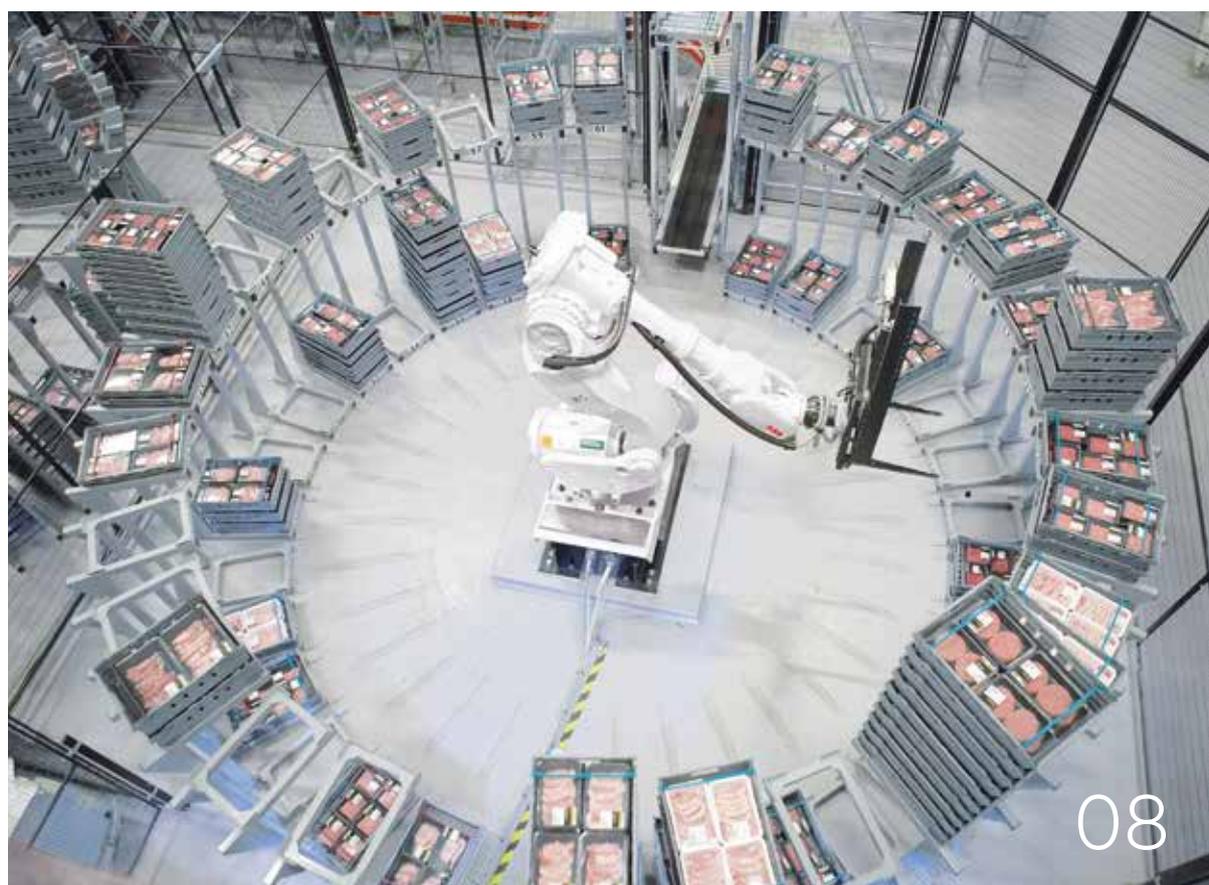


review

03|2019 fr

Systemes autonomes



08



44

08–51 **Systemes autonomes**
52–73 **Énergie**



Outils analytiques
pour l'industrie

36



Visualisations innovantes

23

Pile à combustible,
le plein d'énergie verte



60



De l'automatisation
à l'autonomisation

08

05 **Éditorial**

Systemes autonomes

- 08 De l'automatisation à l'autonomisation
- 16 Estimation d'état et visualisation
- 23 Visualisations innovantes
- 30 Automatisation modulaire : 2^e partie
- 36 Outils analytiques pour l'industrie
- 44 Ligne directe avec le cloud
- 46 Surveillance de blindage de broyeur

Énergie

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

Le mot du moment

- 74 Autonomisation industrielle
-
- 75 Publication ABB

Les systèmes autonomes promettent d'améliorer l'efficacité, la fiabilité et la sécurité d'une machine, d'une usine, d'un réseau ou d'une ville entière tout en se passant de l'homme. Bâties au carrefour du numérique et de l'expertise industrielle, ils doivent pouvoir s'appuyer sur des architectures, des codes et des outils de visualisation innovants, étayés de nouvelles méthodes de gestion et de prédiction. Portes ouvertes sur les derniers développements ABB dans ce domaine.

ÉDITORIAL

Systemes autonomes



Chers lecteurs,

Dans un monde où l'inconstance et l'imprévisibilité règnent en maître, notre capacité naturelle à apprendre, à évoluer et à nous adapter à l'environnement est vitale. Des aptitudes que l'industrie partage de plus en plus. Les automatismes d'hier, qui reposaient sur un jeu limité d'instructions offrant très peu de marge de manœuvre, dans un espace fini, cèdent la place à des systèmes ouverts, capables de s'auto-adapter, de se former en continu et même d'écrire leurs propres règles.

Découvrez dans ce numéro comment ces gains d'autonomie offrent de nouvelles possibilités de collecte, d'interprétation, de traitement et d'exploitation des données afin d'éclairer la prise de décisions dans toute la sphère ABB.

Bonne lecture,

Bazmi Husain
Directeur des technologies

Systemes autonomes



Un système d'auto-apprentissage est bien plus que la somme de ses parties. Non content d'exécuter des programmes ou de réagir tout bonnement à des entrées capteurs, il sait « réfléchir », apprendre de l'expérience, agir en conséquence et s'adapter aux aléas du procédé. C'est là toute la différence entre simple automatisme et système autonome ; un écart que les chercheurs et développeurs ABB se font fort de combler.

- 08 De l'automatisation à l'autonomisation
- 16 L'estimateur d'état a l'œil sur le réseau électrique !
- 23 Outils de visualisation : l'intelligence au service du collectif
- 30 Automatisation modulaire des procédés : théorie et pratique
- 36 L'analytique fait parler le procédé
- 44 Ligne directe avec le cloud
- 46 L'apprentissage automatique surveille le blindage des broyeurs miniers

SYSTÈMES AUTONOMES

De l'automatisation à l'autonomisation



Si les données sont le pétrole de l'économie numérique, les algorithmes d'apprentissage sont les raffineries qui transforment ce « brut » en carburant du développement, de l'exploitation et de la commande autonomes. Les grands gagnants de la 4^e révolution industrielle seront ceux qui disposeront d'une telle expertise pour améliorer la productivité.



Wilhelm Wiese
ABB Global Industries
and Services
Bangalore (Inde)

wilhelm.wiese@
in.abb.com

La voiture autonome est sur toutes les lèvres. Le bond technologique de ces dernières années a donné au secteur une bonne longueur d'avance sur celui des automatismes. ABB Review s'est intéressée aux six niveaux d'autonomie définis par les professionnels de l'automobile [1-3] →1 pour les replacer dans la perspective des systèmes d'automatisation industrielle.

Niveau 0 : le conducteur est totalement maître du véhicule et de son pilotage. En automatisation industrielle, c'est le mode de conduite d'une usine en phases de démarrage, de configuration et d'optimisation du process.

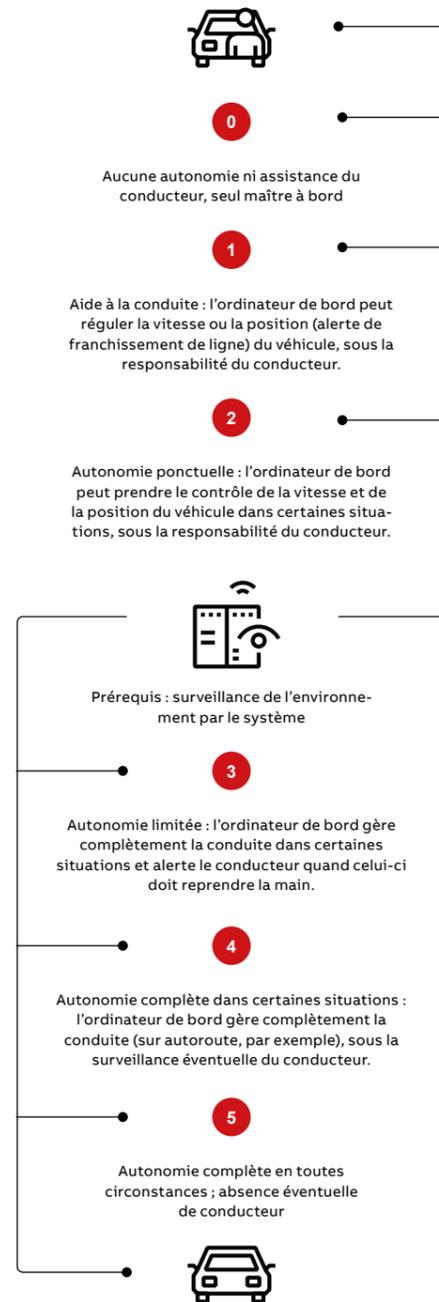
À l'heure actuelle, l'autonomie d'un site industriel se situe entre les niveaux 2 et 3.

Niveau 1 : défini par la NHTSA (agence américaine chargée de la sécurité routière) comme un système d'assistance à la conduite assurant le guidage latéral (direction) ou longitudinal (freinage/accélération) du véhicule, ce niveau correspond dans l'industrie à une boucle de régulation qui maintient certaines variables du procédé à la consigne, en fonction des retours capteurs.

Niveau 2 : toujours selon la NHTSA, il s'agit d'un système capable de gérer le guidage latéral et longitudinal du véhicule quand certaines conditions sont réunies. Le conducteur est toujours responsable des autres manœuvres et doit rester attentif à l'environnement afin de pouvoir reprendre les commandes en cas d'imprévu. Ce niveau correspond au pilotage classique d'un site industriel : l'opérateur de conduite observe la production et n'intervient qu'en cas d'alarme, lorsque certaines variables process s'écartent de la valeur de consigne.

Niveau 3 : ici, l'ordinateur de bord se charge de toutes les fonctions de conduite, dans des conditions prédéfinies. Le conducteur doit néanmoins maintenir sa vigilance pour être en mesure de reprendre le volant, dès que l'ordinateur le lui demande. En dehors de ce périmètre d'action, le pilotage du véhicule est de la responsabilité du conducteur. Cela équivaut peu ou prou à une usine où la production se déroule en continu, supervisée uniquement par quelques techniciens sur site prêts à intervenir en cas de dysfonctionnement.

Niveau 4 : dans certaines phases et zones de conduite, la responsabilité du véhicule est entièrement déléguée au système automatisé, y compris la surveillance de l'environnement. Dans la plupart des secteurs industriels, l'automatisation est loin d'avoir atteint un tel niveau.



01

	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5
Commande		✗			
Exploitation		✗	✗		
Développement	✗				

02

— 01 Niveaux d'autonomie d'une voiture sans conducteur

— 02 Niveaux d'autonomie atteints dans l'industrie

Niveau 5 : le système se charge de la conduite dans n'importe quelle circonstance, les occupants du véhicule ne sont que de simples passagers. À l'heure actuelle, cela relève encore de la science-fiction et devrait le rester pour un certain temps à selon nous.

Autonomisation industrielle : trois angles d'approche
Voyons maintenant les formes que peuvent prendre les systèmes autonomes dans l'industrie →2.

Développement autonome

Si l'essentiel du débat se concentre sur l'exploitation autonome des systèmes, cette dernière est impossible sans au préalable un développement lui aussi autonome. Pour imaginer le futur du développement des automatismes industriels, appuyons-nous sur les concepts fondamentaux de la fabrication 4.0 [4]. Par exemple, un smartphone possède des centaines de paramètres censés permettre à l'utilisateur de paramétrer et de personnaliser son expérience de communication dans les moindres détails. Si l'utilisateur lambda n'en modifie que 10 %, d'autres prennent le temps d'optimiser leur appareil et ses applications pour en tirer le meilleur parti. En partageant ces réglages avec le fabricant, on donne à ce dernier la possibilité d'améliorer le produit, de réduire les coûts de dépannage et d'optimiser les paramètres usine.

Supposons maintenant que tous les smartphones puissent télécharger leur configuration améliorée dans un vaste réservoir de données accessibles à tous. C'est à peu près la même chose dans l'industrie : l'interconnexion de millions d'appareils, ainsi que la connaissance de leur mode d'interaction, de leur domaine d'application et de leur environnement, sont au fondement du développement autonome.

L'analyse des données massives, ou big data, ouvre la porte à des réglages matériels et applicatifs bien plus pertinents que les réglages usine, qui sont en outre affinés en permanence par la modélisation. Afin d'obtenir une assistance semblable à celle de la conduite automatisée, l'ingénieur peut sélectionner soit les pré-réglages fournis par le propriétaire du produit, soit ceux utilisés par la majorité des autres ingénieurs dans le monde entier pour des configurations similaires (application et environnement).

La réponse probabiliste fournie par l'intelligence artificielle pourrait changer la face de l'automatisation industrielle.

L'association de l'expertise humaine et de la puissance de calcul ferait passer le développement autonome du niveau 1 au niveau 2, puis au niveau 3, une fois ce fonctionnement suffisamment mature : l'usine serait alors capable de modifier sa configuration en fonction des conditions externes (changements de saison par exemple). Voilà pourquoi une exploitation autonome n'est guère envisageable sans développement idoine.

Exploitation autonome

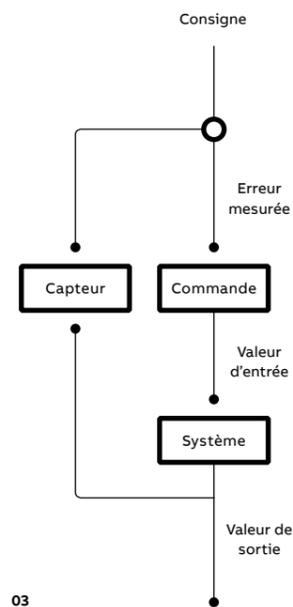
Avec les technologies actuelles, l'usine se situe à un niveau d'autonomie opérationnelle entre 2 et 3. Mais pour atteindre l'autonomie complète, il lui faudra bien plus qu'un développement autonome : les systèmes industriels doivent en effet être capables de combiner les réglages matériels et applicatifs ainsi que les valeurs du procédé. Analyser des décennies d'alarmes et d'événements est un bon point de départ pour avoir une idée des performances passées de l'outil productif dans des conditions très variées.

N'oublions toutefois pas que l'erreur humaine demeure la principale cause de défaillances et d'arrêts de production [5]. Dans ce contexte, disposer de données à l'échelle de l'usine est évidemment indispensable pour exploiter le plein potentiel de l'analytique et des technologies actuelles. Et c'est l'apprentissage automatique, avec ses capacités de stockage et de calcul intensif, qui permet d'en tirer parti. Impossible toutefois de parler

— 03 Automatisation par boucle de régulation

— 04 Modèle probabiliste de gestion des risques par intelligence artificielle

— 05 Témoin des investissements massifs d'ABB dans les technologies de production autonome, ce robot palettiseur de viande surgelée

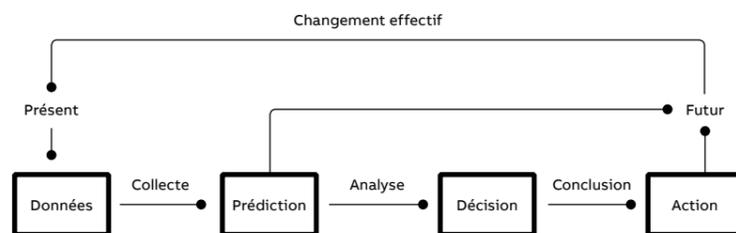


03

d'autonomie complète tant que le système n'est pas en mesure de se reconfigurer automatiquement devant une défaillance inédite ; en d'autres termes, il doit pouvoir transcender les situations rencontrées au cours de son apprentissage pour déclencher et paramétrer lui-même de nouvelles alarmes, et y réagir en conséquence. Une compétence autrement plus élaborée que tout ce qui a été réalisé jusqu'à présent ! Les données ne sont que le début de l'autonomie ; seuls les algorithmes d'auto-apprentissage permettront de passer au niveau supérieur.

Commande autonome

Ce troisième concept est probablement l'aspect le plus controversé des systèmes autonomes. À l'heure actuelle, l'argument le plus dissuasif à l'encontre de l'apprentissage automatique est son caractère probabiliste, là où l'automatisation par boucle de régulation garantit une réponse déterministe →3. Pour autant, si le déterminisme d'une seule boucle est incontestable, qu'en est-il d'un système de contrôle-commande en alignant des centaines, voire des milliers ?



04

La réponse probabiliste fournie par l'intelligence artificielle (IA) pourrait rebattre les cartes de l'automatisation industrielle. Certes, les systèmes de contrôle-commande actuels affichent d'ores et déjà de très hauts niveaux de performance et de fiabilité, mais les automatismes portés par les technologies 4.0 connaîtront une accélération inédite de leurs capacités. Les 80 % de réponse probabiliste de l'IA pourraient bientôt atteindre 90 %, ce qui se rapproche, à l'échelle d'un atelier ou d'une usine, du déterminisme de la logique automate.

— Le prochain échelon de l'autonomie industrielle devra tenir compte du système d'automatisation dans sa globalité.

L'IA va donc révolutionner le modèle établi du contrôle-commande : brassage des signaux, boucles de régulation et étalonnage du procédé laisseront respectivement place à l'analyse des données, à la prédiction et à l'auto-optimisation →4. Quand on sait que l'apprentissage automatique peut mettre en relation des centaines ou des milliers de paramètres là où la boucle de régulation se contente de comparer une variable à une consigne, on conçoit que l'IA surclassera bientôt le contrôle-commande traditionnel. Atteindre le niveau d'autonomie suivant exigera d'appréhender le système d'automatisation industrielle dans sa globalité →5 : données techniques, paramètres et



05

fonctionnement de l'appareil, données environnementales et variables du procédé doivent alimenter le système d'apprentissage automatique, qui sera ensuite entraîné à partir des données physiques, des retours du système d'assurance qualité et de l'expérience des opérateurs et ingénieurs de production. Une fois ces tâches effectuées, les boucles de régulation qui déterminent les entrées process des appareils deviendront caduques. Au niveau matériel, cela entraînera une véritable rupture technologique car le parc d'automates industriels n'est pour le moment pas capable d'héberger des algorithmes d'apprentissage automatique. Une restriction qui ne tardera pas à être levée avec la montée en puissance de la prochaine génération d'appareils.

S'agissant de la technologie, les systèmes de contrôle-commande distribués actuels laisseront vraisemblablement place à des systèmes reposant sur l'IA. Ces derniers ont en effet deux atouts majeurs : d'une part, ils sont plus rapides et plus performants, d'autre part, leur architecture est mieux adaptée aux exigences de la production. Le contrôle-commande distribué est né avec la 3^e révolution industrielle, à une époque où la puissance de calcul et les capacités de stockage étaient limitées, et où la communication temps réel obligeait à rapprocher la partie commande de la partie opérative. Autant d'obstacles bientôt surmontés avec l'arrivée de la 5G.

Feuille de route

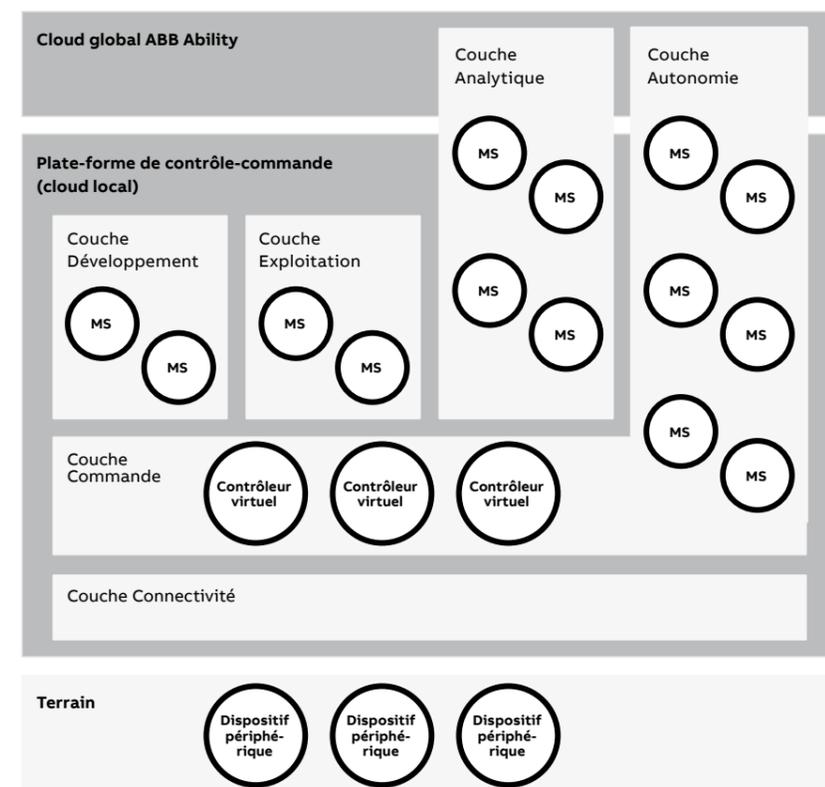
Pour réussir, les acteurs de cette mutation devront faire preuve d'agilité et de réactivité en matière de développement de services. Il faudra réduire au minimum l'utilisation de systèmes fermés et se tourner vers des solutions logicielles hébergées dans le cloud (mode SaaS) pour passer à des architectures de contrôle-commande intrinsèquement autonomes.

Les systèmes industriels de demain devront prendre en charge les trois phases de l'autonomie (développement, exploitation, commande) en adoptant une approche ascendante ; ce sont en effet les couches terrain et commande de la pyramide d'automatisation qui passent le relais des données du procédé et de l'équipement aux solutions analytiques et IA. C'est aussi parce que les automatismes industriels actuels n'ont ni la puissance de traitement ni la mémoire nécessaires à l'exécution de processus analytiques ou IA supplémentaires qu'un système autonome ne peut se contenter d'être le prolongement de l'existant. Pour autant, il faudra évidemment commencer par maintenir les logiciels actuels pendant toute la phase de migration vers une plate-forme plus puissante, formée d'un contrôleur virtuel opérant dans le cloud.

Le contrôle-commande distribué actuel laissera vraisemblablement place à l'intelligence artificielle.

Faire de ce dernier le socle de la nouvelle architecture de contrôle-commande →6 lève les nombreuses embûches qui jalonnent la progression vers une analytique rapide et agile, des solutions d'IA et des systèmes autonomes. Toutes les données étant concentrées dans le même environnement cloud, les applications d'analytiques et d'IA y accéderont facilement. Par ailleurs, les capacités de calcul et de mémoire illimitées enrichiront le logiciel de contrôle-commande de nouvelles fonctionnalités et interfaces. Dernier atout, le déploiement de fonctions dans le cloud est rapide et ne nécessite aucune modification ou extension matérielle : c'est encore un gage d'agilité et de réactivité.

06 Architecture de contrôle-commande autonome



06

Bibliographie

[1] <https://www.nhtsa.gov/technology-innovation/automated-vehicles-safety>

[2] Watson, D. P., Scheidt, D. H., *Autonomous Systems*, Johns Hopkins Applied Physics Laboratory Technical Digest, vol. 26, n° 4, 2005.

[3] Gamer, T., Isaksson, A., « Systèmes autonomes », *ABB Review* 4/2018, p. 8-11.

[4] https://fr.wikipedia.org/wiki/Industrie_4.0

[5] <https://www.continuitycentral.com/index.php/news/business-continuity-news/2448-manufacturing-is-the-sector-most-prone-to-unplanned-downtime-due-to-human-error>

ABB Ability™, pilier de l'industrie autonome

Cette nouvelle architecture a le potentiel de doper la productivité industrielle : une plate-forme de contrôle-commande raccordée à la solution ABB Ability alimente un lac de données, dans lequel peut puiser un système autonome pour exécuter des microservices (MS) d'analyse. Développement, exploitation et commande autonomes prennent forme. Au niveau analytique, les microservices de la plate-forme de commande collectent les données et évaluent leur pertinence pour l'optimisation ou la gestion du parc. Cette intelligence embarquée locale réduit la volumétrie des transferts vers le cloud.

Les systèmes industriels de demain devront prendre en charge les trois phases de l'autonomie (développement, exploitation, commande).

Au demeurant, la commande autonome n'est pas encore pour demain et de nombreux jalons intermédiaires restent à franchir. La connectivité ABB Ability joue ici un rôle d'accélérateur de l'apprentissage automatique. Par exemple, des microservices apprenant des données fournies par les contrôleurs virtuels d'une même plate-forme de contrôle-commande peuvent également tirer les enseignements d'autres systèmes fonctionnant dans des environnements semblables.

Si le système autonome est assurément un objectif ambitieux, il n'en est pas moins réalisable dans le cadre de cette approche graduelle. Pour prendre le virage de l'agilité et passer à la vitesse supérieure, les industriels devront faire évoluer le contrôle-commande d'une offre produits développée et commercialisée en propre à des solutions logicielles ouvertes de services à la demande. La réussite a deux facettes : côté technologique, il s'agira d'intégrer l'autonomie dès la conception de l'architecture de base ; côté économique, il faudra développer en amont un modèle progressif qui dope les ventes sans pénaliser l'activité existante. •

SYSTÈMES AUTONOMES

L'estimateur d'état a l'œil sur le réseau électrique !



Un nouvel outil de visualisation conçu par ABB met les fonctions d'estimation d'état à la portée des gestionnaires de réseaux de transport et de distribution, accélérant l'identification et la résolution des dysfonctionnements. Un pas de plus vers un réseau maillé fiable, à la hauteur des ambitions de l'intelligence électrique.



Antony Hilliard
ABB Automation Solutions
Västerås (Suède)

antony.hilliard@
se.abb.com

Les réseaux de transport et de distribution de l'électricité ne cessent de gagner en intelligence à mesure qu'ils s'interconnectent et se complexifient. Pour se conformer à la réglementation internationale, les gestionnaires ont besoin de capacités de surveillance prédictive en temps réel. La mégapanne d'électricité qui a plongé le nord-est des États-Unis dans le noir le 14 août 2003, et celle survenue en Italie la même année, ont mis en lumière la vulnérabilité des réseaux. Aussi les régulateurs imposent-ils dorénavant aux gestionnaires de réseau de transport (GRT) de surveiller non seulement leurs propres actifs, mais aussi ceux de leurs voisins [1] : une tâche herculéenne !



Giuseppe Martinelli
ABB Enterprise Software
Network Management
Västerås (Suède)

giuseppe.martinelli@
se.abb.com

La solution de gestion de réseaux ABB Ability™ Network Manager se compose d'un superviseur (SCADA) et d'un système de gestion d'énergie (SGE) offrant des fonctions avancées de suivi et d'aide à la conduite.

L'estimateur d'état du réseau, « cerveau » du SGE, s'appuie sur un modèle virtuel ou jumeau numérique du système électrique complet (centrales de production, postes de transformation, circuits, etc.). Ce modèle prédictif, exécuté en temps réel, utilise des algorithmes d'estimation par la méthode des moindres carrés pondérés, couplés à des matrices augmentées par blocs, pour corriger les données aberrantes ou imprécises. Il pallie en outre le manque d'observabilité du réseau électrique, et constitue à ce titre un précieux outil d'identification et d'aide à la décision pour l'opérateur comme pour le SGE. L'estimation d'état remplit donc des fonctions vitales dont les GRT auraient bien du mal à se passer.

Indispensable... mais complexe

L'estimateur d'état doit pouvoir s'adapter à des environnements changeants et offrir toujours la même qualité malgré les remplacements de matériels et les reconfigurations de liaisons. Or les divergences du modèle, couplées à des

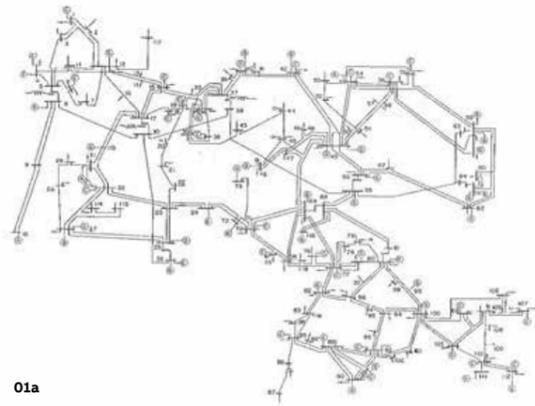
données faussées (erreurs de télémessure ou cyberattaques), peuvent s'avérer particulièrement problématiques en empêchant l'algorithme d'estimation d'état d'élaborer des solutions pour tout ou partie du réseau. Une situation qui dégrade la qualité de la surveillance automatique (analyse d'incidents, par exemple) et comporte un risque de non-respect de la réglementation. En effet, la défaillance de l'estimateur d'état prive le SGE d'outils permettant aux ingénieurs d'appréhender la situation et de résoudre les problèmes sur le réseau.

—
L'estimateur d'état, « cerveau » du système de gestion d'énergie, s'appuie sur un modèle virtuel du réseau électrique complet.

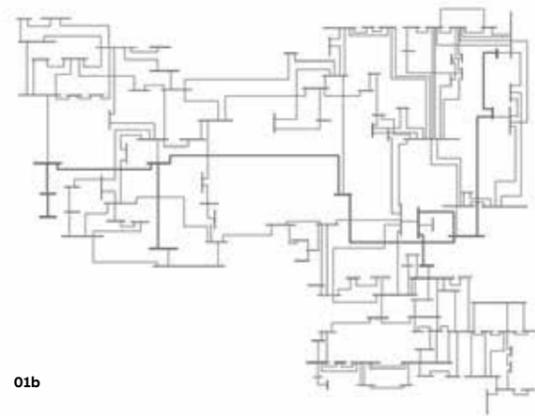
L'obligation de surveiller les réseaux voisins accroît d'autant l'exposition à des données ou modèles erronés. Par exemple, les 113 défaillances d'estimateur d'état enregistrées sur la côte est des États-Unis entre 2013 et 2017 sont dans leur grande majorité imputables à des problèmes de modélisation ou de communication [2].

Fiabiliser la conduite des réseaux passe donc par une mise en service et une surveillance ad hoc de l'estimateur d'état : des opérations longues, coûteuses et gourmandes en main-d'œuvre. Les outils de visualisation développés par ABB aident les ingénieurs, experts ou non du domaine, à surveiller l'état du modèle et ses diagnostics (résidus et nombre d'itérations de convergence, par exemple).

Actuellement, les écrans d'un estimateur d'état affichent essentiellement des tableaux et des chiffres →3a, avec les données d'entrée ainsi que les résultats estimés. Ils sont destinés à des experts des réglages, dont les compétences sont aussi



01a



01b



01c

- Localisation et blocage des télémesures ou relevés erronés ;
- Identification des parties obsolètes du modèle ;
- Évaluation des réglages du modèle et pistes d'amélioration.

Pour valider l'affichage, ABB a organisé en interne des ateliers et des consultations avec ses experts, puis a soumis les résultats à quatre gestionnaires de réseaux (deux européens et deux nord-américains).

Cartographier le réseau

Pour concevoir une solution d'analytique visuelle adaptée aux exigences de diagnostic de l'estimation d'état, l'équipe graphique s'est penchée sur les plans et schémas traditionnels de l'interconnexion électrique [3] : vue topologique et représentation schématique du transport.

En temps normal, les distributeurs d'électricité envoient des agents sur le terrain pour diagnostiquer les dégâts matériels. Facile à interpréter, la vue topologique →1a, qui permet de localiser les actifs, se prête parfaitement à la tâche. L'utilisateur peut faire défiler la carte à l'écran et zoomer jusqu'au niveau de détail souhaité. Pour autant, cette localisation physique ne dit rien sur les fonctionnalités du modèle d'estimation d'état.

Les outils de visualisation développés par ABB aident les ingénieurs en charge de l'estimation d'état, experts ou non, à surveiller le fonctionnement du modèle et ses diagnostics.

Les GRT ont davantage recours à des schémas représentant les connexions logiques des lignes et postes →1b, sous une forme plus abstraite que la vue topologique : les raccordements sont matérialisés par des traits et la navigation se fait de point en point le long du tronçon. Cette représentation schématique permet de visualiser immédiatement toutes les connexions pouvant être établies par les organes de coupure : un atout extrêmement précieux. Reste que l'estimateur d'état ne représente que la situation en cours, avec le risque qu'une toute petite différence sur un schéma (fermeture d'un disjoncteur, par exemple) sous-évalue l'impact d'un événement sur la solution modélisée.

rare que recherchées. Cela ne facilite guère la tâche de l'opérateur novice, qui mobilisera beaucoup de temps et d'énergie pour s'approprier l'outil, au détriment du suivi d'état et du diagnostic, pourtant indispensables à tout énergéticien voulant préserver son avantage concurrentiel.

Méthodologie

En 2018, ABB a lancé un projet de recherche visant à explorer les moyens de visualiser uniquement les points de non-convergence du modèle et des données. Des affichages intuitifs, parlant aussi bien aux utilisateurs novices que chevronnés, devaient garantir une réduction efficace et proactive des risques en agissant sur plusieurs leviers :

Photo p. 16 : ABB conçoit des affichages sur mesure pour l'estimation d'état des réseaux électriques.

01a Cartographie des lignes et ouvrages, utilisée depuis les années 1970

01b Représentation classique des connexions logiques au sein du réseau de transport ; l'épaisseur du trait est proportionnelle à la tension nominale.

01c Représentation schématique de l'équilibrage de puissance, basée sur les travaux de Cuffe et Keane, modifiée par ABB.

02 La vue topologique conçue par ABB pour l'estimateur d'état de son gestionnaire de réseau Power System Explorer (PSE) complète l'interface existante du modèle virtuel de réseau de transport.

Le diagnostic du modèle d'estimation d'état n'ayant que peu à voir avec le fonctionnement d'un réseau de transport ou de distribution, il faut envisager une nouvelle méthode. ABB s'est basé sur des travaux universitaires [4] pour élaborer une visualisation réseau reposant sur la théorie des graphes classique. L'utilisation de plusieurs formats de représentation, de points de repères et d'aides à la navigation donne corps à des affichages abstraits mais intuitifs de la structure sous-jacente du modèle de réseau →1c [5]. À terme, ce type d'outil, sous réserve de convenir à l'estimateur d'état, pourrait aussi servir à la surveillance des réseaux électriques du futur.

Si les graphes de réseau ont déjà fait leurs preuves dans de nombreux domaines à des fins analytiques, comme les sciences sociales ou la logistique, toute la difficulté pour ABB était de les intégrer à une application conviviale axée sur les besoins des gestionnaires de réseaux électriques.

Considérations graphiques

La visualisation des indicateurs d'état doit être évolutive pour s'adapter aux modèles des grands réseaux électriques. ABB a fait le choix du minimalisme, avec suffisamment d'espace pour les données et un style visuel « global » qui fait la part belle à toutes les variables du réseau et propriétés du modèle →2.

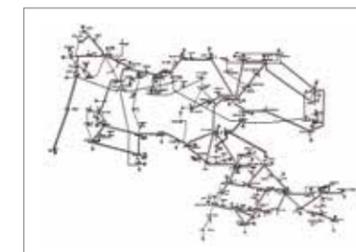
C'est ainsi que le Groupe a repris les grands principes de la représentation graphique des réseaux : traits pour les lignes électriques, cercles pour les nœuds (postes). Le diamètre du cercle renseigne sur l'importance du site et de la charge : cercle de grand diamètre pour une ville ou une centrale de production, cercle plus petit (voire aucun cercle) pour une localité auto-suffisante, un poste de transport ou une petite connexion. L'épaisseur du trait dénote le niveau de tension ou la capacité de transit : le flux de puissance est d'autant plus important que le trait est épais. Ce choix différencie les circuits robustes des circuits fragiles, et distingue clairement les niveaux de tension →3.

ABB s'est basé sur des travaux universitaires pour élaborer une visualisation réseau reposant sur la théorie des graphes classique.

Même si le code couleur est la règle pour représenter la tension réseau, ce mode de visualisation est mieux adapté aux données, qui constituent le cœur du modèle d'estimation d'état.

Problématique actuelle

- L'estimateur d'état utilise un modèle virtuel du réseau de transport.
- Sa mise en service et sa maintenance sont complexes.
- L'interface existante n'affiche pas le réseau.
- Les schémas de réseau classiques ne sont pas adaptés au diagnostic du modèle numérique.

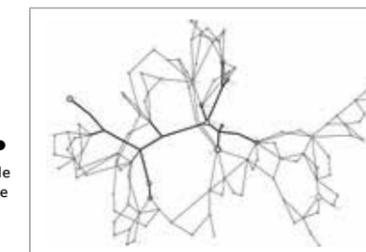


Données tabulaires

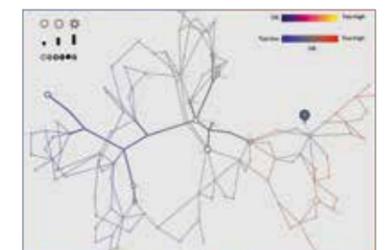
Interface existante + graphes



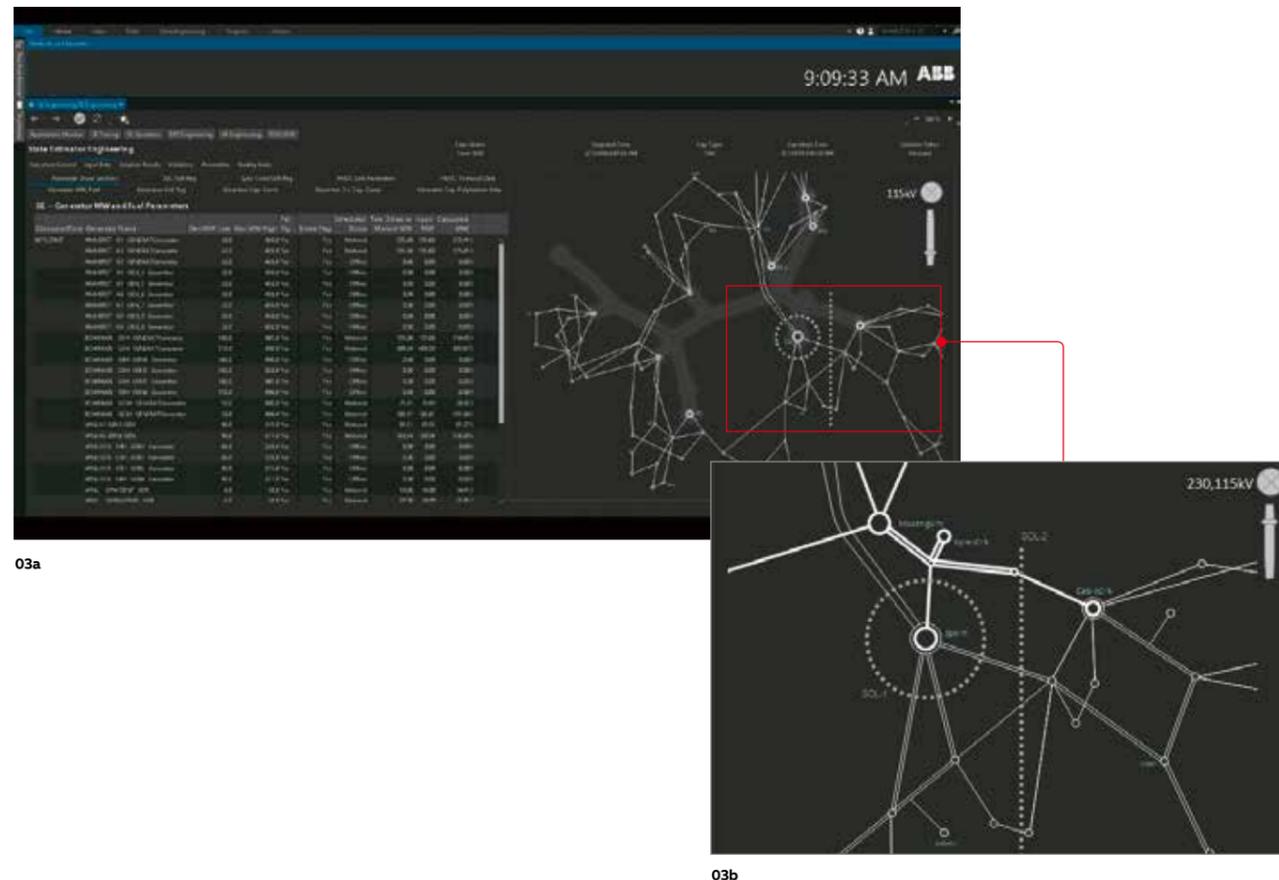
Affichage de la topologie



Futur potentiel de visualisation des données



Visibilité du modèle



03a

03b

La longueur du trait correspond généralement au kilométrage entre deux points. Or la distance n'étant pas un paramètre pertinent pour l'estimateur d'état, la longueur est à l'échelle du transit de puissance net, dérivé de l'impédance [4]. La ligne, métaphore visuelle de l'expression « le courant voyage en ligne droite », offre la représentation la plus fidèle de la structure du réseau. Les ingénieurs peuvent ainsi plus facilement déterminer le « chemin de moindre résistance » et le modèle électrique sous-jacent. Les traits plus longs indiquent les chemins moins directs empruntés par le courant.

Mieux, la solution permet de visualiser dans le modèle d'estimation d'état les principales frontières entre réseau client et réseaux voisins, par exemple, ou entre réseaux « observables » et « non observables », en prolongeant légèrement les traits de façon à créer une ligne de démarcation.

Le résultat →3 est une représentation parlante de la configuration réseau perçue par l'estimateur d'état : transit de puissance entre groupes de production et centres de consommation, aspects résolus par l'estimateur, etc.

Au service de la visualisation

Une fois le concept élaboré, d'importantes questions restaient en suspens : comment rapprocher cet affichage des connaissances qu'ont les ingénieurs de leur réseau et de leur région ? Quelles fonctionnalités peuvent renforcer l'utilité de cette visualisation centrée réseau ?

Les éléments visuels font appel aux connaissances et à l'expérience des ingénieurs chargés de l'estimation d'état pour faciliter la navigation et la recherche.

L'acceptation de la solution dépend de nombreux paramètres. La cohérence et le respect des règles infographiques contribuent à minimiser les erreurs d'interprétation, sources d'incidents. Dans cette optique, ABB a conçu cette interface de visualisation réseau pour les ingénieurs de maintenance du modèle d'estimation d'état, qu'ils soient informaticiens ou électriciens, en complément des représentations classiques →2.

— 03 Les affichages réseau de l'estimateur d'état complètent les données et tableaux existants, et facilitent la navigation avec des vues panoramiques, des fonctions de zoom, des calques pour les niveaux de tension, ainsi que des outils de sélection dans les tableaux et de recherche de postes et ouvrages d'intérêt.

03a Affichage du réseau en regard des données tabulaires

03b Zoom sur un nœud de réseau

— 04 Le choix du noir et blanc pour représenter la structure du réseau permet de réserver la couleur aux indicateurs d'état de l'estimateur (résidus de solution, itérations de convergence, p. ex.). Les couleurs les plus vives signalent les écarts importants, qui « sautent » ainsi aux yeux de l'opérateur.

Autre frein à l'acceptation : la peur de perdre ses repères. C'est pourquoi l'interface ABB reprend les conventions cartographiques (nord en haut, ouest à gauche, etc.). Les jonctions et tronçons secondaires sont intégrés aux lignes principales pour désencombrer l'affichage →3. De même, les légendes apparaissent progressivement, en fonction du contexte (zoom sur un petit poste électrique, par exemple). Les grandes composantes du réseau, telles que des groupes de lignes dans une limite d'exploitation du système (transit de puissance total passant dans les circuits électriques), sont matérialisées par des éléments visuels en arrière-plan, comme un cercle en pointillés délimitant une zone précise de consommation en ville. Les limites d'exploitation au niveau des transferts interrégionaux, est-ouest par exemple, sont représentées par des pointillés verticaux →3b.

Dans l'outil de visualisation particulièrement intuitif d'ABB, les couleurs sont réservées aux données telles que les indicateurs d'état.

Les différents niveaux de tension se présentent sous forme de « calques » : l'utilisateur peut ainsi mettre un calque au premier plan pour se concentrer sur un problème de modélisation, tout en continuant à voir l'ensemble du réseau en fond d'écran.

Au lieu de noyer l'opérateur sous un déluge de détails, l'interface le guide jusqu'à l'affichage pertinent, une fois le problème de modélisation repéré.

Les éléments visuels, intuitivement reconnaissables, facilitent la navigation à l'écran; cette approche centrée utilisateur s'appuie sur les connaissances et l'expérience des ingénieurs d'estimation d'état pour les aider à identifier les problèmes et contraintes du modèle.

Une interprétation haute en couleurs

La charte graphique retenue par ABB, très conviviale, s'appuie sur des styles évolutifs pour traduire la structure du modèle de réseau. L'affichage noir et blanc s'avérant déjà fonctionnel, les couleurs peuvent être réservées à la représentation de données comme les indicateurs d'état du modèle d'estimation.

Les données analogiques comme les résidus ou les temps de convergence du modèle utilisent des dégradés de couleur. Les couleurs vives attirent l'attention vers les zones du modèle sous contraintes; l'utilisateur peut ainsi saisir en un clin d'œil la typologie des défauts. Simultanément, des épingles indiquent des indicateurs ponctuels comme la convergence du dernier jeu de barres ou une erreur de topologie →4,5.

ABB a en outre tenu compte des retours clients pour enrichir sa solution d'une fonctionnalité améliorant encore l'interface utilisateur : l'affichage des écoulements de puissance active ou réactive sous forme d'animations de type flux de particules.



04

Visualisation de l'estimateur d'état

Effets visuels ou icônes superposés aux données clés

Schéma en noir et blanc, code couleur réservé aux données :

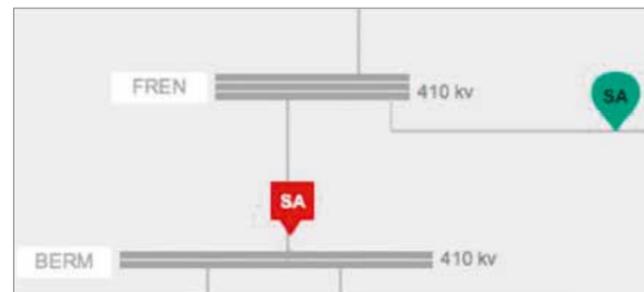
- Résidus
- Itérations de convergence
- Estimations/hypothèses

Les applications sont développées en fonction des besoins de l'utilisateur.

Épingles (à utiliser avec parcimonie)

- Dernier jeu de barres convergé
- Erreur de topologie

05 Des données superposées au réseau principal (ici sous forme d'épingles) permettent de comparer différents états du réseau selon les besoins du client : historiques, transits de puissance, simulations, etc.



05

Le réseau du futur sera visuel

Une fois l'architecture visuelle approuvée pour la surveillance et le diagnostic de l'estimateur d'état, elle peut être reprise pour d'autres applications critiques. Il serait ainsi possible de visualiser les conséquences des incidents les plus probables, ou encore l'état du réseau après une panne ainsi que la propagation des surcharges. De même, l'affichage peut aussi synthétiser les changements de situation d'un réseau voisin un jour de pic de consommation, ainsi que les fortes variations de transit ou les redondances.

Pouvoir évaluer de visu, rapidement et facilement, la demande permettra aux exploitants de fiabiliser et de sécuriser le fonctionnement de leurs réseaux. Les mêmes fonctionnalités utilisées pour la surveillance de l'estimateur d'état aideront également les spécialistes ABB de la mise en service à configurer le modèle, à mener les essais de réception et à former le personnel du client.

Bibliographie

[1] Conseil nord-américain de fiabilité électrique (NERC), *Lessons Learned: External Model Data Causing State Estimator to not Converge*, disponible sur : www.nerc.com/pa/rrm/ea/Lessons%20Learned%20Document%20Library/LL20180602_External_Model_Data_Causing_State_Estimator_to_Not_Converge.pdf, 5 juin 2018.

[2] Conseil nord-américain de fiabilité électrique (NERC), *Reference Document: Risks and Mitigations for Loosing EMS Function*, disponible sur : <https://www.nerc.com/comm/OC/>

ReferenceDocumentsDL/Risks_and_Mitigations_for_Losing_EMS_Functions_Reference_Document_20171212.pdf.

[3] Hilliard, A., et al., « Work Domain Analysis of Power Grid Operations », *Cognitive Work Analysis: Applications, Extensions and Future Directions*, p. 149-170, Londres : CRC Press, 2017.

[4] Cuffe, P., Keane, A., « Visualizing the Electrical Structure of Power Systems », *IEEE Systems Journal*, vol. 11, n° 3, p. 1810-1821, disponible sur : <https://doi.org/10.1109/JSYST.2015.2427994>, septembre 2017.

[5] Mikkelsen, C., Johansson, J., Cooper, M., « Visualization of Power System Data on Situation Overview Displays », actes de la 16^e International Conference on Information Visualisation, p. 119-126, disponible sur : <https://doi.org/10.1109/IV.2012.41>, juillet 2012.

[6] Market Watch, *Distribution Transformer Global Market Projected to Grow Radiantly by 2023*, disponible sur : <https://www.marketresearchfuture.com/reports/distribution-transformer-market-2581>, 20 février 2019.

ABB aide les gestionnaires de réseaux à doper leur rentabilité grâce à des modèles d'estimation d'état toujours plus puissants et intuitifs.

Si les estimateurs d'état sont couramment utilisés, ils sont rarement portés à un tel niveau. En effet, pour fonctionner pleinement, ils exigent un réglage fin en continu, qui ne peut être effectué que par des experts. Avec l'émergence des réseaux intelligents, les gestionnaires ont plus que jamais besoin d'outils améliorant leur perception globale de l'état du système électrique. Le développement et le déploiement des estimateurs d'état devraient donc s'intensifier, tirés par l'essor des énergies renouvelables et l'obligation de capacité pour satisfaire la demande. L'estimateur d'état doit encore conquérir le marché des petits réseaux de distribution en forte croissance [6]. Les progrès en matière d'infrastructure et de contrôle-commande, qui favorisent la pénétration de l'estimation d'état sur le marché équilibré haute et moyenne tension, lui offriront sans doute un ticket d'entrée dans la basse tension. Aux États-Unis, le transport et la distribution d'électricité devraient connaître une solide croissance d'ici à 2023 [6]. ABB accompagne les gestionnaires de ces réseaux et les aide à doper leur rentabilité grâce à des modèles d'estimation d'état toujours plus puissants et intuitifs, tel l'outil de visualisation évoqué dans cet article. •

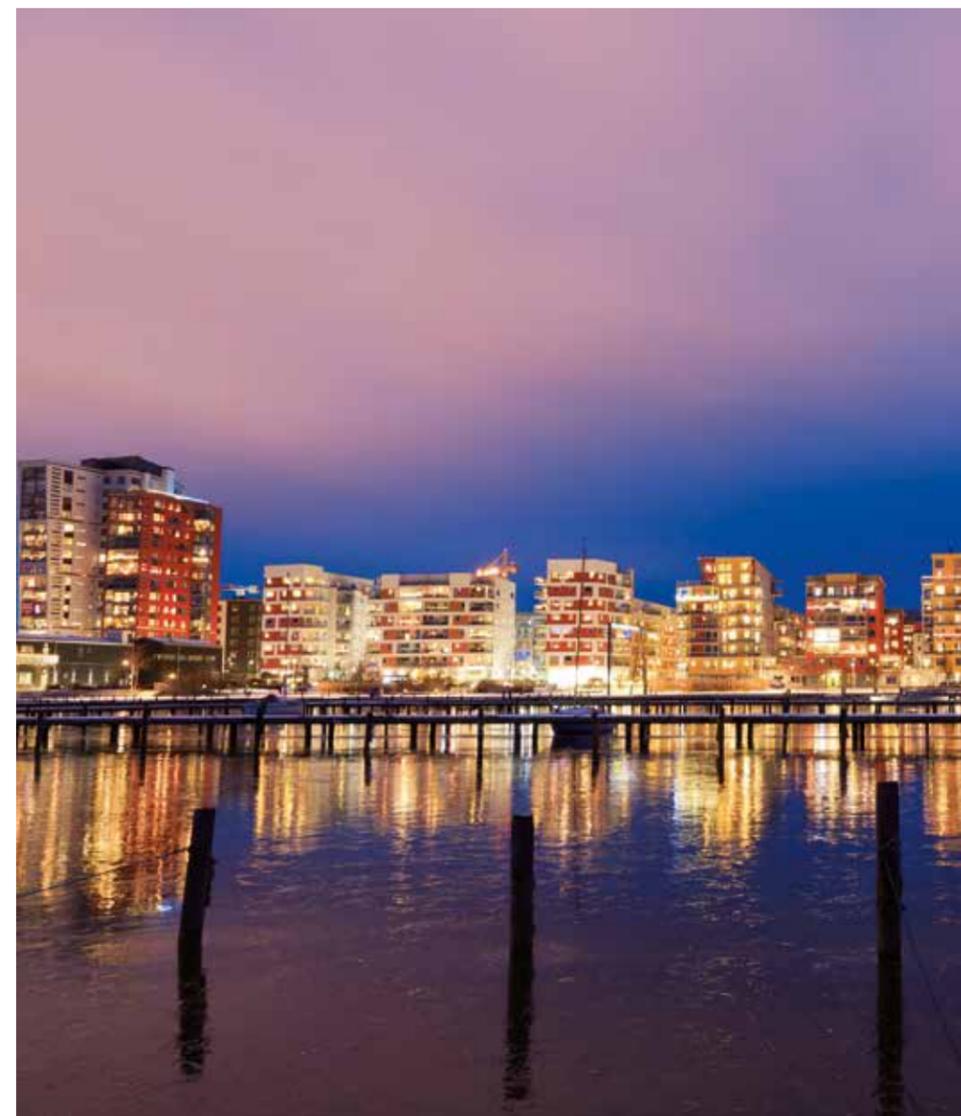
Crédits photo figure 01 page 23 : powmibe, istockphoto.com

SYSTÈMES AUTONOMES

Outils de visualisation : l'intelligence au service du collectif

Orientés utilisateur et intuitifs, les outils de visualisation développés par ABB profitent à deux composantes essentielles d'une collectivité locale : le réseau de chaleur et le système de santé. Des résultats prometteurs qui bénéficieront de l'apport de l'apprentissage automatique et de l'intelligence artificielle.

01



01 ABB collabore étroitement avec des acteurs publics et privés, comme à Västerås (Suède), pour développer des solutions de visualisation numériques favorisant efficacité et durabilité.



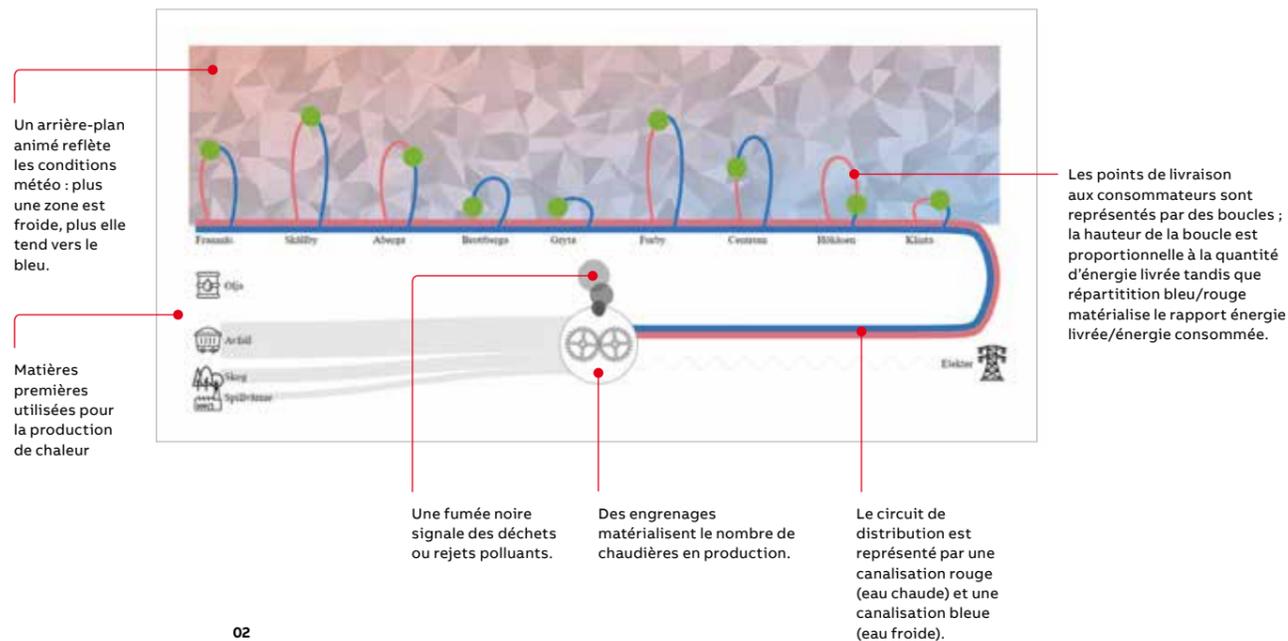
Veronika Domova
ABB Corporate Research
Västerås (Suède)

veronika.domova@se.abb.com



Shiva Sander Tavallaey
ABB Corporate Research
Västerås (Suède)

shiva.sander-tavallaey@se.abb.com



02

Une analytique et une visualisation élaborées des données améliorent la transparence et la compréhension des processus à l'œuvre dans divers services aux collectivités ; les meilleures pratiques qui en découlent sont synonymes de gains de productivité et d'économies d'énergie. Dans un hôpital, par exemple, des affichages bien conçus peuvent contribuer à l'efficacité de la chaîne de soins en fluidifiant le parcours des patients.

L'équipe ABB a développé plusieurs outils de visualisation innovants pour des établissements hospitaliers et des réseaux de chaleur urbains.

Dans le domaine des réseaux de chaleur urbains, une visualisation des données performante aide l'exploitant à optimiser la production d'énergie, au bénéfice de la population, et à réduire l'empreinte écologique régionale. Pour autant, présenter de manière complète les bonnes données au bon usager n'est pas chose facile.

En s'appuyant sur une approche orientée utilisateur¹, les experts techniques et métier d'ABB, en collabo-

ration avec de multiples acteurs du domaine, ont développé plusieurs outils de visualisation innovants pour des hôpitaux de proximité et des exploitants de réseau de chaleur en Suède.

Sur le marché actuel de l'énergie, les réseaux de chaleur et de froid (RCF) assurent une production et une distribution efficaces et durables, à partir d'une palette de combustibles →1. Ils sont très répandus en Suède, où ils desservent plus de 50 % des foyers [1].

ABB, chef de file de l'innovation dans les systèmes de contrôle-commande et d'automatisation, a pour cela une offre de solutions : superviseur de téléconduite, logiciel de gestion de pompes, ou encore solutions de communication et d'interfaçage.

Piloter la production et la distribution de chaleur est complexe et fait appel à des graphiques de procédé synthétisant une multitude de paramètres. Une tâche d'autant plus difficile qu'à l'incertitude et à l'imprévisibilité liées aux aléas météo s'ajoute le manque d'ergonomie des interface homme-machine (IHM) classiques, surchargées de chiffres et de courbes. Il en résulte souvent pour l'exploitant une gestion de la production au jugé ou purement empirique.

ABB a collaboré notamment avec plusieurs énergéticiens suédois, ainsi qu'avec le RiSe, institut de

— 02 Synoptique de la solution ABB représentant les trois composantes d'un réseau de chaleur urbain : production, distribution, consommation

— 03 Le portail AutoMed offre différentes vues selon le niveau de zoom choisi.

— 04 La vue Flux de patients indique le nombre de patients traités, service par service. Des filtres sur des critères liés au diagnostic et au temps sont disponibles. Le temps d'attente est représenté par des histogrammes.

recherche indépendant public suédois, et d'autres acteurs, dont l'agence PiIA pour l'informatique industrielle et l'automatisation, en vue de définir une IHM adaptée aux besoins du métier. Les experts de la recherche institutionnelle ABB et le RiSe ont appliqué l'approche orientée utilisateur pour transformer les données brutes temps réel du RCF en des informations facilement assimilables et exploitables par le biais d'affichages clairs, pertinents et ergonomiques améliorant la connaissance du procédé.

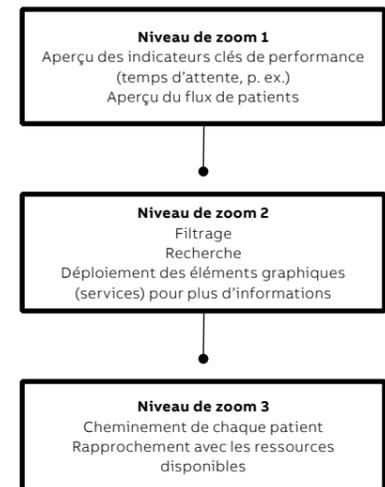
Ils ont commencé par se familiariser avec le domaine en menant des recherches poussées sur le terrain (entretiens avec des opérateurs, planificateurs de production, techniciens de maintenance, spécialistes de l'environnement, clients particuliers, fournisseurs et prestataires). Les données recueillies ont été traitées par un large éventail de méthodes analytiques pour mettre en exergue les zones d'achoppement.

Des ateliers interactifs, rassemblant exploitants et partenaires économiques sous la houlette d'ABB, ont fait émerger des solutions.

Des ateliers interactifs impliquant à la fois exploitants et partenaires économiques ont fait émerger des solutions. Une phase de prototypage itératif basse et haute fidélité a ensuite permis d'affiner le développement grâce à des ateliers d'évaluation avec les utilisateurs, dont les retours qualité étaient immédiatement intégrés.

Note

1) Lire également « L'estimateur d'état à l'œil sur le réseau électrique ! », p. 16.



03

Ce foisonnement d'idées et de concepts a ensuite été circonscrit aux propositions d'IHM offrant à l'exploitant un « instantané » de l'état du réseau. Il faut pour cela agréger de grandes quantités de données en une vue synthétique pertinente, significative et agréable à l'œil, mêlant représentations imagées, symboles et animations.

Il en résulte une « visualisation pipeline » →2, facilement accessible via un navigateur web récent, qui déroule les trois principales composantes d'un système de chauffage urbain : production, distribution, consommation.



04

—
AutoMed est un programme de recherche à long terme visant à automatiser, optimiser et planifier les processus pour mieux allouer les ressources et organiser le flux de patients.

Premier outil de travail fourni à l'opérateur, cet affichage permet de détecter rapidement les dysfonctionnements du RCF. Un simple clic sur un élément graphique donne accès aux vues ou images de détail correspondants (graphiques de procédé ou plan de ville, par exemple).

Plusieurs exploitants ayant testé la solution ont manifesté leur intérêt pour ce type de visualisation, enthousiasmés par les séquences animées et l'expressivité du code couleurs. Même si certains doutaient de l'utilité de l'outil à court terme, beaucoup se projetaient déjà dans une salle de conduite ainsi équipée. Des premiers résultats prometteurs !

Visualiser pour mieux soigner

Les systèmes de santé sont confrontés au double défi de la croissance démographique et de la raréfaction des ressources médicales. En Suède comme ailleurs, le personnel soignant consacre beaucoup de temps et d'énergie à des tâches administratives et d'entretien : écritures, planification, nettoyage et tri du matériel médical, mesures de précaution en présence d'agents pathogènes ou de substances toxiques, etc. [2]. Ces travaux du quotidien, certes indispensables, n'en sont pas moins répétitifs, monotones et potentiellement dangereux. Ils consomment un temps qui serait mieux utilisé ailleurs.

Peut-on optimiser ces tâches ? ABB en est convaincu : robots et algorithmes sont à même d'améliorer l'organisation hospitalière et de réduire ainsi la charge de travail humaine. Expert de la robotique, de l'automatisation et du contrôle-commande, le Groupe s'est penché sur des solutions de visualisation susceptibles de décharger le personnel, qui pourrait alors se recentrer sur son cœur de métier : les soins et services médicaux spécialisés.

AutoMed : la collaboration avant tout

Lancé en 2015, AutoMed est un programme de recherche médicale collaboratif à long terme financé par l'agence gouvernementale suédoise Vinnova. Rassemblant ABB, deux hôpitaux suédois et de nombreux partenaires industriels ou universitaires, il vise à développer des méthodes d'automatisation, d'optimisation, de planification, de modélisation et de simulation des processus pour mieux allouer les ressources et gérer les parcours de soins.

En l'absence de données temps réel, ABB s'est rapproché des hôpitaux pour obtenir un historique des flux de patients. Ses chercheurs ont alors pu identifier les engorgements potentiels et développer un outil de simulation prédictive. Le pilier de cette solution : une IHM garante d'une exploration et d'une analyse poussées des données.

05



—
05 Des vues synoptiques conviviales, permettant une exploration et une analyse pointues des données, aident le personnel hospitalier à identifier les motifs d'attente.

En outre, la visualisation des délais d'attente avant prise en charge doit permettre au personnel de détecter les goulets d'étranglement, sources de retards dans le système de soins global →5. En l'absence de données fiables, il n'a malheureusement pas été possible de dégager une vision complète de ce paramètre. Toutefois, un chantier supplémentaire a permis d'en approcher les valeurs pour chaque service : évaluation du temps moyen et de l'écart-type, détermination des données aberrantes (délais d'attente anormalement courts ou longs, par exemple).

L'équipe ABB a aussi planché sur des vues contribuant à formaliser la prise en charge d'une maladie donnée. En effet, paradoxalement, le protocole de traitement post-diagnostic varie d'un cas à l'autre : les services à impliquer et les procédures à suivre dépendent en partie du jugement et des décisions spontanées de l'équipe soignante. Dans une optique d'uniformisation, les chercheurs ABB ont isolé le dénominateur commun aux parcours de soins de certaines pathologies, base de la standardisation des processus.

Innover pour mieux visualiser

Un portail web affiche les données médicales dans plusieurs vues synthétiques interactives : flux des patients, dossier médical et parcours de soin de chacun d'eux →3.

—
ABB s'est penché sur des solutions de visualisation susceptibles de décharger le personnel hospitalier au profit de son cœur de métier : soigner.

La première vue présente les données sous forme hiérarchique, avec l'organisation de l'hôpital et le nombre de consultations et d'admissions dans chaque service pendant une période donnée →4. Des filtres sur des critères liés au diagnostic et au temps sont disponibles. Un clic permet de déployer ou de refermer l'élément graphique représentant chaque service. La répartition des temps

d'attente est représentée par un histogramme circulaire entourant le service, où les valeurs vont croissant dans le sens horaire.

Le portail web AutoMed permet l'exploration des données médicales dans plusieurs vues interactives.

La longueur de chaque barre est proportionnelle à la durée d'attente. Passer le pointeur de la souris sur une barre affiche la valeur correspondante dans une fenêtre contextuelle. Un code couleur indique si cette durée est inférieure, légèrement supérieure ou très supérieure à un seuil estimé. Un clic sur la barre redirige l'utilisateur vers la vue des dossiers médicaux correspondants.

La deuxième vue affiche le parcours thérapeutique de chaque patient. Des filtres ainsi qu'un identifiant personnel permettent de retrouver un patient, tout en respectant son anonymat.

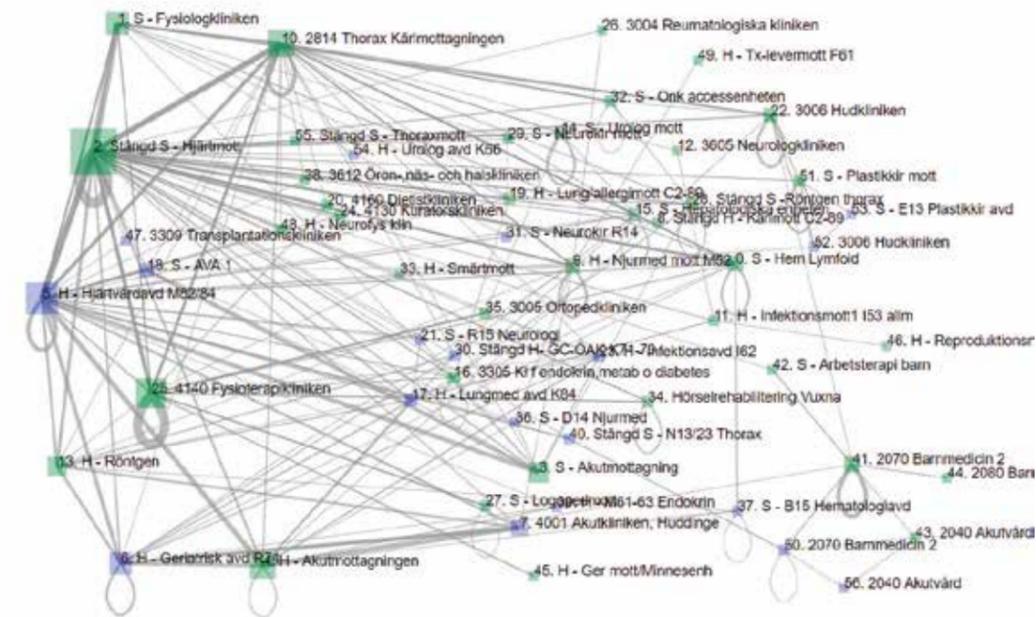
L'historique pour une maladie donnée présente les diagnostics, les services consultés, les soins délivrés et les temps d'attente →6. Le temps d'attente est rapproché à l'écran de la disponibilité des ressources, notamment du nombre de lits disponibles à cette période, afin de faire apparaître des corrélations potentielles.

Le « diagramme des transitions » →7 représente le cheminement du patient dans les différents services de la chaîne de soins. Il est alors possible de grossir l'élément graphique des services ou parcours suivis par de nombreux patients. Passer le pointeur de la souris sur l'un d'eux fait apparaître le détail des données correspondantes. Des filtres permettent de cibler les services et transitions relatifs à une pathologie donnée.

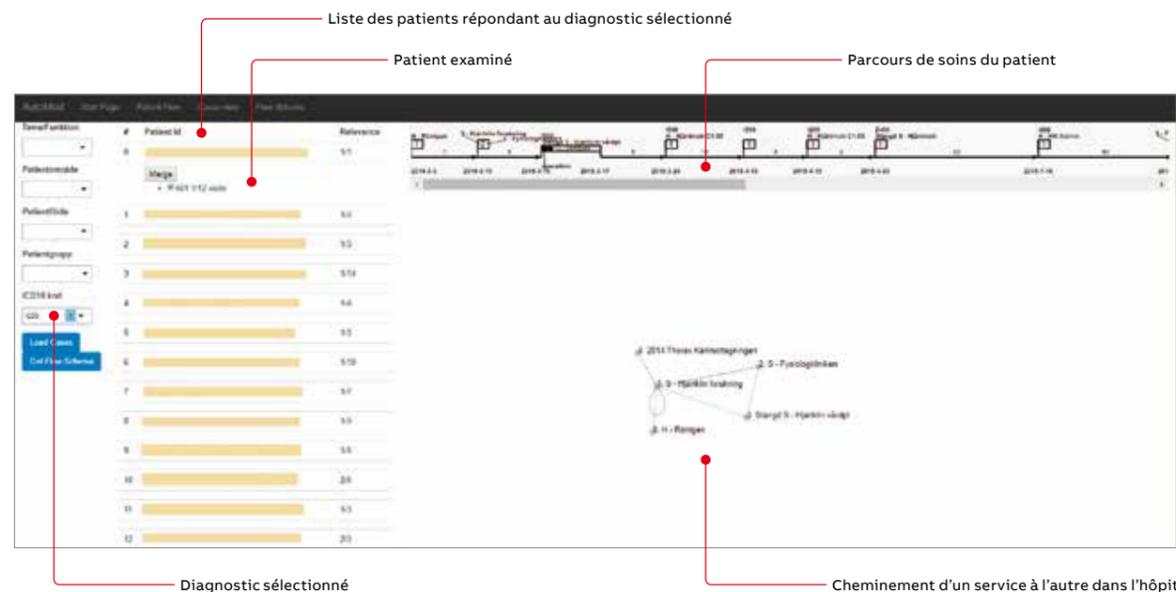
Le succès d'un outil de visualisation se mesurant à l'aune de sa convivialité, le portail web a fait l'objet d'une démonstration au personnel soignant et de tests pratiques. Les premiers retours se sont révélés positifs : les participants ont proposé des évolutions tout en se montrant favorables à la poursuite du projet.

06 La vue Dossier médical affiche l'historique des patients pour une pathologie donnée.

07 Le diagramme des transitions retrace le cheminement des patients de service : la dimension des éléments graphiques (taille des icônes et épaisseur des flèches) est proportionnelle à la fréquentation du service et à l'importance du flux.



07



06

Bibliographie

[1] Euroheat & Power, District Heating in Sweden, disponible sur : <https://www.euroheat.org/knowledge-hub/district-energy-sweden/>, mai 2017.

[2] Westbrook, J., et al., « How much time do nurses have for patients? », BMC Health Service, disponible sur : <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3238335/>, 24 novembre 2011.

Défis et perspectives

L'accès à des informations de qualité est essentiel au développement de solutions fondées sur les données, une exigence difficile à satisfaire dans de nombreux secteurs, notamment celui de la santé. Dans les deux projets présentés, la définition du périmètre d'intervention a soulevé une batterie de problèmes relatifs aux données : questions juridiques liées au transfert, données manquantes ou de mauvaise qualité, jargon spécialisé, etc. Pour les résoudre, l'équipe ABB a procédé à des analyses manuelles ou informatiques en partenariat avec les représentants métier avant de pouvoir délimiter les objectifs.

L'apprentissage automatique et l'intelligence artificielle sont les prochaines étapes d'une visualisation efficace des données massives.

Le nombre et la variété des parties prenantes ont favorisé les collaborations et ouvert un large champ de perspectives. À l'inverse, les contraintes d'emploi du temps ont parfois fait obstacle à l'avancement des travaux. Au cours des recherches in situ, l'équipe ABB a constaté des pratiques de travail bien ancrées qui tendaient à freiner l'acceptation du changement. Exploitants de RCF comme personnel médical se sont néanmoins montrés intéressés par les avantages de ces nouvelles solutions et leur potentiel en matière d'efficacité et de productivité.

Forts de ces succès, les chercheurs ABB poursuivent leurs travaux sur la visualisation efficace de données massives. En toute logique, apprentissage automatique et intelligence artificielle devraient faire leur entrée dans ce domaine, à des fins d'aide à la décision. •

AUTOMATISATION MODULAIRE DES PROCÉDÉS : 2^E PARTIE

Couche orchestration : théorie et pratique

La modularisation est perçue comme le moyen de lever les obstacles auxquels est confrontée l'industrie de transformation. Le groupe ABB est de ceux qui ont développé des concepts et produits pour automatiser les procédés continus modulaires. Après en avoir exposé les fondements dans un précédent numéro d'ABB Review, nous faisons ici le point sur le niveau « Orchestration » de cette nouvelle architecture industrielle et en illustrons le développement avec deux applications pilotes.

Mario Hoernicke
Katharina Stark
ABB Corporate Research
Ladenbourg (Allemagne)

mario.hoernicke@
de.abb.com
katharina.stark@
de.abb.com

Axel Haller
ABB Automation GmbH
Industrial Automation
Mannheim (Allemagne)

axel.haller@de.abb.com

Ralf Jeske
ABB Automation GmbH
Industrial Automation
Minden (Allemagne)

ralf.jeske@de.abb.com

Henry Bloch
Alexander Fay
Universität Helmut
Schmidt de Hambourg
Hambourg (Allemagne)

Alexander Wittenbrink
INVITE GmbH
Leverkusen (Allemagne)

Torsten Knohl
Bayer AG
Leverkusen (Allemagne)

Stephan Hensel
Leon Urbas
Anna Menschner
Universität technique
de Dresde
Dresde (Allemagne)

Les industriels voient aujourd'hui la modularisation des process comme une promesse de flexibilité accrue et d'interopérabilité des actifs de l'usine. Conscient de ce nouvel enjeu de l'automatisation des procédés continus, ABB est depuis 2014 membre d'un consortium réunissant le géant de la chimie et de la pharmacie Bayer, l'université technique de Dresde, la société INVITE (fruit d'un partenariat public-privé entre l'université technique de Dortmund et Bayer Technology Services) ainsi que l'université Helmut Schmidt de Hambourg pour concrétiser ce concept.

—
La modularisation promet de lever bon nombre de difficultés rencontrées par les exploitants de procédés continus.

Un système d'automatisation modulaire est bâti sur deux niveaux interconnectés par un réseau :

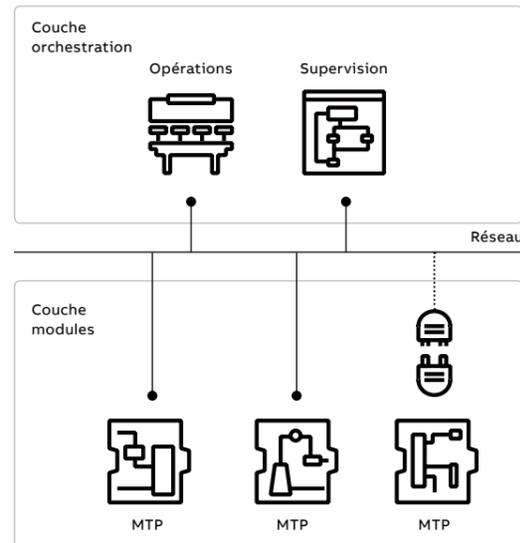
- une « couche de modules », qui matérialise un petit automate exécutant la logique de commande d'une unité de process ;
- une « couche d'orchestration », qui fédère et pilote ces modules de procédé pour bâtir l'outil de production continue.

À la différence des sites traditionnels, l'usine modulaire ne se fonde pas sur des milliers d'entrées/sorties commandées par un automate central mais sur des petits « blocs de fonctions » autonomes et réutilisables, à l'image des environnements logiciels orientés objet. Le consortium formé par ABB et ses partenaires industriels et académiques s'est notamment attaché à définir le sous-système « MTP » (Module Type Package), qui assure l'intégration transparente des modules de procédé au système d'orchestration [1] →1.

Plus précisément, MTP spécifie les interfaces nécessaires à la communication entre les automates modulaires et la couche orchestration de niveau supérieur, mais aussi les modules eux-mêmes ainsi que leurs fonctionnalités et services. Ce dispositif est fondamental pour alléger l'effort de développement de nouveaux projets d'automatisation.

La couche modules est construite à partir des différents types de modules nécessaires à l'application, librement choisis par l'ingénieur. Un module assure un ensemble de fonctions process encapsulées appelées « services », qui décrivent chacune une opération (mélange, refroidissement, chauffage, etc.) et sont orchestrables depuis un système de supervision. Les modules « interopèrent » pour accomplir les tâches de l'application.





01

Pour bâtir un nouveau système, il faut d'abord développer ces types de modules, puis les intégrer dans le superviseur. Pouvoir réutiliser des modules de même type écourte considérablement cette phase de développement.

La couche modules et la couche orchestration communiquent sous protocole OPC UA ; le superviseur est alors un client OPC UA qui se connecte aux serveurs embarqués dans les modules pour transmettre ses commandes.

La couche modules exécutant peu d'opérations, elle peut se contenter du contrôleur Freelance AC700F d'ABB ou du Système X20 de B&R Industrial Automation, par exemple. La couche orchestration, quant à elle, met en œuvre la plateforme d'automatisation 800xA d'ABB.

Pouvoir réutiliser des modules de même type écourte considérablement la phase de développement.

Couche orchestration

Au sommet de l'édifice, la couche orchestration gère le fonctionnement des modules et des services intégrés (démarrage, arrêt et visualisation), ainsi que le dialogue homme-machine, suivant les spécifications MTP. Une couche orchestration type n'utilise pas de contrôleur mais commande les

modules sous OPC UA, via un ordinateur classique, par exemple. Les modules étant très facilement définis dans MTP, le développement de la couche orchestration est aussi simple que rapide.

Développement

Le développement de la couche orchestration comporte trois volets : la bibliothèque de types de modules, la définition de la structure de l'usine et l'élaboration de la stratégie de commande.

La bibliothèque de types de modules, extensible, est au cœur du dispositif. Chaque type y est importé et mis à la disposition des autres étapes du développement. L'importation se résume à la sélection d'un fichier MTP, sans aucune autre configuration.

Après avoir ajouté les types de modules requis par l'application à la bibliothèque, l'ingénieur peut les utiliser pour organiser l'usine. Chaque type indique ses « frontières » au sein de MTP, c'est-à-dire des points de raccordement du module à un équipement (conduite, par exemple) ou à un flux d'information (signal). Ces données peuvent servir à cartographier l'usine. À chaque module correspond un symbole généré dans l'éditeur de topologie, créant ainsi une instance de module →2. Les modules sont interconnectés par leurs entrées/sorties, spécifiées dans MTP. Chaque module a son propre nom de variable qui lui sert d'identifiant dans le système de supervision.

Dernière étape : la stratégie de commande est bâtie sur un diagramme fonctionnel en séquence (SFC). Rappelons qu'un programme écrit en langage SFC, conforme CEI 61131-3, est une succession d'étapes et de transitions reliées par des liaisons dirigées vers des branches parallèles ou alternatives. Dans notre cas, la logique de commande est définie en regard des étapes et transitions : au lieu d'un code CEI 61131-3 classique, on obtient une liste des modules avec leurs services et commandes possibles. Les modules utilisables sont automatiquement inclus dans les tables basées sur la structure de l'usine développée au préalable.

La simplicité du processus permet de générer une bonne part de l'environnement d'exécution, lequel se compose de deux grandes parties : la visualisation et la gestion des modules.

Les informations nécessaires à l'usine sont importées de l'outil de développement dans le système de contrôle-commande 800xA, qui génère alors automatiquement toutes les données utiles aux opérateurs et aux ingénieurs de production →2-4.

01 Architecture du système d'automatisation modulaire ABB

02 Modélisation de l'usine à l'aide de modules de procédé ; à chaque module correspond un écran.

03 Pour chaque variable de module, synoptique et symboles ont immédiatement accès aux valeurs en ligne et sont automatiquement rafraîchis.

04 Espace de la couche orchestration dans le système 800xA : vue d'ensemble montrant la topologie de l'usine et la séquence de commande.

Le système d'orchestration 800xA étant décrit, le développement de l'usine modulaire et la configuration de l'outil d'exécution sont presque entièrement automatisés. L'utilisateur dispose ainsi d'un environnement d'exploitation totalement opérationnel, capable de piloter immédiatement les modules dès l'établissement d'une connexion.

Applications pilotes

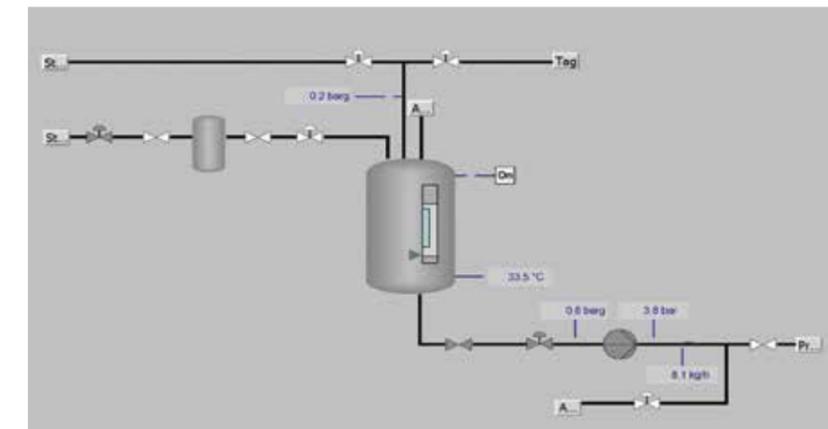
Deux applications ont été testées pour vérifier le concept : la première avec l'association de chimistes allemands NAMUR, la seconde en conditions réelles avec le groupe pharmaceutique Bayer.

NAMUR

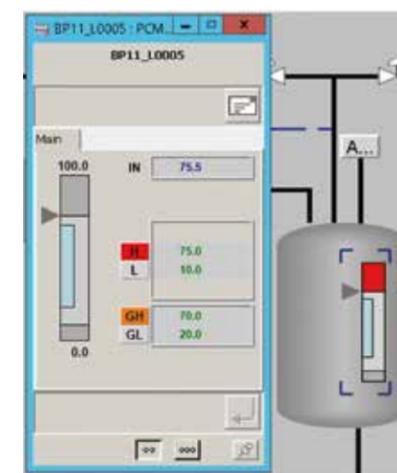
L'application met en œuvre trois types de modules, chacun réalisant deux à quatre fonctions successives →5 :

- Quatre alimentateurs (BPxx) : inertage, dosage, déchargement et remplissage ;
- Un réacteur de mélange (RP04) : inertage, traitement et refroidissement ;
- Un distillateur (KW06) : inertage et traitement.

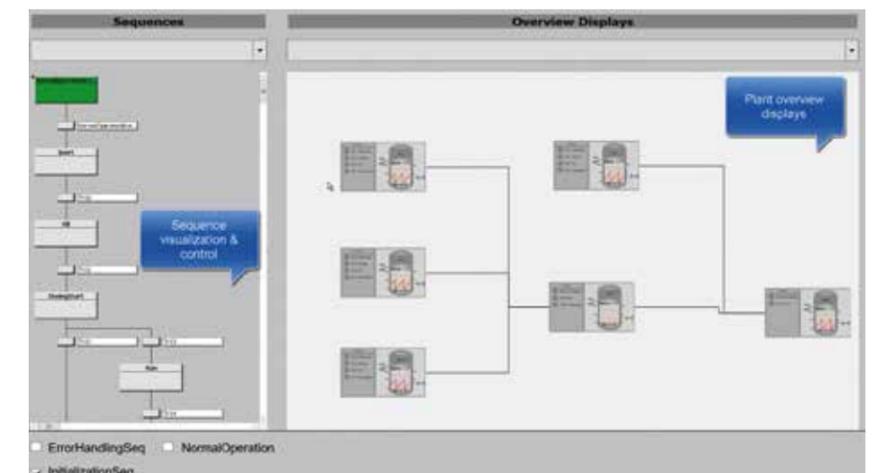
Le développement de l'usine modulaire et la configuration de l'environnement d'exécution du niveau orchestration sont presque entièrement automatisés.



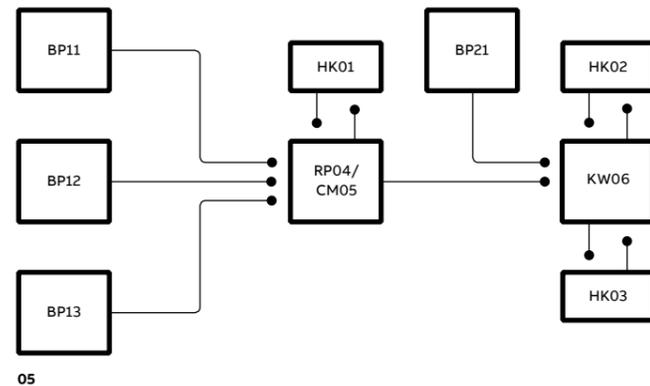
02



03



04



Trois des alimentateurs effectuent le dosage des produits destinés au réacteur de mélange ; ce dernier alimente à son tour l'étage de distillation, lui-même raccordé au quatrième alimentateur.

À noter que ce schéma comporte également des réchauffeurs (HKxx), qui ne sont pas pris en compte dans l'application pilote. Par ailleurs, le réacteur/mélangeur peut être remplacé par un réacteur continu (CM05), lequel ne figure pas non plus dans ce pilote en raison de ses grandes similitudes avec le réacteur de mélange.

Toute séquence débutant obligatoirement par un inertage, il y a interverrouillage des autres fonctions avec cette opération.

Chaque type de module est assorti d'une interface homme-machine bâtie sur les schémas de tuyauterie et d'instrumentation spécialement fournis par NAMUR pour cette étude de cas.

À cela s'ajoute une description des modules et de l'usine modulaire. Toutes ces informations permettent de mettre en œuvre les modules de l'application pilote à l'aide de composants ABB et du prototype. Une interface MTP est créée pour chaque type de module, l'ensemble des MTP définissant la topologie du site. Enfin, une séquence de démarrage du procédé est développée ; elle s'arrête lorsque l'usine atteint le régime permanent.

Bayer

L'application pilote est ici l'unité de filtration d'une usine pharmaceutique de principes actifs. Elle se compose de trois modules : deux équipés de contrôleurs ABB Freelance, et le troisième, d'un

Système X20 de B&R Industrial Automation. Le développement a utilisé le prototype et l'atelier logiciel Freelance.

Les services associés à chaque type de module ont été tirés des schémas de tuyauterie et d'instrumentation, des descriptions fonctionnelles, des séquences, des exemples de code et des listes de variables fournis par l'industriel. Les documents techniques usuels ont permis de renseigner et de décrire les services.

L'étape suivante a consisté à créer les interfaces MTP et à les ajouter à la bibliothèque des types de modules dans l'outil de développement de la couche orchestration. C'est à ce niveau qu'ont été conçues la topologie de l'usine modulaire et les séquences de commande. L'un des modules résultants est visible en →6 [2].

—
L'automatisation des procédés modulaires, tant aux niveaux exploitation que supervision, est une réussite.

Ces deux pilotes sont la preuve que le dispositif fonctionne et tient ses promesses de réduction des temps de développement, de mise en service et de mise sur le marché.

Automatiser pour développer plus vite

L'automatisation des procédés modulaires, tant aux niveaux exploitation que supervision, est donc une réussite. Cette nouvelle démarche allège considérablement la réalisation du système par rapport

—
05 Exemple d'application NAMUR

—
06 Module de filtration Bayer équipé du système d'automatisation modulaire ABB (photo reproduite avec l'aimable autorisation de Bayer AG)

aux méthodes traditionnelles. Sans compter que les modules opérationnels sont réutilisables, ce qui accélère le développement et le lancement d'autres applications d'automatisation modulaire. C'est autant de temps de gagné sur toute l'ingénierie de l'usine.

—
Ces travaux ont abouti à un logiciel d'automatisation des procédés modulaires.

Le projet a en outre fourni de précieux enseignements pour standardiser l'interface MTP et ses résultats ont bénéficié aux divers profils d'intervenants, qu'ils soient universitaires, chercheurs, développeurs et exploitants. Le standard, que les partenaires du projet entendent respecter et faire évoluer, est appelé à beaucoup progresser.

Ces travaux ont abouti à un logiciel d'automatisation des procédés modulaires, qu'ABB et ses partenaires ne manqueront pas d'enrichir de nouvelles fonctionnalités pour répondre aux dernières exigences du domaine et favoriser une totale conformité normative. •



Bibliographie

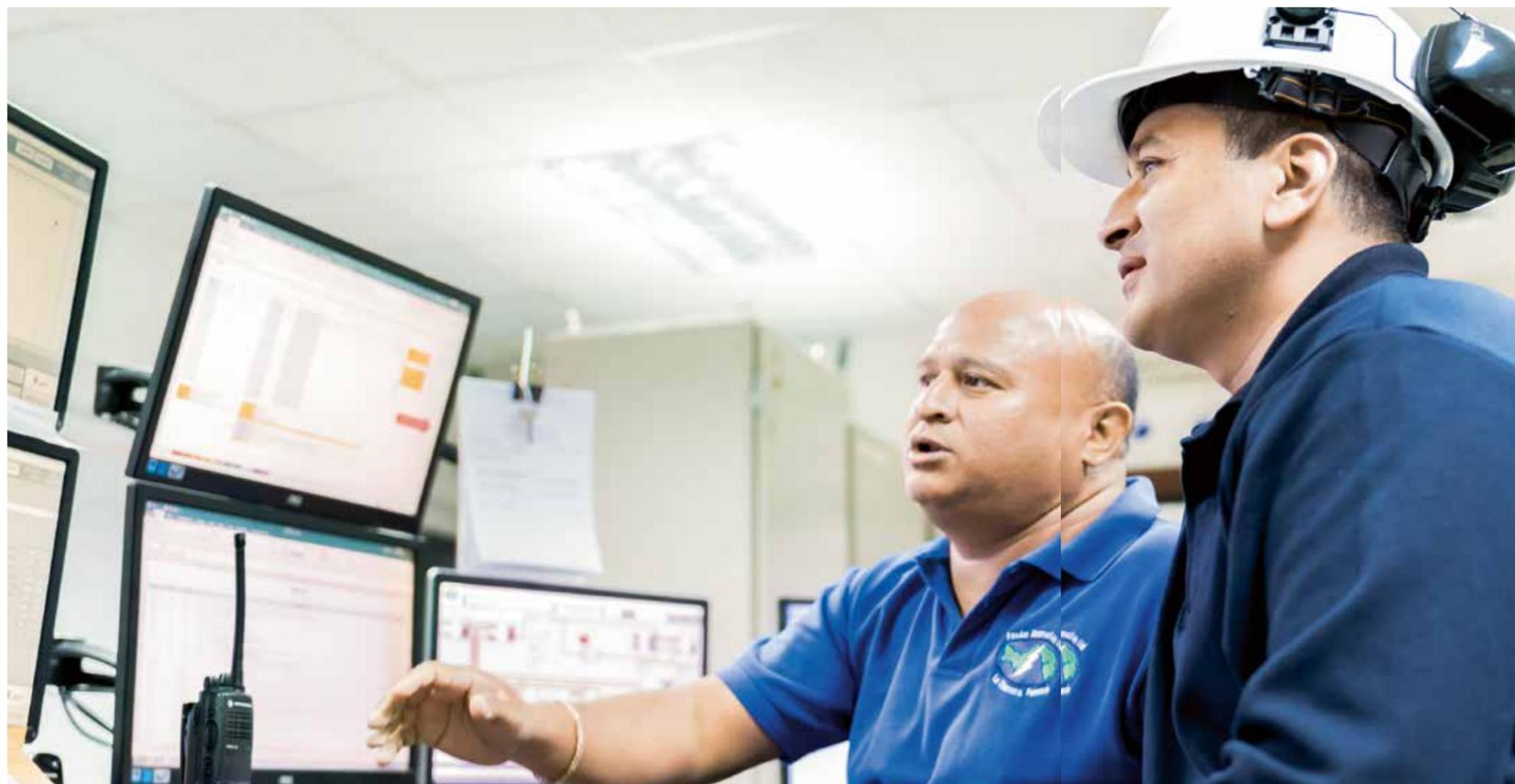
[1] Bernshausen, J., et al., « NAMUR Module Type Package – Definition », atp édition, 58(1-2), p.72-81, 2016.

[2] ABB, Modular automation solution for life science company Bayer AG, disponible sur : <https://new.abb.com/life-sciences/references/modular-automation-solution-for-life-science-company-bayer-ag>.

SYSTÈMES AUTONOMES

L'analytique fait parler le procédé

Fruit de l'expertise des spécialistes ABB du *process*, la nouvelle suite d'outils de diagnostic et d'analytique DIAS permet à l'industrie de transformation d'identifier, de comparer et de gérer en continu les défaillances, alarmes et chronogrammes d'événements. Déployée sur site ou dans le cloud, cette innovation ABB est un remarquable outil d'aide à la décision.



—
01 DIAS aide les opérateurs de conduite à diagnostiquer les perturbations et alarmes du procédé.

De nos jours, les systèmes d'automatisation industrielle produisent au fil de l'eau des quantités astronomiques de données. Prenons l'exemple du secteur amont de l'industrie pétro-gazière : les ingénieurs de maintenance ABB reçoivent près de 1,5 Go de données compressées par mois, soit plus de 3900 variables, 250 000 alarmes et événements. Un afflux d'informations que l'industriel doit pouvoir utiliser sans avoir le moindre doute quant à leur véracité. L'analytique est l'outil par excellence pour discerner les informations pertinentes au sein des données brutes, distinguer les états de marche normale des dysfonctionnements, mais aussi pour proposer des améliorations et permettre aux opérateurs de lancer les actions correctives →1. Reste que trier le bon grain de l'ivraie est une tâche ingrate, qui mobilise par ailleurs de solides connaissances métier.

—
DIAS allie l'analytique moderne à l'expertise de la maintenance ABB pour doter les clients d'une solution complète, bâtie sur des connaissances expertes en génie des procédés.

Les critères de sécurité, de performance et de rentabilité étant indissociables, ABB a développé une nouvelle solution analytique dédiée à l'automatisation des procédés continus : DIAS, acronyme de *Data Analytics Tools for Industrial Automation*. Conçue en 2017 pour renforcer les capacités d'analyse et de diagnostic, DIAS allie les méthodes analytiques modernes à l'expertise des équipes de maintenance ABB pour doter les clients d'une solution complète, bâtie sur l'expérience du terrain. Elle fournit une vue globale des données historiques, assortie de courbes interactives qui permettent aux ingénieurs de se concentrer sur les détails importants et mener une analyse fine et efficace. Bref, de plonger au cœur du procédé pour en décrypter les subtilités en vue d'améliorer la prise de décision, la sécurité et la rentabilité des opérations.

—
Nuo Li
Martin Hollender
Andrew Cohen
Moncef Chioua
Matthieu Lucke
ABB Corporate Research
Ladenbourg (Allemagne)

nuo.li@de.abb.com
martin.hollender@de.abb.com
andrew.cohen@de.abb.com
moncef.chioua@de.abb.com
matthieu.lucke@de.abb.com

—
Rheinhard Bauer
Ancien collaborateur ABB

Explorer

Les alarmes servent à identifier les anomalies de fonctionnement d'un procédé. Une fois déclenchées, elles peuvent rapidement se propager et noyer les opérateurs de conduite sous une avalanche de données, les empêchant de gérer l'événement en toute sécurité. Dans la chimie, cette surcharge est à l'origine de la plupart des accidents soumis aux enquêteurs de l'agence fédérale américaine Chemical Safety Board [1]. À l'impératif de sûreté de fonctionnement et de sécurité du personnel s'ajoutent les coûts induits par ces événements, qui peuvent dégrader la rentabilité.

C'est pourquoi ABB a étudié les moyens d'améliorer l'analyse des données, notamment dans le cadre d'une unité de séparation de pétrole et de gaz en mer. Rappelons que la séparation est la première étape du traitement hydrocarbure, qui consiste à isoler les composants principaux du mélange brut polyphasique (huile, gaz et condensats) à proximité du puits producteur. Pour évaluer le système DIAS, ABB s'est vu confier 382 jours d'enregistrement de données opérationnelles de l'usine.

La solution d'ABB permet de rechercher et d'inspecter un événement suspect ; AE Explorer réorganise l'écran en conséquence.

Forts de leur expérience, les ingénieurs de maintenance ABB ont naturellement commencé par rechercher et identifier les alarmes de procédé et

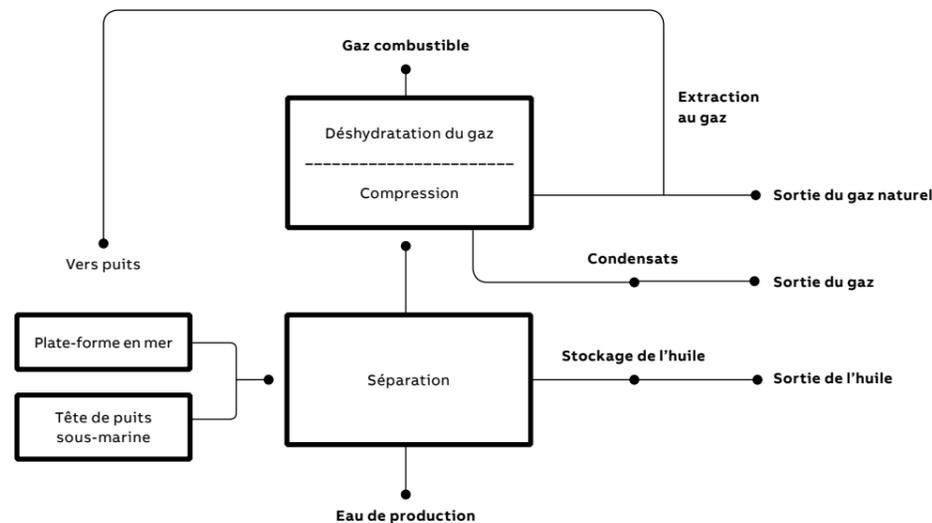
les événements déclencheurs, aidés en cela par l'explorateur de DIAS, AE Explorer. Ce dernier affiche des écrans fournis, mais d'une grande lisibilité →3. Des fonctions de zoom, de glisser-déposer, et bien d'autres, aident les ingénieurs à obtenir une vue claire de la situation.

Sur détection d'un événement suspect, un simple clic permet de lancer la fonction « Investigation ». AE Explorer réorganise alors l'écran pour permettre à l'opérateur d'inspecter rapidement et aisément l'événement en question. Une fois les données triées, DIAS affiche en clair l'enchaînement des événements et leurs liens de causalité →4. Résultat : une meilleure réactivité de la maintenance aux aléas et incidents du quotidien.

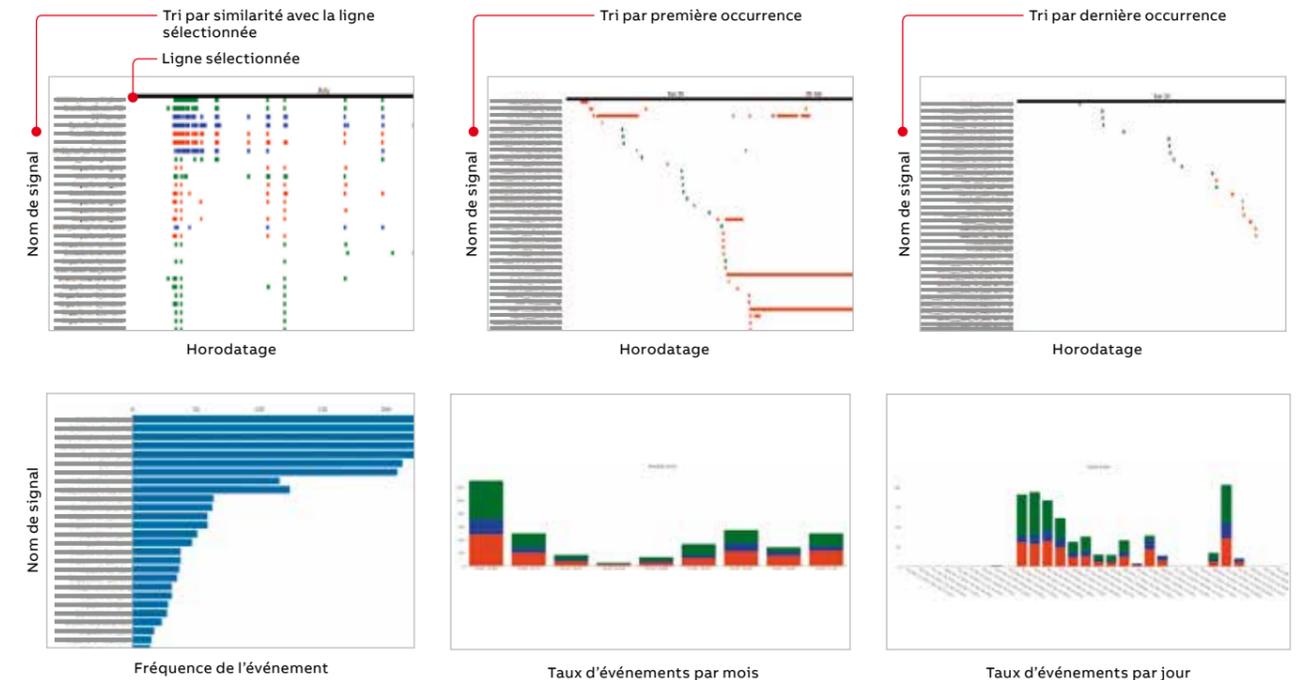
Décrypter

Conséquence du déploiement de systèmes de contrôle-commande distribué et de l'interconnexion des unités de production continue, la surabondance de données pose un réel défi à la gestion d'alarmes des usines modernes [2]. Dans ce contexte, un diagnostic rapide et précis des alarmes récurrentes améliore beaucoup le fonctionnement du procédé piloté. DIAS s'appuie donc sur des techniques d'apprentissage automatique pour regrouper et classer les alarmes problématiques, et repérer les alarmes récurrentes parmi la masse de données opérationnelles.

ABB a rigoureusement testé cette fonctionnalité sur la colonne de séparation pétrole/gaz d'une plate-forme offshore →2. À cette occasion, DIAS a repéré 1473 variables en alarme. Une avalanche étant définie comme 8 alarmes ou plus en 10 minutes, DIAS a identifié 926 avalanches qu'il a automatiquement réparties en 5 classes en fonction de leur similarité.



03a



03b

02 Synoptique d'exploitation d'une unité de séparation pétrole/gaz

03 Exemples d'écrans de l'explorateur d'alarmes et d'événements AE Explorer

03a Fiche aide-mémoire

03b Identification et tri des événements

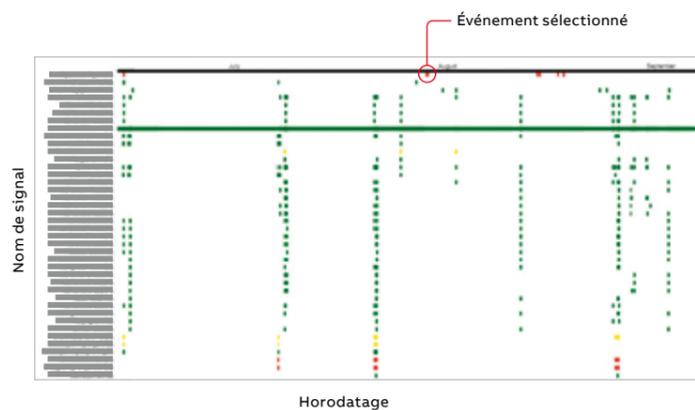
Dans un cas d'anomalie, DIAS a groupé 16 avalanches d'alarmes dans la même classe et a localisé avec précision le dysfonctionnement dans le système de réinjection d'eau de production →5.

DIAS s'appuie sur un outil d'apprentissage automatique pour regrouper et classer les alarmes problématiques.

Dans cette classe, les séquences d'avalanches débutent par une alarme « écoulement faible » dans la pompe P11 (A FICA 130 L), très vite suivie d'une alarme similaire dans la pompe P21 (A FICA 116 L), ce qui arrête les deux pompes. Le niveau du tambour de dégazage augmente rapidement jusqu'à l'activation des alarmes « niveau haut » d'eau (C LICA 128A H) puis « niveau haut » d'huile (C LT 118 H). Cette nouvelle approche de

co-activation d'alarmes se prête bien ici à l'analyse des séquences en cours et surpasse la méthode établie d'alignement des séquences de défaut [2,3].

Sachant qu'il est capital pour l'être humain de comprendre et d'interpréter les données des algorithmes d'apprentissage automatique, DIAS constitue un atout incomparable, notamment en termes de transparence : il permet aux ingénieurs de tirer parti de leur connaissance du process pour améliorer les résultats des groupements d'alarmes. Cela passe par un maniement intuitif de l'interface graphique. Un exemple : deux des seize avalanches d'alarmes regroupées par l'algorithme apparaissent dans le même bandeau vertical →6a. Les ingénieurs sont ainsi en mesure d'inspecter et de valider les classes résultantes avec des outils de comparaison spécifiques ou l'explorateur AE Explorer.



04

ingénieurs de maintenance ABB en étudient certes les données opérationnelles, mais s'intéressent surtout aux chronogrammes des signaux pré- et post-incidentiels. Pour cela, AE Explorer leur permet d'abord d'identifier l'événement d'intérêt, puis DIAS les redirige vers l'écran des transitoires afin de comparer et d'analyser les séries de données temporelles enregistrées peu avant et après l'événement sélectionné →7a.

L'écran de l'enregistreur de transitoires permet de fouiller dans l'historique d'un événement. Il est ainsi possible, de déceler un défaut capteur en comparant la différence entre les mesures de courant effectuées aux bornes d'entrée et de sortie d'un moteur →7b.

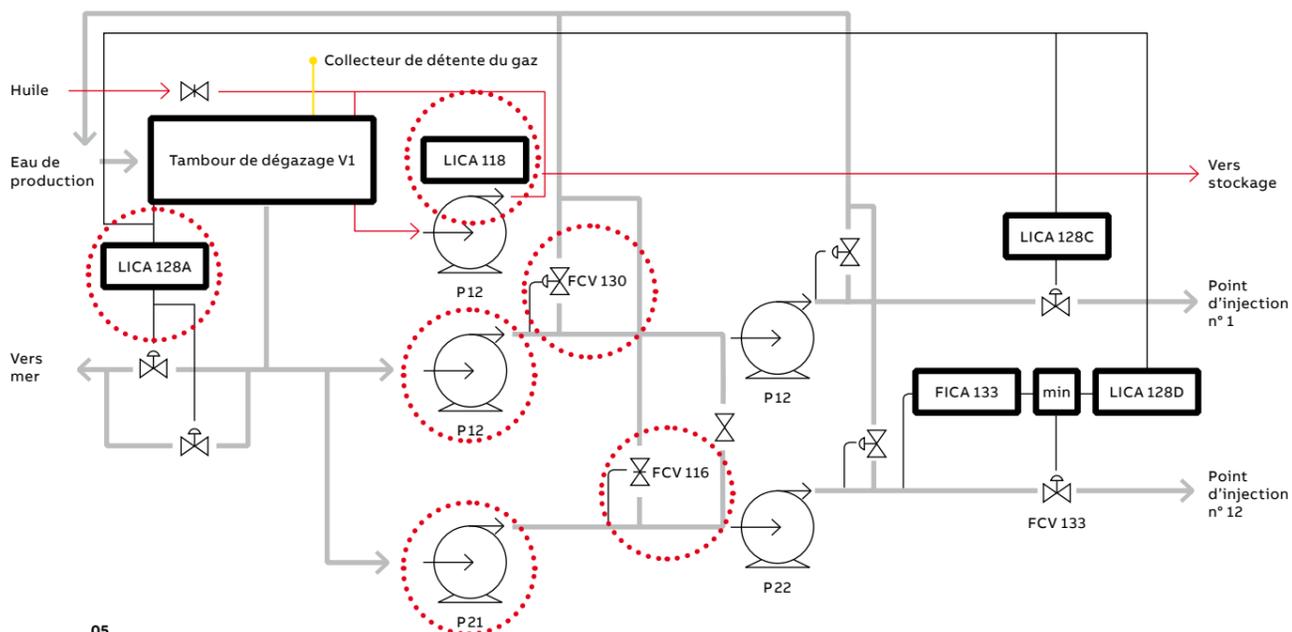
DIAS utilise des cartes de chaleur pour signaler des points clés dans les séries de données temporelles.

DIAS fait aussi usage de cartes de chaleur pour signaler des faits marquants dans les séries temporelles, comme par exemple une brusque variation de niveau d'un signal →8a : chaque pavé représente ce changement brutal, à un instant 't', le dégradé de couleur reflétant l'importance de l'événement. Il suffit alors de cliquer sur un pavé pour être redirigé vers un écran de tendances haute résolution en affichant le détail.

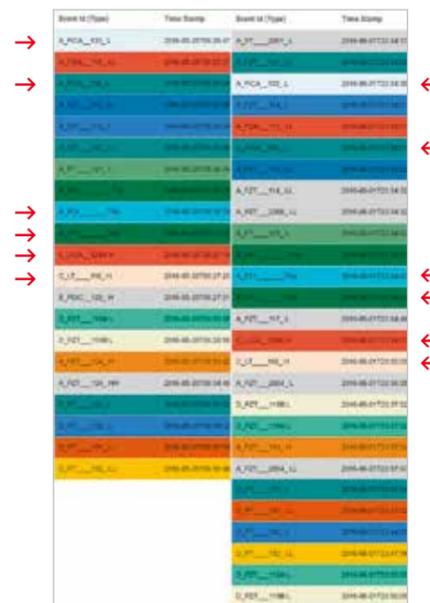
Pour les aider à discriminer les causes de défaut majeures d'alarmes similaires, AE Explorer peut encadrer ces avalanches à l'aide de règles, puis rechercher les événements récurrents survenus juste avant ou après →6b. Plus un événement est fréquent, plus grande est sa probabilité d'avoir la même origine que celle ayant provoqué le flot d'alarmes →6c. Cette double capacité de classement d'événements et d'identification des causes d'alarmes contribue à la sécurité, à la productivité et donc à la rentabilité du site.

Scruter

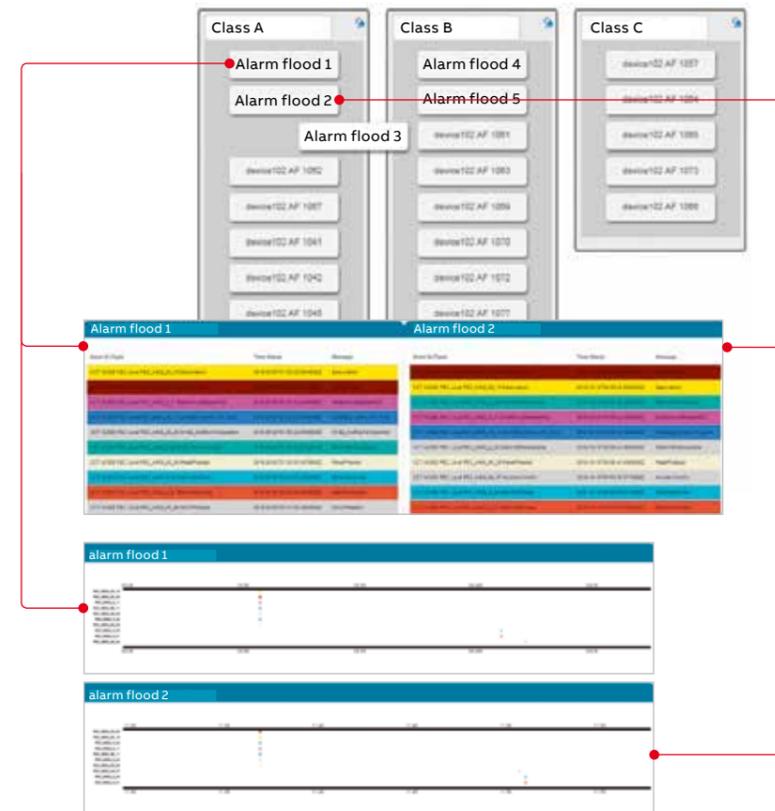
Le bon fonctionnement des procédés minéralurgiques (mines, cimenteries) repose sur des entraînements sans réducteur. Pour améliorer les capacités analytiques de ces systèmes, les



05



06a



06b

Comptage des occurrences d'événements avant/après sélection d'une avalanche d'alarmes

04 Chaîne de causalité

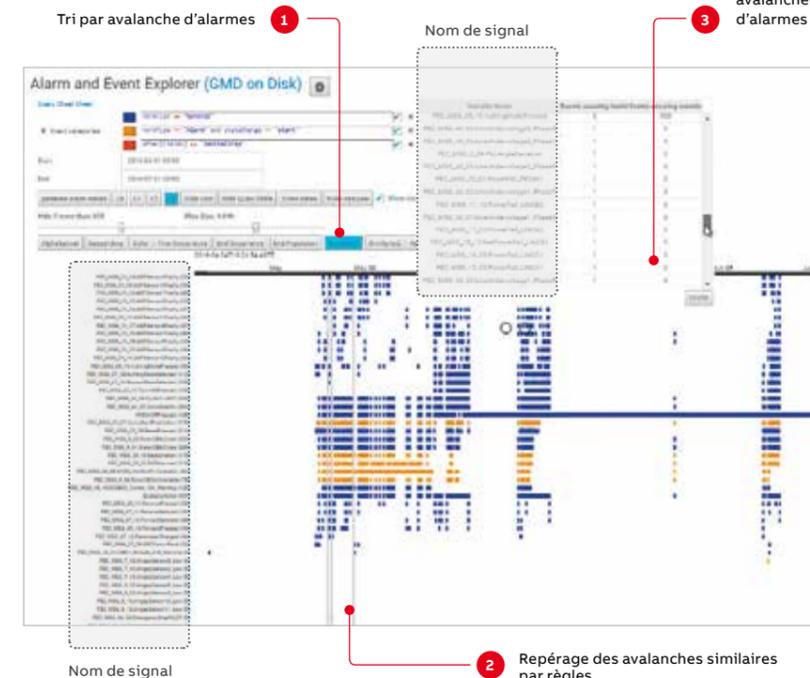
05 Schéma de procédé de réinjection d'eau de production (gris : circuit d'eau, noir : circuit d'huile, jaune : circuit de gaz). Diagnostic : changement de type de combustible dans les pompes

06 DIAS renseigne les ingénieurs sur les avalanches d'alarmes et événements.

06a Groupement de deux avalanches d'alarmes dans la même classe

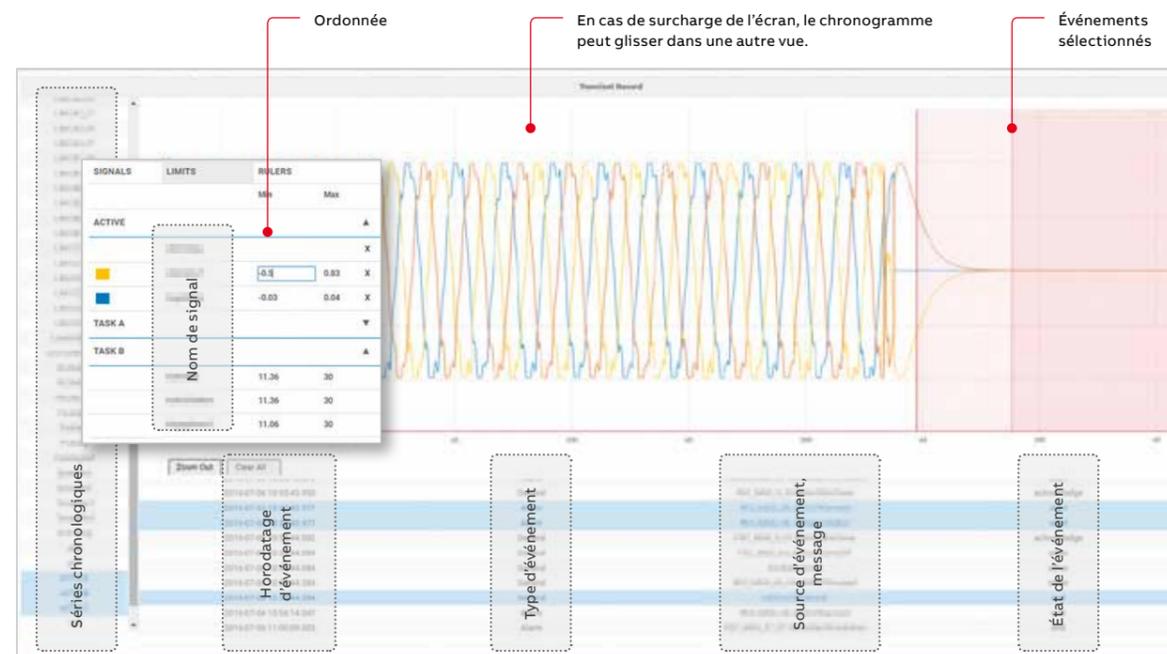
06b Contrôle et paramétrage des résultats de groupement/classement

06c Identification d'une cause commune à plusieurs occurrences de défaut

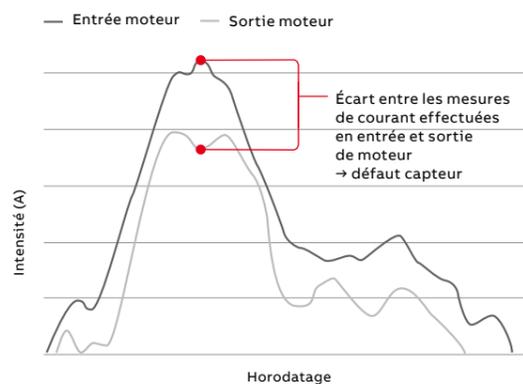


06c

Repérage des avalanches similaires par règles



07a



07b

Autre outil utile de la panoplie DIAS, l'écran de tendances haute densité →8b fournit aux ingénieurs une vue d'ensemble des séries temporelles consultées. Pour les aider à mieux comprendre les différents modèles de variation dans le temps, l'écran liste les signaux par similarité de forme, les plus semblables apparaissant en tête. Ces outils font de DIAS une solution analytique sans égal pour les procédés industriels reposant sur des entraînements sans réducteur.

Évolutions et perspectives

S'appuyant sur des décennies d'expérience au service de l'industrie de process et de connaissances approfondies du domaine, les ingénieurs de maintenance ABB ont pu établir les meilleures pratiques d'analyse des données opérationnelles. DIAS a été développé par itération à partir d'informations

fournies par ces mêmes experts afin de faciliter et d'optimiser leur tâche au quotidien. Pour ABB, c'est la garantie de résultats analytiques d'une extrême fiabilité. Bâtie sur des technologies de pointe, DIAS est une application web dont chaque module fonctionnel peut être déployé sur site ou dans le cloud.

Bâtie sur des technologies de pointe, DIAS est une application web dont chaque module fonctionnel peut être déployé sur site ou dans le cloud.

Compte tenu de la multiplicité des systèmes de gestion d'alarmes et d'événements utilisés dans le process, plusieurs types de stockage cohabitent. Pour épargner aux ingénieurs le casse-tête du mode de raccordement, DIAS propose plusieurs liaisons de données configurables.

Il est également possible d'établir différentes connexions via l'interface utilisateur, comme le système de fichiers de la base de données temps réel d'ABB, Microsoft SQL Server, la base Oracle et le moteur de recherche et d'analyse Elasticsearch. Quel que soit le système de stockage raccordé, l'ingénieur de maintenance peut rechercher les alarmes et événements qui l'intéressent à l'aide d'une interface d'interrogation universelle →3b. Ces requêtes renferment une somme de connaissances du process.

—
07 Affichage des transitoires

07a En accédant à l'écran des transitoires, l'opérateur peut se concentrer sur des événements précis.

07b Affichage de défaut capteur

—
08 Autres outils
AB Explorer d'assistance graphique à l'opérateur

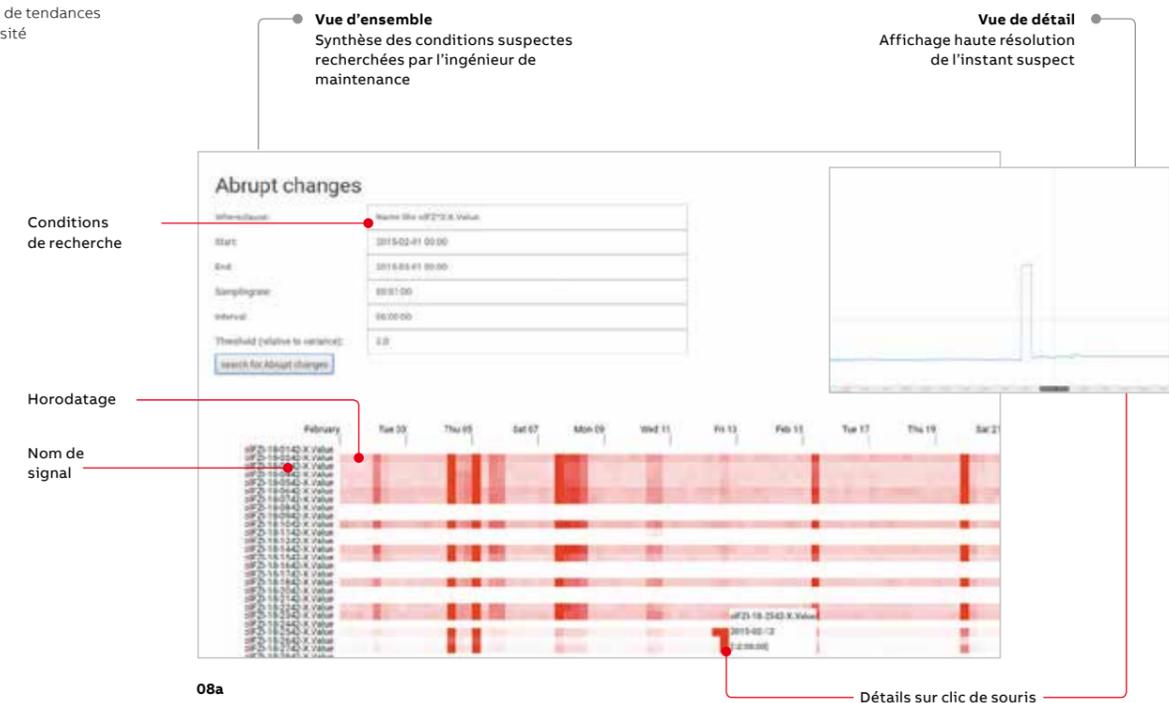
08a Carte de chaleur signalant les brusques changements de valeur

08b Écran de tendances haute densité

Pour partager cette manne tout en limitant les efforts de recherche, DIAS mémorise des modèles de requête, accessibles aux différents utilisateurs. Un système complet, souple d'emploi et convivial est ainsi mis au service des clients.

Au sein même des divisions ABB, les spécialistes de la maintenance utilisent DIAS pour régler les problèmes du terrain. Néanmoins, son champ

d'application ne s'arrête pas aux activités amont pétrole et gaz, ni aux procédés équipés d'entraînements sans réducteur : DIAS réussit également dans la production d'énergie. À l'avenir, ABB étoffera son offre avec des outils dédiés, intégrés à ses solutions de gestion des opérations et de la performance, comme Ability™ Manufacturing Operations Management et Ability™ Performance Optimization for Control Loops. •



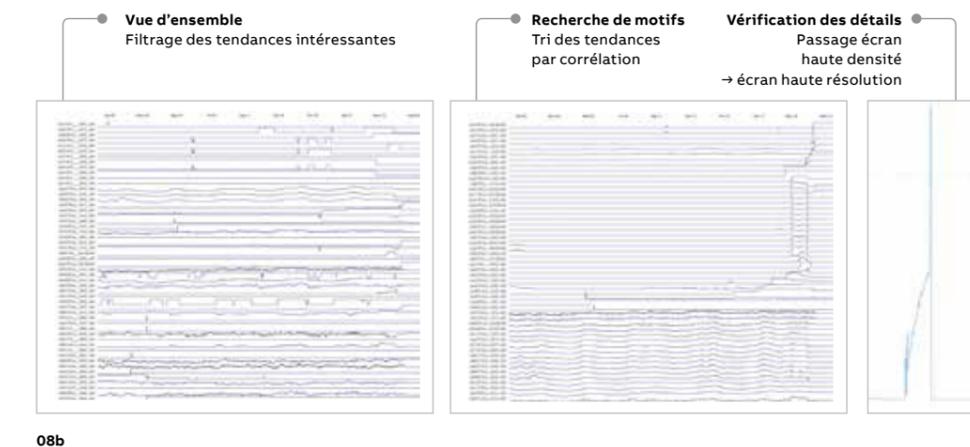
08a

Bibliographie

[1] Beebe, D, Ferrer, S., Logerot, D., « Alarm floods and plant incidents », Digital Refining Processing Operation & Maintenance, ProSys, 2007.

[2] Marco, V. R., Chioua, M., et al., « Causal analysis for alarm flood reduction », actes du 11^e symposium IFAC DYCOPS-CAB, Dynamics and Control of Process Systems, including Biosystems, p. 723-728, Trondheim (Norvège), 6-8 juin 2016.

[3] Lucke, M, Chioua, M., et al., « Online alarm flood classification using alarm coactivations », actes du 10^e symposium IFAC ADICHEM, Advanced Control of Chemical Processes, p. 345-350, Shenyang (Chine), 25-27 juillet 2018.



08b

SYSTÈMES AUTONOMES

Ligne directe avec le cloud

La nouvelle micro-console ABB s'appuie sur les dernières technologies mobiles de l'Internet des objets pour interagir avec les variateurs de fréquence destinés à un large éventail d'applications industrielles. Sa connexion directe avec la plate-forme de services ABB Ability™ dans le cloud permet de surveiller à distance l'état de fonctionnement, les indicateurs de performance et bien d'autres données de tout un parc de variateurs. Une exclusivité ABB !



Roland Schmale
ABB Drives, Digital
Ladenbourg (Allemagne)

roland.schmale@
de.abb.com

ABB, numéro un des variateurs standard et haut de gamme, a reçu en Chine le prix de l'innovation 2018 du magazine *Modern Manufacturing* pour sa nouvelle micro-console « plug & play » →1, dont les multiples fonctionnalités facilitent l'accès à toutes sortes d'informations ainsi que leur visualisation. L'utilisateur peut ainsi consulter, entre autres, les réglages moteur, les macroprogrammes applicatifs, le rendement et les économies d'énergie, mais aussi les diagnostics de défaut →2.



Pasi V. Karhinen
ABB Drives
Helsinki (Finlande)

pasi.v.karhinen@
fi.abb.com

Les données fournies par la micro-console permettent d'exploiter le plein potentiel des variateurs ABB pour développer de nouveaux modèles économiques et des services sur mesure.

La micro-console utilise les plus récents protocoles de communication de l'Internet des objets (IoT) sans fil et cellulaire, comme Bluetooth et NB-IoT, pour dialoguer avec les variateurs dans n'importe quel environnement industriel. Connectée à la plate-forme cloud ABB Ability via une liaison chiffrée et cybersécurisée, elle autorise la télésurveillance des données d'état, des indicateurs de performance opérationnels et des événements liés aux variateurs ABB, ainsi que le téléchargement en continu de données temps réel et d'historiques de tendances. La téléassistance facilite l'accès à



01

l'expertise ABB sur site pour identifier et régler les problèmes à distance.

L'utilisateur gagne sur tous les tableaux : gestion des actifs, télédiagnostic, maintenance prédictive, connaissance approfondie de la chaîne cinématique, analyse du taux d'engagement des équipements, optimisation et personnalisation de l'installation, etc. Grâce aux données mises à sa disposition, il peut tirer le meilleur parti de ses variateurs pour développer de nouveaux modèles économiques et des services sur mesure.

02



01 La nouvelle micro-console d'ABB permet notamment de surveiller à distance l'état de fonctionnement des variateurs de fréquence.

02 La micro-console fait remonter les données du variateur au suivi d'état ABB Ability™ Condition Monitoring for Drives dans le cloud, lequel fournit à son tour des informations temps réel précises sur les événements liés à l'appareil afin d'améliorer la disponibilité, la fiabilité et la maintenance de l'entraînement.

03 L'industrie chinoise, cible privilégiée d'ABB, affiche une croissance soutenue dans l'IoT.

Au contact du nuage

Bien des petites et moyennes entreprises éloignées de milliers de kilomètres, comme en Chine →3, se heurtent aux difficultés de mise en place de la variation électronique de vitesse en l'absence de connexion internet. Dans pareil cas, le client doit installer et mettre en service une passerelle ou un dispositif en périphérie de réseau : un raccordement fastidieux qui accapare en outre un port de connexion au bus de terrain, déjà utilisé pour acheminer les signaux de l'automate programmable.

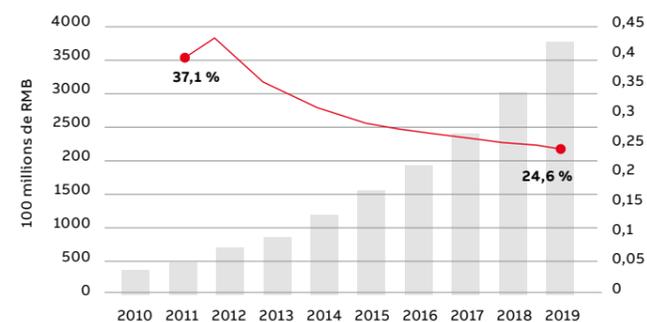
Quand bien même, seule une fraction des données du variateur est transmise à la passerelle cloud ; les données qui ne transitent pas par l'automate restent à demeure. De plus, les échanges automate-variateur sont parfois insuffisants pour alimenter les traitements analytiques de haut vol comme l'apprentissage profond, le télédiagnostic et la prédiction de défaillance.

La micro-console ABB lève tous ces obstacles. À commencer par son installation et sa mise en route automatiques, qui évitent d'arrêter l'entraînement. De même, les données sont collectées par le bus de la console, sous protocole ABB.

Résultat : paramètres opérationnels, journaux d'activité, voire historique de fonctionnement du variateur peuvent être transmis directement au cloud par le réseau cellulaire NB-IoT. La micro-console embarque à cette fin un modem dédié, une carte SIM et une antenne haute performance. Elle se charge même du trafic de données. De plus, l'interface sans fil Bluetooth permet des services de téléassistance à la demande, à partir d'un terminal mobile équipé de l'application Drivetune.

L'installation et la mise en route automatiques de la micro-console évitent d'arrêter l'entraînement.

Ce dialogue direct avec le nuage répond aux attentes d'un grand nombre de clients, qui peuvent difficilement se permettre d'arrêter les machines pour connaître la performance opérationnelle d'un variateur et de toute la chaîne d'entraînement, déceler une défaillance imminente ou minimiser les risques de panne en production. Cette « ligne directe » économique avec le cloud reste à ce jour une exclusivité des variateurs ABB qui fait toute la différence avec la concurrence. •



03

Source : ministère chinois de l'Industrie et des Technologies de l'Information

SYSTÈMES AUTONOMES

L'apprentissage automatique surveille le blindage des broyeurs miniers

Pour éviter l'usure des tambours, l'intérieur des broyeurs de minerais est chemisé d'une plaque de métal ou de caoutchouc, appelée « blindage ». ABB et la Haute école spécialisée bernoise se sont associés pour mettre au point un système de surveillance de ce dispositif, basé sur l'apprentissage automatique. À partir des données d'accélération, l'algorithme identifie le meilleur moment pour remplacer le blindage, limitant ainsi la durée et donc le coût d'immobilisation de l'outil productif.

—
Venkat Nadipuram
ABB Process Industries,
Mining, Aluminium
and Cement
Baden-Dättwil (Suisse)

venkat.nadipuram@
ch.abb.com

—
Marco Jordi
Pr Axel Fuerst
Haute école spécialisée
bernoise, Institut des
systèmes industriels
intelligents (I3S)
Berthoud (Suisse)

Dans les mines de grande taille, les blocs de minerai sont fragmentés sur place pour en récupérer les matériaux utiles. Les machines qui réalisent cette tâche se composent d'un volumineux tambour dans lequel le minerai se broie soit tout seul, soit sous l'action de sphères d'acier. La rotation du tambour fait grimper le minerai et les sphères sur la paroi, jusqu'à ce qu'ils atteignent l'angle de chute et retombent au fond où ils sont réduits en petits fragments.

Le tambour, dont le diamètre peut atteindre 10 m, est un élément très coûteux qu'il convient de protéger par un blindage métal ou caoutchouc. Le remplacement de ce blindage coûte également cher en raison du temps d'arrêt du broyeur et du prix des pièces de rechange ; il est donc judicieux de l'effectuer non seulement le plus tard possible mais aussi à une date qui minimise les pertes de production →1. Connaître l'usure réelle du blindage est à cet effet indispensable. La méthode consistant à mesurer l'usure depuis l'intérieur du broyeur a un inconvénient majeur : elle implique d'arrêter la production. Une autre approche est-elle possible ?

Surveillance vibratoire

Le choc du minerai contre le blindage est source de vibrations, dont la nature et la fonction de transfert varient avec l'épaisseur du blindage.

Un phénomène qui, mieux compris, peut être mis à profit pour mesurer l'usure. C'est pourquoi ABB s'est associé à l'Institut des systèmes industriels intelligents (I3S) de la Haute école spécialisée bernoise pour simuler les transitoires et réponses harmoniques. Il est apparu clairement que le signal d'accélération d'un blindage usé présentait une plus forte amplitude que celui d'un blindage neuf.

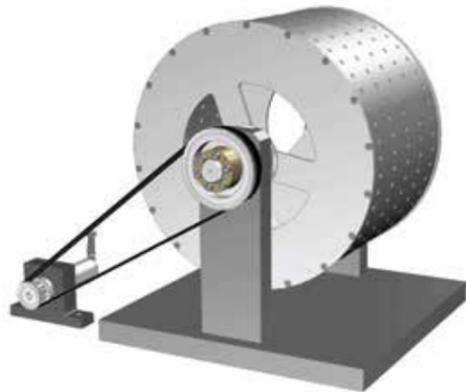
—
Par souci d'économie, il convient non seulement de remplacer le blindage le plus tard possible mais aussi à une date qui minimise les pertes de production.

Vérifier ces conclusions sur un broyeur grandeur nature étant compliqué, ABB et I3S ont construit un modèle réduit →2a. Cette maquette a été le théâtre de nombreuses mesures avec différentes épaisseurs de blindage. Des réseaux de neurones profonds ont analysé l'ensemble des données collectées afin de les répartir précisément dans les bonnes classes d'usure.

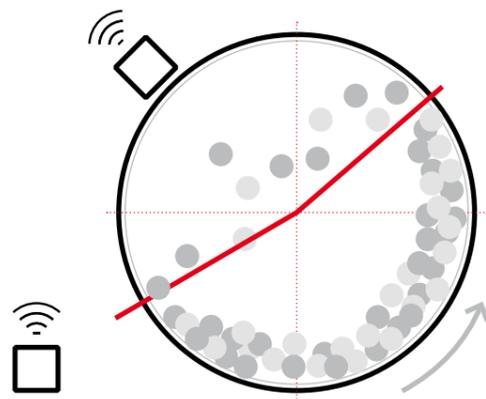
—
01 Dans un broyeur à haut régime, surveiller l'usure du blindage est indispensable pour maximiser la disponibilité. Le broyeur de la mine Boliden à Garpenberg (Suède) – dont l'exploitation remonte au début du IV^e siècle av. J.-C. ! – produit quelque 2,5 millions de tonnes de minerai par an.

Crédit photo figure 01 : Boliden





02a



02b

Enfin, des mesures effectuées sur un broyeur en vraie grandeur ont validé les expérimentations. Forts de ces données, I3S et ABB ont mis au point un prototype permettant de mesurer l'état du blindage et les paramètres du procédé en fonctionnement.

Simulation

La simulation par éléments finis de la réponse harmonique et des transitoires de modèles de blindage neuf et usé, sous logiciel ANSYS [1], a confirmé que le signal d'accélération émis par le choc du minerai contre le blindage présentait des variations mesurables selon l'état de ce dernier. Ainsi, un blindage usé engendre des fréquences plus élevées : l'usure du caoutchouc entraîne en effet une diminution de l'amortissement, qui se manifeste principalement par l'accroissement de l'amplitude du signal →3. Ce résultat confirme l'hypothèse selon laquelle une fine épaisseur de blindage amplifie le choc, et donc les forces d'excitation.

Usure

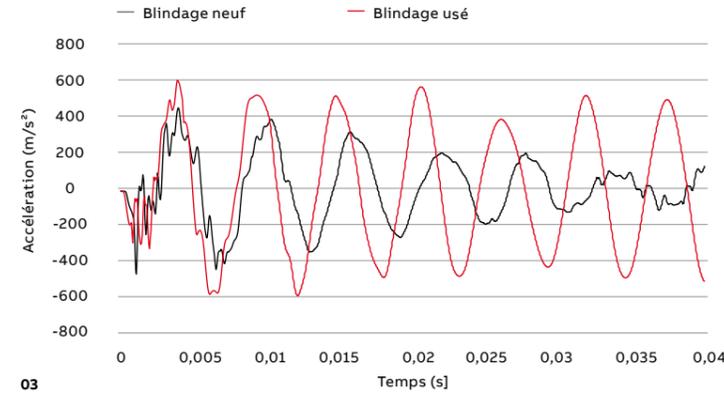
Des capteurs d'accélération placés à l'extérieur de la maquette →2b mesurent indirectement l'épaisseur du blindage.

Ce signal brut subit un premier traitement qui en extrait des caractéristiques exploitables par un réseau de neurones profond spécialisé dans la reconnaissance de formes. Celui-ci comporte, outre les couches d'entrée et de sortie, trois couches cachées de 500 neurones chacune.

Le système a affiché près de 98 % de précision pour les mesures sur maquette ; seules 2 % des données ont été mal classées.

Partant des données issues de la maquette et des essais physiques, le réseau classe le blindage en différentes catégories selon l'épaisseur. Les essais en laboratoire ont simulé sept degrés d'usure du blindage, pour une épaisseur comprise entre 2 et 17 mm, sous différentes charges. Le réseau de neurones, qui devait classer le signal brut pré-traité dans une des sept catégories prédéfinies, s'est acquitté de sa tâche avec une très grande précision (proche de 98 %) pour les mesures sur maquette. Autrement dit, seulement 2 % des données de mesure ont été mal classées. Le jeu de données provenait à 70 % de l'entraînement et à 30 % des essais physiques. La matrice de confusion →4 reflète cet excellent résultat, d'autant plus que les données mal classées s'approchent de la diagonale, signe d'erreur minime.

Les mesures physiques ont également donné de bons résultats ; on pouvait s'attendre à une précision nettement amoindrie par les perturbations du milieu environnant, mais un bon entraînement du réseau de neurones basé sur TensorFlow [2] a permis d'atteindre 82,9 %. Reste à augmenter la quantité de données pour gagner encore en précision.



03

02 Maquette de broyeur autogène ayant servi aux mesures en laboratoire

02a Maquette constituée d'un tambour en acier entraîné par une courroie dentée montée sur un petit moteur électrique. La paroi interne du tambour est recouverte d'une couche de caoutchouc amovible qui simule le blindage.

02b Schéma fonctionnel de la maquette indiquant l'emplacement d'un accéléromètre sans fil ainsi que les angles de chute et d'impact. Le capteur est placé à l'extérieur du tambour pour mesurer les vibrations. Le signal d'accélération constitue une variable dépendante tandis que l'épaisseur du blindage et la charge du broyeur sont deux paramètres indépendants ; la vitesse de rotation, la température, la taille et la nature de la charge sont des variables réglées. Diverses mesures ont été effectuées, avec une épaisseur de blindage comprise entre 2 et 17 mm et une charge de 1 à 4 kg. Chaque configuration a donné lieu à au moins deux mesures d'accélération de 2 min, échantillonnées à 970 Hz.

03 Simulation des signaux d'accélération (transitoires) sur un blindage neuf (noir) et usé (rouge) ; ce dernier présente des amplitudes et des fréquences plus élevées en raison du moindre amortissement.

04 Matrice de confusion pour la classification de l'épaisseur du blindage en sept catégories (2, 5, 7, 10, 12, 15 et 17 mm) à partir de mesures effectuées sur maquette

Angles de chute et d'impact

Les données d'accélération fournies par la rotation du broyeur servent à déterminer l'angle de chute à l'intérieur du tambour →5. De fortes amplitudes se concentrent dans la zone d'impact, là où la charge percute le blindage. On constate également des fluctuations du signal au niveau du point de chute, où la charge ne s'entasse plus et se détache du blindage. Le vecteur gravité se déplace avec le minerai, qui glisse progressivement vers le centre, au fond du tambour, créant des vibrations sur la paroi.

L'entropie du signal, calculée sur une fenêtre glissante, correspond à la quantité d'information qu'il contient [3]. Cette valeur fournit les angles de chute et d'impact. Autrement dit, plus le signal d'accélération est aléatoire et imprévisible du fait des impacts, plus son entropie est importante. Cette valeur renseigne sur les variations du signal d'accélération et permet ainsi de déterminer les angles de chute et d'impact. La longueur de la fenêtre du calcul d'indice constitue un paramètre majeur ; dans le cas présent, une fenêtre de 1180 points de mesure donne de bons résultats.

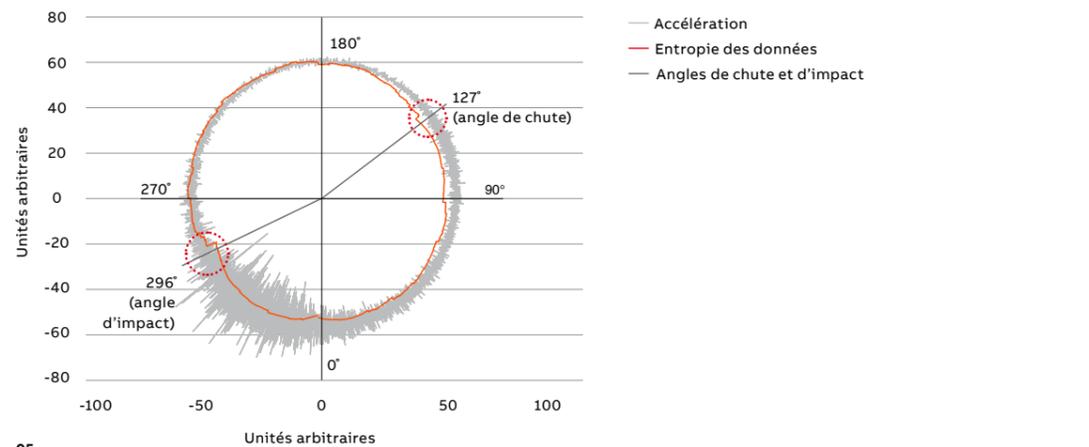
Un entraînement adéquat du réseau de neurones basé sur TensorFlow a permis d'obtenir 82,9 % de précision : un bon résultat.

Matrice de confusion

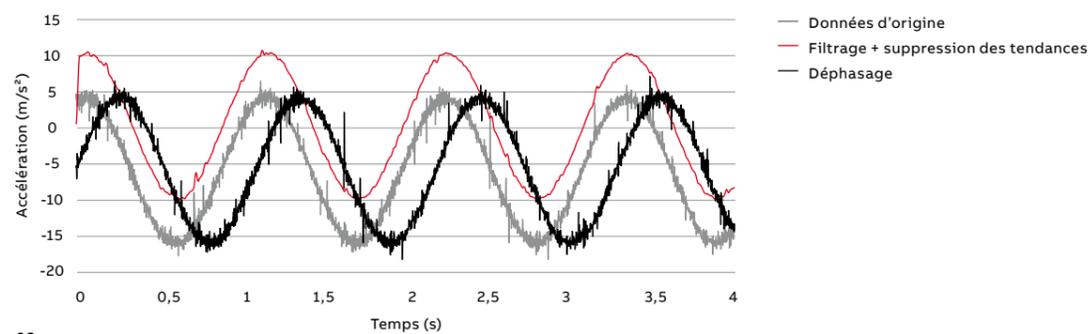
Classe de sortie	1	2	3	4	5	6	7	
1	159 14,2%	0 0,0%	0 0,0%	1 0,1%	0 0,0%	1 0,1%	1 0,1%	98,1 % 1,9 %
2	0 0,0%	159 14,2%	0 0,0%	0 0,0%	0 0,0%	0 0,0%	1 0,1%	99,4 % 0,6 %
3	0 0,0%	0 0,0%	160 14,3%	0 0,0%	0 0,0%	0 0,0%	0 0,0%	100 % 0,0 %
4	0 0,0%	0 0,0%	0 0,0%	153 13,7%	0 0,0%	5 0,4%	1 0,1%	96,2 % 3,8 %
5	0 0,0%	0 0,0%	0 0,0%	0 0,0%	153 13,7%	1 0,1%	3 0,3%	97,5 % 2,5 %
6	1 0,1%	0 0,0%	0 0,0%	6 0,5%	0 0,0%	153 13,7%	1 0,1%	95,0 % 5,0 %
7	0 0,0%	1 0,1%	0 0,0%	0 0,0%	7 0,6%	0 0,0%	153 13,7%	95,0 % 5,0 %
	99,4 % 0,6 %	99,4 % 0,6 %	100 % 0,0 %	95,6 % 4,4 %	95,6 % 4,4 %	95,6 % 4,4 %	95,6 % 4,4 %	97,3 % 2,7 %
	1	2	3	4	5	6	7	

Classe cible

04



05



06

Validation

Le modèle mathématique a été validé par des essais sur le terrain. L'instrumentation sensible (batterie, minuterie, pilotes d'accéléromètres, convertisseur analogique-numérique et dispositif d'acquisition des données) a été placée dans un boîtier métallique robuste la protégeant des rigueurs de la mine. Les accéléromètres, de leur côté, ont été montés directement sur le tambour du broyeur à l'aide d'aimants et raccordés par câble au boîtier. Pendant plusieurs semaines, le dispositif a collecté des données sur un broyeur tournant à plein régime.

Les nombreux impacts enregistrés pendant la rotation du broyeur font que le signal de vibration, très parasité, doit être retraité.

L'apprentissage automatique à l'appui de l'analytique

Du fait des nombreux impacts enregistrés pendant la rotation du broyeur, le signal de vibration brut comporte une forte composante parasite qui complique l'identification de l'état du blindage. Ce signal nécessite donc un prétraitement car les algorithmes d'apprentissage automatique doivent pouvoir s'appuyer sur des données normalisées. Nombreuses ont été les itérations pour déterminer le modèle de classification le mieux adapté.

Prétraitement

Les mesures ne commençant pas toujours au même point, les jeux de données sont différents. Or l'uniformité est la condition indispensable à toute évaluation pertinente. C'est pourquoi l'installation d'essais comporte un détecteur de phase. Le signal brut subit plusieurs traitements : d'abord un filtrage passe-bas à une fréquence de coupure de 2 Hz, puis un lissage de courbe et enfin une suppression des composantes tendancielles. Les données ainsi filtrées et « détendancées » permettent d'obtenir la phase, qui à son tour fournit le décalage appliqué aux données d'origine afin que

05 Tracé polaire des angles de chute et d'impact dans un broyeur en rotation

06 Prétraitement des données d'accélération : le signal est déphasé, puis filtré et détendancé.

07 Réseau de neurones pour la classification du blindage par épaisseur (b = biais, w = poids)

tous les jeux de données débutent au même point. Les données issues des 2 minutes de mesures ont ensuite été découpées en plusieurs tranches pour correspondre à une rotation de tambour, chaque tranche étant rééchantillonnée en 1024 points de mesure. Ce prétraitement garantit l'homogénéité des données qui alimentent l'algorithme d'apprentissage automatique.

Extraction d'attributs

Les algorithmes d'apprentissage automatique cherchent à établir des correspondances entre un jeu d'attributs et les valeurs cibles correctes. Il est donc capital de bien choisir et tester ces attributs (ondelettes, entropie, analyse harmonique, entre autres). Le meilleur résultat a été obtenu en combinant les valeurs statistiques, les données d'accélération brutes et la transformée de Fourier rapide de chaque tranche. Tous ces attributs et leurs valeurs cibles respectives ont été recensés dans un tableau servant de matrice d'entrée au réseau de neurones.

Reconnaissance de formes par réseau de neurones

Parmi les différentes méthodes d'apprentissage automatique évaluées (machines à vecteurs de support, arbres de décision ou réseaux de neurones), les réseaux de neurones se sont avérés les plus performants pour classer les données. Un réseau de neurones est censé identifier les formes dans chaque signal et s'en servir pour ranger ce signal dans l'une des classes cibles. Toutes les mesures obtenues des différents essais de charge du broyeur et d'épaisseur du blindage ont permis de définir plusieurs classes.

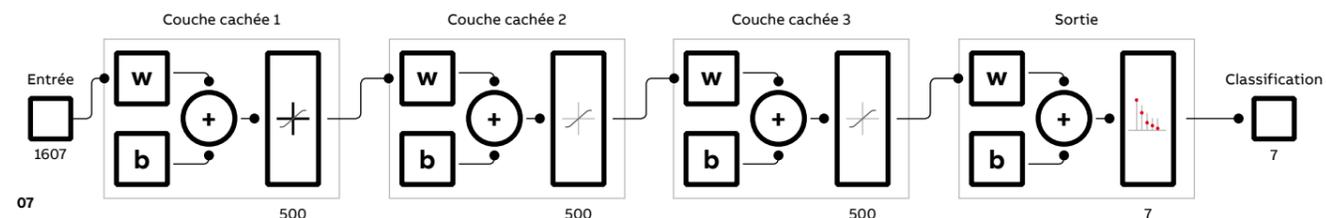
L'étape suivante a consisté à construire les matrices d'entrée et de sortie du réseau de neurones ; la matrice d'entrée comporte le tableau des attributs précité tandis que la matrice de sortie définit la classe cible correspondant à chaque jeu d'attributs. Le réseau [4] est ensuite constitué de

trois couches cachées de 500 neurones chacune et d'une couche de sortie pour la classification →7. Le jeu de données a été utilisé à 70 % pour l'entraînement du réseau, à 15 % pour la validation et à 15 % pour les essais. L'entraînement utilise la méthode de la « rétropropagation du gradient conjugué à l'échelle », qui met constamment à jour par itération les paramètres centraux du modèle (biais et poids des neurones). Dernière étape, l'optimisation des hyperparamètres du réseau (paramètres à fort impact non réglés dans le modèle central) a permis de déterminer de manière fiable l'état du blindage.

La solution permettra de planifier le remplacement du blindage en fonction de son usure réelle, avec le double avantage de réduire les temps d'arrêt machine et d'économiser la matière.

Gains de productivité et réduction des coûts

L'hypothèse selon laquelle l'épaisseur du blindage joue sur la valeur du signal d'accélération a été confirmée par des simulations ainsi que des mesures sur maquette et broyeur grandeur réelle. Le système de surveillance développé par I3S et ABB met en lumière l'intérêt de l'apprentissage automatique combiné à des accéléromètres pour mesurer l'état du blindage et les paramètres du procédé en fonctionnement. Il permettra de planifier le remplacement du blindage en fonction de son usure réelle, avec un double avantage : réduction des coûts et temps d'immobilisation, économie de matières. Pour les exploitants miniers, cette nouvelle solution de surveillance est synonyme de gains de productivité et de meilleure planification de la maintenance. •



07

Énergie



Si l'innovation technologique succombe aujourd'hui aux sirènes de « l'échec accéléré » (*fail fast*), certains secteurs industriels stratégiques y résistent encore farouchement. C'est le cas de la production et de la distribution d'électricité, domaines dans lesquels ABB affiche plus d'un siècle d'expérience. Fort de cet héritage, le Groupe innove sans relâche pour fiabiliser l'alimentation électrique, décarboner la filière et améliorer la protection des transformateurs.



- 54 L'ASI industrielle PowerLine DPA à l'épreuve du terrain
- 60 Pile à combustible, le plein d'énergie verte
- 68 TXpand™ protège les transformateurs de la rupture

ÉNERGIE

L'ASI industrielle PowerLine DPA d'ABB à l'épreuve du terrain



Parée pour affronter les rigueurs du milieu industriel (poussière, corrosion, humidité et chaleur), l'alimentation statique sans interruption PowerLine DPA d'ABB équipe aujourd'hui le site d'Inovyn, premier producteur de PVC en Europe.



Paolo Catapane
ABB Electrification,
Smart Power
Quartino (Suisse)

paolo.catapane@
ch.abb.com

Dans bien des filières industrielles, une panne d'électricité peut avoir des retombées désastreuses : arrêts de production, redémarrages complexes et coûteux, mise au rebut de produits, dommages matériels et problèmes de sécurité.

Le réseau électrique n'est en outre pas à l'abri de défauts de plus ou moins longue durée (chute ou hausse de tension), voire de parasites sur la ligne, de variations de fréquence ou encore d'harmoniques. Ces phénomènes sont lourds de conséquences : perte de données, manque à produire, indisponibilité de services essentiels à l'activité, risques de dégât matériel, pertes financières et atteinte à la sécurité. Nombreux sont donc les industriels à se tourner vers les alimentations statiques sans interruption (ASI) pour assurer la continuité des opérations.

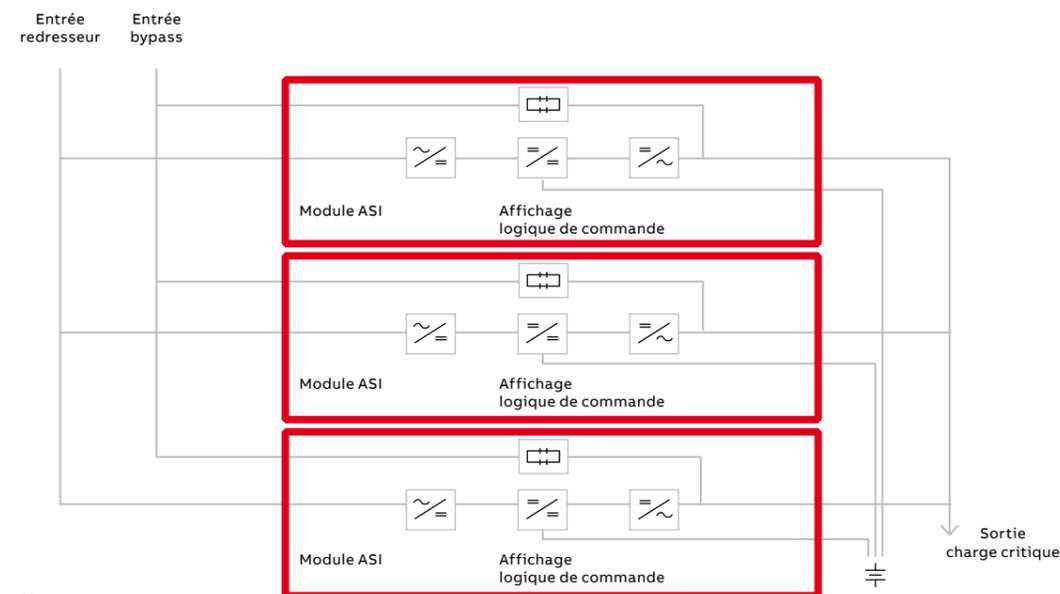
C'est pour ces environnements réputés exigeants, qui fourmillent d'appareils électriques et électroniques, qu'ABB a conçu l'ASI PowerLine DPA.

DPA (Decentralized Parallel Architecture) est une architecture parallèle décentralisée dont la modularité intrinsèque se traduit par une disponibilité, une maintenabilité et une flexibilité exemplaires, ainsi qu'un faible coût de possession tout au long des quinze années de service de l'ASI.

Architecture DPA

Les systèmes d'ASI à architecture parallèle centralisée sont pilotés par un matériel (circuit de dérivation, par exemple) ou un système de contrôle-commande hiérarchisé : dans cette configuration, il suffit que l'un des constituants lâche pour ébranler tout l'édifice. Dans une architecture parallèle décentralisée, l'ASI est bâtie autour de modules qui embarquent chacun l'ensemble des matériels et logiciels nécessaires à l'autonomie de fonctionnement : redresseur, onduleur, chargeur de batterie, contacteur statique (bypass), protection anti-retour (évitant la réinjection dans le réseau), logique de commande, écran, synoptique de contrôle et de pilotage →2. La sortie d'un module n'est pas affectée par les défaillances constatées ailleurs dans l'ASI ; en cas de panne, les autres modules reprennent sa charge. Autrement dit, il s'agit d'un système multimodule tolérant aux pannes, sans point unique de défaillance, pour une disponibilité maximale.

— La modularité de l'architecture DPA est gage de disponibilité, de maintenabilité, d'évolutivité et de flexibilité.



02

— 01 Inovyn, premier producteur de PVC en Europe, a misé sur l'ASI PowerLine DPA d'ABB pour sécuriser l'alimentation électrique de son site belge de Jemeppe-sur-Sambre.

— 02 Avec l'architecture DPA, chaque module embarque tout le matériel et le logiciel nécessaires pour fonctionner en autonome, sans avoir à partager des composants critiques.

— 03 Partie de l'installation PowerLine DPA chez Inovyn

Les éléments de l'ASI communs à tous les modules, mais non essentiels au système (raccordements d'E/S, signalisations propres au client, bypass de maintenance et écran), sont regroupés dans la même baie.

Facilité de maintenance

Point fort de l'architecture DPA : les modules peuvent être insérés et retirés sous tension, sans avoir à couper l'alimentation ou à transférer la charge sur le réseau, et ce sans risque pour l'application sensible. Ce remplacement sécurisé des modules répond aux exigences de continuité de service, minimise le temps moyen de réparation (MTTR) et les stocks de pièces spéciales, simplifie les mises à niveau du système.

Évolutivité

La modularité de l'architecture DPA facilite l'extension et la montée en puissance au fur et à mesure qu'augmente la charge (démarrage d'une nouvelle ligne de production, par exemple). Inutile de surdimensionner la configuration initiale en prévision des évolutions futures ; il suffit d'ajouter ou de retirer des modules, au gré des besoins.

Pleine puissance

Dernière innovation de la gamme de protections électriques ABB bâties sur DPA, l'ASI PowerLine 20-120 kVA →3 est spécialement conçue pour surmonter les nombreux obstacles au déploiement d'équipements électriques complexes en milieu industriel.

La tenue aux ambiances difficiles est ici cruciale ; d'où l'attention particulière portée à la robustesse. Protégée IP42, PowerLine DPA se joue de la poussière, de la condensation, de l'humidité (jusqu'à 95 %), de la corrosion et des mauvaises manipulations. L'ASI est conçue pour fonctionner dans une plage de températures de -5 à +45 °C. La sécurité étant prioritaire, elle garantit un haut niveau de protection aux utilisateurs et au personnel de maintenance. Sa conformité normative (CEI/EN 62040-1 pour les exigences générales et les règles de sécurité, CEI/EN 62040-2 pour la compatibilité électromagnétique et CEI/EN 62040-3 pour les performances et procédures d'essai) a été vérifiée.

Dans un site industriel, l'espace occupé par les équipements électriques est souvent limité ou cher. PowerLine DPA a pour cela deux atouts : un faible encombrement et une entrée de câbles en face avant (par le haut et par le bas), qui évite de prévoir un dégagement supplémentaire à l'arrière. Qui plus est, toute extension du système se faisant par simple empilement de modules, l'emprise au sol reste la même.



03

PowerLine DPA est une ASI « à double conversion » : en entrée, le courant alternatif (CA) fourni par le réseau est redressé en courant continu (CC) ; en sortie, celui-ci est transformé par l'onduleur en un courant alternatif stabilisé en tension et en fréquence pour donner une sinusoïde pure. Ces deux étages isolent la forme d'onde de la tension de sortie des imperfections de l'alimentation CA.

— L'ASI PowerLine DPA est spécialement conçue pour les environnements extrêmes de l'industrie.

PowerLine DPA dispose d'une grande capacité de surcharge et d'une bonne robustesse aux courts-circuits. Dans certaines configurations industrielles, l'alimentation CA de l'ASI provient d'un appareillage électrique ou d'un départ-moteur, et partage souvent les jeux de barres avec des charges parasitées comme les variateurs de

fréquence. Il faut alors installer un transformateur d'isolement pour protéger l'entrée de l'ASI. Avec des puissances assignées de 20 à 120 kVA et un facteur de puissance d'entrée proche de l'unité (0,99), l'ASI d'ABB ne nécessite pas d'installation électrique onéreuse : elle est directement prête pour le service.

Ceillets de levage pour faciliter l'installation, plots antivibratoires, protection IP42, câbles sans halogène et capacité de redémarrage à froid sont les autres traits distinctifs qui en font l'ASI des applications industrielles exigeantes.

Surveillance à distance

En cas de panne électrique, l'ensemble du personnel concerné doit être rapidement et pleinement informé de l'état du système. Pour cela, PowerLine DPA peut être équipée de cartes relais et d'une carte de gestion de réseau permettant de se connecter à un système de contrôle-commande distribué ou un superviseur via SNMP, Modbus TCP ou Modbus RS 485. Ces interfaces sont multifonctions : contrôle de l'environnement, gestion et diffusion étendues des alarmes, surveillance redondante de l'ASI, intégration de PowerLine DPA dans des environnements multifournisseurs et multiplateformes, fourniture des données ASI à des applications web.

Un terrain de choix

Le site Inovyn de Jemeppe-sur-Sambre produit 475 000 tonnes de polychlorure de vinyle (PVC) par an, soit l'équivalent de 50 semi-remorques par jour. Près de 500 personnes s'y relayent nuit et jour pour faire d'Inovyn le premier producteur d'Europe →1,4-6. C'est pour relever le défi de l'excellence opérationnelle en environnement difficile (poussière, corrosion, humidité, chaleur, etc.) qu'Inovyn a choisi l'ASI PowerLine DPA d'ABB.

C'est parce que l'usine exige le meilleur de la protection électrique qu'Inovyn a opté pour PowerLine DPA.

De tels volumes et contraintes de production exigent une très grande précision. « Notre système de contrôle-commande distribué gère une multitude d'E/S », explique Pierre Henveaux, ingénieur électricien et chef d'équipe Haute Tension-Basse Tension. Concrètement, c'est un ordinateur qui commande le démarrage des moteurs, l'ouverture et la fermeture des vannes, etc. bref, qui pilote toute l'usine. Le site de Jemeppe est celui qui totalise le plus d'E/S en Europe. Il est hors de question que le système s'arrête, ce qui nous obligerait à naviguer à vue ! »

S'agissant d'une production par lots (batch), le contrôle-commande distribué se doit d'être le plus performant possible, d'autant que le nombre d'opérations d'E/S ne peut qu'augmenter avec les progrès de la technologie. « Nous avons de très fortes exigences, et au premier chef des alimentations infallibles. Car il suffit d'un défaut électrique de deux millisecondes pour tout perdre : l'information ne passe plus et le système se met en sécurité. Et au-delà de 40 millisecondes... c'est la cata ! » Le site d'Inovyn a beau avoir son propre système de production électrique, qui débite l'équivalent de 1/8^e de la puissance d'un réacteur nucléaire, il n'est pas à l'abri de micro-coupures.

Un partenariat privilégié

Inovyn et ABB travaillent ensemble depuis 2000 et ont tissé une solide relation de confiance. Les systèmes d'ASI développés jusque-là par ABB visaient surtout le marché des datacenters. Or Inovyn réclamait une solution « durcie » aux conditions extrêmes de son usine : un impératif qui a motivé la conception de l'ASI industrielle PowerLine DPA.

Inovyn s'est ainsi doté de deux PowerLine DPA. Outre la qualité de l'équipement, l'industriel en apprécie la grande robustesse, chaque module étant enfermé dans un caisson solide, protégé par de puissants filtres : de quoi tenir dix à quinze ans, soit bien plus que les produits de la concurrence.



04

— 04 Aperçu de l'outil productif d'Inovyn

— 05 Les matières premières du PVC : sel de mer et pétrole

— 06 Réacteurs de polymérisation



06

Inovyn se contente pour l'instant d'un système de contrôle-commande distribué d'ancienne génération, mais compte évoluer vers un outil plus performant dans les prochaines années. Les ASI PowerLine DPA sauront faciliter cette migration au moment venu. L'industriel installera également deux nouvelles unités dans sa nouvelle ligne de production prévue pour démarrer courant 2019.

Pérennité

La continuité de fourniture d'une énergie propre et sûre est vitale pour nombre d'entreprises. L'ASI PowerLine DPA est à la hauteur de l'enjeu. Son architecture modulaire facilite sa maintenance et son extension ; le remplacement des modules sous tension évite toute mise hors service et procure une disponibilité maximale.

PowerLine DPA facilitera la future extension du système de contrôle-commande distribué d'Inovyn.

PowerLine DPA affiche jusqu'à 96 % de rendement et un facteur de puissance unitaire qui dopent les performances, optimisent l'investissement, facilitent et sécurisent l'exploitation et la maintenance dans un large éventail d'environnements industriels particulièrement rudes. Des attributs qui en font une ASI à très faible coût total de possession. •



05

ÉNERGIE

Pile à combustible, le plein d'énergie verte

La pile à combustible produit de l'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène, en ne rejetant que de l'eau et de la chaleur. Quoi de plus écologique ! Elle soulève néanmoins des questions : comment peut-elle contribuer à la transition vers la sobriété carbone ? Quels défis techniques doit-elle relever ?



Photo: iuchischen, istockphoto.com

01

— 01 Les piles à combustible produisent une électricité verte à partir d'hydrogène et d'oxygène. Non polluantes, elles ne rejettent que de l'eau et de la chaleur, des ressources elles-mêmes exploitables.

L'urbanisation croissante augmente la demande mondiale en énergie [1], encore majoritairement satisfaite par des combustibles fossiles comme le pétrole, le gaz et le charbon →2. Dans les pays en développement, par exemple, seulement 30 % de ces besoins sont couverts par des sources d'énergie renouvelables.

Or les ressources fossiles se raréfient et voient leur utilisation exacerber la pollution (gaz à effet de serre, rejets atmosphériques, destruction de la couche d'ozone, pluies acides) et le dérèglement climatique. C'est en outre l'ensemble de la filière (extraction, transport, traitement) qui est tout aussi nocif pour l'air et l'eau.

— La pile à combustible produit directement de l'électricité par oxydation de l'hydrogène.

Le remède tient notamment dans la pile à combustible (PAC) qui a l'avantage de ne produire ni oxydes de carbone (CO, CO₂), de soufre (SO_x) ou d'azote (NO_x), ni particules →1.



Mahesh Vaze
ABB Corporate Research
Bangalore (Inde)

mahesh.vaze@in.abb.com



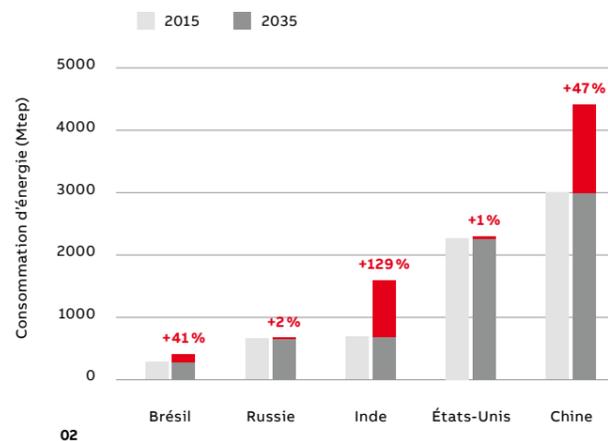
Mikko Kajava
ABB Marine & Ports
Helsinki (Finlande)

mikko.kajava@fi.abb.com

Un principe simple

Une PAC convertit directement l'énergie chimique d'un combustible en énergie électrique. Là où le moteur à combustion interne passe par plusieurs étapes de conversion (énergie chimique-chaleur-travail mécanique), la pile à combustible produit directement de l'électricité par oxydation de l'hydrogène →3. Mieux, elle ne rejette que de l'eau et de la chaleur, qui sont réutilisées pour améliorer la chaîne hydrogène. La réaction électrochimique se contente d'oxygène, en abondance dans l'air, et ne génère aucun GES si l'hydrogène provient de filières elles-mêmes propres et durables. Non polluante, la PAC respecte ainsi les réglementations environnementales et sanitaires.

Nées des travaux d'un physicien gallois, Sir William Grove, en 1839, les PAC ont depuis alimenté en eau potable et en électricité les missions spatiales de la NASA. Un temps freiné par des catastrophes



liées à la combustion de l'hydrogène (notamment l'accident du Zeppelin *Hindenburg* en 1937), leur développement a repris et abouti à une pluralité de technologies fiables, sûres et bien accueillies par les secteurs public et privé.

Par essence modulaire, la PAC est promise à un bel avenir, en particulier dans les applications stationnaires, portables et de transport →5.

Applications stationnaires

Les PAC stationnaires sont une source d'énergie locale propre, efficace, fiable et durable. De moins en moins chères et de plus en plus performantes, elles connaissent aujourd'hui un formidable essor.

Construite par l'Américain FuelCell Energy en 2014, la plus grande installation au monde (59 MW) alimente la ville de Hwasung, en Corée du Sud [3], à partir de l'hydrogène tiré de son réseau de chauffage au gaz naturel.

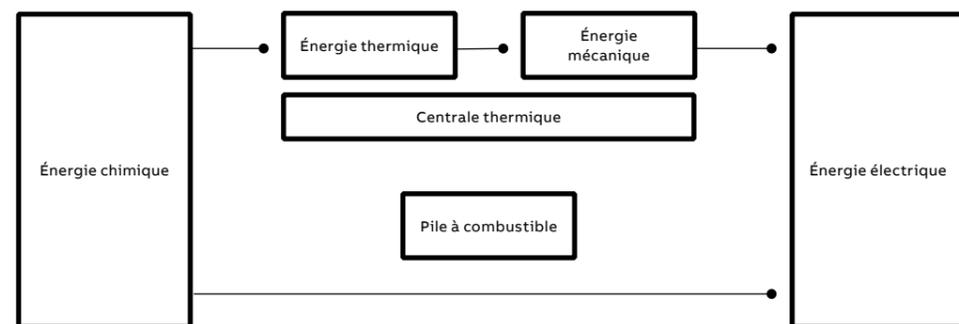
La PAC relève aussi le défi de l'exiguïté urbaine. En plein cœur de la City londonienne [4], un système de 300 kW, intégré dans les installations de refroidissement, de chauffage et d'alimentation électrique de la tour du 20 Fenchurch Street, produit une électricité bien plus propre qu'un équivalent à combustion classique : ce sont plus de 18 000 kilogrammes de polluants et 1800 tonnes de CO₂ d'évités.

Par essence modulaire, la PAC est promise à un bel avenir dans les applications stationnaires, portables et de transport.

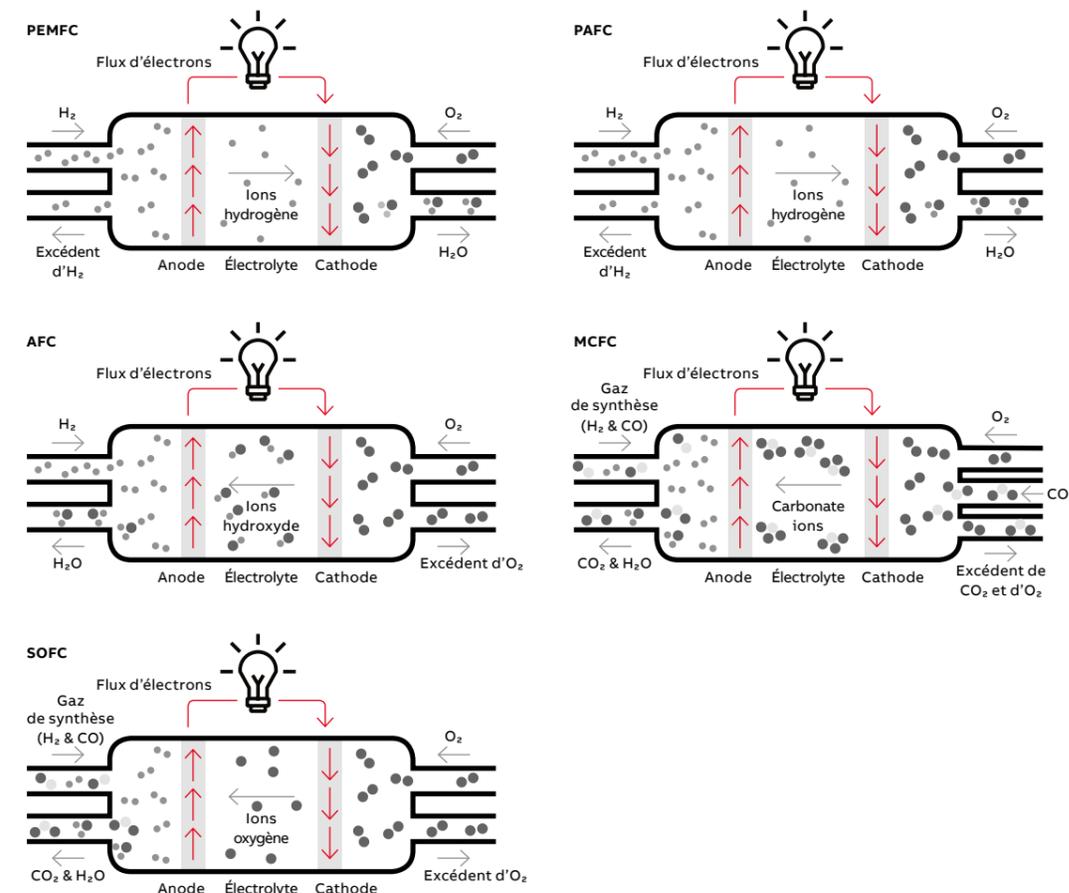
La filière fait donc figure d'alternative, notamment en milieu rural où l'alimentation électrique est absente ou peu fiable. Le lycée Poelano de Ventersdorp (Afrique du Sud), par exemple, s'éclaire avec une PAC de 2,5 kW qui alimente également ses équipements informatiques. Fiables, efficaces, sûrs et silencieux, ces mini-réseaux de PAC soulagent ou renforcent les réseaux nationaux. Leur impact social, politique et économique est non négligeable sur la population des régions reculées ou mal desservies.

Portabilité

L'intérêt de la PAC portable ne se limite pas à sa densité énergétique, nettement supérieure à celle des accumulateurs au plomb ou lithium-ion →6. Bien d'autres atouts (autonomie et fonctionnement hors réseau, recharge rapide, légèreté, commodité, fiabilité, faibles coûts d'exploitation) en font la candidate idéale pour les usages militaires, les auxiliaires de puissance et l'alimentation



- 02 Consommation mondiale d'énergie primaire en millions de tonnes équivalent pétrole sur la période 2015-35
- 03 Processus de production d'énergie dans une pile à combustible
- 04 Technologies de piles à combustible et applications



	PEMFC	PAFC	AFC	MCFC	SOFC
	Pile à combustible à membrane échangeuse de protons ou électrolyte polymère	Pile à combustible à acide phosphorique	Pile à combustible alcaline	Pile à combustible à carbonate fondu	Pile à combustible à oxyde solide
Applications	Production stationnaire d'électricité, cogénération chaleur/électricité, transport	Production stationnaire et cogénération (principalement dans les hôpitaux où la chaleur dégagée sert à la stérilisation)	Propulsion spatiale et sous-marine, automobile (dans une moindre mesure), eau potable	Production stationnaire, applications industrielles et militaires, production hybride (turbine à gaz et cogénération)	Production stationnaire, alimentation auxiliaire des véhicules, cogénération chaleur/électricité
Combustible	H ₂ /reformate	H ₂ /reformate	H ₂ /reformate	H ₂ /CO/reformate	H ₂ /reformate
Comburant	O ₂ /air	O ₂ /air	O ₂ /air	CO ₂ /O ₂ /air	O ₂ /air
Coût	Significatif	Très élevé	Élevé	Faible	Faible
Rendement (%)	50-60	40-55	50-60	55-65	55-65
Densité d'énergie (kW/m³)	3,8-6,5	0,8-1,9	1	1,5-2,6	0,1-1,5
Plage de puissance (kW)	1-250	50-200	1-100	1000-2000	1-900
Température de fonctionnement (°C)	60-200	175-200	65-200	600-650	650-1000
Risques	Empoisonnement au CO (catalyseur au platine), nécessité de réduire le CO si l'hydrogène est tiré d'hydrocarbures ou d'un combustible à base d'alcool	Corrosion due aux acides, empoisonnement (CO, composés riches en soufre)	Réaction de l'électrolyte alcalin avec le CO ₂ présent dans les impuretés, empoisonnement au CO ₂ , réduction de la durée de vie de la PAC	Dégradation accélérée des composants par les températures de fonctionnement élevées et l'électrolyte corrosif, corrosion, réduction de la durée de vie de la PAC	Températures de fonctionnement élevées, réduction de la durée de vie

d'appareils électriques et électroniques portables. D'une puissance de 5 W à 500 kW, ces PAC peuvent notamment alimenter la propulsion primaire d'aéronefs sans pilote de manière fiable, durable et efficace, tout en limitant la signature thermique, acoustique et vibratoire du système. Développé par le Naval Research Laboratory des États-Unis, le drone à hydrogène liquide *Ion Tiger* embarque 550 W pour une masse de 17 kg seulement. De quoi voler plus d'une journée (six fois plus longtemps qu'un équivalent alimenté par batterie), voire 48 heures avec de l'hydrogène liquide cryogénique.

Mobilité

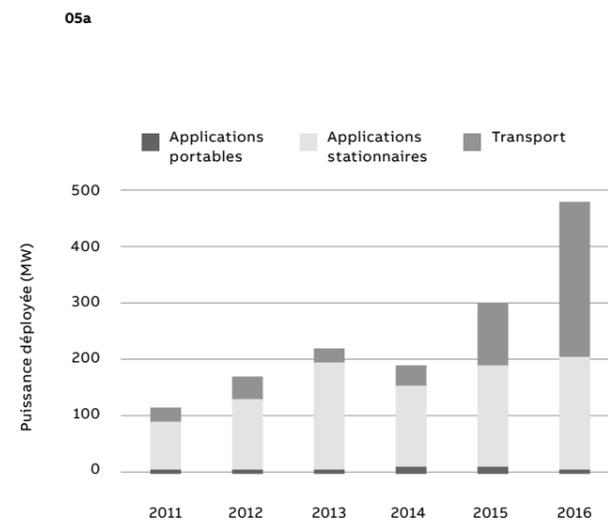
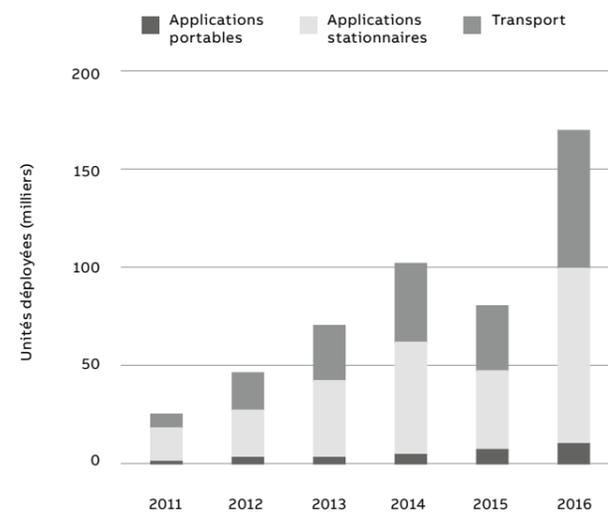
Pour lutter contre la pollution de l'air et l'épuisement des ressources fossiles, nombreux sont les pays et les villes à déployer des infrastructures de

recharge de véhicules équipés de PAC →7. C'est le cas d'Aberdeen (Écosse), où la municipalité a mis en service le plus grand parc européen de bus à hydrogène [6]. Au cours de la première année, la flotte a effectué plus de 1600 recharges, d'une durée de 5 à 7 minutes seulement. La station de recharge a distribué 35 000 kg d'hydrogène et démontré sa grande fiabilité et sa disponibilité (99,99 %). Forts de cette réussite primée à l'occasion du Low Carbon Championship 2016, les urbanistes envisagent l'extension de la flotte. Le déploiement de bus à PAC a connu le même succès dans d'autres villes du monde.

De nombreux pays déploient des infrastructures de recharge en hydrogène pour les véhicules équipés de PAC.

Très intéressés par ce transport décarboné, les opérateurs maritimes, gros émetteurs de CO₂ (3 à 5 % des rejets mondiaux) et de SO_x (plus de 5 %), mènent aussi des recherches dans ce domaine →8. ABB n'est pas en reste ; le Groupe participe au projet conjoint MARANDA [7], financé par l'Union européenne, qui vise à concevoir et mettre en œuvre une PAC à membrane échangeuse de protons de 165 kW sur le navire de recherche *Aranda*. Objectif : tester en milieu marin la production d'une électricité non polluante à très faible empreinte acoustique et vibratoire. ABB fournira la technologie de conversion d'énergie entre la PAC et la centrale électrique du navire. ABB a aussi mené avec Ballard et Royal Caribbean Cruises [8] un projet pilote de paquebot à hydrogène embarquant une PAC de 100 kW.

ABB fournira la technologie de conversion d'énergie électrique entre la PAC et la centrale électrique du navire de recherche *Aranda*.



05b

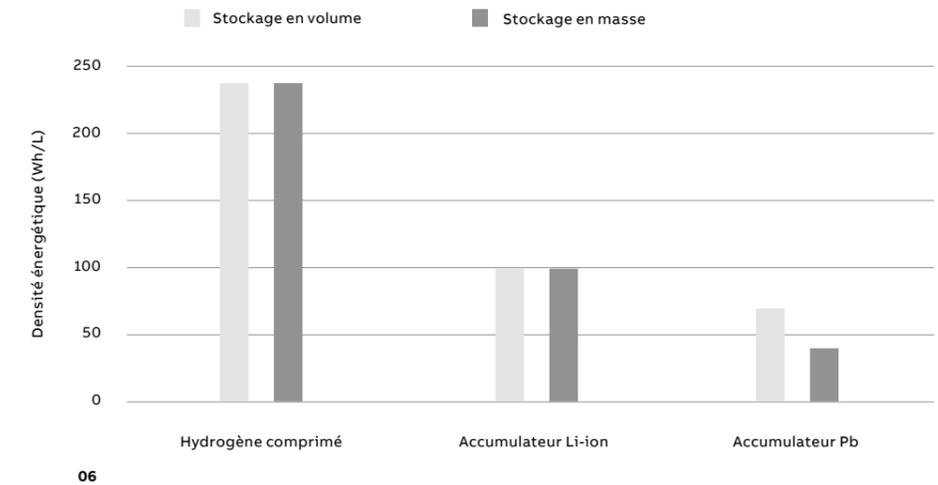
05 Déploiement des systèmes PAC sur la période 2011–16

05a Nombre d'unités déployées

05b Puissance déployée

06 Densité énergétique de l'hydrogène comprimé (3000 psi) comparée à celle des batteries plomb et lithium-ion [5]

07 Les PAC haute densité alimentent en énergie propre les transports urbains.

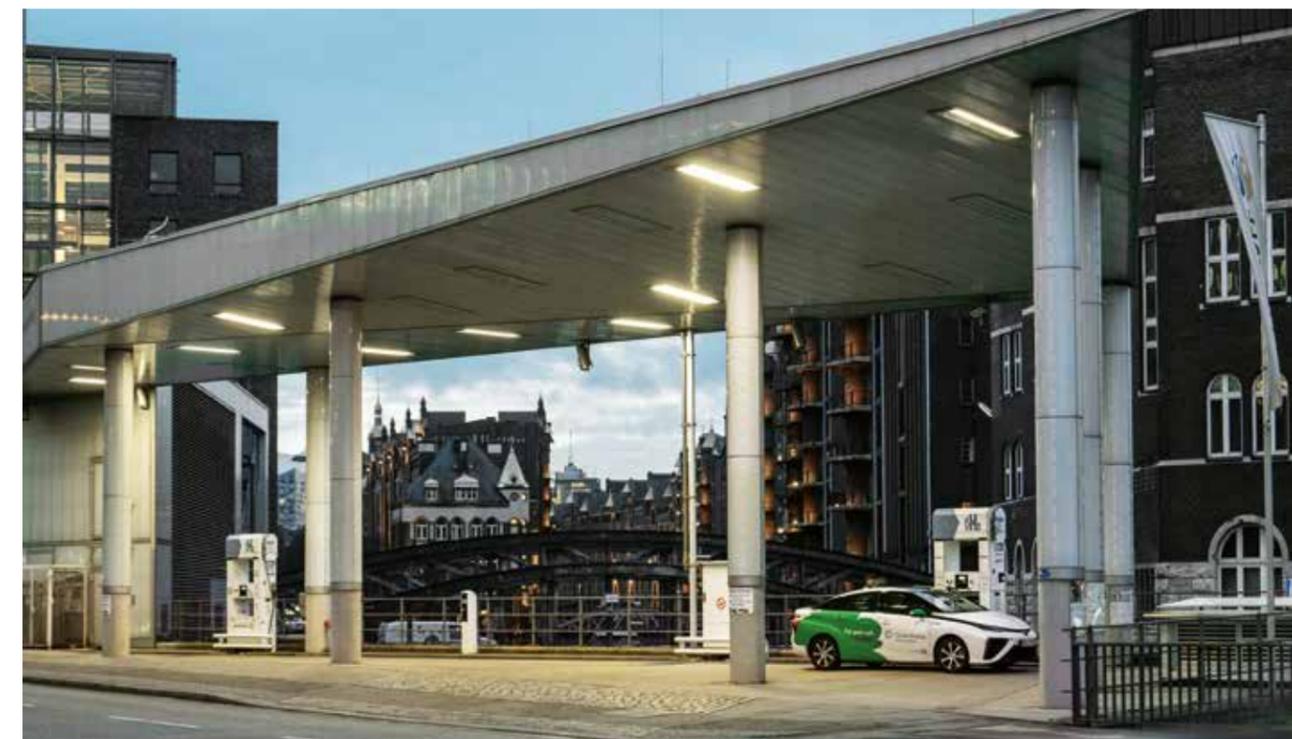


Les défis de la filière

Certes, l'hydrogène est un gaz léger qui se disperse et tombe en dessous du seuil d'inflammabilité très vite. Comparé aux autres combustibles, il ne présente qu'une faible puissance de détonation et sa combustion rapide réduit considérablement l'exposition à la chaleur ou aux flammes. Reste qu'il doit être manipulé avec précaution. Différentes normes régissent d'ailleurs l'installation d'une PAC.

D'autres défis sont à relever :

- La sécurité et l'efficacité de la production, du stockage et de la distribution d'hydrogène ;
- Le coût des PAC (catalyseurs en tête), principal frein aujourd'hui à leur développement ;
- L'optimisation globale (rendement, efficacité, coût, taille) des empilements de cellules (stacks) en vue d'augmenter les tensions et puissances électriques. Vraisemblablement imputable à différentes pertes (cinétiques, ohmiques, transport massique, reformat), la dégradation de l'endurance de la pile est encore mal comprise. Les effets du gel, du dégel et des impuretés dans les cellules, ainsi que les risques de noyage ou d'assèchement des membranes, doivent



Crédit photo : Adrian Hancu, istockphoto.com

07



08

être étudiés et modélisés avec précision. La modélisation des réactions électrochimiques, des transferts thermiques et des écoulements fluidiques à l'aide de simulations multiphysiques et de modèles d'ordre réduit permet d'optimiser la PAC et d'obtenir des courbes caractéristiques de fonctionnement très utiles pour la conception des systèmes de commande, de protection et d'électronique de puissance nécessaires à son intégration dans le réseau électrique.

Malgré ces défis, la technologie est bien perçue, tant par les entreprises que le grand public. Source d'énergie propre, mais aussi de chaleur et d'eau qu'un simple traitement rendra potable, la pile à combustible n'a pas d'égale pour propulser l'électricité verte. ●

Crédit photo : Gaël Musquet, Wikimedia Commons

—
08 Premier navire hydrogène au monde, Energy Observer ne rejette ni GES ni particules fines. Autonome, il produit de l'hydrogène par électrolyse de l'eau de mer.

Bibliographie

[1] « India's energy consumption to grow faster than major economies », *The Economic Times*, disponible sur : <https://economictimes.indiatimes.com/industry/energy/oil-gas/indias-energy-consumption-to-grow-faster-than-major-economies/articleshow/56800587.cms>, 27 janvier 2017.

[2] *The Fuel Cell and Hydrogen Annual Review 2016*, 4th Energy Wave, 2016.

[3] Overton, T., « World's Largest Fuel Cell Plant Opens in South Korea », *Power Magazine*, 25 février 2014.

[4] Logan Energy, Case Study, CCHP System, 20 Fenchurch Street, London, disponible sur : <http://www.loganenergy.com/wp-content/uploads/2015/11/150818-20-Fenchurch-Street-GW.pdf>

[5] Cook, B., *An Introduction to Fuel Cells and Hydrogen Technology*, Heliocentris, Vancouver (Canada), 2001.

[6] Ballard, Case Study – Fuel Cell Zero-Emission Buses for Aberdeen, Scotland, disponible sur : <http://ballard.com/docs/default-source/motive-modules-documents/aberdeen-case-study.pdf?sfvrsn=2>

[7] Kajava, M., « MARANDA – Aranda goes hybrid », *ABB Marine & Ports, Generations*, p. 122–123, disponible sur : <http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107045A7585&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>, décembre 2017.

[8] Bogen, J., « Catching fuel cell fever », *ABB Marine & Ports, Generations*, p. 32–33, disponible sur : <http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107045A7522&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>, décembre 2017.

ÉNERGIE

TXpand™ protège les transformateurs de la rupture

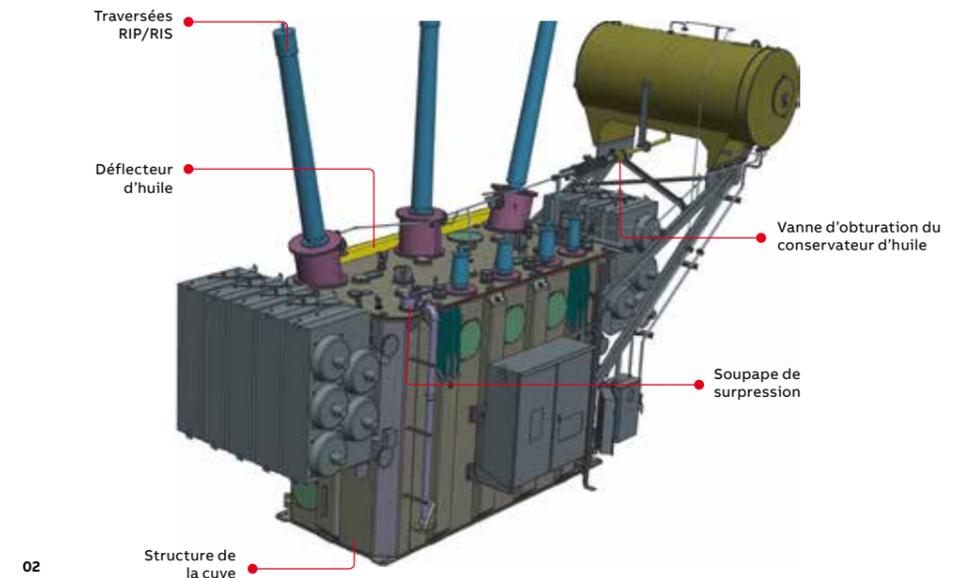
Les arcs électriques qui se produisent dans un transformateur immergé ont des conséquences potentiellement dramatiques. La solution TXpand d'ABB, qui s'appuie sur des outils numériques afin d'optimiser la conception de la cuve et la sécurité des composants, réduit l'impact de la majorité des arcs internes.



01

01 Malgré les précautions prises pour éviter la formation d'arc dans un transformateur immergé, il y a toujours un risque d'éclatement de la cuve et donc d'incendie. La solution TXpand d'ABB s'attaque à ce problème en réduisant l'impact des arcs internes.

02 Transformateur à cuve souple TXpand



Samuel S. Brodeur
ABB Inc.
Varenes (Canada)

samuel.s.brodeur@ca.abb.com



Huan M. Dinh
ABB Inc.
Lexington (Kentucky, États-Unis)

huan.m.dinh@us.abb.com

Les transformateurs immergés dans l'huile, composants essentiels des réseaux électriques, sont soumis à de fortes sollicitations. Leur taux de défaillance, s'il reste faible (environ 1 % par année de service [1]), n'est pas négligeable, d'autant que les dommages collatéraux peuvent être énormes : fuite du diélectrique, incendie, etc.

Un arc interne de faible impédance provoque l'échauffement et la vaporisation de l'huile contenue dans le transformateur. Il se forme alors une bulle de gaz, phénomène distinct de l'explosion résultant de la mise en contact d'un combustible et d'un comburant (oxydant). Cela explique que les dispositifs de prévention des explosions de type disque de rupture, courants en pétrochimie, ne sont guère utiles dans un transformateur.

Avec TXpand →1, ABB a développé et optimisé une solution destinée à réduire l'impact des arcs internes dans les transformateurs.

TXpand

Quand il s'agit de limiter les risques d'incendie, plusieurs mesures de protection électrique entrent en jeu. La première d'entre toutes consiste à intégrer un disjoncteur rapide qui limite la durée de l'arc et donc la quantité d'énergie déchargée dans la zone de défaut. La conception même du transformateur doit aussi contribuer à sa protection. TXpand a pour cela cinq caractéristiques constructives →2.

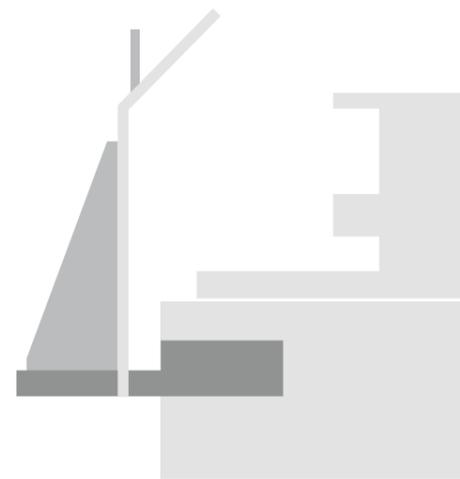
Structure de la cuve

Une étude réalisée par Hydro-Québec sur le réseau 735 kV a révélé que l'éclatement de la cuve d'un transformateur était la principale cause de fuite d'huile, et donc de départ d'incendie, dans 50 des 74 graves défaillances enregistrées. La parade tient dans une cuve conçue pour résister à l'éclatement, comme c'est le cas de TXpand, qui se déforme pour confiner et absorber l'énergie d'arc générée par le défaut. La structure de la cuve est donc au cœur de la solution. Assouplir les zones les plus rigides et renforcer les points faibles passe par une analyse rigoureuse et une modélisation de cet élément. Des points de rupture stratégiquement positionnés permettent de maîtriser les défaillances les plus imprévisibles.

La cuve du transformateur se déforme pour confiner et absorber l'énergie d'arc générée par le défaut.

Traversées RIP/RIS

La plupart des incendies consécutifs à un défaut interne sont imputables aux traversées en papier imprégné d'huile (OIP). L'étude Hydro-Québec susmentionnée révèle que les défaillances de traversées constituent, dans 18 cas sur 74, la deuxième cause d'écoulement d'huile [2]. Les traversées



03a



03b

en papier imprégné de résine (RIP) ou en fibres synthétiques imprégnées de résine (RIS) réduisent le risque de fuite, d'incendie ou d'explosion de la porcelaine.

Vanne d'obturation du conservateur d'huile

Cette vanne, montée sur la canalisation de raccordement à la cuve, laisse s'écouler l'huile dans les deux sens mais se ferme et déclenche une alarme si le débit dépasse un certain seuil. Ainsi, en cas de défaillance d'une traversée ou d'éclatement, l'huile ne risque pas de s'échapper de la cuve ni d'alimenter un incendie.

Soupape de surpression

Cette soupape à ressort évacue l'excédent de pression interne résiduel qui n'a pas été absorbé par la déformation de la cuve. Une conduite en sortie canalise l'huile et le gaz vers un dispositif de confinement.

Déflecteur d'huile

Le cinquième et dernier aspect de la solution TXpand concerne le point de rupture stratégique, qui se situe au niveau de la soudure du couvercle. La surpression risquant d'entraîner l'expulsion brève d'un mélange de gaz et d'huile chaud, il est indispensable d'installer un déflecteur en ce point pour assurer la sécurité du personnel en cas de fuite d'huile →3.

Conception de la cuve

La formation d'un arc dans l'huile est un phénomène amplement étudié et bien connu. On sait par exemple que l'énergie dégagée dépend de l'intensité maximale de courant, de la durée (courte si la protection électrique est efficace) et de la tension de l'arc. Un incident survenu sur le réseau 735 kV d'Hydro-Québec a permis d'observer l'impact de la surpression induite par la bulle d'air sur la tension d'arc [3] et d'affiner le calcul de ce paramètre, qui reste l'un des plus difficiles à appréhender.

Il est essentiel de bien comprendre la physique de la cuve pour en analyser le comportement, de la déformation à la rupture.

La composition chimique de l'arc, donnée cruciale pour la coupure de circuit, a fait l'objet de nombreuses recherches depuis 1953. D'après cinq études publiées, le volume de gaz produit par l'arc varie linéairement et la température dans la zone de réaction avoisine 2000 K [1]. Un vaste programme expérimental portant sur des transformateurs de distribution, étayé de simulations numériques, a permis de déterminer un facteur de conversion gaz-volume assez réaliste de 85 cc/kJ à pression et température standard [4]. Ce facteur k intervient dans l'équation ci-dessous, qui décrit la hausse de pression dans une cuve de transformateur.

—
03 Le déflecteur canalise l'écoulement d'huile le long de la paroi externe de la cuve afin d'éviter de mettre le personnel en danger.

03a Situation normale

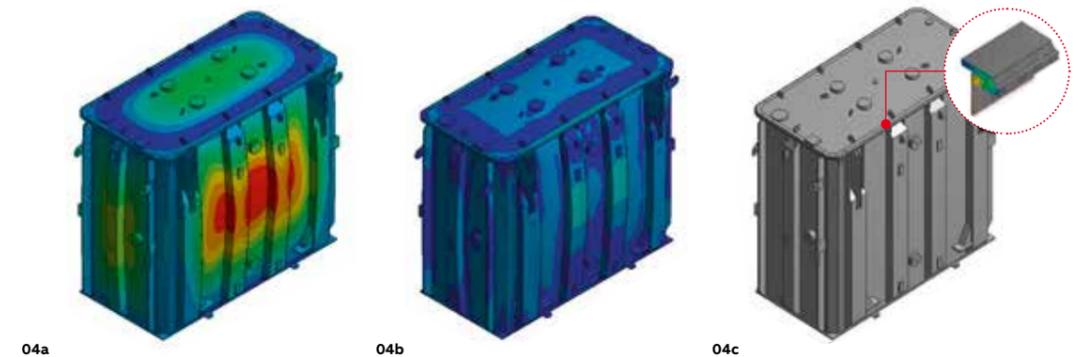
03b Action du déflecteur

—
04 Analyse numérique de la cuve.

04a Déformation (souplesse de la cuve)

04b Contraintes (analyse de la résistance globale)

04c Zones critiques (points de rupture)



04a

04b

04c

Le facteur d'amplification dynamique F , qui correspond au rapport entre la pression dynamique locale et la pression stable finale, est issu de l'observation d'explosions chimiques dans des cuves spéciales [5] et de nombreuses simulations numériques avec injection à haute pression [3].

$$P_s = F \left[100 \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{kE}{100C}} - 50 \right]$$

P_s : pression calculée dans la cuve (kPa)

E : énergie d'arc à laquelle doit résister l'équipement (kJ)

k : facteur de conversion de l'énergie d'arc ($5,8 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kJ}$)

C : coefficient de dilatation de la cuve (m^3/kPa)

F : facteur d'amplification dynamique

Il est essentiel de bien comprendre la physique de la cuve. C'est en 1959 que des expériences et des études numériques sur des transformateurs immergés à cuve rectangulaire, soumis à de brusques décharges d'azote, ont pour la première fois mis en évidence l'importance du coefficient de dilatation de la cuve sur la pression interne [6,7]. Pour autant, les paramètres de résistance de la cuve restèrent inexplorés jusqu'en 2011, année où Hydro-Québec et ABB lancèrent un vaste programme de recherche sur le sujet. Plus de cinq années ont été nécessaires à la mise au point d'une méthode numérique pour analyser le comportement de la cuve, de la déformation à la rupture. Une quarantaine d'essais destructifs ont validé les

valeurs théoriques et permis d'étalonner l'ensemble des paramètres numériques (simplification géométrique, taille du maillage, types d'élément, contacts, conditions aux limites) ainsi que l'analyse des résultats. Les simulations effectuées pendant ces années d'étude ont permis de caractériser précisément les déformations de la cuve, donc de déterminer son coefficient de dilatation et, in fine, sa résistance →4.

Des essais ont facilité la mise en données numériques de la déformation de la cuve.

Essai sur transformateur de forte puissance

Un modèle grandeur nature d'un transformateur de 330 kV/210 MVA →5, mais équipé de parties actives factices, a été construit sur les principes TXpand [8]. Un volume d'air comprimé comparable à celui du gaz généré par un arc de 20 MJ a été injecté dans la cuve remplie d'eau. Le fort dégagement d'énergie est à ce jour le plus important jamais constaté sur ABB. La cuve, dont la déformation correspondait en tout point aux prédictions numériques, a absorbé toute l'énergie sans exploser. La pression interne a mis plus de 5 secondes à s'échapper par la soupape de surpression, ce qui est relativement lent par rapport aux 50 millisecondes que durent les trois cycles d'un défaut.



—
05 Essai de surpression dans la cuve d'un transformateur 330 kV

05a Avant défaut

05b Après défaut

06 Essai de défaut interne (40 kA pendant 300 ms) sur un transformateur SSVT

06

Un second essai a eu lieu sous une pression plus importante, dans le but de faire éclater la cuve. Alors que la bulle de gaz s'est formée au fond de la cuve, la rupture s'est bien produite au point stratégique prédit par la simulation numérique : la soudure du couvercle.

Essai sur transformateur de faible puissance

La méthode de simulation TXpand, initialement développée pour les transformateurs de puissance, a cette fois été appliquée à un transformateur SSVT (Station Service Voltage Transformer) se caractérisant par une tension de tenue au choc de 650 kV et une cuve 100 fois plus petite que celle d'un transformateur de puissance. L'analyse a débouché sur plusieurs modifications conceptuelles qui ont amélioré la résistance de la cuve aux arcs internes. En 2017, c'est un appareil SSVT complet →6 qui a subi un essai de défaut d'arc interne à 40 kA pendant 300 ms, conformément aux exigences de protection les plus élevées (classe II, niveau 2) de la norme CEI 61869-1:2007. La cuve a bien résisté à la pression, sans fragmentation ni projection, avec évacuation de l'huile par la soupape de surpression en 5 secondes environ. Preuve était ainsi faite que l'outil numérique développé pour les gros transformateurs de puissance s'appliquait également aux petits SSVT.

—
TXpand est le fruit de nombreuses années de recherche-développement, appuyées par une connaissance approfondie de la formation des arcs électriques et la puissance du numérique.

Simplicité, efficacité et compétitivité

TXpand est le fruit de nombreuses années de recherche-développement, appuyées par une connaissance approfondie de la formation des arcs électriques et la puissance du numérique. La solution a fait ses preuves en situations réelles aussi bien sur de gros transformateurs que sur des SSVT. Les clients d'ABB louent sa simplicité, son efficacité et son faible coût. Le Groupe dispose ainsi d'une technologie mature, capable de limiter l'impact d'un arc interne. Ces progrès dans la sécurité des transformateurs pourraient servir de fondement à une analyse des risques et des coûts du système de confinement d'huile des postes électriques. •



05a



05b

Bibliographie

[1] Cigré, Guide des meilleures pratiques de sécurité incendie des transformateurs, groupe de travail A2.33, brochure technique n° 537, 2013.

[2] Foata, M., Power Transformer Fire Risk assessment, session Cigré 2008, Sydney (Australie).

[3] Foata, M., Dastous, J.-B., Power transformer tank rupture prevention, session Cigré 2010, Paris.

[4] Dastous, J.-B., Foata, M., « Analysis of Faults in Distribution Transformers with MSC/PISCES-ZDELK », MSC World User's Conference, Los Angeles, 1991.

[5] Kawamura, T., et al., Prevention of Tank Rupture Due to Internal Fault of Oil Filled Transformers, session Cigré 1988, Paris.

[6] Foata, M., Khouzam, G., Power Transformer Tank Rupture, Association canadienne de l'électricité, Toronto, 1994.

[7] Kothmann, R. E., Thompson, D. G., « Power Transformer Tank Rupture: Risk Assessment and Mitigation », EPRI, 1995.

[8] Brodeur, S., Dastous, J.-B., « Design and Testing of an Arc Resistant Power Transformer Tank », IEEE Transactions on

Power Delivery, 2019 (article soumis à l'IEEE pour publication).



01

LE MOT DU MOMENT

Autonomisation industrielle

Où en sont les systèmes industriels en matière d'autonomie ?



Wilhelm Wiese
ABB Global Industries
and Services
Bangalore (Inde)

wilhelm.wiese@
in.abb.com

Peut-on appliquer à un site industriel les mêmes critères que ceux utilisés pour caractériser un véhicule autonome ? Loin de vouloir comparer l'incomparable, ces deux domaines ont en fait beaucoup de dénominateurs communs qui peuvent éclairer la définition de l'autonomie.

La première idée qui vient à l'esprit quand on parle de « système autonome », c'est la voiture. Mais qu'en est-il dans l'industrie ? Si l'agence américaine en charge de la sécurité routière (NHTSA) a très clairement défini les cinq niveaux d'autonomie d'un véhicule [1], aucun organisme n'en a encore fait de même pour l'automatisation industrielle. Ces deux mondes sont pourtant plus comparables qu'il n'y paraît.

Soyons clairs : systèmes d'automatisation et systèmes autonomes appartiennent à deux espèces bien différentes. Les seconds peuvent s'affranchir de toute intervention humaine directe →1, pas les premiers [2,3].

En matière d'autonomie, l'industrie vise un objectif raisonnable : le niveau 3 de la NHTSA. Cela revient à développer des automatismes capables d'effectuer eux-mêmes l'ensemble des paramétrages, c'est-à-dire d'exploiter toute la masse de données (réglages optimisés, associations d'équipements, ambiance industrielle, etc.) remontées du gigantesque parc d'appareils connectés pour en déduire la meilleure configuration.

Un système autonome peut fonctionner en l'absence de supervision humaine directe, ce qui n'est pas le cas d'un système d'automatisation.

En pied de machine, le niveau 3 de l'autonomie industrielle exige que l'opérateur soit prêt à reprendre la main à tout moment, dès que l'ordinateur le sollicite.



02

—
01 Le recours accru à l'apprentissage automatique doit aider l'industrie à s'émanciper de l'intervention humaine.

—
02 Les algorithmes aux commandes du robot emballeur FlexPicker d'ABB maximisent la flexibilité des chaînes de production agroalimentaires tout en respectant les règles d'hygiène.

Bibliographie

[1] www.nhtsa.gov/technology-innovation/automated-vehicles-safety

[2] www.roboticsbusinessreview.com/ai/breaking-down-autonomous-systems

[3] Gamer, T., Isaksson, A., « Systèmes autonomes », ABB Review 4/2018, p. 8–11.

Qu'il s'agisse de la conduite d'un véhicule ou d'une usine, l'objectif est le même, à savoir s'émanciper de l'intervention humaine grâce au recours accru à l'apprentissage automatique. Au plan technique, cela impose de revoir de fond en comble le niveau contrôle-commande de la pyramide industrielle, qui doit disposer d'une vue d'ensemble du site et des procédés.

L'intelligence artificielle est appelée à bouleverser le modèle établi du contrôle-commande : le brassage des signaux, les boucles de régulation et l'étalonnage du procédé laisseront respectivement place au tri et à l'analyse fine des données, à la prédiction et à l'auto-optimisation →2. Les systèmes autonomes de demain fédéreront le développement, l'exploitation et la conduite en un flot continu d'algorithmes d'apprentissage automatique qui ouvriront des pistes inédites en matière d'optimisation industrielle. •

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

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

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

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

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

Impression

Vorarlberger
Verlagsanstalt GmbH
6850 Dornbirn (Autriche)



Maquette

Publik. Agentur für
Kommunikation GmbH
Ludwigshafen (Allemagne)

PAO

Konica Minolta
Marketing Services
Londres
(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

www.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 disponibles sur abb.com/abbreview.

Gardez 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.



Dans le numéro 04/2019
Mobilité électrique

Dans le monde entier, les moyens de transport font appel à de multiples technologies et procédés, allant de la production et de la distribution d'électricité aux modes de conversion de cette même énergie en mouvement. Comment l'électrification peut-elle améliorer l'efficacité et réduire les coûts de nombreux secteurs, et par là même contribuer à la sauvegarde de la planète ? C'est ce que vous découvrirez dans le prochain numéro d'ABB Review.