible au changement (d'au moins un ordre de grandeur) que ce qu'exige la précision de référence.

De même, le suivi de performances calcule régulièrement le rapport de transformation, l'impédance

et le courant magnétisant mais aussi, à chaque nouvelle mesure, la perte de puissance et les écarts avec le modèle prédictif.

—
La nouvelle application de surveillance de changeur de prises analyse la perte de puissance lors d'un réglage.

Changeur de prises

Le changeur de prises en charge (CPC) est le seul élément du transformateur utilisant un mécanisme d'entraînement. Fortement sollicité, ce dispositif électromécanique est à l'origine de près d'un tiers des avaries de transformateur [2-4] et, par voie de conséquence, d'un grand nombre d'études sur les méthodes de surveillance et de diagnostic pour y remédier [10-12]. Celles-ci reposant sur l'utilisation de capteurs supplémentaires de vibration ou de courant moteur, elles ne donnent pas une idée claire du temps de commutation, qui est pourtant un précieux indicateur de performance.

—
02 Les clients veulent des informations immédiates et précises sur les performances d'un transformateur ? La console opérateur en salle de conduite est le meilleur outil pour afficher les résultats.

—
03 Circuit équivalent type d'un transformateur à deux enroulements, côté primaire

—
04 Pertes supplémentaires observées lors d'un réglage de prise (en nuances de gris et en noir, contribution de chaque phase ; en rouge, perte totale). Ici, une phase ouvre le contact principal environ deux millisecondes après les autres.

—
05 Historique des écarts de courant par rapport aux valeurs attendues : on voit que le 22 mai un appel de courant a définitivement modifié les paramètres du transformateur. À noter que cette modification est minime (30 mA) comparée au bruit et, en valeur absolue, au courant de charge nominal (environ 0,5 A).

Lors d'un réglage de prise, le système de surveillance ABB analyse la perte dans le transformateur avec les mêmes signaux de tension et de courant que ceux utilisés par le suivi de performances. Ce nouvel outil fournit ainsi une estimation du temps de commutation et de la perte de puissance supplémentaire occasionnée par la manœuvre : un temps de passage trop court indique un risque d'arc entre les contacts de prises ; un temps de passage trop long est signe de problèmes mécaniques. L'étude ABB montre que les variations dans la perte de puissance de commutation sont dues aux résistances de passage : la perte attendue peut être déduite de la plaque signalétique du CPC.

Mode opératoire

Le changeur de prises ne se contente pas d'ajouter ou de retrancher des spires pour régler la tension ; il optimise le rapport de transformation par échelons pour éviter la formation excessive d'arcs et autres dangers électriques. Le passage d'une prise à l'autre engendre un courant de circulation induit par la différence de tension et limité par les résistances de passage.

Ce courant entraîne provisoirement une perte supplémentaire qu'une analyse minutieuse du signal permet de relever →4. Le temps de commutation et la valeur des résistances peuvent être déduits de la durée et de l'amplitude de la perte.

Le système de surveillance analyse les formes d'onde enregistrées lors de la bascule pour calculer la perte. Un perturbographe correctement configuré fournit ces enregistrements.

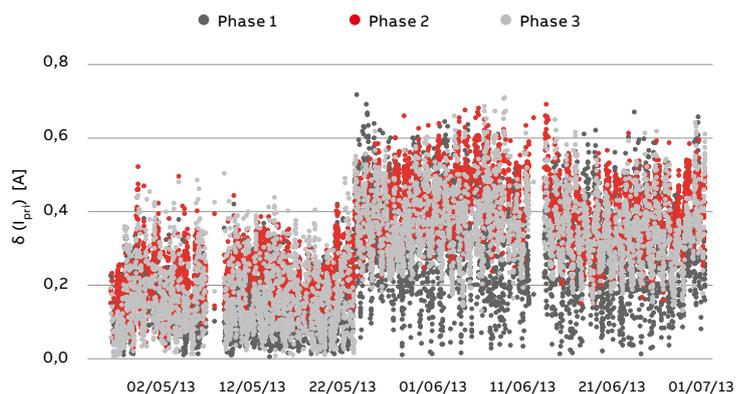
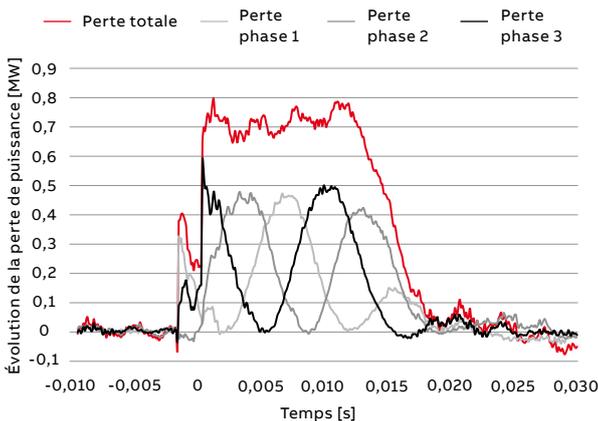
Études de cas

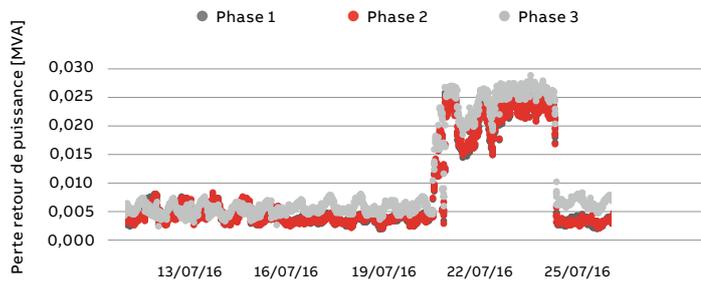
Voyons deux exemples pour illustrer la sensibilité des solutions révolutionnaires de surveillance de transformateurs ABB. Les écarts par rapport au modèle livrent des informations sur la présence et la datation d'un événement et, mieux encore, sur sa cause.

—
Des études sur site ont illustré la sensibilité des solutions révolutionnaires de surveillance de transformateurs ABB.

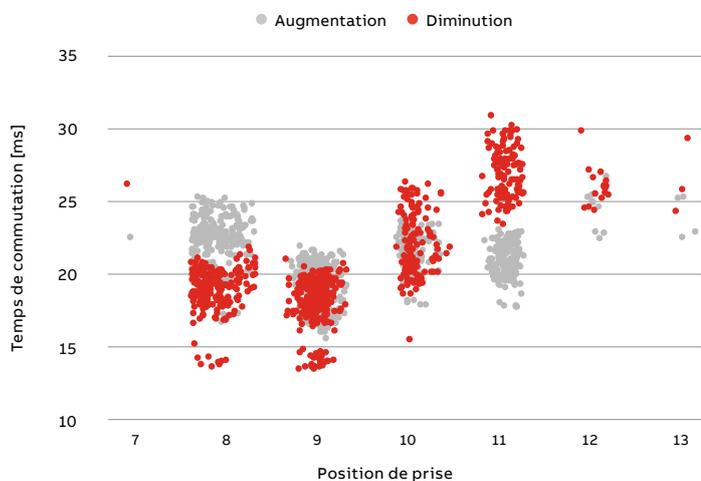
Modification permanente due à la saturation

Dans un premier cas, ABB a évalué un incident de transformateur qui s'est produit le 22 mai 2013, lors d'un changement brutal de la dérive du courant par rapport au modèle établi →5. Cet événement n'étant pas lié à la charge, il fut attribué à la présence d'un courant magnétisant. Son apparition coïncidant avec la mise sous tension d'un transformateur à proximité, on suppose que l'effet de la tension associée a provoqué la montée en saturation du transformateur, à l'origine de courants de Foucault permanents dans la structure de l'appareil. Ce qui n'a pas empêché le transformateur de continuer à fonctionner, l'augmentation de la perte de puissance étant relativement faible (environ 20 % des pertes à vide).





06



07

Perte temporaire due à des conditions externes

Certaines conditions du système électrique, externes au transformateur, peuvent aussi dégrader la performance. ABB en a fait l'expérience sur un transformateur de 50 MVA affichant une longue liste d'alarmes thermiques dues à un échauffement. Le système de surveillance ABB enregistre une perte de puissance anormale mais temporaire →6, qui n'engendre donc pas de modification permanente des propriétés de l'appareil. Autre observation récurrente : une augmentation de la perte de puissance. Le nouveau système de surveillance ABB a pu établir le moment et la cause probable de l'événement, à savoir l'exploitation d'une petite centrale hydroélectrique, côté secondaire. Des résultats qui corroborent la nécessité de surveiller la production renouvelable.

Variation du temps de commutation

Sur certains types de changeurs de prises, le temps de commutation peut varier d'une position à l'autre. ABB a étudié ce phénomène lors de plusieurs milliers de manœuvres effectuées par un changeur de prises en service →7. Les écarts observés sont considérables, signes d'une usure des contacts nécessitant une intervention de maintenance.

Déploiement dans MicroSCADA Pro

Le superviseur est un environnement idéal pour présenter les résultats de la surveillance dans la mesure où la plupart des autres facettes de l'exploitation d'un poste (traitement des événements, cybersécurité, etc.) sont facilement accessibles. Un dispositif électronique de protection (ou « IED ») correctement configuré sert d'unité d'acquisition ; la perturbographie est conforme à la norme CEI 61850-8-1. Les résultats prétraités sont ensuite transmis aux « objets de l'application de supervision », selon la terminologie MicroSCADA Pro.

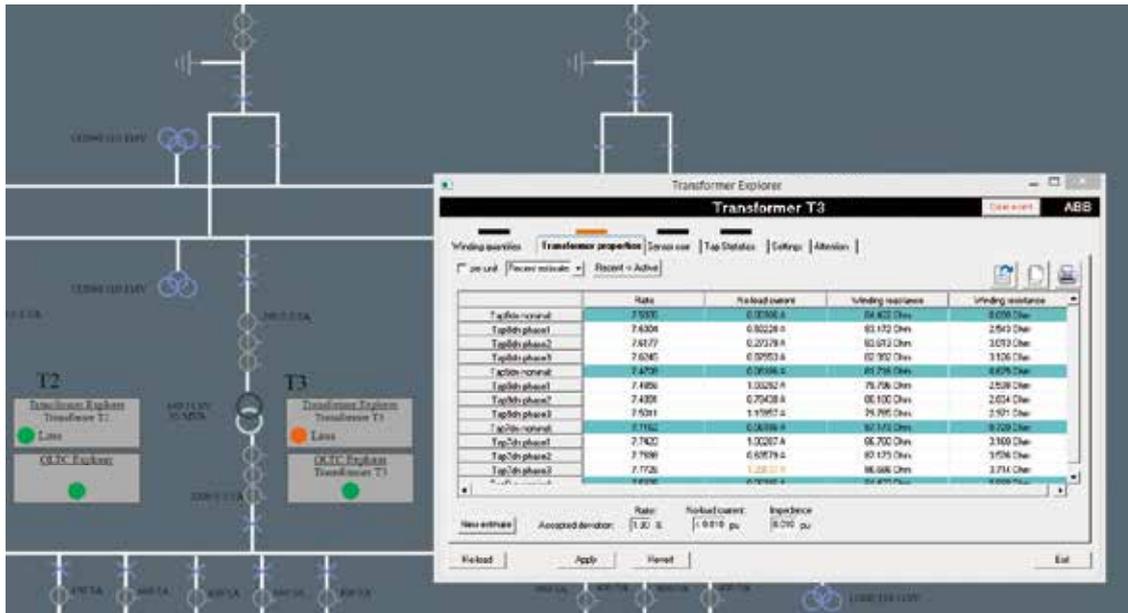
L'emploi d'IED classiques a ici le double avantage d'éviter le recours à un matériel d'acquisition dédié et d'acheminer sur le bus de procédé du poste des signaux classiques (110 V/5 A) ou numérisés.

—
MicroSCADA Pro est tout désigné pour afficher les résultats de la surveillance puisque d'autres facettes de l'exploitation d'un poste électrique sont à portée de clic.

Une mise à jour d'objets de procédé relevant d'une fonction MicroSCADA Pro spécifique enclenche une analyse complémentaire et des indicateurs d'alerte (rapport de transformation, perte, impédance, différence de courant, temps de manœuvre de la prise, tendance, par exemple). À l'heure actuelle, quelques dizaines d'indicateurs sont calculés, chacun d'eux étant exprimé en unités spécifiques d'un seuil d'acceptation : la valeur 1 signifie que la grandeur surveillée est précisément celle du seuil d'acceptation.

Les indicateurs d'alerte peuvent être synthétisés en un indicateur principal reprenant la valeur maximale de l'ensemble. Celui-ci gère l'apparence des symboles de surveillance. L'opérateur peut alors cliquer sur le symbole correspondant pour en savoir plus →8. Un indicateur franchissant le seuil d'acceptation déclenche un événement MicroSCADA Pro, identifié et daté dans le journal. Les écrans de surveillance affichent la totalité des données récentes et des résultats d'analyse (paramètres du modèle de transformateur pour chaque phase, positions de prise utilisées, par exemple).

L'application MicroSCADA Pro facilite le traitement et la consignation ultérieurs des événements : il est ainsi possible de sélectionner des résultats pour les transmettre aux systèmes de gestion de



08

Cet écran illustre un schéma unifilaire de procédé (à gauche) avec ici deux transformateurs et leurs symboles d'état. Un clic sur l'un des symboles fait apparaître des informations utiles, comme le rapport de transformation, le courant à vide et l'impédance d'enroulement estimés par le système de suivi des performances pour chaque phase et position de prise utilisée. Les valeurs surlignées en vert (à droite) sont les caractéristiques nominales figurant sur la plaque signalétique de l'appareil ; une valeur hors tolérance est signalée en caractères jaunes.

06 Perte de puissance enregistrée lors d'une étude de cas sur site : la production d'énergie côté basse tension est à l'origine de l'augmentation des pertes dans le transformateur.

07 Temps de commutation suivant la position des prises pour quelque 1750 manœuvres (augmentation des manœuvres en gris, diminution en rouge)

08 Écran MicroSCADA
Pro sur ordinateur
SYS600C

tout un parc d'actifs. De plus, les applications de surveillance génèrent leurs propres journaux dont le détail peut être soumis pour analyse approfondie à la télé-expertise ABB.

Enrichissement fonctionnel

Cet article illustre la nouvelle approche d'ABB en matière de surveillance de postes électriques, à savoir l'intégration complète de fonctionnalités supplémentaires dans l'équipement standard. Le but n'est pas tant de détecter les défauts imminents que d'évaluer les performances des actifs en service réel.

À ce jour, ABB a testé ces applications avec succès sur huit transformateurs de puissance 30-1000 MVA et de tension 120-750 kV. Les enregistrements d'une dizaine d'années de fonctionnement et de quelque 10 000 réglages de prise ont fourni des données rigoureuses pour étayer cette nouvelle méthode.

Soucieux d'offrir à ses clients le meilleur de la surveillance d'actifs industriels, ABB poursuit sa démarche d'innovation fonctionnelle selon les mêmes principes. •

Remerciements

Que nos collègues des différentes divisions d'ABB soient ici remerciés pour leur soutien et leur encouragement.

Bibliographie

[1] Offre produits ABB, disponible sur : <https://new.abb.com/products/transformers/service/advanced-services>

[2] CIGRÉ, GT 05, « An international survey on failures in large power transformers in service », *Electra*, n° 88, mai 1983.

[3] Vahidi, F., Tenbohlen, S., « Statistical Failure Analysis of European Substation Transformers », *ETG-Fachbericht - Diagnostik elektrischer Betriebsmittel*, p. 5-9, 2014.

[4] Minhas, M., et al., « Failure in power system transformers and appropriate monitoring techniques », *11th International*

Symposium on High Voltage Engineering, Londres, 1999.

[5] T. Bengtsson, T., Abeywickrama, N., « On-line Monitoring of Power Transformer by Fundamental Frequency Signals », *CIGRÉ 2012*, communication A2-110.

[6] Abeywickrama, N., et al., « Transformer Explorer: Monitoring transformer status by fundamental frequency signals », *International Conference on Condition Monitoring and Diagnostics (CMD)*, X'ian (Chine), communication 116, 25-28 septembre 2016.

[7] Sahoo, S., et al., « Monitoring

Power Transformer Performance, Usage and System Event Impacts – A Case Study », *3rd International conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON)*, Rupnagar (Inde), 16-18 novembre 2017.

[8] Standard IEEE 62-1995, *IEEE Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus - Part 1: Oil Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors*.

[9] Norme CEI 60076-1, *Transformateurs de puissance - Partie 1 : généralités*, 2012.

[10] Bengtsson, T., et al., « Acoustic

Diagnosis of Tap Changers », *CIGRÉ 1996*, communication 12-101.

[11] Jongen, R., et al., « On-load tap changer diagnosis with dynamic resistance measurements », *IEEE International conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, Bali (Indonésie), p. 485-488, 23-27 septembre 2012.

[12] Lewis, K. G., et al., « A tap-changer monitoring system incorporating optical sensors », *2nd International conference on the Reliability of Transmission and Distribution Equipment*, Coventry (Royaume-Uni), p. 97-102, 29-31 mars 1995.

LE MOT DU MOMENT

Floraison d'hybrides

Nous savons tous ce que signifie le terme *hybride*... du moins nous le pensons. Mais comment expliquer qu'il soit aujourd'hui sur toutes les lèvres ? Donnons à ce « mot du moment » une petite note philosophique : l'hybride n'est pas tant un effet de mode qu'un mouvement de fond.



Michelle Kiener
ABB Review
Baden-Dättwil
(Suisse)

michelle.kiener@
ch.abb.com

Tapez *hybride* dans Google et vous tomberez inmanquablement sur une définition de la voiture hybride. J'ai voulu mener ma petite enquête sur ce terme incontournable. À la question « *quelle est la première chose qui vous vient à l'esprit à l'évocation du mot hybride ?* », la réponse de mon entourage fut presque unanime : « *la voiture* » !

Or l'hybridation est un concept bien plus vaste et nuancé que cela. L'idée d'aborder ce sujet dans nos colonnes m'est venue en passant devant un magasin de cycles dont la vitrine exhibait des vélos à assistance électrique (VAE) arborant l'étiquette « hybride ». Déjà propriétaire d'une voiture hybride et d'un VAE, j'ai voulu en savoir plus, tout excitée de compter parmi les premiers à découvrir le vélo à récupération d'énergie, parfait compromis entre ma voiture et ma bicyclette. Or cette étiquette racoleuse cachait en fait un ersatz tout terrain, à mi-chemin entre le vélo de course et le VTT.

Retour à la case départ : commençons par définir ce qu'est un véhicule hybride. Dans mon cas, je roule en hybride « lourd ». Ne vous méprenez pas : ce qualificatif ne va pas à l'encontre des impératifs de légèreté des nouvelles technologies automobiles, mais désigne un véhicule combinant motorisation thermique et électrique, avec récupération d'énergie pour alimenter la batterie.

Une technologie à distinguer de l'hybride « rechargeable » qui, comme son nom l'indique, doit être branchée sur le secteur pour recharger la batterie. D'où ma déduction qu'un vélo hybride devait fonctionner à l'image de mon hybride lourd. Le propriétaire d'un hybride rechargeable serait-il parvenu à la même conclusion ? Rien de moins sûr. Et que dire du jardinier passionné de roses ? →1.



01

Une idée novatrice, l'hybride ? Que nenni ! Attesté pour la première fois à la fin du XVI^e siècle [1], ce mot, du latin *ibrida*, désignait le produit du sanglier et de la truie, et plus généralement tout individu de sang mêlé (*bâtard*) ou organisme issu du croisement de différentes variétés ou espèces. C'est aux alentours de 2002 que l'on a vu le terme « fleurir » dans l'automobile.

Selon le Larousse [2], *hybride* se dit :

- 1) d'un animal ou végétal provenant du croisement de deux espèces, races ou variétés distinctes ;
- 2) d'un individu né du mariage de deux cultures ou traditions ;
- 3) de quelque chose issu ou constitué d'éléments de différentes natures (matériau composite, par exemple).

Mais rendons justice à mon marchand de cycles qui, soit dit en passant, a su enfourcher la mode de l'hybride pour attirer le chaland : peut-être aurais-je dû commencer par consulter Wikipédia [3]. Outre les définitions attendues de l'hybridation en biologie, dans l'automobile, le ferroviaire, etc., l'article déroule une liste d'homonymes accolés à des domaines aussi hétéroclites que la cryptographie, la photographie, la téléphonie... et j'en passe. Si tous sont consacrés par l'usage, force est d'admettre que depuis 2002, le raccourci *hybride* renvoie de plus en plus à la voiture, au point d'éclipser toutes les autres acceptions et de galvauder le sens original.

L'hybridation est quelque peu victime du « phénomène Apple » : au commencement était l'iMac, puis l'iPod, suivi de l'iPhone, de l'iPad, etc. Aujourd'hui, quiconque veut apporter une touche *high tech* et



02

01 Rose hybride *Chrysler Imperial*, obtenue par croisement de rosiers thé et floribundas en 1952

02 La *Chrysler Imperial* des années 1960 n'a rien d'une hybride.

Bibliographie

[1] *Centre national de ressources textuelles et lexicales*, disponible sur <https://www.cnrtl.fr/etymologie/hybride>, consulté le 13 septembre 2019.

[2] *Dictionnaire de français Larousse*, disponible sur <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/hybride/40717>, consulté le 13 septembre 2019.

[3] *Wikipédia*, disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Hybride_\(homonymie\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Hybride_(homonymie)), consulté le 13 septembre 2019.

De ses racines biologiques au XVI^e siècle à sa floraison technologique au XXI^e, l'hybride n'a pas fini de faire parler de lui.

glamour à son produit, sa technologie... ne peut s'empêcher d'affubler son nom du préfixe « i ». J'ai même vu un « iParapluie » ! En technologie, le mot hybride a parfois une connotation écologique quand certains y voient plutôt des vertus de légèreté, de maniabilité, etc.

Bref, un mot fourre-tout ? Comme toujours, mieux vaut savoir lire entre les lignes pour démêler le vrai du faux. Sinon gare à la confusion : croyant commander une luxueuse berline *Chrysler Imperial Hybrid* →2, vous risqueriez de recevoir un flamboyant rosier éponyme à « garer » dans votre jardin ! •

Recevoir *ABB Review*

S'abonner

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

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

Garder le contact

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



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

Publication ABB

Rédaction

Bazmi Husain

Chief Technology Officer
Group R&D and Technology

Adrienne Williams

Senior Sustainability
Advisor

Christoph Sieder

Head of Corporate
Communications

Reiner Schoenrock

Technology and Innovation

Roland Weiss

R&D Strategy Manager
Group R&D and Technology

Andreas Moglestue

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

Publication

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

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

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

Édition et droits
d'auteur ©2019
ABB Switzerland Ltd.
Baden (Suisse)

Impression

Vorarlberger
Verlagsanstalt GmbH
6850 Dornbirn (Autriche)



Maquette

Publik. Agentur für
Kommunikation GmbH
Ludwigshafen (Allemagne)

PAO

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

Traduction française

Cléa Blanchard
clea.blanchard@gmail.com

Avertissement

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

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

ISSN: 1013-3119

abb.com/abbreview

Versión mobile

La publication d'*ABB Review* sur tablette (iOS et Android) s'est arrêtée fin 2018. Nos lecteurs sont invités à consulter les versions PDF ou en ligne sur www.abb.com/abbreview





01|2019

Idées nouvelles

Innovations

- 06 À la une de l'innovation 2019
- 21 ABB Customer World

Partenariats stratégiques

- 24 Entretien avec SynerLeap
- 28 Coup de pouce pour les jeunes pousses

Productivité connectée

- 36 Cap sur le navire autonome
- 39 Transformateur de puissance ABB Ability™
- 46 Mesure de température non intrusive
- 54 Bus en boucle avec ASI statiques
- 61 Nouveaux disjoncteurs Tmax XT

Entraînements et convertisseurs

- 64 Sécurité renforcée pour les paliers
- 68 Raccordement direct

Le mot du moment

- 70 Apprentissage profond



02|2019

Jumeaux numériques et simulations

Jumeaux numériques et simulations

- 08 Un nouvel univers des possibles
- 14 Synergie entre périphérie et cloud
- 20 Simulation électrothermique
- 26 Jumeaux numériques HVDC Light®
- 34 Analytique connectée
- 42 Simulation simplifiée
- 47 Conception optimisée
- 52 Entraînements de puissance numérique
- 58 Suivi d'état des machines tournantes
- 64 Atténuer l'impact d'un arc interne

Productivité

- 72 Automatisation modulaire

Le mot du moment

- 78 *Cloud, edge et fog*



03|2019

Systèmes autonomes

Systèmes autonomes

- 08 De l'automatisation à l'autonomisation
- 16 Estimation d'état et visualisation
- 23 Visualisations innovantes
- 30 Automatisation modulaire
- 36 Outils analytiques pour l'industrie
- 44 Ligne directe avec le cloud
- 46 Surveillance de blindage de broyeur

Énergie

- 54 ASI durcie PowerLine DPA
- 60 PAC : le plein d'énergie verte
- 68 Transformateurs à cuve souple

Le mot du moment

- 74 Systèmes autonomes



04|2019

Électromobilité

Électromobilité

- 08 Formule E : sur la piste électrique
- 14 Tout électrique aux chutes du Niagara
- 18 Le navire à hydrogène
- 24 La recharge en ligne de mire
- 30 L'avenir du réseau électrique
- 38 Infrastructures de recharge

Productivité

- 46 Apprentissage automatique et autonome
- 52 Suivi d'état et optimisation
- 56 Prototypage virtuel de l'instrumentation
- 64 Optimisation d'actifs
- 68 Co-simulation des disjoncteurs
- 74 Suivi de performances et supervision

Le mot du moment

- 80 Hybride

Dans le numéro 01/2020
Inspirer demain

Le premier numéro de la nouvelle décennie ne se contentera pas d'explorer les potentialités du présent, mais braquera un projecteur sur les technologies émergentes, les réalisations pratiques et les méthodes de développement indispensables pour réussir.

Une invitation au voyage dans le futur qui confortera vos intuitions ou ébranlera vos certitudes...