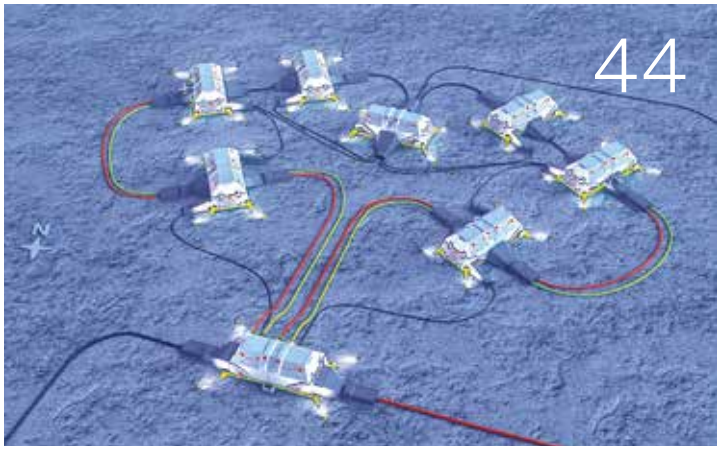
review

01|2020 fr

Sources d’inspiration

06 – 17 **Innovations ABB**
18 – 41 **L’usine intelligente**
42 – 60 **Performance de l’extrême**



Co-innover pour mieux automatiser

Turbocompresseur mono-étagé A200-H

Mue numérique

05 **Éditorial**

À la une de l’innovation 2020

08 **Innovations ABB**

L’usine intelligente

20 **Mue numérique**
24 **Repenser l’innovation**
30 **OPC UA sur TSN**
36 **Co-innover pour mieux automatiser**

Performance de l’extrême

44 **Électrification sous-marine**
50 **Conversion de puissance sous-marine**
56 **Turbocompresseur mono-étagé A200-H**

Le mot du moment

62 **Fabrication additive**

63 **Publication ABB**

Commande robotique OmniCore™

—

Si nous avons intitulé ce numéro « Sources d'inspiration », c'est parce que l'innovation ne se résume pas à avoir une bonne idée. Innover, c'est voir loin, faire preuve de souplesse et de résilience, user de persévérance, remettre sans cesse l'ouvrage sur le métier et, surtout, savoir identifier les vrais problèmes pour forger des solutions d'avenir. La longue expérience d'ABB en recherche-développement et relation client fourmille d'idées, de projets et de réussites propres à nourrir l'inspiration.
Des remarques, des suggestions ?

abb.com/abbreview

ÉDITORIAL

Sources d’inspiration

Chers lecteurs,

« Munissez l’homme d’un marteau, et il ne saura que planter des clous ». Un adage qui s’applique on ne peut mieux aux machines ! Traditionnellement, la production en grandes séries passe par la répétition à l’identique des mêmes opérations pour obtenir des produits tout à fait uniformes. Or c’est la variabilité, voire l’arbitraire, qui prévalent dans le monde réel. La réponse de l’industrie a été d’uniformiser artificiellement les parmètres et les exigences, réduisant ainsi l’éventail des choix offerts à la clientèle, et de continuer à faire appel à l’humain quand la reproductibilité n’était pas de mise.

Une époque révolue : les appareils et systèmes qui fondent aujourd’hui la 4e révolution industrielle sont capables d’identifier par eux-mêmes des situations et des problèmes très divers, et de s’y adapter sans passer par l’humain ou, le cas échéant, en l’alertant. Ce numéro d’*ABB Review* s’intéresse aux produits, services et solutions qui conduisent, accompagnent ou illustrent cette transition.

Bonne lecture,

Bazmi Husain
Directeur des technologies

Crédit photo page 04 : istockphoto.com/gremlin

À la une de l'innovation 2020

13

ABB ne se contente pas de repousser les frontières du possible mais va bien au-delà pour lui conférer prédictibilité, fiabilité, sécurité et compétitivité. De l'atelier aux fonds marins en passant par les navires rouliers, la possibilité porte en elle la promesse d'un accomplissement.

08 IA et robotique : la combinaison gagnante de l'atelier flexible
09 Les robots investissent les chaînes d'assemblage automobile
10 Un nouvel Azipod® embarque sur les navires rouliers
11 La commande robotique OmniCore™ en lice pour le prix de l'innovation IERA 2019
12 L'exploitation pétrolière prend le large grâce à l'électrification sous-marine
13 Disjoncteur électronique ultrarapide
14 La détection d'anomalies prête main-forte aux robots
15 EC Titanium : solution moteur-variateur intégrée
16 Le jumeau numérique dope la productivité des installations robotisées
17 Turbocompresseur A200-H : la performance sans l'encombrement

IA ET ROBOTIQUE : LA COMBINAISON GAGNANTE DE L'ATELIER FLEXIBLE

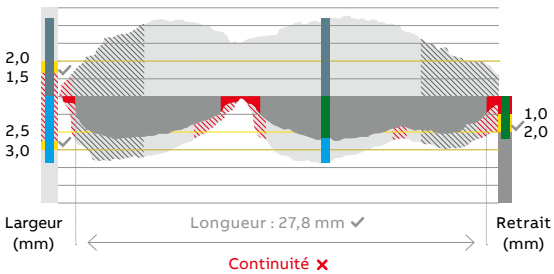
Intelligence artificielle (IA) et robotique sont deux moyens de flexibiliser l'automatisation industrielle. Le remplacement d'une programmation « en dur » par des capacités d'apprentissage étend les fonctionnalités des robots pour gagner en rapidité, en sécurité et en productivité. ABB tire parti de l'IA pour optimiser le fonctionnement de ses robots : reconnaissance de l'environnement et réactivité adaptée, inspection et analyse des dysfonctionnements, optimisation autonome des processus.

Des robots embarquant des capteurs de vision, par exemple, sont capables de repérer des objets, quelle que soit leur position, et leurs algorithmes d'apprentissage automatique, de déterminer les meilleures trajectoire et orientation du préhenseur.

Ajoutez à cela un apprentissage supervisé à partir d'exemples, et vous obtenez des robots qui savent aussi détecter les défauts et problèmes de qualité, comme dans les cordons de soudure (→ figure ci-contre).

Illustration de cette optimisation autonome des procédés industriels, le premier robot atomiseur de peinture instrumenté et connecté ABB Ability™ Connected Atomizer assure des diagnostics intelligents en temps réel pour une nette amélioration de la qualité. Avec ses capteurs d'accélération, de pression, de vibration et de température qui surveillent des variables clés du procédé, il réduit de 75 % les déchets de peinture lors des changements de couleur et de 20 % la consommation d'air comprimé.

ABB utilise encore l'IA pour scruter le comportement des presses d'emboutissage et des robots de transfert, et minimiser les temps morts sur la chaîne : un algorithme identifie à cette fin les goulets d'étranglement et ajuste en conséquence les temps de marche/arrêt de tous les équipements pour lisser le process et mieux planifier la production. •



LES ROBOTS INVESTISSENT LES CHAÎNES D'ASSEMBLAGE AUTOMOBILE

Les usines automobiles, championnes de l'automatisation ? Si certaines tâches, dont le soudage, sont fortement automatisées, d'autres, comme l'assemblage final, n'ont pas encore atteint la maturité technologique nécessaire. La complexité des opérations (câblage, installation des sièges et aménagement de l'habitacle) exige en effet une grande dextérité.

Les ingénieurs d'ABB développent néanmoins des techniques pour robotiser les premières étapes de l'assemblage final. Le déplacement linéaire constant des carrosseries automobiles complique beaucoup la tâche dans cet environnement. Il faut alors des capteurs de vision et de commande d'effort pour guider en temps réel le robot dans ses mouvements, qui n'obéissent plus à des trajectoires programmées.

Première étape indispensable : la synchronisation du robot avec la progression linéaire de la chaîne grâce à un suivi de convoyeur classique ou à des véhicules à guidage automatique (AGV). Compatible avec les convoyeurs traditionnels, le guidage automatique repose sur la lecture en temps réel de balises 2D de suivi longue portée AprilTags. Ces dernières sont généralement placées sur le dispositif téléguidé, et la caméra de lecture est fixée soit au sol, soit dans le pied du robot si ce dernier est monté sur un axe linéaire.

Une fois les déplacements du robot et du véhicule synchronisés, l'assemblage peut commencer. Le robot ne perd jamais de vue les caractéristiques du poste de montage grâce au « Real-Time On-Board Vision », un système de vision temps réel ABB embarqué sur son préhenseur.

La combinaison de ces données et des retours du capteur d'effort installé entre le poignet et le préhenseur du robot assure le guidage en temps réel et la manipulation ultraprécise nécessaires à l'accomplissement de la tâche.

ABB a déployé des pilotes dans certaines usines chinoises et allemandes d'un grand constructeur automobile pour des opérations d'assemblage de l'habitacle. L'expérience acquise dans ces installations et ailleurs pourra se décliner dans d'autres applications d'assemblage automobile ou d'autres chaînes de production où le mouvement est continu. •

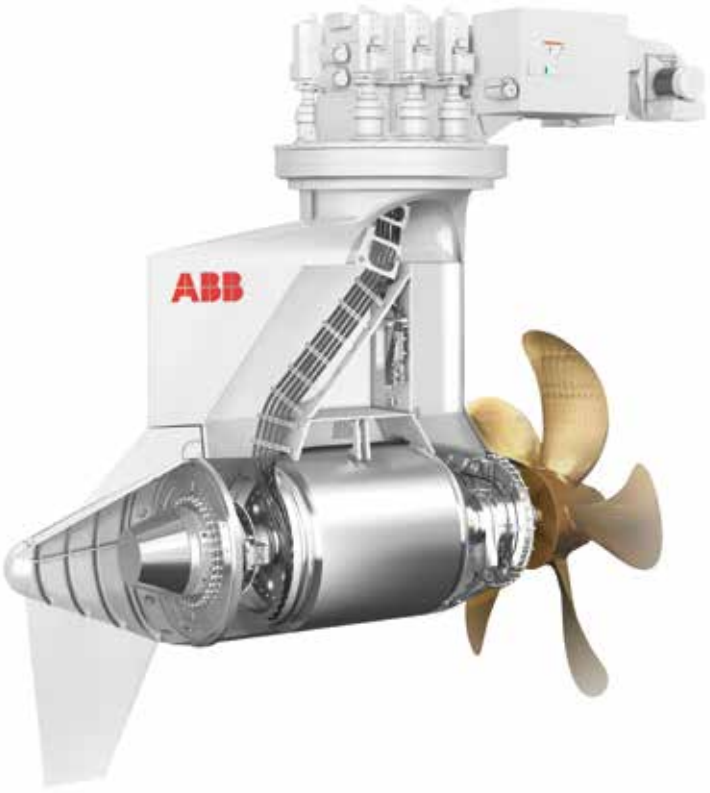
UN NOUVEL AZIPOD® EMBARQUE SUR LES NAVIRES ROULIERS

Depuis son lancement en 1990, le système Azipod® d'ABB est la technologie reine pour la propulsion marine de tout type d'embarcation, du petit navire de transport à l'imposant brise-glace. Restait à satisfaire les clients souhaitant un « entre-deux » capable de développer des puissances de 7,5 à 14,5 MW : c'est chose faite avec l'Azipod M. Ce milieu de gamme convient non seulement aux navires rouliers transportant passagers, véhicules et marchandises (ropax), mais aussi aux gros bateaux de construction offshore, aux paquebots de tonnage moyen et aux pétroliers navettes. Le dernier-né de la famille Azipod, qui couvre maintenant toutes les puissances de 1 à 22 MW, embarque la quatrième génération de moteurs à aimants permanents qu'ABB a musclée pour plus de puissance et de rendement.

Il bénéficie de la même simplicité de conception qui permet d'accroître la robustesse et la fiabilité tout en facilitant la maintenance.

Des atouts opérationnels au bénéfice des armateurs et exploitants de navires rouliers. Un exemple : conçu pour les faibles hauteurs sous barrot, le propulseur peut se loger sous la cale réservée aux véhicules. Ce sont autant de mètres carrés gagnés sur le pont et de manœuvres automobiles facilitées !

De construction robuste, simple et facile d'entretien, l'Azipod s'est imposé sur 25 types de navires depuis près de trois décennies. Cette nouvelle offre de moyenne puissance vient à point nommé aider le trafic roulier à respecter les normes de performance énergétique et antipollution toujours plus strictes. •



LA COMMANDE ROBOTIQUE OMNICORE™ EN LICE POUR LE PRIX DE L'INNOVATION IERA 2019

La nouvelle génération de commande de robot ABB OmniCore™ est en bonne place pour remporter le prix IERA, qui récompense les meilleures inventions et réalisations dans le domaine de la robotique, sous l'égide de l'IFR *(International Federation of Robotics)* et de l'IEEE RAS *(Robotics and Automation Society)*.

Les commandes robotiques d'ABB sont déjà réputées pour leur précision dynamique et leur rapidité d'exécution exceptionnelles. Avec OmniCore, les développeurs d'ABB ont enrichi ces caractéristiques de nouveaux atouts pour s'immerger dans l'usine du futur : la flexibilité et la connectivité.

Les clients du Groupe utilisant OmniCore ont ainsi la capacité de fabriquer des produits toujours plus variés en lots de petite taille, au même niveau de productivité.

Couplé à la plate-forme ABB Ability™, le coffret robotique OmniCore peut, dès sa mise sous tension, se connecter facilement aux services avancés qui améliorent la performance et la fiabilité, mais aussi se raccorder aisément à une panoplie de bus de terrain, de systèmes de vision et de commandes d'effort pour compléter la solution d'automatisation. Autre avantage : la cybersécurité fait partie intégrante d'OmniCore pour éviter la perte de données et sécuriser la boucle de la connectivité, des données et du contrôle-commande. OmniCore intègre également le logiciel de surveillance SafeMove2 d'ABB qui permet au robot de travailler en toute sécurité aux côtés de l'opérateur, sans compromettre la productivité.

Malgré toutes ces fonctions évoluées, OmniCore n'en reste pas moins d'une utilisation simple et intuitive, et tout aussi facile à programmer avec le nouveau boîtier de commande FlexPendant à écran tactile. •

L'EXPLOITATION PÉTROLIÈRE PREND LE LARGE GRÂCE À L'ÉLECTRIFICATION SOUS-MARINE

En 2013, ABB s'est associé aux géants du pétrole et du gaz Equinor, Total et Chevron pour monter un projet ambitieux : concevoir et tester une solution complète d'électrification sous-marine destinée à l'industrie des hydrocarbures. Face au défi de l'exploitation des ressources situées à la fois très loin des côtes et de la surface, ABB a développé un équipement modulaire dont les composants s'assemblent pour former un système d'électrification sous-marine[1]. Celui-ci se compose de plusieurs variateurs de fréquence, d'un appareillage électrique ainsi que d'un système de protection et de contrôle-commande qui assure le transport, la distribution et la conversion de l'électricité vers les pompes et compresseurs sous-marins. D'une puissance maximale de 100 MW, le système peut fonctionner jusqu'à 3000 m de profondeur et 600 km des côtes, sans aucune maintenance pendant ses 30 années d'exploitation. Pour l'opérateur pétrolier et gazier, l'avantage est triple : moins d'espace occupé par les installations de surface, moins d'émissions de gaz à effet de serre et consommation énergétique réduite.

Par pragmatisme, ABB a fait le choix d'une méthode de conception par étape : chaque composant, module et ensemble a été simulé, testé en laboratoire et sur site, puis qualifié au niveau de maturité technologique 4 selon la procédure RP A-203 de DNV et le standard API 17F pour les systèmes sous-marins de pilotage de la production.

Une fois validé, chaque composant a subi des essais en eaux peu profondes : un prototype de variateur moyenne tension a parfaitement fonctionné pendant plus de 1000 heures[2] en immersion dans un site portuaire protégé.

En juin 2019, c'est un prototype du système complet (deux variateurs en parallèle avec appareillage et contrôle-commande) qui a été testé en eaux peu profondes, cette fois pendant 3000 heures ! Les résultats de l'essai, combinés à toutes les qualifications obtenues, garantissent la fiabilité du système dans les dures conditions des fonds marins. L'industrie pétrogazière ne tardera pas à bénéficier de cette solution d'électrification sous-marine prête à l'emploi. •

Notes

1) Intéressé par ce système ? Pour en savoir plus sur sa conception, son fonctionnement et sa qualification, lisez « L'électrification sous-marine est l'avenir des gisements d'hydrocarbures », p. 44.

2) Pour approfondir la question des technologies utilisées, de l'architecture et des fonctions du variateur sous-marin, rendez-vous en p. 50, « La conversion de puissance colonise les fonds marins ».

DISJONCTEUR CC ÉLECTRONIQUE ULTRARAPIDE

Les systèmes de distribution en courant continu (CC) ont souvent besoin, en cas de défaut, d'une protection ultrarapide capable d'offrir à la fois sélectivité, excellente tenue aux pannes et aptitude à la reconfiguration. La solution ABB ? Un disjoncteur CC à semi-conducteurs de puissance affichant des pertes par conduction extrêmement faibles, une densité de puissance élevée et un temps de réaction très court. Avec un courant assigné de 1000 à 5000 A et une tension de fonctionnement de 1000 VCC, l'appareil est capable de couper un courant de court-circuit présumé de plusieurs centaines de kA, et ce jusqu'à 1000 fois plus rapidement que n'importe quel disjoncteur mécanique.

Ce nouveau disjoncteur électronique est formé par la mise en parallèle de thyristors intégrés commutés par la gâchette à blocage inverse (RB-IGCT), une technologie développée en interne par ABB. Baptisé SS DCCB, le disjoncteur propose deux modes de refroidissement : par eau pour les fortes densités de puissance, ou un mode diphasique plus évolué, qui combine la simplicité du refroidissement par air à la performance du refroidissement par liquide. Ce dernier système, peu coûteux à installer et à entretenir, se caractérise par une grande longévité. La dissipation de puissance est réduite de 70 % par rapport aux autres solutions d'électronique de puissance.

Les systèmes de distribution CC embarqués, capables de gérer d'importants transits de puissance dans un espace restreint tout en affichant de hauts rendements et un faible coût global, ont le vent en poupe avec l'essor des navires tout électriques. Le SS DCCB est le candidat idéal pour ces applications marines, qui seront d'ailleurs son premier terrain d'action. Il s'agit du premier disjoncteur ABB pouvant être directement intégré à n'importe quel réseau de bord CC.

Son architecture modulaire et simplifiée ainsi que ses interfaces numériques décuplent les possibilités d'utilisation, qui ne se limitent pas au seul domaine maritime. Microréseaux CC, systèmes de stockage d'énergie sur batterie, datacenters, infrastructures de recharge de véhicules électriques, entre autres, pourront eux aussi bénéficier de ce disjoncteur dont la commercialisation interviendra dans le courant de l'année. •

LA DÉTECTION D'ANOMALIES PRÊTE MAIN-FORTE AUX ROBOTS

Tout le monde sait assurément ce qu'est une anomalie. Si toutefois vous en doutez, imaginez-vous boutonner votre chemise en décalant un côté d'un cran par rapport à l'autre : dans ce cas, l'anomalie saute aux yeux. Mais quand il s'agit de distinguer une alarme effective d'une fausse alerte déclenchée par un robot industriel, c'est une autre paire de manches !

La détection d'anomalies est une branche de l'apprentissage automatique qui consiste à repérer les écarts importants par rapport à la majorité des observations faites sur des jeux ou flots de données. Cette discordance, pour peu qu'elle se répète, est souvent le signe annonciateur d'un dysfonctionnement ou la confirmation d'un événement nécessitant une intervention humaine.

C'est en étudiant une masse colossale de données historiques que les spécialistes du génie logiciel ABB ont mis au point une méthode statistique permettant de comprendre la distribution des événements affectant les robots d'une usine et d'obtenir en temps réel des informations sur l'état fonctionnel de chacun d'eux. La méthode est conçue pour afficher des scores d'anomalies sur les tableaux de bord d'une flotte de robots, de déclencher des alarmes automatiques, d'exécuter en proactif des actions de maintenance prédictive, de réduire les temps improductifs, d'éviter les micro-arrêts et, au final, de maximiser le taux de rendement synthétique.

L'idée est de fournir aux clients un outil de gestion des paramètres physiques et des alarmes/événements des robots sur une plate-forme de données agrégées. Cette dernière s'accompagnera d'un affichage des rafraîchissements d'état et des tendances de scores, faisant à la fois office d'indicateur précoce de défaillances potentielles et d'aide à l'identification rapide des causes.

Cet outil ABB prendra la forme d'une application d'apprentissage automatique incluse dans la dernière offre de services connectés ABB Ability™. •

EC TITANIUM : SOLUTION MOTEUR-VARIATEUR INTÉGRÉE

EC Titanium réunit un moteur et un variateur de fréquence ABB en un seul pack facile à installer. Prévu pour des applications de 745 à 7450 W, il s'appuie sur le dernier cri des technologies d'entraînement pour offrir une solution ultra-performante, compacte et connectée.

ABB a fait le choix de l'efficacité énergétique et de l'économie avec un moteur synchrone à réluctance assisté d'aimants en ferrite, qui permet de réduire les pertes et d'atteindre la classe de rendement IE5. La solution se distingue également par sa facilité d'installation et sa forte puissance massique (double de celle des moteurs asynchrones).

Qui dit variateur intégré, dit possibilité d'adapter la vitesse de l'entraînement aux exigences du procédé et de faire tourner l'équipement à son point de fonctionnement optimal, gage de longévité, d'économie d'énergie et de conformité normative. C'est la garantie d'un bon rendement total à pleine charge, tandis qu'à charge partielle, cas de figure très fréquent, le rendement peut être de 16 % supérieur à celui d'un moteur asynchrone équivalent.

Autres avantages pour les applications de pompage et de ventilation : une nomenclature réduite puisqu'un même ensemble moteur-variateur peut fournir plusieurs débits. De quoi abaisser les coûts, simplifier l'achat et le montage. Côté raccordement, EC Titanium multiplie les options : connexion câblée, liaison RS 485 ou Bluetooth. Le variateur fait par ailleurs office de capteur pour l'ensemble moteur-variateur, qui peut s'équiper d'un capteur intelligent pour mesurer d'autres paramètres de performance du moteur. Ces données peuvent ensuite être transmises à la plate-forme ABB Ability™, où des algorithmes de détection d'anomalies les analyseront afin de renseigner les systèmes de suivi d'état et de maintenance prédictive. •

LE JUMEAU NUMÉRIQUE DOPE LA PRODUCTIVITÉ DES INSTALLATIONS ROBOTISÉES

Comment répondre efficacement à la demande de personnalisation de masse et de raccourcissement du cycle de vie des produits ? Le jumeau numérique devient aujourd'hui indispensable pour tester différentes configurations industrielles sur une ligne virtuelle avant même de modifier ou de construire une chaîne de fabrication « en dur ».

C'est dans cette optique que la division robotique d'ABB a lancé la troisième génération de son logiciel PickMaster®.

Voilà plus de 18 ans que ce champion de la configuration applicative guide les robots et facilite leur intégration dans les applications complexes de prise/dépose à la volée, d'emballage et de manutention avec système de vision intégré.

Le jumeau numérique livré avec la dernière version du logiciel dope la productivité des lignes d'assemblage : quelques heures suffisent à la mise en service, quelques minutes seulement aux changements de gamme. PickMaster améliore la flexibilité et simplifie l'optimisation des installations multi-robots, avec à la clé une meilleure gestion des flux de produits dans les opérations d'emballage (sachets, barquettes, cartons, etc.), de chargement et de manutention. Adieu mises au rebut et emballages incomplets !

Grâce à cet outil de programmation hors ligne des tâches robotisées, l'utilisateur est en mesure de créer, de simuler et de tester une configuration complète en environnement virtuel, sans jamais interrompre la production. Le jumeau numérique optimise en temps réel le process, qui réagit en conséquence. Nombreux sont les bénéfices pour le client : réduction des risques, des retards et des coûts induits, mise sur le marché accélérée de nouveaux produits grâce à un démarrage rapide et à une montée en charge sans accroc de la production.

L'interface moderne de PickMaster offre aux opérateurs et responsables d'usine une vue d'ensemble et un contrôle global de la ligne. Sa conformité au standard industriel PackML assure la cohabitation avec d'autres machines d'emballage et l'intégration transparente aux systèmes de planification de l'usine et de la fabrication.

Disponible dans une multitude de configurations, PickMaster est compatible avec tous les robots ABB ainsi qu'avec de nombreuses machines virtuelles et physiques. Il est parfaitement adapté aux usines et lignes de production les plus exigeantes en matière de rendement, de réactivité et d'adaptabilité. •

TURBOCOMPRESSEUR A200-H : LA PERFORMANCE SANS L'ENCOMBREMENT

Le turbocompresseur A100-H d'ABB est actuellement LA référence en matière de suralimentation mono-étagée, avec des valeurs maximales impressionnantes : rapport de compression de 5,8, rendement de 66 % et pression moyenne effective (pme) au frein de 22 bar. Et pour les pme plus élevées, ABB a encore la solution avec son turbocompresseur bi-étagé Power2®. Problème : entre 22 et 24 bar de pme, la configuration à deux étages risque fort d'être trop complexe.

C'est pourquoi ABB a développé un nouveau turbocompresseur mono-étagé plus puissant. Baptisé A200-H, il surclasse l'A100-H dans tous les domaines : rapport de compression (jusqu'à 6,5), rendement (supérieur à 69 %) et pme (environ 24 bar). Un supplément de puissance idéal pour les moteurs à grande vitesse.

La turbine a été dimensionnée de façon à obtenir le meilleur rendement de suralimentation possible sans pénaliser la tenue mécanique des composants. Les contraintes pesant sur l'enveloppe ont été minimisées dans l'optique des futures applications d'écrêtage des pics de charge, qui pâtissent de nombreux cycles de marche/arrêt[1].

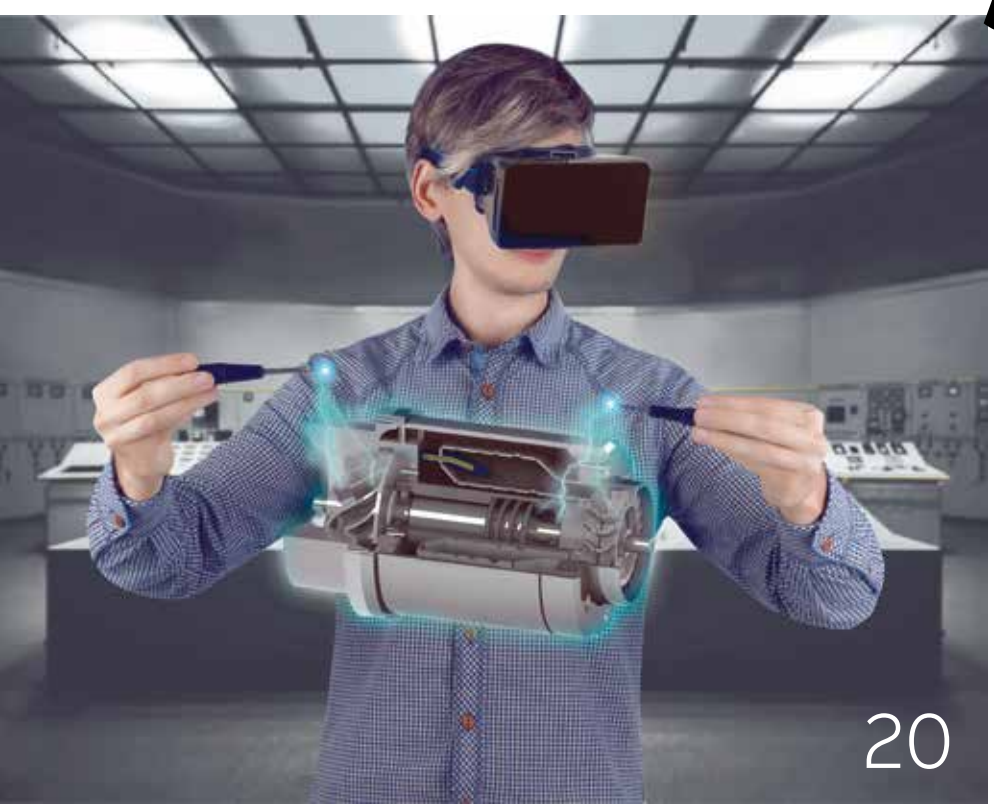
Le client a, pour la première fois, la possibilité de choisir entre deux systèmes de paliers grâce à un support modulaire breveté ABB qui peut accueillir aussi bien des paliers lisses ABB que des nouveaux roulements à billes ultra-performants. À charge partielle, la perte d'énergie engendrée par ces derniers ne dépasse pas 15 % de celle des paliers lisses. Le temps de montée en charge est réduit de 15 % également.

Des sondes embarquées surveilleront la vitesse, la température, le nombre de cycles, les conditions ambiantes et bien d'autres paramètres ; la surveillance pourra aussi s'appuyer sur les données fournies par le groupe électrogène. Cette mine d'informations permet d'évaluer la durée de vie des composants en fonction de leur sollicitation et peut même donner lieu à une extension de la durée de vie de l'équipement, ce que ne permettent pas les solutions classiques. •

Note

1) Pour en savoir plus, lire « A200-H, la référence en suralimentation mono-étagée », p. 56-61.

L’usine intelligent



20

24

te

Le numérique bouscule des pans entiers de l'économie, de la culture… et de l'industrie. Quelle forme revêt ce bouleversement sans précédent et qu'implique-t-il dans l'évolution de nos outils, de nos modes de pensée et de notre vision du fonctionnement de toute l'entreprise ? Là encore, l'innovation ABB est force d'inspiration.

20 L'usine du futur se décline en numérique
24 Repenser l'innovation à l'ère de la quatrième révolution industrielle
30 OPC UA et TSN, au cœur des réseaux industriels de demain
36 Créer de la valeur par l'innovation collaborative

ABB

L'USINE INTELLIGENTE

L'usine du futur se décline en numérique

L'industrie est à l'orée d'une nouvelle révolution, celle du numérique : une lame de fond appelée à bousculer l'organisation de l'usine, les relations clients-fournisseurs et même la formation aux métiers de demain.

Reiner Schönrock
ABB Corporate Communications
Zurich (Suisse)

reiner.schoenrock@ch.abb.com

Augmenter la productivité, raccourcir le cycle de vie produit, fabriquer en masse du sur-mesure, tout cela dans le strict respect des normes techniques et environnementales… mais aussi gagner en performances et en fonctionnalités pour améliorer la communication, l'analyse et la présentation des données : toute la chaîne de valeur et l'organisation de l'entreprise connaissent une profonde mutation. Pour rester concurrentiels dans cet environnement de rupture et être capables de fabriquer des produits ultra personnalisés en très petits lots, de manière efficace et durable, les industriels ont besoin d'un écosystème bâti sur des solutions et des services nourris de données massives et hyper connectés. Bref, d'une révolution numérique !

En améliorant la connectivité, la compatibilité et la collaboration, le numérique rend les procédés manufacturiers et continus plus flexibles, plus productifs, plus efficients que jamais. Qu'elle s'appelle « 4e révolution industrielle », « Internet industriel des objets », « Industry 4.0 » ou « Made in China 2025 », cette mutation ne se contentera pas d'optimiser chaque étape de la fabrication ; elle révolutionnera de bout en bout la chaîne de valeur et les écosystèmes de l'entreprise. Dans ce contexte, ABB s'inscrit en acteur majeur de la fourniture de solutions numériques pour l'industrie, en grande partie sous la bannière ABB Ability™.

Il est cependant un préalable incontournable à cette évolution : la connectivité de toutes les ressources et forces vives de l'appareil productif, à savoir ses outils, machines, matières, opérateurs, etc. →01. De quoi faire le lien entre la réalité physique du terrain et le monde virtuel, interconnecté, du numérique. Mais rien de tout cela ne sera possible sans protocoles de communication, formats de données et interfaces matérielles standardisés. D'où l'implication d'ABB dans les grandes instances de normalisation mondiales.

—

En améliorant la connectivité, la compatibilité et la collaboration, le numérique permet de gagner en flexibilité, en productivité et en efficience.

Car c'est en « parlant le même langage » que les actifs industriels sont à même de comprendre le sens des informations de l'usine, de s'envoyer des messages et d'y répondre, afin d'interagir en parfaite autonomie et d'accomplir les tâches requises. La mise en œuvre de technologies de pointe comme l'intelligence artificielle est l'un des axes de recherche-développement d'ABB pour « autonomiser » la production.

Le jumeau numérique, double virtuel d'un actif physique, est à ce titre un levier de transformation. Il promet d'écourter notablement les temps de développement, de fabrication et d'essai, tout comme d'alléger les coûts de prototypage et de montée en charge de la production. Mais à condition de disposer de données homogènes et

—
Le cobot à deux bras YuMi® hisse la collaboration homme-machine vers des sommets de productivité.

01

cohérentes à tous les stades du cycle de vie d'un produit, d'un système ou d'un site industriel. De fait, le jumeau numérique peut servir à améliorer les détails d'un seul maillon ou à optimiser des pans entiers de la chaîne de valeur.

Des mesures d'intégrité et de sécurité visent à garantir tout du long un traitement exhaustif et fiable des données, sans risque d'altération ; c'est le seul moyen d'acquérir les informations nécessaires à l'optimisation du procédé.

Le numérique vise à faciliter le quotidien des opérationnels, pas à se substituer à eux. Le but est de laisser aux systèmes autonomes le soin d'accomplir des tâches dangereuses, rébarbatives ou épuisantes, et de prendre des décisions dans les domaines où l'humain n'est pas indispensable. Pour autant, il n'y a de véritable autonomie décisionnelle que si ces systèmes sont capables de faire les bons choix dans des situations pour lesquelles ils n'ont pas été formés ni programmés →02.

Autre vertu de l'automatisation : la création d'emplois qualifiés. Selon une étude mandatée par ABB, mieux se préparer aux métiers d'avenir exige que les pays, même bien lotis, repensent leur système éducatif ainsi que leur politique d'apprentissage et de formation. Le Groupe s'y attèle déjà en créant des « espaces de travail numériques » et en dispensant à ses employés des formations intensives à l'usine automatisée du futur. Il intervient également dans la sphère universitaire, avec notamment la création, en 2007, de la Fondation ABB Jürgen Dormann, qui octroie des bourses aux étudiants en génie électrique les plus méritants et nécessiteux du monde entier. Autre exemple : depuis 2016, le Prix de la recherche en l'honneur d'Hubertus von Grünberg récompense tous les trois ans un travail universitaire d'exception en énergétique avec, à la clé, une dotation de 300 000 dollars.

—

Le jumeau numérique promet de raccourcir les délais de développement, de fabrication et d'essai.

Au-delà des objectifs d'interopérabilité et d'autonomisation des actifs, la transformation numérique de l'industrie a aussi pour ambition de contribuer à un environnement plus durable. Les technologies du numérique peuvent en effet alléger le fardeau climatique. En témoigne le slogan *Mission to Zero* d'ABB qui entend promouvoir la protection du climat, avec un bilan d'ores et déjà probant : aujourd'hui, le Groupe tire plus de la moitié de son chiffre d'affaires de produits et systèmes écocompatibles. Et le mouvement va

Crédit photo figure 01 : istockphoto.com/monstArrr

—
01 Grâce aux outils de réalité virtuelle qui facilitent la prise de décision et l'accès à l'information dans des domaines aussi variés que la maintenance et la conception produit, l'humain et la machine travaillent plus que jamais main dans la main.

—
02 Il suffit au technicien de scanner le QR code de l'équipement (ici, un variateur ACS880) pour accéder immédiatement à une mine de données.

crescendo. Les automatismes pour le résidentiel et le tertiaire facilitent l'optimisation énergétique et la maîtrise des usages électriques. Grâce au numérique, les économies d'énergie peuvent atteindre 30 %.

ABB, qui a consolidé un grand nombre de ses solutions de numérisation de l'industrie sous l'égide ABB Ability™, ne cesse d'élargir son offre de produits et de services s'appuyant sur cette plate-forme à la pointe de l'innovation. Ce sont aujourd'hui quelque 200 solutions édifiées sur mesure pour coller aux besoins des clients dans nos centres ABB Ability™ Customer Experience.

Révolution en marche

La transformation numérique de l'industrie est protéiforme ; cette expression générique recouvre en fait une multitude de mutations en cours et de concepts intitulés « Industrie du Futur », « 4e révolution industrielle », « Industrial Internet Consortium », etc.

—

Avec ses espaces de travail numériques, ABB entre de plain-pied dans l'usine du futur.

La communication sur chacune de ces initiatives doit s'accompagner d'informations sur la manière dont elles s'inscrivent dans ce changement de paradigme. •

02

L'USINE INTELLIGENTE

Repenser l'innovation à l'ère de la quatrième révolution industrielle

Comment transformer le processus d'innovation pour exploiter au mieux le potentiel du numérique ? Comment identifier des problématiques spécifiques à un domaine ou une technologie pour les transposer à plus grande échelle, voire révolutionner toute une industrie ? Voici quelques pistes tirées d'un livre récemment paru sur les technologies émergentes et les stratégies à mettre en place.

Wilhelm Wiese
Corporate Technology Center India
ABB Global Industries and Services Private Limited
Bangalore (Inde)

wilhelm.wiese@in.abb.com

Alors que se profile la quatrième révolution industrielle et que les produits et les marchés évoluent à un rythme effréné, l'excellence opérationnelle est plus que jamais vitale pour toute entreprise. Dans un monde en perpétuelle évolution, les modèles et pratiques de développement et de déploiement fondés sur un cycle de mise à jour et de maintenance de plusieurs mois, voire de plusieurs années, ne sont plus adaptés. Suivre ce rythme exige un changement de paradigme dans le processus d'innovation appliquée aux produits, aux technologies et aux solutions.

L'industriel a besoin d'identifier les problèmes spécifiques à un domaine ou une technologie qui sont transposables à plus grande échelle.

La tendance est aujourd'hui au développement de solutions. Dans cette optique, nombreux sont les industriels à vouloir amorcer le virage du numérique ou passer d'une logique produit à une approche orientée solution. Mais pourquoi un tel battage ? Cette démarche de progrès n'est-elle pas au fondement même de l'ingénierie ? Le fait est que pour suivre le rythme d'évolution des besoins, voire le devancer, la vraie difficulté n'est pas tant de développer des solutions que d'identifier les problèmes. Pour l'industriel, résoudre un problème consiste avant tout à bien le définir. Dans le cas qui nous intéresse, il s'agit de savoir comment exploiter l'avantage concurrentiel des nouvelles technologies sur les technologies classiques →01. Concrètement, cela revient à dérouler la feuille de route pour identifier les gisements de valeur dans l'atelier et les nouvelles sources de revenus pour l'entreprise industrielle et les prestataires de services.

Plus facile à dire qu'à faire ! Les stratégies numériques innovantes et leurs promesses de productivité, si enthousiasmantes lorsqu'elles sont annoncées en conseil d'administration, peuvent vite tourner court quand il s'agit de les concrétiser. Sous couvert de numérisation, on se retrouve au final avec des solutions classiques qui n'améliorent qu'à la marge la performance des produits et services existants. En outre, il s'avère que bon nombre de ces applications se cantonnent à des marchés de niche et ne sont pas généralisables à grande échelle.

Crédit photo figure 02 : istockphoto

01

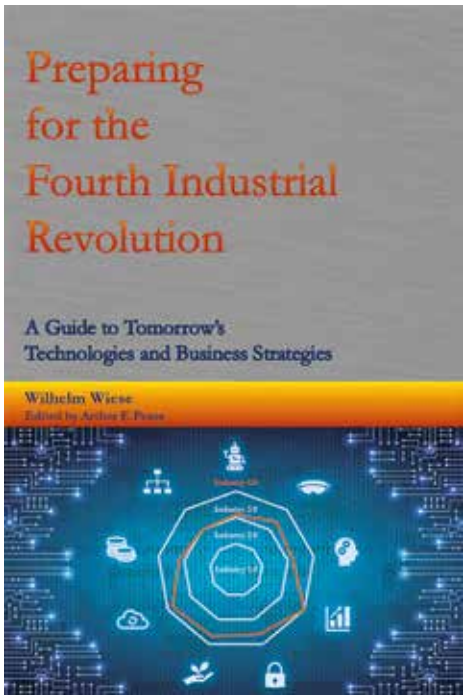
—
01 Piloter les procédés industriels nécessite de faire le lien entre des centaines de variables. Un nouveau module d'analytique développé par ABB utilise les données massives (*big data*) pour détecter des phénomènes suspects et prédire très finement les événements indésirables.

—
02 L'ouvrage de Wilhelm Wiese, directeur du centre technologique ABB de Bangalore (Inde), sur lequel s'appuie cet article (ISBN 978-1-6871-4652-6, 2019)

Même s'ils peuvent être bénéfiques à l'entreprise et faire le bonheur des équipes opérationnelles, ces faux-semblants de solutions numériques ne font pas pour autant décoller la productivité pour améliorer les résultats financiers de l'industriel, ni grimper les ventes du fournisseur de l'application ! Pour profiter de la manne de plusieurs milliards de dollars que promet cette nouvelle ère industrielle, les entreprises doivent réinventer les technologies actuelles. Il leur faut partir de l'atelier pour identifier les problèmes spécifiques à une filière ou une technologie, et transposables sur plusieurs sites ou secteurs, dans une optique de révolution globale de l'industrie →02.

—

Les problèmes mal définis ou épineux, qualifiés de « vicieux », ne sont pas à éviter car ils peuvent bien au contraire s'avérer très utiles à l'élaboration d'une solution.



02

Tout développement doit donc commencer par l'énoncé du problème en question et le chiffrage de la valeur apportée par la solution. Ce n'est qu'ensuite que peuvent être lancé le processus d'innovation et évaluée la capacité des nouvelles technologies à provoquer une vraie rupture et créer de la valeur pour les clients.

L'énorme potentiel des problèmes « vicieux »

Par où commencer ? On peut par exemple s'appuyer sur les fondamentaux d'une démarche très en vogue inspirée du design, le *design thinking*. Selon Plattner, Meinel et Leifer [1], cette méthode de conception créative comprend cinq phases : (re)définition du problème, détermination et étude des besoins, co-création, développement et validation. Ces phases ne s'enchaînent pas forcément et peuvent se chevaucher : à mesure que l'équipe projet affine ses idées et explore de nouvelles pistes, elle peut revenir plusieurs fois sur les étapes d'inspiration, de co-création et de réalisation du projet.

Cette méthode est particulièrement efficace pour des problèmes qualifiés par Horst Rittel et Melvin Webber de « vicieux » (*wicked*), c'est-à-dire mal définis ou difficiles, voire impossibles à résoudre [2]. Loin d'être rebutants, de tels problèmes sont au contraire très prometteurs. En effet, l'erreur serait de limiter notre réflexion aux problèmes bien cadrés qui tendent à déboucher sur des solutions à base de règles ou de techniques éculées.

Pour représenter ces problèmes vicieux dans les processus décisionnels de l'écosystème 4.0, inspirons-nous de la fenêtre de Johari →03a [3].

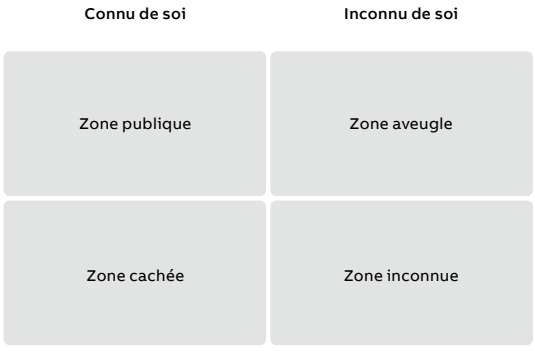
Créé par des psychologues à destination des groupes d'entraide, cet outil aide les participants à mettre au jour des problèmes jusqu'alors cachés en vue de trouver des solutions nouvelles. Notre variante industrielle →03b est divisée en quatre quadrants représentant chacun un grand domaine de solutions, à commencer par celles qualifiées d'« incrémentales » : celles-ci répondent à des problèmes connus de soi et des autres acteurs du secteur visé, que l'on pourra sans doute vite résoudre avec les technologies modernes ou moyennant quelques évolutions par incréments.

Véritable gisement de valeur pour l'usine numérique , les solutions apportées aux problèmes vicieux sont les plus à même de créer la rupture technologique.

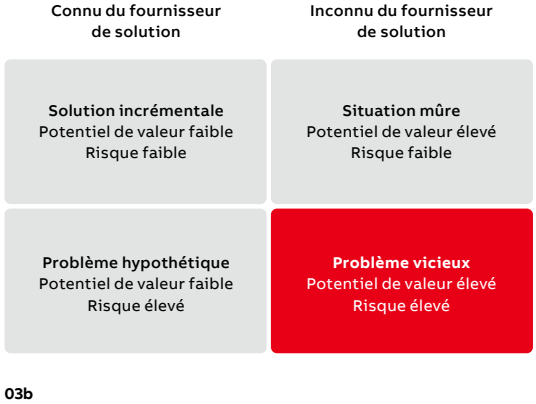
Le deuxième domaine, celui des « situations mûres » concerne les problématiques bien connues des gens de métier, tels les opérateurs de production, qui y voient des gisements d'améliorations, ce qui n'est pas le cas du fournisseur de solutions. Des « ateliers de co-création » peuvent alors être organisés avec le client, où le fournisseur s'imprègne des difficultés rencontrées par l'industriel et apporte son expertise technique à l'élaboration d'une solution. Ces échanges permettent de bien cadrer les problèmes afin de s'orienter vers des solutions reproductibles et transposables à grande échelle.

Le troisième quadrant, les « problèmes hypothétiques », est un domaine à risques : le fournisseur peut investir beaucoup d'argent en développement sans aucune garantie de réussite, la solution n'étant pas considérée comme stratégique ou suffisamment créatrice de valeur.

Le dernier domaine est celui des « problèmes vicieux », véritable moteur de la 4e révolution industrielle. Il est naturellement très risqué : le processus d'innovation étant complexe, certaines idées sont en effet vouées à l'échec. Mais elles sont aussi l'occasion de créer la rupture avec des solutions qui ont toutes les chances de rencontrer un énorme succès.



03a



03b

—
03 Créée par des psychologues à destination des groupes d'entraide, la fenêtre de Johari aide à mettre au jour des problèmes cachés en vue de trouver des solutions nouvelles.

03a Les quatre quadrants de la fenêtre de Johari représentant chacun un grand domaine de solutions.

03b Variante pour l'analyse des problèmes industriels

—
04 Réacteur batch

04

Surmonter un problème vicieux

ABB s'est récemment attaqué à un problème vicieux en collaboration avec un grand nom de l'industrie chimique [4], dont les opérateurs de production étaient ponctuellement confrontés à la formation inexpliquée de mousse dans les réacteurs discontinus →04. Dans les secteurs chimique et pharmaceutique, la production par lots (*batch*) se décompose en plusieurs étapes de transformation suivant une recette stricte jusqu'à obtention du produit final. Dans notre exemple, la mousse donnait lieu à une telle concentration d'impuretés dans le produit qu'il fallait retirer et recycler le lot défectueux. Résultat : dix-sept heures de production perdues, sans compter les temps morts nécessaires au nettoyage des cuves et des conduites.

—

Une rupture conceptuelle dans le processus d'innovation ouvre la voie aux nouvelles technologies de la 4e révolution industrielle.

Les procédés batch transforment des produits répondant à de stricts critères de qualité. Néanmoins, au vu du nombre de variables en jeu, il n'y a jamais deux lots identiques. L'interaction de facteurs comme la qualité des intrants, la taille du lot, la température, l'humidité et autres variables climatiques, peut être source d'anomalies. En outre, la gestion de la production elle-même comprend souvent des centaines de variables process très imbriquées.

C'est pourquoi une surveillance minutieuse des lots s'impose pour comprendre et piloter ce process hautement dynamique. Or, dans notre cas, le client disposait certes d'une grande quantité de données mais n'était pas en mesure de faire le lien entre la centaine de variables de production issues de plusieurs centaines de lots et d'autres données comme les spécifications matières, la consommation d'énergie et les mesures du procédé.

En étroite collaboration avec le client, les experts dépêchés par ABB ont utilisé des techniques d'analytique avancée pour déterminer la cause des défaillances. Ils ont ainsi mis au jour des profils d'exploitation suspects, comme des pics de consommation électrique et des anomalies dans le débit de vapeur. Enfin, ils ont participé à la co-invention d'un outil prédictif très précis, capable de déclencher l'alerte une trentaine de minutes avant l'apparition probable de mousse.

Tout au long de ce partenariat, l'équipe s'est appuyée sur la solution ABB BatchInsight →05, qui associe des techniques d'informatique décisionnelle, d'analyse classique des données et d'apprentissage automatique au service de l'analyse holistique des procédés batch.

Que nous apprend cet exemple ? À l'évidence, ces évolutions radicales dans le développement de solution ouvrent la voie à la mise en œuvre des nouvelles technologies de l'industrie du futur qui sont appelées à jouer un rôle crucial dans l'identification des problèmes mal définis. Cette étape peut par exemple être suivie d'une analyse des causes de défaillance par intelligence artificielle (IA) pour déboucher sur des solutions inédites. Et il suffit d'une intuition initiale pour entreprendre cette exploration approfondie des données et des technologies !

Pour autant, même une intuition exige un déclencheur. C'est pourquoi une visite des installations pour enquêter sur des problèmes de productivité ou de qualité encore inexpliqués est un bon point de départ. Elle donne en général tout un éventail de pistes. De là, différents formalismes à base de questions peuvent être appliqués pour explorer les relations de cause à effet, comme le diagramme en arêtes d'Ishikawa [5]. Dans l'analyse des problèmes vicieux, ce ne sont pas les causes de défaillance qui sont visées par ces techniques de questionnement itératif. Il s'agit de définir le périmètre des données à recueillir et de déterminer la technologie à utiliser pour en déduire une relation de causalité qui ne vient pas d'emblée à l'esprit des personnes concernées : un travail en trois étapes →06.

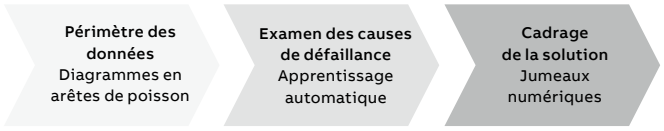
La première consiste à délimiter le périmètre, c'est-à-dire à trouver les données potentiellement impliquées dans le problème mais qui n'ont pas encore été prises en compte.

Dans un deuxième temps, des technologies de pointe (apprentissage automatique, IA) sont appliquées aux données pour explorer les causes de défaillance. Vient enfin la dernière étape, passionnante, de l'élaboration de la solution. Elle commence généralement par plusieurs études de faisabilité et rentabilité fondées sur la construction de modèles ou de jumeaux numériques. Celles-ci sont essentielles car le résultat des algorithmes d'apprentissage automatique est fourni avec une probabilité donnée, qui doit être testée avant toute mise en production.

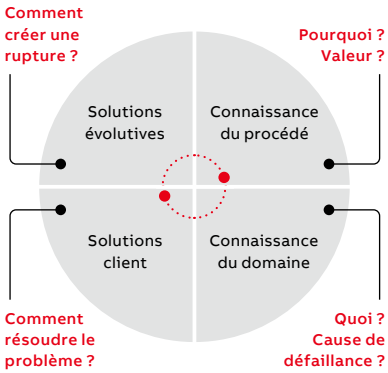
Élaborer une solution à un problème vicieux commence habituellement par des études de faisabilité fondées sur la construction de modèles ou de jumeaux numériques.

Opérateurs, fournisseurs et équipementiers sont-ils en mesure de réaliser ce travail par eux-mêmes ? C'est peu probable. Heureusement, un excellent modèle de résolution de problèmes divise ces tâches en trois volets correspondant chacun à une question : pourquoi ? quoi ? comment ? →07. Cette dernière permet notamment de faire la différence entre la méthode classique de résolution de problèmes et la démarche collaborative propre à induire une véritable rupture.

05



06



07

—
05 Le module Batch-Insight d'ABB associe des techniques d'informatique décisionnelle, d'analyse de données classique et d'apprentissage automatique au service de l'analyse holistique des procédés batch.

—
06 Processus d'élaboration de solutions aux problèmes « vicieux »

—
07 La co-innovation, levier de résolution des problèmes vicieux

Résoudre les problèmes vicieux grâce à la co-invention

Dès l'étape *pourquoi*, le processus d'élaboration de la solution en commun doit s'appuyer sur une compréhension fine des besoins, objectifs et critères de différenciation du client. À défaut, le risque est de ne mettre en œuvre que des correctifs techniques et des solutions partielles. En d'autres termes, l'équipe doit comprendre les processus de production et la chaîne de valeur de l'usine cible, ainsi que leur impact sur la productivité et les caractéristiques des produits.

Ce n'est qu'après avoir clairement énoncé le problème que peuvent être appliquées l'expertise métier et les dernières technologies telles que l'analyse de données massives ou l'apprentissage automatique, pour identifier la cause du problème et, par là même, le *quoi* à modifier.

Le troisième volet, le *comment*, est au cœur du changement de paradigme qui transforme la collaboration en co-invention. Son objectif fondamental n'est pas la résolution immédiate du problème pour un site ou une activité donnés, mais l'utilisation des nouvelles technologies du numérique (IA, systèmes autonomes) pour créer une rupture en matière de productivité ou de caractéristiques produits, qui soit reproduite dans toutes les usines du client, voire tout un secteur.

—
La co-invention appliquée à la résolution de problèmes vicieux libérera le potentiel des nouvelles technologies pour atteindre de nouveaux sommets de productivité.

En somme, élaborer des solutions pour résoudre les problèmes vicieux d'aujourd'hui est une excellente occasion d'exploiter le potentiel de nombreuses innovations de l'usine 4.0. Qui plus est, la mise en œuvre de ces solutions en milieu industriel aura pour effet d'éprouver et d'améliorer en continu les capacités de l'apprentissage automatique. Enfin, cette méthode s'appuie sur la pré-évaluation des solutions, stimulant la création de jumeaux numériques ; ceux-ci produiront à leur tour les données qui étaieront et accéléreront le développement des systèmes autonomes de demain. Autrement dit, la co-invention appliquée à la résolution de problèmes vicieux libérera le potentiel des nouvelles technologies pour atteindre des niveaux de productivité difficilement imaginables avec les solutions actuelles. •

—
Bibliographie

[1] Plattner, H., Meinel, C., Leifer, L., « Design Thinking - Understand, Improve, Apply », *Understanding Innovation*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p. xiv–xvi, 2011.

[2] « Design thinking », *Wikipedia*, disponible sur : https://fr.wikipedia.org/wiki/Design_thinking (consulté le 10 décembre 2019).

[3] « Fenêtre de Johari », *Wikipedia*, disponible sur : https://fr.wikipedia.org/wiki/Fenêtre_de_Johari (consulté le 10 décembre 2019).

[4] L'auteur remercie Benedikt Schmidt du centre de recherche ABB de Ladenbourg (Allemagne) pour les informations sur ce cas.

[5] « Diagramme de causes et effets », *Wikipedia*, disponible sur : https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_causes_et_effets (consulté le 10 décembre 2019).

L'USINE INTELLIGENTE

OPC UA et TSN, au cœur des réseaux industriels de demain

Le tandem formé par les standards de communication OPC UA et TSN, estampillé IEEE, est appelé à révolutionner tous les échelons de la pyramide d'automatisation industrielle, des machines de production à l'informatique de gestion. Mais comment des équipements disséminés dans l'usine (capteurs, actionneurs, automates), aux ressources parfois limitées, peuvent-ils relever les défis de la convergence entre technologies opérationnelles et informatiques ?

Crédit photo : istockphoto.com/industryview

—
OPC UA et TSN promettent de révolutionner la collecte et le traitement des données industrielles, comme dans cette unité de production de panneaux photovoltaïques.

ABB voit dans l'usine connectée un formidable levier de progrès pour les systèmes d'automatismes. Deux standards de communication y concourent : OPC UA et IEEE TSN.

Le standard OPC, basé sur un mécanisme d'échange et d'intégration d'objets indissociable de Windows (OLE), est une interface ouverte permettant à des applications logicielles de communiquer avec n'importe quel équipement industriel compatible. Bâti sur le modèle client-serveur, OPC est une étape décisive vers l'ouverture et l'interopérabilité des systèmes de production hétérogènes. Adieu protocoles maison, pilotes et autres interfaces spécifiquement conçues pour chaque solution : le constructeur n'a plus qu'à doter son matériel d'un serveur OPC, qui se chargera du dialogue avec n'importe quelle application OPC cliente. OPC UA (*Unified Architecture*), dernière version en date du standard, agrège les trois spécifications précédentes d'OPC Classic au sein d'une architecture réseau ouverte et commune (*Open Platform Connectivity*). Elle comble nombre de lacunes de ses prédécesseurs tout en améliorant la flexibilité, la sécurité, la transparence et la fiabilité des échanges et des traitements. OPC UA répond bien mieux aux contraintes d'un nouvel écosystème industriel fondé sur les données, à savoir la volumétrie et la complexité des transferts, que ne pouvaient pas anticiper les premiers développeurs du standard.

La technologie réseau TSN (*Time-Sensitive Networking*), pour sa part, est un ensemble de standards IEEE qui enrichit le protocole OPC UA de fonctions déterministes aux niveaux inférieurs de la pyramide d'automatisation. Le couple OPC UA-TSN est aujourd'hui proposé aux industriels à différents niveaux de maturité technique. À terme, il vise à supplanter les réseaux de terrain [1].

Reste qu'il est difficile d'en doter les équipements de production lorsque ces derniers disposent de ressources limitées. Une équipe ABB a récemment étudié les performances d'appareils de terrain classiques confrontés à l'implantation d'OPC UA-TSN. Un projet baptisé « IIoT (*Industrial Internet of Things*) Device » a permis d'évaluer plusieurs plates-formes matérielles et logicielles dans le cadre de trois démonstrateurs destinés à différents prototypes de produits ABB dotés d'OPC UA, pour lesquels ont été comparées la solution d'automatisation étendue 800xA d'ABB et l'intégration TSN. Deux questions se sont alors posées : le concept d'industrie 4.0 est-il capable d'exploiter le déterminisme des réseaux d'usine et d'améliorer l'accès aux données sous TSN et OPC UA ? Est-il possible de porter ces nouveaux mécanismes dans des produits d'automatismes pour en étoffer les capacités et doper les performances ?

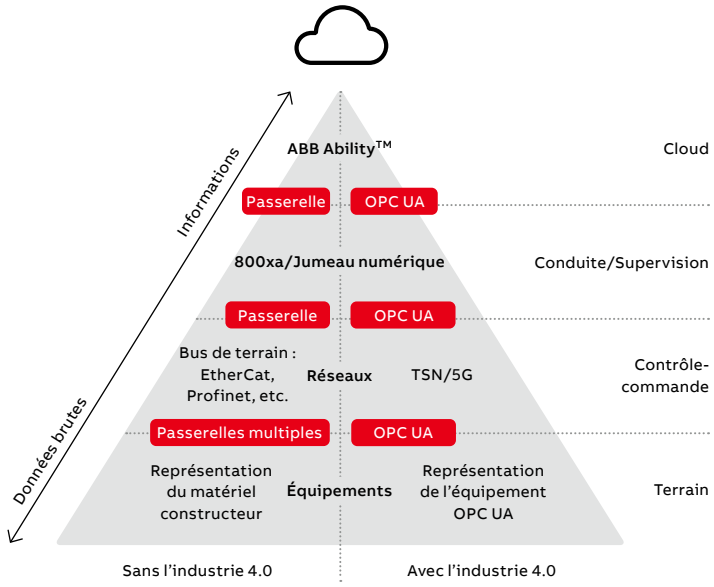
—
OPC est un standard de communication industrielle qui permet à des programmes Windows d'échanger des données avec n'importe quel matériel compatible.

Les nouveaux enjeux de l'automatisation industrielle

Le monde des automatismes fait aujourd'hui face à de nouvelles problématiques comme les analyses de données poussées, l'accès au cloud, l'informatique de périphérie (*edge*), etc., qui impliquent autant de tâches de collecte, de rapatriement, d'affichage, de traitement et de diffusion de l'information.

Alexander Gogolev
ABB Corporate Research
Ladenbourg (Allemagne)

alexander.gogolev@
de.abb.com



01

Il faut en effet prétraiter, filtrer et transmettre au cloud les données récoltées des machines et lignes de production, par exemple. À l'heure actuelle, ces données brutes sont souvent fédérées par des bus de terrain qui respectent des règles de sémantique et de transfert propres à chaque fournisseur d'automatismes. L'accès aux données de production passe obligatoirement par des passerelles dédiées faisant le lien entre les différents formats de données et modes de transport. Grâce au support de transmission TSN, OPC UA peut unifier les modèles d'information de tous les composants du système pour accélérer et fluidifier l'accès aux données →01. Le binôme OPC UA-TSN fournit également de puissantes descriptions sémantiques pour représenter la logique métier de l'équipement ainsi que des communications client-serveur transparentes pour des interactions directes du capteur au cloud.

Autre avantage d'OPC UA-TSN : le passage d'un monde fermé et propriétaire à un standard ouvert et universel.

Photo: ©Istockphoto.com/AleksandarGeorgiev

02

—
01 Évolution de la pyramide d'automatisation

—
02 OPC UA et TSN peuvent unifier les modèles d'information et garantir un transport de données déterministe.

Aux interfaces et protocoles propriétaires s'ajoutent d'autres obstacles aux échanges inter-équipements dans l'atelier. Les applications exigeantes comme la commande d'axes synchronisés, par exemple, demandent de hauts niveaux de performance et un comportement déterministe pour transporter les données entre machines : ce en quoi pèchent les bus de terrain vieux de plusieurs décennies. TSN entend surclasser ces réseaux traditionnels, rendre possible et accompagner la hausse des performances du transport de données.

En somme, la difficulté n'est pas seulement d'unifier des modèles d'information évolués mais aussi d'assurer des communications déterministes au sein des architectures en place. Les promoteurs de l'industrie 4.0 préconisent à cette fin des mécanismes IoT comme OPC UA et TSN, le premier servant de vecteur IoT au sommet de la hiérarchie industrielle, et le second, de support de transmission aux niveaux inférieurs. De quoi fournir deux briques de bases essentielles à l'automatisation industrielle du futur : un transport de données rapide et robuste ainsi qu'une communication client-serveur pour les appareils riches en contenus sémantiques →02.

Un transport de données rapide et robuste et une communication client-serveur pour les appareils riches en contenus sémantiques sont les briques de bases de l'automatisation de demain.

Autre intérêt d'adopter l'association OPC UA-TSN : le passage d'un monde industriel fermé à un univers unifié et standardisé garantissant l'interopérabilité des logiciels, interfaces et modèles d'accès entre gammes de produits. OPC UA-TSN fédère également l'expertise du développement entre différentes activités de l'entreprise, supprimant les doublons ou la redondance dans un éventail de domaines connexes.

Pas si simple…
Si OPC UA et TSN permettent de progresser en fonctionnalités et en performances, des questions demeurent :

- Le marché est-il prêt à migrer d'un monde individuel et fermé, mais néanmoins familier, à un écosystème ouvert et standardisé qui, comme toute nouveauté, garde sa part d'inconnu ?
- Comment évoluer en douceur vers ce nouveau modèle numérique ?
- Existe-t-il des solutions pilotes intégrant OPC UA-TSN ? Quelles technologies et stratégies faut-il mettre en œuvre pour implanter OPC UA-TSN dans un système ?

Avant de sauter le pas, demandez-vous si votre système a vraiment besoin de la grande richesse fonctionnelle d'OPC UA et TSN. En effet, toutes les applications ne réclament pas une réponse déterministe ou une faible latence. Il y a donc fort à parier que le champ d'action de TSN variera en conséquence : classiquement, les connexions au cloud et, dans certains cas, les échanges entre capteurs n'ont guère besoin de TSN, tout comme les terminaisons du flux numérique ne s'accompagnent pas toujours de descriptions sémantiques poussées ni ne réclament un accès uniforme aux données.

L'intégration de la technologie OPC UA-TSN dans les outils de conception et de gestion existants soulève ensuite deux questions qui n'ont rien de futile compte tenu de la multiplicité des systèmes multifournisseurs : quels mécanismes utiliser ? Comment unifier l'ensemble ?

Opter pour OPC UA et TSN appelle d'autres questions cruciales :

- Où le système requiert-il cette nouvelle technologie et dans quelle mesure ?
- Comment incorporer OPC UA et TSN à l'architecture réseau et comment les configurer ?

Rappelons que tout système industriel commence (ou finit) par des équipements périphériques souvent limités en ressources (puissance de traitement, capacité de stockage ou alimentation électrique), circonstances pour lesquelles OPC UA n'a pas été prévu à l'origine. Qui plus est, une prise en charge pleine et entière de TSN exige un matériel spécifique pour fournir des capacités temps réel. Dans ces conditions, quelles améliorations faut-il apporter aux équipements de terrain pour gérer ces protocoles ? et comment les préparer à un environnement 4.0 et IIoT ? La mise en conformité OPC UA-TSN peut s'avérer l'étape la plus délicate de la démarche.

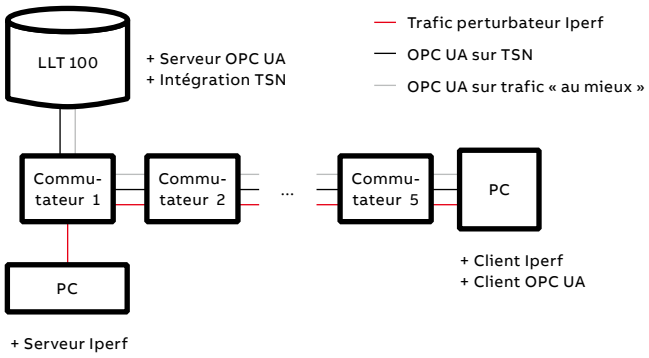
Implantation OPC UA-TSN dans les produits ABB
Une équipe pluridisciplinaire d'ABB a installé OPC UA dans trois de ses appareils : un débitmètre massique à effet Coriolis FCB400, une jauge laser LLT100 et un départ-moteur universel UMC. Le détail de l'opération fera l'objet d'un autre article.

L'équipe en a profité pour plancher sur la mise en œuvre de la technologie TSN dans ces trois prototypes, à l'aide d'équipements tiers. Le banc d'essai comprend plusieurs commutateurs TSN

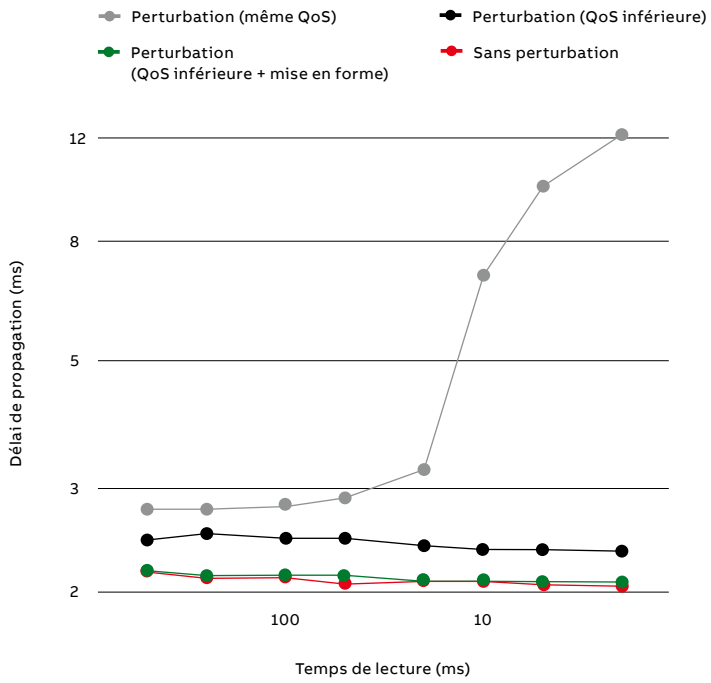
de la société TTTech, deux ordinateurs industriels et des prototypes d'appareils de terrain ABB →03. Le paramétrage est effectué par le logiciel du prototype, qui associe les utilitaires de ligne de commande traditionnels aux nouveaux outils de configuration réseau comme le protocole NETCONF et le langage de modélisation de données YANG.

Grâce à une mise en forme du trafic « sensible au temps », l'infrastructure de commutation TSN peut assurer des échanges temps réel avec une précision atteignant la microseconde. Or les équipements de terrain, bridés par leurs ressources, sont souvent incapables de respecter des délais de transit compatibles avec les fenêtres de transmission et la granularité de l'information observées par les commutateurs TSN. Ces disparités et leurs conséquences ont été étudiées dès les premières étapes de l'évaluation TSN.

L'étude s'est focalisée sur les exigences applicatives que sont la durée des cycles de commande (1 à 5 ms) et le volume des données échangées dans le cas type d'une opération de lecture-écriture sur plusieurs variables. La première phase du projet a évalué la latence et la gigue du trafic OPC UA soumis à différentes charges réseau. Les questions de synchronisation des applications et d'intégration système pour TSN seront traitées dans une deuxième phase et abordées dans un prochain article.



03



04

Essais concluants

L'évaluation a montré que l'on pouvait nettement réduire la latence de transmission OPC UA et resserrer ses limites. Le graphe →04 illustre les différents temps de propagation de requêtes de lecture OPC UA en provenance ou à destination du serveur OPC UA embarqué (en l'occurrence, la jauge LLT100) sur un réseau où 95 % de la bande passante est consommée par un trafic parasite ; la qualité de service (QoS) est également prise en compte. On voit que l'introduction d'un mécanisme QoS suffit à réduire le temps de latence en dépit d'un fort trafic perturbateur. Dans les commutateurs TSN, la QoS classe les trames selon huit niveaux de priorité afin d'assurer la préemption des messages dotés de la priorité la plus élevée. Des outils TSN tels que la mise en forme du trafic « sensible au temps » permettent de réduire encore et de stabiliser la latence OPC UA. Il est donc évident que même une gestion élémentaire de TSN dans le logiciel de l'équipement terminal améliore le déterminisme de l'accès aux données sur une infrastructure compatible.

—

L'évaluation TSN a montré une nette réduction du temps de latence des échanges OPC UA.

Les outils logiciels développés dans le cadre du projet évolueront lors d'une seconde phase d'adoption de cette technologie, qui ciblera l'intégration TSN des automatismes situés en bout du flux de communication numérique.

Le projet IIoT Device a débouché sur de nouveaux prototypes d'appareils embarquant OPC UA, dont certains sont déjà en développement, avec, en prime, des outils et des bonnes pratiques

Crédit photo : istockphoto.com/milanvirijevic

—
03 Configuration du banc d'essai TSN : le trafic perturbateur à haut débit est fourni par Iperf 2.0.5, un outil de mesure réseau très utilisé dans l'industrie.

—
04 Latence d'une requête de lecture OPC UA dans un trafic perturbé sur TSN

—
05 L'usine connectée jouera un rôle clé dans l'avènement de l'automatisation 4.0. ABB y contribue avec sa démarche d'harmonisation et de standardisation OPC UA-TSN.

pour faciliter la mise en place d'OPC UA. Citons notamment un générateur de code automatisé qui traduit les composants du développement (fichiers de description d'équipement, par exemple) en code C prêt à être compilé et chargé dans l'appareil connecté à un serveur OPC UA. Autre exemple : un guide d'intégration matérielle « DI » (*Device Integration*) fournissant aux développeurs de différents horizons un modèle fonctionnel et standardisé de représentation de la logique métier de l'appareil.

Nouvelle donne pour l'automatisation industrielle

On trouve déjà des commutateurs compatibles TSN qui répondent aux attentes déterministes des réseaux opérationnels, tout comme des logiciels client-serveur OPC UA prêts à être intégrés. L'extension OPC UA dotée du mode de communication éditeur-abonné (*Pub/Sub*), particulièrement intéressante pour les applications à hautes performances, ne va pas tarder. Selon la Fondation OPC [2], « *Pub/Sub réussit à faire descendre OPC UA dans les plus basses couches de la pyramide industrielle, là où les contrôleurs d'automatismes, capteurs et dispositifs embarqués nécessitent des réseaux de communication optimisés, à basse consommation et faible latence* ».

Les équipes ABB, ralliées par de plus en plus d'acteurs du domaine, travaillent d'arrache-pied sur la standardisation d'OPC UA-TSN.

Les équipements de terrain ABB sont d'ores et déjà compatibles avec le protocole TSN de base. Une gestion pleine et entière de TSN, matériel compris, est envisageable dans un proche avenir. La question de son intégration totale reste ouverte : en effet, les fabricants de commutateurs ne recherchent pas des solutions complètes mais plutôt des modules complémentaires de configuration réseau. Les fournisseurs d'automatismes, équipementiers et intégrateurs comme ABB maîtrisent les technologies à l'œuvre et détiennent les outils ainsi que l'expertise nécessaires pour décider de l'ampleur du déploiement et de l'intégration de TSN →05. Aussi poursuivent-ils leur collaboration pour élaborer des mécanismes d'intégration normalisés, applicables à toute l'industrie.

05

Pour progresser vers un écosystème 4.0 universel, il faut en harmoniser et normaliser les grandes composantes. Les équipes ABB, ralliées par de plus en plus d'acteurs du domaine, travaillent d'arrache-pied sur la standardisation d'OPC UA-TSN ; ce sont autant de forces de propositions d'améliorations ou d'enrichissements fonctionnels qui doivent à leur tour être harmonisés avec les précédentes spécifications. Si la tâche est immense, la voie à l'adoption des technologies IoT en milieu industriel est clairement tracée. •

Remerciements
Cet article n'aurait pas été possible sans les idées, les contributions et le dévouement de tous les membres de l'équipe, en particulier Francisco Mendoza, Roland Braun, Philipp Bauer et Thomas Gamer.

—
Bibliographie

[1] « OPC UA TSN - A new Solution for Industrial Communication », disponible sur : https://www.automationworld.com/opc-ua-tsn-new-solution-industrial-communication, *AutomationWorld*, 3 mai 2018 (consulté le 3 décembre 2019).

[2] Fondation OPC, « OPC Foundation announces OPC UA PubSub release as important extension of OPC UA communication platform », disponible sur : https://opcfoundation.org/news/press-releases/opc-foundation-announces-opc-ua-pubsub-release-important-extension-opc-ua-communication-platform/ (consulté le 3 décembre 2019).

L'USINE INTELLIGENTE

Créer de la valeur par l'innovation collaborative

ABB a mis au point une méthode de co-innovation en quatre étapes dédiée aux projets d'analytique et d'intelligence artificielle dans l'industrie. En cumulant maîtrise des technologies et expertise des données, cette démarche innovante permet au Groupe de créer des solutions en étroite synergie avec ses partenaires et clients.

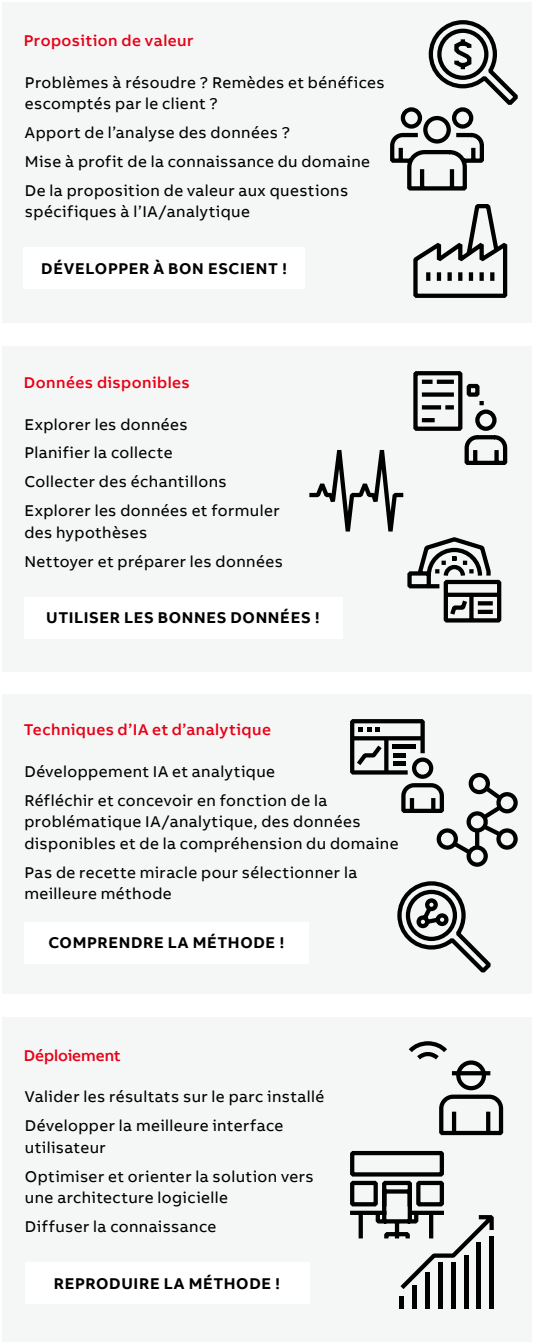
L'analytique et l'intelligence artificielle (IA) gagnent du terrain dans le monde des automatismes et accroissent l'autonomie de l'usine [1,2]. Pour autant, l'IA est une discipline complexe et son intégration à un projet d'automatisation n'est pas en soi un gage de valeur ajoutée : cette dernière exige une stratégie claire, des compétences pointues et une quantité suffisante de données fiables. Quand l'analytique et l'IA sont mises en œuvre à bon escient, elles deviennent partie intégrante d'une solution d'accompagnement global de l'entreprise, qui permet de dégager une importe valeur ajoutée. Ce résultat est la conjonction de trois facteurs déterminants : une expertise en science des données, une parfaite compréhension du domaine et un savoir métier. La recherche-développement collaborative, qui partage et s'enrichit de ces connaissances et expertises, peut étayer la démarche. Fort de ces atouts, ABB a développé et formalisé une méthode inspirée de CRISP-DM [3] pour orchestrer cette intelligence collective.

Mises en œuvre à bon escient, l'analytique et l'intelligence artificielle permettent à chaque partenaire d'une solution d'accompagnement global de l'entreprise d'apporter sa valeur ajoutée.

Cette stratégie s'applique systématiquement aux projets de co-innovation menés avec les partenaires et clients du Groupe dans les domaines de l'analyse avancée, de l'apprentissage automatique et de l'IA. Si la démarche s'échelonne en quatre étapes, elle n'en est pas moins résolument itérative dans la pratique : chaque itération apporte un savoir et une compréhension supplémentaires qui enrichissent la créativité et la chaîne de valeur. Ces dernières années, des experts ABB ont mis en œuvre ce processus collaboratif dans un large éventail de secteurs industriels comme la chimie, l'automobile et l'énergie afin d'identifier, d'exploiter et de générer des données de qualité propres à valoriser les projets d'analytique et d'IA [4,5].

Les quatre temps de la co-innovation

L'innovation collaborative commence par l'élaboration d'un plan d'action en quatre étapes permettant aux partenaires du projet (fournisseurs d'automatismes et clients) de savoir à tout moment où ils en sont dans le processus et de rappeler leurs objectifs →01 :



01

- Identification et proposition de valeur
- Contrôle et collecte des données
- IA et modélisation analytique
- Déploiement

Étape 1 : au cours de la phase d'identification sont organisés des ateliers réunissant clients et intervenants ABB afin d'identifier les pierres d'achoppement, difficultés et problèmes à résoudre ainsi que les acteurs concernés par le projet. Vient ensuite la construction d'une « proposition de valeur », c'est-à-dire la promesse d'une valeur, réelle ou perçue par la clientèle cible, qu'il s'agit de communiquer, de délivrer et de reconnaître. C'est ainsi qu'est formulé le problème d'IA industrielle.

01 Les quatre jalons de la co-innovation ABB orientée analytique et intelligence artificielle

Benjamin Klöpper
Martin W. Hoffmann
ABB Corporate Research
Ladenbourg (Allemagne)

benjamin.kloepper@de.abb.com
martin.w.hoffmann@de.abb.com

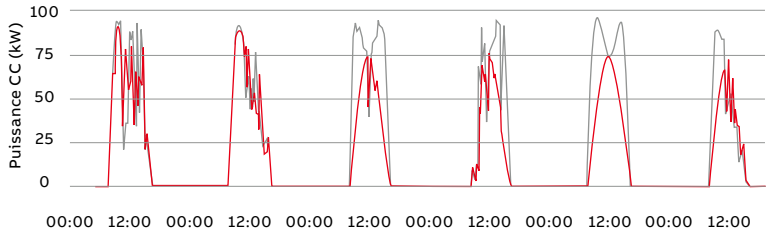
James Ottewill
ABB Corporate Research
Cracovie (Pologne)

james.ottewill@pl.abb.com

Étape 2 : pour réussir un projet de développement analytique et d'IA, il est primordial d'avoir accès à des données pertinentes et de qualité. Cela passe en amont par le contrôle et la collecte des bonnes données.

Dans un premier temps, les experts du domaine et les spécialistes de la gestion et de l'analyse de données massives que sont les *data scientists* se retrouvent à l'occasion d'ateliers ou d'entretiens sur une journée, qui facilitent le partage des connaissances, pour identifier les informations utiles à la résolution de la problématique.

Dans un deuxième temps, ils évaluent la pertinence des données disponibles, puis identifient celles qui font défaut. Les experts se penchent également sur la façon dont la fusion de données hétérogènes émanant d'une multitude de sources (signaux, alarmes, événements, données de l'entreprise, par exemple) peut aider à concrétiser la proposition de valeur.



02

Si la qualité ou la quantité de données s'avère insuffisante, il est possible d'envisager une campagne de collecte, d'installer des capteurs supplémentaires ou encore de substituer aux données manquantes des données issues d'une source non évidente [6].

Étape 3 : les experts en modélisation IA d'ABB commencent par explorer les données et les préparer pour la modélisation. C'est à ce stade que l'on détecte et traite les autres problèmes de qualité [7], identifie les corrélations, élabore les caractéristiques et formule des hypothèses. Les enseignements tirés de ce troisième jalon permettent d'affiner le problème d'IA.

Vient ensuite le cycle d'« entraînement-validation test » : il s'agit pour le *data scientist* de concevoir et d'entraîner les modèles fondés sur les données, de corroborer le modèle sur un jeu de données de validation (ou par validation croisée), d'en préciser les hyperparamètres ou, au besoin, d'en retoucher les caractéristiques.

La méthodologie peut ici revêtir plusieurs formes, des approches purement orientées données (réseaux de neurones, par exemple) aux modèles régis principalement par les lois de la physique, en passant par toutes les variantes intermédiaires.

Des méthodes hybrides sont développées pour mettre à profit les points forts de chaque modèle et en compenser les faiblesses. En s'appuyant sur une double expertise du domaine et des données, la construction du modèle suit un parcours guidé, de la définition appropriée de ses entrées, sorties et structure à l'élaboration d'une fonction coût qui quantifie avec précision la performance du modèle, en passant par le choix de la technique de modélisation adaptée.

Une fois validé, le modèle est testé sur un nouvel ensemble de données, différent de celui ayant servi à l'apprentissage des algorithmes. De plus, des outils d'interprétation permettent d'en étudier le raisonnement au sein de modèles « boîte noire » de type forêt aléatoire ou réseau neuronal artificiel.

Dès ce stade, des maquettes d'interfaces utilisateur sont créées à partir de données réelles ou de prédictions pour accélérer la modélisation et l'évaluation des flux de travail. Ce partage en continu des résultats et des connaissances avec les participants au projet et les clients procure à ABB un précieux retour d'expérience pour améliorer le modèle.

Étape 4 : au stade du déploiement, les canaux numériques, ou « pipelines de données », ainsi que les ressources et processus d'apprentissage automatique issus de la phase de modélisation IA sont mis en production. Il faut pour cela disposer d'un système de réentraînement (à la demande, planifié ou sur événement) des modèles d'apprentissage automatique, ainsi que d'un logiciel servant à tester le modèle afin d'évaluer sa qualité et sa précision, puis à restituer les résultats à l'utilisateur.

ABB a co-innové avec ses clients la chimie, de l'automobile et de l'énergie, entre autres.

C'est avec le client qu'ABB décide du mode de déploiement de la solution : tableau de bord web, application intégrée au logiciel sur site existant, assistant virtuel, par exemple.

03

—
02 L'algorithme distingue parfaitement une anomalie (en rouge) d'un fonctionnement normal (en gris).

—
03 La plate-forme numérique e-mesh™ d'ABB intégrera la solution de co-innovation IA sous la forme d'un complément logiciel dédié à la surveillance, à l'optimisation et à l'amélioration de la production d'énergie décentralisée.

Cas d'usage : suivi des performances d'une centrale solaire
Cette méthode de co-innovation ABB en quatre étapes s'est illustrée avec succès dans une solution d'analytique destinée aux automatismes industriels de l'énergie et des procédés continus, entre autres.

Elle a notamment permis à des experts et data scientists de la filière électrique (réseaux et électrification) de faire équipe avec les centres de recherche du Groupe en Pologne, en Chine, en Suède, en Suisse et en Allemagne pour concevoir une solution innovante d'analyse avancée appliquée à la surveillance des rendements photovoltaïques (PV). Voyons étape par étape le déroulement du projet.

1) Compréhension du problème. Les systèmes de suivi d'état sont en mesure d'accroître le taux de disponibilité et le rendement d'une centrale PV pour en diminuer le coût global. Or la dispersion et la modularité des installations, tout comme leur éloignement et leur fonctionnement autonome, sans présence humaine, posent problème. Aussi les exploitants ont-ils besoin de systèmes de surveillance très précis et performants, capables de relayer les indicateurs de performance et d'état de la centrale, et de pointer les causes de dysfonctionnement potentiel.

2) Formulation du problème. Les coûts induits par l'installation, la configuration et la maintenance d'un suivi d'état autonome, doté de capteurs évolués et taillés pour l'application, mais aussi de câbles et de fonctions pointues de communication, peuvent rapidement dégrader le bénéfice d'un tel système. Or le fournisseur de technologies numériques avancées pour l'industrie qu'est ABB sait parfaitement que les centrales PV utilisent déjà d'importants systèmes d'acquisition et de stockage de données (superviseurs, terminaux de téléconduite, onduleurs et outils de gestion de la maintenance, par exemple). En s'appuyant sur son savoir-faire pluridisciplinaire (solaire PV, électronique de puissance, automatisation, suivi d'état), ABB a évalué l'utilité de ces données à l'aune de la proposition de valeur pour énoncer correctement la tâche analytique.

—

La démarche de co-innovation ABB avec les experts métier du client a débouché sur une solution d'analytique avancée pour surveiller les performances des centrales photovoltaïques.

3) Formulation des données. Forts de ces acquis technologiques et d'un solide socle de connaissances en analytique, les scientifiques d'ABB ont conçu et mis en œuvre des méthodes évoluées de résolution qu'ils ont appliquées à l'analyse pour formuler correctement les entrées, sorties et fonctions coût des modèles de données des composants d'une centrale PV. Le résultat est un système capable d'extraire des données brutes de production des informations significatives, directement exploitables →02 : vitesse de dégradation, diagnostic de défaut, analyse des causes de défaillance, etc.

4) Solution et déploiement. La solution développée englobe toutes les étapes de l'analyse, de l'ingestion et du nettoyage des données à la préparation du modèle et au déploiement. Tout au long de ce processus, ABB s'est appuyé sur l'expérience utilisateur pour améliorer la compréhension du problème et la transparence de la solution.

Ce développement prend aujourd'hui la forme d'une application de la suite e-mesh™ Analytics, qui tournera sous la solution numérique Ability™ e-mesh™ Monitor d'ABB →03,

elle-même construite sur la plate-forme cloud agrégeant les données des actifs énergétiques distribués. Facile à déployer et évolutive, cette innovation ABB fait office de « guichet unique » pour obtenir de précieuses informations sur quantité d'actifs.

Maintenance prédictive de machines tournantes
ABB a également mis en œuvre un programme de co-innovation pour développer une solution de maintenance prédictive de machines tournantes dans une unité de production continue →04 [8,9].

Les équipes du client (responsables de production, opérateurs, fiabilistes) ont collaboré avec les spécialistes ABB des données, des machines tournantes et de l'innovation centrée sur l'usage pour créer une proposition de valeur répondant aux besoins et attentes du domaine. Premier constat : ce type d'usine compte habituellement un grand nombre de moteurs basse tension et de pompes qui tournent non-stop jusqu'à l'incident ou la panne. Or cette profusion d'actifs rend impossibles l'enregistrement manuel des données et l'analyse de l'état fonctionnel de chacun. Toute avarie se solde par la réparation ou le remplacement de l'équipement, ce qui coûte globalement plus cher que d'intervenir en préventif.

1) La proposition de valeur s'est énoncée comme suit : « prémunir l'usine des arrêts inopinés de pompes classiques dans les deux semaines à venir ». Ce qui, en termes analytiques, s'est traduit par : « prédire si une pompe tombera en panne au cours des deux prochaines semaines et, le cas échéant, savoir pourquoi ».

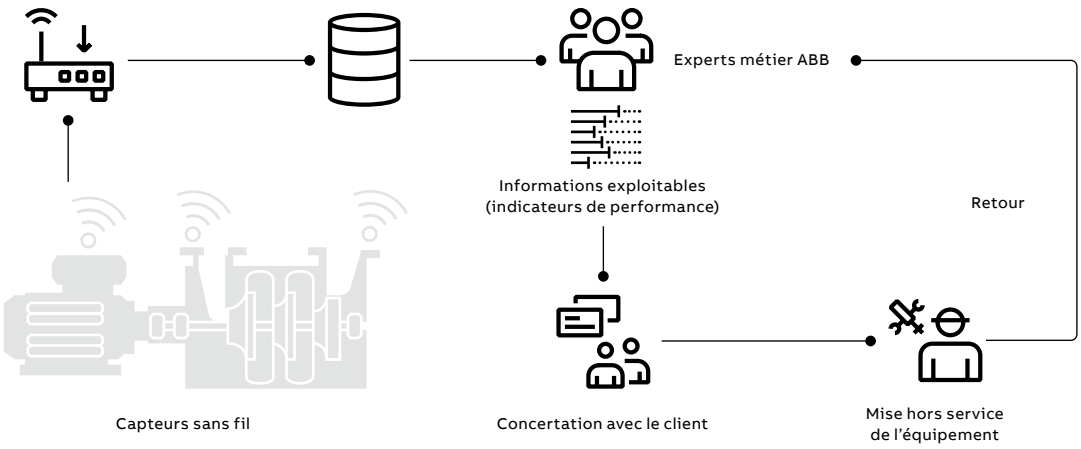
—

En partenariat avec les équipes du client, ABB a mis au point une solution de maintenance prédictive des machines tournantes dans une usine de transformation.

04

—
04 La stratégie de co-innovation ABB appliquée au suivi d'état et à la maintenance prédictive des machines tournantes permet d'optimiser le fonctionnement de l'usine.

—
05 La solution IA est capable de prédire les défaillances sur un horizon de deux semaines.



05

2) L'inspection des données a révélé que la collecte était insuffisante en vue de l'analyse. Les systèmes de suivi d'état n'avaient été déployés que sur les grosses pompes de plus grande valeur ; les équipements moins coûteux, mais qui peuvent aussi grever le budget maintenance, n'étaient pas surveillés au même niveau. Avec l'aide d'ABB, le client a identifié une usine pilote pour installer l'instrumentation sans fil à même de produire les données requises. Grâce à une infrastructure de collecte mise en place par le Groupe, ses data scientists ont pu eux aussi accéder aux données.

—

Data scientists, experts terrain, clients et partenaires font de la R&D collaborative une source de valeur ajoutée pour l'automatisation industrielle.

3) Les data scientists et les experts métier d'ABB ont analysé les données entrantes et identifié des signes de défaillance potentielle →**05** : des diagnostics immédiatement partagés avec le client qui a pu rechercher et confirmer ces dysfonctionnements. Des échantillons de données issus de systèmes sains et des cas de défaillance établis ont permis d'entraîner un modèle d'apprentissage profond capable de prédire la défaillance d'une pompe à un horizon de deux semaines.

4) Ce travail de recherche sur la maintenance prédictive de pompes classiques s'ajoutera au portefeuille ABB de suivi des performances industrielles. L'ensemble constituera une offre de services à forte valeur ajoutée grâce auxquels les experts terrain d'ABB et les responsables maintenance du client seront en mesure de surveiller les actifs en s'appuyant sur des algorithmes IA [9].

Acteurs de la co-innovation

Ce nouveau cadre de R&D collaborative a permis à ABB de développer des solutions d'IA industrielle performantes, taillées sur mesure pour chacun de ses clients. C'est en mutualisant et en partageant la connaissance que data scientists, experts techniques, clients et autres parties prenantes créent de la valeur. Les clients et partenaires du Groupe sont invités à co-innover avec ses spécialistes du domaine et de l'analyse des données pour expérimenter cet édifiant levier de progrès et l'adapter à leurs spécificités. •

—
Bibliographie

[1] Gamer, T., Isaksson, A., « Systèmes autonomes », *ABB Review 04/2018*, p. 8-11.

[2] Gamer, T., *et al.*, « The Autonomous Industrial Plant – Future of Process Engineering, Operations and Maintenance », *12th International Conference on Dynamics and Control of Process Systems (DYCOPS)*, vol. 52-1, p. 435-460, 2019.

[3] Wirth, R., Hipp., J., « CRISP-DM: Towards a standard process model for data mining », *4th International Conference on the Practical Applications of Knowledge Discovery and Data Mining*, p. 1-11, 2000.

[4] Schmidt, B., *et al.*, « Industrial Virtual Assistants: Challenges and Opportunities », *ACM International Joint Conference and International Symposium on Pervasive and Ubiquitous Computing and Wearable Computers*, Singapour, 2018.

[5] Atzmueller, M., *et al.*, « Big data analytics for proactive industrial decision support », *atp magazin*, vol. 58, n° 09, p. 62-74, 2016.

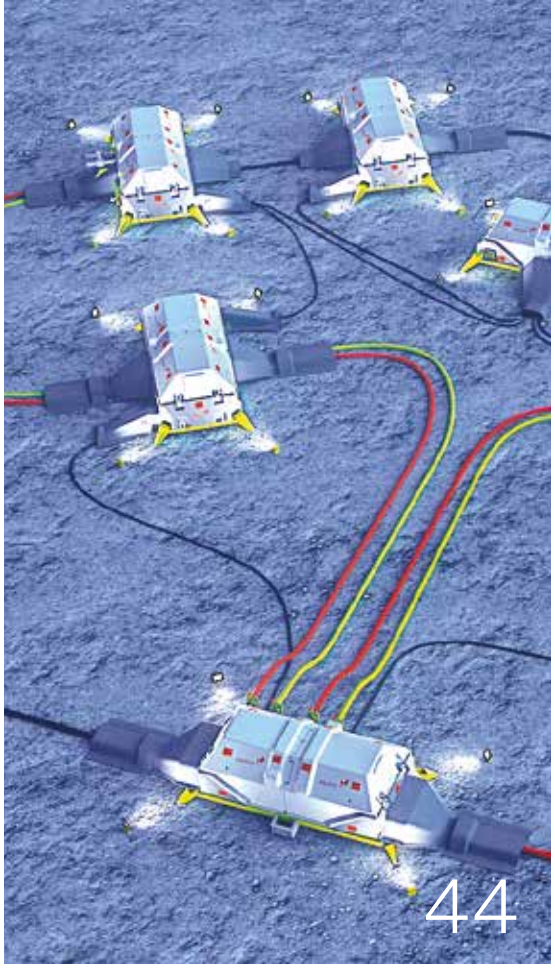
[6] Ottewill, J., « Diagnostic des machines tournantes par analyse des courants moteur », *ABB Review 01/2018*, p. 72-79.

[7] Gitzel, R., *et al.*, « Data Quality in Time Series Data: An Experience Report », *18th IEEE Conference on Business Informatics (CBI)*, 2016.

[8] Amihai, I., *et al.*, « An Industrial Case Study Using Vibration Data and Machine Learning to Predict Asset Health », *20th IEEE Conference on Business Informatics (CBI)*, 2018.

[9] Gitzel, R., *et al.*, « L'apprentissage automatique bouleverse le suivi d'état », *ABB Review 02/2019*, p. 58-63.

Performance de l’extrême

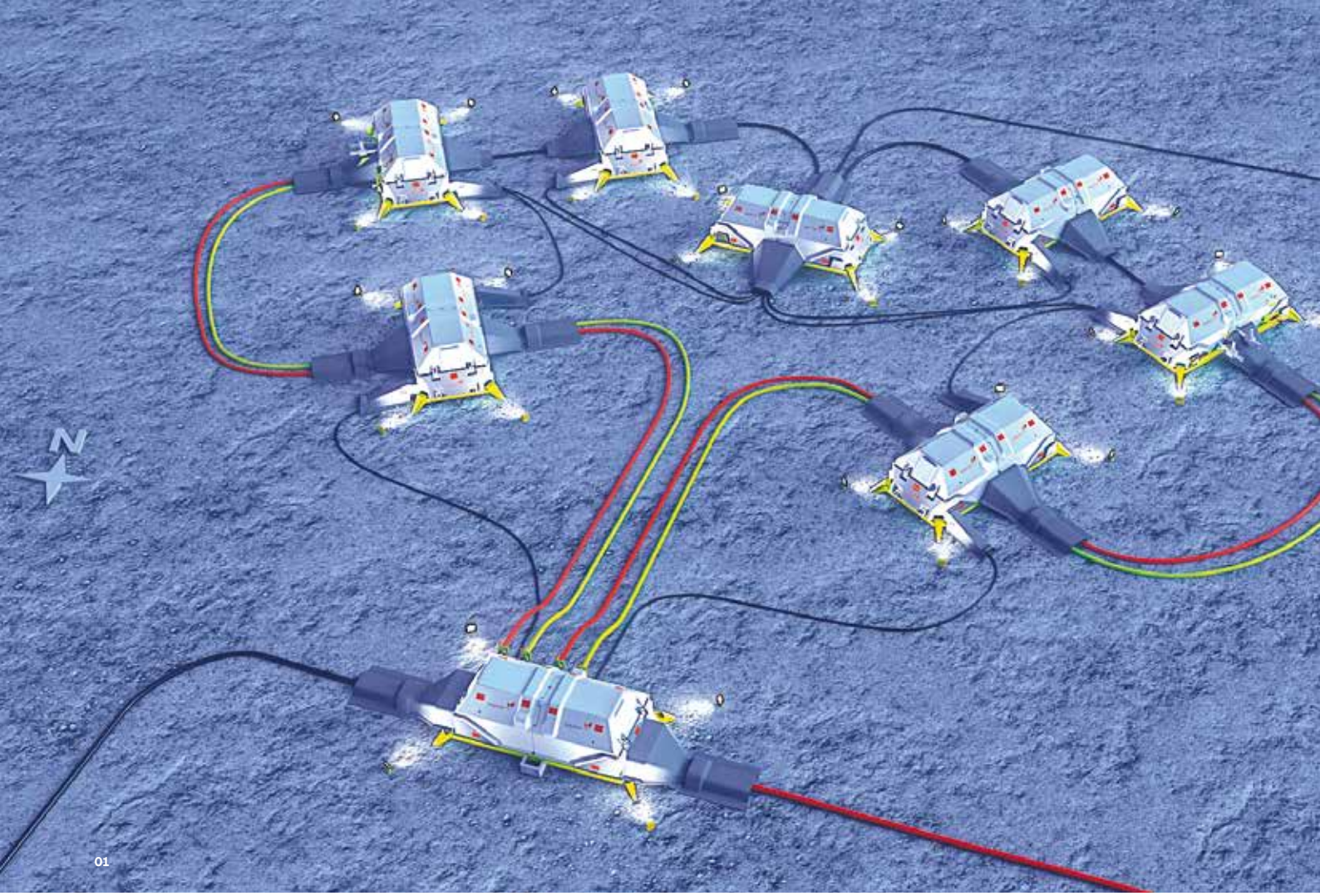


Les fonds marins figurent parmi les endroits les plus hostiles de la planète et constituent à ce titre l'un des meilleurs terrains d'expérimentation pour les technologies d'exploitation et de supervision à distance : des enseignements transposables à bien d'autres applications.

44 L'électrification sous-marine est l'avenir des gisements d'hydrocarbures

50 La conversion de puissance colonise les fonds marins

56 A200-H, la référence en suralimentation mono-étagée

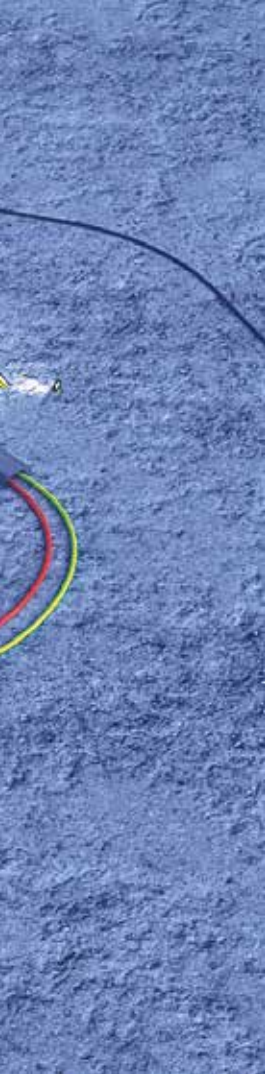


01

PERFORMANCE DE L’EXTRÊME

L’électrification sous-marine est l’avenir des gisements d’hydrocarbures

Les gisements de gaz ou de pétrole *offshore* sont de plus en plus éloignés des côtes et de la surface. Pour les exploiter, le système d’électrification sous-marine ABB est à ce jour sans équivalent en termes de fiabilité, de modularité et de qualification. Ayant réussi haut la main les essais en conditions réelles, le voici prêt à coloniser les grands fonds, ouvrant la voie à une unité de production entièrement sous-marine.



—
01 Vue d'artiste d'un système d'électrification sous-marine (source : étude de cas Equinor)

Si les champs gaziers et pétroliers matures sont de moins en moins accessibles, la demande mondiale en énergie d'origine fossile ne se tarit pas [1]. Les *majors* internationales vont donc chercher ces ressources toujours plus loin et plus profond, ce qui n'est pas sans difficultés [2]. Alors que l'offshore lointain était auparavant considéré comme trop coûteux et trop complexe, l'émergence de nouvelles technologies « intelligentes », fiables et écoperformantes permet dorénavant d'envisager son exploitation sans plomber la rentabilité. Avec les progrès du transport, de la distribution et de la conversion d'électricité sous-marins, l'idée d'immerger toute une installation de production au fond de l'océan ne relève plus de la science-fiction. Foreurs et producteurs pourront alors prospecter et exploiter des réservoirs de plus en plus profonds, petits et distants →01. Pour concrétiser cette vision, le secteur a besoin de matériel extrêmement fiable, capable de se passer de maintenance. Car récupérer un appareil des profondeurs abyssales coûte une fortune !

Dans cette optique, ABB s'est associé en 2013 à Equinor (anciennement Statoil), Total et Chevron au sein d'un projet industriel doté d'un budget de 100 millions de dollars, auquel contribue également le Conseil norvégien de la recherche [3]. Le Groupe, géant mondial de l'électrotechnique et de l'automatisation, a développé un système de transport, de distribution et de conversion de l'électricité destiné aux pompes et compresseurs de gaz sous-marins. Ses caractéristiques impressionnantes (éloignement jusqu'à 600 km, puissance crête de 100 MW, profondeur maxi de 3000 m et fonctionnement presque sans maintenance pendant 30 ans) concrétisent l'ambition d'une installation pétrolière entièrement sous-marine.

La surface n'est pas la panacée

Actuellement, la production d'hydrocarbures offshore repose généralement sur des turbines à gaz installées en surface, sur une ou souvent plusieurs plates-formes fixes ou flottantes, ou même sur des navires. Dans une installation sous-marine, de nombreux câbles acheminent l'électricité vers les points de consommation, pompes ou compresseurs par exemple, implantés au fond de l'océan : on parle d'« extension longue ». Maintenance incessante, support et logistique compliqués, sans compter une production d'énergie externe émettrice de gaz à effet de serre : les installations de surface sont aussi complexes que coûteuses.

Pouvoir distribuer, transporter et convertir l'électricité par de grandes profondeurs d'eau et sur de longues distances, change complètement la donne pour l'industrie pétrogazière. Installé à proximité de la charge, le système électrique diminue l'encombrement et la masse des unités de surface, réduit le temps de réponse en tête de puits, les besoins de puissance et l'empreinte carbone de l'installation. ABB a apporté son expertise technique à ce projet de grande ampleur, étape cruciale pour l'avènement d'une « usine sous-marine » complète.

—

Avec les progrès de l'électrification sous-marine, implanter des installations de production complètes au fond de l'océan ne relèvera bientôt plus de la science-fiction.

La conception à l'appui de l'électrification sous-marine

La méthode novatrice adoptée par ABB a débouché sur une solution d'électrification flexible et modulaire, qui s'appuie sur des produits ayant fait leurs preuves en environnement sous-marin :

- Variateurs de fréquence ;
- Appareillages moyenne tension (MT) ;
- Matériels de contrôle-commande et de distribution basse tension (BT).

Depuis 1999, date à laquelle ABB a inauguré le premier transformateur sous-marin au monde, le Groupe n'a eu de cesse d'améliorer la polyvalence, la robustesse, la puissance et la fiabilité de ses produits. La réussite de ce projet tient en grande partie à une compréhension approfondie des propriétés thermiques et électriques des composants, équipements et ensembles soumis à des contraintes particulièrement fortes.

—
Stian Ingebrigtsen
ABB AS Energy Industries
Bergen (Norvège)

stian.ingebrigtsen@no.abb.com

Svein Vatland
ABB AS Energy Industries
Oslo (Norvège)

svein.vatland@no.abb.com

Heinz Lendenmann
ABB System Drives
Västerås, (Suède)

heinz.lendenmann@se.abb.com

02a

02b

ABB a élaboré un programme de qualification rigoureux, s'appuyant sur les recommandations et les niveaux de maturité technologique définis dans la certification DNVGL-RP-A203 pour les technologies de prospection et d'exploitation d'hydrocarbures en mer. Ont également été mis en œuvre les exigences relatives aux équipements et systèmes de surface, la spécification API 17F de l'Institut américain du pétrole portant sur les systèmes sous-marins de pilotage de la production, des essais de vieillissement accélérés, ainsi que la spécification interne TR3025 d'Equinor concernant les niveaux d'immunité des équipements et marges de conception des systèmes. Cette méthodologie systématique couplée à une communication intense entre les experts métier des partenaires industriels a garanti une identification précoce des évolutions et améliorations nécessaires, ainsi qu'une excellente gestion des risques résultant d'un fonctionnement fiable dans les limites spécifiées. Les industriels du pétrole et du gaz ont ainsi l'assurance que toutes les technologies développées seront aptes à fonctionner dans l'environnement hostile des grandes profondeurs.

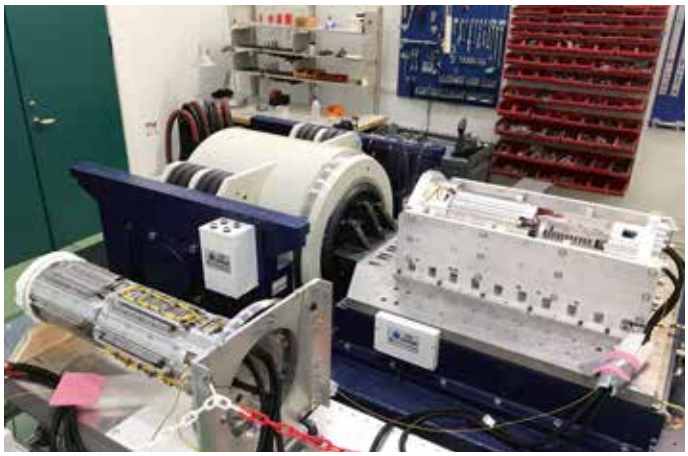
—

Le système ABB achemine l'électricité jusqu'aux charges situées à 600 km des côtes et 3000 m de profondeur.

Qualification de la commande électronique sous-marine

Le système de protection et de contrôle-commande, « cerveau » de la solution globale, se compose de divers modules : distribution, conversion, alimentation auxiliaire et pilotage de la fourniture électrique. Le système doit en effet alimenter des charges situées jusqu'à 3000 m de profondeur et 600 km des côtes : une prouesse technologique inédite.

La conception des équipements et systèmes, contrôle-commande inclus, s'est faite selon une approche pragmatique et progressive, de l'idée première aux derniers tests. Des procédures ont été élaborées afin de comprendre le comportement et les limites de tous les éléments constitutifs de la solution (matériaux, pièces, composants, appareils, sous-ensembles et ensembles). L'alliance de la simulation, des essais en laboratoire et sur le terrain a permis de modifier la conception selon une approche cyclique et itérative, faite d'essais successifs →02. Par exemple, le matériel de contrôle-commande a été testé en environnement difficile d'accès pour reproduire les contraintes du milieu sous-marin : certains paramètres ont alors révélé, par intermittence, des écarts qui ont disparu dès le retour à la normale. Leur enregistrement perturbographique a permis aux experts d'en analyser les causes de défaillance. Ces allers-retours entre conception et essais, riches d'enseignement, sont venus à bout des plus grandes difficultés de conception et ont débouché sur la qualification de l'ensemble des composants, sous-ensembles



03

et ensembles. Ainsi le module électronique sous-marin était-il qualifié avant même le début des essais sur site en conditions quasi réelles →03.

Conception et qualification des variateurs
Piliers de la solution d'électrification sous-marine, les variateurs régulent la vitesse et le couple des moteurs d'injection d'eau de mer, de surpression et de compression. Ils doivent donc être à la fois modulaires, compacts, robustes et d'une fiabilité à toute épreuve pour fonctionner durant 30 ans sans maintenance[1].

La tension en sortie du variateur s'étage entre 2,3 et 7,2 kV, voire plus. La fréquence de fonctionnement est limitée à 200 Hz sauf pour les charges de compression haute vitesse d'une puissance inférieure à 5 MVA. Le variateur intègre un filtre en sortie qui maintient la qualité de la fourniture et les transitoires de tension dans les tolérances du moteur et du câblage.

L'appareillage électrique alimente le transformateur intégré au variateur à la tension assignée de 11-33 kV, à la fréquence classique de 50/60 Hz ou très basse de 16 2/3 Hz. Un seul câble suffit pour acheminer cette puissance sur la distance impressionnante de 600 km.

L'architecture modulaire du variateur ABB lui permet de s'adapter à un grand nombre de configurations de moteurs, jusqu'à une puissance apparente de 18 MVA. De quoi faire tourner les plus gros compresseurs sous-marins, moyennant deux variateurs en parallèle →04.

Les variateurs ainsi que l'appareillage MT sont logés dans une cuve d'huile à compensation de pression, l'huile faisant office d'isolant et de réfrigérant des composants de puissance.

L'architecture cellulaire robuste, à base de semi-conducteurs de puissance et de redondances intégrées aux circuits d'alimentation et de commande, réduit la maintenance au minimum. En cas de défaillance d'une cellule, le défaut y reste confiné sans se propager aux cellules voisines, si bien que la perte d'une ou de deux cellules par phase n'interrompt pas le fonctionnement du variateur. Un système de gestion des défauts, lui-même à plusieurs niveaux de redondance, fiabilise la solution.

—

Les allers-retours entre conception et essais sont venus à bout des plus grandes difficultés.

Les principaux composants et sous-ensembles du variateur (fibres optiques et connecteurs inclus) ont fonctionné sans le moindre défaut pendant plus de 3000 heures lors d'un essai sous pression de 345 bar réalisé dans le centre de recherche-développement d'Equinor à Trondheim (Norvège) : preuve était faite que l'appareil saurait résister aux fortes pressions des abysses.

Conception et qualification de l'appareillage électrique
L'appareillage MT d'ABB distribue l'électricité entre le variateur et les autres consommateurs sur le fond marin.

Conçu spécialement pour l'application, il peut aligner six départs avec un disjoncteur d'entrée ou un disjoncteur de couplage pour deux appareillages →05. En entrée, l'appareillage est raccordé au secondaire d'un transformateur abaisseur sous-marin ou directement au câble d'alimentation provenant de la côte ou des installations de surface. Les départs alimentent les charges sous-marines (entraînements des pompes et compresseurs). La modularité et les remarquables caractéristiques assignées du dispositif (tension phase-phase de 36 kV et courant de jeu de barres de 1600 A) s'adaptent à toutes sortes de configurations et de cas d'utilisation. Deux transformateurs abaisseurs intégrés alimentent le système de distribution auxiliaire redondant. Ces circuits fonctionnent de manière indépendante, grâce aux mini-disjoncteurs modulaires BT qui coupent le système et rétablissent la charge auxiliaire connectée, protègent les auxiliaires des défauts et fournissent une entrée

—
02 Plusieurs itérations successives ont permis d'affiner l'architecture de contrôle-commande en intégrant les retours d'expérience des essais précédents.

02a Une des premières versions

02b Dernier essai de qualification du module de commande : la conception a joué un rôle décisif dans le développement du prototype et du produit final.

—
03 Le prototype du module électronique sous-marin, ici sur son socle de montage, est conforme aux référentiels API 17F, ISO 13628-6 et Statoil TR1233v7 de l'industrie pétrogazière.

—
Note

1) Lire « La conversion de puissance colonise les fonds marins », p. 50.

04

05

d'alimentation externe pour la mise à jour des données d'état.

Les composants immergés dans l'huile reprennent la technologie éprouvée de coupure dans le vide ABB. Pour leur qualification, ils ont subi les essais de type CEI/IEEE, des essais sous pression statique et cyclique ainsi que des essais de fermeture-ouverture au courant assigné de court-circuit à 16 2/3 Hz avec asymétrie maximale. Plusieurs modules de disjoncteurs ont été construits puis soumis, avec leurs interfaces de commande électrique et optique, à divers essais de type électriques, d'endurance mécanique et de vibration, entre autres, aux fins d'exploitation et de transport.

Les ingénieurs ont d'abord étudié quatre versions de pôles de disjoncteur à pression atmosphérique, en changeant à chaque fois d'architecture et de matériaux. L'usine ABB de Ratingen (Allemagne) a ensuite construit et testé un prototype du modèle retenu à quatre départs.

Baptême de l'eau

Forts des excellents résultats obtenus en laboratoire, ABB et ses partenaires industriels passent en décembre 2017 à l'étape critique des essais en eaux peu profondes. Un prototype grandeur nature de variateur MT est alors immergé dans le site de test du Groupe à Vaasa. L'appareil a fonctionné pendant 1000 heures en configuration adossée au réseau, celui-ci fournissant uniquement quelques centaines de kilowatts pour compenser les pertes. L'opération fut couronnée de succès : tous les composants électroniques et de puissance ont affiché un excellent comportement thermique quelles que soient les contraintes d'environnement.

—

L'essai de 3000 heures en eaux peu profondes a confirmé l'atteinte du niveau de maturité technologique 4, prélude au lancement commercial de la solution ABB.

En juin 2019, ABB lançait un essai en eaux peu profondes de 3000 heures sur un prototype de la solution au complet →06, à savoir deux variateurs →06c en parallèle, l'appareillage →06a et le contrôle-commande. La réussite éclatante de l'essai attestait que la solution avait atteint le niveau de maturité technologique 4, prélude au lancement commercial de ce remarquable système d'électrification modulaire.

Départ pour les grands fonds

Le raccordement en parallèle de deux variateurs de 9 MVA totalise une charge de 18 MVA, ce qui est suffisant pour couvrir n'importe quel besoin de puissance sous-marine des installations pétrogazières. Autres points forts : l'extrême fiabilité, la flexibilité et la modularité de la solution, qui peut être alimentée depuis n'importe quelle installation de surface en mer ou, mieux encore, depuis la terre ferme.

Cette innovation ABB va au-delà des exigences et qualifications les plus strictes de l'industrie du pétrole et du gaz : une performance que l'on doit aux procédures de conception et d'essai originales mises au point par ABB et à la collaboration de toutes les parties prenantes au projet. La solution d'électrification sous-marine est prête à plonger dans le grand bleu ! •

—
04 Deux variateurs sous-marins montés en parallèle

—
05 Appareillage électrique modulaire à quatre départs : le choix du courant alternatif basse fréquence (16 2/3 Hz) augmente considérablement la distance de transport électrique.

—
06 Équipements utilisés lors des essais en eaux peu profondes (juin 2019)

06a Prototype d'appareillage de distribution moyenne tension

06b Immersion de l'appareillage dans le port de Vaasa

06c Un des prototypes de variateur utilisé

06d Immersion du variateur

06a

06b

06c

06d

—
Bibliographie

[1] EIA, « EIA predicts 28 % energy use increase by 2040 », disponible sur : https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=32912, septembre 2017 (consulté le 28 novembre 2019).

[2] Oekland, O., *et al.*, « Steps to the Subsea Factory », actes de l'*Offshore Technology Conference*, Rio de Janeiro (Brésil), p. 304-313, 2013.

[3] Bugge, J. Ø., Ingebrigtsen, S., « Subsea Power JIP – As Enabler for all Subsea Electric Power Production », actes de l'*Offshore Technology Conference*, Houston (États-Unis), p. 2885-2895, 2017.

PERFORMANCE DE L’EXTRÊME

La conversion de puissance colonise les fonds marins

01

ABB, en étroite coopération avec les industriels du pétrole et du gaz, a mis au point un système d'électrification sous-marine basé sur un variateur de fréquence à compensation de pression. D'une performance inégalée à ce jour, le dispositif entre actuellement en phase finale de qualification et ouvre la voie à des installations sous-marines équipées de pompes et de compresseurs intégrant la variation électronique de vitesse (VEV).

—
01 Prototypes de variateurs sous-marins prêts à être immergés dans le port de Vaasa (Finlande) pour un essai en eaux peu profondes

—
Heinz Lendenmann
ABB System Drives
Västerås (Suède)

heinz.lendenmann@se.abb.com

Tor Laneryd
ABB Corporate Research
Västerås (Suède)

tor.laneryd@se.abb.com

Raphael Cagienard
Thomas Wagner
ABB System Drives
Turgi (Suisse)

raphael.cagienard@ch.abb.com
thomas.wagner@ch.abb.com

Stian Ingebrigtsen
Svein Vatland
ABB AS Energy Industries
Bergen (Norvège)

stian.ingebrigtsen@no.abb.com
svein.vatland@no.abb.com

Kim Missing
Esa Virtanen
ABB Transformers
Vaasa (Finlande)

kim.missing@fi.abb.com
esa.virtanen@fi.abb.com

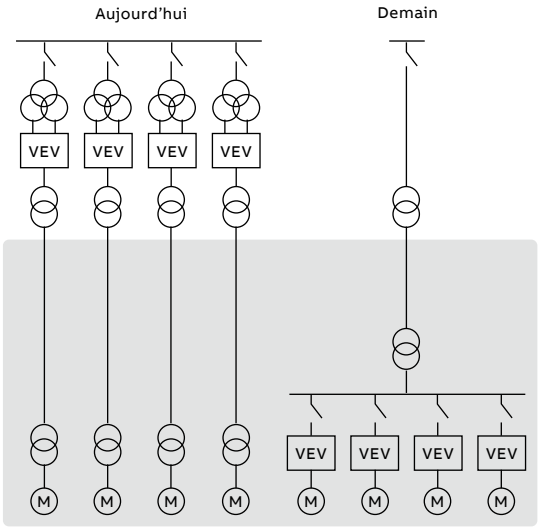
Les gisements pétrogaziers *offshore* se situant de plus en plus loin des côtes, les industriels du pétrole et du gaz s'efforcent sans relâche d'optimiser la production. Dans ce contexte, certains caressent l'idée d'installer tout le matériel d'entraînement et de commande des pompes et compresseurs directement sur le fond marin, à proximité immédiate des stations de pompage et de compression. Et pourquoi pas ?

L'équipement électrique est traditionnellement installé à terre ou sur des plates-formes en surface ; l'immerger au fond de l'océan réduirait non seulement l'encombrement et le poids de la plate-forme, mais aussi les coûts de câblage, d'alimentation et de maintenance ainsi que le temps de réponse à tout changement de variable en tête de puits. Sans compter les gains de fiabilité.

Et si l'on immergeait tous les entraînements et commandes électriques de pompes et compresseurs sous-marins ?

C'est dans cette optique qu'ABB, Equinor, Total et Chevron ont lancé un projet industriel commun visant à développer et à tester des technologies de distribution et de conversion d'électricité sous-marines. Dans un premier temps, ABB a construit un prototype de variateur de fréquence grandeur nature, qu'il a ensuite testé en eaux peu profondes pendant 1000 heures →01. Selon une étude menée par ABB, aucun autre variateur moyenne tension (MT) n'avait auparavant fonctionné à 9-12 MVA pendant aussi longtemps en immersion complète dans l'eau de mer.

Un deuxième essai, plus récent, a été l'occasion de tester le système au complet, avec deux variateurs perfectionnés et raccordés en parallèle



02

afin d'augmenter la puissance de sortie, un appareillage électrique et des dispositifs de contrôle-commande sous-marins.

Percée technologique

Pièces maîtresses du système sous-marin, les variateurs de fréquence ABB sont des mastodontes de 50 tonnes qui commandent les moteurs électriques des pompes et compresseurs de gaz. De conception modulaire, ils s'adaptent à une grande variété de moteurs sous-marins dans des plages de puissance de 0,5 à 18 MVA et de tension de 2,0 à 7,2 kV. Des valeurs qui permettent d'entraîner directement des compresseurs de gaz humide et des pompes classiques à des fréquences comprises entre 20 et 120 Hz, ainsi que des compresseurs haute vitesse (jusqu'à 18 000 tr/min), à des distances pouvant dépasser 600 km.

—

Dans un système sous-marin, un seul câble de puissance à fréquence fixe, tiré depuis la station de conversion, suffit à commander plusieurs compresseurs et pompes.

Tous les modules du variateur sont conçus pour fonctionner à 3000 m de profondeur et sont conformes aux spécifications API 17F et SEPS 1002. Un des essais de qualification a consisté à faire fonctionner un convertisseur de puissance, équipé de tous ses composants électroniques et électriques, dans un caisson hyperbare à 345 bar. Durant 3000 heures, le module a converti dans cet environnement des niveaux de courant allant jusqu'à 1000 A. Cette étape était indispensable pour atteindre le niveau de maturité technologique 4, véritable sésame autorisant la mise en production de l'équipement.

Afin de s'affranchir des limitations liées à la profondeur d'exploitation, la cuve du variateur est à compensation de pression : l'ensemble des composants, y compris le transformateur, baigne dans un fluide diélectrique qui fait également office de réfrigérant. La conception des composants de puissance (condensateurs, semiconducteurs et électronique de commande) intègre des marges de sécurité accrues, une redondance matérielle et une résistance à la pression. Tous les matériaux sont de plus compatibles avec le diélectrique, ce qui garantit la fiabilité exceptionnelle de l'exécution. Pour concevoir et développer ce système, ABB a pu capitaliser sur ses deux décennies d'expertise en transformateurs sous-marins, réputés pour être particulièrement fiables, robustes et sans maintenance. Les nouveaux variateurs ABB, équipés d'un contrôleur ainsi que d'une interface de communication avec la surface, sont logés dans un module de commande électronique sous-marin remplaçable.

Le grand plongeon

En 2019, deux variateurs ont été testés dans les eaux peu profondes du port finlandais de Vaasa. Intégrés à un système électrique sous-marin complet, ils ont fonctionné en parallèle de manière à fournir la puissance maximale nécessaire.

L'essai a duré plus de 3000 heures, soit 125 jours environ. La conversion des 22 kV d'entrée en une tension de sortie comprise entre 6,9 et 7,2 kV, à différents niveaux de puissance, a confirmé le bon fonctionnement de l'ensemble. De plus, la redondance intégrée s'est montrée capable de gérer la tolérance aux pannes comme prévu : en dépit de la coupure intentionnelle (suivie de la reconnexion) de certains des modules depuis la surface, le système a continué de fonctionner.

La conversion sous-marine, une technologie d'avenir

Comme évoqué précédemment, déplacer la conversion au fond des océans offre de nombreux avantages. Fini le câblage en fil à fil de chaque moteur sur des kilomètres de long →02. Autre inconvénient de la conversion en surface : la tension doit être d'abord élevée puis abaissée afin de minimiser les pertes cuivre, ce qui exige deux transformateurs, l'un en surface, l'autre sous-marin [1].

03

—
02 Architecture actuelle et future des systèmes d'électrification sous-marine : l'immersion des variateurs (à droite) réduit énormément les longueurs de câble moteur.

—
03 Les variateurs, traditionnellement installés à terre ou sur des plates-formes, pourraient bientôt migrer vers les fonds marins. Deux prototypes d'appareils sous-marins ont été testés dans les eaux peu profondes du port finlandais de Vaasa, où ils ont fonctionné sans le moindre défaut pendant plus de 3000 heures.

—
Note

1) Lire « L'électrification sous-marine est l'avenir des gisements d'hydrocarbures », p. 44.

Avec la solution ABB, il suffit d'un seul câble de puissance à fréquence fixe, tiré depuis la station de conversion en surface, pour commander plusieurs compresseurs et pompes tapis au fond de la mer. Une « pieuvre électrique sous-marine » [2], déjà dans les cartons des majors du pétrole[1].

Dès le début, il était donc clair pour les ingénieurs en charge du projet que le déploiement sous-marin était LA solution →03. Restait à trouver les technologies pour y parvenir.

Même si l'environnement des variateurs était complètement nouveau et qu'aucune défaillance n'était pour ainsi dire tolérable, l'équipe de conception ne partait pas de zéro. Pour s'affranchir des contraintes des grands fonds, elle savait déjà que l'appareil devait être rempli d'un fluide diélectrique semblable à celui utilisé dans n'importe quel transformateur, qui assurerait la transmission de pression, le refroidissement et l'isolation électrique [3]. Les règles usuelles de conception pouvaient dès lors s'appliquer à l'enveloppe de la cuve, qui n'avait pas besoin de résister à une pression aussi importante que celle endurée par d'autres systèmes. ABB a donc opté pour un mécanisme sous-marin de compensation à soufflet qui garantit une pression interne quasi identique à la pression externe.

—

L'architecture thermique de la cuve doit assurer un refroidissement d'une fiabilité à toute épreuve, même par de grandes profondeurs d'eau.

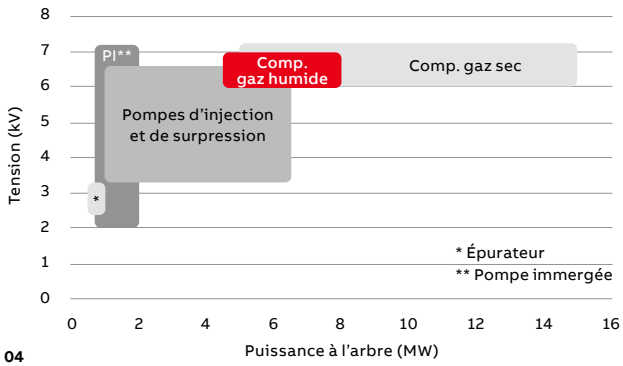
Jusque-là, pas de problème ! Par contre, adapter les composants électriques et mécaniques (condensateurs, semi-conducteurs, électronique et câblage) aux fortes pressions des fonds marins promettait d'être complexe. Il était de plus primordial que l'ensemble des composants soit chimiquement compatible avec le diélectrique et que l'architecture thermique de la cuve assure un refroidissement sans faille, même par les plus grandes profondeurs. Le projet actuel a su lever tous ces obstacles : un net progrès sur les précédentes versions de variateurs sous-marins qui avaient recours à des caissons en acier massif extrêmement lourds pour résister

aux énormes pressions, entravant de fait le refroidissement du dispositif en dépit des faibles températures du milieu marin [4].

À l'évidence, la fiabilité et la sécurité du système exigent que tous les composants restent dans les plages de température assignées. L'équipe projet a eu l'idée d'une méthode de refroidissement passif qui se contente de tirer profit de l'interface entre les parois de la cuve et l'eau de mer afin de dissiper les pertes, selon le seul principe de la convection naturelle. Et ce, sans aucune pièce en mouvement, éternelle source potentielle de défaillance.

Aucun variateur ne pouvant satisfaire à toutes les exigences du cahier des charges, l'architecture retenue devait être modulaire.

L'essai en eaux peu profondes a été l'occasion d'analyser la performance du refroidissement passif à l'échelle du système entier, et d'observer que le comportement thermique de l'intérieur de la cuve correspondait aux calculs : les composants très sensibles à la température pouvaient être maintenus dans un milieu suffisamment froid pour garantir une fiabilité opérationnelle maximale même à des niveaux de puissance élevés. En fait, le convertisseur sous-marin constitue un environnement thermique quasi idéal pour l'électronique, puisque le refroidissement par l'huile assure des températures faibles et constantes. Cette approche s'est avérée efficace et fiable dans toutes les conditions de pression, de température et de salinité de l'eau, qui sont des propriétés bien connues [5].



04

Indispensable modularité

Autre casse-tête pour les ingénieurs de l'équipe projet ABB : les variateurs doivent pouvoir gérer de vastes plages de puissance et de tension →04 surtout en ce qui concerne les pompes de surpression et d'injection, les compresseurs de gaz sec et humide, ou encore les applications de moindre puissance (pompes immergées et épurateurs, par exemple).

En étroite collaboration avec ses partenaires industriels, le Groupe a posé les bases d'un équipement sous-marin commandé en vitesse variable répondant aux spécifications suivantes :

- Tension de sortie : 2,0-7,2 kV ;
- Puissance à l'arbre moteur : 0,3-15 MW ;
- Fréquence de sortie fondamentale : 0-200 Hz (0-300 Hz pour les variateurs de moins de 5 MVA) ;
- Tension d'entrée : 11-33 kV ;
- Durée de fonctionnement : 30 ans ;
- Fonctionnement à 3000 m sous le niveau de la mer, à des températures comprises entre 0 et 20 °C.

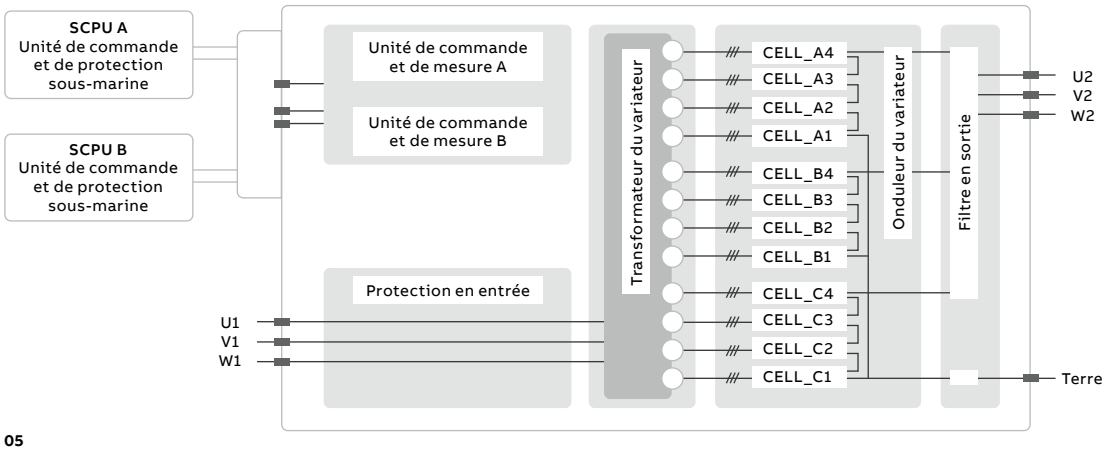
Devant un tel cahier des charges, il était évident qu'aucun appareil ne pouvait remplir toutes les exigences à la fois. La solution résidait donc dans la modularité et, plus précisément, dans le choix d'une architecture cellulaire. Chaque module de puissance constitue une cellule, unité de base de la topologie retenue. Le nombre de cellules raccordées ainsi que leur tension unitaire déterminent la tension de sortie du variateur. Ainsi, la taille de la cellule, directement proportionnelle à son intensité nominale, correspond à l'intensité nominale de conversion.

Chaque cellule des deux premiers appareils était conçue pour un courant assigné de 1000 A. Dans l'optique d'une fiabilité optimale pour une classe de tensions de sortie donnée, il fallut trouver un compromis entre la tension nominale de chaque cellule et le nombre de cellules : une tension plus élevée diminuait le nombre de cellules et donc la complexité du dispositif, mais réduisait également la redondance du système. Cet arbitrage tient aussi compte de la complexité du transformateur.

La cellule se compose de deux demi-ponts de transistors bipolaires à grille isolée (IGBT) et d'une batterie de condensateurs pour le bus à courant continu (CC). Les commandes de grille IGBT sont directement alimentées par le bus CC, sans passer par une alimentation haute tension isolée. Les cellules sont reliées par fibre optique à l'unité de commande et de mesure dans la cuve.

—
04 Applications ciblées par la vitesse variable sous-marine avec les plages de puissance et de tension moteur assignées

—
05 Synoptique fonctionnel du prototype de convertisseur sous-marin



05

Des organes électromécaniques (sectionneurs, by-pass) isolent chaque cellule du circuit principal. Il en résulte un variateur tolérant aux pannes qui peut continuer à fonctionner même en cas de défaillance d'une cellule. Le nombre de cellules au-delà du minimum requis pour fournir la tension de sortie donne le niveau de redondance du système. En plus d'être la brique de base du convertisseur sous-marin, la cellule constitue une unité fonctionnelle complète et, avec la totalité de ses composants, très représentative de l'ensemble aux fins de qualification.

—

La cellule, brique de base du convertisseur sous-marin, constitue aussi une unité fonctionnelle complète.

La figure →05 en illustre le synoptique : le transformateur du variateur alimente l'onduleur et ses cellules ; s'y ajoutent en sortie un filtre moteur et en entrée une protection qui limite les transitoires dans les connecteurs, câbles et moteurs à des niveaux admissibles tout en préservant les composants internes des surtensions dynamiques. La souplesse intrinsèque de ces trois unités autorise des ajustements en fonction du projet sans avoir à requalifier tout le système : il s'agit simplement de réagencer des composants identiques. Cela permet de couvrir toute la gamme de tensions en sélectionnant le bon nombre d'unités à assembler pour construire le variateur. Pour les projets exigeant des niveaux d'intensité plus élevés, il suffit de raccorder en parallèle deux convertisseurs complets qui pourront fournir jusqu'à 18 MVA.

L'essai en eaux peu profondes a confirmé le bon fonctionnement du variateur sous-marin ABB et de ses composants et principes fonctionnels (redondance et refroidissement compris) jusqu'à 1000 A. Le système a ainsi atteint le niveau de maturité technologique 4 et est prêt à être déployé en conditions réelles : mission accomplie ! •

—
Bibliographie

[1] Scheuer, G., *et al.*, « Subsea Compact Gas Compression with High-Speed VSDs and Very Long Step-Out Cables », actes de la 6e *IEEE Petroleum and Chemical Industry Committee (PCIC) Europe Conference*, p. 163-173, 2009.

[2] Snefjellå, Ø. H., « Subsea factory from an electrical perspective », *IFEA Subsea Kraft*, 4-5 février 2014.

[3] Virtanen, E., Akdag, A., « Power below the waves », *ABB Review Special Report Transformers*, p. 33-36, novembre 2012.

[4] Hazel, T., Baerd, H. H., Legeay, J.J., Bremnes, J. J., « Taking Power Distribution Under the Sea: Design, Manufacture, and Assembly of a Subsea Electrical Distribution System », *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 19, n° 5, p. 58-67, 2013.

[5] Lendenmann, H., *et al.*, « Shallow Water Testing of 9–12 MVA Variable Speed Drive for Subsea Installation », *Offshore Technology Conference*, 6-9 mai 2019.

01

PERFORMANCE DE L'EXTRÊME

A200-H, la référence en suralimentation mono-étagée

L'offre de turbocompresseurs ABB se déclinait jusqu'à présent en appareils mono-étagés (A100-H) et bi-étagés (Power2®). Le nouvel A200-H, destiné à la suralimentation des moteurs essence à grande vitesse, vient s'intercaler entre ces deux références : son unique étage affiche un rendement supérieur à 69 %, un rapport de compression pouvant atteindre 6,5 et une pression moyenne effective au frein de 24 bar.

Les moteurs grande vitesse à mélange pauvre et haut rendement sont incontournables dans le paysage énergétique actuel, caractérisé par la quadruple exigence de décentralisation, de flexibilité, de compétitivité et d'écocompatibilité. Ces vingt dernières années, la pression moyenne effective (pme) au frein de ces moteurs a augmenté d'environ 1 bar tous les trois ans, tout comme le rendement électrique. D'où l'obligation d'améliorer le rapport de compression et le rendement des turbocompresseurs.

Le turbocompresseur mono-étagé A100-H d'ABB est le *nec plus ultra* dans son segment : son rapport de compression de 5,8 et son rendement maximal de 66 % conviennent aux moteurs essence à mélange pauvre développant jusqu'à 22 bar de pme. Au-delà, place au turbocompresseur bi-étagé qui, depuis une dizaine d'années, a su s'imposer par ses excellentes performances opérationnelles. C'est le cas, par exemple, du Power2® d'ABB avec son rapport de compression nettement supérieur et son rendement dépassant 73 %. Revers de la médaille, ce turbocompresseur est plus complexe, plus lourd et plus coûteux que ses homologues mono-étagés. En outre, lorsque la pme d'un moteur se situe entre 22 et 24 bar, le turbocompresseur bi-étagé s'avère généralement une solution trop complexe et surdimensionnée puisqu'elle ne donne son plein potentiel qu'au-dessus de 24 bar.

— 01 L'A200-H, chaînon manquant entre les turbo-compresseurs mono- et bi-étagés, ouvre de nouveaux horizons dans de nombreuses applications.

— 02 Rapport de compression des moteurs essence grande vitesse à mélange pauvre

— **Gerald Müller**
Antje Hertel
Franco Domenig
Martin Seiler
Florian Maurer
ABB Turbo Systems
Baden (Suisse)

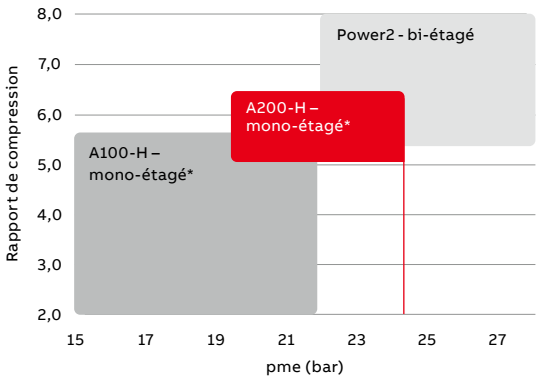
gerald.mueller@ch.abb.com
antje.hertel@ch.abb.com
franco.domenig@ch.abb.com
martin.a.seiler@ch.abb.com
florian.maurer@ch.abb.com

Le nouvel A200-H d'ABB comble le fossé entre les turbocompresseurs mono-étagés et bi-étagés.

Le nouvel A200-H →01 se présente donc comme le chaînon manquant entre les turbocompresseurs à un et à deux étages. Son rapport de compression de 6,5 et son rendement supérieur à 69 % inciteront les motoristes à développer des moteurs haute vitesse offrant une plus grande puissance massique ou capables de fonctionner en altitude. Avec sa pme d'environ 24 bar, l'A200-H a un rendement supérieur à celui de l'A100-H →02, sans étage supplémentaire.

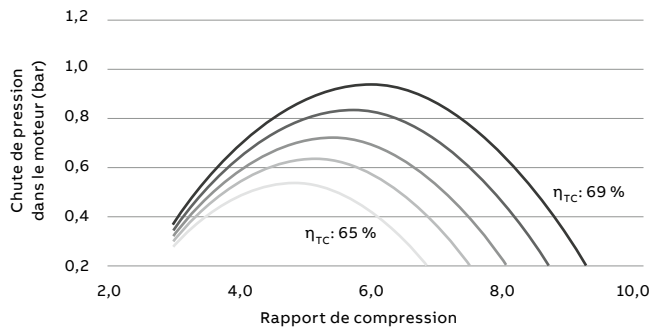
Rendement
Comme illustré en →03, un rapport de compression supérieur doit s'accompagner d'un rendement accru pour maintenir constante la chute de pression dans le moteur (différence de pression entre le collecteur d'échappement et l'entrée de turbine). C'est ce constat qui a poussé les développeurs de l'A200-H à améliorer à la fois le rapport de compression et le rendement global turbocompresseur (η_{TC}) par rapport à l'A100-H.

Étage compresseur
Doper le rapport de compression et le rendement exigeait d'optimiser le débit de suralimentation. L'équipe de conception avait pour cela toute latitude d'augmenter certaines dimensions par rapport à l'A100-H, la configuration à un seul étage restant quoiqu'il en soit toujours plus simple et plus compacte qu'une solution bi-étagée. La réalisation de la roue de compresseur en alliage d'aluminium permet de tirer parti de procédés de

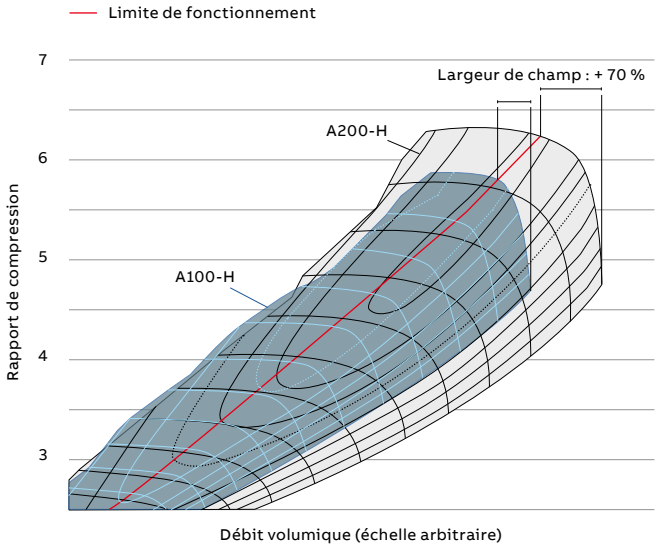


*Conditions ambiantes de base : 500 m, 30 °C (réserve de puissance supplémentaire en fonction de l'altitude)

02



03



04

fabrication efficaces, gages de qualité. Côté performances thermodynamiques, l'alliage d'aluminium offre une durée de fonctionnement de 40 000 heures avant remplacement, voire plus avec une solution numérique (→p. 17).

Optimisation du champ compresseurs

Le champ compresseur de l'A200-H →04 affiche un rapport de compression bien supérieur à 6 en régime moteur nominal. En fonctionnement stabilisé, la limite de fonctionnement doit présenter une marge suffisante par rapport à la limite de pompage. Le champ doit donc être optimisé, au regard non seulement des exigences de rendement, mais aussi de sa largeur. Une attention particulière a été portée à la plage de fonctionnement ; si le rapport de compression peut atteindre 6,5, c'est grâce à la mise en œuvre des dernières avancées technologiques qui permettent au champ de gagner en largeur (+70 % par rapport à l'A100-H).

Dans la droite ligne de la technologie éprouvée des turbomachines ABB, la roue de compresseur peut être taillée suivant plusieurs profils (valeurs de *trim*) pour moduler le débit volumique.

Qualification mécanique

L'étage compresseur doit présenter des caractéristiques mécaniques lui permettant de résister à l'excitation de ses modes propres dans la plage de fonctionnement. ABB s'est appuyé sur des analyses par éléments finis (AEF) associées à une compréhension fine du comportement vibratoire des ailettes pour élaborer des règles de conception visant à réduire l'amplitude des résonances potentiellement critiques ou à supprimer les excitations. Résultat : une exécution affichant une bonne résistance à la fatigue gigacyclique avec le moins de boucles de qualification possible. L'AEF a également contribué au placement précis des jauges de contraintes en phase de qualification →05.

—

La configuration à un seul étage reste toujours plus simple et plus compacte que la solution bi-étagée.

Étage turbine

Un nouvel étage turbine a été développé pour tenir les objectifs de rendement élevé et de rapport de compression jusqu'à 6,5 →06. La turbine a été adaptée au compresseur pour obtenir le meilleur rendement de suralimentation possible sans pour autant sacrifier les performances mécaniques. Tous ses éléments constitutifs (admission, stator, roue et diffuseur) ont été conçus en fonction de la plage de débit et des rapports de compression nécessaires. Deux outils y ont largement contribué : la mécanique des fluides numérique (CFD) en 3D pour la performance et l'AEF pour l'intégrité mécanique à haut régime. Ainsi, malgré les vitesses de rotation élevées, la durée de vie des composants et les intervalles de remplacement recommandés remplissent les critères applicables aux moteurs à essence.

Un démonstrateur technologique associant les nouveaux compresseur et turbine a affiché un rendement de suralimentation supérieur à 69 %.

Enveloppe

Les concepteurs n'ont pas voulu reprendre les raccordements d'air et de gaz existants, compte tenu du haut niveau de performance requis. Cette liberté conceptuelle a débouché sur un nouveau positionnement et un allongement des conduits, plus faciles d'accès, ce qui facilite grandement le montage et la maintenance.

Le dispositif pouvant servir à de futures applications d'écrêtage des pics de charge, la conception s'est attachée dès le début à optimiser les contraintes pesant sur l'enveloppe. Par exemple,

—
03 Variation de la pression dans le cylindre selon le rapport de compression et le rendement de la suralimentation

—
04 L'A200-H affiche un champ compresseur élargi aux points de fonctionnement à pleine charge.

—
05 Essai de fatigue gigacyclique avec mesure par jauges de contrainte

la modélisation a eu recours à des outils d'AEF sophistiqués pour améliorer le carter de la turbine de manière à ce que le démarrage du moteur augmente rapidement la température d'admission des gaz et garantisse un grand nombre de cycles de démarrage et d'arrêt.

—

Le dispositif pouvant servir à de futures applications d'écrêtage des pics de charge, les concepteurs se sont attachés à minimiser les contraintes pesant sur l'enveloppe.

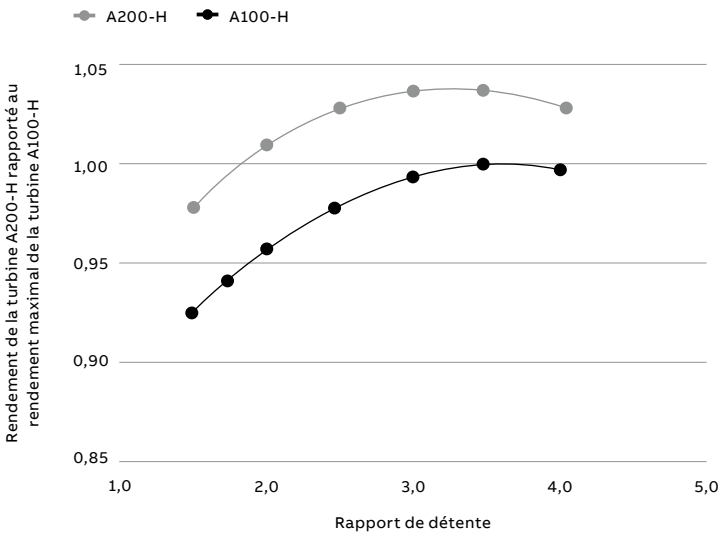
Les retours d'expérience sur les turbocompresseurs A100-H avaient appris aux ingénieurs que la fixation sur palier hydraulique ou par écrous de serrage consistait le moyen le plus simple de monter un gros turbocompresseur sur un moteur, raison pour laquelle les nouveaux A200-H proposent les deux possibilités →07.

Arbre et système paliers

À l'instar de ce qui se fait pour les turbocompresseurs à flux radial, les paliers lisses associés à un amortisseur à huile à l'intérieur des brides offrent le meilleur rapport coût/fiabilité opérationnelle. Pour minimiser le nombre de pièces et faciliter le montage, les paliers de butée principaux et auxiliaires sont placés côté compresseur.

Le client a, pour la première fois, le choix entre deux types de paliers grâce à un support modulaire, breveté ABB →08, qui peut accueillir aussi bien des paliers lisses ABB que des nouveaux roulements à billes ultra performants. Dans ce dernier cas, la perte d'énergie à charge partielle ne dépasse pas 15 % de la valeur de l'option paliers : l'idéal pour les régimes de fonctionnement affichant de forts transitoires. Des simulations thermodynamiques de transitoires effectuées sur un moteur à essence classique de 2 MW avec différents modes de propulsion ont révélé que le simple remplacement des paliers lisses par des roulements à billes diminuait d'environ 15 % le temps nécessaire pour atteindre la pleine charge (démarrage à chaud et à froid) tout

05



06

en réduisant de moitié la consommation d'huile comme la dissipation de chaleur dans le lubrifiant. Dans les deux cas, les organes de roulement sont raccordés directement au circuit d'huile du moteur. Les roulements à billes se présentent sous la forme d'un module qui facilite la mise à niveau de l'équipement.

—

Les fonctionnalités numériques de l'A200-H offrent plus de souplesse pour évaluer les besoins en maintenance.

07

Le numérique pour abaisser le coût global

La durée de vie du rotor est fonction de la température et de la vitesse de suralimentation ainsi que du nombre de cycles de charge. Auparavant, on supposait certaines conditions ambiantes (avec des écarts prédéfinis) et un profil d'exploitation donné pour obtenir une estimation conservatrice des paramètres de fonctionnement admissibles. Une approche qui n'est plus de mise aujourd'hui avec l'augmentation des régimes cycliques, tel l'écrêtage des pics de charge, qui soumettent le moteur et le turbo à des cycles de marche/arrêt bien plus fréquents. Ces sollicitations mécaniques répétées, tout comme les fluctuations importantes de température, précipitent l'usure des composants.

Le nouvel A200-H intègre des fonctionnalités numériques qui offrent plus de souplesse en termes de maintenance et de prescription des limites d'exploitation. La surveillance de paramètres comme la vitesse, la température, le nombre de cycles de marche/arrêt, les conditions ambiantes, entre autres, se fera à l'aide de sondes embarquées ou à partir des données fournies par le groupe électrogène. L'accès à des données opérationnelles précises permet d'évaluer la longévité des composants en fonction de leur exposition réelle : consommation des pièces du rotor pendant leur durée de vie, contrôle des pièces chaudes statiques d'après l'historique de fonctionnement, etc.

Chaque inspection, réalisée toutes les 20 000 heures de fonctionnement dans le cas du gaz naturel, est l'occasion de collecter et d'analyser en ligne ces données pour connaître l'état de l'arbre et du rotor. Si le résultat de l'analyse est satisfaisant, le client obtient le feu vert pour 20 000 heures supplémentaires tout en continuant de bénéficier de la garantie. L'inspection suivante peut même donner lieu à une extension de l'intervalle de remplacement de l'équipement au-delà des 40 000 heures de la garantie contractuelle classique (en l'absence de données numériques). En supposant que le moteur a une durée de marche totale de 120 000 heures, révision complète incluse, allonger l'intervalle de remplacement du rotor permet de n'utiliser que deux composants sur tout le cycle de vie : une économie non négligeable !

Les données de fonctionnement des pièces statiques chaudes soumises à des charges cycliques de fatigue thermomécanique, corrélées à leurs mécanismes d'usure et de dégradation, viennent considérablement enrichir les connaissances et la base de données d'expérience. L'utilisation de nouveaux algorithmes d'analyse et outils d'optimisation de la conception permettront

08

— 06 Comparaison des rendements A100-H et A200-H

— 07 Fixation par écrou du turbocompresseur A240-H

— 08 Prototype du module de roulement sur un banc d'essai ABB

d'optimiser l'exécution du carter et d'autres pièces fortement sollicitées. Pour les futures applications d'écrêtage des pointes, le numérique promet de repousser les limites d'exploitation et de réduire notablement le coût global de la solution.

— Les premiers prototypes de l'A240-H, testés depuis fin 2019, sont très attendus, comme le reste de la gamme de turbocompresseurs ABB.

Intégrées au turbocompresseur A200-H, ces nouvelles fonctionnalités décuplent la valeur ajoutée et le potentiel de l'appareil. L'exploitant peut dès lors se voir proposer, au cas par cas, des services de programmation de maintenance, de suivi des tendances de performance, de gestion de parc ou de mise à niveau en temps utile.

Le turbo nouvelle génération

L'A200-H d'ABB représente un net progrès en matière de suralimentation mono-étagée à haute pression. Il fournit aux motoristes et aux industriels le supplément de puissance et de rendement dont ils avaient besoin, tout en réduisant les coûts sur le cycle de vie.

Avec un rapport de compression atteignant 6,5 et un rendement supérieur à 69 %, l'A200-H intègre de nouveaux étages compresseur et turbine qui lui procurent des performances, une fiabilité mécanique et une longévité exceptionnelles, même à pleine charge. Il répond aux exigences les plus strictes de fonctionnement cyclique, de minimisation des pertes, de sécurité et de dynamique du rotor.

Les fonctionnalités numériques de l'A200-H permettent à l'exploitant d'accéder aux données d'installation et de fonctionnement qui facilitent l'évaluation de l'endurance des composants, lui offrent plus de souplesse dans la planification des besoins de maintenance et font chuter le coût global. Autant d'atouts qui rendent cette nouvelle offre de turbocompresseurs incontournable pour les applications de moteurs à grande vitesse. Les premiers prototypes à l'essai du dernier-né de la gamme, l'A240-H, tout comme ses trois « petits frères » A238-H, A234-H et A231-H, sont très attendus par les clients d'ABB. La production débutera en 2021 ou 2022. •

Bibliographie

[1] Wunderwald, D., *et al.*, « The New A100-H Single-Stage Turbocharger Series for High-Speed Engines », *MTZ worldwide*, vol. 69, n° 7-8, p. 8-15, 2008.

[2] Galloway, L., *et al.*, « An Investigation of the Stability Enhancement of a Centrifugal Compressor Stage Using Porous Throat Diffuser », *Journal of Turbomachinery*, vol. 140, n° 1, 011008, janvier 2018.

LE MOT DU MOMENT

Fabrication additive

La fabrication additive rebat les cartes de la production de masse.

Chau Hon Ho
Corporate Research
Baden-Dättwil (Suisse)

chau-hon.ho@
ch.abb.com

La fabrication additive, ou impression 3D, transforme des données numériques en un objet physique. Elle s'appuie pour cela sur un logiciel *(slicer)* qui découpe le modèle 3D numérique de la pièce en une succession de couches horizontales, puis traduit ces informations en langage machine. Un procédé résolument différent des techniques classiques de fabrication soustractive (perçage ou usinage) ou de formage (moulage par injection).

L'impression 3D facilite ainsi la fabrication de formes complexes, dont bon nombre sont impossibles à réaliser avec d'autres méthodes. Autre point fort : elle permet d'optimiser certaines caractéristiques propres à un produit, telles que la conductance ou la résistance thermique, la tenue mécanique, la rigidité, voire la biocompatibilité. Le matériau de base peut être renforcé par l'adjonction de métal, de céramique, de bois, de graphène ou encore de fibres de carbone. Chaque pièce produite présente donc des propriétés uniques selon l'application visée.

Forte croissance à moindre coût

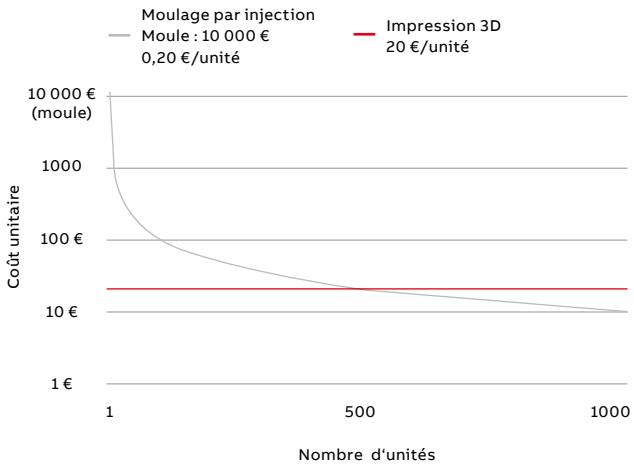
Le coût d'une pièce imprimée en 3D dépend de plusieurs facteurs : quantité et type de matériau utilisé (plastique, céramique, métal), procédé d'impression retenu (polymérisation, liaison physique, fusion) et durée du post-traitement →01. En dehors de ces aspects, la modification d'une pièce existante n'entraîne aucun coût hormis celui de la mise à jour du modèle 3D numérique. Il est donc possible de personnaliser chaque produit, en fonction des besoins spécifiques du client, sans grever le budget de fabrication.

Revers de la médaille : puisque le coût unitaire ne diminue que marginalement avec la quantité de pièces produites, la fabrication additive ne peut rivaliser avec les procédés traditionnels utilisés pour les grandes séries →02. Impossible ici de compter sur des économies d'échelle ! Toutefois, au vu des progrès accomplis dans l'automatisation du procédé et de la démocratisation de certaines matières premières, la fabrication additive devient de plus en plus compétitive, même pour les gros volumes de production.

	Technologie				
	Poly-mérisation	Liaison physique	Fusion		
		BJ	SL	EB	LM
Métal			M	M	D
Céramique					
	SL	PJ	FD		
Plastique			M		

SL : stéréolithographie
PJ : projection de polymère
BJ : projection de liant
SLM : fusion sélective par laser
EBM : fusion par faisceau d'électrons
LMD : dépôt de métal par laser
FDM : dépôt de fil

Le choix du procédé d'impression dépend de l'application visée.



02

— 01 En dépit de sa relative jeunesse, l'impression 3D se distingue par la diversité et la maturité technologique des procédés mis en œuvre, ainsi que par la large palette de matériaux utilisables.

— 02 La fabrication additive est particulièrement compétitive pour le prototypage ou les petites séries.

D'autres facteurs viendront renforcer la compétitivité du procédé : l'intégration de l'ensemble de la chaîne de production, l'apport de l'intelligence artificielle dans le design génératif, l'optimisation des procédés, la prédiction de qualité et l'auto-correction en cours d'impression contribueront à l'émergence de nouveaux modèles économiques.

— La fabrication additive est de plus en plus rentable, même pour les gros volumes de production.

Perspectives

La fabrication additive a déjà atteint une taille critique qui lui permet de s'imposer comme technique de production à part entière. Plusieurs raisons à cela : des imprimantes plus rapides, des coûts matière en baisse et la demande de produits de plus en plus personnalisés. C'est ainsi qu'aux États-Unis, 99 % des prothèses auditives sont imprimées en 3D depuis 2015, à l'issue d'une période de conversion qui a duré moins de 500 jours.

Selon le cabinet d'études Wohlers Associates [1], le marché mondial de la fabrication additive devrait dépasser 15 milliards de dollars en 2020, 24 milliards en 2022 et 36 milliards en 2024. •

— **Bibliographie**

[1] *Wohlers Report 2019*, disponible sur : https://wohlersassociates.com/2019report.htm (consulté le 28 novembre 2019).

— **Recevoir *ABB Review***

— **S'abonner**
Contactez votre correspondant ABB ou souscrivez en ligne sur www.abb.com/abbreview

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

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

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

— **Publication ABB**

— **Rédaction**

Bazmi Husain
Chief Technology Officer
Group R&D and Technology

Adrienne Williams
Senior Sustainability Advisor

Christoph Sieder
Head of Corporate Communications

Reiner Schoenrock
Technology and Innovation

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

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

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

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

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

Édition et droits d'auteur ©2020
ABB Switzerland Ltd.
Baden (Suisse)

— **Impression**
Vorarlberger Verlagsanstalt GmbH
6850 Dornbirn (Autriche)

— **Maquette**
Publik. Agentur für Kommunikation GmbH
Ludwigshafen (Allemagne)

— **PAO**
Konica Minolta Marketing Services
Londres
(Royaume-Uni)

— **Traduction française**
Cléa Blanchard
clea.blanchard@gmail.com

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

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

ISSN: 1013-3119

abb.com/abbreview

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

Crédit photo :
Publik. Agentur für Kommunikation

S’abonner
et garder le contact

Peur de manquer un numéro ? Abonnez-vous à la version PDF ou papier sur notre site pour être informé par e-mail des nouvelles publications ou recevoir directement *ABB Review* dans votre boîte aux lettres.

Sur ce même site, retrouvez des extraits des dernières éditions, ainsi que l’intégralité des numéros depuis 1996 et une sélection d’articles remontant jusqu’à la naissance du magazine en 1914.

www.abb.com/abbreview