

ABB

3 | 16  
fr

# review

**125 ans de présence en Suisse** 7

100 ans de recherche 13

**Des innovations révolutionnaires** 16

En route vers le futur 55

La revue  
technologique  
du Groupe ABB



## Double anniversaire

**125**  
YEARS SERVING  
THE WORLD FROM  
SWITZERLAND  
[www.abb.com](http://www.abb.com)

Power and productivity  
for a better world™





2016 est l'année d'un double anniversaire pour ABB : 125 ans de présence en Suisse, son « ancêtre » Brown Boveri & C<sup>ie</sup> ayant vu le jour en 1891, et 100 ans de recherche institutionnelle puisque c'est en 1916 qu'ASEA, second fondateur du Groupe, a créé son premier centre dédié à l'innovation à Västerås (Suède).

Nous avons choisi d'illustrer cet héritage avec, en couverture, le stator d'un alternateur ASEA de 22 MVA destiné à la localité norvégienne de Glomfjord, en 1919, et d'annoncer l'avenir avec, ici, le stator d'un aérogénérateur moderne en cours de réalisation à Lingang (Shanghai).

## Double anniversaire

- 7 **ABB, une entreprise en mouvement**  
125 ans d'histoire jalonnée d'innovations
  - 13 **Forces vives**  
100 ans de recherche ABB
- 

## Moteurs de progrès

- 16 L'innovation ABB en première ligne
  - 17 Variateurs de vitesse électroniques
  - 19 Démarreurs progressifs
  - 21 Des moteurs électriques au top
- 

## Le futur en continu

- 23 La technologie du courant continu à haute tension fait grimper le transport électrique
  - 24 Transport massif d'électricité avec HVDC Light®
  - 27 Sectionneur ultrarapide pour disjoncteur CCHT hybride
  - 29 Câble CCHT extrudé
- 

## Transformation tous azimuts

- 31 Progrès dans l'isolation des transformateurs et les changeurs de prises pour applications de fortes puissances
  - 32 Le changeur de prises fait le vide
  - 35 La recherche fondamentale au secours des transformateurs convertisseurs CCHT
- 

## De l'invention à l'innovation

- 38 **Microréseaux**  
Pour une énergie propre, fiable et bon marché
  - 41 **Une bio du robot**  
Petite histoire de la robotique industrielle
  - 45 **Brasse coulée**  
ABB et le brassage électromagnétique
  - 49 **Mining 2.0**  
Le nouveau filon de la mine
- 

## Intensité énergétique

- 55 **Cure d'amaigrissement dans l'éolien marin**  
Un nouveau concept ABB de plate-forme CCHT allégée et affranchie du courant alternatif
- 57 **Au faite des économies**  
Le stockage de l'énergie solaire s'invite à domicile
- 62 **Valoriser le stockage**  
Étude de cas d'un microréseau batteries-diesel raccordé au réseau principal

# La roue tourne . . .



Bazmi Husain

## Chers lecteurs,

S'il est une constante de notre univers, c'est bien le changement perpétuel. La technologie en est une parfaite illustration.

Il n'y a pas de meilleur prisme que l'histoire pour étudier, comprendre et mettre en contexte la dynamique du changement et ses ramifications à long terme. Après l'invention de la machine à vapeur et la mécanisation (fin du XVIII<sup>e</sup> siècle), l'introduction de l'électricité et la production de masse (début XX<sup>e</sup>), et l'apparition des automatismes programmables (fin des années 1960), la numérisation des usines préfigure un quatrième âge d'or industriel ou « Industrie 4.0 ». Chaque période a secoué les fondements de la précédente sur lesquels s'articulaient non seulement l'industrie mais aussi la société et jusqu'aux modes de pensée. Pour qui sait accompagner le mouvement, les révolutions sont l'occasion de conquérir de nouveaux territoires jusque-là inexplorés.

Témoin de l'avènement de trois de ces quatre jalons de l'histoire des techniques, ABB en a aussi été l'un des promoteurs et chefs de file. On lui doit, par exemple, le lancement en 1974 de l'IRB 6, premier robot tout électrique commandé par microprocesseur. Cette innovation a bouleversé de nombreux pans de la production manufacturière tout en faisant beaucoup pour la sécurité au travail et la productivité.

Aujourd'hui, ABB fête un double anniversaire. Il y a 125 ans, Charles Brown et Walter Boveri fondaient la société Brown Boveri & C<sup>ie</sup> (BBC), qui allait vite devenir un grand nom de la production, du transport et de la conversion

électrique, futur berceau du groupe ABB. À l'époque, la fée électricité n'était pas nouvelle et le progrès avait déjà permis de l'acheminer à moindres frais jusque dans les foyers et les usines. Une situation comparable à celle de la transition numérique que nous vivons actuellement : si le microprocesseur et le sans-fil existent depuis longtemps, il aura fallu des trésors d'imagination et d'ingéniosité pour démocratiser leur usage et libérer leur potentiel.

2016 marque également le centenaire de la recherche ABB. En 1916, ASEA (qui donnera son « A » au sigle ABB) inaugure son centre de recherche à Västerås, en Suède, d'où sortiront les premiers diamants de synthèse ainsi que plusieurs générations d'automatismes industriels et le transport électrique en courant continu à haute tension (CCHT). Ces réussites témoignent de l'excellence du Groupe et de sa volonté de rester en tête de la course à l'innovation, grâce à une R&D forte de quelque 8500 personnes dans le monde.

L'évocation du passé d'ABB est aussi un tremplin pour l'avenir. Entre rétrospective et prospective, souhaitons que les lecteurs d'*ABB review* y puisent leur inspiration.

Bonne lecture,

Bazmi Husain  
Directeur des technologies  
du Groupe ABB





# ABB, une entreprise en mouvement

125 ans d'histoire jalonnée d'innovations

**DOMINIC SIEGRIST – ABB fête cette année un double anniversaire : les 125 ans de la création de Brown Boveri & Cie (BBC) et le centenaire du centre de recherche ASEA, en Suède. Au fil des décennies, c'est une succession ininterrompue d'avancées techniques que ses deux précurseurs ont accomplies en solo ou en partenariat depuis leur fusion en 1988. Un événement que le Groupe ne manquera pas de célébrer dans le monde entier et dans les colonnes d'ABB review. Retour sur plus d'un siècle de prouesses technologiques BBC et sur la dernière décennie d'innovations ABB.**

**S**i «Énergie et productivité pour un monde meilleur™» est plus que jamais la devise du groupe ABB, force est de reconnaître que les produits mis au point par ses fondateurs reflétaient déjà cette motivation.

Quand en 1883 Ludvig Fredholm crée ASEA à Västerås (Suède), ses tout premiers appareils (éclairages électriques et alternateurs) ont déjà vocation à améliorer notre quotidien. De même, lorsque Charles Brown et Walter Boveri → 1 fondent en 1891 BBC, à Baden (Suisse), ils entendent faciliter la vie du plus grand nombre. De fait, c'est en démocratisant l'usage de l'électricité que les réalisations de ces deux pionniers de l'électrotechnique ont tant fait progresser la société.

Les percées technologiques ne vont pas tarder à s'enchaîner : en 1891 sort de terre la première centrale électrique à Baden ; en 1895, les appareillages BBC équipent le tramway de la ville suisse de Lugano → 2 ; en 1897 apparaît le premier exemplaire d'une longue lignée de disjoncteurs haute tension à huile → 3 ;

en 1911, la locomotive à traction électrique donne le coup d'envoi de l'électrification ferroviaire. Les locomotives mobiliseront d'ailleurs une part importante de l'effort de recherche-développement de BBC, jusqu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle.

En 1905, BBC suggère aux Chemins de Fer Fédéraux suisses (CFF) d'électrifier la

---

## En 1911, la locomotive électrique de BBC inaugure une nouvelle ère dans l'épopée de l'électrification ferroviaire.

ligne ferroviaire du tunnel du Simplon ; les CFF refusent. Qu'à cela ne tienne, BBC s'en chargera à ses frais ! À défaut d'être une réussite économique, le projet est une première mondiale qui dope l'activité BBC ; nombreux sont les contrats d'électrification ferroviaire remportés par la suite, tels le projet pharaonique du tunnel du Saint-Gothard une quinzaine d'années plus tard → 4.

### L'entre-deux-guerres

La période 1918–1939 est agitée. Après la pénurie de main-d'œuvre et de matières premières occasionnée par la

---

#### Photo

Rien n'arrête BBC et ASEA, pas même le gigantisme des machines. Ci-contre, un alternateur triphasé BBC de 2 MW dans une aciérie allemande (1912).

Les produits ASEA et ABB ont de tout temps facilité et amélioré le quotidien de millions de personnes.

1 Walter Boveri, accompagné de son épouse (au centre) et d'une connaissance, sur le chantier de construction de la première usine BBC (1891).



Grande Guerre, BBC reprend son essor mais l'embellie est éphémère puisque les commandes s'effondrent à partir de 1920, et ce pendant quelques années. Puis l'activité se redresse jusqu'à ce que la crise de 1929 lui porte un nouveau coup. Passé ce cap difficile, l'entreprise rebondit une fois de plus ; en 1939, elle est en mesure de verser à ses actionnaires les premiers dividendes depuis sept ans.

#### De la tourmente aux Trente Glorieuses

Si, en 1936, BBC tarde à investir le marché des radiotransmissions, il y prend très vite ses marques avec, dès 1939, son premier émetteur à lampes. La fabrication quitte alors le laboratoire pour s'installer en 1943 dans une usine spécialement construite pour l'occasion. De la simple T.S.F. à la production de chaleur pour l'industrie et à la radiothérapie, la technique progressera peu à peu pour culminer, en fin de décennie, avec la mise au point d'un accélérateur de particules médical (bêtatron).

En 1939, BBC construit la première turbine à gaz au monde, qui alimentera en secours la ville de Neuchâtel jusqu'en 2002. Elle orne aujourd'hui l'établissement Alstom de Birr (Suisse), emblème historique de la réussite de BBC.

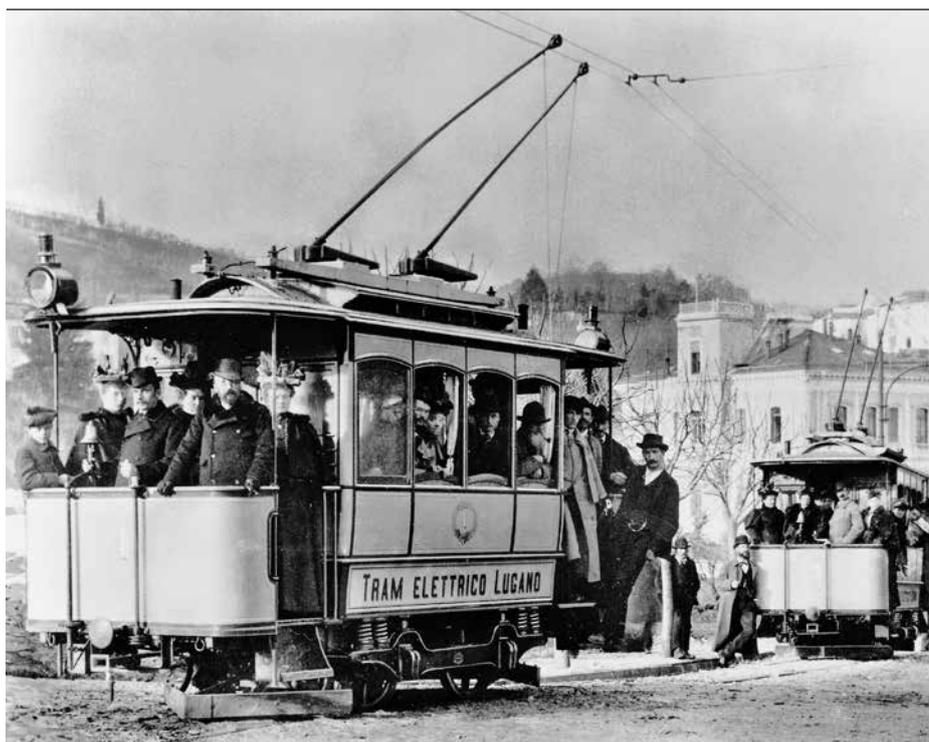
La Seconde Guerre mondiale met de nouveau à mal l'entreprise. Mobilisation oblige, les bras manquent alors que les commandes se multiplient. BBC se retrouve en porte-à-faux, à la fois fournisseur des Alliés et du Troisième Reich. Les commandes pour les donneurs d'ordres suisses (40 % du marché en 1942-1943) atteignent des sommets, surtout dans la production d'énergie. Dans le même temps, l'Espagne, qui se relève de la Guerre civile, devient l'un des plus gros clients de BBC. En plein conflit mondial, l'équipementier trouve les moyens et le temps de construire le laboratoire haute tension de Baden, une installation qui allait s'avérer précieuse dans les années à venir.

En 1935, le site BBC à Mannheim (Allemagne) se déploie au point de surclasser l'usine d'origine de Baden. L'entreprise prospère en équipant les forces armées : motorisation de sous-marins allemands *U-Boot*, turbines pour la marine, com-

presseurs de moteurs à réaction, etc. Si les bombardements alliés de 1944 plombent l'activité, il faudra moins de dix ans pour renouer avec la croissance.

Vers la fin du conflit, les commandes dépassent les capacités ; en 1945, l'entreprise se porte bien et la plupart de ses divisions s'étoffent. Le milieu des années 1950 est marqué par l'essor des turbines à vapeur qui battent des records de puissance. Les commandes affluent de grands comptes comme la *Tennessee Valley Authority*, qui réceptionne en 1967 un groupe turbo-alternateur BBC de 1300 MW. Les turbocompresseurs enregistrent la même croissance, tant en volume de ventes qu'en puissance.

En 1953, le laboratoire de recherche BBC spécialisé dans l'aérodynamique et les techniques de combustion est inauguré. 1965 voit une première mondiale : un hydrogénérateur refroidi à l'eau. BBC est aussi présent sur le front domestique



Première mondiale, l'électrification du chemin de fer du Simplon fait décoller l'activité ferroviaire de BBC.

avec des cuisinières, des machines à laver, des humidificateurs et des chauffe-lits. Une activité cédée à AEG en 1972, même si la fabrication de cafetières BBC se poursuivra jusque dans les années 1980.

À l'image de BBC, ASEA a aussi un long palmarès de percées technologiques. Cent ans se sont écoulés depuis la création de son pôle de recherche ; l'occasion de revenir sur quelques réalisations phares de la dernière décennie.

### La course en tête

Vers la fin des années 1960, l'innovation ASEA et BBC prend de l'ampleur et s'accélère. Les avancées dans le domaine électronique permettent de repenser complètement les modes de résolution des problèmes industriels. La vitesse variable en est un premier exemple.

Les moteurs électriques sont partout dans l'industrie. Ils transforment en force motrice près des deux tiers de l'électricité produite dans le monde, le plus souvent pour entraîner des ventilateurs, des pompes et des compresseurs. Dans la plupart de ces applications, le moteur tourne à vitesse constante, même inutilement, le débit étant réglé par étranglement mécanique (vannes, vannes, registres, etc.) : un gouffre énergétique !

L'heure est à l'entraînement électrique à vitesse variable. Lancés en 1969 et équipés de la technologie de commande révolutionnaire « DTC » (*Direct Torque Control*), les variateurs ABB adaptent en permanence la vitesse et le couple du moteur aux stricts besoins de l'application. Cette optimisation allège la facture énergétique d'environ 50 % en exploitation et améliore la commande.

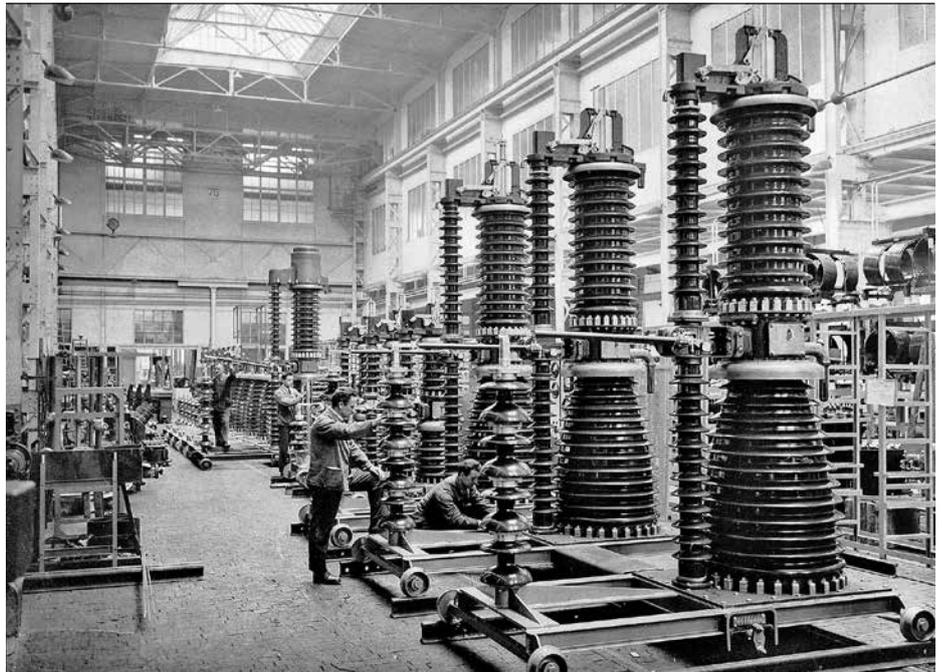
### Réductance variable

Le moteur asynchrone (MAS) est largement majoritaire dans l'industrie. Dépourvu de collecteur ou de balais, il concilie puissance et performance, fiabilité et maintenance facilitée. Mais il a aussi ses inconvénients, dont peut l'affranchir le moteur alternatif à aimants permanents (MAP).

Connu de longue date, celui-ci n'a pu vraiment concurrencer le MAS que dans les années 1980 avec l'arrivée d'une nouvelle génération d'aimants permanents à terres rares comme l'alliage néodyme-fer-bore (NdFeB). (Notons au passage que ce moteur a besoin de la vitesse variable, autre domaine d'innovation ABB.) Le MAP est « synchrone », c'est-à-dire que son rotor tourne en synchronisme avec le champ magnétique. D'où, entre autres avantages, une régulation plus précise de la vitesse, un

En 1967, la Tennessee Valley Authority prend possession du plus puissant turbo-alternateur au monde.

### 3 Fabrique de disjoncteurs à haute tension (1935)



meilleur rendement énergétique et un moindre échauffement des roulements et du rotor.

Revers de la médaille : les aimants permanents coûtent cher et sont sensibles à la volatilité des prix sur le marché des métaux rares. De plus, le champ magnétique élevé du rotor complique la maintenance du moteur.

Pour y remédier, ABB a introduit ces dernières années deux moteurs affranchis des aimants à terres rares : en 2011, le moteur synchrone à réluctance variable « SynRM » → 5 et, en 2014, le moteur synchrone à réluctance avec aimants en ferrite « SynRM<sup>2</sup> ».

Plus performants que les asynchrones classiques, les SynRM peuvent offrir des rendements élevés ou une densité de puissance supérieure dans un moindre volume. Ils se démarquent également par une maintenance allégée, une inertie réduite et une fiabilité exceptionnelle.

#### Démarrage progressif

Autre lacune des MAS : leur démarrage. La méthode la plus fréquente est le démarrage direct sur le réseau, à l'aide d'un contacteur principal et d'un relais de surcharge thermique. Malheureusement, le courant absorbé au démarrage peut être six à sept fois supérieur au courant nominal.

Depuis un peu plus de trente ans, ABB fabrique des démarreurs progressifs qui diminuent le couple au démarrage du moteur, avec de nombreux avantages : réduction des chutes de tension réseau, limitation des appels de courant, suppression des pics d'intensité et optimisation du câblage.

ABB n'a cessé de peaufiner ce concept au fil des ans en sortant de nouveaux modèles qui ont tous rencontré un vif succès : gamme performante PSE en 2010, gamme évoluée PSTX en 2014,

---

La variation de vitesse fut parmi les premières technologies à bénéficier des progrès de l'électronique de puissance.

intégrant des fonctionnalités de communication et une micro-console débrochable pour afficher les informations de diagnostic.



## Câbles CCHT

Le courant continu à haute tension est acheminé par des lignes aériennes mais aussi par des câbles qui, par exemple, raccordent les parcs éoliens marins au système terrestre en courant alternatif (CA) ou interconnectent les grands réseaux électriques transcontinentaux. La longueur pratique des lignes CA étant limitée par des effets capacitifs, le CCHT est la technologie clé pour le transport massif d'électricité sur de longues distances.

ABB a accompli d'immenses progrès dans ce domaine au cours des trente dernières années, comme en témoigne son système de câble extrudé à isolation synthétique XLPE (polyéthylène réticulé) sous 525 kV, lancé en 2014. Le Groupe a également mis au point une structure de câble dynamique pour le CCHT, particulièrement utile aux plates-formes en mer.

## Disjoncteurs hybrides

En cas de défaut, il faut déconnecter les systèmes CCHT. De nos jours, les liaisons CCHT sont en grande majorité point à point et peuvent être déconnectées par des disjoncteurs CA à chaque extrémité. Or cela a pour effet de sec-

## L'aventure continue

C'est en pleine « guerre du courant » opposant Edison, partisan du continu, et les tenants de l'alternatif (Westinghouse en tête, future société d'ABB), qu'ASEA et BBC voient le jour. Aux débuts de l'électricité, la distribution moyenne tension (MT) se faisait en courant continu, jugé plus performant et plus facile à mettre en œuvre. Mais l'alternatif ne tarda pas à le déloger.

Les récents développements technologiques, notamment dans les semi-conducteurs de puissance, ont remis le courant continu en selle. Cette évolution, couplée au besoin d'acheminer toujours plus d'électricité à l'échelle de la planète, incita ABB à introduire la technologie du courant continu à haute tension (CCHT), fondée sur la mise en série de transistors bipolaires à grille isolée IGBT en boîtier pressé.

L'énergie nécessaire pour commander un IGBT est très faible et peut être puisée du circuit d'aide à la commutation (*snubber*) raccordé en parallèle avec le composant; aucune énergie auxiliaire fournie par la terre n'est donc nécessaire. Qui plus est, la commande de gâchette peut très précisément amorcer et bloquer l'IGBT, permettant la mise en série des transistors et leur commande unitaire par centaines, en une fraction de microseconde.

Ce principe est au fondement de la technologie HVDC Light® d'ABB, bâtie sur des convertisseurs à deux niveaux fonctionnant jusqu'à environ  $\pm 80$  kV. Dix-neuf ans après ses premiers pas en mai 1997, HVDC Light totalise 25 installations dans le monde, transite plus de 10 GW et pèse un milliard de dollars dans le portefeuille d'activités ABB.

## Transformateurs

ABB domine le marché des transformateurs depuis de nombreuses décennies. Les progrès les plus récents bénéficient au courant continu à très haute tension (CCTHT), avec des transformateurs de puissance assignée jusqu'à 1100 kV.

Qui dit transformateur dit changeur de prises; c'est là un autre domaine dans lequel ABB fait autant figure de pionnier que de perpétuel innovateur. Ses tout derniers changeurs de prises en charge réduisent les besoins de maintenance et améliorent les performances: l'arc électrique se forme dans une chambre de coupure sous vide, et non plus dans l'huile, évitant de contaminer le diélectrique.

# Le courant continu à haute tension est la technologie reine pour le transport massif d'électricité sur de longues distances.

tionner toute la ligne. Les réseaux CCHT se banalisant, un défaut peut alors provoquer le découplage du réseau entier. Autre complication: la déconnexion doit être beaucoup plus rapide dans un système CCHT que dans un équivalent CA.

Autant de facteurs qui ont poussé ABB à développer son disjoncteur CCHT hybride. Là encore, les semi-conducteurs de puissance ont été mis à profit: l'appareil se compose d'un disjoncteur principal à base d'interrupteurs de puissance et de parafoudres, ainsi que d'une branche parallèle contenant un sectionneur mécanique ultrarapide et un interrupteur électronique de commutation de charge. Cette « hybridation » permet la déconnexion rapide indispensable aux applications CCHT.

## Le CCHT d'ABB repose sur la mise en série de transistors IGBT en boîtier pressé.

### 5 Rotor de moteur synchrone à réluctance variable SynRM d'ABB



#### Automatisation

ABB a deux grands pôles de compétences : l'énergie et l'automatisation. On peut dire sans exagérer que ses avancées dans ces domaines ont révolutionné l'automatisation industrielle. Le Groupe n'a eu de cesse d'innover aussi bien dans les systèmes numériques de contrôle-commande (SNCC) que dans les automatismes manufacturiers, tout comme ASEA fut à l'origine du premier robot industriel électrique à succès, en 1973.

Les premiers développements robotiques, dans les années 1950 et 1960, s'étaient soldés par des machines hydrauliques maladroites et bruyantes, qui perdaient beaucoup d'huile. Conscient du potentiel des robots à commande électrique, ASEA met au point et commercialise au début de la décennie 1970 le premier modèle du genre, l'IRB 6 (pour *Industrial RoBot* et 6 kg de capacité de charge). Le succès est immédiat. Quarante ans plus tard, quatre des cinq premiers exemplaires livrés à une petite entreprise suédoise sont toujours au travail, témoins de l'excellence industrielle ABB.

De nouvelles générations de robots ABB leur ont succédé, au service de nombreuses filières industrielles.

#### La conquête de nouveaux territoires

Relevant les défis d'une multitude de domaines, les technologies de l'énergie et de l'automatisation ABB se sont implantées partout : dans la sphère domestique

et professionnelle, les champs de pétrole et de gaz en plein désert, les usines de traitement de l'eau, les mines souterraines, mais aussi au fond des océans (transformateurs installés à 3000 m de profondeur, par exemple), au cœur des agglomérations comme en rase campagne, dans les usines de production et de transformation qui se sont métamorphosées ces dernières années... et jusque dans l'espace ! À bord d'un satellite, la technologie ABB gravite autour de la Terre.

Un nouvel enjeu de taille, que même des visionnaires comme Brown, Boveri ou Fredholm n'auraient pu soupçonner, se dessine : le réchauffement climatique. Le génie humain consacré aujourd'hui à atténuer les effets anthropiques sur le milieu naturel ouvre des pans entiers d'innovation pour ABB. Les ressources renouvelables en font partie : vent, soleil, biomasse et autres formes d'énergie sont le ferment des nouvelles solutions ABB. Au-delà de la production, c'est aussi la distribution de ces sources d'énergie et les technologies associées (microréseaux, stockage, gestion de charge, conversion de puissance, négoce, ordonnancement, etc.) qui bénéficient encore de l'innovation ABB.

Depuis la fusion d'ASEA et de BBC, en 1988, ABB a su maintenir son statut de numéro un technologique et commercial dans des secteurs très variés, grâce à sa démarche d'amélioration continue dans l'énergie et l'automatisation. Nombre

des acquis et bienfaits de la vie moderne sont le fruit de l'ingéniosité des chercheurs ABB depuis 125 ans.

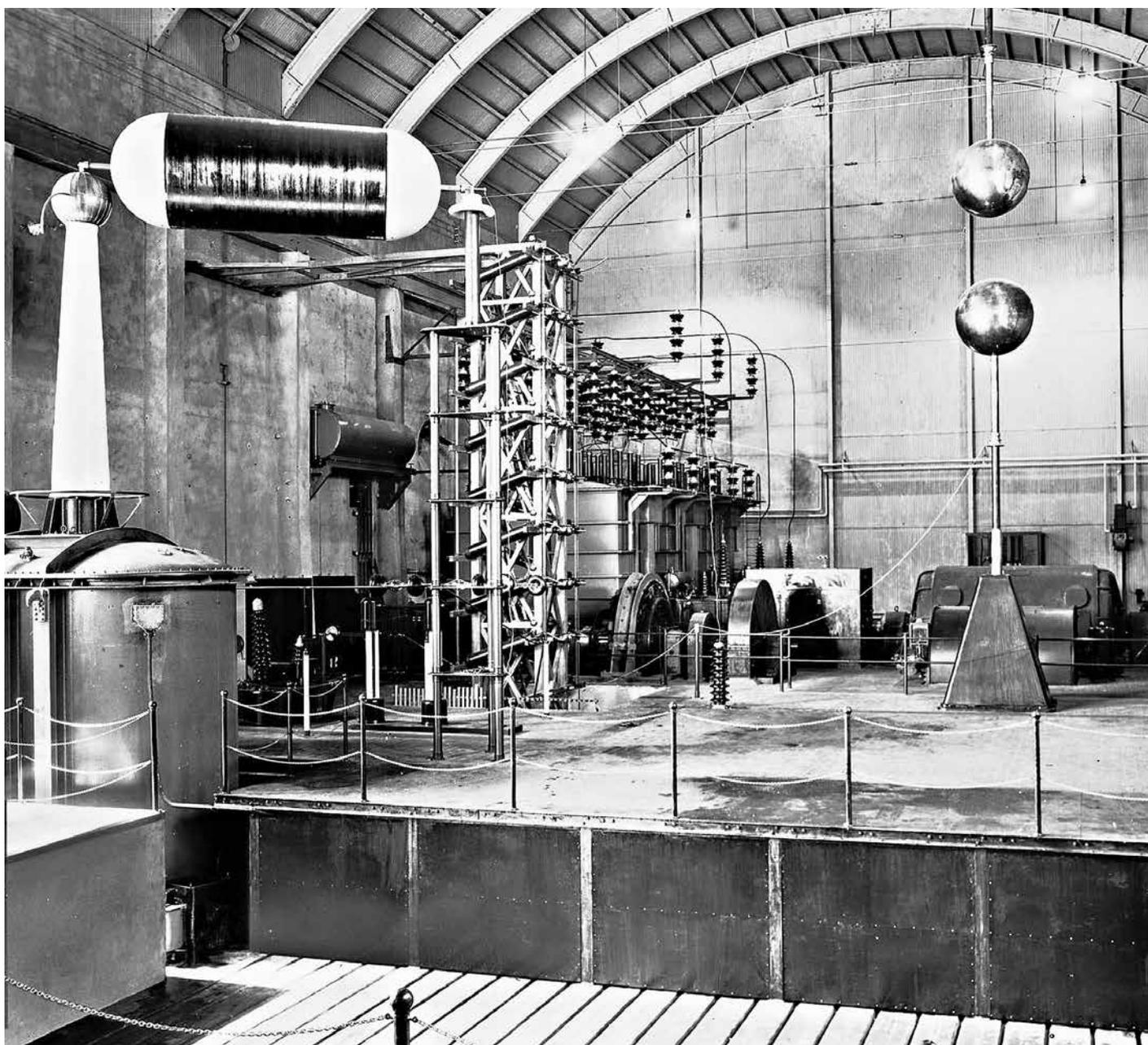
**125**  
YEARS SERVING  
THE WORLD FROM  
SWITZERLAND  
[www.abb.com](http://www.abb.com)

**Dominic Siegrist**

ABB Suisse

Zurich (Suisse)

[dominic.siegrist@ch.abb.com](mailto:dominic.siegrist@ch.abb.com)



# Forces vives

100 ans de  
recherche ABB

ANDERS JOHNSON – *Du besoin naît l'innovation*, dit l'adage. ASEA, société suédoise à l'origine du groupe ABB, en fit l'expérience durant la Première Guerre mondiale: coupée de ses fournisseurs de matériaux et forcée de trouver d'autres moyens de servir ses clients, elle décide de construire en 1916 son «laboratoire central» à Västerås. Son ambition est double: surmonter cette période difficile mais aussi mettre le cap sur le siècle à venir. De nombreuses premières mondiales seront bientôt en germe: diamants de synthèse (années 1950), robots électriques industriels (décennie 1970), liaisons en courant continu à haute tension CCHT (1990), etc. Aujourd'hui, le centre de recherche ABB s'engage en faveur du développement durable, à travers plusieurs projets d'envergure menés dans les secteurs de l'énergie et de l'automatisation.



1a C'est en 1949 qu'ASEA lance ce projet classé top secret. En 1953, les premiers diamants sont élaborés sous une pression de 8,4 GPa maintenue pendant une heure. Une prouesse dont le secret fut gardé jusque dans les années 1980 !



1b Premiers diamants de synthèse sortis du laboratoire ASEA

La première mission du laboratoire central d'ASEA était de pallier la perte des fournisseurs de matériaux et les ruptures d'approvisionnement dues à la Première Guerre mondiale. Une mission qui devait perdurer après la fin des hostilités tant les besoins de recherche dans ce domaine étaient importants.

Durant l'entre-deux-guerres, le laboratoire joue surtout un rôle de soutien aux unités de production d'ASEA. S'il relève les défis auxquels sont souvent confrontées les différentes entités du Groupe, comme la résistance des matériaux et la corrosion, il assure également des recherches et des développements pointus, notamment dans l'isolement électrique et les fours à haute fréquence.

La Seconde Guerre mondiale est une époque de forte expansion. De nouveau confronté à la suspension de ses approvisionnements et à la pénurie de matières premières, le centre de recherche se

consacre à la mise au point et au test de matériaux de remplacement.

Dans les années 1950, ASEA crée à Västerås une « cité des sciences » équipée de laboratoires modernes, qui seront regroupés, au début des années 1960, sur le site de Tegner, toujours en activité → 1. Trois grandes missions lui sont

Plusieurs premières mondiales sont à porter au crédit de la recherche ABB : diamant de synthèse (années 1950), robot électrique industriel (décennie 1970), liaison en courant continu à haute tension, entre autres.

confiées : le contrôle des matériaux, le service et le conseil en productique (nouvelles méthodes de fabrication, contrôle-commande de procédés, diagnostic de pannes), la recherche-développement (matériaux, fabrication, machines, équipements et systèmes) → 2.

**Photo p. 13**

Laboratoire ASEA d'essais de court-circuit à Ludvika (Suède), construit de 1930 à 1933. L'équipement de test (en arrière-plan) était capable de développer une puissance de court-circuit d'un million de kilovoltampères.

2 Valve à thyristors pour la liaison CCHT Inga-Shaba en République démocratique du Congo, ex-Zaïre (début des années 1980)



3 Présentation du robot 5 axes IRB 6 (1974), dont bon nombre des 1900 exemplaires construits par ASEA sont encore en service.



Au milieu des années 1960, le laboratoire d'ASEA est engagé dans 70 grands chantiers, le plus ambitieux portant sur les piles à combustible.

Au milieu des années 1960, le laboratoire prend part à 70 grands projets de R&D, le plus ambitieux portant sur les piles à combustible pour sous-marins. Hélas, bien trop en avance sur son temps, cette innovation restera dans les cartons.

Les années 1970 voient l'avènement des robots électriques industriels → 3 et de la variation électronique de vitesse destinée à piloter les machines à papier et les laminoirs. En 1980, le centre est au cœur du développement des capteurs à fibre optique pour la mesure de température dans les transformateurs.

En 1988, ASEA et Brown Boveri (BBC) fusionnent en ABB. Le succès ne se dément pas tout au long de la décennie 1990 avec notamment la première liaison en courant continu haute tension HVDC Light®, mise en service sur l'île suédoise de Gotland en 1999.

En ce début de XXI<sup>e</sup> siècle, nombreuses sont les innovations auxquelles le centre de recherche ABB a pris activement part :

- 2008 : changeur de prises en charge équipé d'interrupteurs à vide ;
- 2010 : transformateur de 800 kV pour le courant continu à très haute tension (CCHT) ;
- 2011 : moteur synchrone à réluctance variable SynRM ;
- 2012 : disjoncteur CCHT hybride ;
- 2014 : record mondial du transport CCHT sur câble de 525 kV ; achèvement d'un projet global d'efficacité énergétique sur le site minier de Garpenberg (Suède) ;
- 2015 : lancement du robot collaboratif à deux bras YuMi.

Ce numéro d'ABB review ouvre ses pages aux domaines et percées technologiques de la recherche ABB, dont il célèbre le premier siècle d'existence ... mais explore aussi le futur. Car le meilleur est à venir.

En 1980, la recherche ASEA est au cœur du développement des capteurs à fibre optique pour la mesure de température dans les transformateurs.

**Anders Johnson**

Historien des techniques  
Stockholm (Suède)

Des questions sur cet article ?

Contactez Erik Persson, à l'adresse  
erik.persson@se.abb.com.



# Moteurs de progrès

L'innovation ABB en première ligne

ABB a été l'un des grands pionniers du moteur électrique qui, aujourd'hui plus que centenaire, a connu des améliorations permanentes mais aussi des innovations marquantes qui se sont intensifiées ces cinq dernières années. Variation électronique de vitesse, contrôle direct de couple « DTC » (*Direct Torque Control*), démarrage progressif et nouvelles générations de moteurs concentrant des niveaux inégalés de puissance dans un encombrement réduit, sont quelques-unes des avancées majeures signées ABB.

**P**ompes, ventilateurs, compresseurs : en 2012, ce trio de machines représentait, en chiffre d'affaires, 79 % du marché mondial des moteurs basse tension [1]. Ces derniers jouent un rôle prépondérant dans la conversion électromécanique, absorbant 28 à 30 % de la production électrique. Pas étonnant que leur rendement soit aujourd'hui un critère déterminant et que toutes les grandes régions industrielles aient adopté une réglementation leur imposant des exigences minimales de performance énergétique. L'impressionnante quantité d'énergie consommée par ces moteurs électriques à l'échelle du globe explique l'importance accordée à l'innovation dans ce domaine.

---

#### Bibliographie

- [1] Meza, M., « Industrial LV Motors & Drives: A Global Market Update – January 2014, IHS », communication *Motor & Drive Systems 2014 – Advancements in Motion Control and Power Electronic Technology*, Orlando (Floride, États-Unis), 2014.

---

#### Photo

Le rendement et la densité de puissance des nouveaux moteurs SynRM et SynRM<sup>2</sup> d'ABB font beaucoup progresser la conversion électromécanique. La technologie SynRM n'est qu'un exemple de l'innovation ABB dans le domaine des moteurs électriques et de leur commande.

Moteurs de progrès

# Variateurs de vitesse électroniques

**SJOERD BOSGA, HECTOR ZELAYA DE LA PARRA** – Depuis plus d'un siècle, le moteur à courant alternatif (CA), par sa polyvalence, règne en maître dans les usines. Toutefois, sa commande n'est à l'origine pas aussi simple que celle du moteur à courant continu (CC), où le couple est proportionnel au courant d'induit. Le développement de la variation de vitesse en alternatif a donc répondu à un double objectif : émuler les caractéristiques du variateur CC, telles que réponse en couple rapide et vitesse précise, tout en conservant les atouts du moteur CA standard.

La mission première d'un variateur consiste à réguler la vitesse ou le couple développé sur l'arbre moteur. Un exercice auquel se prête bien le moteur CC, par sa simplicité de fonctionnement (pas d'électronique de commande complexe) et sa capacité à fournir sans difficulté la vitesse et le couple demandés. Toutefois, les progrès de l'électronique de puissance depuis quelques décennies ont permis d'appliquer la vitesse variable au courant alternatif, avec la possibilité d'émuler les excellentes performances du moteur CC à l'aide d'un moteur CA robuste, peu coûteux et sans entretien.

## Techniques traditionnelles

La commande en fréquence d'un variateur CA utilise des consignes de tension et de fréquence envoyées à un modulateur qui simule une onde alternative sinusoïdale et transmet celle-ci au bobinage statorique du moteur. Cette technique de « modulation de largeur d'impulsions » (MLI) exige l'utilisation d'un redresseur à diodes côté réseau et le maintien d'une tension CC constante dans le circuit intermédiaire. Un onduleur commande le moteur en tension et en fréquence au moyen d'un train d'impulsions MLI → 1. Cette méthode permet de s'affranchir du capteur qui mesure la vitesse de rotation de l'arbre ou sa position angulaire pour

## Les progrès de l'électronique de puissance depuis quelques décennies ont permis d'appliquer la vitesse variable au courant alternatif.

les renvoyer dans la boucle de commande. Cette configuration « en boucle ouverte », simple et économique, est idéale pour les applications où la précision n'est pas un critère essentiel, comme le pompage et la ventilation.

Il est aussi possible d'utiliser la MLI pour le « contrôle vectoriel de flux » ; cette commande, plus performante, est toutefois plus coûteuse et nécessite un retour capteur.

## Révolution technologique

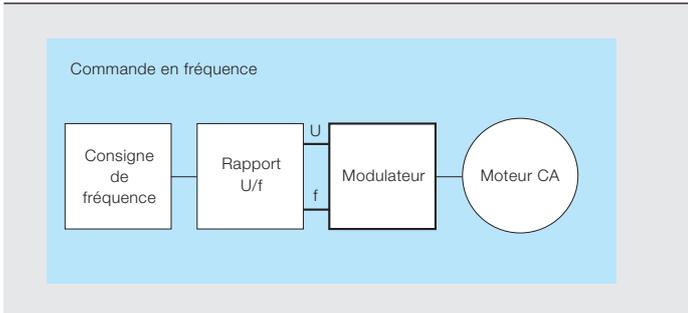
Le contrôle direct de couple DTC d'ABB surclasse les techniques de commande traditionnelles des moteurs. Par exemple, l'orientation du flux ne nécessite ni modu-

lation ni retour capteur ; elle se fonde sur un modèle théorique évolué des caractéristiques du moteur pour calculer directement le couple. Les variables de commande sont ici le flux magnétisant et le couple moteur.

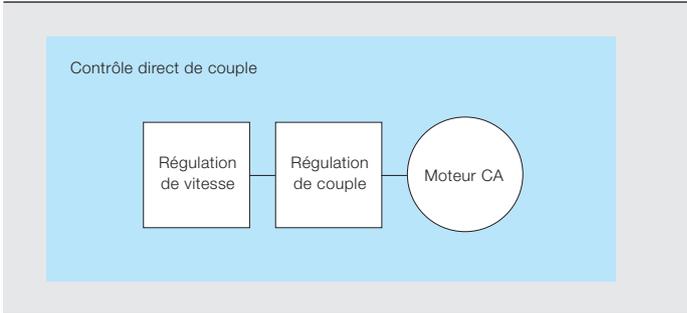
Il n'y a donc pas de modulateur MLI ni de capteur de vitesse (dynamo tachymétrique) ou de position (codeur) sur l'arbre moteur → 2. La commande DTC s'appuie sur les processeurs de traitement numérique du signal (DSP) les plus rapides du marché et sur une modélisation mathématique très poussée du fonctionnement du moteur. Résultats : un temps de réponse en régulation de couple dix fois plus court que celui de n'importe quel autre variateur CA ou CC → 3, et une précision dynamique en régulation de vitesse huit fois supérieure à celle d'un variateur CA en boucle ouverte et comparable à celle d'un variateur CC équipé d'un capteur. C'est là le premier variateur « universel » capable de rivaliser avec les variateurs CA et CC.

La commande DTC améliore notablement la consommation énergétique, la réponse en couple, la linéarité et la répétabilité, ainsi que la précision de vitesse du moteur, tout en réduisant les harmoniques.

### 1 Boucle de régulation d'un variateur CA à commande MLI



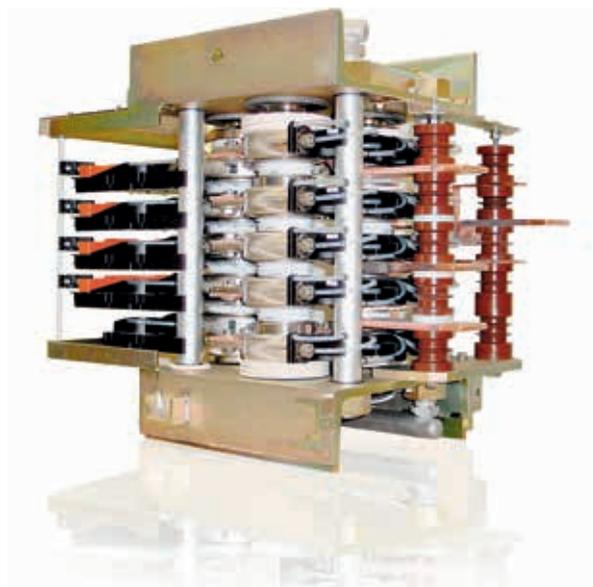
### 2 Boucle de régulation d'un variateur CA à commande DTC



### 3 Variateur ACS550 d'ABB



### 4 Module de puissance à IGCT de 9 MVA



La technologie DTC d'ABB a révolutionné la commande des moteurs.

#### Affaires de famille

Le premier convertisseur de fréquence à commande MLI, baptisé SAMI, vit le jour au début des années 1960 en Finlande, dans les usines de la société Strömberg, rachetée par ASEA en 1987. Les progrès de l'électronique de puissance au cours des décennies suivantes donnèrent naissance à toute une lignée de variateurs ABB, élargissant le champ d'application de la vitesse variable. Aujourd'hui, les variateurs moyenne tension gagnent en compacité, en fiabilité, en redondance et en efficacité énergétique. Au vu des contributions d'ABB dans ce domaine, notamment l'utilisation de thyristors intégrés commutés par la gâchette (IGCT) → 4 et la commande DTC, il n'est pas étonnant que le Groupe soit l'un des premiers fournisseurs au monde de variateurs pour l'industrie.

Sjoerd Bosga

Hector Zelaya De La Parra

ABB Corporate Research

Västerås (Suède)

sjoerd.bosga@se.abb.com

hector.zelaya@se.abb.com

Moteurs de progrès

# Démarrateurs progressifs

**HECTOR ZELAYA DE LA PARRA, MARIA WIDMAN, SÖREN KLING, GUNNAR JOHANSSON – Le moteur asynchrone à courant alternatif, le plus répandu dans l'industrie, démarre très souvent directement sur le réseau, à l'aide d'un contacteur principal et d'un relais de surcharge thermique. Cette méthode a néanmoins l'inconvénient d'entraîner un courant de démarrage qui peut atteindre un multiple de l'intensité assignée. Ce fort appel de courant est responsable de chutes de tension, préjudiciables aux autres équipements raccordés au réseau, mais aussi de contraintes mécaniques excessives qui peuvent détériorer le moteur. Les démarrateurs progressifs sont la parade à ces surcharges. ABB fabrique et commercialise depuis longtemps une vaste gamme de ces appareils.**

Un démarreur progressif à électronique de puissance a pour vocation de limiter le courant appelé au démarrage en augmentant progressivement la tension appliquée au moteur, réduisant ainsi les valeurs initiales de couple et d'intensité → 5.

Le démarreur progressif est un dispositif électronique à thyristors : ces composants semi-conducteurs bipolaires, mis au point dans les années 1950, conviennent aujourd'hui à de très hauts niveaux de tension et de courant. Les thyristors d'un démarreur progressif sont montés tête-bêche sur chaque phase du moteur. Un contrôle judicieux de leur allumage permet une augmentation progressive de la tension de démarrage : l'angle d'allumage varie graduellement pour produire une rampe de tension et de couple, et accélérer le moteur.

L'un des avantages de ce démarrage en douceur, sans à-coups mécaniques, est que le couple peut être réglé exactement à la valeur requise ; c'est là un important facteur de différenciation de la concurrence.

Atout supplémentaire : la fonction intégrée d'arrêt progressif, très utile pour arrêter les pompes des réseaux d'eau sensibles aux coups de bélier, lors d'un arrêt direct en démarrage étoile-triangle

## L'angle d'allumage varie progressivement pour augmenter la tension et le couple, et accélérer le moteur.

ou direct sur le réseau. L'arrêt progressif peut également éviter tout dommage matériel provoqué par l'arrêt brutal d'une bande transporteuse.

### L'offre fournie d'ABB

Après avoir été l'un des précurseurs du domaine dans les années 1970, le Britannique Fairford Electronics fut parmi les premiers à concevoir et à produire un départ-moteur triphasé doté d'une fonction d'optimisation énergétique automatique et de démarrage progressif pour économiser l'énergie. Intéressé par l'idée, ASEA entreprit en 1982 de collaborer avec une petite société suédoise, Elfi, pour développer son propre démarreur en mettant à profit le savoir-faire de son partenaire et les composants de Fairford Electronics.

Le projet fut une réussite, couronnée en 1984 par le lancement du premier démarreur progressif d'ASEA, le DEHE, à l'occasion du Salon international de

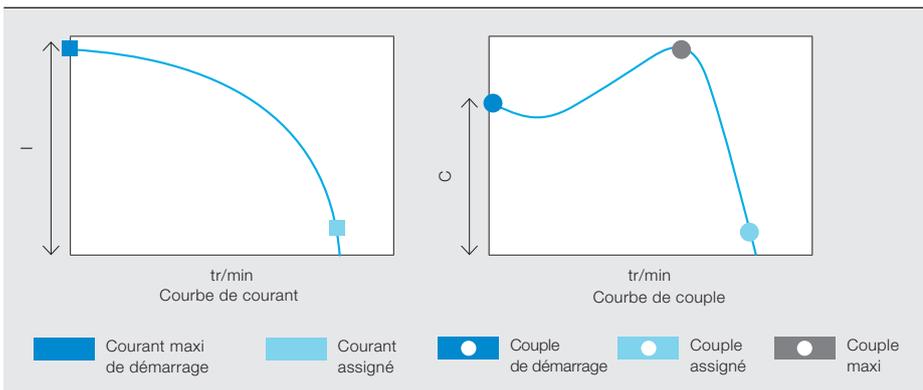
la production et de la distribution de l'énergie électrique Elfact (Suède). Pourtant, à l'époque, les avantages du démarrage progressif ne faisaient pas encore recette, si ce

n'est auprès de clients suédois de la mine et du papier ; ASEA dut former le marché à ce nouveau concept.

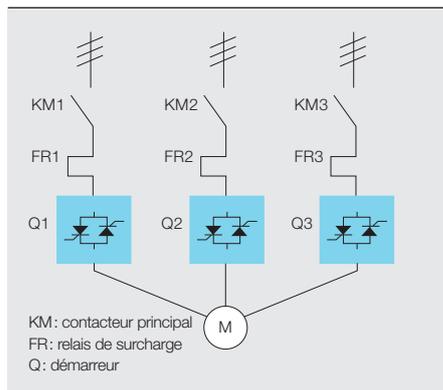
Les principaux composants d'un démarreur progressif moderne sont pour l'essentiel les mêmes que ceux des premières versions : un contacteur, un relais de surcharge et des thyristors → 6. À cela s'ajoutent une carte électronique, un dissipateur thermique, des ventilateurs et un boîtier.

En 1993, une nouvelle mouture étoffée en fonctionnalités voyait le jour : la gamme PSD. Proposée dans une plage de tensions, elle ouvrait de nouveaux débouchés à l'échelle mondiale. Le démarreur progressif PSD remporta un franc succès tout au long de la décennie 1990 et, même si Fairford Electronics était encore responsable de son volet technique, ABB sut mettre à profit sa force de vente et son expérience commerciale pour déployer massivement le produit.

## 5 Courbes de courant et de couple d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil classique sans démarreur progressif



## 6 Représentation simplifiée du démarreur progressif



## 7 L'offre de démarreurs progressifs ABB



Comme pour bien d'autres équipements industriels, la tendance est au développement des fonctions de diagnostic pour répondre aux exigences croissantes de fiabilité et de disponibilité. De nouvelles technologies de rupture, comme l'Internet des objets, des services et des personnes (IoTSP), tracent la voie d'une connectivité étendue qui améliorera la maintenance préventive et l'intégration dans le milieu industriel.

Le DEHE, premier démarreur progressif d'ASEA, fut lancé au salon Elfack (Suède) en 1984.

C'est en 2000 qu'apparaît le PSS, premier démarreur ABB conçu et fabriqué dans son usine d'Örjan, en périphérie de Västerås (Suède). Deux ans plus tard, l'appareil est encore amélioré et l'offre ABB déclinée en deux gammes, du simple PSS au PSD plus évolué.

En 2004, le nouveau modèle PST contribue au leadership d'ABB sur ce marché, notamment en Chine. Le PST est le premier démarreur progressif à intégrer un contact de by-pass en fonctionnement normal pour économiser l'énergie en évi-

tant les pertes par conduction des thyristors. Les développements ultérieurs ont surtout porté sur de nouveaux algorithmes pour renforcer les fonctionnalités du produit et sur l'emploi d'outils de modélisation et de simulation pour étudier le fonctionnement du démarreur dans les applications de pompage d'eau. La baisse des coûts fut aussi un axe de progrès ABB: le lancement du PSE en 2010 consacre la suprématie mondiale du Groupe dans le domaine des démarreurs progressifs → 7.

Depuis 2014, nombreux sont les démarreurs progressifs à communiquer sous protocoles Modbus, PROFIBUS, DeviceNet, Interbus-S, LonWorks, etc., grâce à leur port de transmission, normalement sur fibre optique. Ils s'enrichissent également de diagnostics et d'IHM intuitives, et s'intègrent à d'autres appareils, tels les automates programmables. Autant de fonctionnalités dont est paré le tout nouveau démarreur progressif PSTX d'ABB.

### Hector Zelaya De La Parra

ABB Corporate Research  
Västerås (Suède)  
hector.zelaya@se.abb.com

### Maria Widman

ABB Electrification Products,  
Protection and Connection  
Västerås (Suède)  
maria.widman@se.abb.com

### Sören Kling

ABB Electrification Products,  
Sales & Marketing  
Västerås (Suède)  
soren.kling@se.abb.com

### Gunnar Johansson

ABB Electrification Products,  
Protection and Connection  
Västerås (Suède)  
gunnar.c.johansson@se.abb.com

Moteurs de progrès

# Des moteurs électriques au top

**FREDDY GYLLENSTEN, DMITRY SVECHKARENKO, REZA RAJABI MOGHADDAM – ABB a mis au point une technique révolutionnaire de moteurs synchrones à réductance, ou « SynRM », qui offrent par nature une grande fiabilité opérationnelle, des rendements élevés et de fortes puissances, le tout dans un faible encombrement.**

Le moteur asynchrone (MAS) domine le marché industriel, y compris dans les applications de vitesse variable comme le pompage d'eau → 8. Une hégémonie qu'il doit à sa capacité de démarrer directement sur le réseau, suivant une méthode traditionnelle qui perdure aujourd'hui, même après l'introduction des convertisseurs de fréquence modernes. Le MAS n'est pourtant pas sans inconvénients : son fonctionnement asynchrone induit des pertes rotoriques relativement élevées et l'échauffement des organes de transmission et des enroulements, raccourcissant les intervalles de maintenance et la durée de vie des roulements et de l'isolant.

Des défauts que n'a pas le moteur synchrone à réductance, bien mieux adapté à la variation électronique de vitesse.

## Conception et principe de fonctionnement

Connus de longue date, les moteurs alternatifs à aimants permanents n'ont pu vraiment concurrencer les MAS que dans les années 1980 avec l'apparition d'une nouvelle génération d'aimants à terres rares. Pour autant, l'introduction de ces nouveaux aimants dans les moteurs se heurtait à deux freins : le coût et la volatilité des prix sur le marché

---

## Affranchi des défauts de son homologue asynchrone, le moteur synchrone à réductance est bien mieux adapté à la vitesse variable.

des métaux rares, les progrès parallèles de la commande en vitesse variable. Autre facteur déterminant pour tout grand moteur industriel, le champ magnétique tournant élevé qui complique la maintenance. Place donc au moteur synchrone à réductance sans terres rares !

Le moteur synchrone à réductance est un moteur électrique triphasé dont le rotor, de conception magnétiquement anisotrope, est constitué d'un empilement de tôles d'acier électrique, percées de trous agissant comme barrières de flux. Dans sa version quatre pôles, le rotor comporte quatre axes à haute perméance et quatre axes à faible perméance. Une haute perméance se traduit par une conductivité

magnétique et une inductance élevées, tandis qu'une faible perméance correspond à une faible inductance. La « réductance », autrement dit la résistance magnétique, est l'inverse de la perméance ; une réductance élevée entraîne une inductance basse. Les axes présentant une haute perméance (fer) peuvent être qualifiés de « directs » ( $d$ ), et les axes à haute réductance (air) de « quadrature » ( $q$ ) → 9.

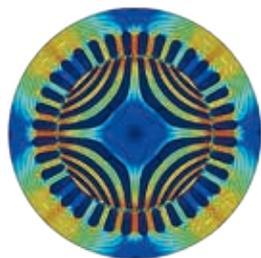
Quand un champ magnétique est produit dans l'entrefer par l'application de courants d'excitation aux bobinages du stator, le rotor s'efforce d'aligner son axe le plus magnétiquement conducteur ( $d$ ) avec le champ appliqué afin de minimiser la réductance dans le circuit magnétique. En d'autres termes, un couple est produit dans l'entrefer entre stator et rotor lorsque le vecteur du champ appliqué et l'axe  $d$  du rotor ne sont pas alignés. Le rotor tourne alors en synchronisme avec le champ magnétique appliqué. C'est ce principe même qui a donné son nom à la technologie de « réductance variable ».

En l'absence de bobinages et, donc, de pertes Joule dans le rotor, le moteur synchrone à réductance chauffe nettement moins qu'un MAS tout en étant plus performant et plus fiable. Sa rotation est parfaite en raison de la répartition sinusoïdale du champ de l'entrefer et du

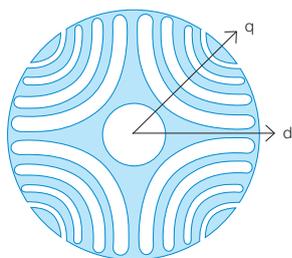
## 8 Moteurs industriels basse tension pour pompage hydraulique



## 9 Moteur synchrone à réluctance avec rotor 4 pôles



9a Vue en coupe



9b Définition des axes magnétiques  $d$  et  $q$



9c Bloc moteur

fonctionnement avec un courant sinusoïdal. Seul bémol : le moteur ne peut pas démarrer directement sur le réseau car la position du rotor doit être connue.

### Historique de développement

Les premiers développements ABB débutent en 2004 lorsque de nouveaux débouchés pour les moteurs SynRM se font jour sur le marché en plein essor de la vitesse variable. Cette technologie devait permettre de gagner en rendement et en fiabilité sans avoir recours à des aimants permanents à terres rares. Alors que les résultats concluants des premières expérimentations débouchent en 2007 sur un projet industriel, ABB sonde le marché et son intérêt pour ce type de produits.

Pour creuser le sujet, ce nouveau concept de moteur donne lieu en 2006 à un master en science (MSc), suivi d'un doctorat.

En 2009, la technologie a bien progressé : les défaillances de roulements et de tôles rotoriques, par exemple, ont fait l'objet d'essais complets de durabilité et d'une analyse des modes de défaillance. En 2011, le moteur SynRM fait salon à la Foire de Hanovre et remporte la même année le prix de l'automatisation à la grand-messe allemande des automatismes et systèmes d'entraînement, SPS IPC Drives. Les premiers produits sont commercialisés dès 2012.

En 2014, la gamme SynRM s'enrichit d'une variante, SynRM<sup>2</sup>. Ce moteur, principalement développé par les grands contributeurs d'ABB à la technologie SynRM, Alessandro Castagnini, Pietro Savio Termini et Giulio Secondo, se singularise par des aimants en ferrite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), généralement bien moins chers, plus performants et plus disponibles que les aimants à terres rares. D'où un

## ABB a misé sur la technologie SynRM dès 2004.

moteur très puissant, économique, endurant et respectueux de l'environnement.

L'année suivante, la famille SynRM s'agrandit encore avec un moteur équipé d'une cage d'écurie à l'intérieur des barres rotoriques SynRM, donc capable de démarrer sur le réseau, ce qui lui vaut l'appellation « DOLSynRM » (*Direct-On-Line SynRM*).

Même si elle a beaucoup évolué depuis ses débuts, la technologie SynRM est encore relativement jeune et recèle d'énormes marges de progrès en performances. ABB y travaille avec une offre de conceptions et d'exécutions sans cesse modernisées et de solutions optimisées pour les besoins multiples et variés de ses clients.

**Freddy Gyllensten**

**Dmitry Svechkarenko**

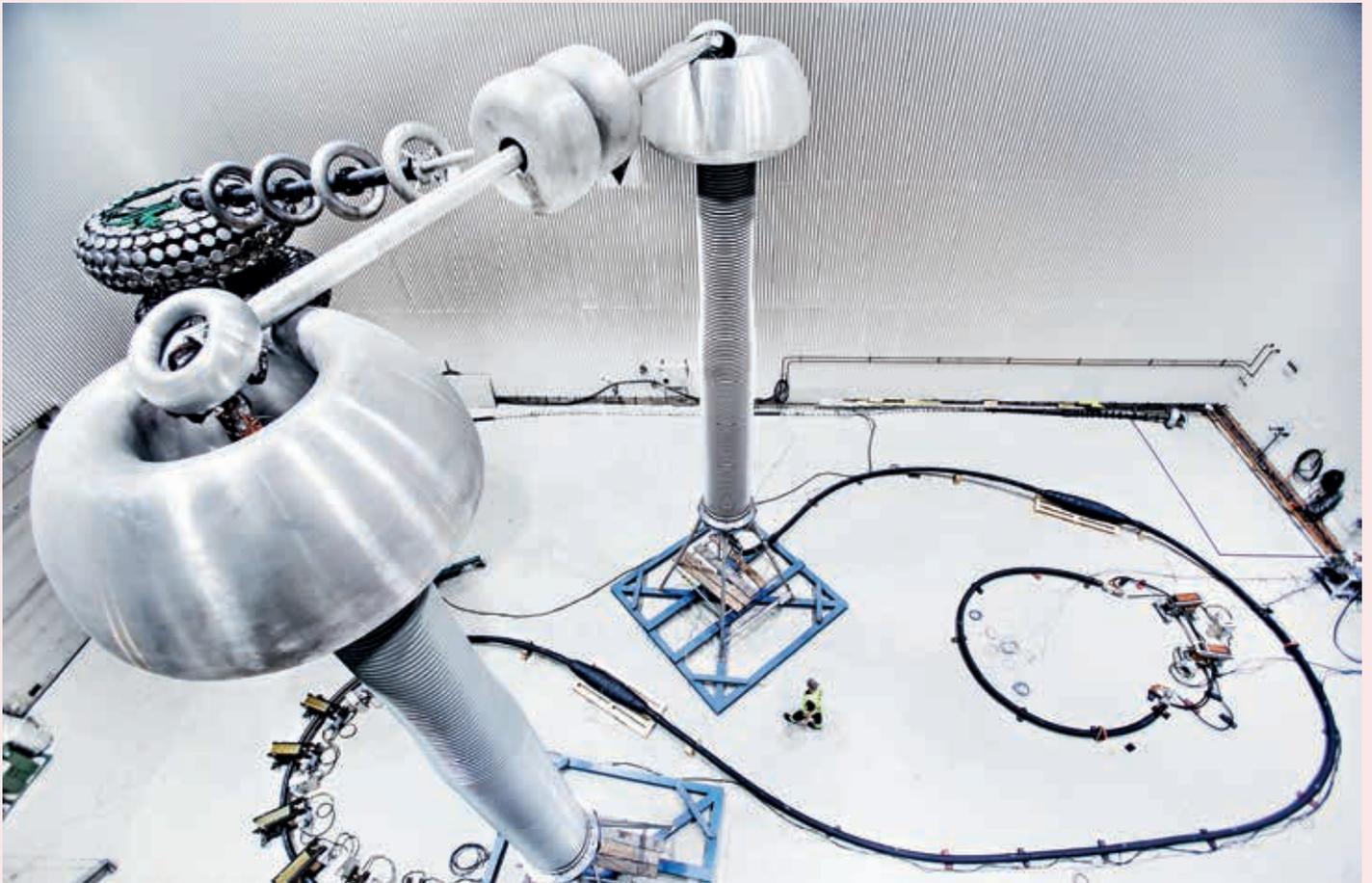
**Reza Rajabi Moghaddam**

ABB Discrete Automation and Motion,  
Motors and Generators  
Västerås (Suède)

freddy.gyllensten@se.abb.com

dmitry.svechkarenko@se.abb.com

reza.r.moghaddam@se.abb.com



# Le futur en continu

## La technologie CCHT fait grimper le transport électrique

**Le progrès de notre société passe par le transport massif d'électricité d'un pays ou d'un continent à l'autre. Le courant continu à haute tension (CCHT) est pour cela idéal : au-delà de ses performances intrinsèques, il bénéficie des avancées de l'électronique de puissance qui l'ont simplifié, rendant son infrastructure moins complexe, moins volumineuse et plus à même d'accueillir de nouveaux concepts, tels les réseaux électriques intelligents, que son concurrent alternatif (CAHT).**

### Photo

De plus en plus de liaisons CCHT sont installées dans le monde pour maximiser le transport de grandes quantités d'électricité (ici, un câble CCHT extrudé de 525 kV à l'essai).

**G**rand perdant de la « guerre du courant » qui l'opposait à l'aube du XX<sup>e</sup> siècle à l'alternatif pour transporter et distribuer l'énergie électrique, le courant continu a dû attendre les années 1950 et l'avènement des techniques de conversion de puissance pour connaître un retour en grâce.

À l'époque, le courant continu se heurtait à plusieurs difficultés, notamment le changement de niveau de tension, dont l'alternatif s'acquittait assez facilement. Reste que le continu surclasse en fonctionnement l'alternatif quand il s'agit de transporter l'électricité en haute tension et donc à de faibles intensités.

Au fil des décennies, le CCHT a été utilisé pour les liaisons de transport sous-marines et les connexions dos à dos, mais au prix d'une électromécanique encombrante. C'est l'avènement des composants de puissance comme les transistors bipolaires à grille isolée IGBT qui concrétisera les systèmes CCHT compacts et économiques. L'offre ABB dans le domaine du CCHT à base de convertisseurs à source de tension répond à l'appellation HVDC Light®.

Un système HVDC Light ne se limite pas à un seul dispositif mais englobe une gamme innovante de produits et de solutions *ad hoc*, tels que câbles, disjoncteurs et composants électroniques de haute technologie.

Le futur en continu

# Transport massif d'électricité avec HVDC Light®

JAN R. SVENSSON – L'origine du CCHT chez ABB remonte à une étude menée en 1993 par Gunnar Asplund, alors directeur de recherche, sur l'utilisation de convertisseurs à source de tension (*Voltage Source Converters*) dans le transport d'énergie en courant continu haute tension. Depuis, des liaisons toujours plus longues et perfectionnées se sont déployées dans le monde entier, faisant du CCHT une activité ABB qui se chiffre aujourd'hui à un milliard de dollars.

**F**ort des résultats convaincants de l'étude de G. Asplund, ABB lança en août 1994 un grand projet visant à explorer davantage l'approche VSC.

Si le convertisseur à source de tension est alors la clé de voûte de cette nouvelle technologie, l'IGBT en est la cheville ouvrière. Ce transistor MOS (métal oxyde semi-conducteur) se contente d'une très faible puissance de commande, que peut lui procurer le circuit d'aide à la commutation (*snubber*) connecté en parallèle. Par conséquent, aucune énergie auxiliaire fournie par la terre n'est nécessaire pour alimenter la commande de gâchette. Qui plus est, l'amorçage comme le blocage de l'IGBT peuvent être commandés avec précision, rendant possible la mise en série du composant.

Au rang des innovations phares d'ABB figurent le montage en série de modules IGBT en boîtier pressé pour supporter les hautes tensions, ainsi que le développement d'un mode de défaillance en court-circuit et d'un régime de test approprié. Pour faire le meilleur usage de ces IGBT

en série, tous doivent être amorcés ou bloqués en même temps de façon que chacun supporte la même contrainte de tension. Ce qui revient, dans une station CCHT à convertisseurs VSC, à commuter un à un des centaines d'IGBT en une fraction de microseconde!

Cette connexion en série fit l'objet d'un

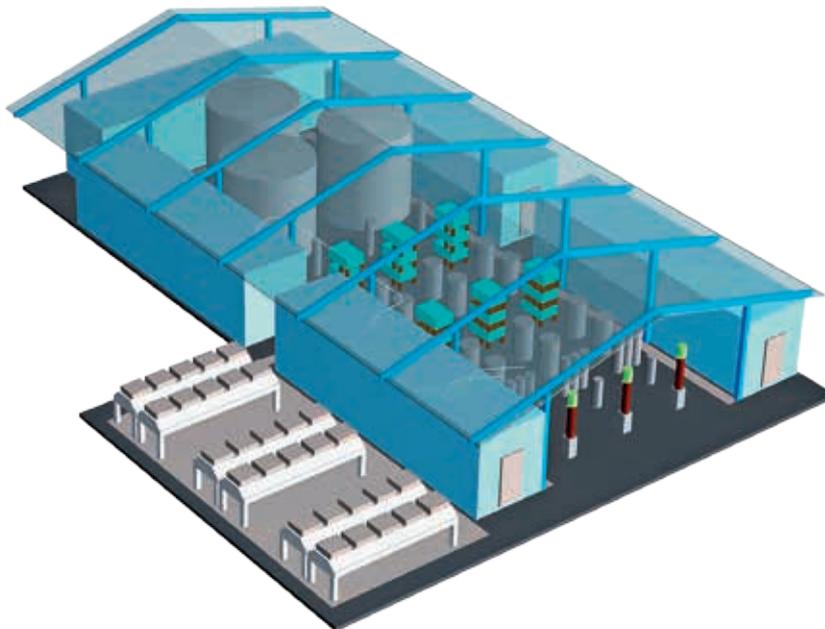
---

Parmi les technologies phares d'ABB figure la mise en série de modules IGBT en boîtier pressé pour tenir aux hautes tensions.

développement complet incluant la conception, la fabrication et le réglage des commandes de gâchette avec les circuits snubbers et l'alimentation. Un concept validé par la réalisation d'un prototype de pont en H avec quatre IGBT en série par valve.

La faisabilité du CCHT à convertisseurs VSC fut démontrée en 1997 par la liaison expérimentale Hällsjön-Grängesberg, au centre de la Suède, sur une ligne en courant alternatif (CA) de 10 km sous 50 kV mise à disposition pour le projet.

## 1 Installation HVDC Light® de Gotland, en Suède



Ce démonstrateur avait pour caractéristiques :

- Une puissance et une tension assignées de 3 MW/±10 kV, une fréquence de commutation de 1950 Hz ;
- Deux stations de conversion à VSC triphasés à deux niveaux ;
- Des IGBT de 2,5 kV/250 A en boîtier pressé, refroidis par eau déminéralisée ;
- Une ligne aérienne et un câble souterrain ;
- Un disjoncteur CC et un hacheur CC utilisant des IGBT en série.

Inaugurée le 10 mars 1997, cette première liaison CCHT à convertisseurs VSC au monde fut suivie d'un vaste programme d'essai prouvant que le concept répondait à toutes les attentes.

### HVDC Light commercial

En mai 1997, ABB lançait HVDC Light en conviant ses clients à des séminaires et à une visite du démonstrateur en Suède. Résolument modulaire, la solution est alors proposée en plusieurs puissances normalisées dans la plage de 10 à 100 MW, avec des convertisseurs à deux niveaux jusqu'à environ ± 80 kV.

D'emblée, HVDC Light avance ses vertus écologiques : le transport d'énergie sur une paire de câbles souterrains évite tout impact visuel et la tension équilibrée

à la terre élimine le besoin d'une électrode, d'où l'absence de courant à la terre et de champ électromagnétique émanant des câbles.

Conçues pour fonctionner sans intervention humaine et, en principe, sans entretien, les stations de conversion sont manœuvrables à distance. La première installation pilote HVDC Light démarre en novembre 1999 sur l'île suédoise de Gotland avec deux câbles extrudés de 80 kV, 140 km séparant les deux stations terminales → 1.

### Applications

Générateur synchrone, le convertisseur VSC crée ses propres tensions de phase. Une commande en cascade permet de régler rapidement et séparément les courants actif et réactif dans un contrôleur interne, tandis qu'un contrôleur externe, plus lent, surveille la référence de puissance active ou la référence de tension de la liaison CC, en utilisant le courant actif. Le courant réactif sert à réguler la tension CA ou à injecter/consommer de la puissance réactive. La commande en cascade ainsi que les boucles de commande externes répondent aux exigences d'une grande variété d'applications :

- Interconnexion de réseaux ;
- Raccordement de parcs de production éloignés des consommateurs

(éolien marin, par exemple) et alimentation électrique de charges distantes (des navires à quai aux plates-formes pétrolières et gazières en mer) ;

- Insertion de liaisons CC dans les réseaux CA pour en augmenter les performances : HVDC Light supprime les goulets d'étranglement dans les réseaux CA, facilite le passage des lignes souterraines, améliore la stabilité et la fiabilité du réseau CA, ainsi que la qualité de la desserte ;
- Alimentation des centres-villes : la faible emprise au sol de la solution et sa technologie câblée permettent d'emprunter sans encombre les couloirs de passage existants.

### Montée en charge

Les semi-conducteurs de puissance CCHT et leur conditionnement n'ont cessé d'évoluer pour répondre aux exigences de puissances accrues et de pertes réduites. L'optimisation des topologies de convertisseur et des algorithmes de commande, ainsi que les stratégies de modulation de largeur d'impulsions (MLI) ont participé à ces progrès, échelonnés sur trois grandes périodes.

### 2002-2005

La mise au point d'une nouvelle génération de câble extrudé à isolation polymère permet d'atteindre une tension de ± 150 kV.

La faisabilité du CCHT à base de convertisseurs à source de tension fut démontrée en 1997 par une liaison expérimentale de 3 MW/±10 kV, sur une distance de 10 km au centre de la Suède.

2 Station HVDC Light (en gris, entre les grues) sur la plate-forme Troll A, au large des côtes norvégiennes



Une station HVDC Light équipée d'un convertisseur VSC actif à trois niveaux, clampé par le neutre, est également développée au profit de deux projets : Cross Sound Cable (330 MW) aux États-Unis et Murraylink (220 MW) dans le Sud australien, lequel totalise 180 km de liaison continue.

#### 2005 – 2007

Une nouvelle génération de semi-conducteurs permet de revenir à la topologie de convertisseur à deux niveaux, grâce à un algorithme MLI optimisé. Plusieurs projets sont menés à bien, dont l'interconnexion Caprivi (300 MW), première liaison HVDC Light aérienne reliant sur 950 km le nord-est et le centre de la Namibie.

#### Depuis 2007

Les récents développements HVDC Light s'appuient sur une topologie modulaire de convertisseurs multiniveaux et multicellulaires en demi-pont. Ce progrès ouvre la voie à des liaisons de fortes puissances comme DolWin1 (800 MW), première à utiliser des câbles extrudés de 320 kV, et North Sea Link (1400 MW), interconnexion bipolaire longue de 730 km entre la Norvège et le Royaume-Uni, dont la mise en service est prévue en 2021.

#### Dans l'offshore

Le CCHT trouve de nombreuses applications en mer. La plate-forme de gaz Troll A, en mer du Nord, par exemple, utilise des compresseurs pour augmenter

la pression du gaz acheminé à terre, à 70 km de distance. Ces compresseurs sont généralement entraînés par une génératrice encombrante et peu efficace. La solution ABB ? Des moteurs électriques à très haute tension (THT) dotés de bobinages statoriques exploitant des câbles extrudés CA à isolation polymère. Le moteur THT peut être directement raccordé à HVDC Light sans passer par un transformateur. Le recours à une alimentation depuis la côte, au moyen d'un moteur THT et d'une liaison HVDC Light, a plus d'un avantage :

- L'énergie produite à terre émet moins de gaz à effet de serre ;
- Le moteur THT affiche un rendement supérieur à celui des turbines à gaz ou groupes diesel, tout en nécessitant moins d'entretien ;
- La plate-forme est moins lourde, moins volumineuse.

En 2005, deux systèmes parallèles de ±60 kV, équipés d'un moteur THT de 44 MW/56 kV CA, furent installés sur Troll A → 2. Deux autres chantiers furent achevés en 2015 avec un moteur THT de 50 MW/66 kV CA.

#### HVDC Light joue les prolongations

En à peine 19 ans, le premier démonstrateur visionnaire de 3 MW entre Hällsjön et Grängesberg s'est démultiplié en 25 installations HVDC Light dans le monde qui transportent aujourd'hui plus de 10 GW et pèsent un milliard de dollars dans le portefeuille d'activités ABB. Ce

déploiement rapide est appelé à se poursuivre sous l'impulsion du défi climatique, de l'insertion des énergies renouvelables dans le réseau électrique, d'une demande d'amélioration de la qualité du courant et du rapprochement des marchés de l'énergie avec l'infrastructure de transport et de distribution électrique.

HVDC Light verra son attractivité renforcée avec l'apparition de nouveaux semi-conducteurs, matériaux de câbles et convertisseurs haute tension, pour acheminer toujours plus de puissance avec moins de pertes.

#### Jan R. Svensson

ABB Corporate Research  
Västerås (Suède)  
jan.r.svensson@se.abb.com

Le futur en continu

# Sectionneur ultrarapide pour disjoncteur CCHT hybride

**LARS LILJESTRAND, JÜRGEN HÄFNER – Le sectionneur ultrarapide est un élément central du nouveau disjoncteur CCHT hybride d’ABB, dont le développement illustre les formidables possibilités de l’électronique de puissance.**

**E**n cas de défaut dans un réseau électrique, il faut pouvoir séparer et isoler la partie défectueuse du reste du système, et seulement elle ! Sur une ligne à courant continu haute tension (CCHT) point à point, cette mission est aujourd’hui assurée par des disjoncteurs en courant alternatif (CA) situés à chaque extrémité → 3. Or les liaisons CCHT étant de plus en plus maillées (multipoints), c’est tout le réseau qui est alors sectionné par le disjoncteur CA → 4. Autre problème, l’élimination d’un défaut CCHT doit s’effectuer en quelques millisecondes, soit bien plus vite que dans un équivalent CA.

Dans cette configuration, un disjoncteur CCHT s’impose.

## Disjoncteur hybride

Encore récemment, il n’existait aucun disjoncteur CC adapté au CCHT, du fait des niveaux de tension élevés, de la hausse très rapide du courant de court-circuit et de la rapidité avec laquelle le courant doit être coupé. C’est précisément ce qui a poussé ABB à innover avec un appareil « hybride » dont les pertes sont aussi faibles que celles d’un

interrupteur mécanique, le pouvoir de coupure comparable à celui d’un interrupteur à électronique de puissance, et l’interruption rapide des courants de court-circuit conforme aux exigences des réseaux CCHT.

## Les fortes exigences de commutation mécanique font du sectionneur ultrarapide une pièce maîtresse du disjoncteur hybride d’ABB.

Ce nouveau disjoncteur comporte deux branches parallèles → 5 : d’un côté, un disjoncteur principal constitué d’interrupteurs de puissance et de parafoudres, de l’autre, un sectionneur mécanique ultrarapide et un interrupteur électronique de commutation de charge. Les interrupteurs mécaniques utilisés auparavant n’étant pas à la hauteur des exigences, le sectionneur ultrarapide est un élément essentiel du disjoncteur hybride.

## Sectionneur ultrarapide

Cet interrupteur mécanique est capable de conduire de forts courants assignés avec des pertes négligeables. Une fois ouvert, il peut supporter une tension élevée pendant quelques millisecondes, grâce à un système de contacts en parallèle et en série → 6, 7.

Les contacts en parallèle admettent des courants assignés élevés quand l’interrupteur est fermé, tandis que ceux en série résistent à une tension élevée lorsqu’il est ouvert. La faible course des actionneurs de contacts en série garantit

une ouverture rapide et une excellente endurance mécanique. Ces mécanismes linéaires, de type Thomson, se déplacent dans des directions opposées, doublant la vitesse de séparation des contacts.

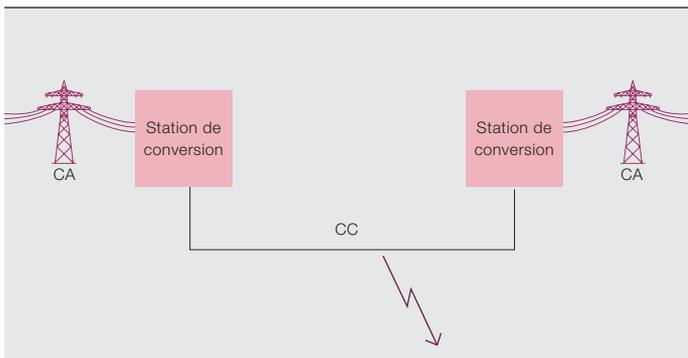
L’interrupteur est logé dans un boîtier rempli d’un gaz sous pression qui améliore la tenue en tension.

## Deux ans de réflexion

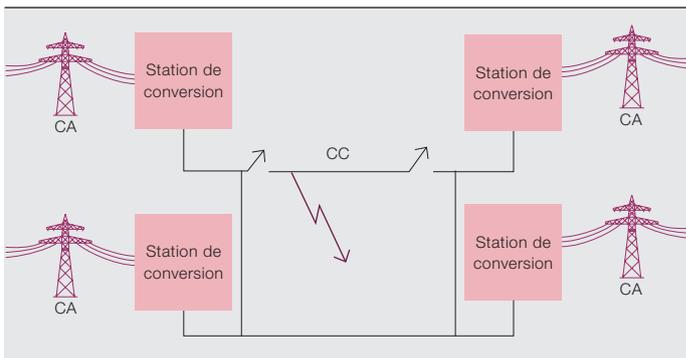
C’est en 1999 qu’ABB identifie le besoin d’un interrupteur de commutation rapide pour shunter les interrupteurs électroniques. En 2000, il lance la construction d’un démonstrateur destiné à la limitation des courants de défaut moyenne tension (MT). Le premier modèle, à base de contacts rotatifs, remporte un tel succès que le projet prend rapidement de l’ampleur. Moins d’un an après, le sectionneur est doté de contacts linéaires améliorés.

Dès 2002, la technologie était mature pour des applications MT à 17,5 kV.

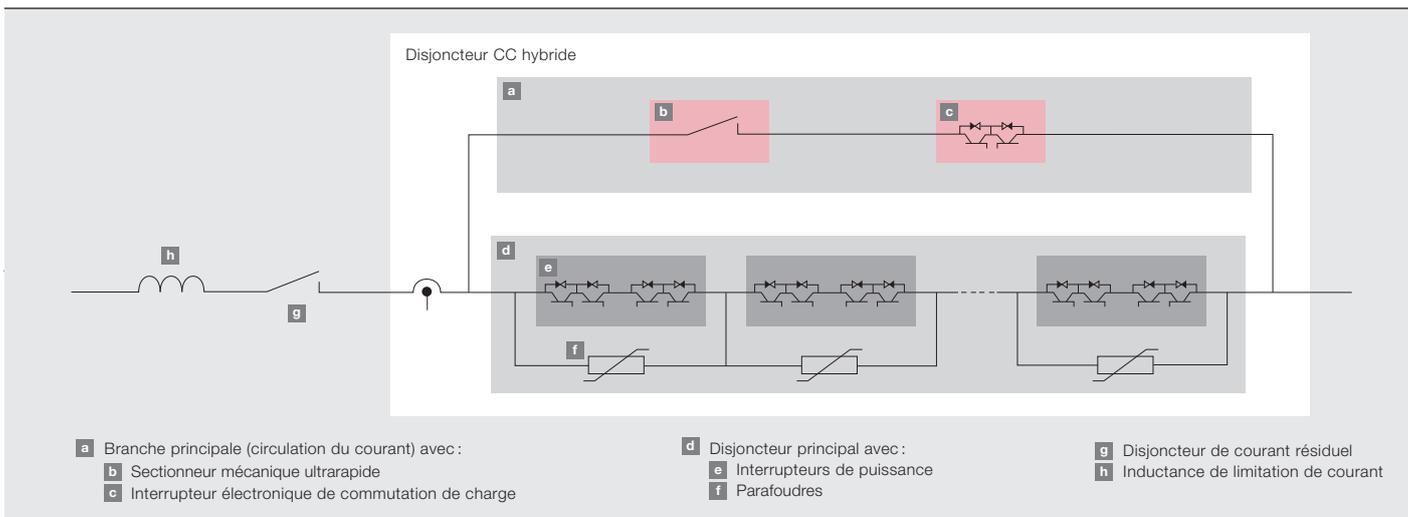
### 3 Le disjoncteur CA peut éliminer un défaut dans une liaison CCHT point à point.



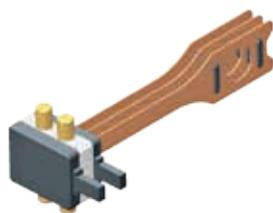
### 4 Dans un réseau CCHT, le recours à un disjoncteur dans la partie CA pour éliminer un défaut risque d'interrompre le courant dans tout le réseau.



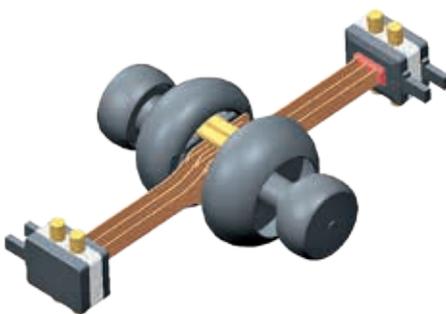
### 5 Disjoncteur CCHT hybride



### 6 Contacts en parallèle



### 7 Contacts en série



Les efforts de développement entamés en 1999 continuent de porter leurs fruits.

#### De 2010 à nos jours

Si les réseaux CCHT étaient déjà dans l'air en 2010, aucun disjoncteur ne répondait à leurs exigences. Un premier disjoncteur hybride CC fut alors proposé, mais sans sectionneur ultrarapide. Les ingénieurs ayant travaillé sur l'interrupteur de commutation rapide développé dix ans auparavant suggérèrent de s'en inspirer pour mettre au point le sectionneur.

Restait à prouver que cette solution MT pouvait être transposée à la haute tension (320 kV). En parallèle, d'autres concepts furent évalués et comparés. Au final, l'interrupteur basé sur des contacts mécaniques connectés en parallèle et en série s'imposa comme le composant le plus à même de satisfaire aux exigences applicatives. La production débuta en 2011 en Suisse.

Les efforts de développement entamés en 1999 continuent de porter leurs fruits. Gageons que ce disjoncteur associant électronique de puissance et mécanique très rapide trouvera de nombreuses autres applications électriques.

#### Lars Liljestrand

ABB Corporate Research  
Västerås (Suède)  
lars.liljestrand@se.abb.com

#### Jürgen Häfner

ABB Power Grids, Grid Systems  
Ludvika (Suède)  
jurgen.hafner@se.abb.com

Le futur en continu

# Câble CCHT extrudé : une technologie de pointe

**CARL-OLOF OLSSON – Le transport d'électricité CCHT réclame le meilleur de la technologie de câbles à isolation synthétique extrudée : XLPE.**

Les premiers câbles d'énergie extrudés apparaissent à la fin des années 1940. L'isolant utilisé est le polyéthylène (PE), choisi avant tout pour sa faible permittivité, ses bonnes propriétés mécaniques et sa haute conductivité thermique. Une dizaine d'années plus tard, c'est au tour de l'isolation en polyéthylène réticulé XLPE (*Cross-Linked Polyethylene*) de s'imposer en haute tension. Un succès toujours d'actualité.

Pour les câbles CCHT sous-marins, deux matériaux d'isolation sont envisageables : le papier imprégné ou le synthétique XLPE. Pour les liaisons terrestres, ce dernier prime par sa masse totale inférieure et sa plus grande facilité de jonctionnement.

## L'isolation synthétique extrudée XLPE est la technologie reine en haute tension.

### Grands développements

Dans les premiers câbles d'énergie, il y a un siècle et demi, l'enveloppe isolante était directement appliquée sur le conducteur. Or on a vite découvert qu'il était possible d'augmenter considérablement la tension de fonctionnement en entourant le conducteur de papier métallisé afin d'atténuer les effets du champ électrique local. Les câbles isolés n'ont cessé de progresser jusqu'à l'avènement, à la fin des années 1960, des câbles XLPE

fabriqués par co-extrusion : une couche uniforme et compacte d'isolant polymère autour du conducteur est prise en sandwich entre deux écrans semiconducteurs.

En 1997, ABB met au point des systèmes de câbles extrudés pour courant continu. L'amélioration des propriétés diélectriques du XLPE permet d'augmenter les niveaux de tension, du premier palier technique de 80 kV aux 525 kV d'aujourd'hui. Le coût total des systèmes de câbles ne cesse de diminuer grâce à la maîtrise des procédés de fabrication et des techniques de pose et d'assemblage.

### Tenir la performance sur la distance

Les dernières générations de câbles XLPE d'ABB → 8 atteignent 525 kV, grâce à un isolant à plus faible conductivité électrique et à des jonctions et extrémités spéciales. Des essais de qualification ont été réalisés à une température du conducteur de 70 °C, quand celle des câbles à papier imprégné plafonne à 55 °C. Les recherches et développements futurs visent des niveaux de température de fonctionnement et de tension encore plus élevés.

Les nouveaux investissements dans les systèmes de câbles laissent entrevoir un usage plus écoresponsable et durable de l'énergie.

**8 Les câbles XLPE modernes présentent une structure sophistiquée en couches, à la fois flexible et adaptable à l'application.**

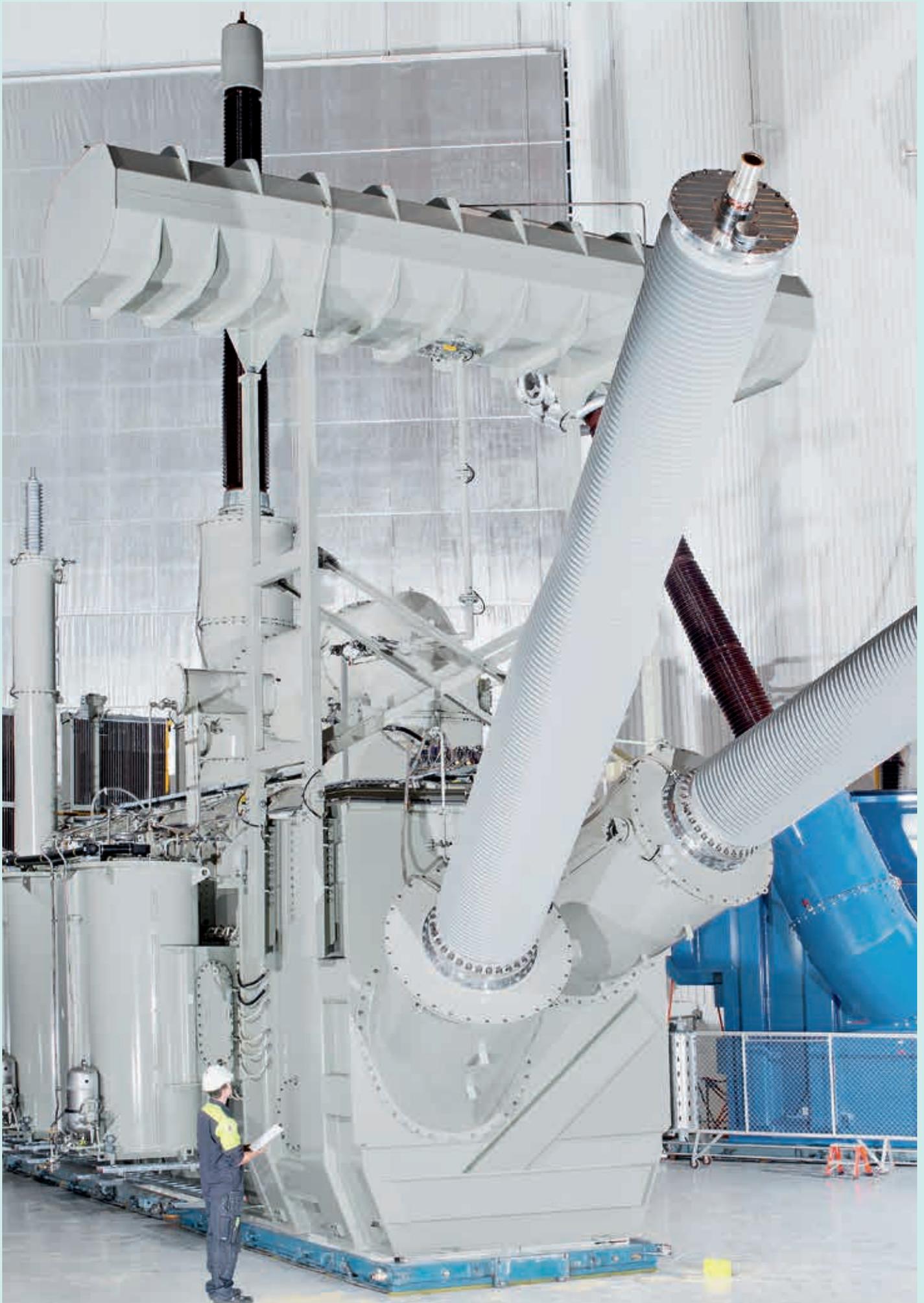


**Carl-Olof Olsson**

ABB Corporate Research

Västerås (Suède)

carl-olof.olsson@se.abb.com



# Transformation tous azimuts

## Progrès dans l'isolation des transformateurs et les changeurs de prises pour applications de fortes puissances

Avec la hausse ininterrompue des niveaux de puissance transités dans le réseau électrique (jusqu'à plusieurs gigawatts aujourd'hui), les transformateurs qui gèrent ces énormes quantités d'énergie sont de plus en plus sollicités. Lorsqu'on arrive dans le domaine du courant continu à très haute tension (CCTHT), les méthodes traditionnelles d'isolation ne conviennent plus; il faut alors faire appel à la recherche fondamentale pour, par exemple, étudier et atténuer les perturbations causées par la dérive ionique. De même, la commutation à ces très hauts niveaux de tension dégrade le fluide diélectrique du transformateur; d'où l'importance de concevoir de nouveaux changeurs de prises en charge affranchis de ces contraintes.

Le CCTHT est le moyen le plus efficace de transport massif d'énergie sur de longues distances. La première liaison ABB en courant continu haute tension (CCHT) fut l'interconnexion entre l'île de Gotland et le continent suédois, mise en service en 1954. Trente ans plus tard, celle d'Itaipu au Brésil représentait un progrès spectaculaire en portant la tension de transport assignée de 400 à  $\pm 600$  kV CC, record mondial du CCHT inégalé pendant plus d'un quart de siècle. En 2010, ABB installait une liaison de  $\pm 800$  kV CC en Chine; un nouveau palier franchi en seulement deux ans par le prototype de transformateur convertisseur de 1100 kV CC, à Ludvika (Suède).

Riche de plus d'un siècle d'expérience dans ce domaine, depuis le premier transformateur à huile construit par BBC en 1893, ABB dispose des compétences pour mener à bien de tels projets. Ces dernières années, les défis du transport en courant continu à haute et très haute tension ont été l'occasion de nouvelles avancées scientifiques et techniques qui ont renforcé la position d'ABB sur ce marché. C'est notamment une meilleure compréhension de phénomènes physiques, tels que la dynamique ionique dans le complexe isolant huile-papier des transformateurs convertisseurs, qui a conforté son leadership technologique dans la construction de ces appareils.

La commutation de tensions élevées n'est pas simple, surtout quand il s'agit de faire varier le rapport de transformation d'un appareil sous tension, à l'aide d'un changeur de prises en charge. Ce dernier sert à gérer l'énergie électrique

produite lorsque le courant est interrompu dans un échelon de réglage pour passer dans un autre. Dans un changeur de prises classique, la commutation utilise l'huile du transformateur pour couper le courant. D'où la formation d'un arc électrique qui, à la longue, use les contacts et diminue les propriétés du fluide diélectrique.

ABB a mis au point une nouvelle gamme de changeurs de prises en charge utilisant des chambres de coupure sous vide. Ainsi, l'arc qui se forme pendant la manœuvre reste confiné dans la chambre, évitant la dégradation de l'huile et allongeant la durée de vie des contacts jusqu'à un million de manœuvres. Autre atout de cette technologie: l'interruption de courants élevés. Les changeurs de prises qui en sont équipés affichent des caractéristiques assignées supérieures à celles de leurs homologues traditionnels.

### Photo ci-contre

Faire fonctionner un transformateur à de très hauts niveaux de tension? Un défi à la taille de l'engin!

# Le changeur de prises fait le vide

**LARS JONSSON, MAGNUS BACKMAN, PETER NILSSON – ABB a mis au point une nouvelle gamme de changeurs de prises en charge basés sur la technologie des chambres de coupure sous vide. En confinant l'arc électrique, on évite ainsi la dégradation de l'huile du transformateur ainsi que l'usure des contacts.**

**C**hanger le nombre de spires des enroulements d'un transformateur de puissance sous tension entraîne irrémédiablement la formation d'arcs électriques dans l'huile. Au fil du temps, ces arcs mettent à mal aussi bien les contacts du changeur de prises que les propriétés du fluide diélectrique. Maintenance régulière et remplacement de l'huile sont alors indispensables.

## Avantages ABB

Les nouveaux changeurs de prises en charge ABB sont équipés d'une chambre de coupure sous vide spécialement développée à cet effet. L'arc y étant confiné, l'huile ne se dégrade pas et les contacts peuvent effectuer jusqu'à un million de manœuvres, avec en prime un pouvoir de coupure du courant bien supérieur.

## Historique

Les changeurs de prises en charge et les interrupteurs à vide existent depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle, mais leur réunion en un seul produit est somme toute assez récente. Dans les années 1970, ASEA breveta divers aspects de la coupure dans le vide, y compris les applications pour changeur de prises en charge. La première association fut réalisée sur des changeurs de prises de type réactif, technologie alors prépondérante aux États-Unis

et toujours en usage aujourd'hui. Elle fonctionnait à des intensités élevées, côté basse tension du transformateur.

Toutefois, son essor ne vint qu'avec la libéralisation ultérieure du marché de l'énergie dans de nombreux pays, qui

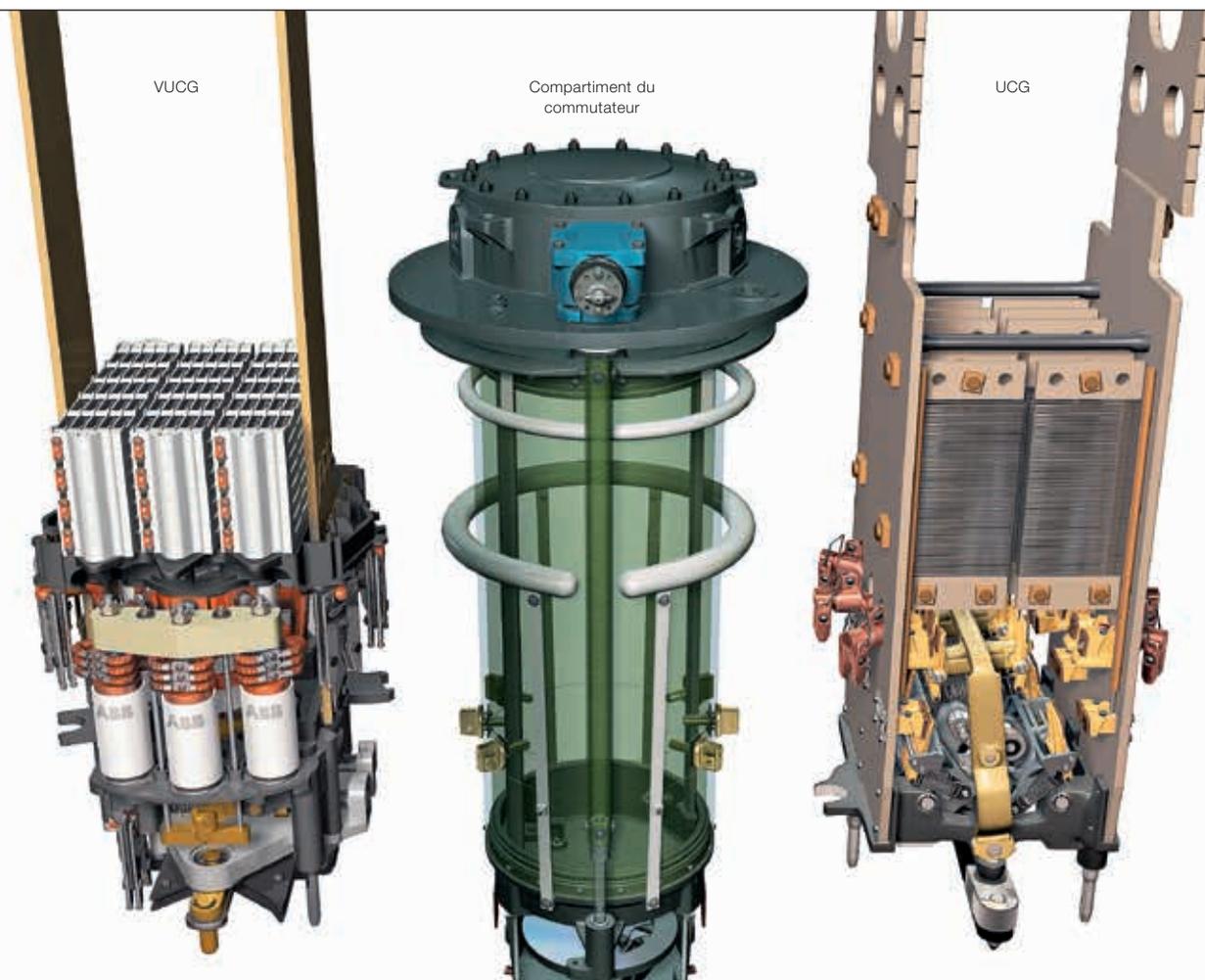
---

La chambre de coupure sous vide des nouveaux changeurs de prises ABB confine l'arc électrique, évitant la dégradation de l'huile et l'usure des contacts.

força les exploitants à améliorer l'utilisation des équipements, allonger leur durée de vie et alléger la maintenance.

Pour répondre à ces nouvelles exigences, le centre de recherche institutionnel d'ABB, en Suède, effectua en 2002 une étude préliminaire sur les changeurs de prises en charge dotés de chambre de

## 1 L'interchangeabilité des commutateurs facilite la transition d'un changeur de prises classique UC vers un modèle sous vide VUCG.



coupure sous vide. Un groupe de travail fut constitué l'année suivante et produisit les premières ébauches du VUCG, dont le principal atout différentiateur est l'utilisation d'interrupteurs à vide et de contacts auxiliaires actionnés par un mécanisme d'entraînement unidirectionnel.

Le premier prototype de commutateur VUCG remonte à 2004. En 2005, il est équipé d'un mécanisme à ressorts de compression, plus fiable que les contacts annulaires des premiers modèles, et d'un nouveau redresseur mécanique assurant un sens de rotation unique. Le VUCG est présenté à la session 2006 du CIGRÉ.

Cette même année, ABB conçoit et réalise le premier prototype du VUCL. Ce dernier s'apparente au VUCG mais dispose en plus d'un contact de dérivation pour contourner les interrupteurs à vide en fonctionnement normal; il supporte ainsi des courants plus élevés. Le VUBB

voit le jour en 2007, ainsi qu'un sélecteur de prises à compensation de position de l'encoche de came.

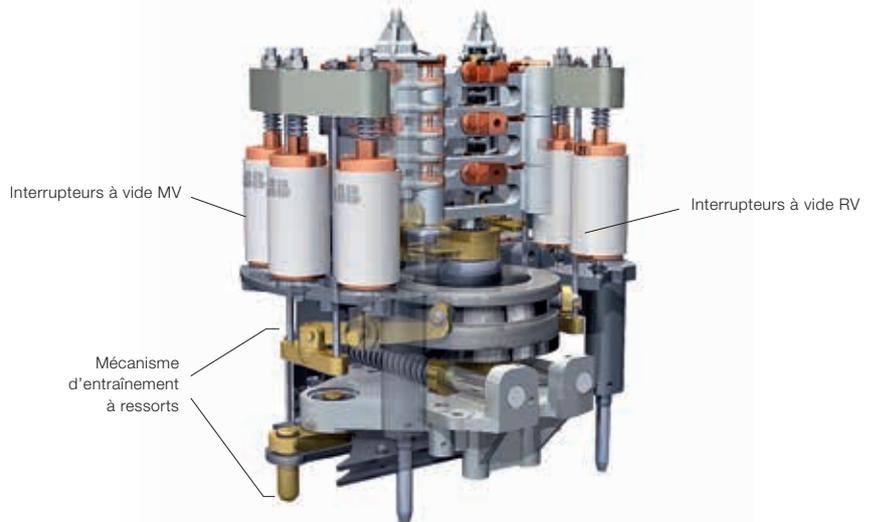
Le VUCG, lancé en 2008, facilite le passage de la technologie traditionnelle à la coupure dans le vide → 1. En parallèle, ABB s'efforce d'améliorer le matériau des contacts. En 2009, l'appareil exécute 600 000 manœuvres lors d'un essai d'endurance électrique. L'année suivante, ABB conçoit et fabrique le premier circuit d'essai synthétique pour changeurs de prises sous vide, point de départ de longues campagnes de tests à haute puissance.

Après les modèles VUCL et VUBB en 2012, ABB commercialise depuis 2016 le changeur de prises en charge le plus performant au monde: le VUCG 1800. La famille de changeurs de prises sous vide comprend aussi le VRLTC, dispositif à réactance développé par ABB pour le marché américain.

**Le VUGG, commercialisé en 2008, a facilité le passage à la technologie de la coupure dans le vide.**

# L'utilisation de chambres de coupure en parallèle pour applications monophasées allonge notablement la durée de vie des contacts.

## 2 Principaux éléments du commutateur



### Caractéristiques fonctionnelles

Le changeur de prises remplit une double fonction : sélectionner la prise d'un enroulement de réglage et commuter la charge entre les prises de cet enroulement. Deux conceptions sont envisagées :

- Changeur de prises à *sélecteur* : il combine la sélection, la conduction et la commutation du courant dans un seul compartiment. Son nombre réduit de pièces en fait un dispositif très compact, mais les contraintes inhérentes à sa conception empêchent de l'utiliser sur des transformateurs de puissance et de tension assignées normalement supérieures à 100 MVA/145 kV. Le VUBB en est un exemple ;
- Changeur de prises à *commutateur* : le dispositif de commutation de charge est ici séparé du sélecteur. Utilisé dans une foule d'applications, c'est le seul type de changeur de prises adapté aux applications de haute tension/puissance. Les appareils VUCG et VUCL en font partie.

Dans un changeur de prises à commutateur, seul ce dispositif, qui gère la puissance de commutation, utilise des interrupteurs à vide ; la partie sélecteur est identique à celle d'un appareil classique.

Le commutateur → 2 possède deux jeux d'interrupteurs à vide (MV/RV) et deux jeux de contacts auxiliaires rotatifs. Le mécanisme à ressorts convertit le mouvement

lent de l'entraînement motorisé en un mouvement rapide pour la commutation des contacts et assure la synchronisation requise. L'énergie accumulée dans les ressorts garantit l'achèvement du cycle de commutation même en cas de défaut d'alimentation électrique. Le mécanisme à ressorts est toujours aligné dans le même sens, quelle que soit la commande émise (augmentation ou baisse). Il en résulte une séquence de commutation rigoureusement identique et une moindre sollicitation des contacts.

L'élément principal du changeur de prises, l'interrupteur à vide, a fait la preuve de sa fiabilité optimale depuis plus de 40 ans dans des millions d'appareils. Toutefois, dans le cas improbable d'une défaillance, le système de contacts auxiliaires est conçu pour effectuer lui-même un certain nombre de réglages de prises et déclencher une alarme par relais de protection.

### Champion du monde

Après plus d'un siècle d'innovation dans le domaine des changeurs de prises, ABB poursuit sur sa lancée avec le VUCG 1800. Destiné aux transformateurs de forte puissance, il permet de changer de rapport de transformation sans devoir forcer la division du courant. L'utilisation de chambres de coupure sous vide en parallèle pour applications monophasées diminue notablement la détérioration des contacts, même en cas

de niveaux élevés d'intensité et de tension d'échelon : le courant de coupure traversant trois chambres au lieu d'une, l'usure est répartie plus équitablement entre les contacts. Ce nouveau changeur de prises utilise les interrupteurs à vide de ses prédécesseurs, offrant les mêmes garanties de qualité et de longévité que les autres appareils de la gamme ABB.

Prochaine révolution annoncée : la commutation à électronique de puissance, déjà à l'œuvre dans une installation pilote. Comme pour la coupure dans le vide, cette technologie finira par s'imposer dans les changeurs de prises en charge.

**Lars Jonsson**

**Magnus Backman**

ABB Corporate Research

Västerås (Suède)

[lars.e.jonsson@se.abb.com](mailto:lars.e.jonsson@se.abb.com)

[magnus.backman@se.abb.com](mailto:magnus.backman@se.abb.com)

**Petter Nilsson**

ABB Power Grids, Transformers

Ludvika (Suède)

[petter.nilsson@se.abb.com](mailto:petter.nilsson@se.abb.com)

Transformation tous azimuts

# La recherche fondamentale au secours des transformateurs convertisseurs CCHT

JOACHIM SCHIESSLING, OLOF HJORTSTAM, MATS BERGLUND – Le transformateur convertisseur, connecté entre la valve du convertisseur et le réseau à courant alternatif (CA), est une pièce maîtresse du transport en courant continu à très haute tension (CCTHT). Une connaissance approfondie des matériaux et des processus physiques en jeu dans l'isolant soumis à des contraintes CC est indispensable pour concevoir une isolation électrique à la fois robuste, performante et peu coûteuse.

La vocation première du transformateur convertisseur d'une station CCHT est de convertir la tension fournie par le réseau CA en une tension exploitable côté CA de la valve du convertisseur. L'isolant électrique d'un transformateur convertisseur a la particularité de devoir résister à des contraintes CC et CA combinées, à la différence de celui d'un transformateur de puissance ordinaire. Le paramètre déterminant de la répartition du champ électrique est la permittivité du matériau côté CA, et sa résistivité côté CC. La permittivité et la résistivité du papier et de l'huile diffèrent respectivement d'un facteur de 2 et de 100 ; le transformateur convertisseur doit donc avoir une isolation plus robuste.

Le comportement CC de l'isolant est largement déterminé par ces paramètres qui évoluent dans le temps, notamment la résistivité de l'huile, sous l'effet des contraintes électriques appliquées, de la température, de la durée de mise sous tension, de l'hygrométrie, etc. De plus,

## La migration ionique dans un champ CC engendre des charges d'espace qui jouent beaucoup sur la répartition du champ électrique.

la migration ionique dans le champ CC génère des charges d'espace aux interfaces de l'isolant, qui ont un impact non négligeable sur la répartition du champ électrique.

Dans ces conditions, une compréhension approfondie des phénomènes physiques en présence et une connaissance

fine des matériaux sont indispensables pour concevoir une isolation CC endurante et économique. L'usage est de s'appuyer sur des calculs simplifiés à partir d'un circuit RC équivalent → 3a. Toutefois, cette méthode ne tient pas compte, entre autres, de l'accumulation des charges d'espace ni du comportement résistif complexe de l'huile.

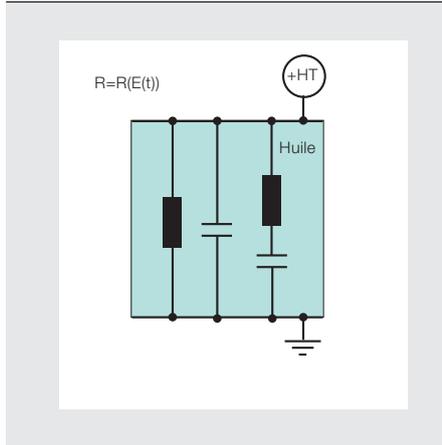
Dans les années 1980, les études sur les propriétés CC de l'isolation électrique, menées au centre de recherche ASEA à Västerås (Suède), ont abouti à un modèle tenant compte de la génération et de la dérive ioniques. Après validation expérimentale, celui-ci fut intégré à un outil de simulation. Ces connaissances ont permis de développer des solutions techniques originales.

### Modèle de dérive ionique pour isolation huile-papier

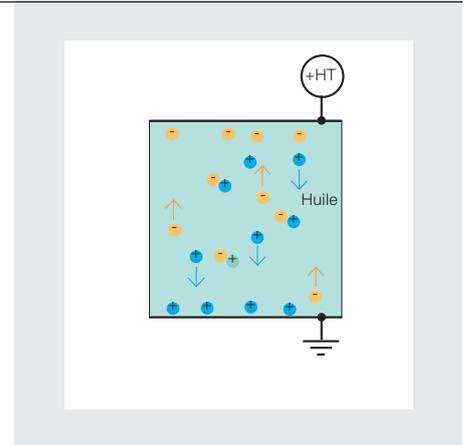
La résistivité d'un fluide diélectrique de transformateur (huile minérale, par exemple) n'est pas une propriété intrinsèque ni bien caractérisée du matériau.

Le comportement non linéaire des fluides diélectriques complique la prédiction de la répartition du champ électrique avec les modèles résistifs traditionnels.

### 3 Deux méthodes de simulation d'un système isolant CC



3a Circuit équivalent RC



3b Modèle de dérive ionique

### 4 Calcul de la densité ionique dans un fluide diélectrique en fonction du temps

#### Modèle de dérive ionique

Équations de continuité pour la concentration des ions positifs (p) et négatifs (n) :

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\mu_p \bar{E} p - D_p \nabla p) = S$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} - \nabla \cdot (\mu_n \bar{E} n - D_n \nabla n) = S$$

$\mu_n, \mu_p, D_n$  et  $D_p$  représentant la mobilité électrique et les constantes de diffusion des ions négatifs et positifs.

Terme source incluant la génération et la recombinaison des ions :

$$S = K_B^0 c F(E) - K_R p n$$

$F(E)$  étant le facteur d'Onsager de contribution au taux de génération ionique en fonction du champ.

Équation de Poisson incluant les charges d'espace (p-n) :

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \epsilon_r \bar{E}) = q(p - n)$$

$\epsilon_0$  étant la constante diélectrique, et  $\epsilon_r$ , la constante diélectrique relative.

La résistivité apparente est déterminée par la concentration d'ions libres et leur mobilité électrique. Exposés à un champ électrique, les ions libres se déplacent le long de ce champ, si bien que certaines zones du fluide s'appauvrissent en ions, d'où une moindre résistivité. Autrement dit, la résistivité apparente diminue avec la durée d'application des contraintes électriques dans l'huile.

Ce comportement non linéaire de l'isolant explique la difficulté à prévoir,

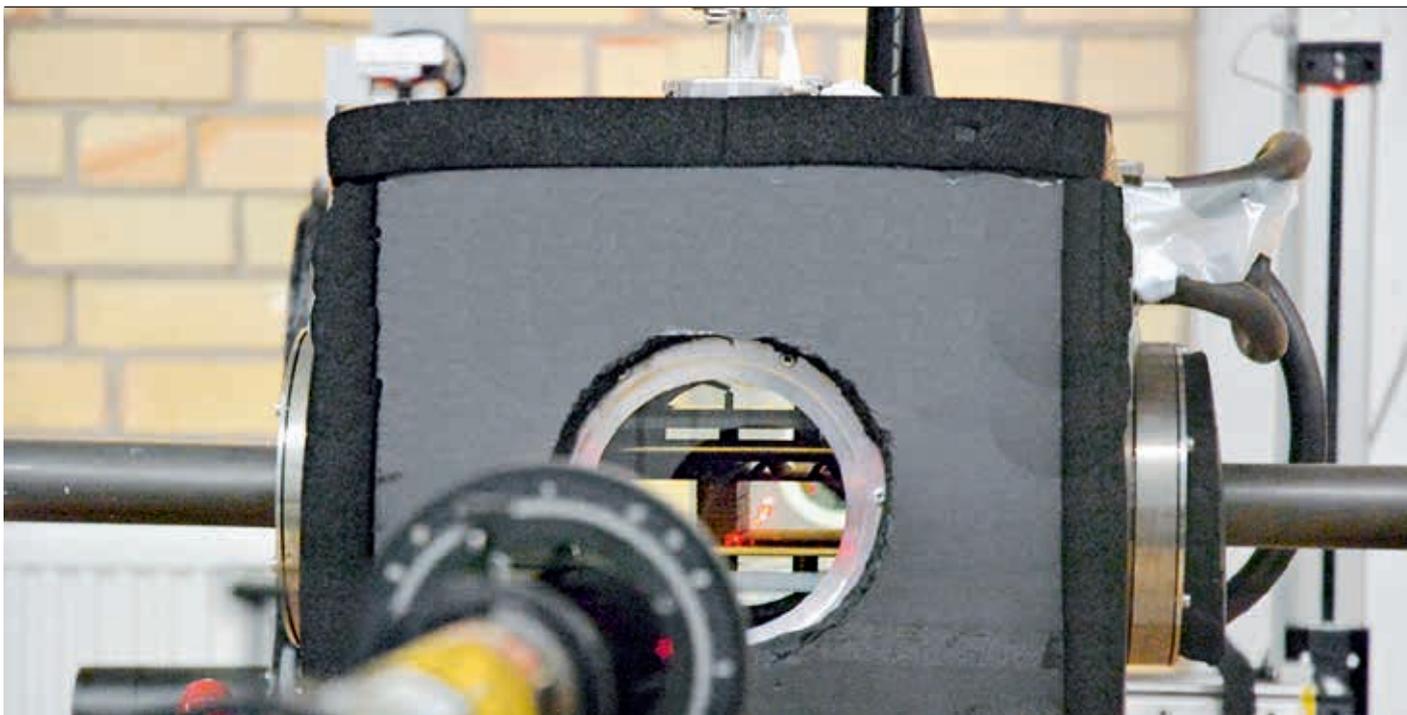
avec les modèles résistifs traditionnels, la répartition du champ électrique dans l'huile soumise à des contraintes CC.

Aussi les chercheurs d'ASEA ont-ils proposé dans les années 1980 un autre modèle, la dérive ionique [1], qui utilise des équations de transport pour calculer l'évolution dans le temps de la densité ionique du fluide diélectrique → 3b. À partir

**Le système de détection haute sensibilité d'ABB utilise l'effet Kerr électro-optique pour mesurer les contraintes électriques directement dans l'huile.**

de la différence de densité entre ions positifs et négatifs, il est possible de calculer le champ électrique en fonction du

## 5 Montage expérimental pour la mesure par effet Kerr



Les outils et simulations ABB ont permis de développer en un temps record un prototype de transformateur convertisseur de 1100 kV CC.

temps pour chaque point du système. On le voit en → 4, résoudre ces équations en trois dimensions pour une multitude de points est une opération gourmande en puissance de calcul. Toutefois, les ordinateurs d'aujourd'hui, associés à des méthodes numériques optimisées, sont capables d'utiliser le modèle de dérive ionique pour concevoir les éléments clés du système d'isolation d'un transformateur convertisseur.

#### Mesure de champs électriques sous contraintes CC dans l'huile

Le modèle de dérive ionique devait être validé par des mesures expérimentales.

C'est pourquoi le laboratoire du centre de recherche ABB à Västerås a mis au point un système de détection haute sensibilité pour mesurer les contraintes électriques directement dans l'huile minérale. Il utilise l'effet Kerr électro-optique qui, en modifiant la biréfringence d'un rayon lumineux à travers un fluide diélectrique placé dans un champ électrostatique → 5, donne la direction, l'amplitude et l'évolution temporelle des champs électriques.

Comme prévu, les résultats obtenus concordent avec les prédictions du modèle de dérive ionique, alors qu'ils divergent fortement de celles des modèles résistifs.

L'effet Kerr et le modèle de dérive ionique, inaugurés pour la liaison CCHT d'Itaipu au Brésil (1984), se sont avérés indispensables au développement continu des systèmes d'isolation de transformateurs convertisseurs. C'est grâce à ces outils et aux simulations qu'ABB a pu développer un prototype d'appareil de 1100 kV CC en un temps record. Associés à une compréhension approfondie du phénomène, ils ont largement contribué à faire d'ABB le chef de file du CCHT et de la technologie des transformateurs convertisseurs.

Les résultats obtenus avec la méthode Kerr concordent avec les prédictions du modèle de dérive ionique.

**Joachim Schiessling**

**Olof Hjortstam**

ABB Corporate Research

Västerås (Suède)

joachim.schiessling@se.abb.com

olof.hjortstam@se.abb.com

**Mats Berglund**

ABB Power Grids, Transformers

Ludvika (Suède)

mats.g.berglund@se.abb.com

#### Bibliographie

- [1] Gäfvert, U., *et al.*, «Electrical field distribution in transformer oil», *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 27, n° 3, p. 647, 1992.

# Microréseaux

Pour une énergie propre, fiable et bon marché

**TILO BUEHLER, RITWIK MAJUMDER – L'esprit ou la force, la tête et les jambes... À quoi donc tient la performance? Une question que les abonnés aux réseaux électriques n'ont jusqu'ici guère eu le choix de se poser: loin des centrales d'énergie et des dispatchings, il leur était impossible de contrôler la provenance de l'électricité ou son coût. Mais aujourd'hui la production n'est plus l'apanage des mégacentrales: le solaire en toiture et d'autres formes d'énergie décentralisée érodent la distinction entre producteurs et consommateurs. À ce puissant levier d'action s'ajoutent des doses croissantes d'intelligence embarquée et des interrupteurs entièrement commandables qui permettent de déporter les décisions de conduite du réseau. Les grands comptes (sites hospitaliers, industriels, etc.) ont désormais la maîtrise de leurs infrastructures, de leurs consommations et de leurs émissions.**

Les réseaux d'énergie connaissent une révolution sans précédent depuis l'émergence de la distribution électrique: la part croissante de la production locale bouscule leur mode de gestion.

Disposer de sa propre alimentation de secours (groupes électrogènes le plus souvent) pour parer à une coupure de courant sur le réseau de distribution n'est pas nouveau pour des sites comme les hôpitaux et les usines. Ces dernières années, cette autonomie énergétique a souvent été renforcée par l'installation de cellules photovoltaïques (PV), parfois couplées à un moyen de stockage par batteries. À la différence des générateurs diesel, qui ont avant tout vocation à sécuriser l'approvisionnement électrique, ces investissements supplémentaires doivent être exploités et rentabilisés au maximum; d'où l'importance d'une stratégie de déploiement optimal des capacités de production tant internes qu'externes.

Si les « microréseaux » → 1 revêtent une multitude de formes, à différentes échelles du territoire → 3, tous ont en commun

- un essaimage des sources de production et des charges;
- un contrôle-commande décentralisé;
- une capacité d'« îlotage », c'est-à-dire de fonctionnement en autonomie, découplé du réseau principal.

Installer un microréseau répond également à de multiples objectifs :

- Baisse des coûts;
- Diminution de l'empreinte écologique;
- Assurance de la fourniture en énergie.

---

## Des niveaux croissants d'intelligence embarquée autorisent le déport des décisions de conduite du réseau.

Ces microréseaux sont soit connectés au réseau principal (hôpitaux et usines, par exemple), soit totalement autonomes, notamment dans des sites reculés → 2. C'est le cas de l'île de Kodiak, au large de la côte méridionale de l'Alaska, où les 15 000 résidents, non raccordés au réseau continental, tirent quasiment 100 % de leur électricité des énergies

### 1 Question de terminologie

#### Un « microréseau » répond à plusieurs définitions.

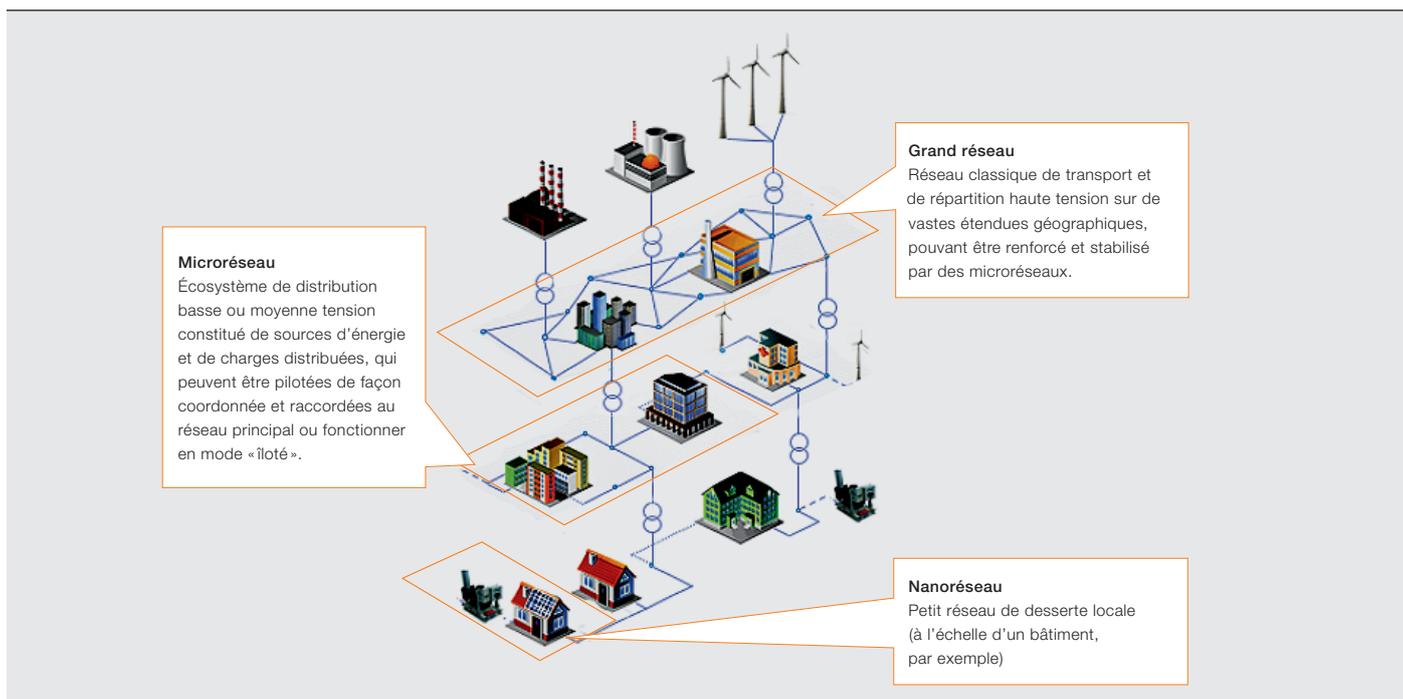
Pour le ministère américain de l'Énergie (*Microgrid Exchange Group*), il s'agit d'un groupe de ressources énergétiques distribuées et de charges interconnectées au sein d'un territoire électrique donné, qui se comporte comme une seule entité pilotable vis-à-vis du réseau principal, auquel il peut se connecter et se déconnecter pour s'« îloter ».

Le groupe de travail C6.22 du CIGRÉ (*Microgrid Evolution Roadmap*) le décrit comme un système de distribution électrique constitué de charges et de sources d'énergie diffuses (génératrices distribuées, dispositifs de stockage ou charges pilotables) pouvant être exploitées de manière coordonnée, qu'elles soient raccordées au réseau ou déconnectées (régime îloté).

### 2 Segments applicatifs et principaux moteurs de déploiement des microréseaux

		Moteurs de déploiement					
		Sociaux	Économiques	Environnementaux	Opérationnels		
		Accès à l'électricité	Économies d'énergie et d'argent	Réduction de l'empreinte carbone et de la pollution	Indépendance énergétique	Continuité de fourniture	
* Entreprise locale de distribution ✓ Premier plan (✓) Second plan	Segments Clients						
	Sites insulaires	ELD*		✓	✓	✓ (✓)	
	Sites reculés	ELD, initiatives gouvernementales, organismes de développement	✓	✓		✓	
	Industrie et tertiaire	Groupes miniers, ELD, pétrole et gaz, datacenters, chaînes hôtelières et sites de loisir, agroalimentaire			(✓)	✓	✓
	Défense	Institutions militaires		(✓)	(✓)	✓	✓
	Villes, écoquartiers	ELD			(✓)		✓
Établissements scolaires, campus	Organismes privés et publics, ELD		(✓)	✓		(✓)	

### 3 Question d'échelle



renouvelables (EnR). Un microréseau insulaire auquel ABB a contribué avec une solution innovante de stockage inertiel.

Reproduction à petite échelle du réseau public de distribution, le microréseau → 3 est soumis aux mêmes contraintes que son grand frère : sources de production diverses, profils de consommateurs différents et interconnexions multiples avec d'autres réseaux. Mais les différences sont également de taille : faible inertie,

forte pénétration EnR, électronique de puissance commandée, etc. Pour garantir l'approvisionnement énergétique, un contrôleur de microréseau doit équilibrer les ressources disponibles de manière sûre, fiable et économique.

Dans certains cas, les microréseaux peuvent servir à pallier la fiabilité du réseau principal. Pas question d'interrompre une opération chirurgicale ou de stopper sans prévenir une chaîne de

fabrication à cause d'une panne de courant ! Dans l'idéal (et sous réserve que le contrôleur en ait la faculté), un microréseau peut basculer sans encombre du mode interconnecté au mode îloté, déployant ainsi les moyens de production et de stockage disponibles tout en délestant au besoin les charges, et évitant le déclenchement des protections locales. De même, le contrôleur doit faciliter la reconnexion au réseau lorsque le courant est rétabli.

La production locale d'énergie est souvent renforcée par l'installation de cellules photovoltaïques, parfois couplées à un dispositif de stockage par batteries.

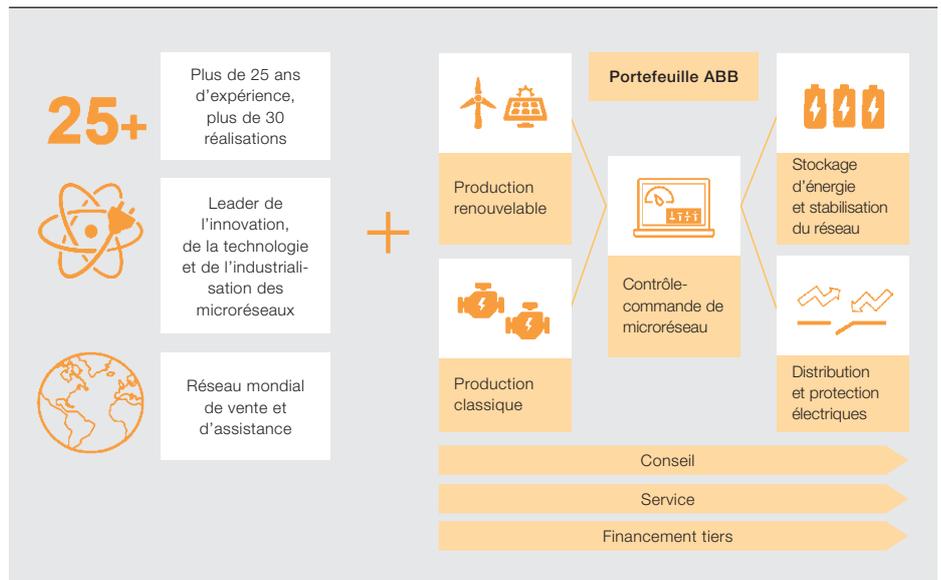
#### 4 De l'intention à l'action

ABB équipe actuellement ses installations de Longmeadow (Johannesburg) d'un microréseau solaire-diesel intégré. Ce site de 96 000 m<sup>2</sup>, qui emploie un millier de personnes, abrite le siège social du Groupe en Afrique du Sud, ainsi que son usine de fabrication d'appareillages moyenne tension et d'assemblage de tableaux de protection. Le déploiement ABB comprend des panneaux photovoltaïques (PV) en toiture et un système de stockage par batteries et de stabilisation du réseau PowerStore™

pour maximiser la production renouvelable et garantir la continuité de la fourniture en cas de panne sur le réseau de distribution et lors des passages du microréseau en fonctionnement îloté.

Ce sont ainsi une centrale PV de 750 kW et un système PowerStore de 1 MVA/380 kWh qui viendront en renfort des groupes diesel existants.

#### 5 ABB, fournisseur mondial de produits et solutions pour microréseaux



Avec plus de 25 ans d'expérience dans les microréseaux et plus de 30 réalisations à son actif → 4, ABB est un grand fournisseur mondial de produits, solutions et services pour toute la production électrique (insertion EnR, automatisation, stabilisation du réseau, stockage d'énergie, contrôle-commande intelligent, conseil) → 5. Une position renforcée par l'acquisition en 2011 de l'Australien Powercorp, spécialiste du domaine.

ABB a toujours été à la pointe de la recherche dans les systèmes de stockage, de stabilisation, de protection et d'interconnexion au réseau.

Son offre Microgrid Plus™ se compose de la plate-forme de contrôle-commande éponyme et du système de stockage d'énergie et de stabilisation par volants d'inertie ou batteries PowerStore™. Le contrôleur de microréseau calcule la configuration la plus économique pour

garantir un bon équilibre offre-demande de puissance, une pénétration maximisée de la production EnR (jusqu'à 100%), un réseau stable et un approvisionnement fiable.

La solution est complétée par une vaste palette de composants pour microréseaux (disjoncteurs Emax 2, onduleurs PV, etc.), de dispositifs de connexion et de services de conseil et d'assistance.

#### Tilo Buehler

ABB Power Grids  
Baden-Dättwil (Suisse)  
tilo.buehler@ch.abb.com

#### Ritwik Majumder

ABB Corporate Research  
Västerås (Suède)  
ritwik.majumder@se.abb.com

# Une bio du robot

## Petite histoire de la robotique industrielle

**TOMAS LAGERBERG, JAN JONSON – La naissance du premier robot électrique à Västerås (Suède), au début des années 1970, a marqué le début d’une nouvelle ère dans le monde de l’automatisation manufacturière. Voici l’histoire des robots industriels, des origines à nos jours, et l’évocation de leur avenir aussi exaltant que prometteur pour l’humanité.**

L’histoire du robot industriel débute en 1954, quand George Devol dépose le brevet du premier robot programmable par apprentissage. En 1956, il fonde avec Joseph Engelberger (surnommé plus tard « le père de la robotique industrielle ») la société Unimation, dont le premier robot, à actionneurs hydrauliques, est vendu à General Motors en 1961. En 1964, le géant de l’automobile n’en commande pas moins de 66, lançant ainsi véritablement l’activité d’Unimation. Svenska Metallverken est le premier industriel en Europe à accueillir un robot en 1967, à Upplands Väsby (Suède).

Flairant ce formidable potentiel, le PDG d’ASEA, Curt Nicolin, décide que son entreprise doit développer ses propres robots. Nous sommes à la genèse de la robotique industrielle. Durant l’été 1971, Nicolin demande à deux de ses plus brillants ingénieurs, Ove Kullborg et Curt Hansson, de se pencher sur de nouvelles méthodes de conception robotique. Car, à vrai dire, les robots Unimation sont alors des mastodontes bruyants qui

consomment énormément d’énergie et perdent beaucoup d’huile!

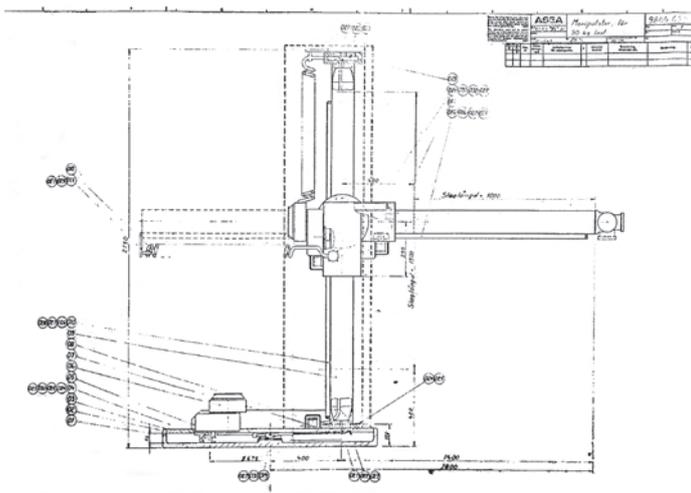
Les deux ingénieurs couchent sur le papier quelques idées... C’est ainsi que le premier « manipulateur » à cinq axes (le mot « robot » n’apparaissant sur les schémas qu’en 1972) voit le jour. Ses concepteurs l’ont doté d’un bras qui se

---

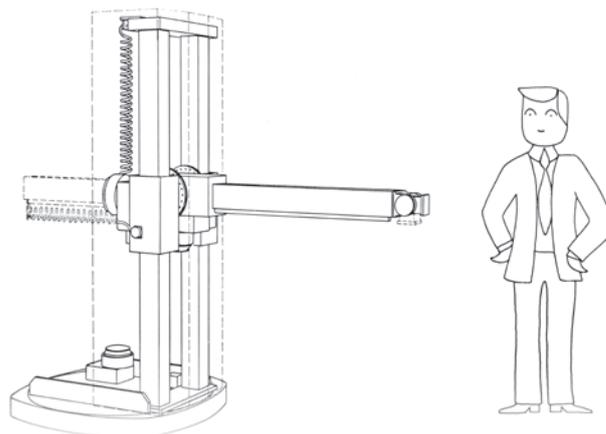
### L’entraînement électrique mis au point par l’équipe d’Ove Kullborg l’emporte sur son concurrent hydraulique.

déplace à la verticale et à l’horizontale, et tourne autour de sa base → 1,2.

En avril 1972, la direction d’ASEA décide de lancer un projet de développement robotique complet et nomme à sa tête Björn Weichbrodt, futur grand spécialiste du domaine. Un premier prototype est présenté à la direction en février 1973. Dès le début, le projet est global, de la conception mécanique et de l’électronique au marketing en passant par le développement applicatif. La conception mécanique est confiée à deux pointures du domaine, Ove Kullborg et Bengt



1a Exemple de dessin de conception



1b Hauteur initiale du robot ASEA : à peine plus de 2 m

Aujourd'hui, ABB commercialise une large gamme de robots industriels qu'il a vendus et installés à plus de 250 000 exemplaires.

Nilsson, chacun ayant la responsabilité d'une dizaine d'ingénieurs.

D'emblée se pose le choix fondamental du type de commande : pneumatique, hydraulique ou électrique ? Le pneumatique est écarté en raison du manque de rigidité de la chaîne cinématique, qui n'offre pas la précision ni la répétabilité souhaitées. Restent l'hydraulique (la règle dans les automatismes) et l'électrique (l'exception). Pour trancher, une compétition interne est organisée entre deux équipes, menées respectivement par Ove Kullborg et Björn Weichbrodt. Objectif ? Concevoir et construire les prototypes des trois axes inférieurs d'un entraînement électrohydraulique. Lors d'une confrontation des deux solutions, le système électrique de l'équipe Kullborg l'emporte haut la main.

Le choix de la conception de base du robot est également primordial. À l'occasion d'un séjour aux États-Unis, B. Weichbrodt a vu des prototypes de robots anthropomorphiques qui miment les mouvements du bras humain ; c'est selon lui la voie que doit suivre le futur robot d'ASEA.

Le troisième critère de choix concerne l'électronique et la méthode de programmation du robot. Très tôt, l'électronique de l'époque s'avère inadéquate en matière de souplesse de commande, de précision et de stabilité. Par chance, un membre de l'équipe ASEA lit un article sur un nouveau dispositif appelé « microprocesseur 8008 », mis au point par une

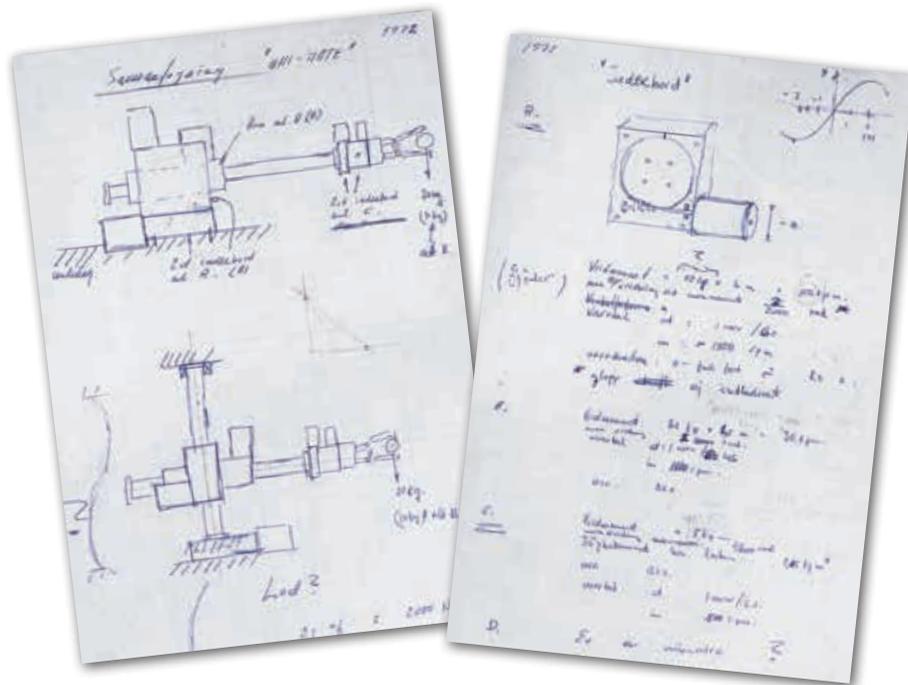
obscur entreprise californienne du nom d'Intel. Ce petit composant implanté dans l'électronique de commande peut intégrer toute la programmation du robot asservi. Certes, le manuel qu'Intel fait parvenir à ASEA est tapé à la machine, émaillé de corrections manuscrites et maintes fois photocopié, donc difficile à décrypter, mais cela suffit pour que l'équipe y trouve la réponse exacte à ses besoins.

Des prototypes de cartes sont câblées avec l'électronique, mais aucun microprocesseur n'est alors disponible pour tester la conception et le code. Weichbrodt finit par aller chercher lui-même chez Intel deux microprocesseurs. La démarche aboutit à la mise au point d'une commande électronique dernier cri, d'un boîtier de programmation rudimentaire et d'un simple écran-ligne.

Trois décisions capitales sont prises : le robot ASEA sera entièrement électrique, à structure anthropomorphique et commandé par microprocesseur. Autant de caractéristiques qui nous semblent évidentes aujourd'hui.

L'IRB 6 (pour *Industrial RoBot* et une capacité de charge de 6 kg) fait sensation dès ses débuts publics en octobre 1973, quand on le voit saisir des blocs de soupape et les disposer dans un ordre précis. Un petit atelier dans le sud de la Suède, Magnussons i Genarp, repère le potentiel du robot et en commande le tout premier exemplaire le

## 2 Premiers croquis du projet



31 décembre 1973, suivi de quatre autres en 1974, qui exécutent encore aujourd'hui la même tâche: polir des tubes en acier inox. ABB a racheté à l'entreprise il y a quelques années le premier IRB 6 pour en faire une pièce de musée.

Comme pour toute nouveauté, a fortiori révolutionnaire, la production en série tarde à décoller. Ce n'est qu'en 1978 que les volumes produits sont suffisamment importants pour qu'ASEA dégage des bénéfices de son activité robotique.

Faisons un grand bond en avant dans le temps. Nous voici en 2014 au *Capital Markets Day* d'ABB à Londres. Au-delà de la traditionnelle présentation des résultats financiers et orientations stratégiques, ABB dévoile en première mondiale le dernier-né de son offre de robotique réellement collaborative: le bien-nommé YuMi® (contraction de *you* et *me*).

L'idée même de YuMi remonte à 2006, quand ABB identifie un marché pour un robot capable, par exemple, de saisir les minuscules pièces d'un téléphone mobile ou de travailler dans les petits ateliers de micro-électronique en Chine. L'assemblage de ces composants est alors presque entièrement réalisé par des colonnes d'ouvriers en bordure de chaîne. Il était dès lors évident que le robot devait pouvoir travailler main dans la main avec l'opérateur, dans le même espace. Une idée visionnaire → 3 qui guidera l'équipe de développement tout au long du projet.

Parmi les critères décisifs de la conception robotique, citons l'électronique et la programmation.

**ASEA voulait un robot tout électrique, anthropomorphe et commandé par microprocesseur: des caractéristiques qui nous semblent évidentes aujourd'hui.**

La sécurité est la priorité des concepteurs. YuMi aura donc deux bras rembourrés pour absorber l'énergie en cas de choc, des articulations rondes et lisses, dénuées de zones de pincement, une capacité de charge limitée et une



## L'IRB 6 remporte un grand succès lors de sa première présentation publique en octobre 1973.

vitesse de rotation et un couple moteur réduits. Pour autant, Camilla Kullborg, une des conceptrices de la mécanique, comprend que cette sécurité intrinsèque ne suffit pas à rendre le robot sans danger pour l'homme; il doit aussi apparaître et être perçu comme tel. Une exigence qui a présidé au design initial de YuMi et à ce qu'il est aujourd'hui → 4. En 2011, Camilla et l'équipe de développement ABB reçoivent le prestigieux prix du design industriel *Red dot: best of the best*.

YuMi tient la vedette lors de son lancement commercial à la Foire de Hanovre 2015, marquant l'avènement d'une nouvelle ère robotique, celle des robots collaboratifs ou « cobots ».

Aujourd'hui, ABB commercialise une large gamme de robots industriels dont il a fourni et installé plus de 250 000 unités. Parmi ses grandes premières mondiales, citons le robot de soudage à l'arc, le robot de peinture tout électrique, le pupitre à « combinateur de mouvements » (*joystick*) pour la commande intuitive des axes, l'entraînement par moteurs à courant alternatif, la simulation *VirtualRobot™* sur PC, le langage de programmation évolué et les cellules robotisées modulaires. Que de chemin parcouru depuis le premier-né de Björn Weichbrodt, « père du robot électrique ».

Le marché de la robotique industrielle devrait connaître une forte croissance dans les prochaines années, avec des machines d'un genre entièrement nouveau: robots volants, nageurs, marcheurs, roulants, montés sur véhicules, micro-robots, exosquelettes décuplant la force humaine et cobots assistants, jusque dans l'espace.

Du haut de ses neuf ans, Agnes Kullborg, fille de Camilla et petite-fille d'Ove, a déjà son idée sur la question: « *Les robots sont très cools et ils aident les gens. Je pense que dans le futur, ils les aideront encore plus. J'aimerais travailler avec eux. Peut-être même en inventer. Un peu comme YuMi, qui a vraiment l'air sympa* ». Nul doute que la vérité sort de la bouche des enfants.

### **Tomas Lagerberg**

ABB Corporate Research  
Västerås (Suède)  
tomas.lagerberg@se.abb.com

### **Jan Jonson**

Ancien collaborateur ABB  
ABB Discrete Automation and Motion, Robotics  
Västerås (Suède)

# Brasse coulée

## ABB et le brassage électromagnétique : un flot d'innovations en continu

REBEI BEL FDHILA, ULF SAND, JAN-ERIK ERIKSSON, HONGLIANG YANG – Entre ABB et l'électromagnétisme dans l'industrie métallurgique, c'est une longue histoire jalonnée de dépôts de brevets et de personnalités de premier plan, à l'origine des innovations et des produits qui ont fait du Groupe un acteur majeur du marché. Partenaire de longue date des métallurgistes, ABB a su saisir les opportunités au vol pour développer des collaborations fructueuses avec ses clients et consolider sa position de numéro un de la technologie. Il s'appuie aujourd'hui sur ce prestigieux héritage pour poursuivre sa quête d'excellence et gagner de nouveaux marchés.

On doit l'invention du brasseur électromagnétique à Ludwig Dreyfus, un éminent collaborateur d'ASEA qui découvrit vers 1930 qu'un champ magnétique tournant ou glissant pouvait développer une force électrodynamique suffisante dans le métal en fusion pour générer un brassage efficace. Son brevet sur le brassage électromagnétique dans un four à arc électrique, déposé en 1937 en Suède → 1, signe l'acte de naissance de cette technologie. Toutes les autres applications en reprennent le principe.

### Installation

La première réalisation de brasseur électromagnétique date de 1947, en Suède. À l'époque, tant la fusion que l'affinage du métal se déroulaient dans un four à arc électrique. Le brasseur homogénéise la température du bain et accélère les réactions chimiques métal/laitier. Depuis, les brasseurs électromagnétiques se sont imposés par milliers dans de nombreux procédés métallurgiques comme la fusion (four à arc, four poche), la coulée continue de l'acier et la refusion de l'aluminium.

### Première mondiale

Dans les années 1960, les ingénieurs du roulementier SKF et d'ASEA mettent au point le premier four poche au monde pour résoudre le problème de basse qualité de l'acier produit dans les fours à

arc. Ce procédé ASEA-SKF, qui combine brassage électromagnétique, traitement sous vide, chauffage par arc électrique et purge par injection d'argon, marque l'avènement d'une nouvelle ère dans la production d'acier de haute qualité → 2. Entre 1968, date de la mise en production du premier four poche chez SKF Hällefors en Suède, et 1990, quelque 70 fours supplémentaires furent installés.

Si le four ASEA-SKF fut par la suite détrôné par des procédés d'affinage plus modernes, le brassage électromagnétique en poche demeure incontournable pour produire efficacement de l'acier de qualité commerciale ou fortement allié [1]. On dénombre aujourd'hui environ 140 brasseurs électromagnétiques utilisés par divers procédés d'affinage.

### Freinage électromagnétique

Dès 1970, le brassage électromagnétique fut appliqué à la coulée de blooms et de billettes pour en améliorer les qualités métallurgiques (uniformisation de la structure et état de surface). Dix ans plus tard, ASEA et le Japonais Kawasaki Steel eurent l'idée d'ajouter un champ électromagnétique au procédé classique

de coulée de brames. Ce champ continu (CC), appliqué au flux puissant sortant de la busette d'injection immergée, réduit la vitesse du jet et stabilise les fluctuations fluidiques dans le moule → 3. La technologie, dénommée par la suite « freinage électromagnétique », s'épanouit dans la coulée de brames minces. Elle stabilise les fluctuations au niveau du

## Plus de la moitié des couleuses de brame minces dans le monde sont équipées du freinage électromagnétique ABB.

ménisque et réduit l'engorgement des poudres de coulée, deux paramètres cruciaux de la coulée à haute vitesse ; la brame est ainsi de bien meilleure qualité. Aujourd'hui, plus de 50 % des 70 couleuses de brames minces en service dans le monde sont équipées du freinage électromagnétique ABB.

### Régulation

Dans les années 1990, Kawasaki Steel (qui deviendra en 2002 JFE) et ABB mettent au point un procédé de régulation de la coulée de brames, baptisé *FC Mold (Flow Control Mold)*. FC Mold utilise deux champs magnétiques CC : un champ statique dans la partie basse de

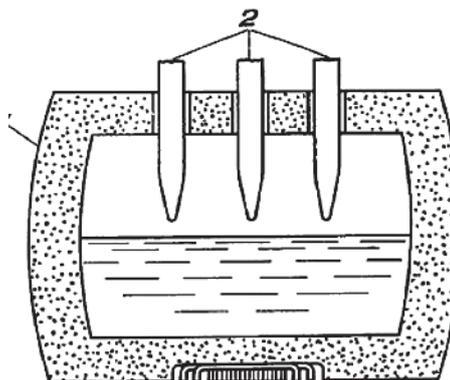
**PATENT N° 102334 SVERIGE** **KLASS 21: h: 18-10**  
 BESKRIVNING BEVILJAT DEN 19 JUNI 1941  
 OFFENTLIGGJORD AV KUNGL. GILTIGT FRÅN DEN 22 JAN. 1937  
 PATENT- OCH REGISTRERINGSVERKET PUBLICERAT DEN 19 AUGUSTI 1941  
 Ans. nr 281/1937. Hårtill en ritning.



**ALLMÄNNA SVENSKA ELEKTRISKA AKTIEBOLAGET, VÄSTERÅS.**  
 Omröringsanordning vid ugnar för metallurgiska ändamål.  
 (Uppfinnare: L. Dreyfus.)

Det är bekant att vid s. k. virvelströmsugnar, d. v. s. ugnar vid vilka den huvudsakliga värmetillförseln till chargen sker genom i densamma inducerade elektriska virvelströmmar, vanligen av hög frekvens, åstadkomma en elektrodynamisk omröring av chargen eller löset i syfte att påskynda där förlöpande reaktioner. I de ändamålsenliga formerna av de

i huvudsak kring en horisontal axel, så att nya delar av detsamma oppbörigt komma upp till ytan samt där utsätts för uppvärmning resp. reaktioner. Samtidigt hålles periodalet av strömmen i omröringslinningen väsentligt lågre än ligeta kommersiella periodal, varigenom effekten i nämnda linsning hålles låg. Någon nämnvärd uppvärmning avses såväl i linsning



## Le FC Mold G3 est à la pointe de la régulation des écoulements dans la coulée de brames.

la coulée et un autre en partie haute, ce qui stabilise les fluctuations au ménisque et permet de mieux réguler l'écoulement. Kawasaki Steel put ainsi accroître la vitesse de coulée et améliorer la structure et l'état de surface de la brame. Aujourd'hui, plus de 70 lignes de coulée de brames sont équipées de la technologie FC Mold.

### FC Mold G3

La décennie suivante voit le développement de la troisième génération de FC Mold (*FC Mold G3*) pour répondre à l'évolution de la demande sur le marché. Le procédé FC Mold G3 ajoute un champ magnétique mobile, de même sens que le champ magnétique supérieur du *FC Mold II*. Il se synchronise avec le champ magnétique CA, qui assure une vitesse au ménisque optimale dans la quasi-totalité des conditions de coulée → 4. Il s'agit du plus performant régulateur de débit pour couleuses de brames. En 2016, ABB s'apprête à commercialiser sa solution inédite de mesure de température *OptiMold Monitor* pour affiner la connaissance du procédé de coulée continue. Combinée au FC Mold, cette technologie permet de réguler le procédé en temps réel, améliorant encore la qualité du produit final.

### Refusion d'aluminium

Dans les années 1960, ASEA met au point un brasseur électromagnétique destiné aux fours de refusion d'aluminium. Malgré des résultats probants en termes d'économies d'énergie et de hausses de rendement et de productivité,

les industriels ne s'y intéressent vraiment qu'à partir de 1990, lorsque ces critères prennent de l'importance. ABB commercialise alors une gamme de brasseurs électromagnétiques couvrant tous les types et tailles de fours → 5. En utilisation normale, le brasseur permet de réduire la consommation énergétique de 10 % et d'augmenter la productivité de 25 % ! Aujourd'hui, on compte plus de 200 brasseurs ABB installés dans le monde.

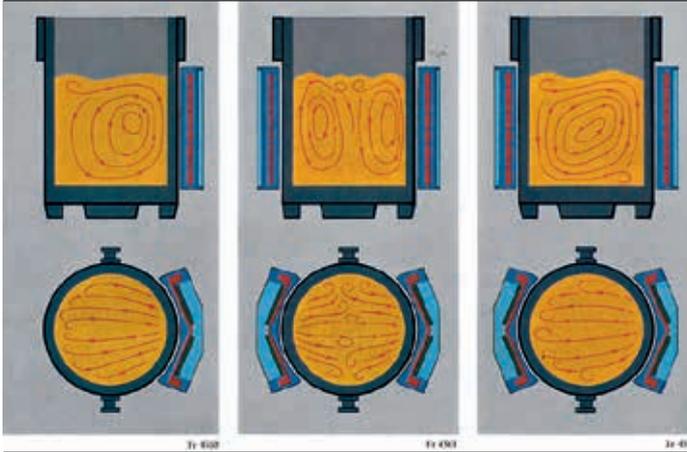
### ArcSave®

En 35 ans, le four à arc s'est progressivement transformé en une simple cuve assurant une fusion rapide au prix d'une consommation énergétique élevée. Au début des années 2000, ABB développe un nouveau brasseur électromagnétique de capacité nettement supérieure. Breveté quelque temps plus tard, puis commercialisé sous le nom d'*ArcSave*, il fut installé sur un four à arc moderne dont le client put apprécier, entre autres, les économies d'énergie et d'alliage de même que le rendement de production.

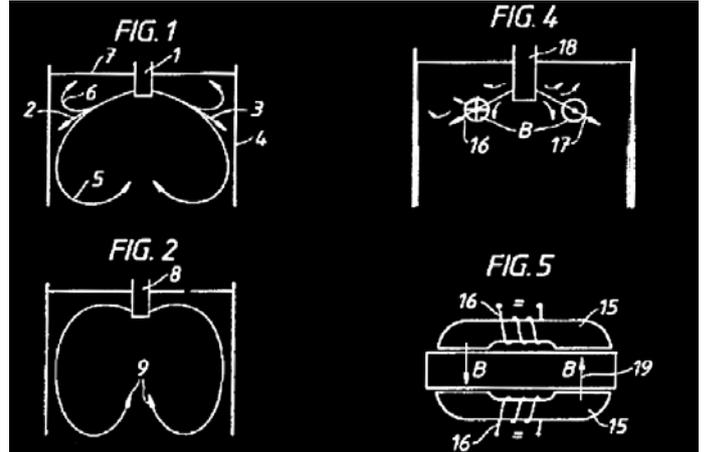
### Une chaîne d'innovations ininterrompue

De nombreux collaborateurs ABB ont, dans la lignée de L. Dreyfus, vraiment fait progresser le secteur. Citons par exemple :  
 – Yngve Sundberg (années 1950–1980) développa toute une théorie de calcul et de conception des fours électriques et des brasseurs électromagnétiques. Avec ses collègues d'ASEA, il est à l'origine d'au moins six brevets et d'un ouvrage [2] qui fait toujours autorité ;

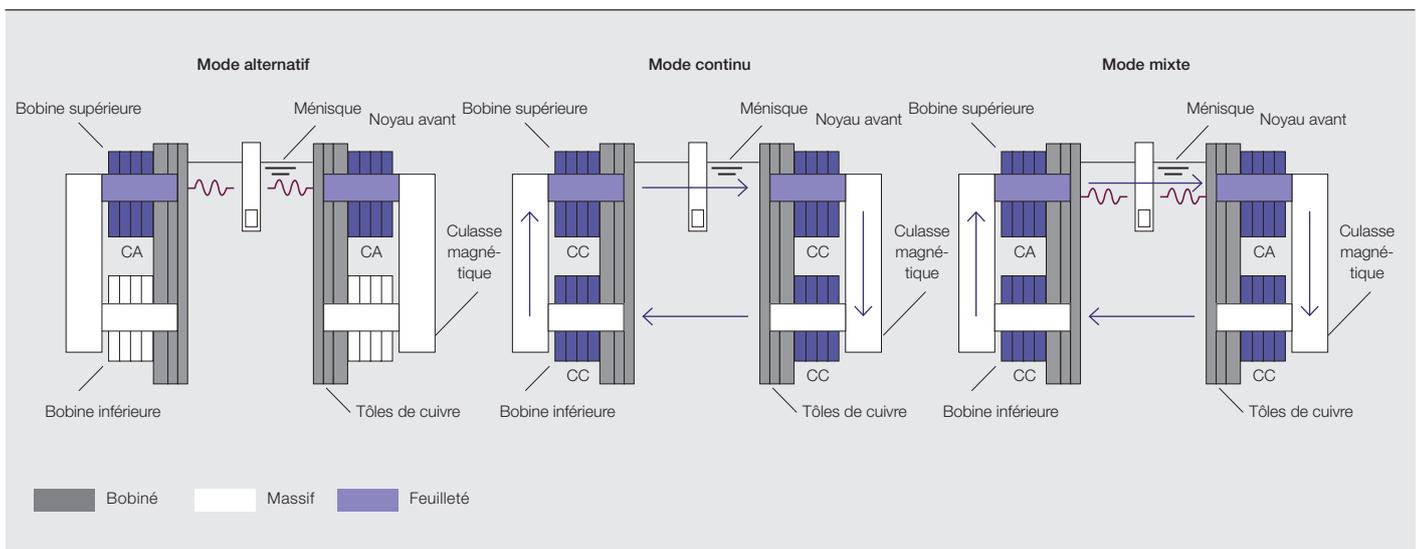
## 2 Croquis représentant les différents modes de brassage au début du procédé ASEA-SKF



## 3 Premier brevet sur le freinage électromagnétique appliqué à la coulée de brames



## 4 Modes de fonctionnement du FC Mold G3



Depuis 20 ans, la collaboration s'est renforcée avec la recherche ABB pour faire progresser les techniques de mesure et de simulation.

- Sten Kollberg (années 1980–1990) se concentra sur les problèmes de coulée rencontrés par les clients, ouvrant la voie au développement du freinage électromagnétique et du FC Mold. Son honnêteté et son sens

des relations humaines lui valurent le profond respect de ses collègues ;

- À peu près à la même époque chez ASEA, Göte Tallbäck fut le premier à tenir compte des phénomènes magnétohydrodynamiques en métallurgie. Son article sur la simulation numérique du freinage électromagnétique, publié il y a 30 ans, est toujours d'actualité. Entre 2000 et 2010, il déposa avec ses collègues quatre brevets sur le brassage électromagnétique ;
- Jan-Erik Eriksson, collaborateur d'ABB depuis 1980, fut un artisan majeur du FC Mold, notamment de dernière génération, et du freinage électromagnétique, en partenariat avec des industriels japonais. Il partage 25 brevets avec ses collègues ABB ;



– Rebei Bel Fdhila, qui a rejoint le centre de recherche ABB en 1995, complète les connaissances métier de ses coéquipiers par son expertise en modélisation. Ensemble, ils aident ABB à redéfinir ses capacités de modélisation, de simulation et de conception pour innover dans le brassage électromagnétique et conforter sa position sur le marché.

Sous l'impulsion de Rebei Bel Fdhila et de Jan-Erik Eriksson, la collaboration s'est resserrée avec le centre de recherche ABB ces 20 dernières années, donnant naissance à des techniques avancées de mesure (notamment par laser) et de simulation en dynamique des fluides. Grâce à sa connaissance approfondie des procédés métallurgiques, de la coulée continue, de l'électromagnétisme et des phénomènes sous-jacents complexes liés aux écoulements multiphasiques (fortes interactions entre métal liquide, argon et particules), l'équipe ABB a réussi à améliorer et à moderniser le brassage électromagnétique pour conquérir de nouveaux marchés.

### Exigences de développement

Efficacité énergétique, productivité et qualité sont les principaux axes du développement durable en métallurgie. Le freinage et le brassage électromagnétiques sont appelés à y jouer un grand rôle. ArcSave, la dernière génération de FC Mold et OptiMold Monitor, pour

ne citer qu'eux, symbolisent l'infatigable soif d'innovation d'ABB, sa compréhension fine du marché et sa dynamique de progrès. L'émergence de l'Internet des objets, des services et des personnes (IoTSP) fera naître de nouvelles attentes au sein des clients métallurgistes. ABB y répondra par des produits qui ne se contenteront pas d'accroître la fiabilité, la sécurité, la rentabilité et la qualité, mais offriront également plus de facilité d'utilisation, de capacité de mesure et d'analyse tout en dopant les performances du procédé. Fier de collaborer avec la quasi-totalité des grands aciéristes du monde, ABB veut demeurer à l'avant-garde de l'innovation dans l'électromagnétisme au service de la métallurgie.

#### Rebei Bel Fdhila

##### Ulf Sand

ABB Corporate Research  
Västerås (Suède)  
rebei.bel\_fdhila@se.abb.com  
ulf.sand@se.abb.com

#### Jan-Erik Eriksson

##### Hongliang Yang

ABB Process Automation, Metallurgy  
Västerås (Suède)  
jan-erik.a.eriksson@se.abb.com  
hongliang.yang@se.abb.com

#### Bibliographie

- [1] Sundberg, Y., « Principles of the induction stirrer », *ASEA Journal*, 44 (4), p. 71–80, 1971.
- [2] Sundberg, Y., *Electric furnaces and induction stirrers*, rapport interne d'ASEA, Västerås (Suède), 1979.

# Mining 2.0

## Le nouveau filon de la mine

**JAN NYQVIST – Loin des yeux, loin du cœur ... la devise n'est assurément pas celle des compagnies minières amenées à exploiter des sites reculés, ni même d'ABB! Quiconque évolue dans ce milieu se reconnaîtra davantage dans l'initiative « Mining 2.0 » d'ABB qui vise à automatiser toute la chaîne de valeur de l'industrie minière souterraine, aujourd'hui en pleine mutation. Son ambition ? Créer une usine minéralurgique unifiée et intégrée (concept *Ore Factory*) → 1, en appliquant les méthodes du contrôle-commande continu aux opérations manufacturières de la mine. Une approche à l'origine inédite, reprise et portée aujourd'hui par tous les acteurs du monde minier.**

L'exploitation minière est une filière industrielle essentielle pour notre bien-être et notre prospérité, qui revêt souvent une dimension économique stratégique dans certaines régions du monde. On dénombre aujourd'hui quelque 10 000 mines souterraines. Pour sa part, ABB se focalise sur le marché des minerais métalliques comme le fer, le cuivre, le nickel, l'or, l'argent, le zinc et le plomb.

### État des lieux

Confrontée à la dégringolade des cours des matières premières (30 à 50 %, voire plus pour le fer), l'industrie extractive a dû reporter ou abandonner un grand nombre de projets nouveaux ou récents. Si la production est stimulée par la forte croissance des pays émergents, elle doit néanmoins explorer toujours plus loin et creuser toujours plus pour remonter des entrailles de la Terre des minerais de plus en plus pauvres, dont la teneur a parfois chuté de 50 %. Résultat, pour produire autant, il faut extraire beaucoup plus, de sites de moins en moins accessibles.

**Dans ce contexte, la mine a quatre grandes priorités :**

- La sécurité ;
- Le rendement productif ;
- L'écologie ;
- Le recrutement et le maintien des effectifs.

### L'activité a pour caractéristiques :

- un environnement difficile et risqué ;
- des sites étendus et des espaces confinés ;
- un grand nombre d'opérations non planifiées ;
- une forte proportion de main-d'œuvre et d'équipements mobiles ;
- un faible taux d'engagement des équipements mobiles (20 à 25 %) ;
- une faible exploitation de mines à ciel ouvert (20 à 30 %) ;
- une visibilité temps réel limitée des opérations en cours.

### ABB et la mine

ABB possède un riche portefeuille de solutions techniques et commerciales pour faire de la mine une activité pérenne sur le marché mondialisé. Son initiative Mining 2.0 a marqué le coup d'envoi du déploiement des automatismes ABB dédiés à la mine.

Le concept englobe des solutions inédites, saluées par le géant britannique Anglo American et le groupe anglo-australien Rio Tinto, qui constate : « *Si nous avions bénéficié de ces innovations, nous aurions augmenté notre production de 10 à 20 %* ».

Ces technologies ont donné lieu à plusieurs offres applicatives ABB comme *Minelnsight™*, *Smart Ventilation* et *Integrated Mining Operations (IMO)*, dont certaines sont commercialisées, d'autres en développement.

Mining 2.0 est le fruit d'une collaboration ouverte et fructueuse entre l'activité Mine d'ABB et la recherche institutionnelle du Groupe, mais aussi de l'interaction avec ses clients et fournisseurs. La démarche a aussi bénéficié de projets académiques et financés par des organismes publics,

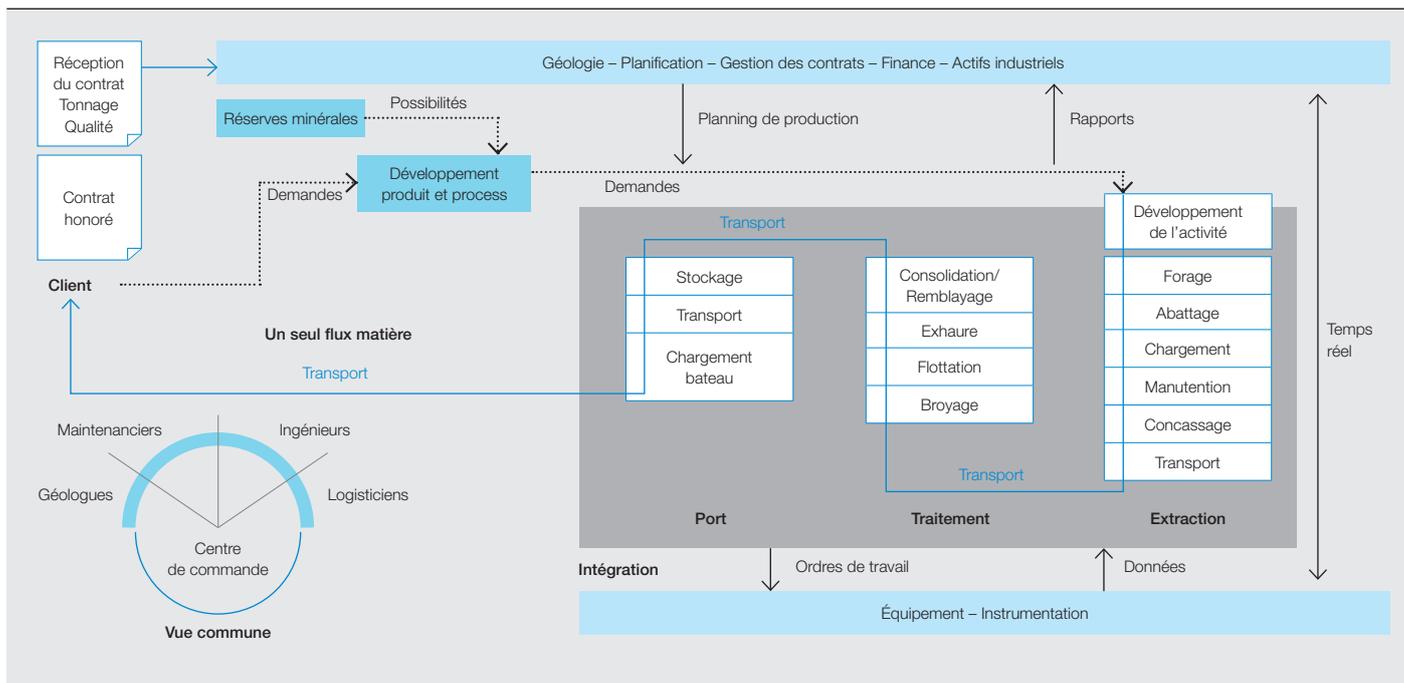
---

## Pour produire autant, il faut extraire beaucoup plus de minerai de sites de plus en plus difficiles.

comme les programmes *I<sup>2</sup>Mine (Innovative technologies and concepts for the intelligent deep mine of the future)* de la Commission européenne et *SMIFU (Sustainable Mine and Innovation for the Future)* du Nordic Rock Tech Centre.

### Challenges

Au départ, le projet entendait formuler clairement les problématiques de l'exploitation minière et leurs solutions. L'enjeu



« Impossible de continuer à construire des machines gigantesques ; il faut repenser l'activité minière. »  
(BHP Billiton)

était double : d'un côté, le monde minier connaissait ses difficultés et ses nouveaux défis, mais avait du mal à les exprimer ; de l'autre, ABB détenait les solutions mais peinait à les présenter d'une façon compréhensible.

L'objectif jusqu'à présent était d'augmenter la productivité et la capacité de production des machines pour mécaniser toujours plus les opérations et doper les rendements. Une recette qui a aujourd'hui atteint ses limites, de l'avis même du premier producteur mondial de matières premières, l'Anglo-australien BHP Billiton : « Nous ne pouvons pas continuer à construire des machines de plus en plus grosses ; il nous faut repenser toute l'activité ».

Plusieurs pistes de progrès sont apparues au fil du temps :

- *Nouvelles méthodes d'exploitation* pour produire davantage en continu → 2 ;
- *Machines autonomes* pour maximiser le temps de production et limiter d'autant les tâches improductives (changements d'équipe, arrêts techniques, ventilation de la mine après abattage à l'explosif, etc.) ;
- *Maintenance préventive des machines* pour améliorer leur taux d'engagement et réduire les arrêts intempestifs ;
- *Téléconduite centralisée* avec supervision par un opérateur de toutes les activités planifiées pour en

améliorer la coordination et réagir aux perturbations en temps réel. Cette délocalisation du pilotage de la mine réduit le personnel sur place et permet une gestion multisite à partir d'un même poste de commande.

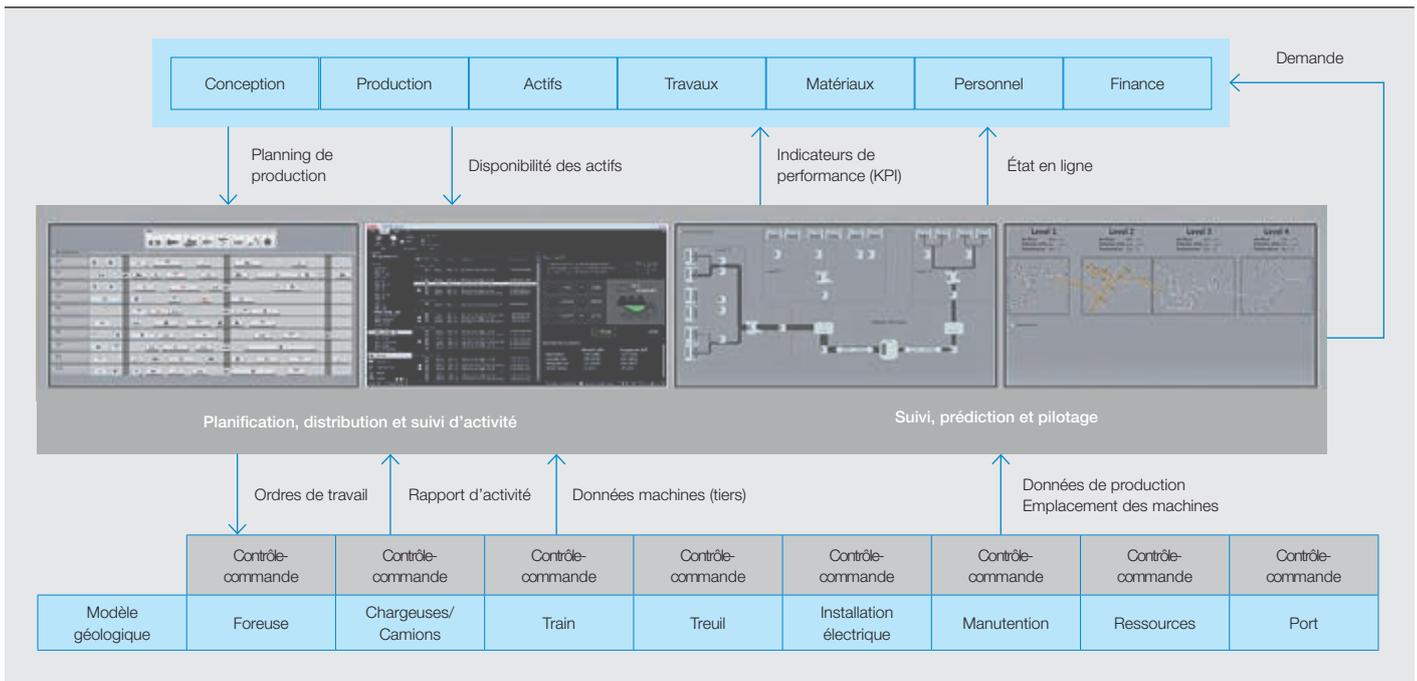
Rappelons qu'une exploitation minière de grande envergure peut aligner des centaines de machines et enregistrer des milliers d'événements à chaque changement d'équipe ;

- *Efficacité du transport* : écoulement stable du minerai → 3 pour éviter les incidents de parcours (silos ou cheminées vides), optimisation du remplissage des camions et des trains, et du fonctionnement du treuil ; les machines doivent être exploitées efficacement et n'être poussées aux limites qu'en cas de besoin.

### Technologies et méthodes

Les développements de Mining 2.0 ont englobé plusieurs domaines de recherche ABB (communication, expérience utilisateur, logiciel, instrumentation et contrôle-commande) et se sont fondés sur une vision globale du procédé, centrée sur l'utilisateur. Des démonstrateurs ont permis de visualiser et de tester différents concepts et scénarii. Dans la mesure du possible, les solutions ont été évaluées par des essais sur site.

## 2 Usine minéralurgique totalement intégrée



Une large palette de ressources techniques et humaines a été développée et mobilisée à cette fin :

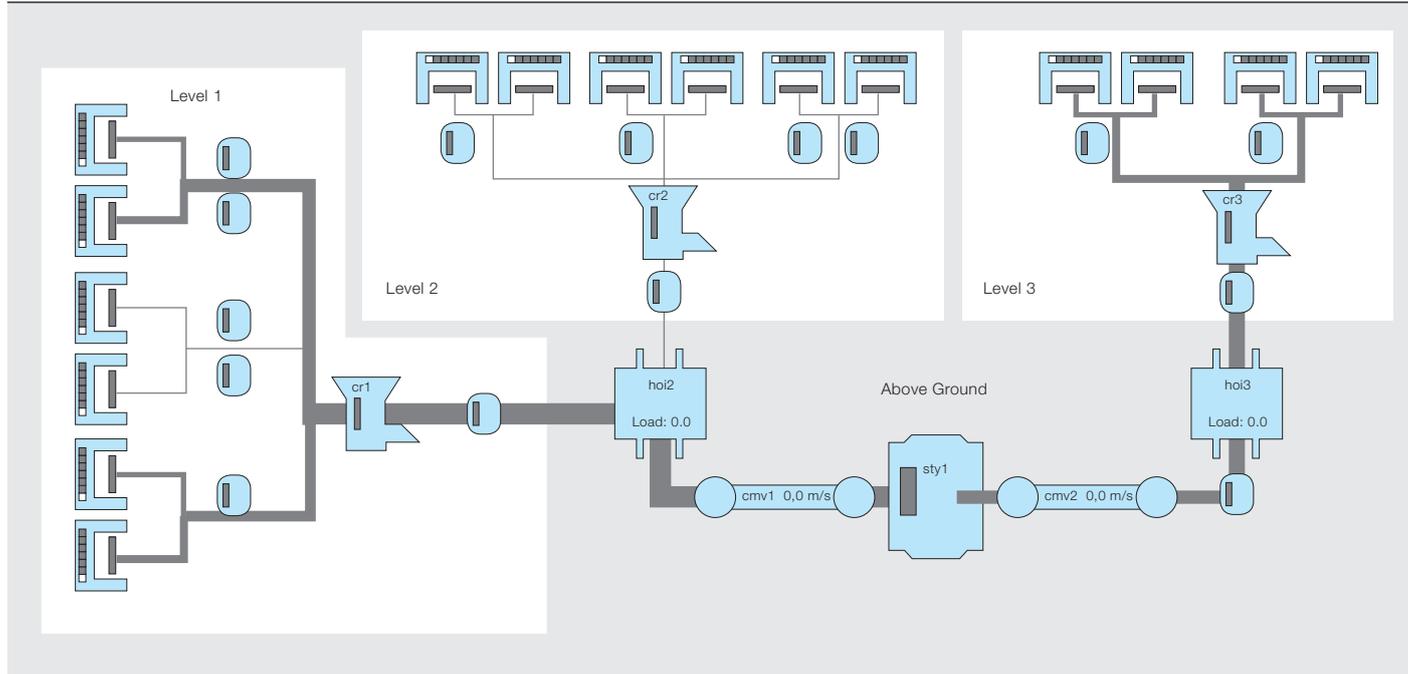
- *Enquêtes sur le terrain* : une équipe de deux à quatre personnes s'est rendue sur un site pour observer, interviewer et recueillir des informations sur le déroulement des opérations ; la démarche a jeté les bases des développements futurs ;
- *Modèles du domaine et architectes* pour décrire les opérations minières d'aujourd'hui et de demain ;
- *Description des ressources* (effectifs à l'œuvre) et des processus (déroulement des tâches) pour développer des solutions d'automatismes axées sur l'utilisateur ;
- *Visualisation* : plusieurs concepts ont été développés pour différentes solutions et divers scénarii → 4 ;
- *Essais de communication sans fil* pour appréhender les limites et les modalités d'installation de cette technologie sous terre, mais aussi tester la localisation des équipements ;
- *Contrôle-commande* : ventilation de la mine, gestion de l'eau, optimisation de l'ordonnancement, contrôle et suivi des flux matières ;
- *Optimisation de la maintenance* par des méthodes statistiques et analytiques basées sur la criticité des équipements.

### Solutions et produits

L'idée fondatrice du concept Ore Factory d'ABB était de transposer les fondamentaux du contrôle-commande de process (intégration verticale et horizontale, commande centralisée, exploitation des données à partir d'une seule source et accès temps réel aux données machines) dans l'environnement manufacturier de la mine. Il manquait à ce tableau l'intégration des engins mobiles par la mise en place d'un réseau de communication sans fil. Voyons les solutions développées à cet effet :

- *Optimisation de la stratégie de maintenance* avec la méthode analytique CRIM (*CRITICALITY-analysis-based Maintenance*) qui permet à l'exploitant d'étudier et de choisir, parmi les approches prédictive, préventive et non interventionniste (exploitation des équipements jusqu'à la défaillance), LA solution la plus performante et économique pour tous les actifs de la mine. L'optimisation CRIM se déroule en plusieurs étapes et commence par une analyse de criticité des équipements pour finir par une analyse du coût global de la démarche ;
- *Localisation du personnel* (par téléphone mobile) *et des machines* : un système de radio-identification permet de suivre à la trace les ressources engagées et de les visualiser sur une carte 3D de la

Dans une mine souterraine, la technologie prime. Les communications sans fil, par exemple, permettent la connexion temps réel avec tous les engins mobiles.



Intégration verticale et horizontale, commande centralisée, données monosources et accès temps réel aux données machines sont les éléments clés du contrôle-commande de procédé.

mine → 5. Pour les zones à risques, une fonction de géopérage, développée en partenariat avec la société Mobilaris et commercialisée sous l'appellation *ABB Mine Location Intelligence*, peut être intégrée au système. Au-delà de la sécurité, la fonction renforce la transparence du milieu minier : chacun connaît l'emplacement de chaque actif dans la mine ;

- *Optimisation de l'ordonnancement* à court terme de toutes les activités souterraines et *distribution en ligne des ordres de travail* aux opérateurs (solution ABB MineInsight). L'état d'avancement de chaque tâche peut être rapatrié en ligne. Cette rétroaction et l'optimiseur permettent d'automatiser l'ordonnancement à court terme. Le volet distribution de la solution est commercialisé, l'ordonnanceur étant prévu pour fin 2016. Bénéfice client : en cas d'imprévus, le temps nécessaire pour replanifier l'activité se compte en secondes, et non plus en heures. Il est alors possible de resserrer le calendrier, d'augmenter la production (de 10 à 20 % au vu des essais) et d'améliorer l'utilisation des ressources. On peut en permanence accéder à l'état d'avancement en temps réel et prédire la production ;

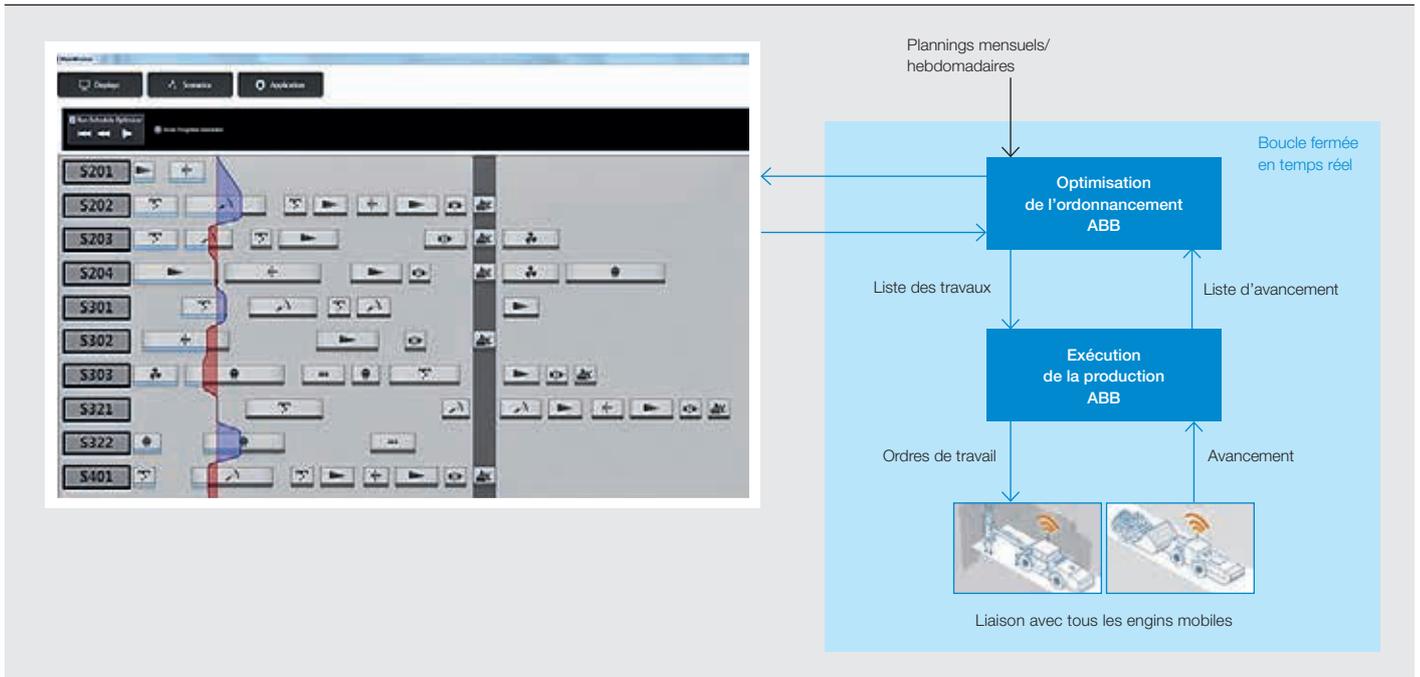
- *Contrôle des flux matières* : moins prioritaire pour le marché, cette fonction est encore à l'étude. Il s'agit d'une plate-forme de suivi du minerais qui, associée aux concepts de visualisation, sera intégrée à la solution MineInsight. L'intérêt pour le client réside dans la visualisation en ligne de la production minérale, la prédiction de la production et des événements futurs, un bilan massique sur toute la chaîne de valeur et une production optimisée, avec un minimum de perturbation.

Une solution de régulation instrumentée de tous les équipements de ventilation minière → 6 est prête à être lancée sur le marché dans le cadre de l'application ABB Smart Ventilation. La valeur ajoutée pour le client réside dans la robustesse et l'adaptabilité du système aux nouvelles conditions d'exploitation, ainsi que dans une réduction jusqu'à 50 % de la consommation énergétique. Il en résulte un usage plus efficace de l'infrastructure en place (puits), qui permet de différer les investissements et les extensions de la mine.

#### Quelques jalons sur le chemin de la mine du futur

**Septembre 2009** : l'initiative Mining 2.0 d'ABB débute sous la forme d'une pré-étude réalisée dans le sillage du programme *Mine of the Future™* de

#### 4 Ordonnancement automatisé avec visualisation temps réel de l'état d'avancement et des connexions machines



#### 5 Localisation des machines et du personnel par cartographie 3D de la mine



« Nous devons optimiser le process en partageant toutes les informations à partir d'une seule source. »  
(Vattenfall)

Rio Tinto. Concrètement, il s'agit de piloter à distance l'ensemble du site de Pilbara, au nord-ouest de l'Australie, à partir d'un centre de commande délocalisé à Perth, à 1500 km de là.

**Printemps 2010 :** deux événements viennent confirmer la poursuite du projet. D'une part, les débuts de coopération entre ABB et Atlas Copco, marqués par la présentation en avril d'un projet de « mine optimisée » faisant la part belle à l'intégration des machines mobiles et au suivi des matières décrivant le flux de production. D'autre part, une réunion avec

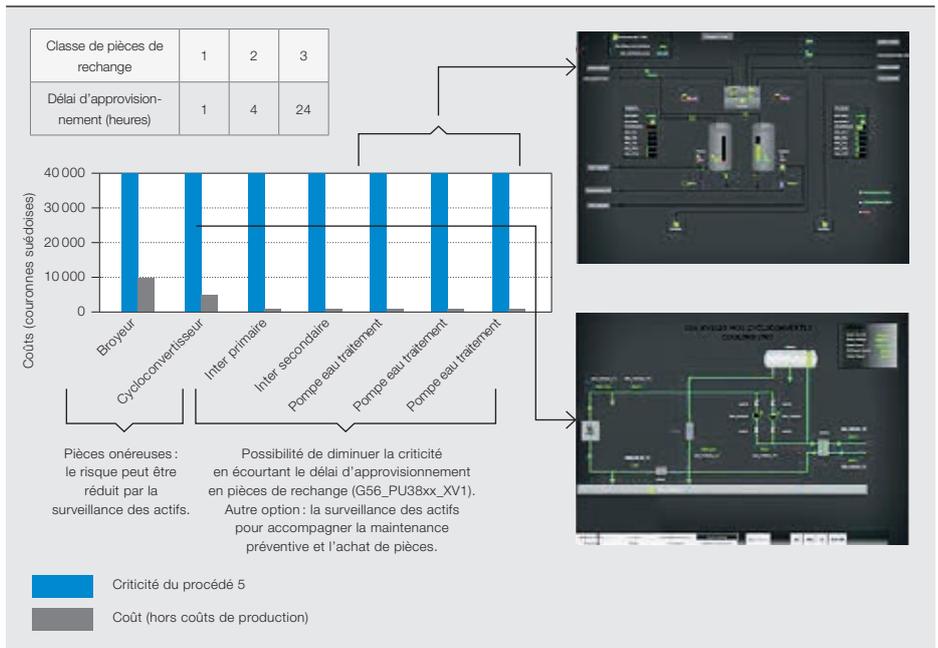
Vattenfall AG (Allemagne) au cours de laquelle l'exploitant minier déclare : « Nous avons poussé au maximum l'automatisation des machines ; notre objectif est à présent d'optimiser le process en partageant toutes les informations à partir d'une seule source ». De même, Vattenfall préfère le flux tiré au flux poussé, qui est la norme dans la production minière en continu.

**Été 2011 :** ABB met en place sa vision d'usine minéralurgique du futur pour la présenter aux clients.

## 6 Régulation de la ventilation



## 7 Optimisation de la maintenance par analyse de criticité des équipements CRIM



Le premier réseau LTE installé dans une mine souterraine permettra de tester la 5G et les solutions de communication du futur.

**Fin 2011 :** ABB dévoile les premiers concepts de sa solution, qui débouchent sur l'outil d'optimisation de la maintenance CRIM → 7, testé avec succès sur site.

**2012 :** le démonstrateur est prêt. Sont présentées les solutions de gestion de la production par les outils d'ordonnancement, de visualisation du suivi des matières et de régulation de la ventilation; cette dernière application, également testée sur site, donne des résultats concluants. ABB lance le développement du système de distribution des ordres de travail, partie intégrante de la solution d'ordonnancement automatisé.

**2013 :** le système de distribution est développé, un premier prototype installé. La recherche ABB commence à tester les algorithmes d'ordonnancement sur données réelles; l'année s'achève par des essais sur site.

**2014 :** les solutions Minelnsight et Smart Ventilation sont commercialisées; les premières applications vendues sont le système de distribution et la ventilation de la mine à la demande.

**2015 :** l'ordonnanceur ABB est introduit chez certains clients; sa diffusion est programmée pour la fin 2016.

### Dans la même veine : la mine robotisée

Toujours à l'écoute des métiers de la mine, les artisans de Mining 2.0 ont noué des relations avec le marché qui ont alimenté d'autres initiatives. Exécuter toutes les opérations sans présence humaine sur place, grâce au développement d'une plate-forme de manutention et de télécommande des engins mobiles, en est un exemple. Un système robotisé de chargement a ainsi vu le jour; un livrable est en cours.

Les téléservices (outils analytiques et robots de service, par exemple) constituent de nouvelles voies de progrès, en particulier dans les domaines de la ventilation minière, de l'analyse des données énergétiques et de l'inspection des convoyeurs.

Un réseau mobile LTE (*Long-Term Evolution*) est actuellement mis en place dans une mine souterraine à Boliden, en Suède. Baptisée PIMM (*Pilot for Industrial Mobile Communication in Mining*), cette première mondiale, financée par l'agence suédoise pour l'innovation Vinnova dans le cadre d'un consortium, vise à tester le déploiement de la 5G et des dernières technologies de communication dans la mine.

#### Jan Nyqvist

ABB Corporate Research  
Västerås (Suède)  
jan.nyqvist@se.abb.com

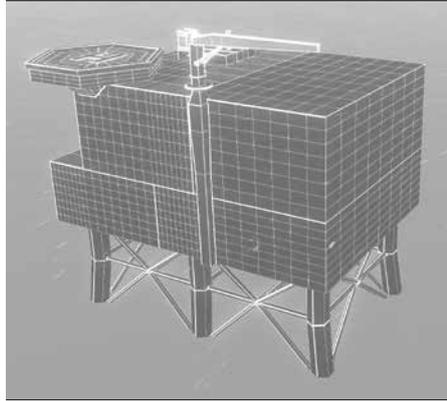


# Cure d'amaigrissement dans l'éolien marin

Un nouveau concept ABB de plate-forme CCHT moitié moins lourde et affranchie du courant alternatif

RYAN LADD, PETER SANDEBERG – Toute installation éolienne *offshore* est soumise aux conditions extrêmes du milieu marin : violence des éléments (vent, houle, courants), salinité, corrosion, etc. Contre vents et marées, il faut rapatrier en toute fiabilité l'énergie électrique sur le continent, souvent à des kilomètres de distance. Mais il est peut-être une mission encore plus périlleuse : la livraison et la mise en service de ces mastodontes pesant parfois plus de 20 000 tonnes, qui doivent être acheminés par les plus gros navires au monde, puis grutés et mis à l'eau par de puissants engins de levage. Et encore faut-il que la météo le permette !  
Le nouveau concept de plate-forme offshore CCHT d'ABB bouleverse la donne.

### 1 Nouveau concept de plate-forme offshore CCHT d'ABB



Pour assurer les besoins croissants de l'humanité en énergie électrique propre et fiable, les éoliennes prolifèrent dans de nombreux pays. Mais l'éolien terrestre a ses aléas : la force du vent varie d'un moment à l'autre et les flux d'air peuvent être perturbés par la topographie des lieux (relief, végétation, urbanisme, etc.). En mer, par contre, les vents sont plus forts et plus réguliers, procurant une énergie abondante, fiable et prévisible. De même, à terre, le nombre de sites d'implantation des aérogénérateurs est limité, tant pour des raisons pratiques qu'esthétiques, alors qu'en mer ces machines sont moins visibles et de bien meilleur rendement. Bref, l'éolien marin s'envole.

La production et le transport d'énergie en pleine mer posent bien sûr des défis techniques, qu'il s'agisse d'accéder aux installations pour en assurer la maintenance ou de faire transiter l'électricité par câble sous-marin sur de longues distances. Ce dernier obstacle est amplement levé par les liaisons en courant continu haute tension (CCHT), moins sujettes aux pertes en ligne que les sys-

tèmes classiques en alternatif. Les équipements CCHT ont également bien d'autres atouts, comme une meilleure aptitude à la commande et au redémarrage sur panne (*blackstart*) ainsi qu'une plus grande réactivité, etc. C'est donc la technologie retenue par plusieurs projets dans le monde pour raccorder l'éolien marin au réseau électrique terrestre.

#### Modularité en poupe

Si le CCHT est bien implanté sur terre depuis plus de 60 ans, c'est assez récemment qu'il a pris le large. La première mise en exploitation d'un parc éolien marin CCHT remonte à 2009. Les installations se sont depuis succédé, chaque génération se démarquant nettement de la précédente, comme c'est le cas dans tout domaine à progression rapide.

L'expérience et les connaissances acquises lors des projets CCHT extracôtiers ont permis à ABB de concevoir une plate-forme deux fois moins lourde et volumineuse → 1, qui plus est délestée des postes électriques CA équipant habituellement les parcs éoliens. Les aérogénérateurs peuvent en effet se raccorder directement à la liaison CCHT par un réseau de collecte de 66 kV. D'où un allègement de la plate-forme pouvant atteindre au total 70% par rapport aux installations classiques et une diminution des coûts d'exploitation en supprimant la maintenance à long terme des postes.

Cette innovation ABB s'appuie sur une conception modulaire qui s'adapte en souplesse au cahier des charges du client. Si la structure de base optimisée renferme tout ce dont a besoin une

plate-forme CCHT pleinement opérationnelle, rien n'empêche de lui ajouter des quartiers de vie, un hélipont, une grue plus puissante, par exemple. L'extension se fait aisément au gré des besoins, sans tout revoir de fond en comble.

Cette modularité a d'autres avantages. Chaque module peut être fabriqué à l'unité, parallèlement à d'autres disséminés dans des ateliers plus petits ; une méthode à l'opposé de la construction traditionnelle de toutes les superstructures (*topsides*) de la plate-forme dans un chantier naval spécialisé. Cette démarche a le mérite d'augmenter le nombre de sources d'approvisionnement, d'intensifier la concurrence et de réduire nettement les risques inhérents aux mégaprojets.

Le transport y gagne aussi beaucoup. Très peu de navires sont en effet capables d'acheminer et d'installer ces gigantesques installations ; en diminuant leur poids de moitié et en répartissant les modules préfabriqués sur plusieurs cargos, on optimise la logistique.

#### La plate-forme du futur

Cette cure d'amaigrissement est le fruit de l'étroite collaboration entre les meilleurs chercheurs et spécialistes ABB du CCHT. Le matériel CCHT embarqué a été repensé et considérablement réduit ; des études et des essais poussés ont permis de diminuer la redondance tout en maintenant la haute disponibilité du système. En améliorant l'aménagement de la structure et en supprimant l'espace vacant, ce concept révolutionnaire dessine la prochaine génération de plates-formes offshore.

#### Ryan Ladd

ABB Power Grids, Grid Systems  
HVDC Market Communications  
Ludvika (Suède)  
ryan.ladd@se.abb.com

#### Peter Sandeberg

ABB Power Grids, Grid Systems  
HVDC Marketing and Strategy  
Västerås (Suède)  
peter.sandeberg@se.abb.com

#### Photo p. 55

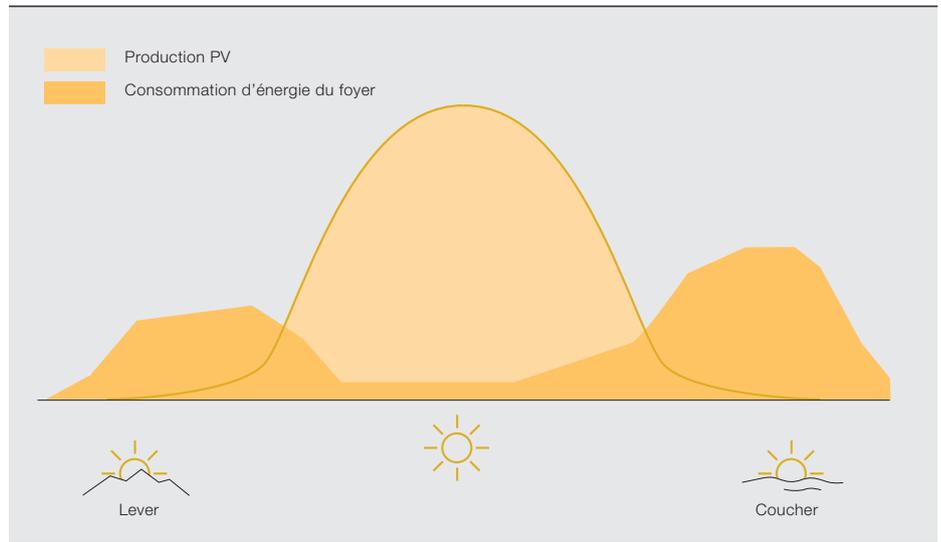
Les concepteurs de plates-formes offshore misent sur un poids réduit de moitié, une installation électrique simplifiée, une construction modulaire et un design compact original, très différent des structures traditionnelles.



# Au faîte des économies

Le stockage  
de l'énergie solaire  
s'invite à domicile

PAOLO CASINI – Faire du solaire une énergie d'avenir accessible au plus grand nombre: telle est l'ambition du projet d'Alliance solaire internationale, lancé par le Premier ministre indien Narendra Modi dans le cadre de la COP21 en novembre 2015, aux côtés du président français, du Secrétaire-général des Nations unies et de quelque 120 pays bénéficiaires de l'initiative. Si le solaire photovoltaïque (PV) a connu un formidable essor depuis 2004, grâce à des mécanismes d'incitation comme les tarifs d'achat garantis, il lui faut aujourd'hui un « plus » pour accompagner la prochaine génération de systèmes et contribuer à sa pérennité tant financière que technique: le stockage d'énergie. La filière PV, notamment dans le résidentiel, amorce aujourd'hui un virage stratégique ... ABB est en première position.



Des années durant, le principe du tarif d'achat dans le PV résidentiel a eu pour objet de garantir une rémunération du kilowattheure (kWh) solaire bien supérieure au prix de l'électricité, sans obligation de corrélation entre la puissance injectée et la consommation réelle du logement, que ce soit en termes de bilan ou d'équivalence énergétique à un instant donné. Mais les temps changent. D'un investissement rémunérateur, l'électricité solaire se doit aujourd'hui de couvrir des besoins fondamentaux, tout en tenant largement compte de facteurs décisifs : les risques d'instabilité du réseau du fait de la pénétration accrue de la production décentralisée, le début de la parité entre coûts d'autoproduction et prix de l'électricité achetée au réseau, et la baisse des incitations tarifaires.

En améliorant la capacité de mobilisation et de distribution de l'énergie solaire, et en optimisant la production locale pour une plus grande intégration au réseau et une baisse des coûts, le stockage énergétique sera le moteur de développe-

**Photo p. 57**

Comment les solutions ABB de stockage résidentiel de l'énergie peuvent-elles contribuer à la souplesse d'intégration du solaire photovoltaïque dans la sphère domestique ?

ment de la nouvelle génération de systèmes PV. Si la maîtrise des coûts d'intégration est la priorité des énergéticiens, l'allègement de la facture d'électricité est le critère qui facilitera le déploiement du PV domestique.

**Autoconsommation et autosuffisance**

Le progrès du PV résidentiel s'appuie sur deux leviers : l'autoconsommation (utilisation de l'électricité produite sur place) et l'autosuffisance (capacité à couvrir de façon autonome les besoins énergétiques du foyer). Dans cette optique, la prochaine génération de systèmes PV devra à la fois pouvoir à la consommation du logement et minimiser l'achat d'électricité au réseau. D'où l'obligation de résoudre la problématique du décalage entre le profil de production PV et la courbe de consommation électrique → 1.

Il y a plusieurs façons d'atteindre un niveau acceptable d'autosuffisance et d'autoconsommation dans le résidentiel :

- Gestion de la charge des appareils électriques du foyer en déplaçant leur usage en journée, quand il fait soleil ;
- Stockage des kilowatts disponibles (à chaque fois que la production dépasse la consommation du logement) et restitution à la demande,

souvent avant le lever et après le coucher du soleil ;

- Adoption de charges électriques pour remplacer les solutions non électriques traditionnelles (usages thermiques et/ou véhicules électriques) ;
- Agrégation du système local de gestion d'énergie à de plus vastes systèmes distribués couplés au réseau pour la fourniture de services système.

La filière solaire sera radicalement différente à l'avenir, notamment dans le résidentiel : ABB est à l'avant-garde de cette évolution.

Des niveaux d'autoconsommation et d'autosuffisance dépassant chacun le seuil de 30 %, typique des installations PV classiques, ne peuvent être obtenus au meilleur coût qu'en combinant tout ou partie de ces solutions. Pour leur mise en œuvre au niveau produit, deux pistes sont envisageables : la gestion de la charge et le stockage de l'énergie.

**Stockage**

Pratiques et économiques, les batteries électrochimiques figurent parmi les meilleurs moyens de stockage du surplus de production solaire. Pour autant, si l'ajout

## 2 Stockage d'énergie REACT d'ABB



arbitraire de batteries à une installation PV peut contribuer à l'autosuffisance totale du logement, la rentabilité n'est pas toujours au rendez-vous. En cause : le coût élevé des solutions de stockage par batteries techniquement viables et le nécessaire surdimensionnement des modules PV requis pour charger ces batteries.

Une solution de production PV + stockage domestique durablement rentable résulte plutôt d'un compromis entre la taille du parc de batteries et les niveaux d'autoconsommation et d'autosuffisance auxquels peut prétendre le foyer avec une stratégie globale de gestion d'énergie sur mesure. En d'autres termes, il faut trouver un équilibre optimal entre le coût des batteries (et l'encombrement de l'installation PV) et la réduction de la facture d'énergie achetée au réseau.

Le système de stockage d'énergie REACT (*Renewable Energy Accumulator and Conversion Technology*) d'ABB a été pensé pour cet optimum → 2. Il se compose d'un onduleur PV réseau (jusqu'à 5 kW) alimenté par un bus continu (CC), auquel sont raccordés deux régulateurs MPPT (*maximum power point tracking*), reliés chacun à une rangée de modules PV, et un chargeur de batteries bidirectionnel → 3. Si cette architecture

de couplage CC est la solution la plus économique dans le neuf, elle permet également de moderniser les installations PV existantes sous forme de chargeur de batterie sur bus CA ; il suffit de ne pas raccorder le module PV à son entrée → 4.

REACT se démarque par sa modularité : un compartiment électronique à droite, un compartiment de batteries à gauche (jusqu'à trois par système). Les batteries sont secourues en cas de panne réseau.

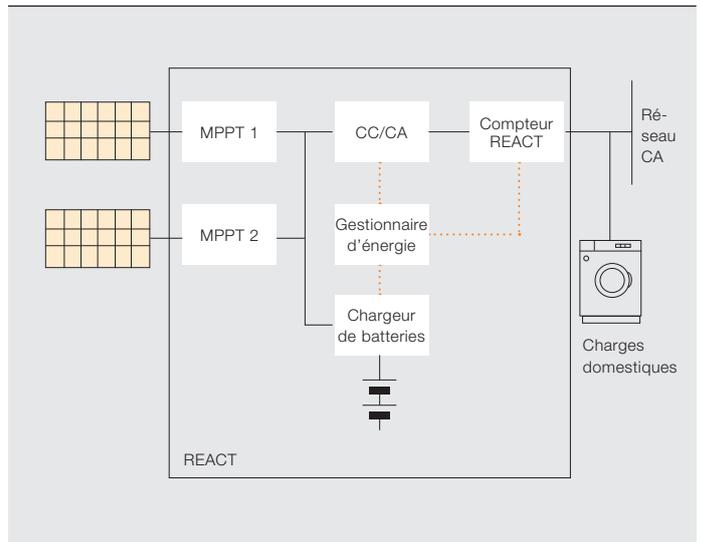
### Optimisation

Le stockage d'énergie REACT est constitué de batteries lithium-ion modulaires qui permettent de porter sur site la capacité d'origine du système de 2 kWh à 6 kWh. Un système embarqué de ges-

**La prochaine génération de systèmes PV devra à la fois pourvoir aux consommations du logement et minimiser l'achat d'électricité au réseau.**

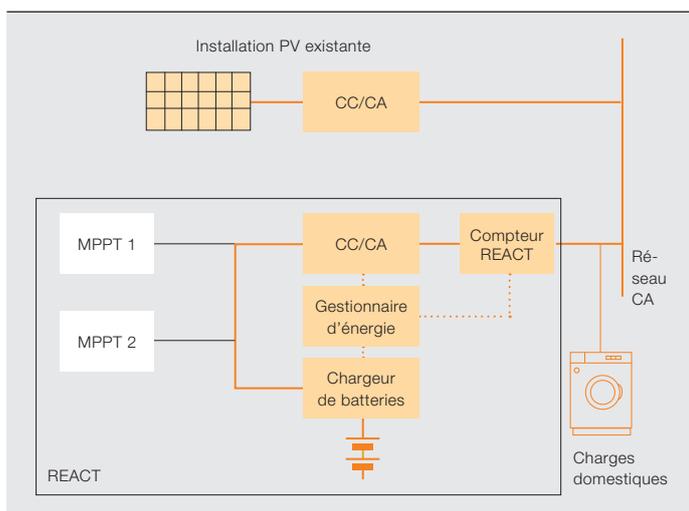
tion de charge efficace interagit avec certains consommateurs et appareils du logement pour atteindre jusqu'à 60 % d'indépendance énergétique en configuration de base → 5. Le compromis entre la taille des batteries et le niveau d'autosuffisance procuré par le système est un objectif variable, fonction de l'évolution du coût des batteries. L'extension de capacité à 6 kWh est donc possible dans

## 3 Configuration REACT type : un compteur dédié indique en temps réel les niveaux d'autoconsommation et d'autosuffisance.

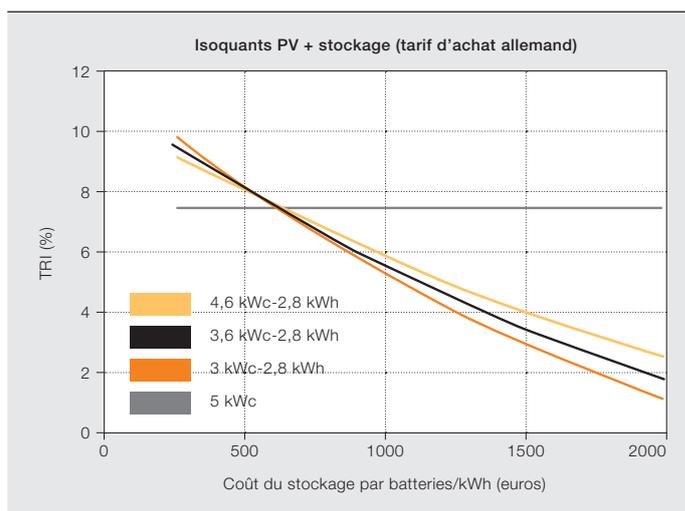


**Le progrès du photovoltaïque résidentiel s'appuie sur deux leviers : l'autoconsommation et l'autosuffisance énergétiques.**

**4 Modernisation d'une installation PV avec un système REACT exploité en mode bus CA : les entrées PV (MPPT 1 et 2) ne sont pas utilisées.**



**5 Rentabilité d'une installation PV + stockage selon la configuration du système (puissance PV et taille des batteries) et le coût des batteries**



le cadre d'une montée en puissance du système après installation, lorsque le prix des batteries permet d'en améliorer le taux de rendement interne (TRI).

## L'ajout de capacités de stockage à un onduleur PV classique ouvre la voie au solaire résidentiel durablement autonome.

### Rentabilité chiffrée

Le choix de batteries Li-ion comme moyen de stockage répond à plusieurs critères :

- Évolution favorable du profil de coût dans les prochaines années → 6 ;
- Rapport taille/capacité et performances ;
- Taux de charge/décharge (0,5C à 1C envisageable sans affecter la durée de vie de la batterie) ;
- Longévité doublée (10 ans) ;
- Rendement (décharge rapportée à la charge) supérieur à 95 %.

Le graphe → 7 illustre le résultat d'une simulation menée sur un logement type à Munich (Allemagne), dans les conditions suivantes :

- Production PV annuelle de 990 kWh/kilowatts crêtes (kWc)
- Foyer de 4 personnes

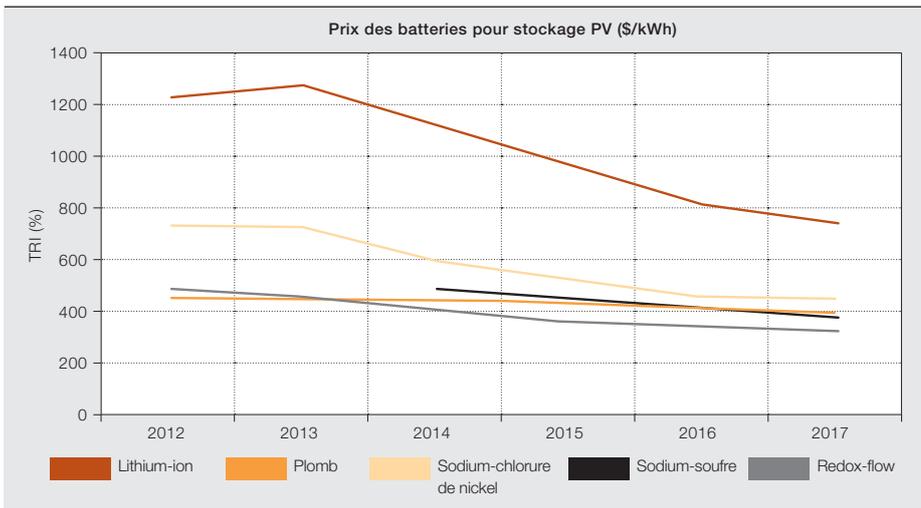
- Consommation annuelle de 4100 kWh répartie comme suit : froid : 0,4 kW ; lave-linge : 2 kW ; PAC : 2 kW ; four électrique : 2,8 kW
- Puissance PV installée de 5 kW CC
- Prix du kWh acheté au réseau : 23 centimes d'euros

L'ajout d'un stockage de 2 kWh à l'installation PV de 5 kW peut accroître l'autosuffisance du logement de 15 %, et son autoconsommation de 10 %. On gagne encore 5 à 7 % avec un gestionnaire de charge.

Celui-ci décale la consommation du logement en interagissant avec les appareils domestiques programmables non prioritaires. Les gros équipements du foyer étant aujourd'hui pour la plupart pilotés par microprocesseur, leur interaction avec le gestionnaire de charge devrait idéalement emprunter une liaison de données. Or ce standard de communication, certes largement déployé par les fabricants d'appareils électroménagers et étudié par plusieurs instances normatives en Europe et aux États-Unis, n'a malheureusement pas encore été reconnu ni mis en œuvre. L'intégration efficace du gestionnaire de charge dans REACT revêt donc la forme d'une série de signaux utilisés soit pour alimenter les charges programmables, soit pour signaler à l'utilisateur quand il est temps de démarrer une charge.

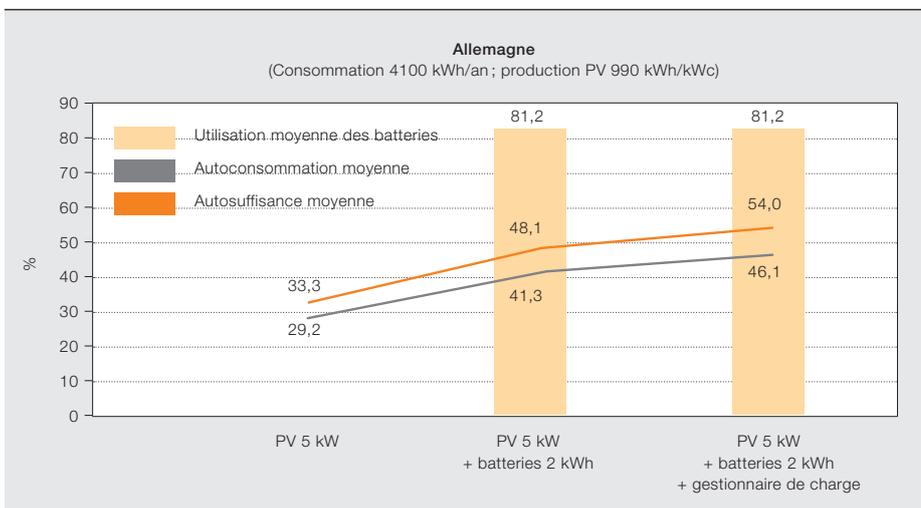
Quoi qu'il en soit, REACT est paré pour la domotique avec la possibilité de s'interfacer avec les charges critiques du logement et même avec un gestionnaire

6 Évolution des coûts pour différentes technologies de batterie : le lithium-ion affiche la plus forte baisse et l'une des plus longues durées de vie (source : IMS).



Les futurs systèmes PV cumuleront production et stockage.

7 Niveaux d'autoconsommation et d'autosuffisance caractéristiques des installations PV en Allemagne selon différents niveaux de configuration PV



d'énergie externe conforme aux futures normes de communication sur liaison numérique, Wi-Fi ou ZigBee.

**Des perspectives au beau fixe**

L'ajout de capacités de stockage à un onduleur PV classique marque l'avènement du solaire résidentiel durablement autonome. Pour garantir la rentabilité de l'investissement, il est capital de trouver le bon équilibre entre le coût des batteries et les niveaux d'autosuffisance et d'autoconsommation du foyer.

Le soin apporté au dimensionnement des batteries doit s'accompagner d'une stratégie efficace de gestion des flux énergétiques du système, que ce soit de la source PV à la batterie, depuis ou vers le réseau et les appareils domestiques, entre le gestionnaire d'énergie de l'onduleur et les charges du logement. Comme

l'atteste notre étude de rentabilité → 6,7, ABB est en mesure de proposer une solution complète de stockage énergétique résidentiel, pourvue du dernier cri des techniques de gestion de la charge pour gagner en commodité et en souplesse d'emploi.

**Paolo Casini**  
 ABB Discrete Automation and Motion,  
 Power Conversion  
 Terranuova Bracciolini (Italie)  
 paolo.casini@it.abb.com

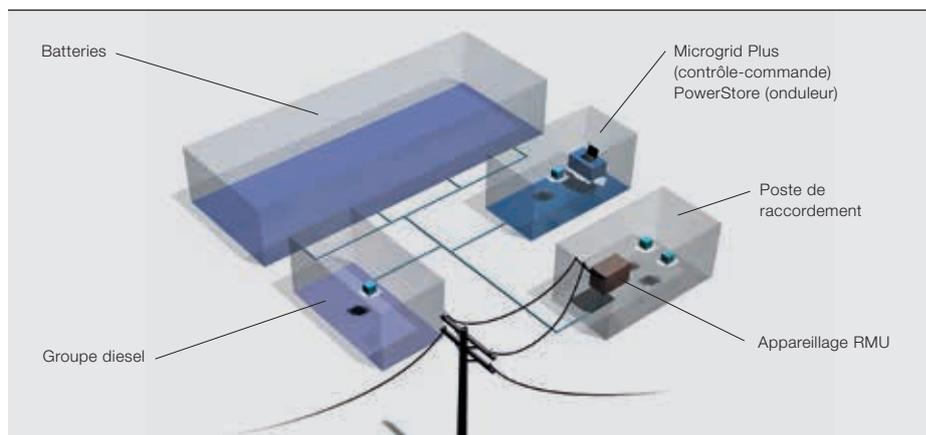


# Valoriser le stockage

## Étude de cas d'un microréseau batteries-diesel raccordé au réseau principal

NIRUPA CHANDER, JACK GAYNOR – Le stockage massif d'électricité sur batteries a beaucoup progressé : l'amélioration des performances et la baisse des coûts ont engendré des économies d'échelle qui renforcent l'intérêt économique de la solution. Cette évolution favorable pousse un grand nombre d'industriels à envisager l'emploi de batteries pour bâtir un système de stockage d'énergie distribué (SSED). La société australienne AusNet Services s'est intéressée au concept

en 2013 et a vite décidé de mener une expérimentation pilote pour en explorer le potentiel en vue de gérer les pics de consommation et reporter les investissements en infrastructures réseau. À l'issue d'un appel d'offres concurrentiel, AusNet Services a confié le contrat de conception, d'exécution et de livraison du SSED au consortium ABB-Samsung SDI, ABB se chargeant des volets conception et intégration du projet, et Samsung SDI fournissant les batteries.



### Configuration du système

Le SSED a trois grandes composantes → 1 : un système de batteries lithium-ion Samsung SDI d'une capacité de 1 MWh 1C (« C » indiquant le taux de charge/décharge) couplé au réseau par un onduleur ABB PowerStore™ quatre quadrants PCS100 de 1 MVA ; un groupe diesel de 1 MVA ; un poste de raccordement au réseau abritant un transformateur de 3 MVA, un appareillage RMU (*Ring Main Unit*) rempli à l'hexafluorure de soufre ( $SF_6$ ) et des protections électriques. Tous ces équipements sont transportables, le groupe diesel, les batteries et le PCS100 étant conteneurisés dans des unités monoblocs climatisés et dotés de dispositifs d'extinction d'incendie. Transformateur et RMU sont montés sur châssis mobiles.

Logées dans quatre conteneurs de transport, les batteries présentent des taux de charge/décharge symétriques de  $\pm 1$  MW et peuvent très rapidement passer de la charge à la décharge pour un fonctionnement robuste.

### Stockage PowerStore

La pièce maîtresse du SSED est le convertisseur de puissance PCS100 4Q à transistors IGBT (*Insulated-Gate Bipolar Transistors*) d'ABB qui raccorde le système de stockage Samsung SDI au réseau à travers un circuit intermédiaire (bus CC) de 1000 V. D'une puissance apparente symétrique de  $\pm 1372$  kVA, PowerStore assure la gestion bidirec-

tionnelle des puissances active et réactive. Au sein du SSED, il opère en mode générateur virtuel, à l'instar d'un onduleur de tension fonctionnant comme générateur synthétique. Il s'apparente en cela à un groupe diesel classique mais avec un temps de réponse exceptionnel et des fonctions étendues d'injection et de stabilisation de puissance, de la même manière qu'un compensateur statique STATCOM. PowerStore peut alors agir en générateur maître pour donner une référence de tension et de fréquence réseau à d'autres machines synchrones (aérogénérateurs ou onduleurs solaires,

La technologie des batteries a accompli de fabuleux progrès au cours de la précédente décennie, sous l'impulsion de secteurs aussi variés que l'énergie, l'automobile et les datacenters. Aujourd'hui, les applications de stockage massif explosent, l'une d'elles suscitant un intérêt particulier : la mise en œuvre à grande échelle de microréseaux dotés de batteries et raccordés au réseau principal afin de gérer les pics de consommation et différer les travaux de modernisation du réseau. Ces deux objectifs ont amené AusNet Services à expérimenter une installation pilote de stockage hors réseau, en partenariat avec ABB et Samsung SDI. Compte tenu des capacités du SSED en matière de qualité du courant, il fallait également étudier l'incidence de ce générateur intégré sur la qualité et la stabilité de la desserte locale, de même que son potentiel en fonctionnement îloté pour améliorer l'approvisionnement énergétique et la stabilité de la fourniture en cas de défauts du réseau principal.

#### Photo p. 62

Installation pilote ABB de stockage massif par batteries au nord de Melbourne (État de Victoria, Australie) pour le compte de l'énergéticien AusNet Services.

Une source de production intégrée comme le SSED peut soutenir la demande électrique en alimentant localement les charges des lignes amont durant les pics de consommation.

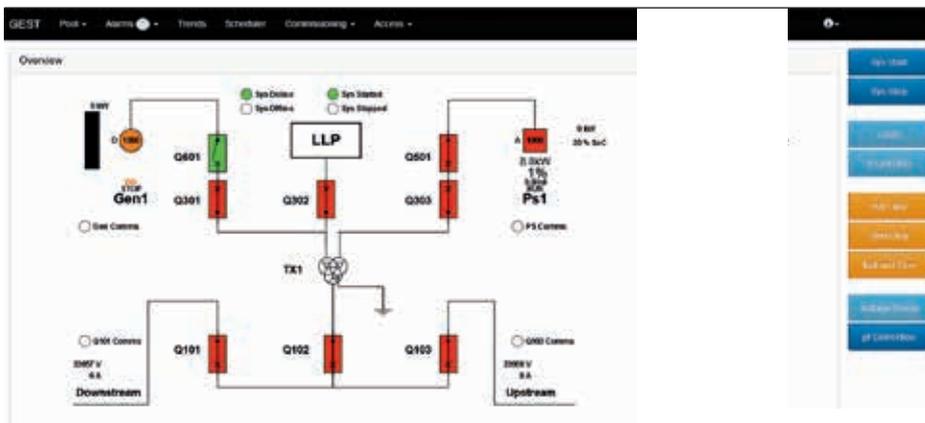
par exemple). De plus, il réagit aux défauts du réseau à l'identique d'un générateur synchrone, fournissant un courant de défaut jusqu'à 2 pu (par unité) pendant 2 secondes.

Le groupe diesel de 1 MVA allonge la durée de décharge et accroît la puissance débitée par le SSED, recharge les batteries faibles et alimente le microréseau.

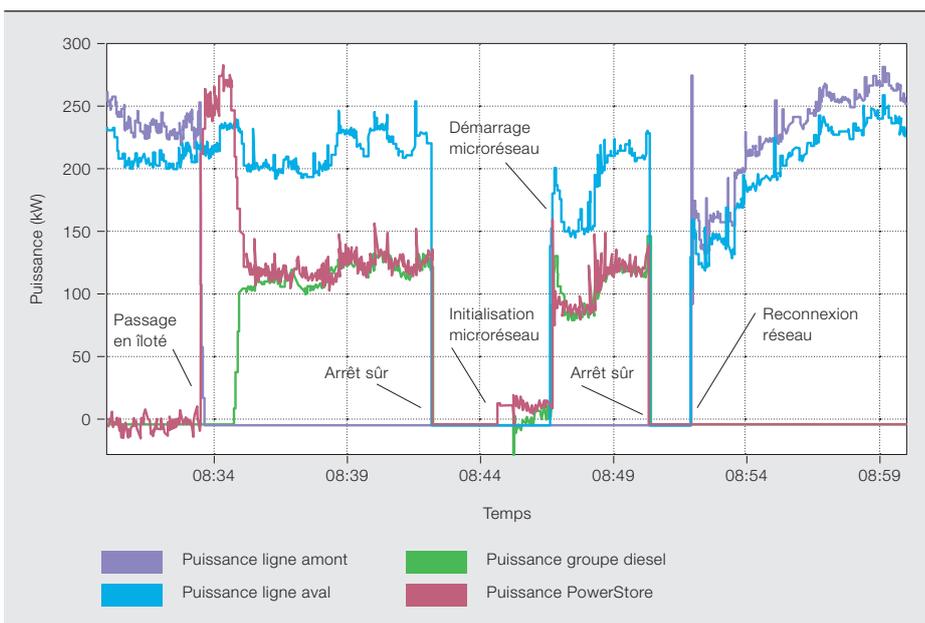
PowerStore et groupe diesel sont couplés au réseau 22 kV par le transformateur de 3 MVA équipé d'un commutateur

Le SSED permet de faire fonctionner le système aval en régime îloté ou connecté au réseau.

## 2 Écran M+ Operations d'ABB



## 3 Îlotage : basculement régime connecté → îloté, arrêt du système, initialisation du microréseau, reconnexion au réseau



de neutre relié au primaire et d'un RMU à trois disjoncteurs au SF<sub>6</sub>. Cette connexion est surveillée et protégée par des dispositifs électroniques intelligents IED (*intelligent electronic devices*), à savoir trois relais REF630 d'ABB. Un appareil SYNCHROTECT® d'ABB permet la synchronisation du SSED avec le réseau et le basculement automatique et transparent du mode îloté au mode connecté. En cas de perte de réseau local, le SSED peut alimenter le réseau auxiliaire de contrôle-commande de 240 VCA pendant au moins 8 heures.

### Contrôle-commande Microgrid Plus

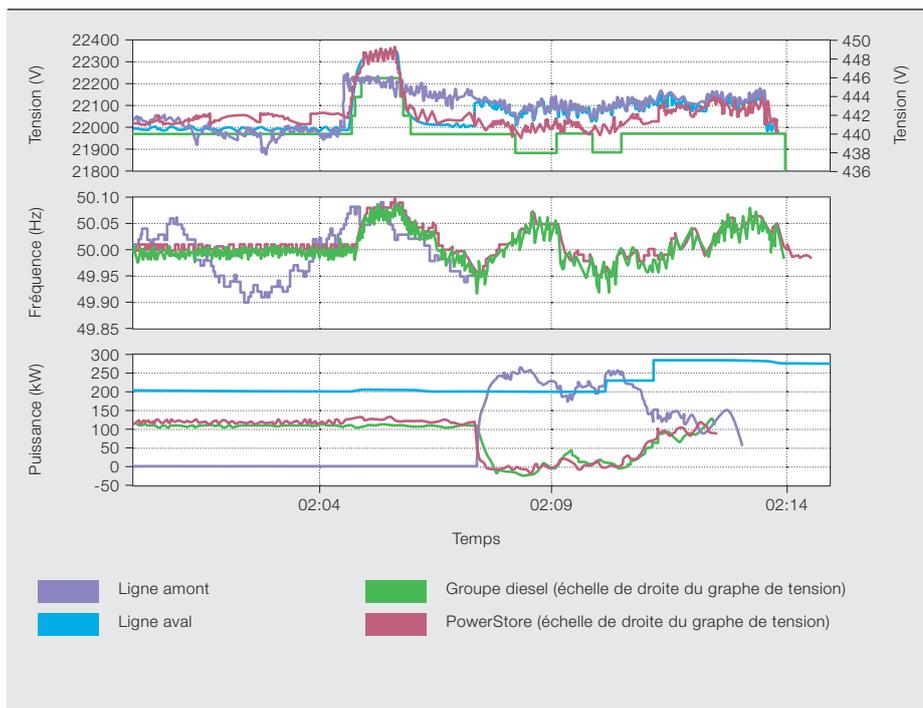
Le SSED est géré par le système Microgrid Plus d'ABB qui garantit la continuité et la stabilité de l'alimentation réseau. Cette plate-forme de contrôle-commande distribué s'interface avec chaque élément clé de l'installation dont elle rapatrie les

données électriques pour les diffuser à tout le réseau. Chaque contrôleur Microgrid Plus agit dans un environnement distribué, la totalité du SSED formant un tout cohérent. Télésurveillance et télégestion sont assurées à la fois par la solution M+ Operations d'ABB → 2 et un terminal de téléconduite relié au système de contrôle-commande d'AusNet Services. La réserve tournante est maintenue par Microgrid Plus, qui surveille continuellement les flux de puissance et d'énergie pour garantir une réponse à n'importe quel échelon de charge.

### Protection

La protection du SSED met en œuvre plusieurs méthodes complémentaires. Le système de gestion de batteries de Samsung communique toutes les alarmes au contrôle-commande Microgrid Plus qui, à son tour, cesse de fonctionner sur

#### 4 Synchronisation : valeurs de tension, fréquence et puissance pendant le basculement régime îloté → connecté, à l'aide d'un banc de charge



apparition d'une alarme critique. Une protection anti-îlotage garantit qu'en cas d'ouverture d'une ligne amont, le SSED ne cherche pas à alimenter le réseau général ou le tronçon de réseau dont dépend la ligne.

Plusieurs protections du système électrique sont assurées par les relais REF630, un relais de secours sensible aux défauts à la terre et des contrôleurs d'isolement.

#### Îlotage

Lors du basculement du mode interconnecté au mode îloté, le SSED augmente sa production de sorte que le flux de puissance dans le disjoncteur amont soit égal à zéro ; il fournit la totalité de la charge de la ligne aval ainsi que celle de l'alimentation auxiliaire (d'où la différence d'environ 30 kW entre la puissance de PowerStore et celle de la ligne aval, et entre la puissance de la ligne amont et celle de la ligne aval) → 3.

Le flux de puissance dans le disjoncteur amont étant nul, le disjoncteur ouvert et PowerStore seul à alimenter le micro-réseau, le groupe diesel démarre et partage passivement avec PowerStore la charge de la ligne aval jusqu'à ce que le système soit arrêté en sécurité. Puis, à l'initialisation du micro-réseau, PowerStore commence à fournir une référence système sur laquelle le groupe peut se syn-

chroniser ; le disjoncteur aval se ferme ensuite et le SSED alimente la ligne aval jusqu'à un nouvel arrêt sûr du système.

Lorsque les sources de production passent de l'état en ligne à l'état hors ligne, et vice versa, les groupes de protection IED changent automatiquement ; c'est l'assurance que les relais REF630 utilisent les bons réglages.

Au passage et au retour en mode connecté, le SSED règle la sortie de tension et de fréquence de PowerStore et du groupe pour s'assurer que la tension et la fréquence de la ligne aval sont égales à celles du réseau amont → 4. Pour cela, un SYNCHROCONTACT envoie des signaux à Microgrid Plus, qui règle alors la tension et la fréquence de sortie de PowerStore et du groupe pour synchroniser les deux réseaux. Le retour en mode îloté suit le processus décrit plus haut : quand le flux de puissance dans le disjoncteur amont est nul, celui-ci s'ouvre et le commutateur neutre haute tension se ferme.

Le SSED absorbe du réactif quand la tension réseau est supérieure à la consigne et en injecte quand elle est inférieure.

#### Écrêtage, injection et correction

Lorsque le SSED est utilisé pour écrêter les pointes sur l'alimentation primaire, le système Microgrid Plus injecte la puissance fournie par PowerStore ou le groupe pour maintenir la charge de la ligne amont à une consigne prédéfinie de puissance maximale, tout en pourvoyant aux besoins de la ligne aval → 5. Quand PowerStore et le groupe sont tous deux en ligne, ils partagent de manière passive et proportionnelle le besoin de puissance de la charge.

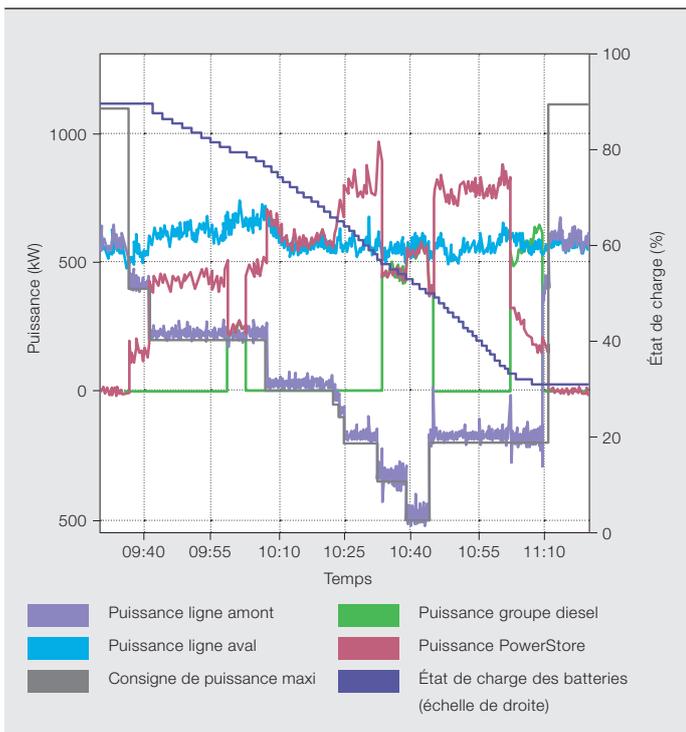
Si l'état de charge des batteries descend à une valeur minimale de consigne (35 %

## Un SSED atténue les défauts d'alimentation et de stabilité liés à l'intermittence des renouvelables.

dans notre exemple), le microréseau augmente la charge du groupe et réduit celle de PowerStore pour diminuer le taux de décharge.

En mode statisme de tension → 6, le système compare la tension du réseau à un paramètre donné, la différence entre ces deux valeurs servant à déterminer

## 5 Écrêtage de pointe



la puissance réactive à injecter ou à absorber pour stabiliser la tension.

La correction du facteur de puissance s'effectue de la même manière, en injectant ou en prélevant du réactif sur le réseau.

La charge au niveau minimal de la ligne amont permet de recharger les batteries tout en répondant aux besoins de puissance de la ligne aval. Lorsque la demande de la ligne amont est supérieure à la consigne maximale, le SSED effectue l'écrêtage de pointe comme on l'a vu plus haut. La recharge peut être temporisée pour bénéficier des périodes creuses d'électricité bon marché.

### Bilan prometteur

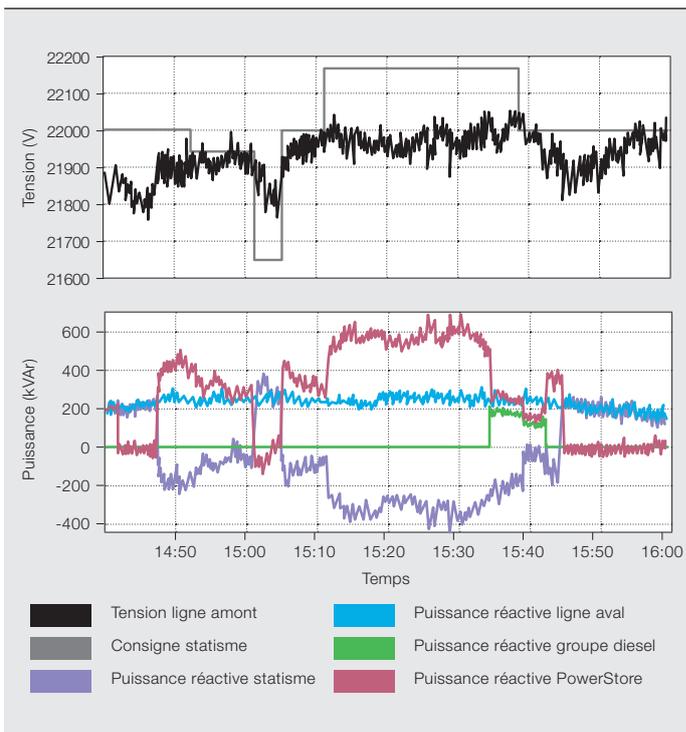
Les résultats encourageants du SSED de démonstration mis en œuvre chez Ausnet Services confirment son aptitude à soutenir et à stabiliser le réseau électrique, évitant ainsi les travaux de renforcement ou de modernisation. Les capacités d'ilotage du SSED diminueront la gravité et la durée des pannes dans les grands réseaux, en isolant et en corrigeant ces défauts tout en maintenant l'alimentation des zones coupées. Compact et transportable, le système peut être installé à proximité du site client.

Les systèmes de stockage d'énergie sur batteries promettent d'accroître la contribution de la production solaire aux grands réseaux traditionnels en compensant l'intermittence de la ressource. Le SSED est en effet à même de soutenir n'importe quelle source de production distribuée.

Les progrès réalisés dans la technologie Li-ion, notamment des taux de charge/décharge proches de 4C (un parc de batteries de 250 kWh étant alors capable de fournir 1 MW) et un encombrement réduit préfigurent un stockage d'énergie performant et économique au sein de plus petits microréseaux implantés dans des sites reculés. Ces performances accrues profitent également à de plus grands systèmes raccordés au réseau pour soutenir les fortes pointes de demande locale (fours à arc, engins de levage et autres grosses charges industrielles à marche intermittente).

ABB et Samsung SDI entendent poursuivre le développement de systèmes de stockage d'énergie modulaires et évolutifs destinés aux microréseaux et à d'autres applications, en axant leur recherche sur les technologies qui permettront aux clients de réduire leur empreinte écologique tout en stabilisant et en pérennisant l'intégration du renouvelable à leurs réseaux.

## 6 Paramètres en mode statisme de tension



Les auteurs remercient vivement Yogendra Vashishtha (chef de projet AusNet Services) et Hachull Chung (chef de projet Samsung SDI) de leur précieuse contribution à la rédaction de cet article.

### Nirupa Chander

ABB Power Grids, Grid Automation  
Notting Hill (Australie)  
nirupa.chander@au.abb.com

### Jack Gaynor

Ancien collaborateur ABB

## Rédaction

### Bazmi Husain

Chief Technology Officer  
Group R&D and Technology

### Ron Popper

Head of Corporate Responsibility

### Christoph Sieder

Head of Corporate Communications

### Ernst Scholtz

R&D Strategy manager  
Group R&D and Technology

### Andreas Moglestue

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

## Édition

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

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

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

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

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

## Impression

Vorarlberger Verlagsanstalt GmbH  
AT-6850 Dornbirn (Autriche)

## Maquette

DAVILLA AG  
Zurich (Suisse)

## Traduction française

Dominique Helies  
dhelies@wanadoo.fr

## Avertissement

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

ISSN : 1013-3119

[www.abb.com/abbreview](http://www.abb.com/abbreview)



Dans le numéro 4|16

# Locomotion

La mondialisation de la production et des services repose sur la capacité à transporter de plus en plus de biens et de personnes, qu'il faille acheminer des marchandises à l'autre bout du monde ou permettre à tout un chacun de se rendre quotidiennement au travail par la route, le rail... Pour ABB, les moyens de transport doivent être respectueux de l'environnement, sobres en énergie, pérennes et économiques. ABB a en portefeuille une palette de produits et de systèmes de haute technologie, des appareils propulsifs pour navires de fort tonnage aux stations de recharge pour véhicules électriques. Au-delà du matériel, cette offre s'enrichit de télé-services et de solutions d'assistance.

Le transport et la contribution d'ABB au progrès de la mobilité durable seront le fil conducteur de notre prochain numéro.



## À vos tablettes

Retrouvez l'application *ABB review*  
sur notre site [www.abb.com/abbreviewapp](http://www.abb.com/abbreviewapp).



## Au contact

Ne manquez pas un numéro : abonnez-vous à la liste de diffusion sur [www.abb.com/abbreview](http://www.abb.com/abbreview).

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



## ABB, partenaire du futur

Pour changer le monde, il faut être perpétuel pionnier et innovateur. Des qualités que *Solar Impulse* a trouvées en ABB. Car nous partageons le même dessein : faire tourner la planète sans épuiser ses ressources. À l'avant-garde de bien des technologies, ABB n'a de cesse d'innover dans les énergies renouvelables, l'efficacité énergétique et la mobilité durable. *Solar Impulse* hisse cette ambition toujours plus haut pour que l'aventure continue. Numérisation et durabilité sont les piliers de la 4<sup>e</sup> révolution industrielle ; l'innovation ABB en est le porte-flambeau. Suivez le cours de l'histoire sur [www.abb.com/betterworld](http://www.abb.com/betterworld)

