



# Efficacité énergétique

Energie 2015 –  
Enjeux et vecteurs de changement  
Page 6

Réseau de grand transport  
Page 22

Biocarburants  
Page 62

Moteurs à haut rendement énergétique  
Page 81



Les industriels, et la société dans son ensemble, sont confrontés à un double objectif souvent perçu comme contradictoire : réussite financière et développement durable. Or, en matière d'énergie, économie rime avec écologie, quelles que soient la source énergétique (électricité ou combustible) et l'activité (exploration, production, distribution ou consommation). Ce numéro de la *Revue ABB* est consacré aux technologies ABB d'efficacité énergétique qui constituent, pour les clients, des leviers de compétitivité.



## Efficacité et sobriété énergétiques

L'énergie est le moteur de l'économie moderne. Extraction et transformation des matières premières, transport et utilisation des produits : pour toutes nos activités, nous dépendons d'un approvisionnement continu et garanti en énergie, la moindre menace de pénurie pouvant mettre en péril la prospérité d'un pays, voire de l'ensemble de la planète. A cela s'ajoute un insatiable appétit d'énergie, surtout dans les économies en progression rapide qui absorberont une part croissante des ressources disponibles.

Dans ce contexte, il est légitime que toutes les parties prenantes participent au débat sur notre avenir énergétique. Dépendre exclusivement des sources traditionnelles d'énergie n'est pas la solution : d'une part, l'impact des activités humaines sur notre environnement semble s'intensifier, comme en témoignent les bouleversements climatiques qui appellent une politique énergétique universelle ; d'autre part, les énergies primaires deviennent sources de conflit entre des acteurs qui veulent à tout prix sécuriser leurs approvisionnements. Enfin, on ne peut plus ignorer les conséquences de l'épuisement progressif des réserves de pétrole.

Pour une majorité d'entre nous, la réponse semble évidente : il faut diversifier le bouquet énergétique avec des variantes des sources traditionnelles ou des énergies renouvelables. Les scénarios du futur comme l'hydrogène ou la fusion nucléaire apparaissent à l'horizon, mais la route est encore longue et l'issue incertaine. Le débat actuel sur nos besoins énergétiques de demain s'articule autour du nucléaire, des combustibles fossiles et des énergies renouvelables.

Les pouvoirs publics et les organisations non gouvernementales (ONG), les industriels, les chercheurs et les consommateurs sont pleinement conscients des enjeux. De nouvelles sources d'énergie primaire sont à l'étude ; le charbon est exploité avec des technologies moins polluantes ; le piégeage du CO<sub>2</sub> est à l'essai ; l'énergie nucléaire est à la veille d'un renouveau ; des biocarburants sont fabriqués ; l'énergie du vent et des mers est exploitée ; des écotaxes ou des certificats d'économie d'énergie sont mis en place pour nous inciter à adapter nos modes de consommation, etc.

La plupart des intéressés s'accordent sur le fait qu'aucune de ces solutions ne suffit à elle seule, d'où la nécessité d'un panachage. Pour autant, il s'agit d'un travail de longue haleine et les changements ne sont pas pour demain. Existe-t-il une solution économique qui donnerait des résultats rapides ?

Oui, et elle s'appelle « efficacité énergétique ».

Consommer moins d'énergie en produisant autant a le même impact global sur le bilan énergétique mondial que l'introduction d'énergies alternatives. Alors que les deux directions doivent être suivies, nous pouvons dès aujourd'hui accroître

la performance énergétique des infrastructures et équipements existants, sans incidence sur les coûts car les investissements nécessaires seront financés par les économies réalisées. A titre d'exemple, prenons l'extraction du pétrole, source d'énergie primaire. En améliorant le processus d'exploration, on consomme moins tout en augmentant le taux de récupération. De même, en renforçant l'efficacité du transport entre la source primaire et les sites de transformation (ex., oléoducs et navires), on allège la facture énergétique. Les potentiels inexploités sont immenses et répondent à des préoccupations à la fois écologiques et économiques, de quoi favoriser une introduction rapide.

Le cycle de Carnot – transformation de l'énergie thermique en énergie mécanique – possède une limite théorique de rendement ; les travaux de recherche sur les turbines, les centrales à cycle combiné et la conduite avancée des procédés ne nous permettront pas de repousser cette limite, mais ils aideront à nous en approcher. Les pertes en ligne dans les réseaux de transport et de distribution d'électricité sont inévitables, mais des technologies comme les systèmes FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) et le courant continu en haute tension (CCHT) constituent d'excellents moyens de les atténuer. Les moteurs électriques sont le premier poste mondial de consommation d'électricité. Si leur rendement s'est accru au fil des ans, il est encore loin de l'optimum. Selon l'application, la commande en vitesse variable de ces moteurs réduit jusqu'à 70% leur consommation énergétique. Sachant que le coût global d'un moteur peut être deux fois plus élevé que le coût d'achat d'un variateur de vitesse, l'argument des économies d'énergie prend une valeur considérable.

Les besoins d'efficacité énergétique sont immenses et urgents, et ABB est partie prenante dans la course à la performance énergétique : pratiquement tous les produits et services de son offre dans les domaines de l'automatisation et de l'énergie y contribuent.

Ce numéro de la *Revue ABB* décrit de nombreuses applications dans lesquelles les technologies ABB vont dans ce sens. Vous découvrirez des domaines où des technologies éprouvées aident dès maintenant à réduire la facture énergétique avec des investissements très vite rentabilisés. Nous espérons que la lecture de ces articles vous donnera de nombreuses idées pour économiser l'énergie, pour votre bénéfice et celui de la planète.

Bonne lecture

Peter Terwiesch  
Directeur des technologies  
ABB

# Revue ABB 2/2007

## Efficacité énergétique

### Le monde en 2015

**6**

#### Enjeux et vecteurs de changement

La *Revue ABB* s'intéresse aux facteurs susceptibles de façonner notre monde à l'horizon 2015.

**11**

#### 2015 – Retour vers le futur

Dans un exercice d'analyse prospective, ABB présente quatre scénarios du futur.

### Efficacité énergétique et réseaux électriques

**14**

#### Des autoroutes de l'énergie

Comment doper la capacité et la fiabilité des réseaux de transport longues distances pour un maximum d'efficacité énergétique ?

**22**

#### Le réseau de grand transport réconcilie alternatif et continu

ABB présente les derniers progrès accomplis dans le domaine du transport de l'énergie électrique.

**28**

#### Problème de congestion ?

#### Venons en aux FACTS !

Lorsque l'intégrité du réseau de transport électrique est menacée, les FACTS arrivent à la rescousse.

**33**

#### Souffler n'est pas jouer

L'éolien a le vent en poupe, mais comment produire de l'électricité quand il n'y a pas un souffle d'air ?

**39**

#### Optimisation sur toute la ligne

Les usines de dessalement couplées à des centrales d'énergie sont profitables pour leurs exploitants et l'environnement.

**44**

#### OPTIMAX™

Comment marier performance environnementale et résultats économiques ?

### Efficacité énergétique et industrie

**45**

#### Championne toutes catégories

Le système d'automatisation étendue 800xA d'ABB aux commandes d'une usine à papier ultramoderne

**49**

#### ABB lamine les coûts énergétiques

Un outil logiciel d'ABB optimise en ligne les performances des laminoirs pour gagner en réactivité et réduire les rebuts.

**53**

#### Avis d'expert

Comment réduire sa facture énergétique sans compromettre la productivité ? Avec *Knowledge Manager* et *Expert Optimizer*, ABB a la solution.

**58**

#### Plus propre, plus productif

Rien n'arrête les nouveaux robots de peinture ABB, pas même les solvants organiques dangereux !

## Energies alternatives

**62**

### Carburants verts : un écobilan en demi-teintes

Et si l'énergie poussait dans les arbres ? De courts articles décrivent les produits ABB intervenant dans la fabrication des biocarburants.

**69**

### Un vent d'énergie souffle sur l'océan

Les parcs éoliens prennent le large mais grâce à la technologie ABB, ils ne perdent jamais pied!

## Produits d'efficacité énergétique

**73**

### Les variateurs de vitesse au rendez-vous de l'efficacité énergétique

La variation de vitesse est un formidable révélateur d'efficacité énergétique.

**81**

### Moteurs à haut rendement énergétique

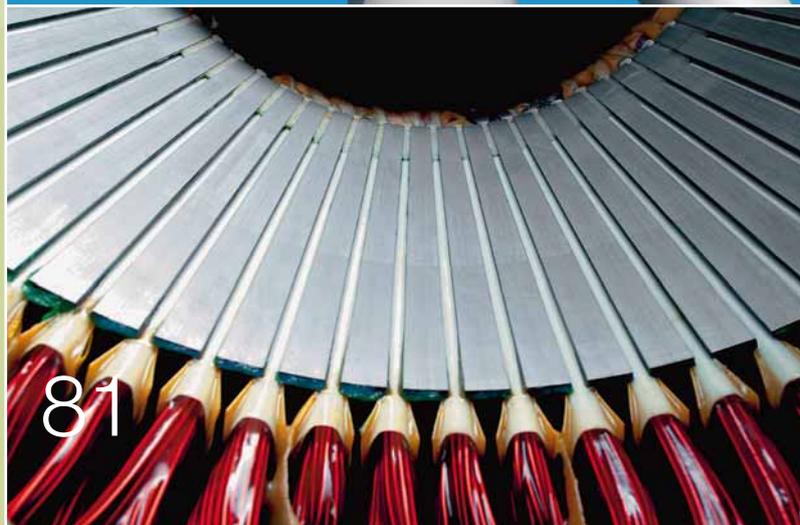
Un investissement sûr et rentable

## ABB, éternel pionnier

**85**

### Il était une fois... le turbocompresseur

Quand la technologie met le turbo.



# Le monde en 2015 – enjeux et vecteurs de changement

Friedrich Pinnekamp



Notre planète vivant au rythme du haut débit, le moindre petit changement dans un domaine clé peut avoir des conséquences majeures sur le développement de la société. Dans un contexte de bouleversements politiques, de boom économique et de dynamique technologique, tout exercice de prospective énergétique au niveau mondial est risqué. Pour autant, l'énergie est l'épine dorsale du développement économique mondial et il nous semble légitime de chercher à anticiper l'avenir. En effet, les producteurs, les transporteurs et les distributeurs d'électricité doivent faire des choix d'investissement sur le long terme ; le secteur des énergies alternatives doit prendre des décisions judicieuses tandis que les industriels et leurs sous-traitants veulent savoir quelle direction prendront le marché et le progrès technologique.

Notre vision du futur est brouillée par le fait que des événements perturbateurs, par nature imprévisibles – pandémies, attaques terroristes et ruptures technologiques – sont porteurs de profonds changements dans le développement du monde.

Il nous semble, cependant, qu'en extrapolant les tendances actuelles ou émergentes nous pouvons apprécier les facteurs susceptibles de structurer notre futur proche et anticiper sur l'évolution de la planète.

ABB s'est penché sur six enjeux et vecteurs de changement des besoins des individus et des industriels, à savoir :

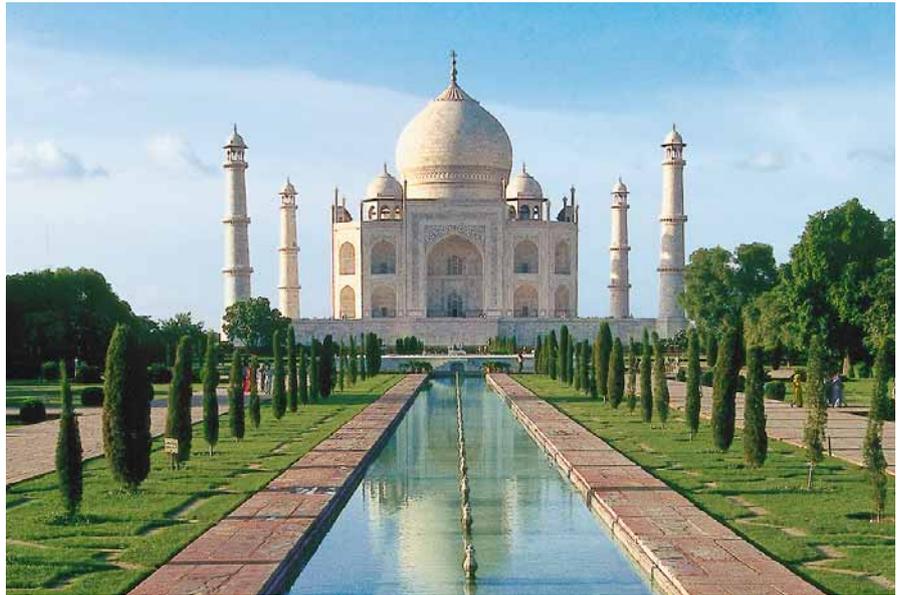
- bouleversements socio-économiques
- Mondialisation
- Restructuration de l'industrie énergétique
- Incertitudes sur les ressources d'énergies primaires
- Besoins en énergie électrique
- Problématique environnementale

#### Bouleversements socio-économiques

Une croissance démographique exponentielle, la chute des taux de mortalité et de fécondité, la modification de l'équilibre entre jeunes et vieux, la pauvreté chronique dans une grande partie de l'hémisphère sud, l'urbanisation galopante et l'essor des mégapoles, la migration de masse à l'intérieur et à l'extérieur des frontières, l'influence croissante de la religion dans certaines cultures et la montée des sectarismes dans d'autres et, enfin, l'impact à l'échelle mondiale des révolutions du numérique et de l'informatique : tels sont les facteurs qui structureront la vie des individus et des sociétés à un rythme de plus en plus rapide.

Avec 6,5 milliards d'habitants aujourd'hui et 75 millions de plus chaque année, l'évolution des structures, des valeurs et des relations au sein de nos sociétés et entre celles-ci est l'élément central qui façonne le monde dans lequel nous vivons.

Le défi démographique est exacerbé dans les nations riches par la chute de la natalité et l'allongement de la durée de vie avec un vieillissement de la



population qui pourrait, à terme, créer des tensions intergénérationnelles **1**.

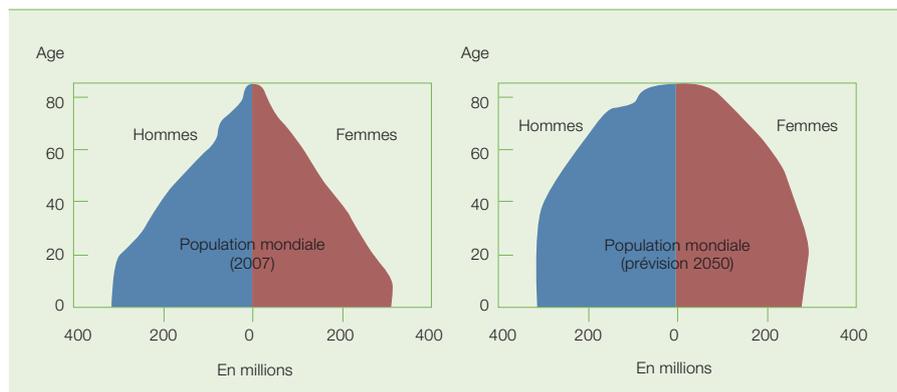
L'extrême pauvreté dans les pays les moins développés restera à un niveau élevé, même si les objectifs ambitieux de lutte contre la pauvreté des Nations unies sont atteints. Selon toute vraisemblance, le nombre de conflits provoqués par la pauvreté et les injustices va croître, débouchant sur une plus grande instabilité sociale et politique.

Au cours des dix prochaines années, les mégapoles compteront 200 millions d'habitants de plus (totalisant 600 millions en 2015), cette migration urbaine constituant, pour les pauvres, la solution traditionnelle pour accéder à de meilleures conditions économiques.

Les populations des zones urbaines ou celles qui migrent vers les pays développés auront un accès accru aux technologies de communication comme l'Internet, la télévision, la téléphonie fixe et mobile.

Ces mêmes technologies contribuent à la diffusion du savoir et font entrer l'éducation dans une nouvelle dimension. Alors que dans les pays riches, le nombre de diplômés de l'enseignement supérieur se stabilise, les pays en développement rapide connaissent sur ce plan une croissance accélérée. Le nombre d'ingénieurs bien formés dans ces pays est impressionnant alors qu'à l'Ouest les disciplines traditionnelles comme l'électrotechnique sont sur le déclin, entraînant une grave pénurie d'ingénieurs qualifiés.

**1** Evolution de la pyramide des âges



## Le monde en 2015



### Mondialisation

La mondialisation se nourrit de l'innovation technologique, des nouvelles relations économiques et des politiques nationales et internationales de nombreux acteurs : gouvernements, organismes internationaux, entreprises privées, média, main-d'œuvre et société civile.

L'impact de la mondialisation sur les sociétés individuelles recouvre de multiples aspects. Les mécanismes de libre circulation des biens et des capitaux, des idées et des populations à l'origine de la transformation des économies et des sociétés sont très complexes.

Les projections de croissance mondiale s'établissent à environ 40% entre 2005 et 2015, pour une augmentation moyenne de 25% du revenu par habitant. Des régions importantes du monde connaîtront une prospérité sans précédent et une classe moyenne pourrait émerger pour la première fois dans des pays auparavant pauvres.

Avec l'intégration progressive de la Chine, de l'Inde et d'autres pays en développement dans le jeu économique mondial, des centaines de millions d'adultes en âge de travailler arriveront sur un marché de l'emploi mondialisé, bouleversant les modes actuels de production, de commercialisation, de recrutement et de rémunération.

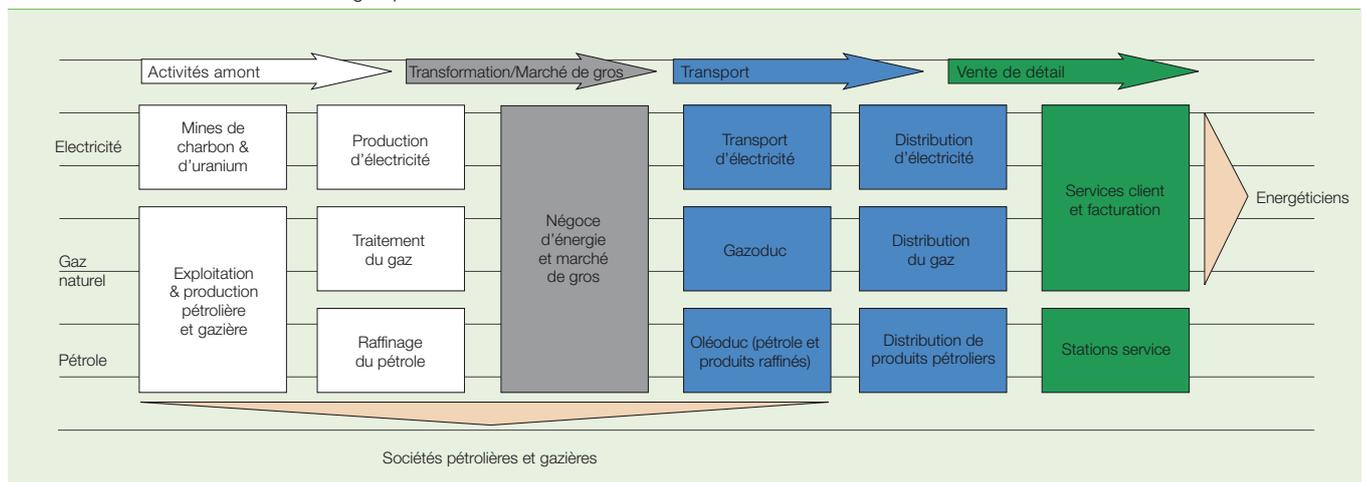
Les bienfaits de la mondialisation profiteront en premier lieu aux pays et groupes aptes à accéder et à adopter les nouvelles technologies. La mobilité professionnelle des travailleurs du savoir entre l'Occident et les pays en développement, la taille croissante de la main-d'œuvre maîtrisant l'outil informatique dans ces derniers et les efforts consentis par les multinationales pour diversifier leurs activités *high-tech* favoriseront la diffusion des nouvelles technologies. Les technologies de l'information et de la communication (TIC) sont un pilier de la mondialisation, favorisant le libre

échange d'idées, d'opinions et de données à haut débit. Elles permettent à ces multinationales de travailler sur plusieurs fuseaux horaires, avantage que n'ont pas les entreprises cantonnées à un marché local.

### L'industrie énergétique en perpétuelle restructuration

L'industrie énergétique mondiale ne cesse de se restructurer : des processus comme l'ouverture à la concurrence, la consolidation sectorielle, le développement des marchés de gros, de même que la marchandisation de l'électricité et du gaz bouleversent la nature même de cette activité économique. Des investissements massifs dans les énergies renouvelables par les majors du pétrole et du gaz, le développement de technologies pour le transport en ultra haute tension et le stockage d'électricité, les interventions des pouvoirs publics pour stimuler ou, au contraire, décourager certaines évolutions et technologies : tous ces facteurs influent sur chaque

2 Chaîne de valeur de l'industrie énergétique



maillon de la chaîne de valeur de l'industrie énergétique mondiale [2].

Un vecteur de changement de cette dernière est la libéralisation et la privatisation des marchés de l'électricité et du gaz. Pour autant, après un quart de siècle, les répercussions de ces deux mesures ne sont pas encore pleinement appréhendées. La libéralisation du secteur ouvre une ère nouvelle sur le marché de gros de l'électricité. Les pays européens libèrent leur marché à des rythmes différents, avec de très fortes disparités dans les modalités d'ouverture, allant de la répartition centralisée aux bourses d'échange. Le but ultime est un marché où le gaz et l'électricité s'échangent comme toute autre marchandise, avec une offre souple et innovante de produits et de services.

Cette restructuration sectorielle va de pair avec la nécessité d'investir dans des infrastructures pour satisfaire une demande croissante de services énergétiques à l'échelle mondiale : remplacement des capacités arrivées en fin de vie, extension des réseaux et surcoût des énergies propres.

Les autorités interviennent dans cette restructuration par le biais de subventions et de politiques fiscales, tout en se dotant d'un cadre législatif et réglementaire pour développer et encourager les énergies renouvelables, sensibiliser les populations à la défense de l'environnement et promouvoir les économies d'énergie.

Toutefois, la production marginale d'énergies vertes a peu de chance de bousculer la structure même de l'industrie énergétique à moyen terme.

Autre vecteur de changement : les problèmes de fiabilité révélés par les grandes pannes d'électricité de 2003. La sécurité d'approvisionnement et ses multiples composantes – fourniture garantie au prix du marché ; aspects technologiques, environnementaux, sociaux, culturels et géopoliti-

ques – ajoutent à la complexité du processus de restructuration.

#### **Incertitudes sur les ressources d'énergies primaires**

La plupart des projections sur nos modes de consommation énergétique anticipent une hausse continue de la demande en énergies primaires au cours des deux premières décennies de ce siècle. Il s'agit d'une extrapolation du développement passé, même si la consommation bascule vers les économies émergentes, tout particulièrement la Chine et l'Inde.

Les réserves en énergie primaire – pétrole, charbon, gaz naturel et uranium – sont suffisantes jusqu'en 2020 et au-delà. L'Agence internationale de l'Énergie (AIE) évalue à 16 billions de dollars les investissements à réaliser au cours des trois prochaines décennies pour satisfaire les prévisions de demande en énergie ; 60 % de cette somme iront aux centrales de production d'électricité et aux réseaux de transport et de distribution<sup>1)</sup>.

Si, par le passé, la corrélation entre consommation d'énergie primaire et produit intérieur brut (PIB) était forte,

elle devrait à l'avenir s'estomper du fait de l'utilisation accrue de technologies à haute efficacité énergétique dans certaines régions. Néanmoins, la croissance économique mondiale s'accompagnera d'une demande accrue d'énergie au cours des 20 prochaines années.

L'or noir, qui assure près de 38 % des besoins mondiaux, demeurera la première ressource énergétique à l'horizon des deux prochaines décennies, même si plus de 30 % des ressources restent à découvrir. Le gaz naturel gardera son importance avec environ 30 % de la production d'électricité. Emettant moins de CO<sub>2</sub>, il constitue une solution avantageuse pour lutter contre les gaz à effet de serre.

À l'exception de l'Europe occidentale, la consommation de charbon augmentera dans pratiquement tous les pays, surtout en Chine et en Inde qui disposent d'énormes réserves. À eux seuls, ces deux pays compteront pour 72 % de la hausse mondiale de consommation de charbon.

Après avoir marqué le pas, le nucléaire pourrait revenir en force dans les économies industrielles. D'autres ressources d'énergie primaire comme l'éolien, la houle, la géothermie ou le solaire s'intégreront dans le bouquet énergétique sans toutefois constituer une part significative des approvisionnements mondiaux au cours des 15 à 20 prochaines années. Un grand nombre de technologies de remplacement appelées à combler l'écart entre les différentes sources d'énergie sont encore en développement et ne devraient pas être rentables avant plusieurs années. Les économies d'énergie, tout particulièrement dans le secteur des transports, pourraient rallonger considérablement les réserves de pétrole. Enfin, les différents



#### **Note**

<sup>1)</sup> Cf. également *Revue ABB* 4/2004

## Le monde en 2015

biocarburants aideront également à sortir du tout-pétrole.

En résumé, les incertitudes sur les ressources d'énergie primaire sont le fait :

- d'un accès restreint aux ressources pour des raisons politiques ;
- du nombre limité de technologies rentables pour exploiter les réserves futures ;
- de la faible disponibilité de ressources d'énergie alternative pour se substituer, à un coût abordable et en quantité suffisante, aux ressources traditionnelles ;
- de la consommation réduite de combustibles fossiles pour protéger l'environnement et réduire les coûts.

### Evolution des besoins en énergie électrique

Avec une demande qui progresse à un rythme soutenu, principalement dans les pays en développement, les disparités régionales sur les modes de production, de distribution et de consommation de l'électricité vont vraisemblablement s'accroître. Dans les économies riches, la vétusté des infrastructures pose un défi tandis que dans les économies émergentes, de nouvelles infrastructures devront être construites. Les besoins en technologies propres et économes seront eux universels <sup>3</sup>.

Même si les composantes du bouquet énergétique servant à la production d'électricité ne devraient pas évoluer de manière notable, les pays qui optent pour une part croissante d'énergie renouvelable seront confrontés au

problème de fiabilité de leurs réseaux. En effet, dans de nombreuses régions du monde, les réseaux de transport et de distribution fonctionnent aux limites de leurs capacités et, même si de nouvelles lignes électriques sont construites par les pays asiatiques en croissance rapide, le rythme de construction n'est pas suffisant pour assouvir la soif d'énergie.

Pour tous les pays, la priorité absolue sera de sécuriser et de fiabiliser la fourniture en modernisant les infrastructures existantes ou en construisant de nouveaux réseaux.

Pour la Chine et l'Inde, cela suppose de construire de nouvelles centrales d'énergie dans des sites éloignés des centres de consommation et proches des sources d'énergie primaire, pour lesquelles il faudra de nouvelles lignes de transport massif d'énergie.

Pour de nombreux fournisseurs d'électricité, fiabiliser les ouvrages est une urgence car les conséquences des dysfonctionnements peuvent être désastreuses pour l'ensemble de la société. On estime que les grandes pannes de courant qui ont frappé les Etats-Unis ont coûté plus de 10 milliards de dollars et qu'elles sont le résultat de sous-investissements dans les capacités de transport et de distribution, de l'obsolescence technologique et de procédures d'exploitation inadéquates.

Les efforts pour réduire les pertes en ligne sont motivés à la fois par des

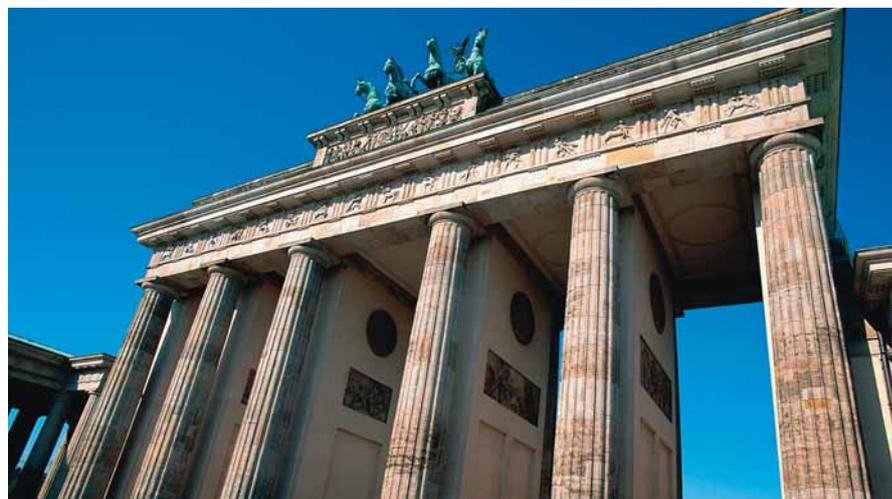
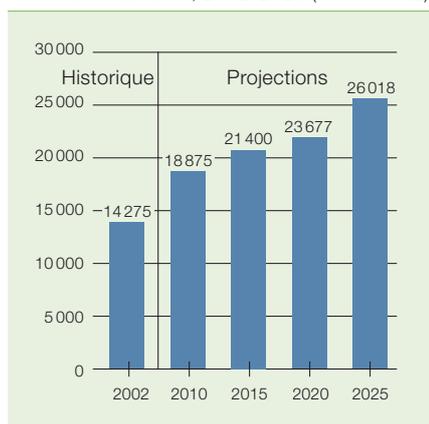
facteurs environnementaux et par un impératif de sécurité d'approvisionnement. Les pertes dans les réseaux modernes de transport et de distribution sont de l'ordre de 6 à 7% de l'électricité acheminée. Approximativement 70% de ces pertes interviennent dans le réseau de distribution qui est plus étendu et qui opère à un niveau de tension inférieur.

Les électriciens ne sont pas les seuls à vouloir agir sur ce front. En effet, les économies d'énergie ont un impact direct sur les finances des industriels, du secteur tertiaire et des ménages, favorisant la demande en équipements électriques peu gourmands en énergie et à haut rendement comme les moteurs, les variateurs de vitesse et les appareils électroménagers.

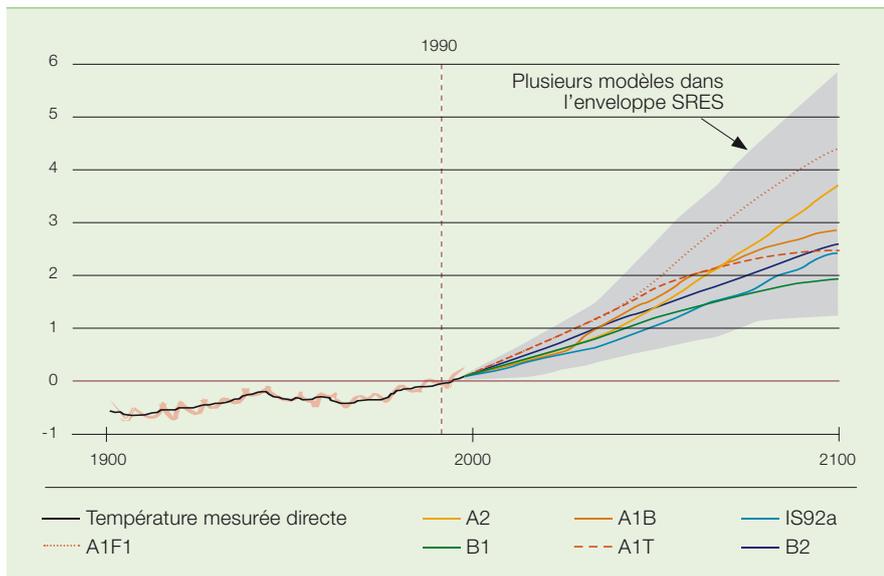
Le progrès technologique a créé de nouvelles méthodes de gestion des réseaux électriques. Des avancées dans la compensation statique d'énergie réactive et dans le stockage d'énergie permettent de raccorder aux réseaux existants de nouvelles sources d'énergie électrique. L'électronique de puissance pilote les réseaux électriques alors que les nouveaux systèmes FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) améliorent leur fiabilité.

Les technologies d'économie d'énergie ou d'efficacité énergétique se répandent. Les semi-conducteurs de puissance à faibles pertes et haut rendement énergétique réduisent les déperditions dans les réseaux. De même, les nouvelles générations de moteurs

<sup>3</sup> Consommation électrique nette mondiale en milliards de kW/h, 2002–2025 (Source : AIE)



4 Différents modèles d'évolution de la température à la surface de la Terre  
(Source: Cambridge Press, 2006)



et les variateurs électroniques de vitesse contribuent à réduire les pertes.

Les travaux de R&D sur les réseaux « intelligents » ou « auto-cicatrisants » qui renforcent leur fiabilité, tirent également profit des avancées dans les TIC.

#### Le marché de l'environnement

Alors que le débat sur l'ampleur et l'impact du changement climatique bat son plein, des défis imposent une réponse mondiale : émissions de gaz à effet de serre, réchauffement planétaire et épuisement des ressources naturelles 4.

Le dossier prioritaire, en grande partie à cause de son impact universel, est celui des concentrations croissantes de gaz à effet de serre. L'essor des technologies « propres » sert de catalyseur à de nouveaux marchés : technologies peu ou pas polluantes pour l'industrie manufacturière et la production d'électricité ; amélioration de l'efficacité énergétique des procédés et des équipements industriels grâce aux moteurs à haut rendement et à la vitesse variable.

Le développement de ces nouveaux marchés se heurte à l'incertitude sur les ressources d'énergie primaire, ce qui devrait jouer en faveur des énergies renouvelables et des biocarburants pour les transports. Ces récentes

années, les technologies de combustion des hydrocarbures de tous types ont fait d'énormes progrès, qu'il s'agisse du pétrole, du gaz et du charbon ou encore des carburants automobiles.

Or l'innovation technologique devra probablement mettre en balance coûts et avantages : fiscalité environnementale, mesures antipollution, allègement de la facture énergétique et allongement de la durée de vie.

Le regain d'intérêt pour le nucléaire risque de freiner le déploiement des sources alternatives de production d'électricité. Le compromis entre performances limitées des énergies propres et croissance économique n'est pas sans compliquer la tâche, tout particulièrement dans les pays émergents.

#### Friedrich Pinnekamp

ABB Group, Corporate Research  
Zurich (Suisse)  
friedrich.pinnekamp@ch.abb.com

## 2015 – Retour vers le futur

### Une analyse prospective d'ABB

Friedrich Pinnekamp

Cette étude a été réalisée à partir d'entretiens, de documents écrits et d'échanges informels avec un grand nombre d'experts externes, de leaders d'opinion, de politiciens et de membres de la communauté scientifique.

La majorité penche davantage pour un réflexe de patriotisme économique que pour une ouverture vers le village planétaire. Elle pense également que le fossé entre pays émergents et pays riches continuera de se combler, les deux groupes profitant, dans une certaine mesure, des fruits de la croissance.

ABB prend leur opinion très au sérieux et se prépare aux différents scénarios. Même si l'incertitude sur l'avenir est forte, tous les scénarios sont un plaidoyer pour l'efficacité énergétique.

Dans une société mondialisée et ouverte, avec un accès quasiment libre de tous à l'énergie, c'est la menace de pénurie universelle des sources d'énergie primaire et le devenir de notre planète qui imposent une utilisation rationnelle de l'énergie. En cas de repli protectionniste, c'est l'absence de sécurité d'approvisionnement qui interdit toute surconsommation d'énergie.

Lorsque le développement des économies émergentes s'accélère, c'est une fois de plus la pénurie de ressources qui entrave leur croissance. Quant aux économies industrielles qui stagnent, c'est la simple réalité économique qui les force à réduire leur consommation énergétique.

Au cours de la prochaine décennie, la partie se jouera donc sur le terrain de l'efficacité énergétique.

L'hypothèse de taux de croissance à quantité d'énergie égale varie de 5 % dans le premier scénario à 3 % dans le dernier.

	Ouverture planétaire	Les pays riches renforcent leur compétitivité
<b>Croissance économique</b>	La plupart des régions ont accédé à la prospérité économique au cours de la dernière décennie. De grands blocs économiques (ex., l'Union européenne) existent mais loin d'être protectionnistes, ils s'intègrent parfaitement dans une économie mondialisée.	La croissance dans les pays industrialisés a été forte pendant une décennie. L'équilibre entre un haut niveau de vie et la compétitivité internationale a pu être maintenu. La croissance mondiale n'a pas atteint les prévisions, les foyers de prospérité n'étant pas déployés au niveau mondial.
<b>Réalité mondiale</b>	L'économie est mondialisée avec la libre circulation des biens, de la main-d'œuvre, de la technologie et des capitaux. Les traités de l'OMC régissent le commerce mondial. Les multinationales prospèrent.	Les pouvoirs publics des pays riches ont profité de fortes exportations et se sont imposés sur des marchés extérieurs. Les économies émergentes ont fait preuve de plus de protectionnisme face à l'influence étrangère.
<b>Tissu socio-économique</b>	Les sociétés se sont bien intégrées dans les marchés mondialisés avec leur main-d'œuvre flexible. La majorité de la population mondiale a accès au savoir et à l'électricité, deux fondements de la prospérité.	Une forte croissance économique a permis aux économies riches de soulager le fardeau de la population vieillissante en attirant des travailleurs immigrés jeunes et instruits.
<b>Marché de l'énergie</b>	Le renchérissement constant du pétrole et du gaz a fait de l'efficacité énergétique une priorité mondiale. De plus en plus de sources d'énergie alternatives deviennent rentables et des gisements pétrolifères et gaziers auparavant non rentables le deviennent.	Les prix élevés de l'énergie incitent aux économies et la production d'énergies alternatives décolle. La libéralisation du marché de l'énergie se poursuit. Pour sécuriser l'approvisionnement en énergie dans un monde aux ressources primaires qui s'épuisent, des fournisseurs de plus en plus puissants passent de nombreux accords bilatéraux.
<b>Réseaux électriques</b>	Les réseaux électriques quadrillent la planète. Il n'y a aucun signe de consolidation et le marché de l'énergie reste dans les mains des fournisseurs.	Le remplacement des infrastructures vétustes a eu un impact positif sur la compétitivité des économies riches. Les pays en développement ont construit moins de réseaux que prévu.
<b>Environnement</b>	Le changement climatique, la biodiversité et l'état de santé de la planète deviennent des sujets de préoccupation majeurs. Les leaders politiques et les grandes entreprises de tous les pays s'attaquent au problème de l'efficacité énergétique et du réchauffement planétaire, devenus urgents.	Des marchés d'émissions de CO <sub>2</sub> ont été créés dans la plupart des pays développés. Les carburants pour le secteur des transports sont de plus en plus dérivés de produits non pétroliers (sous l'impulsion des pays riches).
<b>Technologies</b>	Les besoins de modernisation des réseaux ont donné une impulsion aux nouvelles technologies comme le CCHT et le CAHT, les limiteurs de courant, les disjoncteurs HT et la supraconductivité. De nouvelles méthodes de stockage d'énergie ont favorisé la production d'énergies « vertes ».	Le climat économique positif dans les économies riches a stimulé les investissements en R&D à la fois dans le secteur public et le secteur industriel au-delà des prévisions.

## Les économies émergentes se renforcent

Ayant échoué à réformer leurs économies, les pays riches peinent à suivre les pays qui se développent à un rythme soutenu, principalement en Asie. La Chine, l'Inde, la Corée du Sud et, dans une certaine mesure, le Moyen-Orient ont capitalisé sur leur main-d'œuvre de mieux en mieux formée mais encore bon marché.

La mondialisation a favorisé la pleine intégration des économies émergentes dans le marché planétaire. Les traités de l'OMC ont prouvé leur efficacité dans la promotion des échanges interrégionaux. Les multinationales ont adapté leur dimension planétaire pour exploiter les points forts des différentes régions.

Les conditions de vie dans les nations développées ont progressé, l'émigration de la main-d'œuvre qualifiée a fortement ralenti. Les niveaux de vie montent et ces nations tirent la consommation mondiale.

La demande en énergie a dépassé les projections pour la décennie passée. Pour satisfaire ces importants besoins en énergies primaires, l'efficacité énergétique et les énergies alternatives, y compris le nucléaire, sont devenues des priorités. Dans la mesure du possible, les accords énergétiques bilatéraux sont privilégiés pour tenter de sécuriser l'accès à des ressources limitées.

Les économies riches n'ont que partiellement réussi à remplacer leurs équipements et réseaux électriques vétustes. Des investissements importants dans des infrastructures neuves ont toutefois été réalisés par les pays émergents pour tenter de redresser le déséquilibre entre l'offre et la demande dans ces régions.

La prise de conscience écologique dans les pays émergents a fait que ces derniers ont réussi à agir pour maîtriser la pollution. Les technologies avancées jouent un rôle moteur dans ce domaine. Le développement à l'échelle mondiale de l'énergie nucléaire, la promotion des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique ont atténué la menace de pénurie.

L'appétit insatiable des économies émergentes en énergie a débouché sur l'installation de technologies ultramodernes pour la production et le transport massif d'électricité. Grâce à des applications avancées d'efficacité énergétique dans les usines, les jeunes économies ont encore comblé leur retard sur leurs riches concurrents.

## Repli protectionniste

La stagnation de l'économie mondiale et même la récession dans certaines parties du monde ont duré une décennie. Le commerce mondial a nettement ralenti et les marchés nationaux ont progressé. Les économies occidentales ont été affectées par le ralentissement en Asie, région qui n'a pas pu maintenir son taux de croissance passé. La coopération internationale est limitée. Les pays privilégient l'intérêt national et cherchent l'auto-suffisance.

L'Asie est confrontée à des mouvements sociaux, des problèmes environnementaux et des économies en surchauffe. L'OMC n'a pas réussi à jeter les bases d'un commerce mondial pérenne. Les gouvernements déçus adoptent des mesures protectionnistes, entraînant une baisse du niveau de vie, même dans les économies riches. La circulation des biens et des personnes est restreinte de même que celle du savoir et de la technologie.

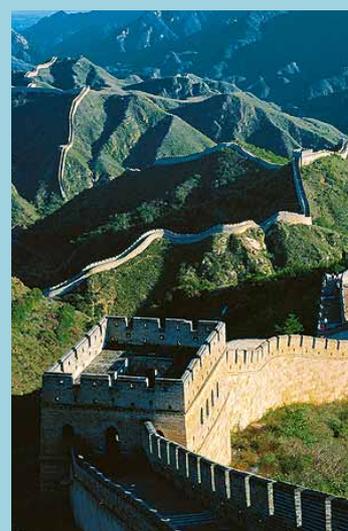
Une part importante de la population mondiale n'a toujours pas accès à l'électricité, situation qui a peu de chance d'évoluer du fait des difficultés financières de ces pays et du durcissement de la conjoncture. L'accès à l'information reste restreint dans les pays fermés.

La stagnation de l'économie mondiale a ramené la demande énergétique prévue aux prévisions d'il y a dix ans. Les besoins en énergie primaire restent considérables, mais le protectionnisme et le désir d'auto-suffisance se renforçant, la priorité est donnée à l'efficacité énergétique, aux énergies alternatives et au nucléaire. Les difficultés à garantir l'accès à l'énergie primaire par des accords bilatéraux sur le long terme vont croissantes car les pays producteurs font bloc pour faire monter les prix. Le risque de guerre de l'énergie s'accroît.

En réaction aux grandes pannes de courant d'il y a dix ans, les pays riches ont poussé les infrastructures existantes aux limites de leurs capacités sans consentir d'investissements majeurs dans les réseaux électriques. De nombreuses liaisons d'interconnexion étaient prévues mais peu ont été mises en œuvre. Les pays émergents ont construit de nouveaux réseaux mais pas au rythme prévu.

La coopération internationale s'est relâchée tout comme les réponses mondiales au changement climatique et le négoce de CO<sub>2</sub>. Des initiatives nationales, tirées plus par des priorités locales de qualité de l'air qu'une vision planétaire, ont été prises. Les combustibles alternatifs font lentement leur entrée sur les marchés des économies riches.

Le secteur énergétique n'a introduit que quelques rares technologies innovantes de production, de transport et d'économies d'énergie.



# Des autoroutes de l'énergie

Technologies de transport et de distribution électriques, moteurs de la performance énergétique

Enrique Santacana, Tammy Zucco, Xiaoming Feng, Jiuping Pan, Mirrasoul Mousavi, Le Tang

L'ouverture des marchés électriques entend permettre au consommateur d'acheter son énergie là où elle est la moins chère, la plus rentable et la plus écologique. Mais il y a encore loin de la coupe aux lèvres ! Les insuffisances de capacité du réseau obligent souvent des centrales à haut rendement à fonctionner à puissance réduite et le client à s'approvisionner à la source la plus proche mais aussi la moins performante.

Pour y remédier, il faut ouvrir de nouveaux couloirs de transport et mieux exploiter les infrastructures existantes en s'appuyant sur de nouvelles technologies.

L'énergie électrique produite par les centrales parcourt des centaines, voire des milliers de kilomètres de réseaux pour desservir l'utilisateur **1 2 3**: pylônes, lignes et câbles, transformateurs, disjoncteurs, condensateurs, systèmes FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*) et CCHT (Courant Continu Haute Tension), organes de conduite, de surveillance et de protection dessinent le paysage électrique. Le maillage de lignes, qui achemine cette énergie à haute tension, des centrales de production aux postes de répartition, est appelé «réseau de grand transport et d'interconnexion». Il est relayé par des réseaux de distribution chargés d'alimenter le consommateur en basse tension. L'ensemble forme un «système de transport-distribution», conçu pour livrer une électricité fiable, sûre et économique, en cohérence avec la demande et les contraintes de la filière.

Les grandes pannes électriques des dernières années témoignent du manque de fiabilité et de capacité d'optimisation des réseaux de transport et de distribution, partout dans le monde.

Ce système assure trois niveaux de service **4**.

Le premier garantit un minimum de connectivité et de capacité de transfert, en régime de fonctionnement normal. Tout manquement à cette obligation de service minimal compromet le développement économique des régions desservies.

Le second niveau s'attache à sécuriser et à fiabiliser la fourniture électrique dans l'éventualité, plausible, de défaillances de ses composants. Il s'appuie obligatoirement sur des «itinéraires bis» entre centrales de production et consommateurs, qui assurent la redondance des capacités de transport et de distribution.

Le troisième niveau pallie l'hétérogénéité et la dispersion des ressources

## Efficacité énergétique et réseaux électriques

énergétiques en vue d'optimiser la desserte électrique pour le bien-être de la collectivité et la recherche de l'optimum économique. Il s'agit concrètement de mieux utiliser les diverses centrales pour réduire les gaz à effet de serre (GES), responsables du réchauffement planétaire, et de maximiser l'efficacité économique globale de l'adéquation offre-demande par des transactions faisant intervenir des mécanismes de marché (négoce, courtage...). Or, sans capacités de transport et de distribution suffisantes (c'est-à-dire supérieures au deuxième niveau de service), cette démarche de progrès est vaine!

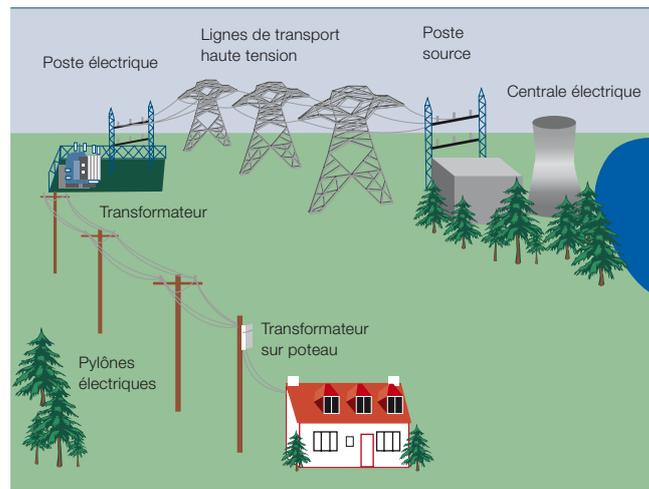
Hélas, il s'avère que les réseaux électriques mondiaux se cantonnent pour la plupart au deuxième échelon pour les grands pays, sans jamais atteindre complètement le troisième. Les grandes pannes électriques des dernières années **Encadré** témoignent amplement du manque de fiabilité et de capacité d'optimisation des réseaux de transport et de distribution, partout dans le monde.

A l'inverse, nous verrons qu'un système de transport-distribution bien construit favorise l'efficacité énergétique de la fourniture électrique.

### Un parcours semé d'embûches: l'exemple américain

Des capacités de transport-distribution suffisantes sont cruciales pour exploi-

**1** Le cheminement de l'électricité aux Etats-Unis, de la centrale au consommateur (source: www.howstuffworks.com)



ter efficacement les systèmes électriques en optimisant le parc productif et en minimisant les pertes en ligne. Ce n'est guère le cas aux Etats-Unis, où cette ambition est souvent entravée par des infrastructures pâti-

#### Encadré Des pannes « historiques »

Amérique du Nord	14 août 2003
Londres	28 août 2003
Danemark/Suède	23 septembre 2003
Italie	28 septembre 2003
Grèce	12 juillet 2004
Australie	14 mars 2005
Moscou	25 mai 2005
Europe	4 novembre 2006
Victoria, Australie	17 janvier 2007
Afrique du Sud	18 janvier 2007
Colombie	26 avril 2007

sous-investissement chronique en extension et en modernisation **5**.

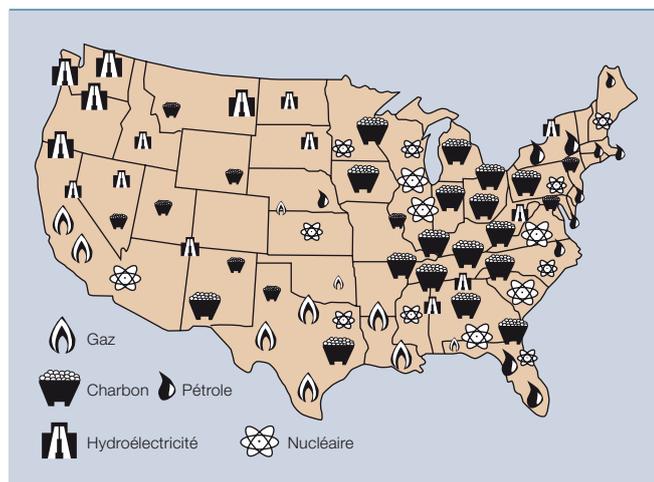
### Congestions

Il y a congestion du transport lorsqu'il faut freiner le transit de puissance sur une ligne ou un ouvrage pour rester en-dessous des seuils fixés par la capacité physique ou les contraintes de sûreté du système. Les fournisseurs électriques recherchent toujours l'électricité la moins chère pour desservir les centres de consommation. Quand une contrainte de transport limite la quantité d'énergie qui peut être prélevée de la ressource la plus souhaitable pour alimenter en toute sécurité les usagers, le gestionnaire du réseau doit trouver un autre moyen de production plus cher (ou moins performant) afin de répondre, coûte que coûte, à la demande. En atteste une étude de 2003 sur les six gestionnaires de réseau de transport (GRT) indépendants que comptent les Etats-Unis: Nouvelle Angleterre, New York, PJM<sup>1)</sup>, Midwest, Texas et Californie [1]. Conclusion: leurs coûts de congestion, cumulés sur la période 1999-2002, se chiffrent à environ 4,8 milliards de

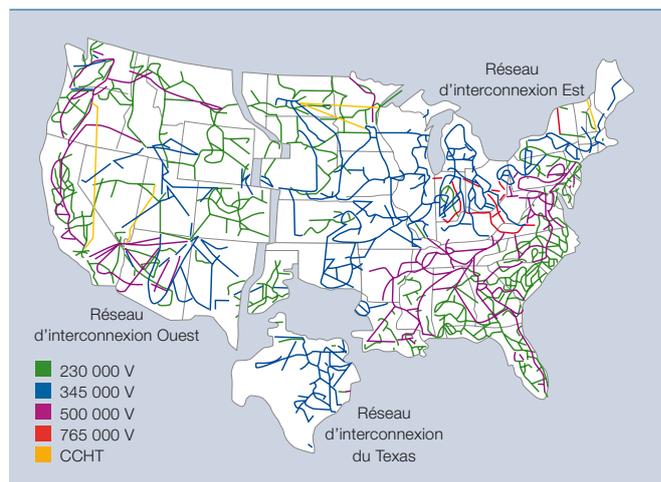
#### Notes

<sup>1)</sup> GRT responsable des opérations et du contrôle du système électrique sur une zone couverte par cinq états de la côte est des Etats-Unis: Pennsylvanie, New Jersey, Maryland, Delaware et Virginie.

**2** Implantation des centrales d'énergie aux Etats-Unis (source: DOE)



**3** Le réseau de transport nord-américain (source: DOE)



## Efficacité énergétique et réseaux électriques

dollars. Les enquêtes des marchés de l'énergie administrés par ces GRT régionaux confirment cette tendance à la hausse. Une étude plus récente, portant sur les coûts de congestion enregistrés par les deux GRT de New York et PJM, de 2001 à 2005, montrent que ces coûts totalisent à l'année près de 1 milliard de dollars pour le premier, le double pour le second [2]! La congestion du transport oblige également à de fréquents allègements de la charge (ACT) [6]; lorsque la demande est intense et la production locale limitée, les GRT sont amenés à couper une ou plusieurs consommations pour maintenir l'intégrité du réseau.

**Le CCHT est plus efficace pour le transport électrique sur liaisons aériennes longues distances; sa capacité est en effet 2 à 5 fois celle d'une ligne CA de même niveau de tension.**

#### Pertes en ligne

L'acheminement physique de l'électricité, d'une source de production à un lieu de consommation, engendre toujours des pertes par effet Joule; celles-ci alourdissent la charge électrique totale et nécessitent un surcroît de production induisant à son tour un gaspillage de ressources. Globalement, ces pertes représentent 6 à 7,5% de la production électrique totale [3] (environ 3,5% dans le transport, 4,5% dans la distribution). Elles sont largement tributaires de la topologie du réseau, de l'implantation et du rendement des unités de production, de la localisation et de la densité de la consommation; à l'évidence, les pertes enregistrées lors des pics de consommation ou sur des lignes très sollicitées sont souvent bien supérieures à celles occasionnées par des régimes de charge moyenne ou faible. Cela s'explique par la relation quadratique entre pertes et flux d'énergie, applicable à la plupart des ouvrages de la fourniture électrique. Le manque à gagner annuel s'estime à plus

de 21 milliards de dollars (sur la base du prix de détail moyen de l'électricité et le cumul des pertes de transport-distribution en 2005 [3]).

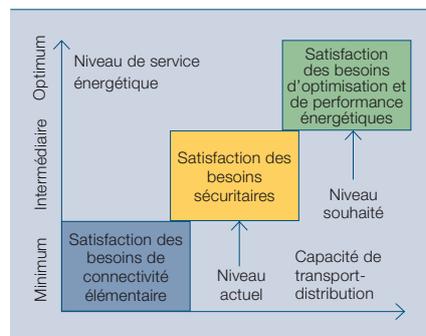
Là encore, aux Etats-Unis, la tendance à la hausse s'est accentuée ces dernières années, surtout en raison de la multiplication des échanges et de l'inefficacité des systèmes de transport et de distribution [8].

#### Les technologies à la rescousse

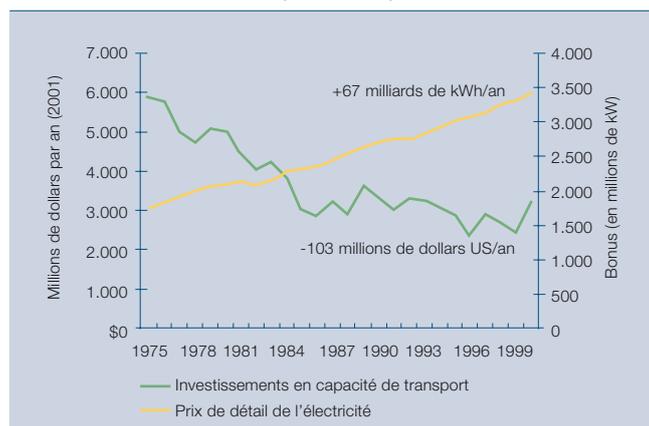
Les choix technologiques permettant d'améliorer l'efficacité des activités de transport et de distribution se répartissent en trois catégories:

- extension de capacité pour utiliser et déployer au maximum les moyens de production;
- optimisation de la conception et du fonctionnement des systèmes de transport-distribution pour réduire les pertes d'énergie globales;
- élaboration de normes industrielles favorisant les équipements de haute efficacité énergétique.

4 Les trois niveaux de service assurés par les systèmes de transport-distribution électriques



5 Retard des investissements en capacité de transport par rapport à la croissance de la demande (source : EEI)



#### Etendre les capacités existantes

Trois grandes techniques s'y emploient: la réalisation de nouvelles lignes (en courant alternatif ou continu), la modernisation des lignes en place ou leur exploitation au plus proche de leurs limites thermiques.

#### Nouvelles lignes

Deux solutions sont en présence: le courant alternatif haute tension (CAHT) et le courant continu haute tension (CCHT). Les contraintes thermiques limitent habituellement la puissance transitée en CAHT à 400 MW sous 230 kV, 1100 MW sous 345 kV, 2300 MW sous 500 kV et environ 7000 MW sous 765 kV. A ces contraintes s'ajoutent les limitations fonctionnelles du système électrique: maintien de la tension, stabilité et sûreté. C'est pourquoi le transit de puissance sur les liaisons CAHT longues distance est d'ordinaire inférieur à ces valeurs.

#### CCHT

Le CCHT est plus efficace, pour des distances supérieures à 600-1000 km, sur des lignes aériennes [9]; sa capacité est en effet 2 à 5 fois celle d'une ligne CA de même niveau de tension [7].

L'intégration environnementale lui est également plus favorable puisque l'emprise au sol<sup>2)</sup> est moindre. Cette technologie est largement employée pour l'interconnexion de systèmes CA lorsque les liaisons en alternatif sont irréalisables du fait de l'instabilité des réseaux ou des écarts de fréquence nominale. Le CCHT investit aussi les liaisons sous-marines de longueur supérieure à 50 km, en remplacement

de sa concurrente alternative rendue impraticable par les capacités élevées des câbles, faute de stations de compensation intermédiaires. Les ultimes progrès du transport CCHT mettent en œuvre un convertisseur à source de tension compact, doté d'IGBT<sup>3)</sup> qui améliorent la qualité de la fourniture électrique sur les réseaux CA. Cette technologie, dénommée *HVDC Ligh<sup>1</sup>™*,

#### Notes

<sup>2)</sup> Cf. « L'insoupçonnable légèreté du CCHT », Dag Ravemark, Bo Normark, Revue ABB 4/2005, p. 25-29

<sup>3)</sup> Transistors bipolaires à grille intégrée (semi-conducteurs de puissance)

s'appuie sur de petits postes convertisseurs et des câbles souterrains pour réduire l'impact environnemental. Sa triple mission de contrôle rapide et indépendant des puissances active et réactive, de soutien de la puissance d'appoint et de redémarrage sur défaut élargit les possibilités d'amélioration de la qualité d'approvisionnement des réseaux CA.

#### Pertes minimales

Les pertes d'un système CCHT apparaissent à deux niveaux : en ligne et aux bornes des convertisseurs CA-CC. Ces dernières représentent environ 1 à 1,5% de l'énergie transitée, ce qui est peu comparativement aux pertes en ligne, qui sont fonction de la résistance des conducteurs et de l'intensité du courant. Sachant qu'il n'y a pas de transfert de puissance réactive sur les liaisons continues, les pertes en ligne du CCHT sont inférieures à celles du CA. Dans la quasi-totalité des cas, les pertes totales en régime continu sont, à transit de puissance égal, inférieures à celles de l'alternatif **7**.

#### Pierres de touche

La question de la répartition des coûts est l'un des freins majeurs à la création de nouvelles lignes, en alternatif comme en continu. Les lignes traversent souvent des régions pour lesquelles les bénéfices locaux de ces réalisations sont discutables : en clair, faut-il ventiler les coûts de construction entre tous les usagers du réseau électrique ou les imputer aux seuls bénéficiaires? La controverse, qui oppose pouvoir politique et opinion publique, reste d'actualité.

Même si une ligne bénéficie d'un appui financier, l'obtention de son permis de construire et le choix de son implantation peuvent se transformer en parcours du combattant pour bien des distributeurs électriques, des années durant... Au point que la ligne en question, une fois autorisée, risque de devoir obéir à un autre cahier des charges et nécessiter un complément d'étude.

**Un conducteur à hautes températures est capable de transporter 2 à 3 fois plus de courant que son homologue classique de même diamètre, sans grever la charge.**

#### Moderniser l'existant

Il y a trois façons de doper la capacité des lignes actuelles : accroître le niveau de tension, augmenter la section et/ou le nombre de conducteurs par phase, utiliser des matériaux conducteurs à haute température. La première solution réduit d'autant l'intensité nécessaire au transfert d'une même puissance. Passer de 230 kV au palier suivant de 345 kV, par exemple, porte à 1100 MW la capacité d'une ligne d'environ 400 MW.

#### Remplacement des conducteurs

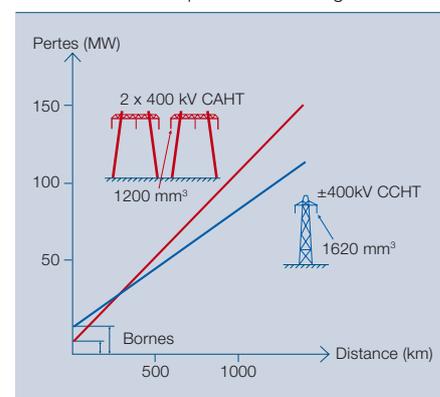
Sachant que la résistance des conducteurs est *grosso modo* inversement proportionnelle à leur section, il faut augmenter cette dernière ou ajouter des conducteurs parallèles pour accroître l'intensité véhiculée sur la

ligne : on peut ainsi porter la puissance d'une ligne 230 kV de 400 MW à 1100 MW en l'équipant de nouveaux faisceaux de câbles plus gros.

Les récents progrès techniques accomplis dans le domaine des conducteurs à hautes températures permettent d'atténuer efficacement les goulets d'étranglement dus aux contraintes thermiques sur les lignes de courte et moyenne longueurs. Un conducteur de ce type est capable de transporter 2 à 3 fois plus de courant que son homologue classique (en aluminium-acier) de même diamètre, sans grever la charge.

L'augmentation de la tension et le remplacement des conducteurs sont deux solutions ayant l'avantage d'occuper la même emprise au sol. Seules réserves : les nouveaux conducteurs sont plus lourds ou nécessitent des niveaux d'isolement accrus, ce qui peut obliger à renforcer ou reconstruire les pylônes mais aussi à remplacer les

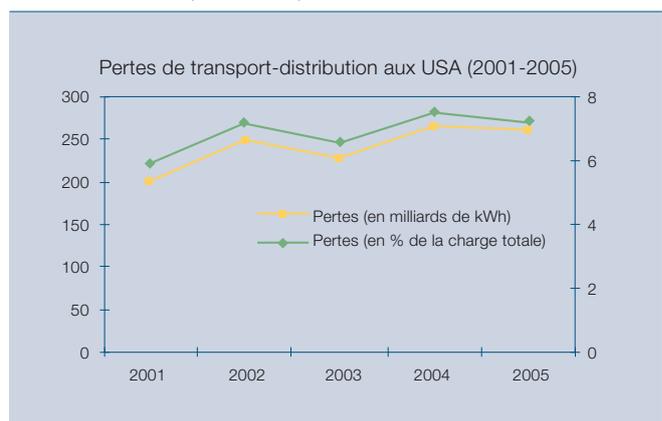
**7** Les liaisons CCHT perdent moins d'énergie sur la distance que leurs homologues CAHT.



**6** Augmentation du nombre d'allègements de la charge de transport, sur la période 1997-2005 (source : NERC)



**8** Pertes du réseau de transport-distribution nord-américain, de 2001 à 2005 (source : EIA)



## Efficacité énergétique et réseaux électriques

9 Station CCHT : le CCHT investit le grand transport et d'autres applications électriques.



gros matériels des postes électriques (transformateurs, disjoncteurs...).

#### Bâtir ou rénover ?

Le débat sur la construction de nouvelles lignes ou la réhabilitation des couloirs existants ne soulève pas que des questions techniques. Nous l'avons vu, l'obtention d'un permis de construire peut demander des années aux Etats-Unis... sans garantie de succès ! Aussi le ministère américain de l'Energie (DOE) devrait-il cette année déclarer les couloirs de transport électrique « d'intérêt national », dans le cadre de la loi *Energy Policy Act* de 2005, en vue de simplifier la délivrance des permis et d'accélérer la construction de grandes lignes dans les zones les plus congestionnées.

#### Optimiser l'existant

Il n'est pas rare que les lignes de transport soient exploitées bien en

11 Les transformateurs de distribution sont responsables d'une grande part des pertes de transport-distribution ; le remède réside notamment dans de nouveaux matériaux.



dessous de leur capacité thermique en raison des contraintes de tension, de stabilité ou d'exploitation du système électrique. Plusieurs technologies peuvent alors améliorer le transit de puissance. Le transformateur déphaseur est le dispositif le plus utilisé pour repousser les limites thermiques liées aux flux de bouclage ou à la mise en parallèle des lignes. La compensation série est une autre technique couramment employée sur les liaisons CAHT longues distances. Mieux, les progrès de l'électronique de puissance ont donné naissance aux dispositifs FACTS<sup>4)</sup> qui permettent de mieux maîtriser le transfert d'énergie dans les lignes et matériels électriques, tels que les transformateurs 10. Les plus simples de ces composants sont le condensateur à thyristors et le compensateur statique d'énergie réactive SVC (*Static Var Compensator*), qui équilibre en grand nombre des points stratégiques du réseau de transport. De même, le TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) conjugue compensation de puissance réactive et amortissement des oscillations de puissance. Le fleuron des FACTS est le compensateur statique synchrone STATCOM (*STATIC COMPensator*), qui injecte et absorbe de la puissance réactive sur le réseau, en fonction des fluctuations de tension du système électrique. Enfin, le nec plus ultra de la technologie est le régulateur universel UPFC (*Unified Power Flow Controller*), qui peut agir sur la puissance active et la puissance réactive de la ligne indépendamment l'une de l'autre, soutenir rapidement la tension et gérer le flux d'énergie. Toutes variantes confon-

10 Les FACTS renforcent la capacité et la stabilité des lignes CA.



dues, les FACTS sont susceptibles d'augmenter de 20% à 40% la capacité de transit des lignes jusqu'ici bridées par des contraintes de tension ou de stabilité.

Les pertes sont largement tributaires de la topologie du réseau, de l'implantation et du rendement des unités de production, de la localisation et de la densité de la consommation.

#### Des réseaux de transport sans contraintes

##### Baisse des prix

L'exploitation de réseaux de transport sans contraintes permet aux moyens de production les plus rentables d'accéder à la charge et d'accroître ainsi l'efficacité du marché électrique ; elle tire parti de la diversité des courbes de charge régionales, en jouant sur leurs particularités climatiques et leurs fuseaux horaires. Les moyens de production rentables peuvent alors être appelés et tourner à plein régime plus longtemps, réduisant d'autant le recours aux ressources moins économiques.

##### Hausse de la fiabilité

Les réseaux de transport sans contraintes fiabilisent l'ensemble du

#### Note

<sup>4)</sup> Cf. « Des réseaux électriques plus fluides », Rolf Grünbaum, Johan Ulleryd, *Revue ABB* 4/2005, p. 21-24

système électrique : à un niveau de réserve de capacité donné, ils sont en effet capables de soutenir la puissance d'appoint adéquate des interconnexions voisines de la région sinistrée (perte simultanée de plusieurs unités de production et lignes de transport).

#### Réduction des rejets polluants et diversification du bouquet énergétique

Ces réseaux sont aussi l'occasion d'exploiter des sources de production moins polluantes et davantage d'énergies renouvelables éloignées des grandes agglomérations. Cette diversification contribuera aux objectifs de sécurité d'approvisionnement et d'indépendance énergétique des pays ; elle aidera également à préserver l'équilibre du mix énergétique d'une région de sorte que la pénurie temporaire d'un type de ressource ne porte pas à conséquence.

### L'emploi de matériaux supraconducteurs, en remplacement du cuivre dans les enroulements de transformateur, peut considérablement diminuer les pertes en charge.

#### Réduction des pertes énergétiques par une conception et une exploitation optimisées du système de transport-distribution

Voici quelques-unes des techniques de minimisation des pertes les plus répandues dans la conception et l'exploitation du transport et de la distribution :

- Remplacement des conducteurs par des conducteurs de plus grosse section ou ajout de conducteurs en parallèle ;
- Augmentation du niveau de tension sur une portion du réseau de transport ou de distribution ;
- Optimisation de la tension par la compensation de puissance réactive (installation de dispositifs en des points stratégiques pour minimiser le transit d'énergie réactive sur les réseaux de transport-distribution) ;
- Fourniture directe d'énergie aux mégacentres de consommation par CCHT ;
- Egalisation de la charge des phases en améliorant l'équilibre des cou-

rants de phase des systèmes de distribution ;

- Emploi de câbles supraconducteurs refroidis à une température proche de l'azote liquide ( $-196^{\circ}\text{C}$ ), capables de véhiculer des intensités très élevées sans leur offrir de résistance ; ces supraconducteurs à haute température (SHT), encore à l'étude, peuvent transporter 3 à 5 fois plus d'énergie que leurs homologues classiques en cuivre et se substituer aux liaisons aériennes que la pression environnementale et les contraintes d'emprise foncière interdisent. Leurs pertes en charge sont nettement inférieures à celles des équivalents aériens, même en tenant compte de l'énergie nécessaire à leur refroidissement. Un grand fournisseur de supraconducteurs annonce des pertes ne dépassant pas 0,5% de l'énergie transmise, contre 5 à 8% pour les câbles traditionnels. De surcroît, l'utilisation de matériaux supraconducteurs, en remplacement du cuivre dans les enroulements de transformateur, peut considérablement diminuer ces pertes. Prenons un transformateur de 100 MVA : le total des pertes en charge, des pertes à vide et des pertes dues au refroidissement n'atteint que 65 à 70% de celles d'un transformateur classique.

D'autres technologies et méthodes de conception promettent d'accroître la capacité du réseau :

- le déploiement de lignes souterraines permettant d'économiser jusqu'à 80% des pertes de distribution ;
- des réseaux de distribution en courant continu ;
- des microréseaux pour supprimer le transport longues distances ;
- la conception de réseaux automatisés « intelligents » ;
- le contrôle-commande temps réel, en ligne ;
- la gestion de la charge par un comptage sophistiqué ;
- le stockage de l'énergie.

Le potentiel d'amélioration de l'efficacité énergétique par la réduction des pertes de transport-distribution est estimé supérieur à 1% de la fourniture

#### Note

<sup>9)</sup> Sur la base du prix de détail moyen de l'électricité aux Etats-Unis, en 2005

totale d'énergie, soit une économie annuelle de 3 milliards de dollars<sup>9)</sup>.

#### Des transformateurs efficaces

Un autre moyen de doper l'efficacité des systèmes de transport-distribution réside dans l'amélioration de la performance énergétique des appareillages. Cette démarche sert trois objectifs : mieux gérer la demande énergétique, renforcer la sécurité d'approvisionnement, tempérer les aléas climatiques.

Les pertes des transformateurs de distribution, en particulier, représentent une fraction non négligeable des pertes totales affectant le transport et la distribution électriques <sup>11</sup> <sup>12</sup>. Une étude du réseau *Pacific Northwest* révèle que ces appareils sont responsables de plus de 30% des pertes (2% seulement pour les transformateurs de poste [4]). Compte tenu de leur nombre, de leur longévité et de leur régime de charge (24 heures sur 24, 365 jours par an), le moindre gain de rendement enregistré sur ces matériels (+0,1%) se traduit par d'importantes économies.

Les technologies actuelles peuvent ainsi réduire d'au moins 15% ces pertes de transformateur.

Deux types de perte sont couramment visés : les pertes fer et les pertes cuivre. Les premières, davantage appelées « pertes à vide », sont provoquées par un courant magnétisant dans le noyau ferromagnétique du transformateur ; toujours présentes lorsque le transformateur est connecté, elles demeurent indépendantes de la charge. Quand un transformateur fonctionne

<sup>12</sup> Deux façons de réduire les pertes en charge des transformateurs : choisir les bons matériaux, revoir la géométrie des enroulements.



## Efficacité énergétique et réseaux électriques



en continu, elles occasionnent une forte consommation d'énergie tout au long de la durée de vie utile de l'appareil, généralement estimée à 20–30 ans. Les pertes cuivre ou « pertes en charge », quant à elles, se produisent dans les spires, les raccordements et la structure métallique du transformateur ; elles sont proportionnelles au carré du courant de charge <sup>13</sup>.

Plusieurs techniques et éléments de construction aident à diminuer les pertes à vide : on peut choisir un acier plus performant pour fabriquer le noyau ou optimiser sa géométrie. De même, l'augmentation de la taille du noyau ou l'abaissement de la tension par spire réduit la densité du champ magnétique et, partant, les pertes fer. Autre possibilité : réduire la section du conducteur comportant les spires de façon à diminuer la densité de courant. En contrepartie, les pertes en charge augmentent ! Il existe plusieurs façons d'y remédier : mise en œuvre de matériaux présentant une plus haute conductivité (conducteurs de forte section) ou adoption de conducteurs en cuivre au lieu de l'aluminium. L'emploi de méthodes de bobinage à plus faibles pertes réduit la longueur des conducteurs portant les enroulements. Un noyau magnétique de moindre section et la diminution du nombre de spires atténuent aussi les pertes en charge ; ces pertes minimes se retrouvent notamment dans les transformateurs supraconducteurs.

On voit bien que la réduction des pertes à vide a souvent pour revers une augmentation des pertes en charge et inversement ; la diminution des pertes de transformateur relève donc d'une démarche d'optimisation mettant en jeu des critères physiques, techniques et économiques, sur fond d'analyse du cycle de vie (ACV). Le plus souvent, il faut arbitrer entre le choix du matériau du noyau et des enroulements, la conception du transformateur et son évaluation économique par l'acheteur, à savoir son « coût global de durée de vie ». Cet élément d'appréciation inclut toutes les dépenses relatives à l'acquisition, à l'installation, à l'utilisation (pertes d'énergie comprises), à la maintenance et éventuellement au rebut du produit.

Le coût global est d'ordinaire calculé par les entreprises électriques, dans le cadre de leur procédure d'achat. Autrement, les clients industriels et commerciaux paient directement cette énergie perdue car ils sont paradoxalement moins réceptifs à cette logique de coût global, notamment en raison de leurs pratiques d'achat et du cycle de vie relativement court des transformateurs.

### Les lignes de transport sont souvent exploitées bien en-dessous de leur capacité thermique en raison des contraintes de tension, de stabilité ou d'exploitation du système électrique.

L'efficacité énergétique des transformateurs progresse à grands pas, sous l'impulsion des pouvoirs publics et du marché. Dès 1992, la *US Energy Act*, loi américaine sur l'énergie, demandait au DOE d'effectuer une analyse coûts-bénéfices des gains d'efficacité énergétique des transformateurs de distribution. Une étude du laboratoire américain *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL) a confirmé que ces progrès, techniquement réalisables, débouchent sur d'importantes économies, chiffrées de 3,6 à 13,7 QUAD<sup>6)</sup> sur la période 2000–2030 [5]. En 1995, l'EPA (*Environmental Protection Agency*) lançait, en partenariat avec les en-

treprises électriques, le label Energy Star® destiné à promouvoir et à soutenir l'utilisation de transformateurs de distribution à haute efficacité. Ce programme sensibilise la population à la cause de la performance énergétique pour baisser les émissions de GES.

Les transformateurs efficaces ont depuis peu la vedette, dans le monde entier <sup>14</sup> ; sur le continent nord-américain, le Canada, le Mexique, de même que les Etats de Californie, du Massachusetts, de New York, du Minnesota, du Vermont, du Wisconsin et de l'Oregon ont d'ores et déjà adopté des programmes d'efficacité énergétique, sur l'initiative du *Consortium pour l'efficacité énergétique* (CEE), organisme à but non lucratif pour la promotion des produits et services efficaces.

Même si ce domaine n'est pour l'instant régi par aucune norme obligatoire, plusieurs référentiels industriels fixent le mode d'évaluation du rendement énergétique des transformateurs de distribution : les normes NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*) TP-1, 2 et 3, par exemple, calculent la performance et la consommation énergétiques des transformateurs efficaces, tandis que la NEMA TP-3 en définit l'étiquetage. Le projet de norme IEEE PC57.12.33, plus précis que la TP-1, renseigne sur le calcul des pertes des transformateurs de distribution.

L'Office de l'efficacité énergétique et de l'énergie renouvelable du DOE vient d'émettre un avis d'ébauche de règles (*Notice Of Proposed Rulemaking, NPR*) fixant les normes de rendement énergétique minimal des transformateurs immergés et secs moyenne tension. Ces nouvelles exigences devraient concerner environ 50 à 60% de la production actuelle de transformateurs de distribution. Les noyaux de ces appareils sont normalement fabriqués dans les qualités d'acier industriel les plus courantes (M4, M5 et M6) et les moins chères. Les améliorations proposées en matière d'efficacité énergétique imposent des aciers au silicium à grains orientés

#### Note

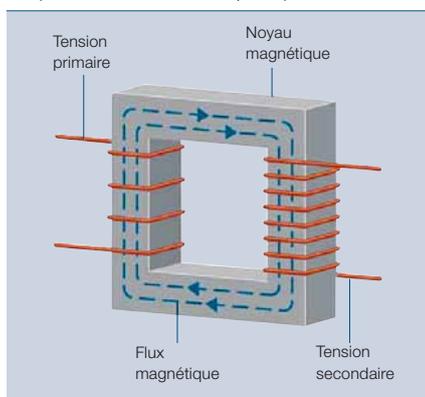
<sup>6)</sup> 1 QUAD = 10<sup>15</sup> Btu = 2,931 × 10<sup>11</sup> kWh = 1,055 × 10<sup>18</sup> J

(M2 et M3), plus performants. Cette exigence accroît la demande en matériaux à haute efficacité puisque les transformateurs secs sont d'ordinaire fabriqués en acier à grains non orientés. La réalisation de ces appareils se heurtera donc à deux grands enjeux : leur coût et la disponibilité de matériaux à haute performance énergétique. Si le DOE finit par imposer ces transformateurs efficaces, les modalités de cette obligation sont encore floues. Dans la foulée, des normes NEMA seront adoptées pour concrétiser les efforts accomplis, en Amérique du Nord comme sur les marchés de la CEI, pour institutionnaliser l'efficacité énergétique dans le monde entier.

### Montrer la voie

Esquissons à présent les technologies qui, une à une ou collectivement, permettront d'accroître l'efficacité du système électrique. Les gisements d'éco-

13 Principe du transformateur  
(source : Precision Graphics)



14 Transformateur triphasé ABB sur poteau



nomie, à l'échelle de la planète, sont gigantesques : ne serait-ce qu'aux Etats-Unis, le potentiel d'économies d'énergie par la réduction des pertes de transport-distribution dépasse 1% de la fourniture totale d'énergie, soit près de 3 milliards de dollars. Ces progrès permettent aussi d'économiser des milliards de dollars par an sur les coûts de congestion.

Ils accélèrent également l'optimisation des moyens de production et freinent la consommation d'énergies fossiles en facilitant l'accès à des sources renouvelables et respectueuses de l'environnement.

L'exploitation de réseaux de transport sans contraintes permet aux moyens de production les plus rentables d'accéder à la charge et d'accroître ainsi l'efficacité du marché électrique.

Le *Business Roundtable Energy Task Force T&D*, regroupement des grands producteurs et fournisseurs électriques nord-américains, s'est donné une feuille de route en trois points :

- Investir à bon escient pour augmenter la capacité et améliorer la conduite du réseau en vue d'optimiser le déploiement et l'utilisation des moyens de production ;
- Optimiser la conception et l'exploitation du réseau à l'aide de technologies et méthodes de pointe, indispensables aux économies d'énergie ;

- Elaborer de nouvelles normes industrielles visant les appareillages électriques à haut rendement énergétique pour réduire la consommation.

Les technologies existent. Pour autant, leur déploiement ne soulève pas que des questions d'arbitrage entre bénéfices durables et coûts ; il impose aussi la remise à plat des pratiques traditionnelles de la filière électrique, l'appui des réglementations sur l'environnement et l'adhésion massive des populations. Les avancées technologiques d'ABB et les progrès de la conception et de l'exploitation des systèmes électriques joueront un rôle déterminant dans les gains d'efficacité énergétique de notre planète.

#### Enrique Santacana

ABB Inc, Power Technology Products  
Norwalk, CT (USA)  
enrique.santacana@us.abb.com

#### Tammy Zucco

Strategic Marketing for Power Products and Power Systems Divisions  
Raleigh, NC (USA)  
tammy.l.zucco@us.abb.com,

#### Xiaoming Feng

#### Jiuping Pan

#### Mirrasoul J. Mousavi

#### Le Tang

ABB Inc, Corporate Research  
Raleigh, NC (USA)  
xiaoming.feng@us.abb.com  
jiuping.pan@us.abb.com  
mirrasoul.j.mousavi@us.abb.com  
le.tang@us.abb.com

#### Remerciements

Nous tenons à remercier le groupement *Business Roundtable* des producteurs et fournisseurs d'électricité aux Etats-Unis et leur comité *Energy Task Force T&D*, mené par ABB, pour nous avoir permis de rapporter ici les grandes lignes de leur plan d'action. Les opinions exprimées dans cet article n'engagent que leurs auteurs.

#### Bibliographie

- [1] J. Dyer, *U.S. Department of Energy Transmission Bottleneck Project Report*, 2003
- [2] *Why Are Electricity Prices Increasing?* A Report Prepared by The Brattle Group for for Edison Electric Institute (EEI), 2006
- [3] *Energy Information Administration* ([www.eia.doe.gov](http://www.eia.doe.gov))
- [4] T. J. Hammons, B. Kennedy, R. Lorand, S. Thigpen, B. W. McConnell, S. Rouse, T. A. Prevost, C. Pruess, S. J. Dade, V. R. Ramanan, and T. L. Baldwin, *Future trends in energy-efficient transformers*, IEEE Power Engineering Review, p. 5-16, July 1998.
- [5] <http://www.cta.ornl.gov/cta/Publications/Reports/ORNL-6847.pdf>, site consulté en avril 2007

# Le réseau de grand transport réconcilie alternatif et continu

Des solutions d'avenir pour le transport massif d'énergie en 800 kV CC et 1000 kV CA

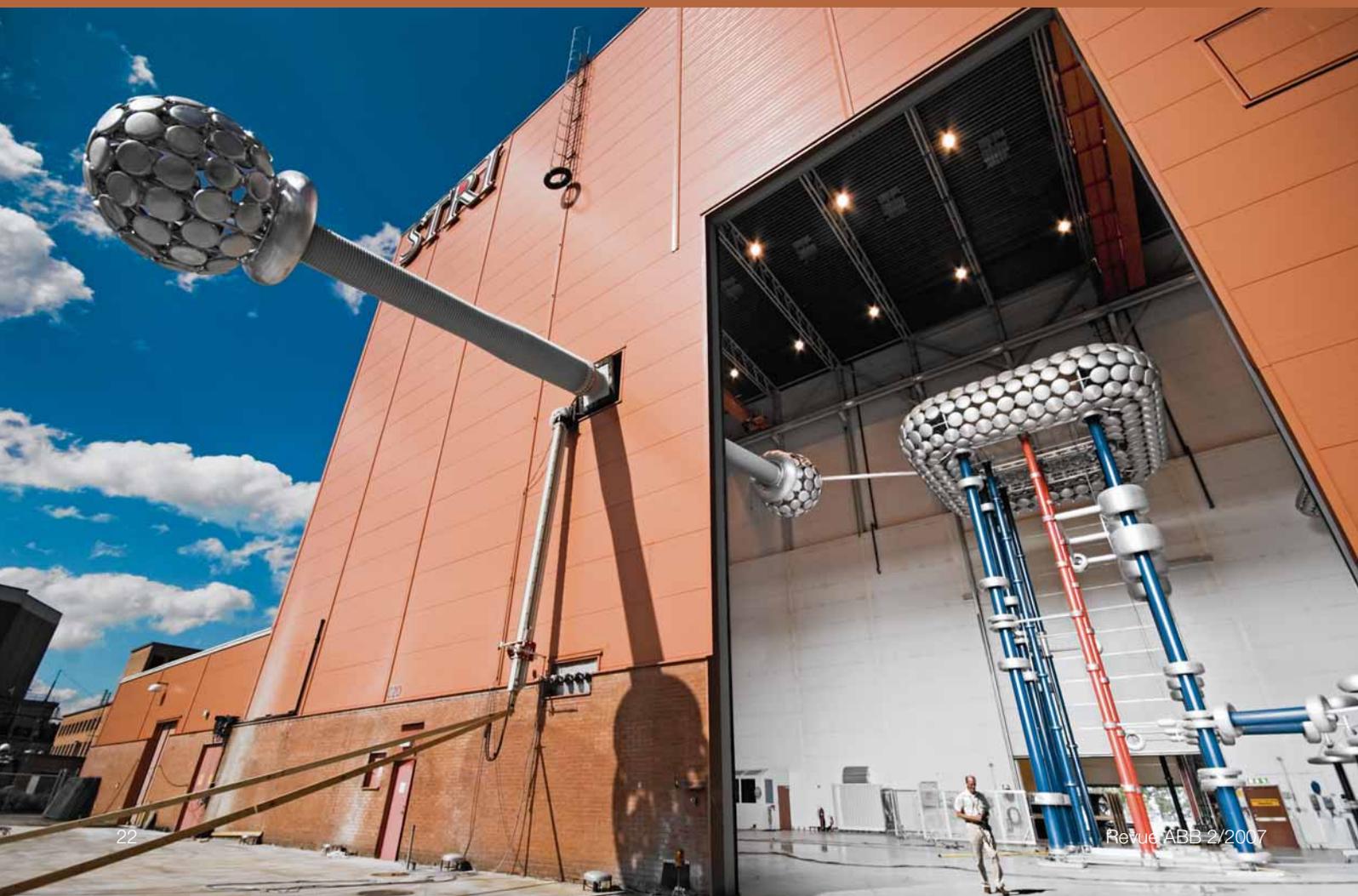
Gunnar Asplund

Le marché mondial de l'énergie connaît deux grandes évolutions: une croissance soutenue de la consommation et une production de plus en plus éloignée des lieux d'utilisation. D'où l'importance grandissante accordée aux modes et techniques de grand transport.

Pour franchir la distance, le pétrole voyage souvent par cargo, le gaz emprunte le gazoduc, tandis que le charbon leur préfère le rail, au prix d'un coûteux renforcement des infrastructures ferroviaires. Pour éviter ces désagréments, n'est-il pas plus économique de produire l'électricité au

voisinage des ressources énergétiques pour ensuite l'acheminer jusqu'au consommateur? De nombreuses sources renouvelables (hydroélectricité, éolien et solaire) obéissant à des contraintes géographiques, il n'y a souvent pas d'autre solution que le transport électrique longue distance.

Ce dernier est donc plus que jamais appelé à jouer un rôle de premier plan. C'est l'occasion pour la *Revue ABB* de faire le point sur les tout derniers progrès accomplis dans ce domaine.



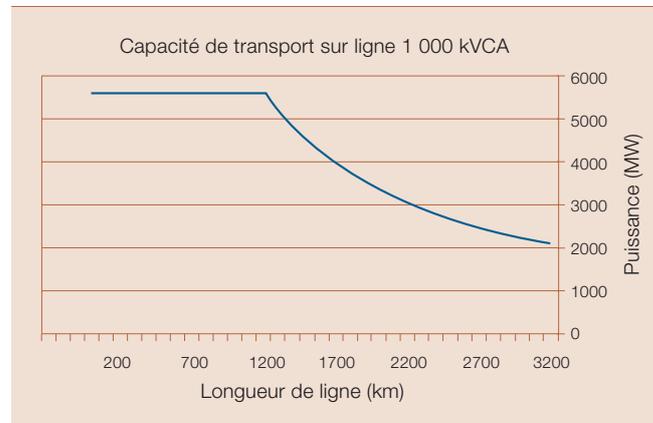
Dès qu'il a fallu transporter l'électricité entre les sites de production et les centres de consommation, le courant alternatif s'est imposé en technologie reine. Son point fort tient à la possibilité d'utiliser des transformateurs pour le porter à des tensions élevées afin de faciliter et de rentabiliser son transport. Les génératrices de courant, tant alternatif que continu, produisent en effet une électricité à des niveaux de tension relativement bas, incompatibles avec le transport longue distance, sous peine d'énormes et coûteuses déperditions d'énergie.

Le courant alternatif offre également une grande souplesse d'interconnexion pour constituer un solide réseau maillé, propre à fiabiliser la desserte électrique. Aux premiers temps de l'électricité, la question de la fiabilité de la fourniture occupait tous les esprits. Puis, à mesure que la production s'est rapprochée de la consommation, le problème du transport massif sur de longues distances perdit de son acuité.

Pour mieux adapter le courant alternatif à ce type de transport, l'usage était d'opter pour la compensation série des lignes. La méthode fait certes merveille lorsque l'électricité voyage d'un point à un autre, mais se prête mal à un réseau maillé où le transit de puissance est moins prévisible.

Le développement des systèmes de transport en courant alternatif (CA) s'est accompagné d'une élévation continue des niveaux de tension. Si une faible consommation peut se contenter d'une basse tension, le doublement de la tension a l'avantage de quadrupler la capacité de transit. Aussi l'évolution des systèmes électriques de la plupart des pays se caractérise-t-elle par une superposition de couches de réseau donnant lieu à une surenchère des niveaux de tension véhiculés.

1 La capacité de transport d'une ligne CA se dégrade avec la distance : ce graphique concerne une ligne de 1000 kV avec une compensation maxi de 70 % et un angle de déphasage de 30°.



Les pays de l'OCDE ont connu une croissance quasi exponentielle de la puissance électrique jusqu'au choc pétrolier de 1973, qui coupa court aux projets de porter la tension à 800, 1000, voire 1200 kV.

L'évolution des systèmes électriques de la plupart des pays se caractérise par une superposition de couches de réseau donnant lieu à une surenchère des niveaux de tension véhiculés.

Il y a 30 ans, la capacité de transit des réseaux électriques correspondait à la demande. La croissance de la consommation a modifié la donne : la production a investi de nouveaux sites (avec, par exemple, des parcs d'éoliennes construits normalement là où le réseau est faible) et l'ouverture du marché électrique à la concurrence a dopé le négoce et les échanges d'énergie sur

de longues distances. Ces contraintes pèsent lourdement sur le réseau de transport.

Dans les pays en développement, la situation est tout autre et s'apparente davantage à celle de l'OCDE des années 50 et 60, exception faite d'un taux de croissance beaucoup plus élevé, surtout en Chine et en Inde. La technologie y a beaucoup progressé au cours des trente dernières années et les solutions adoptées ne suivent pas forcément la voie tracée par l'OCDE.

Dans ces pays, l'alternatif investit les nouveaux réseaux, comme ce fut le cas dans d'autres régions du monde, mais il sert aussi, dans une certaine mesure, au transport de l'électricité produite par des sources éloignées des zones consommatrices.

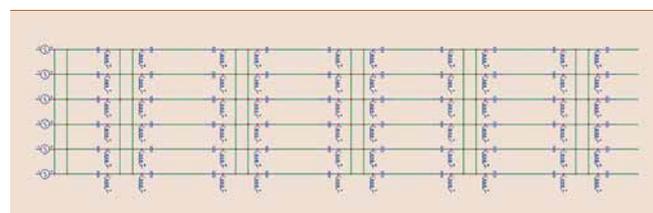
#### Le grand transport en courant alternatif

Une ligne de transport de l'électricité sur de longues distances doit satisfaire à deux impératifs : stabilité et tenue aux défauts (coups de foudre, par exemple). Sa conception obéit à la « règle du  $N-k^1$  », utilisée par la quasi-totalité des électriciens du monde, qui stipule que la perte de puissance maximale, sans compromettre la stabilité du système CA, doit être égale à la puissance de la plus grosse unité de production ou de la ligne ayant la capacité de transit la plus élevée. Si toute la puissance d'un ouvrage de production distant transite sur une seule ligne, le système CA doit résister à cette perte. S'il faut transporter plus d'énergie, plusieurs lignes parallèles doivent être utilisées et interconnectées tous les 300 à 400 km pour fiabiliser le transit.

#### Note

<sup>1</sup> Définit le niveau maximal du risque tolérable, lié à la perte de  $k$  ouvrages, pour le bon fonctionnement du système électrique. En clair,  $N$  représente le nombre d'éléments vitaux du réseau (groupes de production, postes électriques, lignes...) et  $k$  le nombre d'entre eux pouvant être simultanément en défaut sans déstabiliser le réseau.

2 Six lignes CA parallèles sur six tronçons avec compensations série et shunt ; la ligne continue de fonctionner malgré la défaillance de composants.



## Efficacité énergétique et réseaux électriques

Les lignes CA peuvent acheminer beaucoup d'énergie sur de courtes distances, en fonction de la tension et de la capacité thermique des conducteurs. Les lignes plus longues ont une impédance plus élevée qui réduit la capacité de transit. En alternatif, le transfert de puissance active est donné par l'expression :

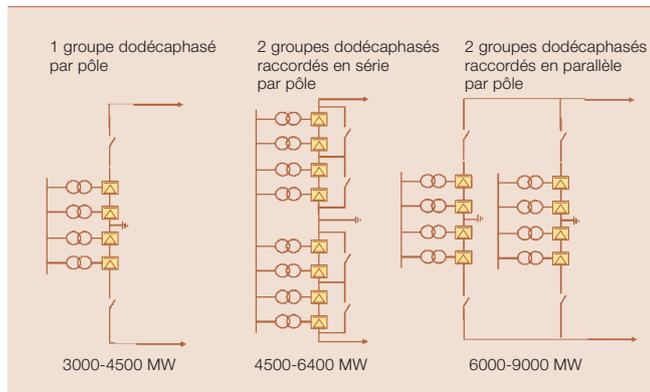
$$P = \frac{U_1 \cdot U_2 \cdot \sin(\delta)}{X}$$

$P$  étant la puissance active,  $U_1$  et  $U_2$  la tension aux extrémités émettrice et réceptrice de la ligne,  $\delta$  l'angle de déphasage entre ces deux extrémités et  $X$ , l'impédance de ligne.

Cette dernière va de pair avec la distance. Pour maintenir la puissance transmise, il faut augmenter  $\delta$ , généralement en deçà de  $30^\circ$ ; au-dessus surviennent des problèmes de stabilité dynamique. La meilleure parade consiste à réduire l'impédance par la compensation série, une solution facilement envisageable, à hauteur d'environ 70%. Au-delà, le système perd de sa robustesse **1**.

Quand une ligne est chargée en-dessous de sa puissance naturelle, il y a production de puissance réactive; sans l'ajout de compensation shunt, la tension peut augmenter démesurément. A l'inverse, une ligne chargée au-dessus de sa puissance naturelle consomme du réactif et fait fortement chuter la tension. Sous l'angle de la

**3** Configurations possibles de convertisseur pour une liaison CCHT 800 kV



fiabilité, il est nécessaire de bâtir une ligne de transport en courant alternatif sous forme de tronçons interconnectés, associant compensations série et shunt **2**, afin de véhiculer à tout moment le maximum de puissance.

### Enjeux techniques

Des liaisons CA à 1000 kV et 1200 kV ont été testées sur plusieurs installations d'essai et même des applications de courte durée<sup>2)</sup>, mais aucune n'est à ce jour en exploitation. Leur construction et la réalisation des équipements nécessaires (transformateurs, disjoncteurs, parafoudres, réactances shunt, condensateurs série, transformateurs de courant et de tension, interrupteurs de coupure et de mise à la terre...) posent plusieurs défis.

Les domaines du contrôle-commande et de la protection ont aussi leurs contraintes particulières. Il faut pou-

voir éliminer les défauts à la terre sur une phase sans ouvrir les disjoncteurs des trois phases. La difficulté tient au fort courant capacitif, engendré par les phases saines, qui s'écoule dans le défaut. On peut y remédier avec des réactances accordées qui minimisent le courant induit.

Les liaisons 800 kV sont pleinement opérationnelles et équipées; le 1000 kV alternatif est encore à l'étude.

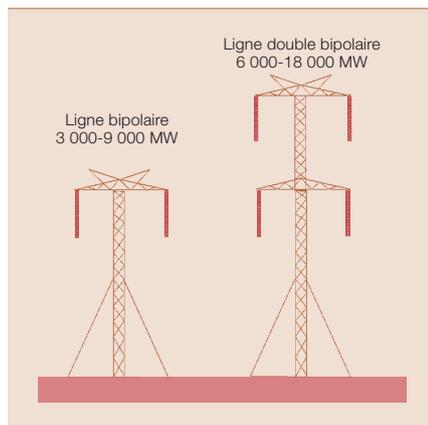
Il y a 30 ans, la capacité de transit des réseaux électriques correspondait à la demande. La croissance de la consommation a modifié la donne.

### Le transport en 800 kV continu

#### Aspects liés au système électrique

Le transport CC consiste à prélever l'énergie électrique en un point du réseau alternatif, à la transformer en continu (dans une station de conversion fonctionnant en redresseur), puis à l'acheminer sur une ligne continue bipolaire avant de repasser en alternatif (dans une station de conversion fonctionnant en onduleur) pour la réinjecter dans le réseau.

**4** Le CCHT 800 kV peut véhiculer jusqu'à 18 000 MW, sur un seul axe de transfert



**5** Avant exploitation commerciale, les équipements d'une liaison CCHT 800 kV doivent se soumettre à une batterie de tests : **a** transformateur, **b** traversée du transformateur et celle du bâtiment des valves (p. 22), testée à Ludvika (Suède).



### Note

<sup>2)</sup> L'ex-Union soviétique a en effet exploité, de 1989 à 1996, une ligne 1200 kV CA reliant la Russie au Kazakhstan.

## Efficacité énergétique et réseaux électriques

D'un point de vue « système », le courant continu est plus simple à transporter sur de longues distances. Les stations de conversion (côtés redresseur et onduleur) peuvent très vite réguler les valeurs de tension/courant et, partant, l'écoulement de puissance. Le déphasage entre extrémités émettrice et réceptrice est insignifiant si la seule liaison est en courant continu. En fait, les réseaux connectés peuvent même fonctionner en asynchrone puisque le courant continu est dépourvu d'angle de déphasage et indépendant de la fréquence.

Les défauts survenant sur les lignes CC ou dans les postes convertisseurs provoquent une augmentation de la fréquence à l'extrémité émettrice du réseau et un abaissement à l'extrémité réceptrice, à moins qu'il existe une capacité de surcharge suffisante dans le pôle restant et des lignes CC parallèles pour gérer l'écart de puissance. La persistance du défaut donne lieu à un plan de protection qui déclenche les générateurs afin de stabiliser la fréquence dans le réseau émetteur. Cela ne pose problème qu'en cas de lignes CA synchrones parallèles – surtout de puissance assignée nettement inférieure à celle des lignes CC –, qui risquent de déclencher lorsque les angles de phase sont trop élevés.

### Configurations

Une liaison courant continu en haute tension (CCHT) à 800 kV peut adopter plusieurs configurations de conversion (3 et 4).

### Difficultés techniques

La plus haute tension transitée à ce jour sur une liaison CCHT est de 600 kV. Datant de plus de 20 ans, la liaison de 6300 MW d'Itaipu, au Brésil, exploite sur 800 km deux bipôles de  $\pm 600$  V exigeant quantité d'équipements : transformateurs, traversées murales du bâtiment des valves, valves à thyristors, parafoudres, diviseurs de tension, condensateurs filtres CC et isolateurs.

### Etat de l'art

ABB a entrepris ces développements depuis plusieurs années, concevant, fabriquant et testant tous les équipements soumis au 800 kV. Des exemples en témoignent ci-après.

### Transformateur

ABB a construit un prototype simplifié de transformateur, avec toutes les caractéristiques d'isolement d'un transformateur de conversion de 800 kV 5a. Les premiers essais effectués sur ce prototype ont donné des résultats concluants :

- Tension de tenue en courant continu : 1250 kV
- Tension de tenue en courant alternatif : 900 kV

### Traversée de transformateur

ABB a réalisé un prototype de traversée de transformateur pour le groupe hexaphasé le plus élevé 5b. Cet équipement a réussi tous les essais de type et individuels, dont les suivants :

- Tension de tenue en courant continu : 1450 kV

- Tension de tenue en courant alternatif : 1050 kV

### Traversée murale

La traversée murale est conçue selon le principe éprouvé des récentes installations à 500 kV. Ses contraintes électriques se sont doublées d'un défi mécanique dû à sa longueur (18 m photo p. 22), ce qui ne l'a pas empêché de réussir tous les essais de type et individuels, tant électriques que

L'ouverture du marché électrique à la concurrence a dopé le négoce et les échanges d'énergie sur de longues distances. Ces contraintes pèsent lourdement sur le réseau de transport.

mécaniques ! Sa tenue aux séismes a également été vérifiée par calculs.

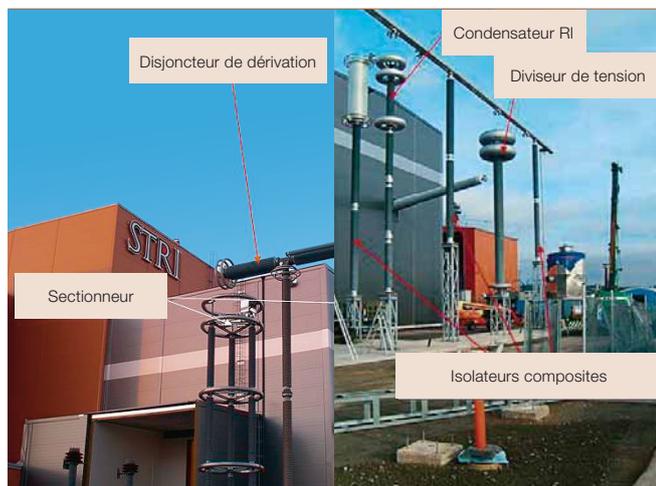
Après réalisation, elle fut installée dans un circuit d'essai sous 800 kV :

- Tension de tenue en courant continu : 1250 kV
- Tension de tenue en courant alternatif : 910 kV

### Essais à long terme

Pour confirmer la faisabilité du projet, une station d'essai à long terme fut construite et mise en service, et tout l'équipement testé sous 855 kV, sur une période minimale de 6 mois 6.

6 Essai de tenue en tension sur circuit de test de 800 kV à STRI (Ludvika)



Encadré 1 Avantages de l'association CA/CC pour maintenir la stabilité du réseau malgré les pertes enregistrées sur les liaisons CC : solution n° 1 illustrée en 11a (liaison CA robuste)

	Nombre de lignes CA parallèles à 500 kV									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nombre de groupes CC perdus	1	oui								
	2	oui								
	3	non	oui							
	4	non	non	non	non	oui	oui	oui	oui	oui
	5	non	non	non	non	non	non	oui	oui	oui
	6	non								
	7	non								
	8	non								

## Efficacité énergétique et réseaux électriques

### Conception de la station

Pour une liaison CCHT 800 kV d'une puissance de 6000 MW, la station doit être conçue pour que la défaillance d'un seul élément vital du réseau n'entraîne la perte que d'une fraction de la puissance. 7 8 illustrent une station de 4 blocs, configurable en :

- 1) deux pôles constitués chacun de deux groupes raccordés en série ;
- 2) deux pôles constitués chacun de deux groupes raccordés en parallèle.

### Essais transformés

Tous ces développements ont débouché sur une exploitation commerciale du CCHT 800 kV.

### Continu ou alternatif ?

#### Coût

Voyons à présent le comparatif économique 10 du transport de 12000 MW sur 2000 km, en alternatif et en conti-

nu : il ressort que le CCHT 800 kV est globalement moins onéreux, l'optimum étant atteint là où les pertes en ligne sont les plus faibles.

#### Avantages et inconvénients du courant alternatif

Principal atout de l'alternatif : la flexibilité de raccordement des charges et de la production sur le trajet électrique. Cet avantage est particulièrement important si le couloir de transport passe par une zone à forte densité de population et si des ouvrages de production jalonnent le parcours. Par contre, l'alternatif pêche par son coût : le système décrit plus haut revient très cher puisque, dans la réalité, il oblige à construire une infrastructure tout électrique de bout en bout.

Autre écueil : l'emprise au sol. Sachant que le transport CA ne peut pas pleinement utiliser la capacité thermique de chaque ligne lorsque celle-ci est

très longue, il faut installer une ligne en parallèle.

Principal atout de l'alternatif : la flexibilité de raccordement des charges et de la production sur le trajet électrique. Cet avantage est particulièrement important si le couloir de transport passe par une zone à forte densité de population et si des ouvrages de production jalonnent le parcours.

#### Avantages et inconvénients du courant continu

Le premier avantage du CCHT réside dans son faible coût de transport de puissances très élevées sur de longues distances, avec des pertes minimales (de l'ordre de 5% pour 2000 km). Sans compter qu'il nécessite moins de lignes et une plus faible emprise au sol : le transfert de 12000 MW peut se contenter de 2 lignes CCHT à 800 kV, quand l'alternatif en demanderait 8 !

Le principal inconvénient du CCHT est le transit de puissance d'un point à un autre et le coût élevé de la construction de stations de raccordement (même si cela est envisageable et déjà réalisé).

#### Le mariage de l'alternatif et du continu

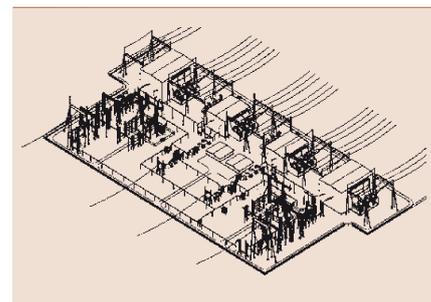
Malgré tout, l'association d'un transport massif d'énergie sur liaison CCHT économique et, en parallèle, d'un réseau alternatif de plus basse tension



7 Station de conversion CCHT constituée de 4 blocs ; la configuration choisie minimise les effets des défaillances de chaque composant.

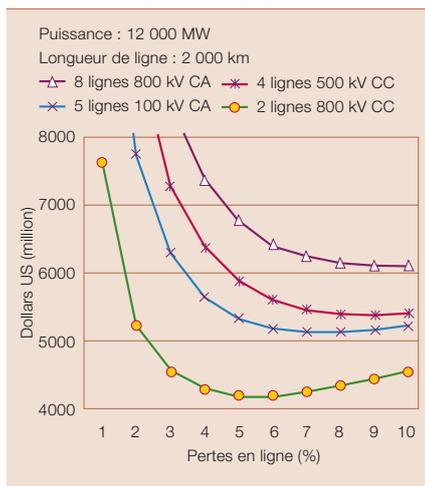
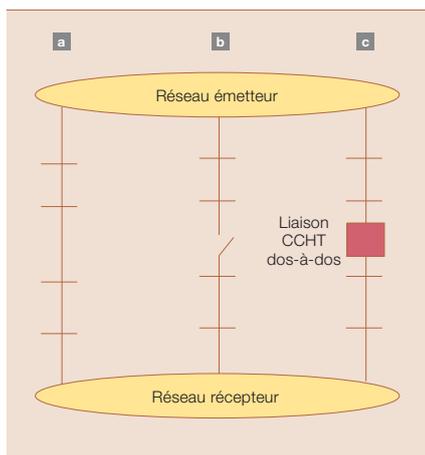


8 Station de conversion CCHT comprenant deux pôles constitués chacun de deux groupes en série.



9 Vue artistique de la station **B**

## 10 Coût des postes, lignes et pertes en fonction des pertes en ligne

11 Trois façons de conjuguer CA et CC pour coupler deux réseaux : **a** = une liaison CA robuste en renfort du CC ; **b** = deux réseaux CA séparés ; **c** = une liaison CCHT dos-à-dos.

pourrait, dans bien des cas, offrir une solution optimale combinant faible coût et haute flexibilité, ainsi que la possibilité d'alimenter le consommateur tout au long du trajet.

Toutefois, cela ne va pas sans poser quelques problèmes techniques : les perturbations dans le transport CC feront bien souvent disjoncter la liaison CA à mesure que les angles de phase augmentent. Il existe heureusement plusieurs façons d'y remédier **11**.

## Solution n° 1

Elle s'appuie sur une liaison CA particulièrement robuste **11a**, capable de tenir à la plupart des perturbations de la liaison CC sans déclencher.

Admettons, par exemple, que le CCHT achemine 12 000 MW sur 2 000 km, dans 2 bipôles constitués chacun de 4 groupes de conversion, et qu'il peut accepter une surcharge temporaire de 50% en cas de déclenchement d'un ou de plusieurs groupes. Supposons maintenant qu'un réseau CA parallèle de lignes à 500 kV est tenu d'absorber la puissance que le CCHT n'a pas pu transporter. Les résultats sont donnés dans l'**encadré 1**.

On y voit que le système conserve sa stabilité dynamique après la perte de plusieurs groupes CC dont la puissance unitaire s'élève à 1500 MW. Ce résultat dépend de la charge avant défaut des lignes CA (jusqu'à 34%, dans le cas présent).

## Solution n° 2

Elle autorise le fonctionnement asynchrone de deux réseaux CA **11b** se chargeant chacun de la moitié de la desserte électrique. En l'occurrence, les deux systèmes étant asynchrones, il n'y a aucun problème de stabilité.

## Solution n° 3

Elle est identique à la solution précédente mais elle utilise une liaison CCHT dos-à-dos **11c** pour accroître la flexibilité de la fourniture sans avoir à synchroniser les deux systèmes. Il s'agit de préférence d'un convertisseur à source de tension (*HVDC Light*<sup>®</sup>) qui stabilise les valeurs de tension et augmente le transfert de puissance des lignes CA.

## Conclusions

Le CCHT 800 kV est normalement la solution la plus économique pour transporter beaucoup d'énergie sur des distances dépassant 500 à 1000 km. Son défaut majeur tient au coût élevé du raccordement de puissance sur le trajet électrique. Une solution mêlant courant continu en haute tension pour fournir le gros de la puissance et courant alternatif pour alimenter le transport remporte la palme de l'économie et de la flexibilité. Le 1000 kV CA garde néanmoins l'avantage lorsqu'il s'agit de se superposer aux liaisons CA 400 ou 500 kV existantes, dans des zones fortement peuplées.

## Gunnar Asplund

ABB Power Technologies, Power Systems DC  
Ludvika (Suède)  
gunnar.asplund@se.abb.com

# Problèmes de congestion ? Venons en aux FACTS !

Les systèmes flexibles à courant alternatif renforcent la capacité des grands réseaux de transport

Rolf Grünbaum, Peter Lundberg, Göran Strömberg, Bertil Berggren



Du simple commutateur éclairant nos foyers à la lourde « machine industrielle » capable d'assouvir notre appétit de biens et de services, la fiabilité et la continuité de la fourniture d'électricité sont désormais perçues comme argent comptant. Sauf par ABB ! Le Groupe ne ménage pas ses efforts pour développer quantité de produits et de technologies destinés à conforter et à améliorer l'intégrité et la continuité de la desserte électrique.

Le réseau électrique doit aujourd'hui se plier à moult contraintes et aléas. Le cheminement de l'électricité, des sites de production à l'agglomération la plus proche, suit des schémas de plus en plus complexes. La croissance de la consommation et du négoce d'électricité allonge les distances. Facteur aggravant, le recours grandissant aux énergies renouvelables pèse lourd sur le système puisque la production est souvent éloignée des

lieux d'utilisation, là où le réseau électrique accuse des signes de faiblesse. La construction de grands axes de transfert d'énergie n'est pas toujours la meilleure solution, face au durcissement des contextes environnementaux, administratifs (aménagement du territoire, obtention des permis) et financiers. Il est donc préférable de mieux exploiter l'infrastructure existante sans en dégrader la fiabilité... à grand renfort de technologies ABB !

La notion de «congestion» du transport électrique oppose deux critères ambivalents : d'un côté, la limitation des quantités d'énergie transportable, de l'autre, l'ambition de faire transiter davantage de puissance sur un même couloir de passage. Cette dernière s'appuie souvent sur un facteur indissociable de la récente ouverture des marchés : les écarts de coûts de production de part et d'autre d'une interconnexion. En clair, le consommateur a tout intérêt à se fournir chez le voisin si l'électricité produite y est moins chère! Encore faut-il que l'infrastructure en place soit à la hauteur de ces échanges transfrontaliers.

Renforcer le système électrique en dopant sa puissance de transfert (notamment par l'ajout de lignes aériennes) a toujours été le premier remède au manque de capacité de transport. Or cette démarche, toujours réalisable, complique de plus en plus la tâche des transporteurs d'électricité, souvent en butte à la vindicte publique; l'obtention des permis de construire, droits de passage ou autorisations d'extension des couloirs d'énergie tient désormais du parcours du combattant.

Pour différer ou éviter ces investissements, il est possible d'utiliser au mieux l'existant en lui conférant plus de souplesse d'exploitation, de disponibilité et de commande : c'est le rôle des dispositifs FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*), éventuellement secondés par des systèmes évolués de collecte de l'information. Pourtant, même si cette technologie fait l'unanimité, sa mise en œuvre pose un certain nombre de défis.

### FACTS et décongestion

Si plusieurs solutions sont envisageables pour supprimer les congestions, selon la nature des contraintes physiques, l'environnement d'exploitation dans lequel elles interviennent est commun à toutes les situations; les stratégies de commande correspondantes peuvent donc, dans une certaine mesure, être génériques.

Dans une configuration type, les actions correctives des FACTS pour contrer ces problèmes sont illustrées en 1.

### Traitement des défauts: mode d'emploi

Le système de conduite d'un réseau électrique passe 99% du temps à minimiser les pertes et à réguler l'écoulement de puissance au regard des réseaux voisins. Après un incident, il a pour mission de contrôler les limites physiques du réseau, puis, le défaut éliminé, de gérer les phénomènes transitoires (stabilité dès la première oscillation, amortissement des oscillations de puissance, stabilité et rétablissement de la tension, réglage de la fréquence), dans un temps de réaction ad hoc.

Renforcer le système électrique en dopant sa puissance de transfert (notamment par l'ajout de lignes aériennes) a toujours été le premier remède au manque de capacité de transport. Or cette démarche, toujours réalisable, complique de plus en plus la tâche des transporteurs d'électricité, souvent en butte à la vindicte publique.

Les 10 à 20 secondes qui suivent ce régime transitoire débouchent sur une période de post-défaut 1 durant laquelle la conduite est confrontée à des phénomènes plus lents: limites thermiques, soutien de la tension (pour éviter un lent écroulement de la tension) et soutien de la fréquence.

20 à 30 minutes plus tard, l'opérateur doit avoir pris toute la mesure de la situation et engagé les actions indispensables pour sécuriser le système et lui permettre d'encaisser des défaillances d'équipements sans sombrer dans la panne généralisée.

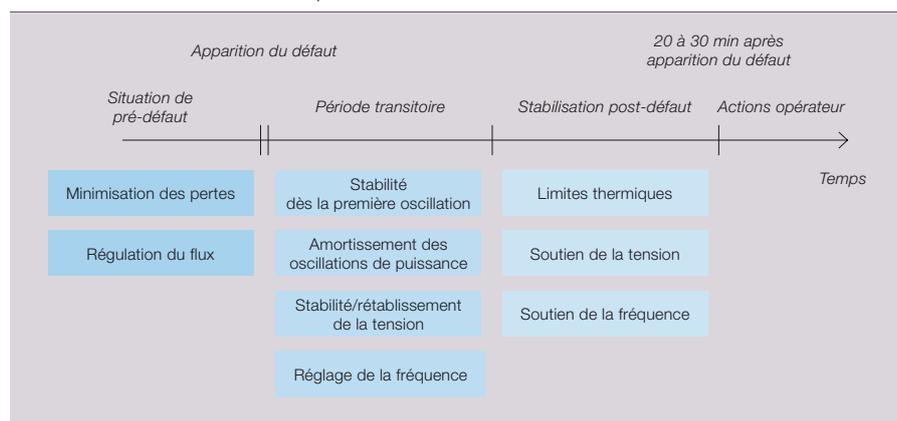
Les mesures correctives relevant des FACTS constituent donc une stratégie de commande générale fournissant les moyens d'une exploitation efficace, en amont de la perturbation, tout en préservant la sécurité et la robustesse du système. Ce qui revient à donner à l'exploitant du réseau le plus de temps possible pour réagir à des incidents graves.

Les dispositifs FACTS ont deux grandes façons de remplir ces objectifs : la compensation parallèle (shunt) et la compensation série.

### Compensation parallèle: SVC et STATCOM

Les compensateurs statiques d'énergie réactive ou «SVC» (de l'anglais *Static Var Compensators*), et les compensateurs statiques synchrones «STATCOM» sont connectés en parallèle, en des points sensibles du réseau de transport. Les deux dispositifs, à base d'électronique de puissance, règlent en dynamique la production ou la consommation de puissance réactive. L'échange de réactif avec le réseau permet de contrôler la tension du système. Outre ce soutien dynamique de la tension, à court ou long terme, ces compensateurs parallèles sont capables d'amortir les oscillations de puissance en régime transitoire [1].

1 Chronologie et priorité des objectifs de conduite permettant de maîtriser les perturbations du réseau et d'éviter les interruptions de fourniture.



## Efficacité énergétique et réseaux électriques

Les principales caractéristiques de ces grands classiques de la technologie FACTS sont étudiées en [2].

STATCOM [2] est un convertisseur à source de tension. La version ABB et son appellation *SVC Light*<sup>®</sup> utilisent des transistors bipolaires à grille isolée (IGBT). Très performant, ce dispositif se caractérise par :

- un soutien robuste de la tension en présence de fortes perturbations ;
- l'équilibrage des charges asymétriques et fluctuantes ;
- l'amortissement des oscillations de puissance ;
- le filtrage actif des harmoniques de courant.

SVC Light<sup>®</sup> est décrit en [3] et [4] pour certaines applications exigeant de hauts niveaux de performance.

Le système de conduite d'un réseau électrique passe 99 % du temps à minimiser les pertes et à réguler l'écoulement de puissance au regard des réseaux voisins.

### STATCOM + stockage d'énergie

La compensation SVC Light peut s'enrichir d'une fonction de stockage d'énergie à l'aide de batteries en série [3] [5]. Le dimensionnement de la solution dépend de l'optimisation du rapport performance/coût. Le temps de décharge (soit la durée de fonctionnement à pleine puissance active) est de l'ordre de 15 à 30 minutes, dans le cas de base. Ce stockage d'énergie permet à STATCOM de fournir et d'absorber aussi de la puissance active sur une période donnée.

Ce convertisseur à source de tension utilise des IGBT raccordés en série pour conjuguer performance et puissance. La charge de la batterie doit être contrôlée tout au long du cycle complet de la charge. Application type : une source d'énergie renouvelable comme un parc éolien dont la production est par nature aléatoire. La fonction d'équilibrage de la charge avec stockage d'énergie fournit de la puissance active à un niveau de puissance

- 2 Les compensateurs statiques synchrones STATCOM régulent la tension en produisant ou en consommant de la puissance réactive.



prédéfini et consomme/injecte du réactif dans les limites de fonctionnement, suivant la consigne du dispatching.

Ainsi, l'association d'une énergie renouvelable et d'un STATCOM à stockage d'énergie permet d'exploiter cette source intermittente de la même façon qu'un groupe classique<sup>1)</sup>.

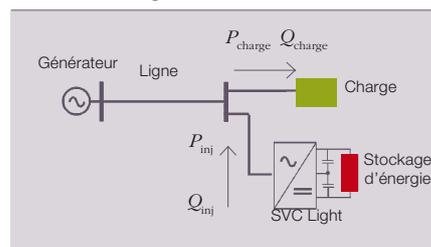
Autre avantage de l'électronique de puissance : ses dispositifs peuvent être utilisés en mode d'urgence pour redémarrer le réseau après défaut ou le reconstituer par des réglages de fréquence et de tension. Grâce à sa capacité de dosage des puissances active et réactive, STATCOM améliore considérablement l'amortissement des oscillations de puissance, ce qui se traduit par une augmentation des transits d'énergie et une diminution des risques de congestion.

En principe, le stockage d'énergie est en mesure de modifier l'instant d'apparition d'un flux de puissance donné sur une connexion en situation de congestion (si la solution est installée sur le côté récepteur du couloir de transfert). L'énergie est stockée en l'absence de congestion et restituée en présence de congestion. Certes, à l'échelle d'un réseau maillé, l'opéra-

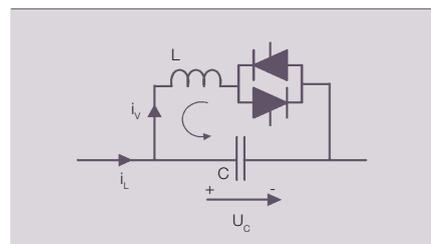
#### Note

<sup>1)</sup> En raison du caractère fluctuant de leur production, les sources d'énergie, comme l'éolien, ont normalement recours à une réserve tournante de centrales classiques ; le stockage d'énergie permet de s'en passer ou d'affecter ces ressources à d'autres fins.

- 3 Principe du stockage dynamique d'énergie avec SVC Light



- 4 Schéma de base du TCSC



- 5 Des TCSC pour amortir les oscillations de puissance



tion demande une énorme capacité mais, au niveau du consommateur particulier, elle peut s'avérer économiquement viable, notamment quand il faut résoudre des problèmes de qualité de la fourniture.

Le couplage du STATCOM et du stockage d'énergie trouve aussi son emploi dans la constitution d'une réserve active commandée en fréquence, surtout si cette solution intervient sur le côté récepteur d'une interconnexion fréquemment saturée. Une installation de ce type pourrait en outre réconcilier capacité de transit et demande d'énergie.

#### Compensation série à base de thyristors

D'autres FACTS peuvent aussi agir sur les transits de puissance active, même sans stockage d'énergie. C'est le cas des compensateurs série.

La compensation série contrôlée par thyristors ou «TCSC» (*Thyristor Controlled Series Compensation*) [4] [5] est souvent utilisée au niveau des goulets d'étranglement où le transfert d'énergie est limité par le faible amortissement des oscillations de puissance. Cette technologie a surtout fait ses preuves lorsque la fragilisation du réseau de transport tend à scinder le système en deux grands groupes de générateurs. La solution met traditionnellement en œuvre une compensation série fixe avec une section plus petite contrôlée par thyristors, laquelle est commandée de façon à amortir activement les oscillations de puissance. Cette adaptation plus précise de l'amortissement aux conditions de la ligne permet d'accroître le transfert de puissance [6].

La compensation TCSC repose sur le principe du thyristor polarisé en direct et amorcé juste avant le passage par zéro de la tension au niveau du condensateur, ce qui injecte un courant supplémentaire dans ce dernier et augmente la réactance apparente (en général, jusqu'à trois fois la réactance originale): c'est cette amplification qui atténue les oscillations de puissance. Contrairement au condensateur série fixe, le TCSC devient inductif dans la bande de fréquences inférieure à sa fréquence fondamentale, éliminant ainsi la résonance hyposynchrone qu'engendre, dans certaines circonstances défavorables, la compensation série raccor-

dée à l'ensemble turbine-alternateur de groupes de production voisins.

Ces derniers temps et, a fortiori, depuis les récentes pannes généralisées, la régulation du flux de puissance active en régime établi suscite l'intérêt croissant des transporteurs d'énergie. Pour autant, même si un TCSC à haute amplification a cette capacité, il vaut souvent mieux subdiviser la branche du condensateur en une suite de condensateurs série commutés par thyristor ou «TSSC» (à droite de [6]).

Dans ce cas, on en vient naturellement à comparer le TSSC à un transformateur déphaseur. C'est oublier que ce dernier est certes apte à gérer les limites thermiques mais est trop lent pour gommer les phénomènes survenant dans la période transitoire. Qui plus est, à plus ou moins longue échéance, il participe à la dégradation du profil de tension et, dans certains cas, de la stabilité angulaire.

Par contre, le TSSC est assez rapide pour atténuer efficacement les phénomènes transitoires et peut soutenir la tension, à court et long termes. Pour autant, là où le transformateur déphaseur est capable à la fois d'augmenter et de diminuer le flux de puissance sur son trajet, le TSSC ne peut que l'augmenter. De surcroît, la réactance d'un TSSC doit empiriquement se limiter à environ 60% de la réactance entre les deux postes situés de chaque côté de la compensation. Par conséquent, si le contrôle des flux de puissance recherché est important (selon

la topologie du réseau), la solution TSSC n'est pas forcément la panacée.

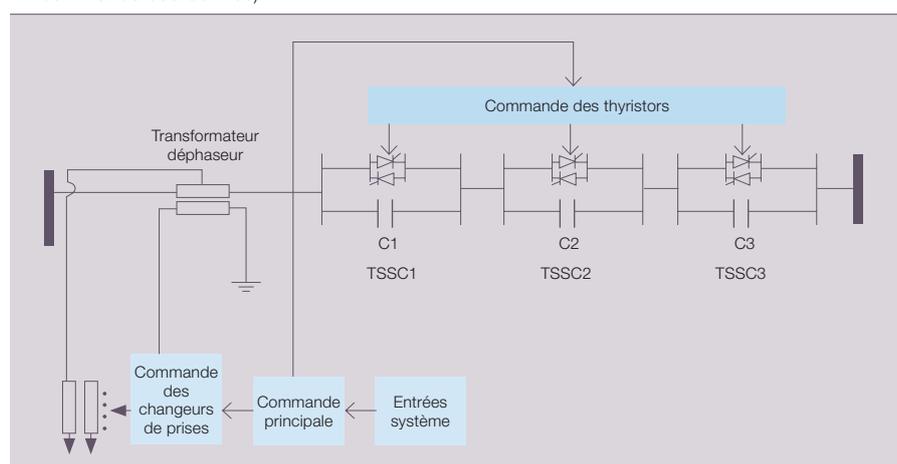
#### Dynaflow

Pour atténuer le risque de congestion dans les zones où l'association de diverses stratégies de commande pose problème, ABB propose sa solution *Dynaflow* de maîtrise des flux de puissance, à base de transformateur déphaseur couplé en série avec un TSSC multi-niveau à commande coordonnée [6].

### Des mécanismes clairs et transparents de partage des responsabilités entre gestionnaires du transport électrique contribueront à la réussite des actions correctives.

Le réglage du transit de puissance se répartit entre le transformateur déphaseur et le TSSC, tous deux plus petits. *Dynaflow* conjugue les qualités des deux appareils en assurant la double fonction de minimisation des pertes et de réglage des flux de puissance en situation de pré-défaut. Il améliore ainsi la stabilité dès la première oscillation, l'amortissement des oscillations de puissance et/ou les performances de la tension en régime transitoire; il en va de même du support des niveaux de tension et/ou des limitations thermiques en stabilisation post-défaut. Le système de conduite et les signaux d'entrée nécessaires au

[6] Schéma de *Dynaflow* (transformateur déphaseur couplé en série avec un TSSC multi-niveau à commande coordonnée)



contrôle-commande sont adaptés au goulet d'étranglement concerné. L'intégration de systèmes de mesure et de communication ajoute à la performance de l'ensemble.

Un exemple d'application type de Dynaflow est l'alimentation des grandes agglomérations; ces zones à forte densité de population se caractérisent souvent par une importante consommation de puissances active et réactive, alors même que leurs sources de production sont éloignées. Il en résulte des lignes de transport et de distribution fortement chargées, et un déficit de sources de puissance réactive dynamique.

Exemple de défaillance grave: un défaut de ligne suivi d'une déconnexion permanente de la ligne en défaut, entraînant une inégale répartition de l'écoulement de puissance dans les circuits restants. Le Dynaflow installé sur ce trajet absorbe alors davantage de charge pour éviter de saturer les lignes parallèles, selon la stratégie suivante:

- En période de pré-défaut, l'objectif principal est de minimiser les pertes actives du système. La consigne de puissance, éventuellement déduite d'un calcul de flux optimal, est normalement obtenue du centre de conduite.
- Immédiatement après l'apparition du défaut, la totalité des étages capacitifs est commutée pour soutenir le rétablissement de la tension. Cette action est d'autant plus importante que les villes comportent de fortes charges perturbatrices, comme les moteurs de climatiseurs; sans soutien de la tension, le rotor de ces moteurs aurait tendance à bloquer et à trop soutirer de puissance réactive, induisant un affaissement local de la tension et des coupures en cascade.
- Après récupération de la tension, la conduite s'attaque aux limites thermiques. En associant transformateur déphaseur et TSSC, le flux d'énergie est maîtrisé pour éviter la surcharge du parcours équipé de Dynaflow ou des lignes parallèles. De plus, si les événements déclencheurs sont graves au point qu'il est impossible de supprimer la surcharge, les flux de puissance peuvent être répartis afin de donner à l'opérateur le maximum de temps pour réagir. Ce qui revient à distribuer également cette surchar-

ge entre circuits parallèles.

#### Les protections système à large couverture

Un modèle de conduite capable de régler dynamiquement les flux de puissance en tenant aussi compte des circuits parallèles exige d'ordinaire des mesures. Les récents progrès de la surveillance des grands réseaux interconnectés par mesures de phaseurs synchronisées (WAMS) et des télécoms, sans oublier les FACTS, ouvrent de nouveaux horizons aux systèmes de conduite à grande échelle ou «WACS» (*Wide Area Control Systems*). Par ailleurs, l'installation de plusieurs éléments dynamiques de contrôle des flux de puissance, sur des lignes parallèles, ne va pas sans coordination des actions de conduite.

Pour décongestionner les zones où l'association de diverses stratégies de commande pose problème, ABB propose sa solution *Dynaflow* de maîtrise des flux de puissance.

#### Pour mémoire

Les systèmes commandables que sont les FACTS ont bien évidemment leurs limites, lesquelles dicteront les futurs niveaux de puissance transitant sur une interconnexion. Sous l'angle de la planification de l'exploitation, il importera de disposer d'outils efficaces d'évaluation de la sécurité permettant de tirer pleinement parti des dispositifs installés.

Pour des raisons historiques, les goulets d'étranglement apparaissent souvent à l'interface des réseaux maillés. Il va de soi que des mécanismes clairs et transparents de partage des responsabilités entre gestionnaires du transport électrique contribueront à la réussite de ces actions correctives.

#### Conclusions

Les FACTS offrent toute une panoplie de dispositifs commandables, capables d'atténuer les congestions et d'améliorer la capacité du réseau existant. Le type de dispositif répondant à chaque situation est lié à la nature du goulet d'étranglement. Parmi les solutions en

lice, cet article a fait le choix du STATCOM à stockage d'énergie, des compensateurs série TCSC et du Dynaflow.

Dans bien des cas, leurs actions correctives devront bénéficier de la mise en œuvre de systèmes d'information et de conduite perfectionnés, parfaitement adaptés au goulet d'étranglement à résorber.

Il faut que la planification opérationnelle du grand transport s'accompagne d'outils performants d'évaluation de la sécurité permettant de tirer le plein potentiel des installations. Cette obligation vaut d'autant plus pour le traitement des congestions à l'interconnexion des différents systèmes électriques.

**Rolf Grünbaum**

**Peter Lundberg**

**Göran Strömberg**

ABB Power Technologies

Västerås (Suède)

rolf.grunbaum@se.abb.com

peter.lundberg@se.abb.com

goran.stromberg@se.abb.com

**Bertil Berggren**

ABB Corporate Research

Västerås (Suède)

bertil.berggren@se.abb.com

#### Bibliographie

- [1] **Mathur, R. M., Varma, R. K.**, *Thyristor-based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems*, IEEE Press, 2002. ISBN 0-471-20643-1
- [2] **Hingorani, N.G., Gyugyi, L.**, *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, IEEE Press, 1999. ISBN 0-7803-3455-8
- [3] **Larsson, T., Ratering-Schnitzler, B.**, *SVC-Light: A utility's aid to restructuring its grid*, IEEE PES Winter Meeting, Singapore, January 2000.
- [4] **Grünbaum, R., et al.**, *FACTS: Powerful means for dynamic load balancing and voltage support of AC traction feeders*, IEEE Power Tech, Porto, Portugal, September 10-13, 2001.
- [5] **Svensson, J., Jones, P., Halvarsson, P.**, *Improved Power System Stability and Reliability using Innovative Energy Storage Technologies*, In Proc. IEE ACDC 2006, London, U.K., p. 220-224.
- [6] **Gama, C., Angquist, L., Ingstrom, G., Noroozian, M.**, *Commissioning and operative experience of TCSC for damping power oscillations in the Brazilian North-South Interconnection*, in proc. CIGRE Session 2000, Paris, France, 2000, p. 14-104.

# Souffler n'est pas jouer

L'éolien dicte ses règles à la fourniture électrique

Jochen Kreusel



Le réchauffement climatique imputable aux activités humaines et la perspective d'épuisement des combustibles fossiles recomposent le paysage énergétique. Les sources alternatives telles que l'éolien conquièrent rapidement le marché. En somme, pour reprendre une formule éculée, un «vent nouveau souffle» sur la filière. Mais pour combien de temps? Car quand Eole s'arrête, la fée électricité s'essouffle! Et les consommateurs acceptent rarement d'être privés d'électricité au moindre caprice de la météo ; il faut donc une capacité productive de réserve pour compenser sans délai ces fluctuations.

Mais ce n'est pas le seul enjeu. Les centrales thermiques ont souvent été construites sur des sites facilitant l'acheminement de l'électricité vers les lieux de consommation, autant dire à proximité des grandes agglomérations. Les ressources éoliennes, en revanche, doivent être implantées dans des zones ventées : c'est donc au transport de s'adapter à la production, et non l'inverse.

Le système électrique du futur doit pouvoir concilier d'un côté, une production impossible à planifier et, de l'autre, une desserte de très grande qualité.

## Efficacité énergétique et réseaux électriques

L'approvisionnement électrique des pays industrialisés peut se targuer d'être à la fois disponible à tout moment, quasiment partout et de qualité. Ces points forts découlent de l'organisation même du système électrique qui se voulait, dès le début du XX<sup>e</sup> siècle, au service du consommateur. Les ouvrages étaient donc souvent planifiés et construits à la périphérie des centres de consommation (même si la fourniture électrique était à l'origine principalement décentralisée et locale); encore aujourd'hui, l'exploitation et la conduite des centrales thermiques, majoritaires dans la plupart des pays, se plient aux exigences de la consommation.

Le stockage de l'énergie, qui vise à compenser les irrégularités de la consommation, s'effectue avant tout côté énergie primaire, où sa mise en place est habituellement gage d'efficacité économique (constitution de réserves, notamment). Néanmoins, ce principe fondamental a été de plus en plus battu en brèche ces 15 dernières années. A cela deux grandes raisons :

- 1) La libéralisation du marché de l'énergie (amorcée dans de nombreuses régions du monde à l'aube des années 90) a sonné le glas de la production locale ; or à quoi bon introduire des mécanismes de concurrence sans avoir la possibilité de se fournir auprès de différentes centrales ?
- 2) Face à la menace de réchauffement climatique et de pénurie des combustibles fossiles, les énergies renouvelables (EnR) connaissent un retour en grâce : l'hydroélectricité, première EnR mondiale dont l'exploitation remonte aux origines de la filière électrique, est aujourd'hui suivie par l'éolien.

## Dans le monde entier, l'éolien est en plein essor depuis 15 ans.

Vent et soleil ont presque toutes les vertus des sources d'énergie durables : propres et infinies, elles bénéficient d'un important potentiel de développement, envié par toutes les autres productions renouvelables. Seule ombre au tableau : elles impliquent une rupture avec l'organisation traditionnelle d'une exploitation tirée par la consommation. Sachant que ni l'éolien, ni le solaire ne peuvent être stockés côté primaire, les systèmes électriques du futur doivent faire preuve d'une flexibilité bien supérieure à celle d'aujourd'hui pour arbitrer entre une production imprévisible et aléatoire, et une consommation toujours avide de qualité et de fiabilité.

### La filière électrique à l'heure du changement

Deux grandes tendances président à cette mutation depuis le début de la décennie 90. Au premier chef, l'ouverture à la concurrence mondiale avec,

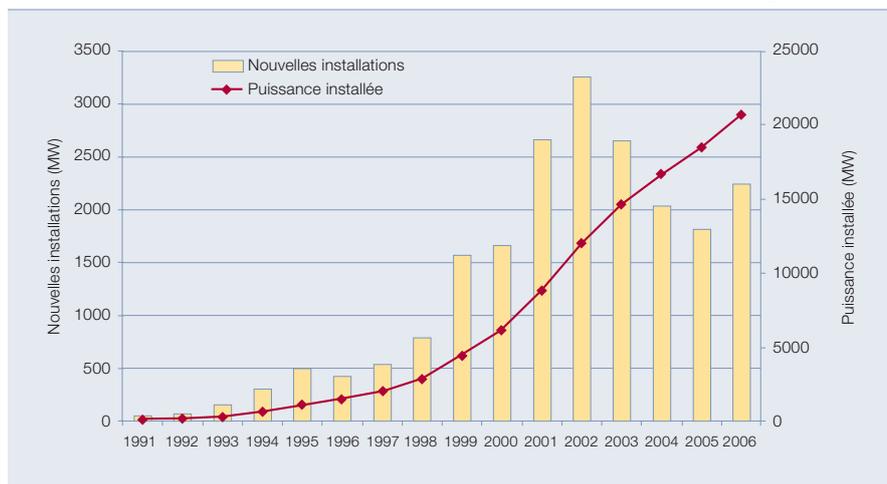
pour corollaire, une redistribution des rôles entre les acteurs du système électrique : d'un côté, la production et le commerce de gros, de l'autre, le transport/acheminement et l'exploitation. Conséquence : la planification de nouvelles centrales est décorrélée des projets d'extension du réseau. De surcroît, les gestionnaires doivent tenir compte des contraintes des générateurs pour garantir l'engagement optimal des blocs de production et la répartition de la charge. Aussi n'ont-ils de pouvoir décisionnel que lorsque la disponibilité du système est compromise. Au final, ils n'ont que très peu d'informations sur les centrales de producteurs indépendants.

Autres orientations décisives : accroître l'efficacité énergétique et réduire l'utilisation des énergies primaires non renouvelables. A cet égard, la production décentralisée associée à la cogénération (chaleur-électricité) et les énergies renouvelables jouent un rôle déterminant dans l'approvisionnement électrique et participeront sans conteste à une couverture durable et sûre de la demande mondiale. Ces politiques énergétiques sont fortement encouragées dans de nombreux pays.

Dans le monde entier, l'éolien est en plein essor depuis 15 ans<sup>1)</sup>. Les gisements sont considérables (du moins sur le littoral) et ses coûts de production sont désormais plus concurrentiels que ceux des autres EnR. Naguère bridé en raison de son efficacité économique insuffisante, l'éolien connaît aujourd'hui une nette expansion dans bien des pays, avec une capacité installée mondiale dépassant 74 000 MW fin 2006. L'Allemagne, à elle seule, connaît la plus forte croissance à ce jour avec plus de 20 000 MW installés **■** (et un pic de consommation de près de 77 000 MW à l'hiver 2005/2006). Elle a ainsi fourni 30,5 TWh d'électricité en 2006, soit 5,1 % du total mondial.

Ces deux tendances ont une caractéristique en commun : outre les fluctua-

**1** Le développement massif de l'éolien allemand (source : Bundesverband Windenergie e. V.)



#### Note

<sup>1)</sup> Cf. « Un vent d'énergie souffle sur l'océan » p. 69

tions de la charge, les gestionnaires de réseau doivent de plus en plus prendre en compte d'autres phénomènes impossibles à planifier.

### Les conséquences d'une forte capacité de production imprévisible

L'énergie éolienne se caractérise par des contraintes de localisation – les régions venteuses sont souvent éloignées des grandes zones de consommation – et sa volatilité.

## L'hydroélectricité, première EnR mondiale, est aujourd'hui suivie par l'éolien.

Le choix d'une bonne implantation pour la production de tout type d'EnR est dicté par la disponibilité de la fourniture d'énergie primaire, en particulier si les coûts d'exploitation du réseau sont indépendants du site. En Allemagne, les éoliennes se concentrent au nord du pays <sup>2</sup>, là où l'infrastructure réseau est traditionnellement moins développée et, de ce fait, mal adaptée à l'acheminement de grosses capacités. D'où l'obligation de développer cette infrastructure. Aux 20 000 MW éoliens terrestres s'ajoutent quelque 30 000 MW maritimes. <sup>3</sup> donne une projection de cette croissance à l'horizon 2030. Une étude de la *Deutsche Energie-Agentur*<sup>2)</sup> a chiffré l'impact de cette expansion sur le réseau de transport allemand à plus de 800 km de lignes supplémentaires d'ici à 2015 [1].

Au demeurant, cette forte proportion d'éolien n'est pas seulement problématique pour le réseau de transport, mais aussi pour le reste de la production. Voyons tout d'abord la capacité installée : les éoliennes à terre, soumises à des régimes de vent types, ne produisent qu'une fraction (10 à 15 %) de la puissance installée, au même niveau de disponibilité que celle des

groupes thermiques [3]; les installations en mer portent cette valeur à près de 50%. Ce déficit doit donc être pallié par des centrales traditionnelles de « réglage ».

Cette réserve aidant, la capacité de production installée dans les réseaux où l'éolien monte en puissance ne posera au départ pas de problème aux systèmes électriques. Toutefois, la garantie de cette capacité de réserve à court et moyen termes doit être adaptée. Comme tout autre système d'approvisionnement, il faut en permanence ajuster l'offre à la demande. Dans tous les systèmes de production, une partie de la consommation, appelée « bande d'équilibrage », est assurée par des centrales fonctionnant à charge partielle et pouvant ainsi rapidement revoir leur puissance à la hausse ou à la baisse <sup>Encadré</sup>. Sachant que ces installations nécessitent un surcroît d'équipements de contrôle-commande et que leur capacité installée n'est pas pleinement exploitée, la bande d'équilibrage doit être réduite au minimum. Sa valeur dépend du nombre de fluctuations imprévues de la charge dans le système électrique, en fonction de la charge elle-même et de la taille de la plus grosse unité de production (dont le système doit pouvoir compenser à tout instant la défaillance). L'Union pour la Coordination du Transport de l'Electricité<sup>3)</sup> (UCTE) en Europe, par exemple, prescrit la

valeur de cette bande d'équilibrage et la fréquence de variation de puissance délivrable par les centrales de réglage.

#### Encadré De la puissance en réserve

La **réserve-seconde** est la puissance de production non mobilisée, accessible en quelques secondes. Elle émane généralement de centrales exploitées à charge partielle, dont on peut facilement augmenter ou diminuer la puissance. Elle sert principalement au réglage fréquence-puissance.

Vient ensuite la **réserve-minute** (encore appelée « réserve chaude » ou « tournante »); une production imprévue, une défaillance du transport ou un aléa de consommation sont d'abord absorbés par la marge de réglage de la réserve-seconde. Pour relayer cette dernière, la production bascule sur d'autres sources en quelques minutes (moins de 15 selon la réglementation UCTE, par exemple). La réserve-minute revêt habituellement la forme d'installations à réservoir et de turbines à combustion (démarrées à cet effet) ainsi que de groupes thermiques ne fonctionnant pas à pleine puissance.

Au troisième niveau de cette échelle de temps figure la **réserve-heure** (« réserve froide » ou « à l'arrêt »), constituée de centrales thermiques prêtes à démarrer dès que les éoliennes s'arrêtent.

<sup>2</sup> Une éolienne à Mecklenburg-Vorpommern (Allemagne) : les faibles densités de population et l'implantation industrielle de ces régions expliquent la fragilité du réseau électrique.



#### Notes

<sup>2)</sup> Agence allemande pour l'efficacité énergétique

<sup>3)</sup> Association des transporteurs européens d'électricité

Un système, dans lequel la production éolienne peut ponctuellement fluctuer entre zéro et la couverture quasi totale de la charge (témoins, l'Allemagne du Nord et le Danemark), aura des besoins en puissance de réserve nettement plus importants qu'un système basé essentiellement sur le thermique ; dans ce dernier cas, la plus grosse unité n'assure tout au plus que quelques pour cent de la consommation maximale et la charge elle-même est parfaitement connue et prévisible. Les premiers retours d'expérience d'Allemagne du Nord (fondés sur des méthodes de prévision de la production éolienne certes perfectibles) révèlent que les besoins moyens en réserve-

## La concentration géographique de l'éolien marin engendra dans bien des cas un besoin permanent de transport massif d'énergie.

minute s'élèvent à 25% de la puissance installée [2]. Ce constat oblige évidemment à revoir les règles d'équilibrage fixées par l'UCTE. Les conclusions de l'enquête de la *Deutsche Energie Agentur* [1] abondent dans ce sens : un court-circuit sur le gigantesque réseau du Nord de l'Allemagne, en cas de vents violents, peut entraîner une panne de production d'une ampleur bien supérieure à la puissance

en réserve tournante prescrite par l'UCTE.

La panne électrique qui a touché plusieurs millions d'Européens, le 4 novembre 2006, et provoqué l'éclatement du réseau en trois zones asynchrones, montre que le système électrique recèle déjà une importante capacité productive imprévisible, influant sur la gestion du système. Le rapport de l'UCTE [4] dénonce en priorité la déconnexion automatique des champs éoliens d'Allemagne du Nord et le manque absolu de coordination entre les quatre gestionnaires de réseau allemands. Même si, en l'espèce, ce mécanisme a plutôt été un élément de stabilisation du réseau (les groupes éoliens étant situés dans une région de surproduction entraînant une montée de la fréquence), il aurait aussi pu être un facteur aggravant de la panne. Deuxième chef d'accusation : le rétablissement du réseau synchrone fut entravé par une production décentralisée dont le gestionnaire méconnaissait la nature et sur laquelle il ne pouvait agir. Conclusion : les exigences fondamentales de la gestion du système ont considérablement évolué et les outils associés doivent leur emboîter le pas.

### Des solutions techniques pour les systèmes électriques de demain

#### De nouveaux choix de transport

Une forte proportion d'EnR et les bouleversements du marché électrique

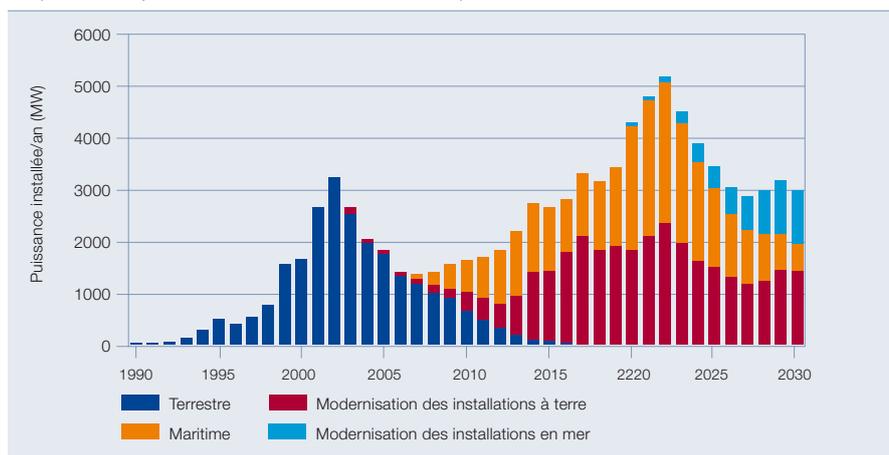
donnent lieu à des activités de transport tout autres que celles exercées par les systèmes classiques à équilibrage local production-consommation. Les besoins en transport et en puissance réactive y sont plus importants. Voyons les divers moyens de renforcer le réseau.

On peut d'entrée ajouter de nouvelles lignes (même si la tâche est souvent aussi laborieuse que délicate) mais aussi accroître l'utilisation des infrastructures en place (couloirs de transport), sans oublier d'augmenter la tension de service, la section des conducteurs ou la température de fonctionnement des lignes triphasées<sup>4)</sup>.

## Vent et soleil ont presque toutes les vertus des sources d'énergie durables : propres et infinies, elles bénéficient d'un important potentiel de développement, envié par toutes les autres productions renouvelables.

En particulier, la concentration géographique de l'éolien marin engendra dans bien des cas un besoin permanent de transport massif d'énergie. Cette situation se profile d'ores et déjà en Allemagne. Une question se pose alors : faut-il renforcer le réseau 400 kV construit à d'autres fins (mise en commun des réserves, essentielle-ment) ou vaut-il mieux lui superposer un autre réseau dédié ? Cette dernière solution est envisageable en augmentant le niveau de tension en alternatif triphasé ou en passant au transport en courant continu à haute tension (CCHT), qui autorise le transit de puissances plus élevées, à encombrement égal, sans consommer de puissance réactive. Si l'on prévoit des convertisseurs CCHT à IGBT autocommutés, ceux-ci peuvent, outre leur

3 Perspectives de croissance de la filière éolienne allemande (source : <http://www.deutsche-windindustrie.de>)



#### Note

<sup>4)</sup> Cf. « Des autoroutes de l'énergie » p. 14

fonction de transport, assurer au réseau local un soutien rapide et continu de la puissance réactive [4]. Ce choix est particulièrement avantageux dans les zones à forte production éolienne et dont les réseaux, nous l'avons dit, sont souvent structurellement faibles. Depuis 1997, ABB fournit des installations *HVDC Light™* mettant en œuvre cette technologie pour des puissances atteignant aujourd'hui 1100 MW.

La capacité du CCHT autocommuté à intervenir instantanément en tout point du diagramme P-Q et, en particulier, au point zéro [4b], ainsi que l'avantage crucial du transport sans puissance réactive font de cette technologie la solution toute désignée pour raccorder les projets de fermes éoliennes en mer. A cet égard, il conviendra non pas d'établir la liaison directement sur le rivage mais de prolonger les lignes CCHT jusqu'aux nœuds hautes performances adéquats du réseau. Ce choix irait dans le sens du réseau superposé au grand transport.

#### Plus de transparence

Les transits de puissance en jeu et les modifications rapides des flux physiques, en cas de variation de la fourniture d'EnR, ajoutent leur lot de contraintes aux réseaux de transport. Une information plus précise et circonstanciée sur l'état du réseau maillé, comme celle fournie par les nouvelles techniques de surveillance à grande échelle [5], peut alors épauler la gestion du système électrique. Des mesureurs de phaseurs sont capables d'enregistrer les vecteurs de courant et de tension avec une très grande précision temporelle. Une image très pointue de la dynamique du système électrique est mise à la disposition du gestionnaire du réseau, par synchronisation horaire sur GPS [5].

Cette nouvelle qualité informative permet autant d'affiner l'observation des réseaux voisins (a fortiori s'ils intègrent des équipements influençant le flux électrique tels que transformateurs déphaseurs, dispositifs FACTS ou lignes CCHT) que de surveiller en continu les états critiques du système et d'en identifier les zones en perte de synchronisme. Lors de la grande pan-

ne du 4 novembre 2006, l'ilotage du réseau UCTE en 3 zones désolidarisées échappa à la vigilance des postes de conduite. On peut présumer que la probabilité de tels incidents s'accroîtra dans un réseau de transport lourdement sollicité. Il faudra donc compter sur une plus grande disponibilité des informations fournies à la conduite du réseau.

**Les systèmes électriques de demain se caractériseront par une forte proportion d'EnR, une production décentralisée externe et, souvent, une prévalence des critères de marché.**

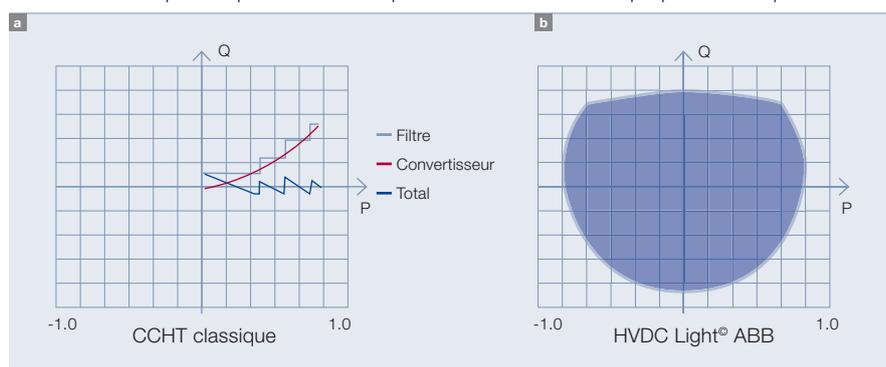
#### Le thermique à la rescousse

Une forte proportion d'éolien accroît les besoins techniques de conduite du sous-système de production indépendant de la fourniture. Cela vaut pour les capacités de réserves primaire et secondaire (réserve-minute [Encadré]) et particulièrement les réseaux utilisant des centrales thermiques au charbon pour équilibrer la charge. La modernisation de la conduite et de l'instrumentation dans les centrales thermiques existantes offre de considérables gisements de progrès qui peuvent se concrétiser sans grand effort. La mise en œuvre de caractéristiques d'exploitation globalement optimisées, à base de modèle, pour la turbine et la chaudière des centrales à vapeur, de type MODAN et MODAKOND d'ABB, auto-

rise un fonctionnement plus souple et robuste, ainsi qu'une réduction de la consommation auxiliaire : en régime ralenti, capital pour fournir la réserve-seconde, des gains de rendement atteignant 0,48% ont été constatés. Cette hausse est fondamentalement due au fait que la vitesse de variation de puissance nécessaire à l'équilibrage du système est obtenue par une strangulation minimale de la vapeur d'alimentation de la turbine. Ces améliorations, dont les résultats vont bien au-delà des exigences actuelles de l'UCTE, sont encore plus importantes dans des systèmes caractérisés par une forte proportion d'EnR et, parallèlement, une exploitation instable du reste de la production.

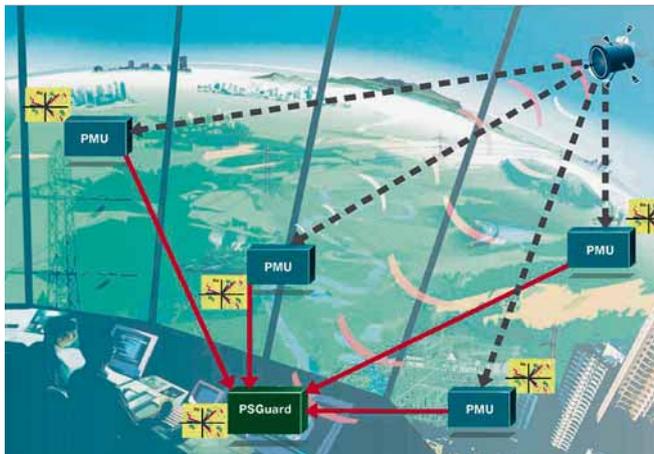
L'imprévisibilité de l'énergie éolienne confère à la réserve-minute une importance particulière. La modernisation des centrales existantes peut être à la fois un impératif technique pour la fiabilité opérationnelle du système et une aubaine commerciale pour les exploitants : la puissance de réserve est une précieuse ressource sur les marchés électriques concurrentiels. La modernisation systématique de l'instrumentation et de la conduite constitue souvent un levier de progrès. Dans un cas, la modernisation coordonnée de la turbine, de la chaudière et de l'unité de commande a permis de passer d'une vitesse de variation de puissance de 2 MW/min à 50 MW/min et d'affiner la précision de la conduite de  $\pm 5\%$  à  $\pm 0,5\%$ . Depuis lors, la centrale concernée peut aussi participer au réglage primaire et secondaire.

4 Diagramme P-Q a d'une liaison CCHT classique et b d'une liaison *HVDC Light™* autocommutée; cette dernière peut en permanence et rapidement commander chaque point des 4 quadrants.



## Efficacité énergétique et réseaux électriques

5 Système de surveillance à grande échelle avec mesures de phaseurs synchronisées [5]



Le vent, source d'énergie inépuisable mais volatile



### Potentiel d'avenir

Les systèmes électriques de demain se caractériseront par une forte proportion d'EnR, une production décentralisée externe et, souvent, une prévalence des critères de marché. Cette évolution pose aux sous-systèmes de production et réseaux de transport classiques de nouvelles exigences, imputables à quatre causes : les contraintes géographiques de la pro-

duction. A l'avenir, il faudra tenir compte de bien d'autres processus et les coordonner de façon qu'une fourniture électrique sûre, fiable et rentable reste un moteur de l'activité industrielle.

Des solutions sont là pour répondre aux exigences croissantes de conduite des groupes thermiques classiques, doper les capacités de transport, parfaire les informations d'état, élargir la compréhension du système, intégrer à point nommé les solutions en présence dans les systèmes électriques... Reste, dans les années qui viennent, à faire les bons choix !

Une forte proportion d'éolien accroît les besoins techniques de conduite du sous-système de production indépendant de la fourniture.

### Jochen Kreusel

Marketing and Technology Power Divisions,  
ABB AG  
Mannheim (Allemagne)  
jochen.kreusel@de.abb.com

duction, l'instabilité et l'imprévisibilité de la fourniture d'énergie primaire, le manque d'informations sur le comportement des productions décentralisées, la « marchandisation » de l'électricité. A cet égard, la multiplication des processus intervenant dans la fourniture électrique sans pouvoir être planifiés ou influencés par le gestionnaire de réseau est fondamentale. Dans le passé, la consommation s'appuyait sur cette caractéristique et la gestion du système utilisait la charge comme grandeur réglante de l'exploitation du

### Bibliographie

- [1] Deutsche Energie-Agentur (dena) *Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und Offshore bis zum Jahr 2020*, Cologne, 2004
- [2] Dany, G. *Systemtechnische Weiterungen der Netzintegration von Windkraftwerken*. Aachener Beiträge zur Energieversorgung (Band 92): *Jahresbericht 2003 des Instituts für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft der RWTH Aachen in Verbindung mit der Forschungsgesellschaft Energie an der RWTH Aachen e.V.*, p. 105–107, Aachen, 2003
- [3] Dany, G., Haubrich, H.J., Biermann, D., Krabs, M., Machate, R.D., Sierig, J., *Wert der Windenergieeinspeisung*, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, Vol. 50 (2000), n° 1/2, p. 48–52
- [4] UCTE, *Rapport final sur la panne du 4 novembre 2006*, Bruxelles, 30 janvier 2007
- [5] Bertsch, J., Carnal, C., Suranyi, A., *Grand angle, Détecter les phénomènes d'instabilité des réseaux électriques et optimiser l'utilisation des équipements avec Inform<sup>IT</sup> Wide Area Monitoring PSG 850*, *Revue ABB* 4/2003, p. 32–36

# Optimisation sur toute la ligne

ABB optimise en ligne une usine hybride de dessalement couplée à une centrale d'énergie

Goetz-D. Wolff, Stefan Lauxtermann, Ramesh Kumar



La croissance rapide des pays du Moyen-Orient s'accompagne d'une forte demande en infrastructures, notamment pour l'alimentation en eau et en électricité. Les usines hybrides de dessalement constituent une solution très souple pour les besoins différenciés de ces pays dans ce domaine. Or l'envolée du prix des combustibles et la nécessité de préserver les ressources précieuses imposent d'optimiser les performances de ces usines sur le court comme sur le long termes, et dans tous les modes de fonctionnement.

Cet article décrit une nouvelle méthode d'optimisation économique des usines hybrides de dessalement couplées à des centrales d'énergie. Elle s'appuie sur différentes solutions logicielles ABB d'optimisation en ligne et hors ligne dont l'efficacité est validée par la pertinence des résultats obtenus par l'usine hybride de Fujairah (Emirats Arabes Unis).

Les usines de dessalement jouent un rôle majeur dans la production d'électricité et d'eau au Moyen-Orient où les besoins ne cessent d'augmenter et d'évoluer. En particulier, la construction accrue d'usines hybrides de dessalement témoigne de leur grande souplesse d'exploitation et de leur adaptabilité aux variations des besoins. Or ces usines sont complexes car le dessalement par voie hybride combine au moins deux procédés. Pour autant, c'est précisément cette complexité qui fait qu'elles offrent un formidable potentiel d'optimisation.

L'usine hybride de dessalement est située à 20 km au nord de la ville de Fujairah, dans le Golfe d'Oman. Contraint, après la privatisation, de donner un tour de vis aux coûts de fonctionnement, l'exploitant se mit en quête de solutions d'optimisation. En 2005, l'usine installa différents outils logiciels ABB de sa suite OPTIMAX<sup>® 1)</sup>, destinés à suivre et optimiser les performances de l'usine, outils que nous allons décrire.

## Coupler dessalement d'eau de mer et production d'électricité

Pour produire de l'électricité, l'usine est équipée de quatre turbines à gaz General Electric PG9171E de 106 MW associées à des générateurs de vapeur à récupération de chaleur et de deux turbines à vapeur Siemens NG90/90 de 119 MW <sup>1</sup>. L'eau est produite avec cinq distillateurs à détentes successives d'une capacité unitaire d'environ 57 000 m<sup>3</sup>/jour et une unité d'osmose inverse à deux étages d'une capacité

### Note

<sup>1)</sup> Cf. « OPTIMAX<sup>®</sup> : un max de performance opérationnelle et environnementale » en p. 44

## Efficacité énergétique et réseaux électriques

de 170 000 m<sup>3</sup>/jour. Au total, l'usine peut produire environ 660 MW et 455 000 m<sup>3</sup>/jour d'eau à la température ambiante de 46 °C. Les générateurs de vapeur envoient de la vapeur haute pression à un collecteur commun. La vapeur basse pression pour le dessalement par distillation est prélevée en sortie des turbines à vapeur ou est fournie par un réducteur de pression.

### Identifier les gisements d'optimisation

Les coûts de combustible représentent 90% des dépenses totales de fonctionnement (combustibles, produits chimiques, pièces de rechange et maintenance des turbines, distillateurs et osmoseurs). A l'exception des dépen-

ses d'investissement, le combustible est de loin le premier poste des centrales d'énergie et des usines de dessalement et, donc, celui qui offre le meilleur potentiel d'économies. Les outils d'optimisation suivants ont été conçus précisément dans ce but :

- **Répartition de la charge** pour la planification à J+1 et l'optimisation en ligne ;
- **Optimisation de l'usine hybride** avec planification en ligne ;
- **Optimisation des éléments** suivants :
  - distillation par détentes successives
  - osmose inverse
  - ventilateurs à tirage forcé (modification des paramètres d'automatisation).

En plus d'alléger la facture énergétique, ces outils améliorent la maintenance et les procédures de travail au niveau global.

### Structure du système

La structure modulaire du système d'optimisation mis en place à Fujairah est détaillée en 2. Les données temps réel sont récupérées des systèmes Siemens Teleperm XP via un serveur OPC, Siemens WinCC et GE Mark V. Elles sont archivées dans la base de données PGIM (*Power Generation Information Manager, anciennement PlantConnect*) d'ABB qui alimente tous les outils d'optimisation et autres applications. PGIM est également un système de gestion des informations industrielles doté d'une interface homme-système pour l'affichage de graphiques, courbes de tendance et bilans. Les indicateurs de performance comme le rendement des turbines à gaz sont calculés par l'outil logiciel intégré *Technical Calculation*.

L'outil de modélisation *PowerCycle*, également fourni par ABB, simule avec précision le comportement thermodynamique de l'usine sous différentes conditions ambiantes et différents régimes établis de fonctionnement. A Fujairah, le modèle *PowerCycle* est utilisé pour :

- **Valider les données** : il contrôle les mesures en ligne pour éviter les erreurs de mesure ;
- **Optimiser le dessalement par distillation** : il fournit des consignes internes d'exploitation pour la distillation, à une charge donnée ;
- **Modéliser la demande en combustible** : il calcule la consommation attendue en combustible selon la conception de l'usine, calcul validé par les mesures de performance lors de la mise en route de l'usine.

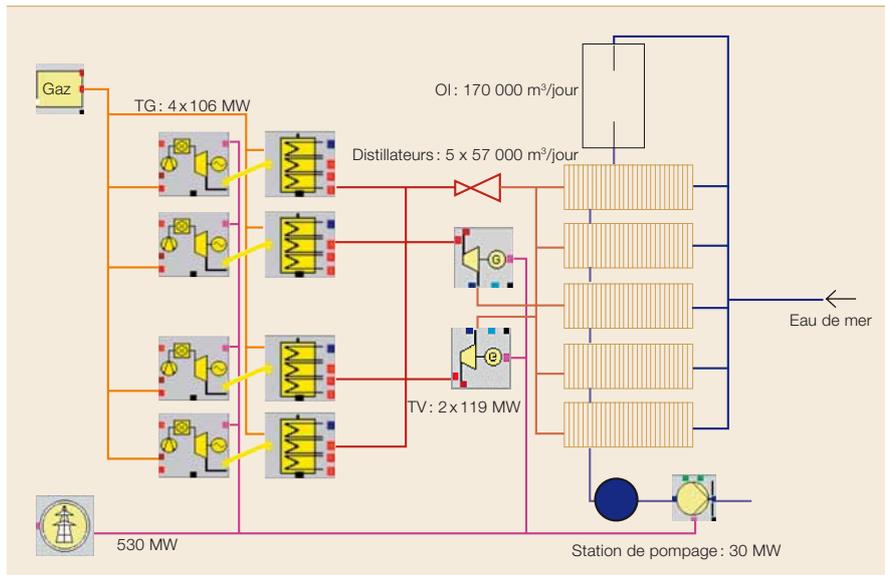
Parmi les autres outils, citons :

- **PowerFit** qui optimise les programmes de production. Cet outil logiciel est principalement utilisé pour la planification à J+1 ;
- **BoilerLife** qui détermine la durée de vie résiduelle des principaux composants de la chaudière.

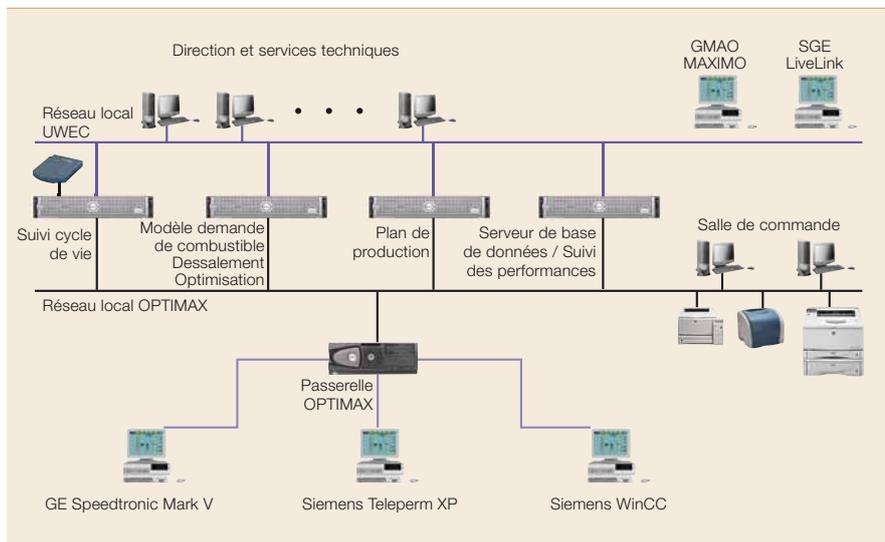
### Solution d'optimisation

La solution d'optimisation mise en place à Fujairah assure les fonctions suivantes :

1 Structure de l'usine de dessalement de Fujairah



2 Structure du système d'optimisation



- Répartition de la charge
- Optimisation du dessalement hybride
- Optimisation du dessalement par distillation
- Optimisation des performances globales
- Optimisation des procédures de travail

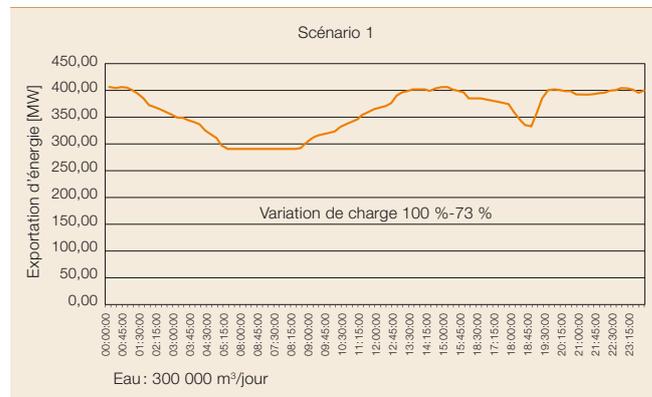
Répartition de la charge

La demande en eau et électricité que doit satisfaire une usine comme celle de Fujairah fluctue au cours de la journée. En effet, dans les régions où l'humidité et la température varient, la charge varie de même. L'exemple de courbe de charge électrique journalière en 3 montre que la centrale fonctionne entre 50 et 80% de sa capacité nette totale, une fluctuation de 20% étant jugée normale. Une variation de charge supérieure à 150 MW équivaut à environ 1,5 fois la capacité maximale d'une turbine à gaz.

La production journalière d'eau de l'usine est fonction de la demande. Une certaine souplesse est assurée par la capacité de stockage des réservoirs d'eau potable.

Le système de répartition de la charge cherche donc à optimiser les capacités de production au vu des besoins spécifiques en eau et en électricité. Selon les niveaux de demande fixés par les répartiteurs de charge, la configuration de l'usine, le prix des combustibles, les coûts de maintenance, le

3 Courbe de charge électrique journalière de l'usine de Fujairah



coût des produits chimiques, les conditions ambiantes et les modes de fonctionnement, le système calcule les performances de l'ensemble du site et de chaque équipement. Le résultat est un optimum économique d'exploitation de l'usine, calculé en combinant turbines à gaz, turbines à vapeur, unité d'osmose inverse et distillateurs à détentes successives. Cet optimum résulte du meilleur arbitrage entre :

- Le fonctionnement combiné des turbines à gaz et à vapeur ;
- Le fonctionnement combiné des turbines à vapeur et débit de vapeur en dérivation ;
- Le dessalement par distillation et osmose inverse ;
- L'utilisation des capacités de stockage d'eau.

Les programmes d'optimisation restent valables de un à plusieurs jours. La solution logicielle d'optimisation comprend quatre éléments :

- Une interface graphique utilisateur ;
- Un noyau qui coordonne l'interface graphique, l'optimiseur et la base de données ;
- Un optimiseur (CPLEX) dont la tâche est de trouver le minimum global par la technique de programmation linéaire mixte ;
- Une base de données Oracle dans laquelle sont stockés tous les résultats et configurations.

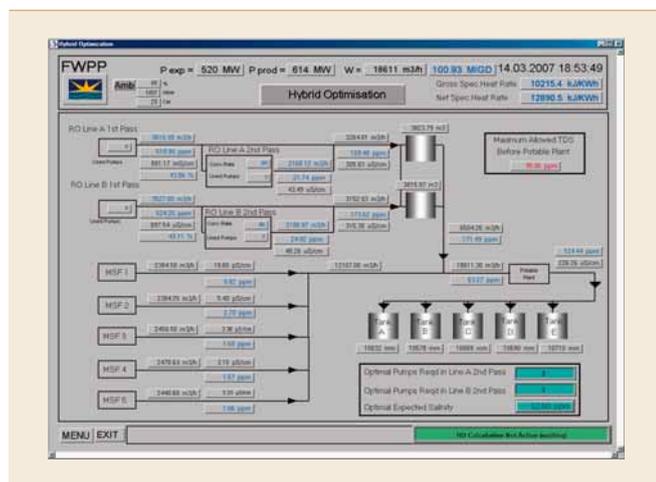
Les programmes de production pour tous les plus gros équipements sont présentés sous forme de tableaux ou de graphiques.

Dans l'usine de Fujairah, on a démontré – à partir de charges et de conditions d'essai spécifiques – que le logiciel d'optimisation permettrait de réduire en moyenne les coûts de combustible de 2,7%. Les plus gros gains ont été identifiés dans les régimes de fonctionnement à faibles charges avec un potentiel d'économie de 6% et plus.

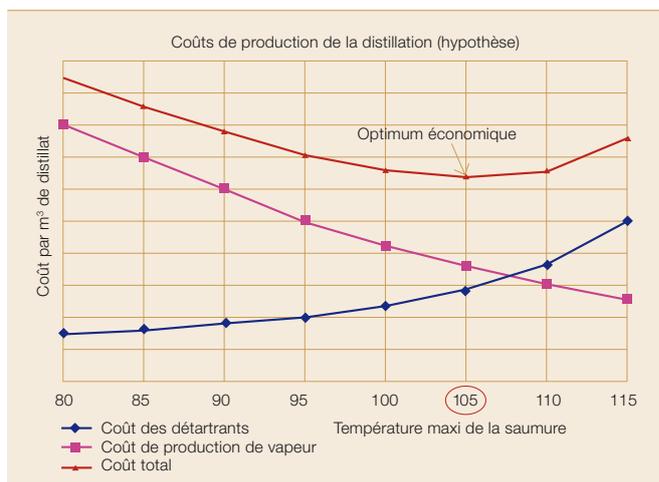
Optimisation du dessalement hybride

L'usine de dessalement de Fujairah met en œuvre un procédé hybride combinant distillation par détentes successives et osmose inverse, l'eau potable devant présenter une qualité définie. Or les deux procédés ne donnent pas la même qualité d'eau : la distillation par détentes successives produit une eau quasiment déminéra-

4 Optimisation du dessalement hybride



5 Minimisation des coûts de la distillation par détentes successives



## Efficacité énergétique et réseaux électriques

lisée alors que l'osmose inverse donne une eau de très bonne qualité. De ce fait, l'eau potable mélangée, issue des deux procédés, doit être reminéralisée pour respecter les critères de minéralisation optimale fixés par les organismes de santé publique.

L'installation ultramoderne d'osmose inverse de Fujairah, construite par Degremont<sup>2)</sup>, compte deux lignes de deux passes chacune. La salinité de l'eau après la première passe est de l'ordre de 500 ppm et de 15 ppm après la seconde. Une partie de l'eau est dessalée par une seule passe et directement mélangée à celle subissant deux passes. La salinité de l'eau produite par l'unité d'osmose inverse avant optimisation se situe entre 80 et 100 ppm.

L'optimisation vise à déterminer le nombre minimum requis de blocs de modules d'osmose inverse (OI) de deuxième passe<sup>3)</sup> pour obtenir la qualité d'eau garantie en sortie d'usine. Cette optimisation permet, à son tour, de réduire :

- la consommation électrique des pompes des blocs de modules OI de deuxième passe de 0,5 MW par pompe ;
- les coûts de maintenance des blocs de modules OI de deuxième passe ;
- les dépenses en produits chimiques de l'usine.

Par ailleurs, en réduisant le nombre de blocs de modules OI en service au cours de la deuxième passe, on augmente la production d'eau dans l'unité d'osmose inverse car chaque deuxième passe rejette approximativement 10% d'eau.

L'écran 4 sert à optimiser en ligne le dessalement hybride. Dans cet exemple de production, deux blocs de modules OI de deuxième passe sont mis hors service par rapport à la méthode standard qui utilise un bloc de deuxième passe pour chaque paire de blocs de première passe en service (rapport 1:2). De surcroît, un outil

logiciel hors ligne est également fourni pour modéliser différents scénarios. L'optimisation du dessalement hybride permet d'économiser l'équivalent de 0,6% du coût total du combustible.

#### Optimisation de la distillation par détentes successives

La production de vapeur, les additifs chimiques et la consommation électrique des équipements de production constituent les principaux coûts d'une installation de distillation par détentes successives. Par conséquent, l'optimiseur a pour mission de minimiser la somme de ces coûts en calculant d'autres valeurs de consigne permettant de maintenir constante la production d'eau. 5 est une courbe de coûts type pour différentes valeurs de température maximale de la saumure.

Les coûts de production de vapeur par m<sup>3</sup> de distillat baissent lorsque la température maximale de la saumure monte car le rapport de performance augmente si la production d'eau doit être maintenue constante. Une élévation de cette température augmente le coût des produits chimiques (ex., détartrant) par m<sup>3</sup> de distillat car l'eau est très entartrante aux températures supérieures. L'optimiseur calcule des valeurs optimales pour les paramètres suivants du fait qu'à une charge donnée différentes combinaisons de ces paramètres peuvent être utilisées :

- Température maximale de la saumure
- Débit de recyclage de la saumure

- Rapport température eau de mer/rejet (en hiver uniquement)
- Rapport débit eau de mer/rejet
- Débit d'appoint

De surcroît, un logiciel de simulation sert à modéliser le procédé de distillation par détentes successives dès le premier étage. Un modèle de la ligne de distillation 6 est configuré en combinant les consignes optimales calculées pour les paramètres précités avec d'autres composants comme les pompes et le réchauffeur de saumure. Ces consignes sont utilisées par les opérateurs pour commander la distillation par détentes successives.

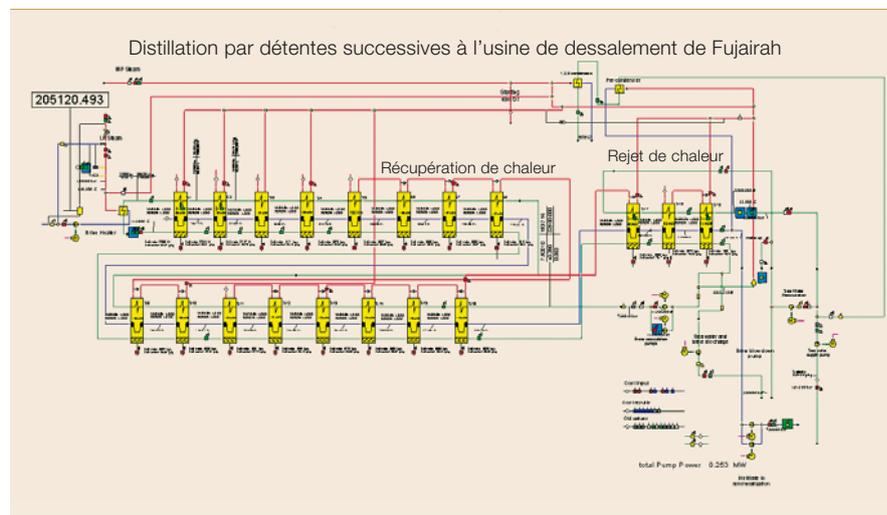
Un double outil d'optimisation en ligne et hors ligne est disponible dans l'usine. L'outil en ligne optimise les réglages toutes les 10 minutes pour une production donnée d'eau distillée alors que l'outil hors ligne sert à des fins de planification.

En utilisant l'outil d'optimisation de la distillation par détentes successives sous différentes conditions d'exploitation, les coûts cumulés de production d'eau distillée ont été réduits de 1,78%.

#### Optimisation des performances globales

Il importe de surveiller les performances des différentes installations de l'usine pour pouvoir détecter toute perte d'efficacité 7. Nous proposons maintenant de décrire le mode de calcul des performances et de l'illus-

6 Modèle de dessalement par distillation

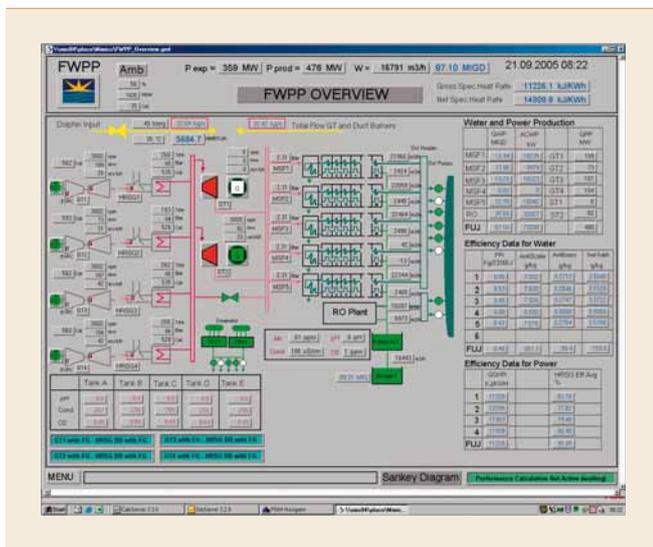


#### Notes

<sup>2)</sup> <http://www.degremont.com> (mars 2007)

<sup>3)</sup> Unités de membranes pour le dessalement par osmose inverse pouvant être mises en service et hors service séparément.

7 Vue d'ensemble des procédés de l'usine de Fujairah



trer avec un exemple de correction opérée sur détection d'une erreur de paramétrage.

Les performances de tous les gros équipements de l'usine de Fujairah sont calculées : turbines à gaz, générateurs de vapeur, turbines à vapeur, pompes d'eau d'alimentation, distillateurs à détente successive, pompes de prélèvement d'eau de mer, unité d'osmose inverse et pompes haute pression. L'affichage et les courbes de tendance, correspondantes 8 sont utilisés par les opérateurs et les ingénieurs pour analyser et surveiller les performances de l'usine dans son ensemble ainsi que celles des différentes installations. Des comparaisons entre les performances réelles et attendues des indicateurs simplifient l'analyse et renforcent son efficacité. Précisément, une contre-performance du générateur de vapeur fut détectée lors de l'utilisation du système d'optimisation et de suivi des opérations. Un examen révéla un problème au niveau du ventilateur à tirage forcé. Celui-ci n'est en fait démarré que lorsque la température moyenne des gaz de combustion à l'arrière des brûleurs à conduit franchit une consigne de régulation spécifique. Dans l'usine de Fujairah, cette valeur était paramétrée à 800 °C alors que, théoriquement, elle est de 840 °C, l'écart de 40 °C se traduisant par une chute de 1,7% du rendement de la chaudière lorsque le ventilateur à tirage forcé est en fonctionnement.

Qui plus est, une fois démarrés, les ventilateurs ne s'arrêtaient jamais car la consigne basse de température de 700 °C était jugée trop faible (la température chutait rarement sous cette valeur). Elle a donc été modifiée après la mise en place du logiciel avec un gain de rendement.

#### Optimisation des procédures de travail

Outre le fait d'optimiser les procédés de dessalement et les performances de l'usine, certaines procédures de travail ont également été améliorées avec :

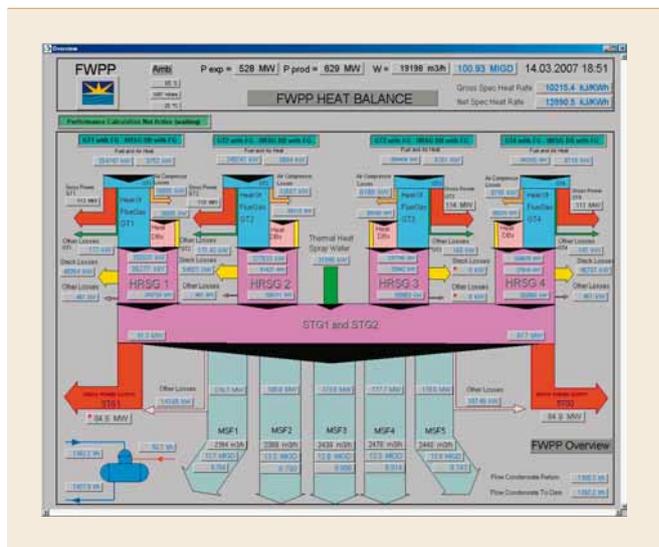
- La création automatique de journaux et bilans pour gagner du temps et éviter les erreurs de saisie ;
- L'échange automatisé des données avec d'autres systèmes comme, par exemple, la gestion de maintenance assistée par ordinateur (GMAO).

A Fujairah, plus de 100 journaux et bilans ont été automatisés, allégeant d'environ 18 heures la charge de travail quotidienne. Des outils conviviaux pour créer différents types de bilan sont développés par ABB avec le tableur Microsoft Excel.

#### Conclusions

Les résultats très favorables de l'installation d'un système de suivi et d'optimisation des performances au sein de l'usine hybride de dessalement de Fujairah et de sa centrale d'énergie valident l'efficacité des techniques modernes d'optimisation. De fait, la

8 Bilan thermique avec calcul des débits de chaleur



plupart des techniques décrites dans cet article peuvent également être appliquées aux usines de dessalement non hybrides.

Globalement, les économies de combustible réalisées à Fujairah dépassent les 4%, sans compter les gains liés à l'optimisation des procédures de travail. Les avantages indiquent que des gisements d'économies existent pour d'autres usines par voie hybride et monoprocédé.

Goetz-D. Wolff

Stefan Lauxtermann

ABB AG

Minden (Allemagne)

goetz.d.wolff@de.abb.com

stefan.lauxtermann@de.abb.com

Ramesh Kumar

ABB AG

Abou Dhabi (Emirats Arabes Unis)

ramesh.kumar@uae.abb.com

#### Bibliographie

- [1] Heinz Ludwig, Karen Stummeyer, FICHTNER, Potabilisation – Nachbehandlung von Destillat und Permeat aus Meerwasserentsalzungsanlagen, May 2004
- [2] Heike Glade, Jan-Helge Meyer, Stefan Will, Strategies for optimization of the Reverse Osmosis Plant in Fujairah, June 2005-09-06
- [3] Water Quality Regulation of UAE, Revision 2, 1. 1. 2004
- [4] Nils Huesgen, On technical and market aspects of water desalination, 17 December 2002

# OPTIMAX<sup>®</sup>

Un *max* de performance opérationnelle et environnementale

Marc Antoine

**L'efficacité énergétique d'un procédé réside avant tout dans la réduction du coût du combustible et des consommables. Les sites industriels étant très gourmands en énergie, le moindre pour cent d'économisé sur leur consommation peut bénéficier à toute la chaîne de production. Encore faut-il utiliser de puissants outils de diagnostic et d'optimisation.**

Les solutions OPTIMAX<sup>®</sup> d'ABB se chargent de surveiller et d'anticiper les performances de l'usine, d'en prédiagnostiquer les défaillances, de valider les mesures et d'assurer la maintenance préventive.

## Maximiser les performances

L'offre OPTIMAX<sup>®</sup> s'adresse aux énergéticiens confrontés à un parc de production complexe dont ils souhaitent alléger la consommation d'énergie sous toutes ses formes. C'est aussi un outil d'aide à la décision qui permet d'arbitrer entre différentes stratégies d'exploitation du site : est-il plus judicieux de vendre ou d'acheter de l'énergie ou du combustible, de démarrer ou d'arrêter un ouvrage, de préserver sa durée de vie en interve-

nant en amont ou de différer sa maintenance préventive ?

## Réduire les coûts de maintenance

En termes de coûts variables, le budget de maintenance est le second poste de dépenses derrière la facture énergétique. Qui dit « optimisation des actifs industriels » implique souvent la collecte d'une information précise, fiable, circonstanciée et gérable. Or la capacité à réagir à ces données est aussi primordiale que les possibilités d'y accéder. Les décisions et actions mises en œuvre ont des effets directs sur les performances d'exploitation, la sécurité d'approvisionnement, la longévité du parc, la qualité de l'énergie, la sécurité et la santé du personnel.

La préparation des tâches et la planification de la maintenance conditionnelle contribuent de plus en plus à la réduction des temps improductifs.

Les solutions de GMAO (Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur) OPTIMAX<sup>®</sup> ont l'avantage d'offrir et de maintenir un haut niveau de disponibilité, de qualité et de sécurité de l'usine. Des atouts qui valent pour l'exploitation du site, mais aussi et surtout pour les interventions de contrôle, de révision et de maintenance. Pour l'indus-

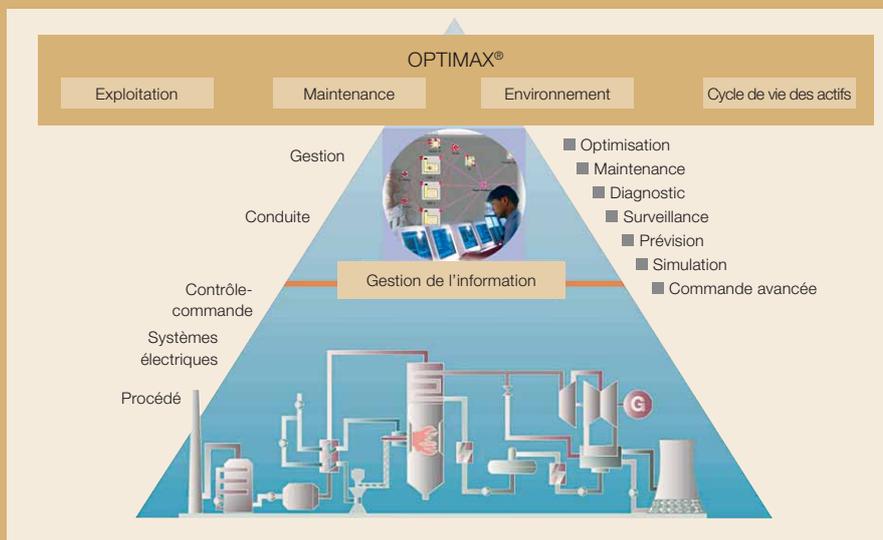
triel, OPTIMAX<sup>®</sup> se traduit par un rendement supérieur des actifs, propre à maximiser la valeur actionnariale.

## Traquer la pollution et chasser le gaspi

La mesure et la réduction des émissions polluantes revêtent une importance croissante, tandis que l'étau de la réglementation se resserre de jour en jour. L'émission de gaz à effet de serre se mesure désormais en espèces sonnantes et trébuchantes, et les industriels ont intérêt à diminuer la pollution de leur site. Les solutions environnementales OPTIMAX<sup>®</sup> sont là pour ça : surveillance de la qualité de la flamme, mesure du débit de charbon et de carbone dans les cendres, optimisation de la combustion, réduction des délais de mise en route d'une chaudière et optimisation de son rendement par commande avancée.

## Allonger la durée de vie

D'un point de vue économique, les responsables de production mettent en balance leurs investissements industriels et les performances, risques et arrêts machines de leur site. En optimisant la durée de vie de l'outil industriel, OPTIMAX<sup>®</sup> est en mesure de programmer son fonctionnement le plus économique et d'arbitrer entre, d'un côté, ses performances commerciales et, de l'autre, ses coûts globaux. Cette démarche peut aussi tenir compte du coût des émissions polluantes, lié au durcissement de la réglementation en matière de CO<sub>2</sub> ; ainsi, une usine déclarée apte au service sur le plan technique peut s'avérer non rentable sous l'angle économique. Ces outils décisionnels ont l'avantage d'intégrer des modèles de vieillissement du site pour en déduire une stratégie optimale d'exploitation entre les arrêts de maintenance, notamment au regard de la montée des contraintes écologiques.



Marc Antoine

ABB Schweiz AG, Power Systems  
Baden (Suisse)  
marc.antoine@ch.abb.com

# Championne toutes catégories

Le système d'automatisation étendue 800xA d'ABB pilote une des usines de pâte à papier les plus modernes au monde

Lena Sjödin

Avec une production annuelle de 500 000 tonnes de pâte, dont 420 000 tonnes de pâte kraft et 80 000 tonnes de pâte chimicothermomécanique, l'usine SCA d'Östrand en Suède est un des poids lourds de l'industrie papetière européenne. Fonctionnant 24 h/24, 365 j/an, le bois issu des forêts septentrionales du pays est transformé en pâte kraft blanchie sans chlore et en pâte semi-chimique destinées à la fabrication de papier pour magazines, de papier et produits d'hygiène et de papier d'emballage. Atteindre des sommets en matière de stabilité de production et d'efficacité industrielle exige un système de contrôle-commande flexible et fiable, qualités intrinsèques du système Industrial<sup>IT</sup> 800xA d'ABB choisi par l'industriel suédois pour l'aider à transformer une des plus grandes usines de pâte d'Europe en un champion mondial.



## Efficacité énergétique et industrie

Après deux années de travaux et un investissement total de 1,6 milliard de dollars, le papetier suédois SCA<sup>1)</sup> vient de mener à terme un vaste projet industriel, qui fait peut-être de son usine d'Östrand (cf. photo ci-dessous) l'une des plus modernes au monde. La chaudière de récupération, mise en exploitation en octobre 2006, et la station d'épuration des eaux sont aujourd'hui toutes deux pilotées par le système d'automatisation étendue Industrial<sup>IT</sup> 800xA<sup>2)</sup> d'ABB, plate-forme d'intégration évolutive dotée de fonctions graphiques et d'une interface de simulation avancée.

Le nouveau système devait fédérer deux fonctions jusqu'alors cloisonnées – production d'électricité et instrumentation – de la manière la plus avantageuse possible.

**Besoin d'intégration**

Si la décision d'investir dans un système intégré de contrôle-commande fut prise au même moment que celle d'acheter une nouvelle chaudière de récupération, le projet avait en réalité démarré plus d'un an auparavant lorsque l'entreprise commença à sonder les fournisseurs potentiels. Le projet était très précis sur un point : le nouveau système devait fédérer deux fonctions jusqu'alors cloisonnées – production d'électricité et instrumentation – de la manière la plus avantageuse possible, ce pour deux raisons. L'industriel désirait, d'une part, abattre les barrières entre les deux fonctions, source de contre-performances en termes de qualité de la production et, d'autre part, ne plus perdre de temps et d'argent à maintenir la communication entre les deux fonctions.

La recherche d'un nouveau système de contrôle-commande débuta en 2003. Un groupe d'ingénieurs du département d'automatisation consacra

quatre mois à étudier le marché, faisant plusieurs voyages avant de rédiger un cahier des charges. Alf Eriksson, responsable des systèmes d'automatisation chez Östrand explique : « Nous avons reçu énormément de propositions et bénéficié du soutien de l'entreprise pendant toute la phase d'études. Pour comparer en toute objectivité le contenu de l'offre des différents fournisseurs, nous avons fourni à chacun des schémas de procédé hypothétiques pour voir quel type de solutions techniques ils proposeraient. Nous avons ensuite testé toutes les propositions au cours d'une campagne d'essais de deux semaines. » Lorsqu'il fallut décider d'acheter une nouvelle chaudière de récupération en août 2004, nous avons déjà arbitré en faveur du système Industrial<sup>IT</sup> 800xA d'ABB. « Nous étions parfaitement synchrones », ajoute Alf Eriksson. ■ montre une solution intégrée type basée sur un système 800xA.

« Piloter l'ensemble des opérations à partir d'un même système est un atout indéniable », poursuit Alf Eriksson qui chapeaute désormais un département intégré aux fonctions étendues. « Les avantages de ce décloisonnement deviendront évidents au fil du temps. Dès à présent, ils se traduisent par une simplification des procédures de travail lors du basculement entre les modes Maintenance et Production, et par un dialogue plus naturel entre les

fonctions Production d'électricité et Instrumentation. »

**Energie verte**

La nouvelle chaudière de récupération de la soude est un équipement qui combine recyclage des déchets et production de vapeur. Pour son fonctionnement, elle réutilise et recycle les

Le système comprend neuf postes opérateurs et sept postes AC 800M de commande de la chaudière de récupération et de la station d'épuration ainsi qu'un simulateur d'entraînement du système de contrôle-commande.

produits chimiques alors que les déchets de bois de l'atelier de production de papier kraft servent de combustible. La vapeur est produite à une pression de 105 bar et une température de 515 °C, valeurs atteintes dans aucune autre usine comparable à travers le monde. Cette chaudière de récupération et la nouvelle turbine ont permis de doubler la production d'électricité à base de biomasse (500 GWh/an) avec, pour résultat, une réduction considérable de l'électricité achetée à un fournisseur extérieur,

Usine de pâte à papier d'Östrand du suédois SCA (photo: Michael Berggren)

**Notes**

<sup>1)</sup> <http://www.scatisue.com/about/corphistory>, (consulté en mars 2007)

<sup>2)</sup> Pour en savoir plus: [www.abb.com/controlsystems](http://www.abb.com/controlsystems) (mars 2007)

faisant de l'usine d'Östrand la plus performante de son secteur. Même au niveau actuel de 420 000 tonnes par an, l'usine de pâte kraft peut dès à présent renvoyer sur le réseau une partie de l'électricité «verte» qu'elle produit. Elle pourra même en injecter davantage dans les années à venir lorsque la nouvelle chaudière sera exploitée à sa pleine capacité (800 000 tonnes environ).

### Simuler pour mieux comprendre

Une atmosphère de travail agréable règne dans la salle de commande commune de d'Östrand 2 avec une plateforme d'intégration 800xA moderne et évolutive au gré des besoins fonctionnels du client. Il s'agit d'un système ouvert, polyvalent et hautement sécurisé avec des fonctionnalités exceptionnelles pour relier différents aspects.

Le système fourni par ABB comprend neuf postes opérateurs et sept postes AC 800M de commande de la chaudière de récupération et de la station d'épuration 3. Il compte également un simulateur d'entraînement du système de contrôle-commande de la chaudière

avec deux postes opérateurs et un système de formation plus petit. Le simulateur s'appuie sur un modèle mathématique de la chaudière, procédé complexe faisant intervenir à la fois une combustion et des réactions chimiques. Plusieurs scénarios ont été élaborés – fuites de cuve, panne d'électricité, problèmes de siccité et fuites de la chambre de combustion –

Dans tout le système, l'information devait être immédiatement accessible et facilement compréhensible, même par des utilisateurs occasionnels.

qui peuvent être combinés avec un certain nombre d'«instantanés» représentant chacun un état de fonctionnement différent de la chaudière de récupération.

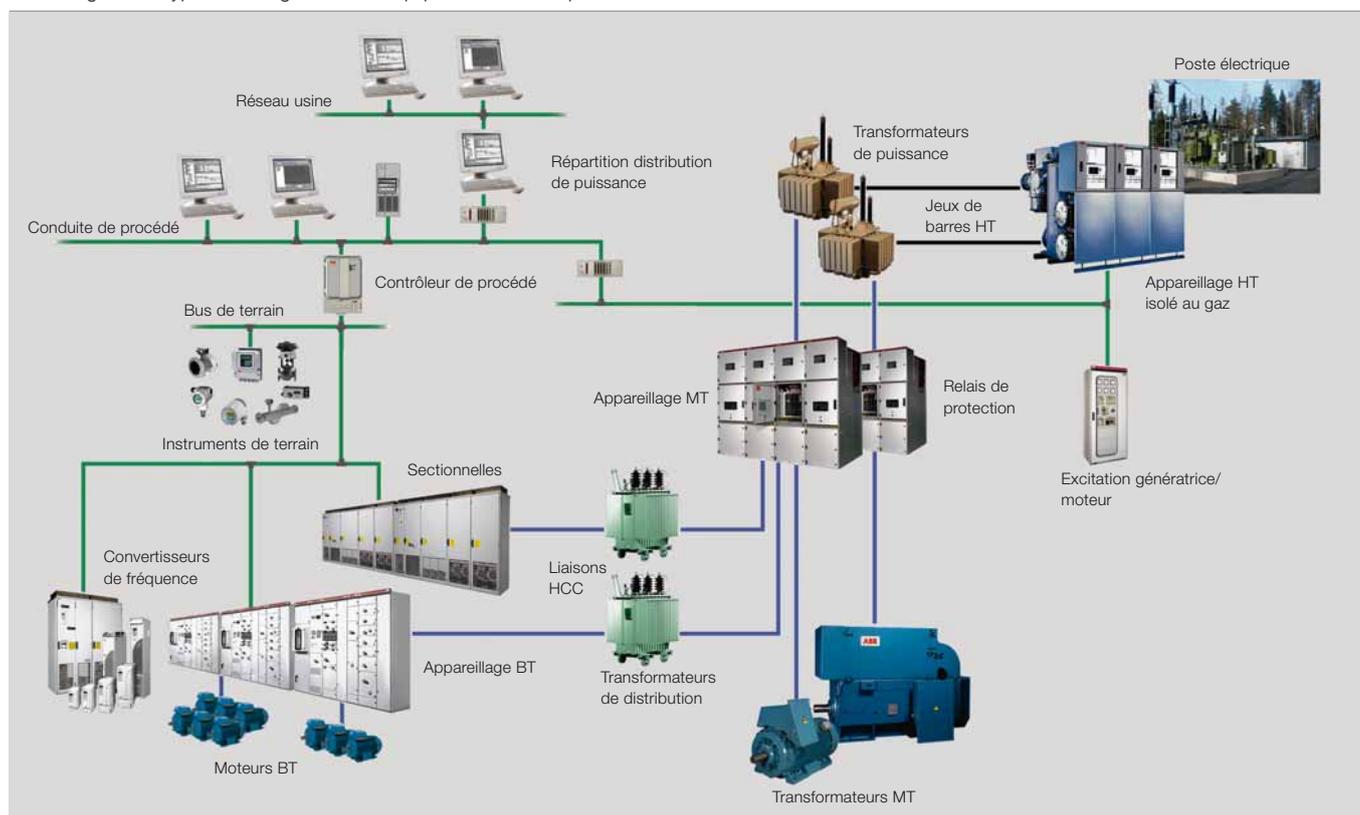
«ABB proposait le meilleur simulateur», déclare Alf Eriksson. «Il nous a permis de tester la chaudière à vide

avant sa mise en exploitation. A présent, nous pouvons former le personnel en utilisant une réplique exacte du système de contrôle-commande. Si nous modifions la programmation du système en exploitation, il est facile de répercuter les modifications dans le simulateur qui restera opérationnel plus longtemps.»

### Repenser les méthodes de travail

L'usine d'Östrand affiche une longue tradition de programmation «maison» que devait respecter le nouveau système. Ses protocoles standards ont été appliqués au mode de fonctionnement du système 800xA d'ABB. Les concepts de base et l'approche thématique des méthodes de travail existantes ont été repensés et les processus revus. Dans tout le système, l'information devait être immédiatement accessible et facilement compréhensible, même par des utilisateurs occasionnels. Pour ce faire, l'outil de conception graphique du système 800xA, utilisé pour la première fois en Suède à Östrand, s'est avéré très utile. En effet, l'affichage graphique plutôt que textuel des informations liées à cha-

1 Configuration type de l'intégration des équipements électriques



## Efficacité énergétique et industrie

2 Salle de commande du complexe papetier d'Östrand en Suède  
(photo : Michael Berggren)



3 Contrôleurs de l'usine de pâte à papier Östrand  
(photo : Michael Berggren)



que fonction concourt à une compréhension fine du procédé sous-jacent. Le langage de programmation est ainsi transposé dans un environnement familier à l'utilisateur.

«Avec la conception graphique, vous accédez facilement à votre application traduite dans un langage universel», explique Alf Eriksson. «Vous avez une vue d'ensemble très utile qui simplifie le diagnostic, par exemple.»

Les protocoles standards d'Östrand ont été appliqués au mode de fonctionnement du système 800xA d'ABB. Les concepts de base et l'approche thématique des méthodes de travail existantes ont été repensés et les processus revus.

### Indispensables bus de terrain

Autre exigence du cahier des charges de SCA : l'interfaçage du système avec les bus de terrain existants et le traitement d'un volume croissant d'informations à des fins de maintenance préventive.

L'usine utilise depuis de longues années les bus de terrain PROFIBUS et ASI; le nouveau système de contrôle-commande de la station d'épuration

devait obligatoirement être compatible avec les bus de terrain. Avec la nouvelle chaudière de récupération, tous les convertisseurs de fréquence et près de 90% des armoires de commutation sont pilotés sur PROFIBUS. Tous les signaux TOR, depuis les robinets de sectionnement jusqu'aux systèmes d'alerte, empruntent le bus ASI. Les signaux analogiques sont distribués sur des blocs d'E/S répartis.

«Nous utilisons énormément d'E/S HART et nous commençons à exploiter le foisonnement de données collectées par le système 800xA d'ABB pour développer des programmes qui nous permettront d'anticiper les besoins de maintenance avec plus de précision qu'actuellement», déclare Alf Eriksson.

### Evoluer au gré des besoins du client

Des relations étroites avec *ABB Services* et un contrat de services très avantageux furent des facteurs décisifs dans le choix du système 800xA. Une personne d'ABB était présente dans l'usine pendant toute la phase de programmation et d'installation pour aider l'industriel à optimiser le système au vu des besoins d'Östrand.

«La présence de cette personne signifiait beaucoup pour nous et pour le projet», précise Alf Eriksson. «Nous avons énormément appris et je pense qu'ABB a aussi tiré certains enseignements de la manière dont nous avons passé au crible les fonctions et les solutions.»

Sachant que l'ancienne solution avec les deux systèmes de contrôle-commande séparés fonctionnait depuis plus de vingt ans, le changement s'est opéré en douceur, d'une part parce que la transition technique s'est faite sans problème et, d'autre part, parce que le personnel d'exploitation et de maintenance s'est accaparé le nouveau système de contrôle-commande de manière exemplaire.

«Avec la conception graphique, vous accédez facilement à votre application traduite dans un langage universel», explique Alf Eriksson.

«Il va sans dire que la tâche était au départ ardue, mais plus nous travaillons avec le nouveau système, plus nous en tirons profit. Nous avançons méthodiquement sans précipitation. Le travail réalisé par tous nos employés force l'admiration. Nombreux sont ceux qui méritent notre respect pour l'aide qu'ils ont apportée à leurs collègues. Nous avons ainsi pu atteindre nos objectifs de qualité et de productivité malgré l'énormité de la tâche.»

**Lena Sjödin**  
Journaliste  
Sundsvall (Suède)  
lena@plan2.nu



# ABB lamine les coûts énergétiques

Des modèles pour doper en ligne l'efficacité énergétique des laminoirs à chaud de produits longs  
Anders Daneryd, Mats G. Olsson, Rickard Lindkvist

La conduite au quotidien d'un train de laminage est loin d'être une sinécure ! En effet, l'opérateur peut s'escrimer toute la journée à stabiliser le procédé pour respecter le programme de production. Il faut parfois beaucoup de temps pour résoudre certaines situations comme un laminage instable qui engendre des temps morts, des pertes de production et, fréquemment, des barres défectueuses.

Stabiliser les conditions de laminage requiert souvent une longue expérience. Les meilleurs ouvriers lamineurs savent juger à l'œil les réglages et sont fiers de leur savoir-faire métier. Cependant, le temps que la production se rétablisse, beaucoup d'énergie et de matières très coûteuses auront été gaspillées avant d'obtenir la précision dimensionnelle requise, en général par tâtonnements successifs. Pour aider les opérateurs et éviter ces gaspillages, ABB a développé un outil logiciel d'optimisation avancée du procédé de laminage.

Dans un laminoir, chaque changement de profil oblige à modifier une configuration qui a été stabilisée pour un matériau précis et une régularité dimensionnelle requise avec un minimum de temps morts et de rebuts. Souvent, le nombre de cages varie également. Un changement de profil mal géré peut retarder la production de plus d'une heure ; lorsque tout se passe bien, quelques minutes suffisent.

Des chercheurs ABB se sont penchés sur les difficultés inhérentes aux changements de profil répétés et aux problèmes qu'ils induisent. Ils ont développé un outil logiciel en ligne qui met en œuvre les plus récents modèles de laminage et méthodes d'optimisation, de simulation et statistiques pour aider les opérateurs à trouver les réglages optimum pour stabiliser le procédé et obtenir la précision dimensionnelle requise.

## Modèles pour l'optimisation, la simulation et le calibrage

La disponibilité et la productivité des laminoirs peuvent, à coup sûr, être améliorées d'une part en modélisant,

## Efficacité énergétique et industrie

simulant et optimisant la vitesse de laminage et les consommations énergétiques et, d'autre part, en contrôlant les aspects dimensionnels des barres, la répartition de la force de laminage, le remplissage des cannelures et autres paramètres importants. L'outil de modèles d'adaptation dimensionnelle ADM™ (*Adaptive Dimension Models*) et son interface homme-machine (IHM) conviviale ont été conçus pour aider l'opérateur de conduite à déterminer les réglages d'optimisation du laminage. Il permet d'effectuer des calculs complexes en moins d'une minute, souvent même en à peine 10 secondes.

L'outil ADM™ fonctionne sur un PC annexe placé dans la cabine de l'opérateur 1, à côté des écrans des systèmes de conduite des laminoirs RMC™ et de contrôle dimensionnel intercage (IDC™).

### Contrôle dimensionnel intercage pour stabiliser le laminage

La solution IDC™ a été développée pour les laminoirs à barres et à fils afin de réduire les tolérances dimensionnelles entre l'engagement et le dégagement des produits dans les cylindres de laminage de même qu'améliorer la qualité des produits, le rendement productif et la disponibilité des équipements. Qui plus est, elle raccourcit les temps de changement de profil et de dimensions, et détecte les signes avant-coureurs de conditions de laminage anormales pour des réglages plus cohérents et des schémas de passe plus performants.

La clé de voûte du système IDC™ est le capteur de profil U-gauge™ qui fournit en ligne les mesures dimensionnelles des barres 2.

Les données du système d'entraînement et du capteur de profil U-gauge™ sont transmises en ligne et en continu à l'outil ADM™ 3. Outre ces données, les calculs de simulation et d'optimisation du procédé nécessitent le réglage par l'opérateur de quelques paramètres. Le résultat des calculs est présenté sous forme de listes de réglages, de tableaux et de diagrammes, généralement affichés en quelques secondes seulement.

Ces calculs, conjugués à des algorithmes très rapides, permettent de réaliser, dans un laps de temps très court et de manière interactive, de nombreuses tâches d'optimisation du laminage. Après identification des réglages dont il a besoin, l'opérateur peut enregistrer les résultats sous la forme d'un nouveau programme de laminage RMC™ pour réutilisation ultérieure. En bref, l'outil ADM™ nécessite un minimum de configuration pour donner des résultats très appréciables.

### Maximiser les performances avec un minimum d'effort

Un laminage stable est obtenu avec un débit massique constant sur toute la ligne et des efforts entre cages réduits au minimum, tout particulièrement les contraintes compressives. Maintenir cette stabilité, de même que la précision dimensionnelle du produit fini, met au défi le savoir-faire de l'opérateur. L'outil ADM™ intègre des fonctionnalités supplémentaires qui

l'aident à comprendre l'évolution des conditions de laminage de la production en cours et à optimiser celles de la production suivante. Cet outil garantit donc la stabilité et le respect dimensionnel des produits tout en permettant à l'opérateur de maîtriser un très grand nombre d'aspects annexes importants sur lesquels il ne pouvait intervenir auparavant. La fonctionnalité clé du module d'optimisation d'ADM™ permet de *maximiser ou minimiser* les aspects de production sélectionnés tout en maintenant les aspects annexes et dépendants dans les contraintes autorisées 4.

### Réduire la consommation énergétique

Une des fonctions d'optimisation permet à l'opérateur de minimiser la consommation énergétique tout en

#### Encadré Pourquoi ça déraile ?

Un déraillement survient en cas de variation du débit massique lorsque les cylindres de laminage amont « alimentent » les deux cylindres de laminage aval avec plus de produits qu'ils ne peuvent en recevoir. L'origine du problème est une mauvaise évaluation des paramètres (écartement des cylindres de laminage, vitesse des moteurs, traction entre cages, etc.) qui affectent la déformation des barres dans les cannelures des cylindres de laminage et, donc, le débit massique du procédé.

Dans les laminoirs où les changements de profils sont fréquents, avec de petits lots de production, les risques de déraillement surviennent plusieurs fois par jour.

1 Cabine opérateur avec les systèmes de commande et de surveillance



2 Capteur de profil U-gauge™ pour la mesure dimensionnelle



définissant des limites supérieures et inférieures de largeur et de section des barres, de vitesse de laminage, de traction entre passes, d'écartement des cylindres de laminage et de vitesse des moteurs. Les dimensions finales et la vitesse de laminage à analyser sont toujours fixées sans aucune intervention humaine. A partir des valeurs des aspects sélectionnés, l'optimiseur de l'ADM™ résout le problème non linéaire de minimisation et fournit la valeur optimale de consommation énergétique du train de laminage, ou puissance **5**, de même que l'incidence des paramètres optimaux déterminés (en général, l'écartement des cylindres de laminage et les taux de réduction) sur la largeur, la section, la traction, etc. Les interdépendances complexes des paramètres du procédé sont gérées par des modèles de laminage cohérents mettant en relation débit massique, élargissement, traction entre passes, couple et puissance. Contrôler la largeur et la section des barres (on parle de *contrôle de remplissage des cannelures*) n'est pas seulement important pour réduire l'usure des cylindres de laminage mais aussi éviter d'endommager les barres en supprimant tout risque de débordement de la cannelure du cylindre. Si l'utilisateur devait, par inadvertance, paramétrer des valeurs incohérentes entraînant le franchissement d'un ou de plusieurs seuils, une fonction de diagnostic lui indique comment obtenir des valeurs admissibles en lançant une nouvelle fois ADM™.

### La preuve par l'exemple

Un exemple en vraie grandeur avec un train de 10 cages est résolu en moins de 10 secondes sur un PC standard avec des économies d'énergie potentielles de 10% pour des programmes de laminage réels. Le point de départ en **6** (itération «0») correspond aux réglages effectifs du train et l'historique des itérations illustre la convergence de la procédure d'optimisation ADM™ vers une consommation énergétique totale inférieure de près de 10% à celle de départ, soit des économies substantielles pour un train continu. De surcroît, ADM™ optimise un train virtuel de 20 cages en moins de 30 secondes.

Les autres objectifs d'optimisation incluent :

- *Maximisation de la vitesse de laminage*. A nouveau, les valeurs limites du système comme le couple, la vitesse et la puissance moteur maxi disponibles sont réglées de même que les limites définies par l'opérateur sur la base de son expérience et de son savoir-faire.
- *Adaptation de la puissance de chaque cage aux objectifs préétablis* (répartition de la charge) et
- *Adaptation de la largeur et de la section de chaque barre*, également selon les objectifs préétablis.

Ce dernier objectif est particulièrement important lorsque l'optimisation vise, avant tout, à contrôler le remplissage des cannelures. Les objectifs, les contraintes et les paramètres de contrôle des propriétés thermodynamiques et microstructurelles seront ajoutés ultérieurement à ADM™.

### Modélisation de la traction entre passes

Dans toutes les stratégies d'optimisation, la traction entre passes joue un rôle important et des restrictions garantissant la stabilité du laminage sans contraintes compressives peuvent être spécifiées, de même que des valeurs de consigne de traction. Un aspect unique de la modélisation est la manière dont les tractions modifient les dimensions des barres, à la fois dans les zones de déformation et entre les cages, alors que parallèlement le modèle global

maintient constant le débit massique. Cet aspect est non seulement absent des autres méthodes de modélisation mais il ouvre également la voie à une analyse cohérente des trains continus dans lesquels les dimensions des barres peuvent être contrôlées par des tractions entre cages relativement élevées.

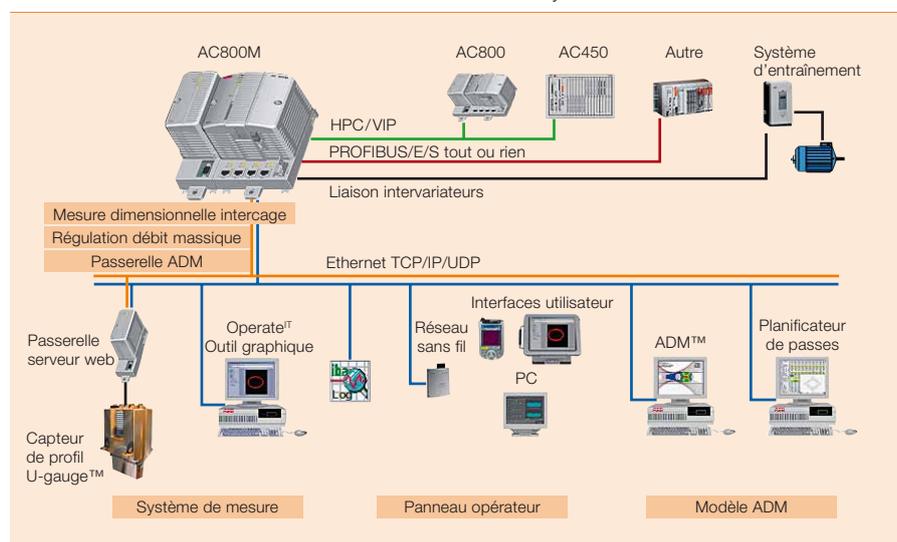
### Adaptation des modèles

L'optimisation peut concerner soit la production en cours, soit une production ultérieure à la suite d'un changement de profil. Pour la production en cours, les données en ligne des systèmes d'entraînement et les mesures du capteur de profil U-gauge™ servent à adapter le modèle pour renforcer sa précision. Les modèles de calibrage issus de productions précédentes peuvent également être utilisés pour optimiser le changement de profil si les conditions de laminage sont similaires. La logique de l'outil ADM™ choisit automatiquement le meilleur stragème d'adaptation des modèles. A l'évidence, il est intéressant d'adapter un modèle de puissance de laminage pour que les calculs de consommation énergétique soient plus précis.

### Simulations rapides pour analyse de sensibilités

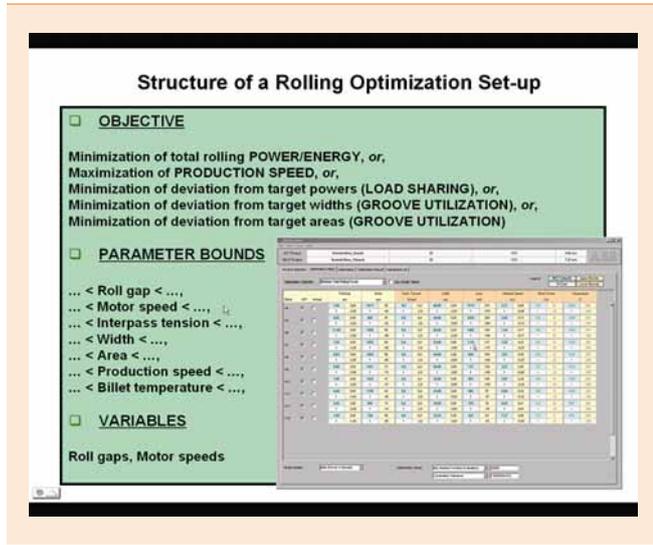
La fonctionnalité de simulation est une autre particularité de l'outil ADM™ qui permet de calculer rapidement des grandeurs telles que largeur et section des barres, vitesse de laminage, traction entre passes, etc. Les paramètres

**8** Composants du système IDC™ de contrôle dimensionnel intercage. L'outil ADM™ fonctionne sur un PC dédié raccordé au bus de communication du système.

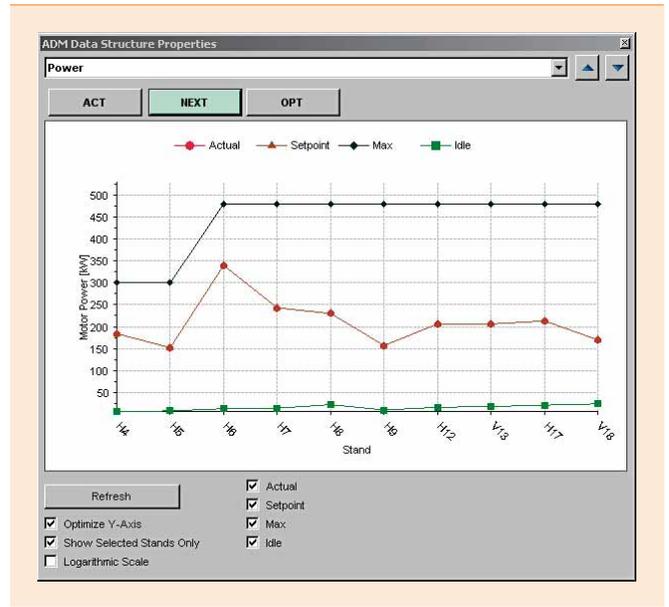


Efficacité énergétique et industrie

4 Réglage pour une optimisation non linéaire avec des choix objectifs, des contraintes de paramètres et des variables d'optimisation primaires (avec écran de saisie des données de l'outil ADM™)



5 Graphiques des grandeurs de puissance de laminage



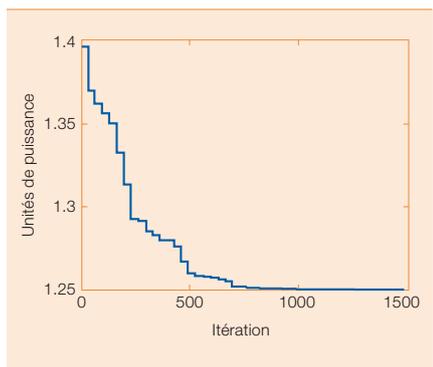
du procédé à entrer incluent l'écartement des cylindres de laminage et la vitesse des moteurs, ainsi que des informations sur les billettes et les cannelures des cylindres de laminage. Cette fonctionnalité est très utile pour analyser l'incidence de petites modifications ou perturbations sur les paramètres du procédé obtenus lors d'une optimisation (*analyse de sensibilités*). Une simulation ne prend que quelques dixièmes de seconde pour un train de 10 cages et un peu plus d'une seconde pour un train de 20 cages.

**Méthode statistique pour conditions de laminage et nature de matériaux incertains**

Supposons un nouveau matériau qui

doit être laminé pour la première fois mais dont les propriétés sont incertaines (essentiellement fluage ou résistance à la déformation). Pour anticiper les problèmes potentiels, l'opérateur désire connaître, par exemple, les marges de sécurité en terme de stabilité de laminage. Dans ce cas, une autre fonctionnalité de simulation de l'outil ADM™ fait une *évaluation statistique* de la probabilité de tractions entre passes supérieures aux valeurs autorisées. Cette fonctionnalité est basée sur la célèbre méthode de Monte Carlo qui a été adaptée aux modèles de laminage d'une manière inédite. Les résultats sont présentés sous la forme d'une probabilité de laminage stable pour les paramètres de configuration et du procédé immédiatement disponibles. En réalité, tous les types de résultats concernant les barres laminées, les cylindres de laminage et les entraînements précités peuvent maintenant être exprimés sous forme d'intervalles de confiance avec des seuils hauts et bas, plutôt que sous la forme d'une valeur spécifique obtenue par simulation déterministe ordinaire. On améliore ainsi également la précision des prédictions de consommation énergétique qui sont très sensibles aux propriétés de déformation des matériaux des barres.

6 Minimisation de la puissance de laminage totale (proportionnelle à l'énergie) d'un train de 10 cages suédois (cages intermédiaires et finisseuses), configuration pour la production de barres rondes de 20 mm de diamètre



**ADM™, un outil de référence pour les laminaires à chaud**

Il y a tout lieu de penser que le systè-

me ADM™ deviendra un outil de référence pour les opérateurs de conduite de laminaires dans leur quête de perfection. La convivialité de son IHM, sa robustesse et sa précision sont les pierres angulaires de la logique d'optimisation, de simulation et d'adaptation des modèles ADM™. Il constitue également un excellent outil de formation car il mutualise le savoir-faire et les pratiques de réglage des différents laminaires.

**Vers l'optimisation en ligne**

Les récents progrès dans les techniques d'optimisation numérique devraient ramener les temps d'optimisation à une ou deux secondes seulement. Un outil d'optimisation en ligne entièrement automatique serait idéal car il permettrait de réduire le nombre de billettes utilisées pour les essais. Plus précisément, l'optimisation et l'adaptation se feraient pendant le temps où la tête de barre se déplace entre les deux premières cages d'un train multicages.

**Anders Daneryd**  
**Rickard Lindkvist**  
 ABB Corporate Research  
 Västerås (Suède)  
 anders.daneryd@se.abb.com  
 rickard.lindkvist@se.abb.com

**Mats G Olsson**  
 ABB Automation Technologies  
 Västerås (Suède)  
 mats.g.olsson@se.abb.com

# Avis d'expert

Des solutions pour améliorer la performance énergétique des cimenteries

Matthias Bolliger, Eduardo Gallestey, Gabriela Crosley, Michelle Kiener

L'industrie cimentière est grosse consommatrice d'énergie thermique et électrique dont les coûts au niveau mondial sont en constante augmentation. Ces récentes années, les cimentiers ont fait d'importants efforts pour réduire cette consommation et alléger les coûts de production avec des équipements moins énergivores ainsi que des combustibles et des matières premières de substitution. Cette évolution a créé des contraintes qui doivent être maîtrisées pour satisfaire aux exigences de qualité et de productivité. Pour accroître la performance opérationnelle d'une cimenterie, dans les limites de ces contraintes changeantes, l'industriel doit trouver le bouquet énergétique au meilleur prix, acheter l'énergie électrique au moment opportun et réduire ses consommations. Cet article présente un certain nombre de solutions et d'outils lui permettant d'atteindre ses objectifs de production.

Efficacité énergétique et industrie

Optimiser la performance globale d'une cimenterie appelle une stratégie d'automatisation intégrée : réduction de la facture énergétique de tous les postes, recherche du point de fonctionnement optimal au vu des objectifs de productivité et de qualité, maîtrise des émissions polluantes. Pour aider les cimentiers à réaliser leurs objectifs, ABB a développé l'outil *Knowledge Manager* qui collecte les informations et données utilisées par le système *Expert Optimizer* servant à modéliser le procédé et à optimiser en permanence le mode d'exploitation de l'usine.

La réduction de la facture énergétique de tous les postes doit aller de pair avec la recherche du point de fonctionnement optimal au vu des objectifs de productivité et de qualité.

**Les variateurs de vitesse font la chasse au gaspi**

Dans une cimenterie, le four, le préchauffeur, les broyeurs et les filtres sont équipés de gros ventilateurs d'extraction. Le refroidisseur à grille est, quant à lui, doté de ventilateurs de soufflage plus petits qui abaissent la température du clinker chaud en

sortie du four [1]. Les débits d'air de tous ces ventilateurs doivent être régulés en fonction des conditions atmosphériques, des contraintes d'exploitation et des besoins de refroidissement, la méthode de régulation mise en œuvre ayant un fort impact sur les coûts de fonctionnement. Ainsi, par exemple, la régulation par action mécanique (registres) avec un moteur tournant à vitesse constante est la solution la plus énergivore alors qu'un ventilateur commandé par un variateur de vitesse offre la meilleure efficacité énergétique. Plus précisément, selon le débit requis, la consommation énergétique d'un ventilateur tournant à vitesse variable peut être inférieure de 70% à celle d'un ventilateur tournant à vitesse fixe [2].

Les ventilateurs constituent un formidable levier d'économie d'énergie du fait de la nature quadratique de la charge. En régime normal, les gros ventilateurs consomment environ 90% du débit nominal, ce qui représente encore un potentiel d'économie de 20%. De nos jours, les ventilateurs des nouvelles usines sont en général commandés en vitesse variable. Le remplacement du parc existant laisse augurer d'énormes gisements d'économie d'énergie, tout particulièrement en ce qui concerne les ventilateurs des refroidisseurs.

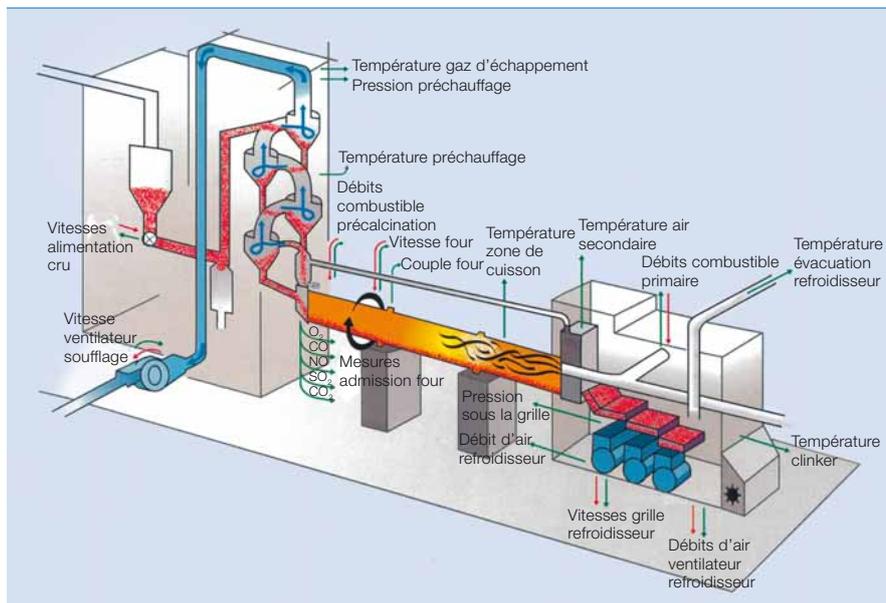
**Multidrive, solution optimisée pour les refroidisseurs à grille**

Près de 10% de l'énergie électrique nécessaire pour produire une tonne de clinker sert à son refroidissement ; le choix du système d'entraînement du refroidisseur nécessite donc une réflexion rigoureuse. Sur ce plan, le système *Multidrive* d'ABB, souvent perçu comme une solution optimisée, offre tous les avantages de la variation de vitesse sans la plupart des inconvénients – économiquement parlant – des variateurs *single drive* qui regroupent dans une même enveloppe un redresseur, un bus c.c. et un onduleur. Contrairement à ces derniers, *Multidrive* produit la tension continue requise dans une « unité centrale » qui alimente un bus c.c. commun auquel sont raccordés les différents onduleurs fonctionnant de manière indépendante [3]. Cette architecture permet de conserver toutes les fonctionnalités des *single drives* avec des convertisseurs pouvant être de puissance et de taille différentes.

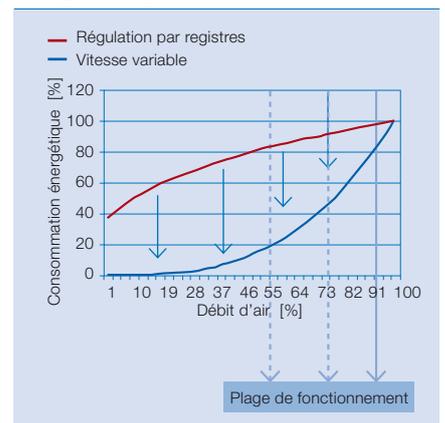
La solution *Multidrive* présente plusieurs atouts, notamment :

- Réduction du câblage avec un point de raccordement unique des différents convertisseurs ;
- Récupération de l'énergie de freinage d'un moteur par les autres moteurs en fonction du type de refroidisseur à grille ;
- Gain de place ;
- Suppression de l'appareillage basse tension utilisé par les variateurs *single drives* les registres et les moteurs en démarrage direct sur le réseau qui sont remplacés ;

1 Schéma de fabrication du clinker illustrant les étapes de préchauffage, de cuisson et de refroidissement avec les signaux d'entrée et de sortie d'un système *Expert Optimizer*



2 Courbes comparées consommation énergétique/débit d'air de la régulation par registres et par vitesse variable



- *Atténuation économique des harmoniques* par un redresseur actif ou, au moins, un redresseur en couplage dodécaphasé ;
- Tous les *avantages* d'un variateur *single drive* sont conservés.

### Gestion énergétique avec Knowledge Manager

*Knowledge Manager* (KM) est une solution avancée de collecte, gestion et diffusion des informations de production, de qualité et de consommation d'énergie de l'ensemble de l'usine. Ces informations sont disponibles en ligne sous forme de bilans, de courbes de tendance et de graphiques. Tous les indicateurs clés de performance du procédé sont calculés et affichés sur une même page. De plus, si l'opérateur désire maximiser la production en même temps que la consommation des différents combustibles, KM fournit les informations indispensables à une analyse de ce qu'il est possible de faire et de ce qui ne l'est pas.

Le système KM peut être adapté et enrichi pour répondre aux besoins spécifiques de chaque entreprise et fait partie de la suite applicative Inform<sup>IT</sup> d'ABB. Il simplifie considérablement la gestion de la production de ciment avec les fonctionnalités suivantes :

- Suivi et bilan de production
- Suivi et bilan des opérations du procédé
- Gestion des stocks de matières
- Bilan énergétique et des rejets polluants

Avec KM, il n'a jamais été aussi simple d'identifier l'incidence des paramètres

de production sur la qualité des produits, les capacités productives, la consommation d'énergie et le niveau des émissions. Il combine les données de production, la variabilité des procédés, les indices énergétiques et les paramètres de qualité en temps réel pour élaborer des bilans et des tendances complets et utiles permettant d'exploiter au mieux les ressources énergétiques, les équipements productifs, les stocks et les capacités de production.

Basé sur le système d'optimisation LINKman, *Expert Optimizer* associe la commande à base de règles avec des techniques modernes comme les réseaux neuronaux, la logique floue et la commande prédictive par modèle (MPC).

L'intégration avec les systèmes ERP (ex., SAP) est indispensable pour faire remonter les données de production de l'atelier et assurer la jonction avec les données de gestion. Ici, KM joue le rôle d'intermédiaire entre, d'une part, la conduite temps réel et son environnement de production et, d'autre part, les systèmes ERP transactionnels.

La consommation énergétique a un impact direct sur les coûts de production. Chaque opération consommant une quantité donnée d'énergie, KM suit la consommation en fonction des matières utilisées ou produites 4.

Disposant de la bonne information au bon moment, au bon endroit et au bon format, les décisions cadrent mieux avec les objectifs de l'entreprise, engendrant des gains de productivité et optimisant les procédés.

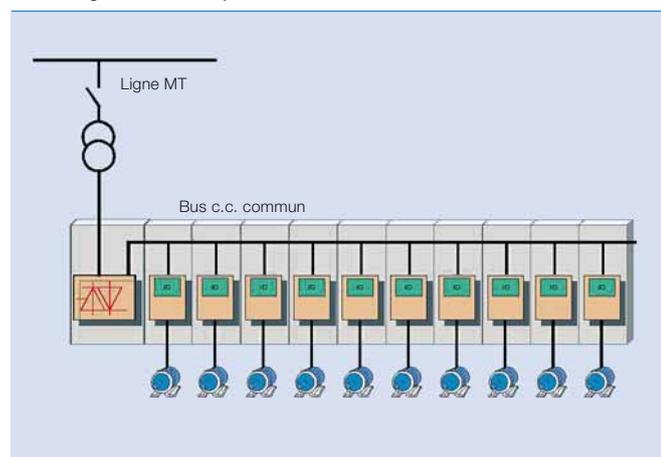
### Economies d'énergie thermique avec Expert Optimizer

La fabrication du ciment est un procédé complexe et gourmand en énergie. Une étape importante est la transformation des minerais ( $\text{CaCO}_3$ , argile et/ou calcaire) en clinker dans le four de cuisson. Une cimenterie type récupère les gaz brûlés du four pour préchauffer le cru avant de l'enfourner. Au fur et à mesure de la montée en température de la zone de cuisson (jusqu'à environ 1500 °C), les minerais fondent partiellement et réagissent pour former le clinker qui deviendra ensuite du ciment. De faibles quantités de gypse ( $\text{CaSO}_4$ ) sont ajoutées et le mélange est finement broyé en poudre.

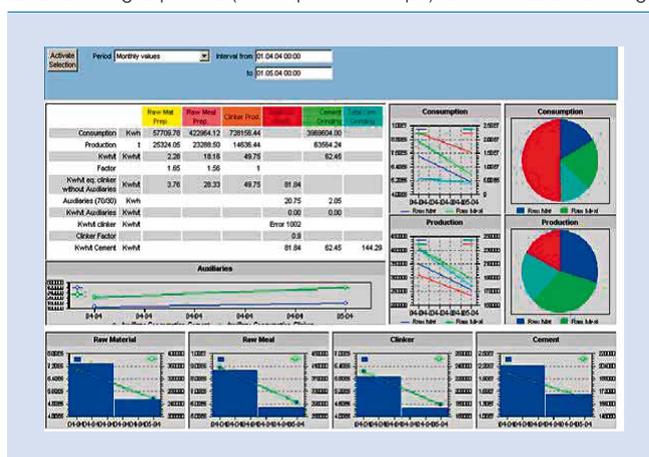
Traditionnellement, on s'en remet à l'expérience d'un « cuiseur » qui agit sur les commandes du four, interprétant constamment les conditions réelles d'exploitation pour ajuster fréquemment les valeurs de consigne. En plus d'être coûteuse, cette opération est rendue difficile par des réactions complexes, des retards et des interactions entre les différentes variables qui font que l'industriel adopte une approche prudente dans le pilotage de son four, avec des températures supérieures à l'optimum et, donc, une surconsommation énergétique.

*Expert Optimizer* est fondé sur le système d'optimisation LINKman, outil

3 Configuration d'un système *Multidrive*



4 Bilan énergétique total (thermique et électrique) avec indicateurs d'énergie



très réussi et apprécié pour ses performances. Il associe la commande à base de règles avec des techniques modernes comme les réseaux neuro-naux, la logique floue et la commande prédictive par modèle (MPC) **Encadré**. *Expert Optimizer* améliore les techniques traditionnelles de commande en interprétant constamment l'état réel du four et en enclenchant les actions appropriées. Les différents signaux d'entrée et de sortie sont illustrés en **1**.

Un fonctionnement optimal et stable du four peut réduire la consommation énergétique et les coûts de maintenance, accroître son rendement et améliorer la qualité globale des produits. Toutefois, si un fonctionnement optimum suppose de maintenir la température de la zone de cuisson<sup>1)</sup> à des valeurs minimales imposées par les besoins de stabilité, trois facteurs compliquent la tâche :

- Variations de la composition du cru
- Complexité du fonctionnement du four
- Faible réactivité aux modifications d'exploitation du four (changements de consignes et leurs incidences)

Le système *Expert Optimizer* de commande avancée des fours trouve, toutefois, un optimum qui garantit un produit de bonne qualité et une température de zone de cuisson plus basse pour alléger la facture énergétique. Il y parvient en appliquant le niveau adéquat d'expertise de manière cohé-

rente et régulière, c'est-à-dire en apportant des modifications fréquentes (toutes les 3 ou 4 minutes).

De manière générale, *Expert Optimizer* pilote les fours pendant plus de 80 % de leur temps de fonctionnement. Des calculs basés sur les mesures de teneur en chaux libre et d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>) avant et après installation du système montrent que, dans certains cas, les économies de combustible frôlent les 8 % par four.

#### Optimisation énergétique des fours de cuisson

Depuis quelques temps, le marché attendait des outils de gestion optimale des sources d'énergie, à la fois traditionnelles et alternatives, utilisées par les fours. C'est pour cette raison que le système *Expert Optimizer* s'est récemment enrichi d'un *Module d'optimisation énergétique* qui permet aux fours de cuisson d'atteindre de nouveaux sommets de performances économiques.

Ce module utilise les données collectées par les systèmes de gestion de l'information (équipements, procédés, marché et laboratoire) pour calculer en ligne les sources d'énergie les plus économiques au vu des nombreuses contraintes de production et de gestion, dont les plus importantes sont :

- Bilan thermique
- Niveau d'oxygène excédentaire
- Composition chimique du clinker
- Concentration en matières volatiles
- Limites d'émissions polluantes (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, etc.)
- Contraintes de vitesse des actionneurs (seuils maxi et mini, rythme de variation)

- Contraintes opérationnelles de consommation de combustible
- Spécificité de la combustion dans le préchauffeur et le four
- Obligations contractuelles (vis-à-vis des clients ou des fournisseurs) à respecter à tout prix

L'élément de base de cet algorithme d'optimisation est un modèle mathématique spécial du four développé dans le système *Expert Optimizer* et utilisé pour implémenter le régulateur (prédictif) **5**. Ce modèle peut calculer les températures du refroidisseur, de la flamme, de la zone de cuisson, de la partie terminale et du réchauffeur, les besoins en énergie du four, le niveau des émissions polluantes et des matières volatiles, etc. Les algorithmes d'optimisation peuvent tenir compte des contraintes à la fois « dures » (à respecter absolument) et « molles », gages de robustesse et de fiabilité du procédé d'optimisation.

Les données d'entrée sont rafraîchies toutes les 15 à 30 minutes, les calculs sont réalisés et les nouvelles consignes de combustible sont transmises au module de stratégie de *Expert Optimizer* qui les met en œuvre. Entre les périodes de rafraîchissement, la stratégie standard de *Expert Optimizer* garantit la stabilité du procédé et maximise ses performances. En particulier, elle assure

#### Encadré Commande prédictive par modèle (MPC)

(extrait de la *Revue ABB* 2/2004, p. 13-19)

Des solutions optimales peuvent être élaborées de plusieurs manières. Une approche largement utilisée pour résoudre les problèmes de commande des systèmes soumis à des contraintes d'entrée et de sortie est la commande prédictive par modèle. Celle-ci est basée sur le principe de « l'horizon fuyant » : une séquence d'actions de régulation optimisées est obtenue par prédiction de l'évolution à court/moyen terme du comportement du système dans un temps donné. Dès que des mesures ou de nouvelles données sont disponibles, une nouvelle séquence est calculée et remplace la précédente. Chaque séquence a pour but d'optimiser les performances et de protéger le système des dépassements de contraintes.

#### Note

<sup>1)</sup> La température de la zone de cuisson permet de prédire la qualité du produit : trop faible, le clinker ne sera pas assez cuit ; trop élevée, il sera surcuit.



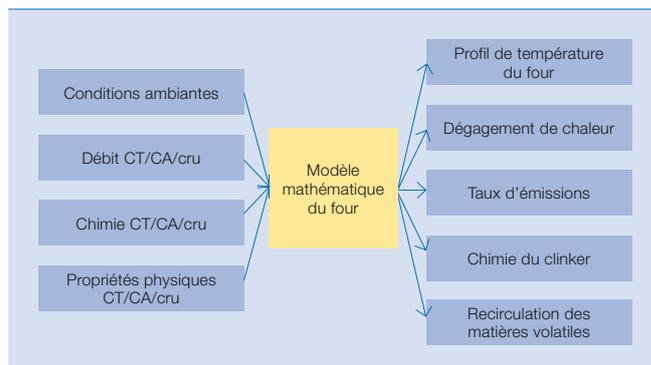
une réactivité optimale de la production à l'évolution du rendement énergétique, des déchets et de la qualité du cru, tout en garantissant le strict respect des contraintes environnementales, contractuelles et techniques.

### Gestion de l'énergie électrique

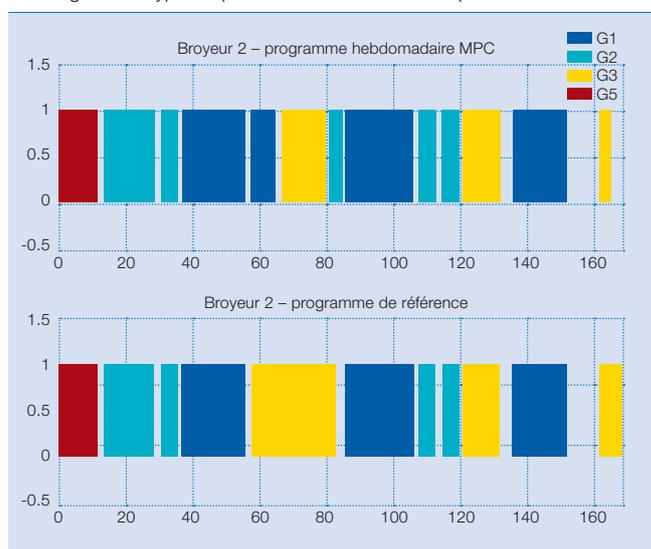
Une cimenterie tourne 24 h/24 avec très peu de capacités de réserve ou d'équipements redondants. Ainsi, l'appareil productif fonctionne jour et nuit ou, en cas de contraintes spécifiques, uniquement la journée, ce qui est notamment le cas de la carrière. Les marges de manœuvre pour la consommation d'électricité sont donc très étroites et limitées pour l'essentiel aux broyeurs. Dans ce cas, les programmes de fabrication (produire telle qualité de ciment dans tel broyeur) sont élaborés manuellement par des méthodes empiriques. Or le grand nombre d'équipements différents, de catégories de ciment et de silos, auxquels s'ajoutent les différentes contraintes opérationnelles et contractuelles, compliquent la tâche. Trop souvent, le choix des opérateurs est loin d'être optimal. La solution de commande MPC décrite ci-après permet d'optimiser, dans ce cas précis, le programme de fabrication.

Une séquence de production type pour les qualités de ciment programmées avec une gestion efficace de l'énergie électrique est illustrée en 6. A partir des commandes clients et des prévisions de coût des sources d'énergie, l'algorithme élabore un programme de référence pour le procédé de broyage complet, définissant le produit fabriqué par chaque broyeur et l'ordre de priorité. Ici, la fonction Coût modélisée est liée à la consommation d'électricité et à la quantité de ciment de moindre qualité fabriquée (ciment produit pendant les changements de fabrication). La facture d'électricité est réduite en produisant pendant les tranches tarifaires les plus économiques et en pilotant les broyeurs au maximum de leurs capaci-

5 Entrées et sorties du modèle type du four de cuisson



6 Programme type de production de différentes qualités de ciment



tés sans franchir les seuils contractuels de consommation électrique. La production de ciment de moindre qualité est réduite en limitant le nombre de changements de fabrication.

Outre les contraintes physiques imposées par la capacité des silos et la disponibilité des broyeurs, d'autres contraintes sont à prendre en compte :

- **Temps de changement de fabrication**: un changement de fabrication peut être source de retard au cours duquel la production du broyeur est acheminée vers un silo spécifique.
- **Exécution des commandes**: l'algorithme d'optimisation exige, en entrée, les prévisions des ventes pour chaque qualité de ciment. Si elles ne peuvent être complètement satisfaites, l'algorithme choisira la qualité à produire en premier en fonction des priorités fixées.
- **Système de transitique**: qu'il s'agisse de bandes transporteuses, d'élévateurs

à godets ou d'aéroglossières, des contraintes existent pour le transport du ciment entre les broyeurs et les silos. Ainsi, par exemple, le site peut comporter trois broyeurs pour seulement deux systèmes de transitique. Cependant, plusieurs broyeurs peuvent simultanément décharger la même qualité de ciment sur le même système de transitique. Seule restriction : un système ne peut desservir qu'un silo à la fois et les silos n'être servis que par un système à la fois.

### Conclusion

Vous l'aurez compris, la gestion énergétique de la production vise à optimiser les procédés dans le but de diminuer la consommation d'énergie thermique et électrique et/ou de réduire les coûts en utilisant des combustibles et un bouquet énergétique plus économiques. Aujourd'hui, des équipements fiables et des solutions techniques éprouvées existent pour tirer le maximum des ressources énergétiques disponibles sans pénaliser ni la qualité, ni la productivité d'un site industriel. Les différentes solutions

intégrées de cet article – variateurs de vitesse, *Expert Optimizer* et *Knowledge Manager* – illustrent à merveille la manière dont une stratégie intégrée d'automatisation industrielle permet d'atteindre les objectifs fixés. Les prix énergétiques continuant de fluctuer (avec une tendance générale à la hausse), le retour sur investissement est en général rapide avec, en plus, un impact positif sur l'environnement; de quoi améliorer les résultats financiers de l'entreprise.

**Matthias Bolliger**  
**Eduardo Gallestey**  
**Gabriela Crosley**  
**Michelle Kiener**

ABB Automation Technologies  
 Baden (Suisse)  
 matthias.bolliger@ch.abb.com  
 eduardo.gallestey@ch.abb.com  
 gabriela.crosley@ch.abb.com  
 michelle.kiener@ch.abb.com

# Plus propre, plus productif

Efficacité énergétique et productivité, mots d'ordre de l'activité Systèmes de peinture d'ABB

Hubert Labourdette

L'application de peinture est un procédé industriel complexe dans lequel ABB a acquis une très grande expérience. Au fil des ans, l'activité Systèmes de peinture du groupe a développé des solutions destinées à renforcer la productivité des ateliers industriels de peinture et à améliorer la qualité de finition. Ainsi, le secteur des biens de consommation et les constructeurs automobiles les utilisent pour peindre des produits aussi différents que les voitures, les téléphones mobiles, les moteurs marins, les engins de levage, etc.

Or de nombreuses peintures contiennent des solvants organiques dangereux à la fois pour l'homme et pour l'environnement. Soumis à forte pression pour réduire leurs rejets polluants et leurs coûts de production, les industriels sont en quête de produits, solutions et services optimisés. L'optimisation des cabines de peinture pose un problème crucial qu'ABB a résolu avec succès en développant un système de recirculation d'air doublé d'une solution ultramoderne d'économie d'énergie que nous décrivons dans cet article.

L'application de peinture est un procédé industriel parmi les plus complexes, aux contraintes nombreuses et concomitantes, notamment :

- *Excellente qualité de finition* avec un environnement parfaitement contrôlé : température, vitesse d'air, hygrométrie et absence de poussières ;
- *Minimisation des consommations* de peinture et de solvant avec les robots et pulvérisateurs ABB ;
- *Moindre exposition des opérateurs aux solvants* pour protéger leur santé ;
- *Réduction de la facture énergétique* qui représente entre 25 et 30% du coût du procédé d'application de peinture ;
- *Respect de la réglementation anti-pollution* avec le traitement des composés organiques volatils (COV) des peintures aux solvants et les économies d'énergie.

ABB minimise déjà les consommations de peinture avec son système de cartouches [1] qui équipe aujourd'hui la majorité des constructeurs automobiles. Une nouvelle génération de robots de peinture [1], lancée en 2006, réduit de manière spectaculaire la présence humaine dans les zones polluées avec un procédé entièrement robotisé.

#### Pourquoi optimiser les cabines de peinture ?

Le fonctionnement d'une cabine de peinture type est illustré en [2]. Une unité d'injection d'air (1) traite l'air capté à l'extérieur, contrôlant sa température, son hygrométrie et sa teneur en poussières. Cet air propre pénètre dans la cabine par le toit (2) à une vitesse verticale constante où il se charge de solvant et de peinture pulvérisés (3). L'air pollué est lavé dans le venturi (4) où l'eau mélangée à la peinture récupérée est envoyée dans la cuve de traitement des rejets (5) alors que l'air mélangé au solvant est évacué dans l'atmosphère (6).

Ce mode de fonctionnement est très énergivore car de

grandes quantités d'air extérieur (plusieurs centaines de m<sup>3</sup>/h) doivent être traitées. De plus, le mélange d'air et de solvant rejeté dans l'atmosphère ne respecte plus la réglementation sur la protection de l'environnement. Ces deux raisons militent, à elles seules, pour l'optimisation des cabines de peinture.

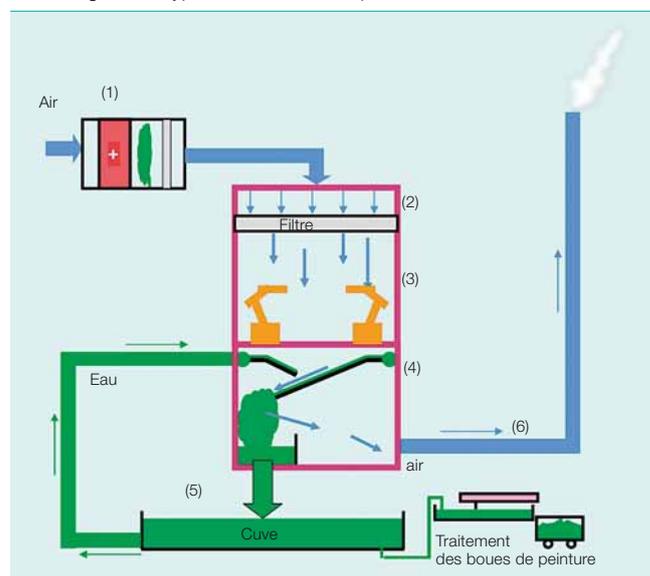
#### Solution ABB d'optimisation

Pour résoudre simultanément tous ces problèmes, ABB a développé une solution qui associe un système de recir-

1 Robot de peinture de nouvelle génération



2 Configuration type d'une cabine de peinture



culcation d'air, un dispositif de récupération des solvants et un système d'économie d'énergie, respectant ainsi en tous points la réglementation anti-pollution. Elle peut uniquement être intégrée aux installations entièrement robotisées, ce qui est de plus en plus le cas des applications de peinture depuis le lancement de la nouvelle génération de robots de peinture ABB.

ABB a développé une solution qui associe un système de recirculation d'air, un dispositif de récupération des solvants et un système d'économie d'énergie, respectant ainsi en tous points la réglementation antipollution.

#### Système de recirculation d'air

Le système de recirculation d'air de la cabine de peinture est illustré en [3]. Après lavage (4), l'air pollué n'est pas rejeté dans l'atmosphère, mais recyclé à 90% dans la cabine une fois traité (8). Non seulement ce système permet de réutiliser l'air, mais le taux de concentration de solvant dans la cabine autorise une optimisation complète du procédé de destruction des solvants. Ce taux est contrôlé et maintenu dans les limites de sécurité. Un conduit spécial prélève 10% du débit d'air pour l'envoyer à un oxydateur thermique de régénératif (7). Ce prélèvement est compensé par la prise d'une faible quantité d'air externe (1).

Ce procédé particulièrement stable est très peu influencé par les conditions externes. Pour autant, il nécessite un procédé de lavage efficace (4) (venturi) et une filtration de l'air très performante.

#### Oxydateur thermique de régénératif

Le solvant est détruit par cuisson à 800 °C. Grâce au procédé de recirculation, l'air est saturé de solvant ; il passe dans une chambre céramique

Efficacité énergétique et industrie

4 où sa température est élevée à 780 °C pour ensuite pénétrer dans une chambre de combustion. A cette température, un phénomène d'auto-combustion se produit qui détruit totalement les solvants. L'air exempt de solvant, chauffé à 835 °C, passe ensuite dans une seconde chambre céramique où il est refroidi à +60 °C avant d'être évacué dans l'atmosphère.

A l'exception de la phase de mise en route, la consommation énergétique de ce système est pratiquement nulle et son rendement thermique proche de 95 %.

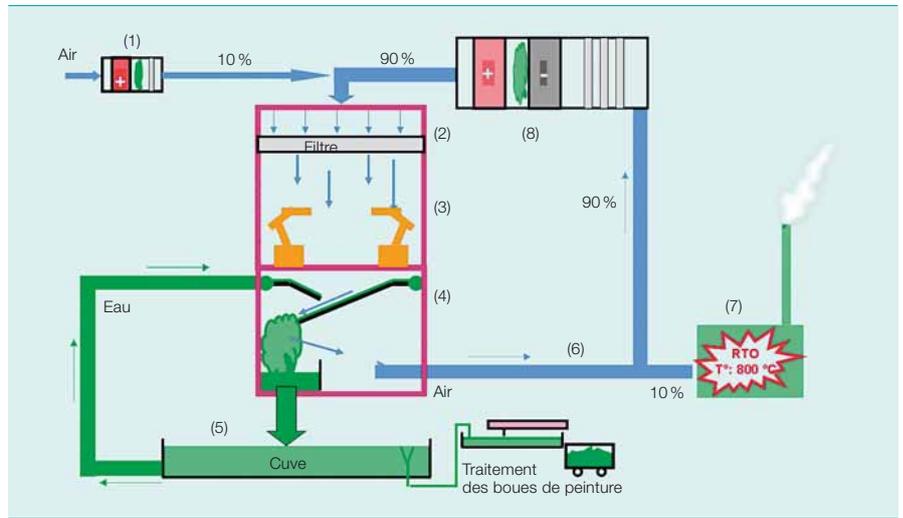
Le débit est périodiquement inversé pour augmenter la température de la céramique. A l'exception de la phase de mise en route, la consommation énergétique de ce système est pratiquement nulle et son rendement thermique proche de 95%. Le procédé respecte scrupuleusement la législation sur l'environnement de presque tous les pays.

Economies d'énergie et d'eau

Les paragraphes précédents ont démontré que les solvants étaient détruits sans apport d'énergie. Une autre source importante d'économie est le procédé de traitement de l'air extérieur 3 (1). Par rapport à un procédé traditionnel, celui d'ABB réduit la quantité d'air frais utilisée – et donc la consommation énergétique – par un facteur de 10! Il nécessite, toutefois, un nouvel équipement 3 (8) (cf. détail en 5 du procédé de recirculation). Ce procédé a intégralement été optimisé dans un but d'économies d'énergie. Après lavage (A), l'air est trop humide pour être réintroduit directement dans la cabine (C). Il est alors séché par condensation.

Après passage dans une filtration de l'air, la température de

3 Procédé de peinture avec préchauffeur d'air et oxydateur thermique de régénératif



celle-ci est abaissée à 14 °C (B) pour condenser l'eau et ensuite immédiatement ramenée à 19 °C. Pour atteindre l'optimum indispensable à une bonne application de peinture, on augmente la température de l'air de 2 °C au travers d'un ventilateur. A l'étape de condensation, toute l'eau est collectée et renvoyée vers le laveur. On crée ainsi un circuit d'eau fermé avec, à la

clé, de substantielles économies. Dans un système traditionnel, le mélange d'eau et d'air est évacué à l'extérieur tandis qu'une eau fraîche est utilisée dans le laveur.

Un système de refroidissement, directement relié au dispositif de traitement de l'air, est utilisé pour la première étape de refroidissement de l'air. Or,

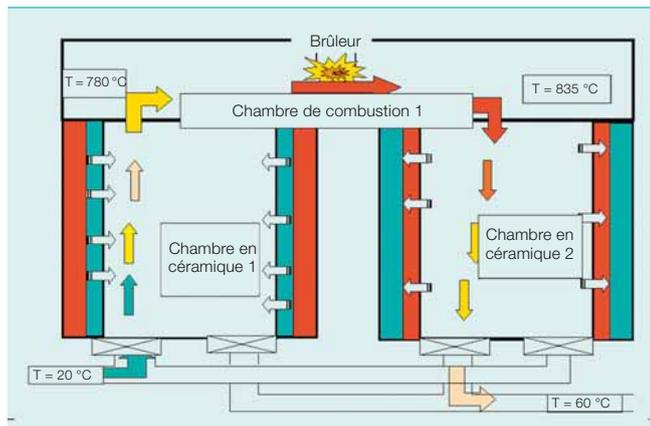
comme tous les systèmes de ce type, il génère de grandes quantités de chaleur qui ne posent pourtant aucun problème car celle-ci est utilisée par la deuxième étape de chauffage de l'air, réduisant ainsi la consommation énergétique.

A l'étape de condensation, toute l'eau est collectée et renvoyée vers le laveur, créant ainsi un circuit d'eau fermé avec, à la clé, de substantielles économies.

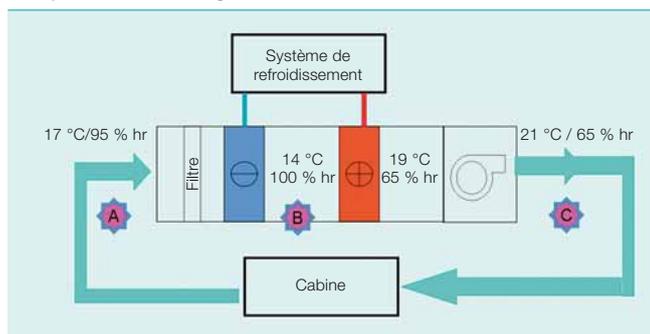
Mise en œuvre du système

Le système de recirculation d'air d'ABB peut non seulement équiper les usines nouvelles, mais également des sites existants pour en améliorer les performances.

4 Chambre de circulation d'air



5 Système de chauffage et de refroidissement d'air



6 Laveur d'air compact et transportable



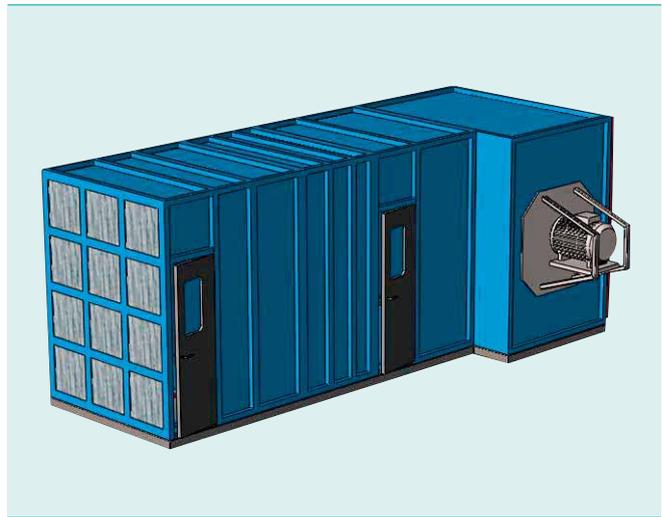
Ce dernier cas, cependant, pose une difficulté supplémentaire car toutes les modifications, y compris la mise en route et la mise en service, doivent être menées à bien au cours des deux ou trois semaines d'arrêt annuel normal (congés d'été ou de Noël). Pour ce faire, ABB a développé avec succès une gamme de modules selon le principe du « prêt-à-produire » 6 et 7.

Pratiquement tous les éléments de ces modules incluent des produits issus d'autres divisions d'ABB (automates, variateurs de vitesse, instrumentation, etc.) et constituent, à ce titre, un bon aperçu de l'offre ABB. Ces éléments sont pré-assemblés dans une structure temporaire à proximité de l'atelier de peinture existant. Dès que la production est arrêtée, l'ancien équipement est partiellement démonté et les nouveaux modules intégrés à la ligne de peinture.

#### Quels avantages pour le client ?

Ce système offre des conditions d'exploitation très stables car indépendantes des variations climatiques extérieures, se traduisant par une nette amélioration de la qualité. Une nouvelle installation est très compacte avec une surface au sol nettement inférieure à celle de l'ancienne installation et une conformité totale à la réglementation sur l'environnement. La facture énergétique est réduite de près de 30 % par rapport à celle des lignes existantes, soit une baisse de 9 % du coût d'exploitation annuel du procédé de peinture.

7 Module de traitement d'air et de refroidissement compact et transportable



Les clients tirent profit du formidable savoir-faire technique acquis par les ingénieurs ABB dans les nombreuses installations de peinture à travers le monde. Leur expérience est indispensable pour optimiser le système dans son ensemble. De surcroît, ils disposent d'une installation où la pulvérisation manuelle est remplacée par une solution robotisée, domaine dans lequel ABB est leader mondial.

La facture énergétique est réduite de près de 30 % par rapport à celle des lignes existantes, soit une baisse de 9 % du coût d'exploitation annuel du procédé de peinture.

#### Economies de peinture

Le système de recirculation nécessite un procédé intégralement robotisé qui engendre des économies supplémentaires en réduisant les consommations de peinture (donc les coûts) et l'impact sur l'environnement. Les robots équipés de la dernière génération de pulvérisateurs ABB accroissent le coefficient de transfert (pourcentage de peinture qui adhère à la pièce sur la quantité totale de peinture pulvérisée). Qui plus est, le procédé de peinture est surveillé par un programme très élaboré qui contrôle avec précision tous les paramètres d'application de peinture sur la voiture.

Le robot est désormais devenu incontournable pour l'industriel qui veut non seulement réduire ses consommations de peinture mais également éviter à son personnel tout contact avec des substances chimiques particulièrement dangereuses [photo p. 58](#).

Cette solution unique d'ABB est un vecteur de productivité qui allège la facture énergétique et diminue les rejets polluants.

#### Hubert Labourdette

Global Lead Center for  
Paint Process Automation  
Saint Ouen l'Aumône (France)  
hubert.labourdette@fr.abb.com

#### Bibliographie

- [1] Osamu Yoshida, *Couleurs à volonté ! Avec son système de cartouches de peinture, ABB concilie économie et écologie*, Revue ABB, 1/2006, p. 43-46

# Carburants verts: un écobilan en demi-teintes

Le rêve d'un carburant automobile issu de la biomasse, écologique et économiquement viable, progresse de jour en jour, porté par des directives et des mesures d'incitation des pouvoirs publics. Ainsi, le 15 février 2007, l'Union européenne (UE) stipulait qu'en 2020 tous les carburants pour voitures devront incorporer 10 % d'éthanol à l'essence ou de méthanol au gazole. Ces deux alcools résultent de procédés de fabrication différents : l'éthanol est obtenu par fermentation et le méthanol par gazéification (le gaz de synthèse, brut mais propre, est transformé en biodiesel).

A ce jour, le Brésil dépasse déjà l'objectif de l'UE pour 2020 en utilisant de l'éthanol issu de la canne à sucre, alcool que le pays produit depuis 1925. Le programme Pro-Alcool, lancé en 1975, a permis d'atteindre dès 1993 un taux d'incorporation de 20 à 25 %. Ce vaste pays exploite 313 usines d'éthanol et, au vu des perspectives d'exportation, 89 usines supplémentaires sont prévues. La demande en biodiesel, issu de l'huile de palme ou du soja, est également en forte hausse : aux 10 usines existantes s'ajouteront bientôt 100 autres.

Les Etats-Unis produisent de plus en plus leur éthanol à partir du maïs et du blé ; l'Europe teste, quant à elle, la production d'éthanol à partir de céréales, de betterave sucrière et de cellulose végétale issue d'herbe, de branches d'arbres, de racines et de souches. Les nouvelles usines combinées offrent de bien meilleures perspectives économiques. Les déchets de la production d'éthanol servent à produire du méthanol pour le biodiesel.

En Suède, l'industrie papetière s'essaie actuellement avec succès à la gazéification de la liqueur noire pour produire du biodiesel. D'autres pays misent sur le méthane, biocarburant issu de divers déchets, pour alimenter leurs flottes de bus urbains et de petits utilitaires.

La production des différents biocarburants dépend de la disponibilité de matières premières dans la région concernée. Pour autant, s'agit-il d'une solution pérenne, propre et économiquement viable ? Les avis sont nuancés et l'écobilan passe difficilement le cap d'une analyse rigoureuse. Il y a quelques années, par exemple, le gouvernement néerlandais décida de fabriquer du biocarburant à partir d'huile de palme importée, projet de prime abord parfaitement viable et écologique. Une étude récente a dénoncé les conséquences de la demande énergétique croissante : les forêts tropicales humides d'Asie du Sud-Est ont été brûlées, rejetant d'importantes quantités de CO<sub>2</sub>, pour être rempla-

cées par des palmiers qui nécessitent des engrais. A l'échelle de la planète, le projet néerlandais ne tient plus la route. La qualité environnementale d'un biocarburant n'est appréciable qu'à l'aune de l'ensemble de la chaîne de production.

Si bon nombre de ces technologies sont à l'initiative des pouvoirs publics, elles doivent, sur le long terme, être rentables.

Pour être écologiquement et financièrement viable, un biocarburant doit s'inscrire dans la durée à tous les points de vue et contribuer véritablement à réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. De nombreux projets en cours ne respectent pas ces critères, alors qu'une poignée d'autres sont les dépositaires de l'avenir « vert » dont nous rêvons tous.



## La Suède roule propre

Deux usines de biogaz d'un grand intérêt sont entrées en service en Suède fin 2006. Porte-drapeaux de la lutte contre le réchauffement climatique, les villes de Borås et de Göteborg font rouler leur flotte de véhicules municipaux (utilitaires, bus, etc.) au biométhane obtenu à partir d'un mélange de déchets domestiques et industriels. La volonté accrue de freiner les émissions de CO<sub>2</sub> dans les transports a débouché sur des initiatives et des mesures incitatives (réductions des taxes et autres impôts, gratuité du stationnement dans les grandes villes du pays) visant à mettre au vert le parc automobile. Le biogaz s'est rapidement imposé comme une alternative aux carburants d'origine fossile.

Läckeby Water, entreprise privée du Sud du pays, a fourni les équipements de production de l'usine : modules de tamis à tambour, échangeurs de chaleur, filtres, décanteurs et desableurs. Le procédé a été conçu pour fabriquer un mélange aux critères spécifiques. Le biogaz produit est traité selon la technique spéciale Cooab qui ne rejette que 0,1% de méthane dans

l'atmosphère (contre 2 à 4% avec d'autres méthodes). Outre la réduction des émissions de gaz à effet de serre, cette technologie permet de transformer davantage d'énergie en biogaz utile.

A pleine capacité, les usines de Borås et de Göteborg produiront respectivement 25 GWh et 60 GWh par an.

Pour sa part, ABB a fourni le système d'automatisation et les équipements électriques (moteurs, variateurs de vitesse et appareillages). En participant à des projets de ce type pour produire du biogaz, les ingénieurs ABB acquièrent un savoir-faire pouvant être ré-exploité pour développer des solutions applicatives modulaires. Aujourd'hui, la Suède est numéro un mondial de la production de biométhane pour véhicules routiers, avec une longueur d'avance dans la maîtrise et le développement technologiques.

A pleine capacité, les usines de Borås et de Göteborg produiront respectivement 25 GWh et 60 GWh par an, celle de Göteborg étant la plus importante au monde. Le gaz issu de la décomposition des déchets biologiques est lavé et purifié pour alimenter en biométhane la flotte municipale. On estime à

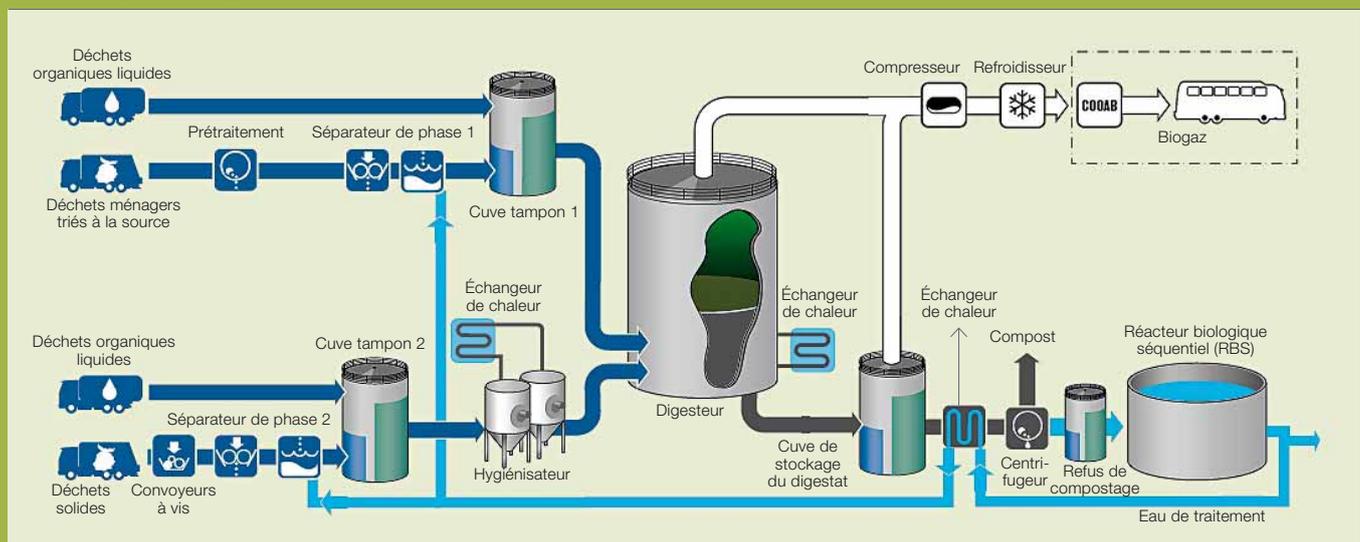


plus de 20 000 tonnes par an la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> résultant de cette initiative.

Läckeby Water a déjà à son actif 4000 projets de différentes ampleurs dans 68 pays à travers le monde. Dopées par des incitations fiscales, les ventes de voitures roulant au biogaz ont augmenté de 50% en 2005, de quoi créer de nouveaux débouchés pour Läckeby Water et ABB. On estime que la création d'autres usines en Suède engendrera, d'ici à 2020, 60 000 emplois, soit le nombre de postes perdus par le secteur manufacturier au cours des cinq dernières années. Une perspective très gratifiante tant sur le plan écologique que politique.

**Nils Leffler**  
nils.leffler@ch.abb.com

Usine de biogaz de 2<sup>ème</sup> génération de Sobacken



## Energies alternatives

## L'éthanol au service de sa Majesté

La Thaïlande produit des biocarburants pour réduire sa dépendance vis-à-vis du pétrole et du gaz naturel. Dans ce domaine, les projets portent sur l'utilisation active de matières organiques bon marché. En réalité, la production de gazohol (mélange d'éthanol et de supercarburant) a débuté en Thaïlande dès 1985, avec le projet de Sa Majesté le roi Bhumibol Adulyadej qui visait la production d'éthanol à partir de jonc. Par la suite, les secteurs public et privé ont pris conscience du potentiel économique de cette filière, contribuant à la mettre au point et à la tester.

En Thaïlande, huit grands producteurs jouissent actuellement d'un agrément d'Etat pour la fabrication d'éthanol, dont l'entreprise Thai Agro Energy Co., client d'ABB. Son usine de Dan Chang, dans la province de Suphan Buri, est conçue pour produire 150 000 l/j d'éthanol à partir de la mélasse. Pur à 99,5%, cet éthanol est destiné à être incorporé à hauteur de 10% au super. Appelé gazohol, ce mélange se présente comme un carburant alternatif pour véhicules automobiles.

Au début du projet de Thai Agro Energy en 2004, la société française Maguin SAS, spécialisée dans la construction d'usines de transformation de la biomasse, a demandé à ABB de lui faire une proposition pour la fourniture des équipements électriques et de contrôle-commande. Au terme de nombreuses présentations, discussions et évaluations avec son client, ABB emporta la commande d'un départ-moteur pour le moteur 380 V, du système d'automatisation de la conduite du procédé de fabrication, de la supervision sur site et de la mise en service. ABB s'est ainsi vu confié les études de conception et de détail, la programmation des logiciels appli-



catifs, la conception et la fabrication des panneaux de commande et du départ-moteur, les recettes usine et sur site et, enfin, la mise en service globale. La production d'éthanol débuta au premier trimestre 2005.

Le système d'automatisation ABB compte deux interfaces opérateurs *Process Portal*, un contrôleur AC 800M et des blocs S800 pour 450 signaux d'E/S. La plate-forme d'automatisation de dernière génération d'ABB, *Industrial<sup>IT</sup> 800xA*, est un système intégré d'amélioration de la productivité industrielle. En fédérant toutes les données clés fournies par l'instrumentation de terrain, *Process Portal* présente des écrans personnalisés avec listes d'alarmes, graphiques, vues de contrôle et courbes de tendance. Les opérateurs de conduite sont parfaitement à l'aise pour travailler efficacement dans l'environnement Windows XP qui leur est familier. Avec *Process Portal*, ils peuvent, par exemple, démarrer ou arrêter un moteur, un signal de retour leur indiquant son état. Plusieurs vues de contrôle peuvent être affichées simultanément. Les opérateurs sont également en mesure d'identifier l'origine des alarmes ; les courbes de tendance constituent, à ce titre, un excellent outil d'analyse car elles permettent d'examiner et de diagnostiquer en profondeur l'état du procédé à partir des données temps réel ou historiques. Des bilans programmés et à la demande sont facilement élaborés sous Excel et consultables par la direction.

En plus des écrans personnalisés, l'interface peut afficher des plans, des

schémas et autres informations d'exploitation pour réduire le délai entre prise de décision et action. Disposant d'informations temps réel, l'équipe de maintenance peut réduire ses coûts en détectant précocement les problèmes au niveau de l'instrumentation de terrain, des moteurs ou du système de contrôle-commande lui-même.

Grâce à la qualité des produits fournis à Thai Agro Energy, ABB a été choisi par une autre société thaïlandaise, Petro Green, pour un projet similaire de production d'éthanol à partir de mélasse avec un procédé très proche, également fourni par Maguin SAS. L'usine a été mise en service avec succès en novembre 2006.

Grâce au système *Industrial<sup>IT</sup> 800xA* et au départ-moteur ABB, Thai Agro Energy et Petro Green, entre autres, sont à présent parfaitement équipés pour produire efficacement de grands volumes d'éthanol et réduire ainsi la facture pétrolière du royaume avec une source d'énergie verte. De quoi répondre au souhait de Sa Majesté et offrir à ses sujets un meilleur cadre de vie !

Suchada Tangcharoensrisakul  
suchada.tangcharoensrisakul@th.abb.com

## Une huile vraiment essentielle

L'usine américaine *Little Sioux Corn Processors* de Marcus, dans l'Iowa, produit de l'éthanol à partir du maïs. Elle s'est récemment dotée d'une installation spéciale pour extraire l'huile des sous-produits du raffinage de l'éthanol, généralement destinée à l'alimentation animale bon marché. Little Sioux peut désormais vendre cette huile comme nourriture pour bétail de qualité supérieure ou comme biocarburant. Cette extraction réduit les résidus de fabrication et améliore la rentabilité du site.

Le système d'extraction COES (*Corn Oil Extraction System*) est fabriqué par GS-Cleantech. Totalement automatisé, il s'insère aisément dans une usine d'éthanol existante sans arrêter la production. Il intègre plusieurs produits ABB, notamment l'interface homme-machine Compact 800, un système de contrôle-commande sur PC avec contrôleurs AC 800M et des automates programmables industriels (API), des variateurs de vitesse ACS800, un appareillage basse tension et une instrumentation (transmetteurs de pression).

Le sous-produit du raffinage de l'éthanol – les drèches – se vend entre 0,04

et 0,06 €/kg. L'huile extraite de ces drèches se négocie actuellement entre 0,46 et 0,57 €/kg après conversion en biodiesel.

Le système de contrôle-commande équipant le COES, un Compact Products 800, est ouvert et normalisé, gage de sa compatibilité avec les autres automatismes du marché.

Le système intégré d'ABB lui permet de réduire ses résidus de production avec un produit compétitif sur un marché réel.

Les protections moteurs *MS Manual Motor Protectors* d'ABB associées à ses contacteurs A-Line utilisés dans l'usine constituent une solution compacte et fiable pour commuter et protéger les moteurs. L'utilisation conjointe de ces dispositifs permet aux opérateurs de réduire le coût des arrêts intempestifs.

Bénéficiant d'un savoir-faire applicatif très large et sans équivalent, ABB propose un éventail complet de solutions d'instrumentation avec FOUNDATION Fieldbus, PROFIBUS et HART, dans le respect des normes internationales.

Dans la salle de commande de Little Sioux, un poste opérateur 800xA Compact 800 ABB est raccordé à deux processeurs non redondants AC 800M déportés. Deux postes *Process Panels* distants d'ABB offrent toute la souplesse nécessaire pour la conduite du

procédé depuis la salle de commande ou dans l'atelier. Le système ABB commande les évaporateurs et l'installation d'extraction.

Cette dernière est constituée d'une unité spéciale de prétraitement, d'un dispositif de séparation de l'huile et de cuves de stockage. Le produit circule des évaporateurs dans l'unité de prétraitement pour être ensuite centrifugé à grande vitesse pour séparer l'huile des sous-produits; celle-ci est ensuite pompée et purifiée dans des cuves de stockage de conception spéciale. Les API distants d'ABB sont aux commandes de l'ensemble du système, veillant à ce que le produit chargé dans les semi-remorques soit une huile de maïs pure.

La société GS-Cleantech développe et commercialise des technologies à la fois « propres » et rentables pour les utilisateurs. Elle appartient au groupe *Greenshift Corporation* dont toutes les filiales sont spécialisées dans ces technologies et l'exploitation plus efficace des ressources naturelles.

Le site de Little Sioux héberge l'un des trois systèmes COES existants, plusieurs autres étant en cours de construction. Améliorer la rentabilité économique de la production d'éthanol se fait au premier chef en créant de nouveaux débouchés pour les sous-produits et en garantissant ainsi la pérennité de ce procédé.

Little Sioux cherche à extraire davantage de carburant et à valoriser un plus grand nombre de sous-produits de chaque boisseau de maïs traité. Le système intégré d'ABB lui permet de réduire ses résidus de production avec un produit compétitif sur un marché réel. Si la collaboration entre GS Cleantech et ABB profite à leurs clients, l'environnement reste sans conteste le principal bénéficiaire de cette coopération.



Conni Hinkel  
conni.hinkel@us.abb.com

## Gazéification de la biomasse et synthèse de carburants

Les carburants issus de la biomasse de même que les composés chimiques et les bioénergies tirées de l'exploitation des forêts et des terres arables pourraient bien être les principales sources énergétiques porteuses d'avenir. La technologie avancée de conversion de la biomasse contribuera à réduire considérablement, voire supprimer, la dépendance vis-à-vis du pétrole de certains pays comme la Suède; parallèlement, elle atténuera les effets néfastes des émissions de gaz à effet de serre résultant de la combustion des énergies fossiles.

Fin 2004, le projet européen de recherche CHRISGAS (*Clean Hydrogen Rich Synthesis Gas*) sur le gaz de synthèse propre et riche en hydrogène issu de la biomasse fut lancé à Värnamo, ville de la région forestière du sud de la Suède. Une usine pilote de recherche, construite dans les années 90 par la compagnie électrique suédoise Sydkraft AB et ensuite provisoirement fermée, sera rénovée pour abriter un programme de recherche supervisé par l'université de Växjö sur un carburant obtenu par transformation thermo-chimique de la biomasse. En 2003, la création de la société à but non lucratif *Växjö Värnamo Gasification Center* (VVBGC), destinée à exploiter et à entretenir l'usine, permit d'investir dans la reconstruction et la reconversion des installations existantes. Sous l'égide du 6<sup>ème</sup> programme-cadre de recherche et développement technologiques (PCRDT)<sup>1)</sup> de l'Union européenne et de l'Agence suédoise de l'énergie, le projet CHRISGAS, initiative suédoise et européenne de recherche et de formation, fut lancé le 1<sup>er</sup> septembre 2004.

### Objectifs

Le projet CHRISGAS a pour but de développer et d'optimiser, sur le plan énergétique et économique, un procé-



dé de production de gaz riches en hydrogène à partir de la biomasse. Ces gaz peuvent alors être valorisés en hydrogène de qualité commerciale ou en gaz de synthèse susceptibles d'être raffinés en combustibles liquides comme le diméthyl-éther (DEM), le méthanol ou le carburant Diesel Fischer-Tropsch.

Le projet CHRISGAS a pour but de développer et d'optimiser, sur le plan énergétique et économique, un procédé de production de gaz riches en hydrogène à partir de la biomasse.

L'enjeu est d'arriver à produire, dès 2009 et à un coût compétitif, un gaz intermédiaire servant à fabriquer un carburant automobile à partir d'une bioénergie. Dans ce cas précis, il s'agit d'un gaz propre et riche en hydrogène obtenu par gazéification à l'oxygène et

à la vapeur de la biomasse, suivie d'un lavage à chaud du gaz pour éliminer les particules et d'un reformage à la vapeur du goudron et des hydrocarbures légers pour améliorer le rendement de l'hydrogène. Un double objectif quantitatif est fixé : la capacité de production de gaz devrait atteindre 3500 Nm<sup>3</sup>/h<sup>2)</sup> sur un total de 2000 h.

### Le procédé

Les étapes du procédé sont présentées en 1. Le cœur est un cyclone et un gazéifieur à oxygène pulsé et vapeur basse pression **1c** fonctionnant généralement à une pression de 10–15 bar et à une température entre 950 et 1000 °C. Pour réduire la consommation de gaz inerte de l'alimentation en combustible, un système à piston est actuellement mis au point avec des performances deux fois supérieures à celles du

### Notes

<sup>1)</sup> Principal instrument de mise en œuvre de l'Espace européen de la recherche

<sup>2)</sup> Un Nm<sup>3</sup> correspond à un m<sup>3</sup> de volume de gaz dans des conditions normales de pression atmosphérique.

système actuel. L'alimentation en combustible végétal, composé de racines et de branches, atteint un débit maximum de 4 t/h. Le gaz est refroidi en aval du gazéifieur **1d**. A ce stade, la température optimale est encore à l'étude et sera déterminée lors d'essais. C'est dans le reformeur à vapeur **1g**, catalytique ou thermique, situé juste après, qu'intervient la première valorisation chimique par transformation des hydrocarbures (essentiellement du méthane) et des goudrons en hydrogène et monoxyde de carbone. Optimiser le dosage de ces deux composants pour obtenir un gaz de synthèse à haut pouvoir calorifique est l'une des priorités des chercheurs. Pour enrichir encore le gaz brut en hydrogène et accroître sa valorisation, un dispositif de réaction du gaz à l'eau et un réacteur d'hydrogénation **1j** sont placés en aval du refroidisseur.

Ici, les difficultés techniques sont de trois ordres : passer du laboratoire à l'échelle semi-industrielle, faire fonctionner les filtres critiques à de hautes températures et identifier les points de

fonctionnement donnant un rendement maximal. Mais par dessus tout, une grande question demeure : la biomasse peut-elle remplacer le gaz naturel dans la production d'un gaz de synthèse aux propriétés adéquates pour être transformé en biodiesel à un coût compétitif?

Pour pouvoir adapter le procédé, réaliser les essais de recherche et apporter rapidement les modifications nécessaires, les nouveaux équipements doivent offrir une certaine souplesse. Cette exigence a conduit le responsable de l'usine, Ola Augustsson, à opter pour un nouveau système de contrôle-commande lui permettant de modifier et de reprogrammer le système au gré des besoins.

#### Contrôle-commande ABB

Au terme d'un processus d'évaluation, c'est le système Freelance 800F d'ABB qui a été choisi avec son interface utilisateur DigiVis. La communication avec les actionneurs et les capteurs, de même que les interconnexions existantes, devaient être préparées. Pour des raisons de sécurité, un dispositif d'arrêt du procédé a été prévu

en cas de problème lors des expériences. L'installation et la mise en service eurent lieu durant l'été 2006. «*ABB s'en est vraiment bien sorti*, souligne Ola Augustsson. *La vétusté de nos équipements n'a pas facilité les choses. A présent, nous disposons d'un système flexible et convivial pour poursuivre nos recherches.* » L'usine fut testée avec succès fin 2006, d'autres essais devant avoir lieu courant 2007.

#### Perspectives

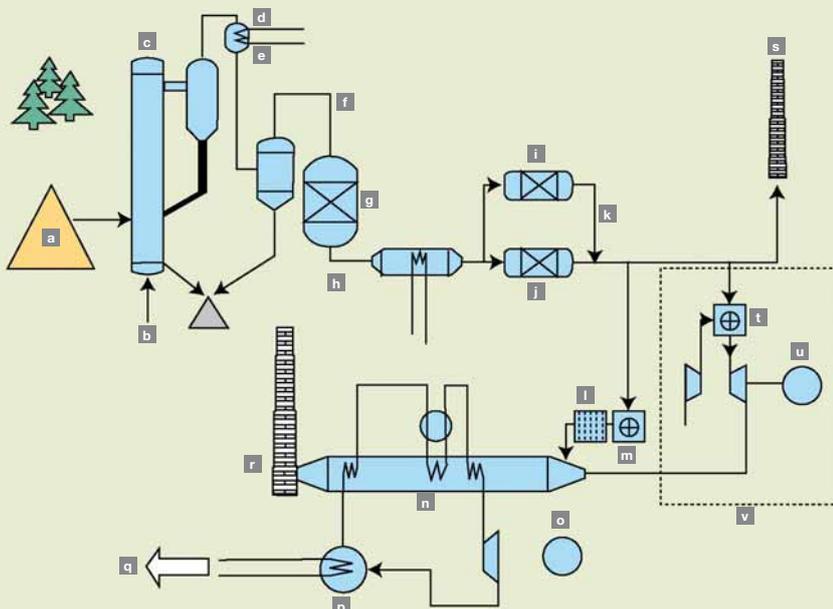
Le but ultime est de transformer le gaz de synthèse en un carburant automobile à un coût satisfaisant ; il sera atteint à un horizon de deux ans. Toutefois, le procédé est parfaitement compris et maîtrisé, ne nécessitant aucune recherche supplémentaire tant que le gaz de synthèse est de bonne qualité et possède un haut rendement. Lorsque l'usine rénovée de Värnamo sortira véritablement un diesel commercialisable produit à partir de racines et de branches de pin, la planète commencera à respirer un peu mieux.

Niclas Erkenstal

niclas.erkenstal@se.abb.com

#### 1 Principes de production de l'éthanol

L'éthanol est un alcool issu de la fermentation d'un produit agricole qui transforme l'amidon en sucre (mélasse) et la mélasse en alcool. Après distillation, l'alcool obtenu est pur à 95 %.



- a** biocarburant
- b** vapeur + oxygène
- c** gazéifieur
- d** refroidisseur de gaz
- e** filtre à gaz chaud
- f** vapeur + oxygène
- g** reformeur
- h** refroidisseur de gaz
- i** réaction du gaz à l'eau
- j** hydrogénation
- k** gaz de synthèse
- l** tour de refroidissement
- m** brûleur
- n** chaudière de récupération de chaleur
- o** turbine à vapeur
- p** condenseur
- q** refroidissement à l'air
- r** cheminée
- s** torchère
- t** brûleur
- u** turbine à gaz
- v** procédés en dérivation

## Energies alternatives

## Du champ à la pompe

Onze ans après avoir installé une raffinerie de sucre à Zeitz (Saxe-Anhalt, Allemagne), Südzucker AG décidait en 2006 de construire dans la région une usine de production de bioéthanol à partir principalement de blé et d'autres céréales abondant dans les environs, mais aussi de sous-produits du raffinage. Avec une capacité de production annuelle de 260 000 m<sup>3</sup> de bioéthanol, la nouvelle usine absorbe près de 700 000 t de céréales cultivées sur environ 100 000 h.

Le bioéthanol est un combustible propre qui est ajouté à l'essence pour réduire la pollution des moteurs automobiles. Facile à produire, il peut être issu de céréales, de maïs, de certains tubercules, de betterave sucrière, de canne à sucre ou de matière cellulosique d'origine herbacée ou ligneuse. Composé essentiellement d'alcool, le bioéthanol est obtenu par fermentation, distillation/rectification et déshydratation.

Actuellement, la réglementation autorise l'incorporation de 5% de bioéthanol à l'essence. Le 15 février 2007, l'Union européenne (UE) proposait de passer à 10% d'ici à 2020.

Cette même réglementation autorise l'adjonction de 15% d'éthyl tertio

butyl éther (ETBE), un dérivé d'éthanol qui améliore l'indice d'octane. Ces deux substances sont d'excellents

L'UE prône l'utilisation des biocarburants et autres combustibles écologiques pour atteindre ses objectifs en matière de réchauffement climatique.

additifs pour l'essence et particulièrement respectueuses de l'environnement.

### Encadré Fourniture ABB

- Système de contrôle-commande avec 14 contrôleurs AC 800F, 7 postes opérateurs et écrans de contrôle, 2 postes pour ingénieur, près de 16 000 entrées/sorties (E/S) déportées pour la plupart avec des modules S800 logés dans plus de 100 boîtiers d'E/S distants ;
- Un départ-moteur qui pilote toutes les installations du bâtiment, y compris l'éclairage extérieur et intérieur ;
- Système d'alarme incendie et infrastructure du réseau informatique ;
- Intégralité des études techniques, de l'assemblage, de la configuration et de la mise en service du site.

L'UE prône l'utilisation des biocarburants et autres combustibles écologiques pour atteindre ses objectifs en matière de réchauffement climatique et garantir ses approvisionnements en combustibles non polluants à partir de sources d'énergies renouvelables.

Les équipes ABB de Leipzig ont participé au projet de Südzucker dès fin mars 2004. Avec 1000 appareils raccordés au bus de terrain PROFIBUS PA, le site constitue une première pour ABB. A Zeitz, les automatismes ABB ont mis en œuvre le nec plus ultra de la technologie ABB, notamment les écrans et postes opérateurs du système d'automatisation étendue IndustrialIT<sup>®</sup> 800xA pour raccorder des contrôleurs AC 800F.

Les délais très courts imposés par le client ont posé un véritable défi qu'ABB a relevé avec succès en travaillant en étroite collaboration avec les différents intervenants. L'usine est entrée en service fin 2006 et est totalement opérationnelle depuis début 2007, contribuant à une planète un peu plus propre.

Collectif rédactionnel  
Revue ABB

1 La nouvelle usine de Südzucker peut produire 260 000 m<sup>3</sup> de bioéthanol par an.



# Un vent d'énergie souffle sur l'océan

Des parcs éoliens en mer se substituent aux nouvelles centrales d'énergie à terre

Eskil Sørensen, Finn Nielsen

Eole assure aujourd'hui près d'un cinquième de la consommation d'électricité danoise, faisant du pays le champion mondial de la filière. Longtemps parquées à terre, les éoliennes prennent aujourd'hui le large : deux grandes fermes marines, au rendement comparable à celui des centrales d'énergie de moyenne puissance, subviennent désormais à près de 4 % de la consommation électrique danoise et comptent pour 25 % de sa production éolienne. ABB est un grand industriel du secteur avec des équipements de transport, des générateurs, des appareillages basse et moyenne tension, et des superviseurs SCADA<sup>1</sup>.

## Energies alternatives

Dans la lutte contre le réchauffement climatique et les rejets de CO<sub>2</sub>, l'énergie éolienne a le vent en poupe! Le Danemark a pour cela plus d'un atout dans sa manche: gros producteur d'aérogénérateurs, il héberge deux pointures mondiales du secteur, le numéro un Vestas et le successeur de *Bonus Energy*, *Siemens Wind Power*. De quoi bâtir un fabuleux pôle d'excellence que d'autres professionnels de l'éolien ne manquent pas de lorgner: l'heure est donc à l'implantation d'unités de R&D au Danemark. Un réseau de sous-traitants au service des constructeurs d'éoliennes y a élu domicile. Cette concentration de talents et de savoir-faire industriels est essentielle au développement de machines toujours plus grosses, équipées de pales de 60 m d'envergure qui griffent le ciel à près de 120 m de haut. L'essor de l'éolien industriel suscite l'intérêt croissant du monde académique, porté par les milieux de l'enseignement et de la formation, ainsi que les universités environnantes et les centres de recherche, tels que le laboratoire Risø.

### Toute une histoire

ABB Danemark contribue aussi à cette manne technologique en cumulant 25 ans d'expertise dans la production d'énergie éolienne; câbles, transformateurs, générateurs et moteurs ne sont que quelques exemples de la fourniture ABB dans ce domaine. Ainsi, lorsque des fabricants d'éolien-

nes danois exportent d'imposantes fermes en Californie ou en Espagne, une bonne partie de leurs équipements est d'origine ABB. D'ailleurs, l'éolien contribue pour beaucoup au chiffre d'affaires d'ABB Danemark.

**Le Danemark a plus d'un atout dans sa manche: grand producteur d'aérogénérateurs, il héberge deux pointures mondiales du secteur.**

Il y a quelques années, 50 % des aérogénérateurs en service dans le monde provenaient de sociétés danoises. Aujourd'hui, la concurrence internationale (dont l'Américain *General Electric* et l'Indien *Suzlon*) progresse et l'éolien est devenu un marché mondialisé très concurrentiel, dont les producteurs danois s'arrogent 30%. Avec une expansion annuelle frisant 20% ces dernières années, cette part de marché correspond à une nette croissance de l'éolien danois. En fait, c'est la filière industrielle la plus florissante du Danemark, que la *Danish Wind Energy Association* chiffre aujourd'hui à 4 milliards de dollars contre 500 000 dollars il y a 10 ans. Conséquence, cette industrie ne cesse de recruter; forte de 21 000 emplois qualifiés, elle peine de plus en plus à trouver de nouveaux talents.

L'éolien danois est né au lendemain des chocs pétroliers des années 70. Les premières éoliennes étaient de petites unités isolées, souvent construites par le forgeron du coin. Dans les années 80, le secteur se professionnalise et amorce le virage de la production industrielle avec des aérogénérateurs de 55 kW unitaires. Plusieurs générations d'éoliennes leur ont depuis succédé, pour atteindre des puissances multipliées par 50! Le marché arbore aujourd'hui des unités de 2 MW, voire 3 MW. Le plus gros engin commercialisé à ce jour affiche 3,6 MW. Et ce n'est pas fini!

### L'appel du large

Plusieurs bonnes raisons justifient le choix d'implanter, *contre vents et marées*, des parcs en pleine mer. Tout d'abord, le gigantisme des pales et des mâts fait qu'il est de plus en plus difficile de trouver un emplacement pour ériger ces colosses, surtout dans les pays à forte densité de population comme le Danemark. De plus, les riverains ne voient pas toujours d'un bon œil la multiplication des champs d'éoliennes sous leurs fenêtres!

Seconde raison de préférer la haute mer: le vent y souffle plus fort. La production électrique peut donc

### Note

<sup>1</sup> Acronyme anglais de *Supervisory Control and Data Acquisition*: logiciel de téléconduite et de télésurveillance

1 Le parc de Nysted aligne 8 rangées de 9 éoliennes d'une puissance unitaire de 2,3 MW.



grimper de 50%, dans le meilleur des cas.

En contrepartie, le coût d'implantation d'un parc éolien est plus élevé, ne serait-ce que par l'ampleur des fondations, les équipements anticorrosion et la peinture de ces géantes d'acier menacées par la forte salinité du milieu marin. Les machines doivent être installées dans des locaux dont l'hygrométrie ne dépasse pas 50%. La maintenance est elle aussi plus chère puisqu'il faut régulièrement hélipositer le personnel. Les énergéticiens justifient pourtant le surcoût de l'éolien *offshore* par une plus grande production d'électricité.

Le Danemark totalise 3100 MW éoliens installés, soit l'équivalent de 5 grandes centrales thermiques pour une économie annuelle de 4 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>.

#### Le parc éolien de Nysted

Sur décision du parlement danois, deux grosses fermes éoliennes en mer ont été construites en 2002 et 2003; elles couvrent aujourd'hui près de 4% de l'électricité nationale. ABB a fourni les équipements majeurs. Mis en service en 2003, Nysted était alors le plus grand parc éolien marin du monde **1**. Ses 72 aérogénérateurs produisent aujourd'hui une puissance maximale de 165,6 MW, soit l'équivalent d'une centrale électrique de moyenne envergure. Chacun alimente, par un câble de 33 kV, un poste de transformation **2** qui adapte la tension produite aux niveaux du réseau et achemine l'électricité à terre sur un câble de 132 kV. Ce parc peut couvrir les besoins en électricité de 150 000 foyers.

L'atmosphère est ainsi débarrassée de 500 000 tonnes de CO<sub>2</sub> par an, ce qui représente 1% des émissions totales de CO<sub>2</sub> du Danemark et contribue nettement à la réduction des gaz à effet de serre. Le pays totalise 3100 MW éoliens installés, soit l'équivalent de

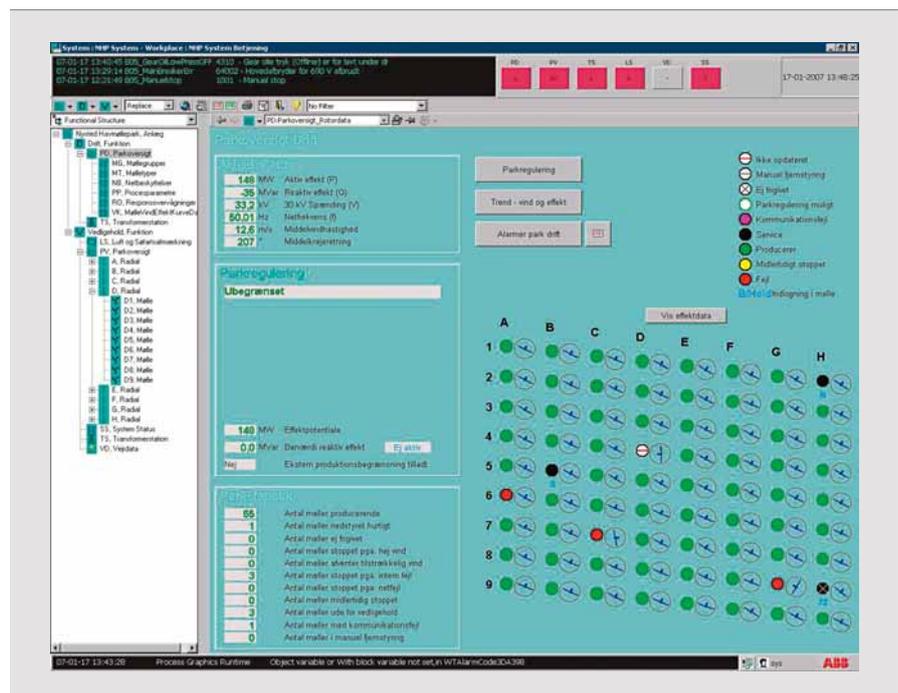
5 grandes centrales thermiques pour une économie annuelle de 4 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>. Le parc de Nysted fut au départ conçu pour produire 500 000 MWh par an; cet objectif a été largement dépassé! D'autres parcs marins sont en gestation. Le gouvernement danois vient en effet d'autoriser la construction de deux nouvelles

centrales, opérationnelles à l'horizon 2009 et 2010. La société *DONG Energy A/S* s'est vue confier la réalisation de Horns Rev, tandis que le consortium *DONG Energy A/S* et *E.ON Sweden AB* décrochait le contrat de construction de Rødsand. ABB a d'ores et déjà remporté une commande et d'autres projets sont en attente.

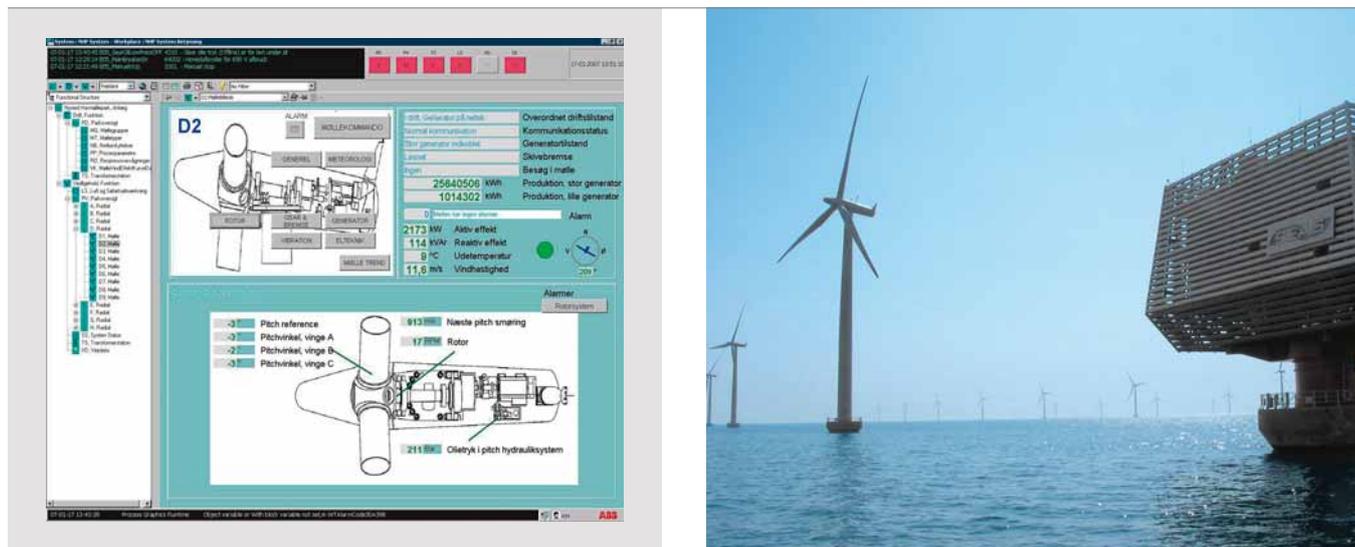
**2** Transformateur recevant la puissance globale des 72 aérogénérateurs du parc éolien



**3** Vue d'ensemble du fonctionnement des 72 aérogénérateurs



4 Vue de détail du fonctionnement de l'aérogénérateur D2



### Des éoliennes dans le vent

Un parc de 72 éoliennes, comme à Nysted, exige un superviseur SCADA<sup>1)</sup> basé sur la plate-forme 800xA à redondance intégrée d'ABB, qui participe à la stabilité et la disponibilité élevées de l'installation. ABB a également fourni les 72 transformateurs et générateurs du site, ainsi que les 45 km de câbles sous-marins à 33 kV reliant les éoliennes implantées à 10–14 km des côtes danoises. De même, le câble de raccordement au réseau terrestre a été livré et mis en service par ABB.

Ce SCADA peut piloter la production d'énergie globale des éoliennes de la même façon que s'il s'agissait d'une centrale électrique. Il va de soi que la

production d'électricité éolienne est tributaire du vent; au demeurant, la puissance totale peut être régulée. Si le réseau électrique appelle 100 MW, le superviseur est en mesure d'ajuster l'offre à la demande. L'opérateur peut facilement saisir sur son système la puissance requise du parc éolien et le SCADA en déduit le nombre de machines à mettre en service ou hors

production s'ils se lancent dans la filière éolienne et solaire<sup>2)</sup>.

### Le Danemark et ses fortes capacités de production éolienne ont déjà été confrontés à des cas où l'offre dépassait la demande.

#### Encadré Le parc éolien de Nysted

- Puissance unitaire des 72 aérogénérateurs : 2,3 MW
- Production globale maxi : 165,6 MW
- Production annuelle : environ 500 000 MWh (alimentant l'équivalent de 150 000 foyers)
- Fabricant d'aérogénérateurs : Siemens Wind Power (anciennement Bonus Energy)
- Hauteur des mâts : 69 m ; envergure des pales : 40 m
- Mise en service : 2003
- Maîtres d'ouvrage : DONG Energy A/S et E.ON Sweden AB

service pour équilibrer production et consommation. L'opérateur a accès à l'état global des 72 éoliennes 3, tout comme au détail de chacune d'elles 4. L'éolien a ainsi permis de réduire le recours aux centrales classiques. Reste que la disponibilité de cette source d'énergie augmentant, il faudra de plus en plus souvent ralentir les machines pour éviter une surcharge du réseau. En l'occurrence, le Danemark et ses fortes capacités ont déjà été confrontés à des cas où l'offre dépassait la demande. D'autres pays devront faire face à ces aléas de

**Eskil Sørensen**  
Journaliste  
Odense (Danemark)  
es@journalist.dk

**Finn Nielsen**  
ABB Denmark A/S  
Skovlunde (Danemark)  
finn.r.nielsen@dk.abb.com

**Note**  
<sup>2)</sup> Cf. « Souffler n'est pas jouer » p. 33

# La variation de vitesse au rendez-vous de l'efficacité énergétique

Per Wikstroem, Jukka Tolvanen, Akseli Savolainen, Peter Barbosa

De toutes les ressources dont dépend l'industrie manufacturière moderne, l'énergie est sans conteste celle qui lui est fondamentale, mais également celle que nous prenons depuis longtemps pour argent comptant. Or la flambée des prix de l'énergie et le réchauffement climatique incitent de plus en plus les industriels à s'interroger sur leur consommation énergétique.

Dans de nombreux secteurs, les gisements d'économies d'énergie sont mineurs et des gains de rendement énergétique de 1 à 2 % sont perçus comme un réel progrès. Dans ces conditions, le potentiel d'économie semble très limité. Pour autant, des technologies existent pour réduire de manière très significative la facture énergétique. Parmi celles-ci, il est un dispositif qui, à première vue, n'a rien de spectaculaire face aux solutions qui en imposent par leur taille ou leur puissance. Il est peu bruyant, n'engendre pas de températures extrêmes et n'exécute aucun mouvement complexe. En fait, il se monte dans une armoire et il n'en est, en général, même pas fait mention dans la description d'un site industriel.

Or, avec un potentiel de gain de 42 %, sa généralisation dans les usines du monde entier engendrerait des économies égales à la consommation d'électricité d'un pays comme l'Espagne; nous avons nommé le variateur de vitesse.

Le principe est simple ! Par le passé, les moteurs des pompes tournaient souvent à plein régime en permanence, la régulation des débits se faisant par vannage. Un variateur de vitesse régule, quant à lui, les débits en agissant directement sur la puissance fournie au moteur, sans consommation inutile, en contrôlant les pertes de charge et en supprimant les pertes associées. Les applications décrites ci-après donnent un aperçu des apports de la technologie de la vitesse variable.

## Absence de normalisation

**L'absence de normes sur l'efficacité énergétique explique que 90 % des installations de pompage sont mal dimensionnées et consomment en pure perte de l'énergie.**

Attendez, » me diriez-vous, « tout est normalisé ! ». Hélas, les choses ne sont pas si simples et en matière d'efficacité énergétique, il reste beaucoup à faire ! Au cours d'une présentation de l'ACEEE<sup>1)</sup>, les auteurs de cet article ont pris conscience que, si la conception des pompes fait l'objet d'une normalisation<sup>2)</sup> de même que les grands hydrauliques comme la hauteur manométrique totale (HMT)<sup>3)</sup>, le rendement des pompes et la hauteur net-

te d'aspiration ou NPSH<sup>4)</sup>, la recherche de normes pouvant aider à concevoir les installations de pompage donnerait des résultats très maigres. Par analogie, acheter un camion de trois tonnes pour faire quelques emplettes serait une aberration en termes d'efficacité énergétique, même s'il s'agit du trois-tonnes le plus performant du marché !

La présentation de l'ACEEE faisait référence à une étude sur les pratiques internes d'un grand industriel de la chimie et de deux cabinets d'ingénierie intervenus dans des projets ré-

cents. L'objet de l'étude était de voir si la taille des pompes installées était en adéquation avec les besoins réels. Les résultats révélèrent que 90 % d'entre elles étaient mal dimensionnées, preuve du manque de normes et de règles de conception. Si 90 % des installations sont surdimensionnées chez ce chimiste, en est-il de même chez les industriels du monde entier ?

**1** illustre le problème auquel sont confrontés les ingénieurs chargés de concevoir les installations de pompage ou de ventilation. Pour chaque

### Notes

<sup>1)</sup> ACEEE Summer Study on Energy Efficiency for Industry July 20, 2005 by Robert Asdal – Hydraulic Institute, Vestal Tutterow – Alliance to Save Energy and Aimee KcKane – Lawrence Berkeley National Laboratory

<sup>2)</sup> Ex., HI, API, ANSI, ISO

<sup>3)</sup> Mesure de l'énergie mécanique transmise au fluide par la pompe, par unité de poids. Elle équivaut à la différence algébrique entre la hauteur de refoulement et d'aspiration de la pompe dans un réseau sans perte de charge.

<sup>4)</sup> Net Positive Suction Head

## Produits d'efficacité énergétique

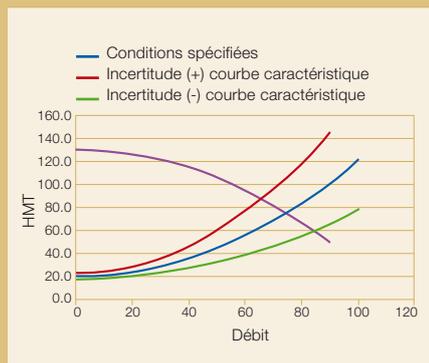
projet, il existe des facteurs d'incertitude quant aux courbes caractéristiques de l'installation (du fait du frottement, des changements de section de

la tuyauterie et du nombre de coudes à 90° au final) qui accroissent le risque de non-respect des conditions d'exploitation théoriques. Dans ce cas,

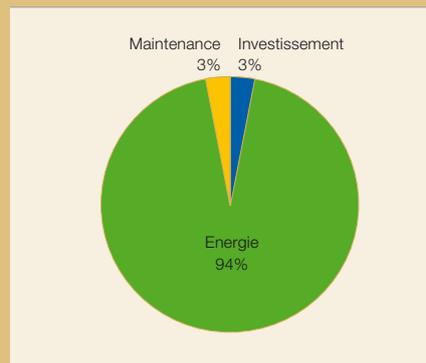
trois solutions permettent de remédier au problème :

- Si les nouvelles conditions sont définitives, vous changez de taille de pompe ou de ventilateur pour l'adapter à la charge ;
- Vous modifiez la vitesse de rotation de la pompe ou du ventilateur ;
- Vous modulez les débits en ajoutant un organe mécanique sur le refoulement (ex., vanne, registre ou aube directrice), solution très énergivore.

**1** Pour une installation en projet, des facteurs d'incertitude quant aux courbes caractéristiques des pompes doivent être pris en compte.



**2** Le poste énergie est le principal élément du coût sur le cycle de vie du moteur d'une pompe ou d'un ventilateur.



Le poste énergie est le principal élément de coût sur le cycle de vie du moteur d'une pompe ou d'un ventilateur **2**. A ce titre, il constitue le meilleur levier d'optimisation de la consommation énergétique.

## Comment en arrive-t-on à surdimensionner une installation ?

A partir d'un exemple concret, la *Revue ABB* analyse la démarche qui aboutit à surdimensionner les installations lors de leur conception et les économies d'énergie induites par les variateurs de vitesse.

Malgré une analyse et une conception méthodiques, de nombreuses installations ne fonctionnent pas de manière optimale, notamment parce qu'elles sont tout simplement surdimensionnées dès le départ, gonflant les coûts d'exploitation et d'investissement. Illustrons notre propos avec l'exemple d'une application de ventilation dans l'industrie des procédés.

Nous partons de l'hypothèse que pour 100 unités de débit, l'application nécessite 4000 unités de pression **3a**.

Par souci de sécurité, on spécifiera 110 unités de débit à l'ingénieur **4b**.

Partant de la courbe théorique de l'installation, il faudra donc un ventilateur de puissance supérieure (trait pointillé jaune) capable de fournir 110 unités de débit et 5000 unités de pression.

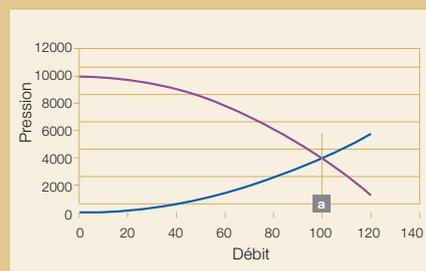
Il est rare que 100% du débit calculé soit requis, à l'exception de pics de pression transitoires.

Pour déterminer la puissance du ventilateur, l'ingénieur chargé de concevoir l'application calcule la chute de pression totale engendrée par ces 110 unités de débit **5c** et la majore de 10%

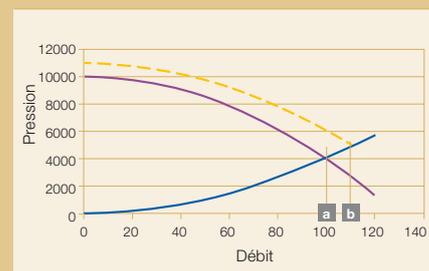
**5d** car il est difficile de prédire si le nombre de coudes à 90° de la tuyauterie sera conforme aux estimations (l'installateur du ventilateur sera éventuellement amené à ajouter des coudes pour éviter d'autres équipements). De même, la section de la tuyauterie est incertaine, une section plus petite engendrant une chute de pression supérieure. Une marge de 10% n'est donc pas excessive.

Au final, quelles sont les valeurs spécifiées dans l'appel d'offre? Débit: 110 unités à une pression de 5500 unités **6e**. Si l'hypothèse de départ est correcte, le ventilateur est maintenant largement surdimensionné. En effet, pour un débit de 100 unités, la chute

**3** Application nécessitant un ventilateur motorisé: trait bleu = chute de pression, trait violet = ventilateur



**4** Une marge de réserve de 10% (b) est ajoutée au cahier des charges du ventilateur (a).



de pression supplémentaire requise au niveau du registre approche les 2800 unités (6f moins 6g) ce qui correspond à 70 % de la pression totale supposée correcte. Or il est rare que 100 % du débit calculé soit requis, à l'exception de pics de pression transitoires. En supposant que la plupart du temps le débit demandé soit de 80 %, l'étrangle-

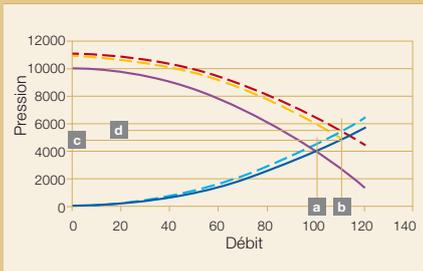
ment supplémentaire requis au niveau du registre sera d'environ 6000 unités (6h moins 6i), soit 150 % de la pression totale correcte supposée.

La démarche donnée ici à titre d'exemple est plus fréquente qu'il n'y paraît. Autre facteur de surdimensionnement : le ventilateur est sélectionné

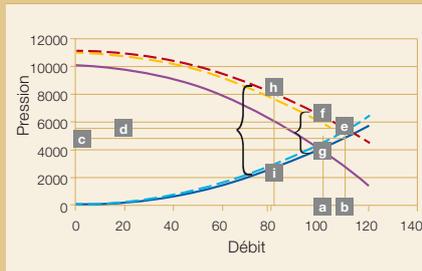
dans une gamme standard de tailles fixes. Souvent, on opte pour une puissance immédiatement supérieure à celle requise par l'application.

Pour notre exemple, un ventilateur correctement dimensionné serait de  $100 \times 4000 = 400\,000$  unités de puissance. Or les différents calculs avec leur marge de sécurité débouchent sur au moins 605 000 unités de puissance (soit 150 % de l'optimum). Une modulation mécanique du débit sur le refoulement induit un fort gaspillage d'électricité, les pertes supplémentaires à 80 % de débit s'élevant à 480 000 unités de puissance (120 % de la pleine puissance d'un ventilateur de taille correcte). Une régulation en vitesse variable aurait évité de gaspiller la plus grosse part de cette énergie.

5 La chute de pression correspondante est également majorée de 10 % (d).



6 L'installation finale est largement surdimensionnée.



## Les variateurs MT font bon ménage avec les économies d'énergie

**227 TWh est la production annuelle de 144 centrales électriques à flamme<sup>5)</sup> ou l'équivalent de la consommation énergétique totale de l'Espagne. Il s'agit également des économies d'énergie potentiellement réalisables avec les variateurs de vitesse moyenne tension (MT).**

Si l'efficacité énergétique est d'actualité, il a fallu de longues années avant que l'opinion publique ne réa-

7 Variateur MT ACS6000 : ce type d'équipement peut jouer un rôle considérable dans la tenue des engagements du protocole de Kyoto.



gisse. Le film d'Al Gore, *Une vérité qui dérange*, a sur ce plan ébranlé les esprits. Certains parmi vous ont peut-être dû annuler leurs vacances d'hiver, faute de neige ; de tels phénomènes contribuent probablement également à renforcer notre sensibilité aux problèmes de réchauffement climatique.

Dans le cadre du protocole de Kyoto, les 15 Etats membres de l'Union européenne (UE15) se sont engagés à réduire de 8 % leurs émissions polluantes d'ici à 2008-2012 par rapport aux niveaux de 1990. En 2004, la réduction atteignait péniblement 0,9 % et, en continuant au rythme actuel,

elle ne sera que de 0,6 % à l'horizon 2010. Des chiffres qui ne rendent guère optimiste.

Au chapitre 2 de son rapport *World Energy Outlook 2006*, l'Agence internationale de l'Énergie analyse l'évolution de la consommation mondiale d'énergie : « A l'échelle mondiale, les projections de consommation d'énergie primaire font état d'une hausse de 53 % entre 2004 et 2030, soit une augmentation annuelle moyenne de 1,6 %. Plus de 70 % de cette hausse sont le fait des pays en développement. » Comment, dans ce contexte, comptons-nous atteindre nos objectifs de réduction ?

Encadré 1 Economies d'énergie réalisées dans des applications industrielles avec variateurs de vitesse

Entreprise	Secteur	Application	Puissance installée [kW]	Economies réalisées [kWh]	% d'économie
Pena Colorada	Mines	Ventilateur de l'atelier de palettisation	1250	2 423 750	35 %
China Steel Taiwan	Métallurgie	Pompes de surpression	672	3 030 720	61 %
Cruz Azul, Mexique	Ciment	Ventilateurs de soufflage du four de cuisson	1470	5 309 640	54 %
Repsol YPF, Argentine	Pétrochimie	Soufflante (remplacement de la turbine à vapeur)	3000	7 560 000	43 %
Daqing Plastic Factory, Chine	Pétrochimie	Mélangeur	1300	2 600 000	31 %

## Produits d'efficacité énergétique

Heureusement, certains domaines recèlent de formidables gisements d'économies d'énergie. Quelques exemples de réussite du secteur industriel sont donnés dans l'**Encadré 1**.

En moyenne pondérée, ces sites industriels ont sabré leur consommation énergétique de 42%. Entre un tiers et

trois quarts des moteurs électriques utilisés dans le monde servent à entraîner des pompes, des ventilateurs et des compresseurs. Ces machines constituent le domaine d'application privilégié de la vitesse variable. Rien que pour les moteurs moyenne tension (MT), les économies d'énergie induites par les variateurs de vitesse

peuvent être estimées approximativement **Encadré 2**.

Coïncidence marquante : l'objectif de l'EU15 pour les variateurs de vitesse est exactement de 45 TWh/an, soit l'équivalent de près de 30 centrales électriques à flamme<sup>5)</sup> ou la consommation totale d'énergie électrique de la Roumanie en 2000. Cependant, cet objectif englobe à la fois les entraînements basse tension (BT) et moyenne tension (MT), alors que les calculs actuels ne prennent en compte que les entraînements MT! Le parc installé de moteurs BT représente près de 10 fois celui des moteurs MT.

Nous allons donc clore cet article sur une note positive : si les variateurs de vitesse MT à eux seuls offrent un potentiel d'économies d'énergie de 45 TWh **7**, nous pouvons espérer atteindre l'objectif de réduction de 45 TWh de l'UE au titre du protocole de Kyoto.

**Encadré 2** Au niveau mondial, les variateurs MT offrent un potentiel d'économies de 227 TWh.

Parc installé de moteurs MT (estimation mondiale basée sur une durée de vie de 20 ans des moteurs)	500 000	
Moteurs entraînant des charges à couple quadratique (minimum)	333 000	
Puissance installée servant à entraîner des charges à couple quadratique (1 500 kW en moyenne par moteur MT)	500 000 000	kW
Moins de 4 % des moteurs MT sont commandés par un variateur de fréquence (nombre de moteurs non équipés)	300 000	
En supposant que seuls 30 % de ces moteurs présentent un potentiel d'économies d'énergie de même ampleur que celui des exemples précédents	90 000	
Consommation de ces 90 000 moteurs *)	569	TWh
En supposant un potentiel d'économies d'énergie de 40 % (semblable aux exemples précédents)	227	TWh
La part de l'EU15 peut être évaluée à 20 %	45	TWh

\*) Hypothèses : deux tiers des moteurs fonctionnent 7 500 h/an et un tiers, 1850 h/an, en moyenne à 75 % de leur puissance nominale.

### Note

<sup>5)</sup> En supposant qu'une centrale moyenne produise 350 MW pendant 4500 heures/an.

## Optimiser la vitesse des pompes pour économiser l'énergie

**Une étude conjointe de l'université de Technologie de Lappeenranta et d'un industriel finlandais du papier révèle que la régulation des débits par action mécanique peut consommer jusqu'à trois fois plus d'énergie qu'une solution combinant régulation par variateur de vitesse et commande optimisée des pompes.**

Selon cette étude, la commande en vitesse variable des pompes peut alléger jusqu'à près de 70% la facture énergétique des installations de pompage en parallèle. Le plus gros potentiel d'économies se situe dans les applications avec forte fluctuation des

débits. Ces conclusions remarquables sont basées à la fois sur des simulations numériques et des travaux pratiques en laboratoire.

Cette étude comparative du département Energie et Technologie de l'environnement de l'université finlandaise visait à quantifier la consommation énergétique de quatre applications avec différentes méthodes de régulation des débits. Les simulations furent réalisées sous logiciel Matlab 6.1/Simulink, les résultats ayant été validés par des mesures réelles. Les trois méthodes de régulation suivantes furent comparées :

**Méthode par étranglement:** le débit d'une pompe est modulé par action mécanique alors que les autres pompes sont commandées en tout-ou-rien.

**Méthode standard:** une pompe est commandée en vitesse variable et les autres en tout-ou-rien.

**Méthode optimisée:** chaque pompe est commandée par son propre variateur de vitesse, le débit total étant modulé uniformément par toutes les pompes tournant à la même vitesse. Cette méthode diffère de la méthode standard en ce sens que les pompes sont mises en route et arrêtées selon un

**Encadré 3** Consommation énergétique d'une usine papetière finlandaise ; pompage d'eau traitée chimiquement

Méthodes de régulation	Consommation énergétique (J/24 h)	(%)	Débit (m <sup>3</sup> )	E <sub>s</sub> (J/m <sup>3</sup> )
Etranglement	177 114	0,0	2254	78,58
Standard	102 786	-42	2257	45,54
Optimisée	57 050	-68	2256	25,29

schéma optimal. Elle fait l'objet d'une demande de brevet d'ABB.

La première application industrielle simulée est tirée d'une situation en vraie grandeur où les nouvelles méthodes pouvaient être mises en œuvre. L'exemple provient d'une usine papetière finlandaise qui utilise des pompes centrifuges Ahlstrom APP22-65 pour pomper une eau traitée chimiquement dans une unité de

dessalement. Un diagnostic énergétique de l'installation de pompage servit de point de départ aux simulations. L'absence de données de base compliqua le tracé de la courbe caractéristique de l'installation.

Les simulations, qui s'appuyaient sur les courbes caractéristiques et de durée simplifiées, ont mis en évidence le piètre bilan énergétique de la régulation par étranglement alors que la

méthode optimisée offre de loin la meilleure performance énergétique. L'écart de consommation entre la méthode standard et la méthode optimisée est supérieur à 45 %. La consommation d'énergie spécifique de la régulation par étranglement est presque trois fois supérieure à celle de la méthode optimisée **Encadré 3**.

## Installation de pompage des eaux usées de Majorque

**La modernisation d'une vieille station de pompage et de stockage des eaux usées en surface a permis d'éliminer les nuisances olfactives et d'alléger la facture énergétique d'au moins 20 % avec le programme de commande de pompes IPC.**

La société EMAYA SA qui distribue l'eau potable et traite les eaux usées de la ville espagnole de Palma de Majorque a récemment achevé la rénovation de ses stations de pompage des eaux usées. La capitale de l'île touristique de Majorque compte 380 000 habitants. Son réseau d'assainissement est composé d'une série de

bassins entre lesquels les eaux usées sont rapidement transférées jusqu'à la station d'épuration. Dans la première station de pompage qui devait être rénovée, les eaux usées étaient préalablement stockées dans une tour. Celle-ci a été remplacée par un bassin de rétention souterrain d'une capacité de 15 000 litres à peine visible des touristes et des riverains **8**.

Quatre pompes submersibles de 60 kW ont été installées dans la station, chacune commandée par un variateur de vitesse ABB *industrial drive* intégrant le programme de commande de pompes IPC (*Intelligent Pump Control*). « Cette station de pompage était vétuste et il y avait des problèmes d'odeur. Il fallait tout simplement améliorer l'environnement local », explique Lorenzo Mestre, ingénieur industriel chez EMAYA. Les quatre variateurs et pompes offrent un niveau de sécurité intrinsèque sans précédent. Même en période de forte consommation, deux pompes suffisent pour vider le bassin alors qu'une seule pompe peut absorber les charges plus légères. Deux pompes sont toujours prêtes à démarrer ; en cas de défaillance de l'une d'elles, l'autre prend immédiatement le relais. La station de pompage est également équipée d'un groupe diesel de secours en cas de panne de courant.

### Quand l'intelligence vient aux pompes

Le programme de commande IPC peut accroître de manière significative l'efficacité énergétique d'une installation de pompage. Comparé aux méthodes traditionnelles de commande des pompes d'eaux usées, le programme IPC peut alléger la facture

énergétique de 20 % avec un certain nombre de fonctionnalités conçues spécifiquement pour les installations de pompage. Ainsi, par exemple, la fonction d'équilibrage de charge fait fonctionner les quatre pompes en alternance (deux par deux) sur le long terme ; la maintenance peut alors être planifiée pour intervenir sur toutes les pompes à la fois.

Une fonction spéciale de maintenance préventive empêche l'engorgement des pompes. Une fois activée, elle fait tourner la pompe à grande vitesse pour ensuite inverser son sens de rotation ou l'arrêter selon une séquence de cycles de nettoyage définie par l'utilisateur. On évite ainsi l'accumulation de particules et on réduit les besoins de maintenance. Le programme IPC peut également surveiller la température du moteur plus étroitement que les installations normales, pour une fiabilité accrue du système global.

### Priorité à la simplicité

L'installation se compose de variateurs de vitesse ABB et de pompes, sans aucun système de commande dédié, source de complexité et de nombreux câblages. ABB a travaillé avec le tableautier Cobelsa SA pour fournir une solution simple à EMAYA. Cobelsa a conçu le système et réalisé l'installation ; il a également assuré l'assistance technique auprès du client. ABB était présent lors de la phase de mise en œuvre.

**8** Discret mais indispensable au confort des vacanciers et des riverains : le bassin de rétention du réseau d'assainissement de Palma de Majorque



## Produits d'efficacité énergétique

# Les variateurs ABB mettent du vert dans une usine papetière

**L'usine du papetier UPM de Shotton (Royaume-Uni) produit exclusivement son papier à partir de matériaux recyclés, sans jamais utiliser de bois. Les variateurs de vitesse ABB contribuent à sa sobriété énergétique.**

Le projet «100% Shotton» prévoyait la construction d'un nouvel atelier de fibres recyclées et d'un atelier de traitement des boues ainsi que la modification de deux machines à papier.

Ici, les variateurs ABB servent, au premier chef, à adapter la vitesse de rotation des pompes aux cadences de production <sup>9</sup>. De même, ils commandent avec précision les pompes de dosage de produits chimiques ajoutés à la pâte. Enfin, certains convoyeurs de l'usine en sont également équipés.

Les variateurs aident à mieux maîtriser le procédé en régulant et en maintenant les valeurs de pression et de

température aux différentes étapes. Ils permettent également de mieux contrôler la productivité et de réduire la facture énergétique.

Ray von der Fecht, chef de la partie automatisation du projet *100% Shotton* explique : « Nous avons choisi les variateurs de vitesse ABB pour la réputation de l'entreprise auprès des industriels du papier. De plus, nous connaissons les produits et les personnes. Globalement, ABB proposait une très bonne solution au meilleur coût. »

La phase de mise en œuvre s'est déroulée tellement bien que les varia-

<sup>9</sup> Variateurs ABB de l'atelier de papiers recyclés de l'usine UPM de Shotton (R-U) : ils réduisent la consommation énergétique en adaptant très précisément la vitesse de rotation des pompes aux besoins.



teurs et le système d'automatisation ont été démarrés non seulement selon le calendrier, mais à la minute près. « C'était comme si on tournait l'interrupteur pour allumer la lumière » ajoute M. von der Fecht.

Pour l'industriel, la maintenabilité des variateurs était un des principaux critères de choix. En effet, ils devaient pouvoir être remplacés rapidement en cas de problème et être simples à déplacer. Des cartes interchangeables étaient un « plus », permettant à l'entreprise de maintenir les variateurs en fonctionnement en remplaçant simplement certains de leurs composants critiques. Autre critère : la compacité, pour gagner de la place, améliorer le rendement, atténuer les pertes thermiques et limiter les coûts de refroidissement. Sur tous ces points, les variateurs ABB étaient très avantageux. Autre argument en leur faveur : leur aptitude à communiquer sur PROFIBUS, bus de terrain standard dans l'industrie papetière. Enfin, les variateurs intègrent des selfs réseau qui réduisent les harmoniques injectés sur le réseau et des filtres moteurs qui atténuent les contraintes imposées au bobinage des moteurs. Mais le critère fondamental était la fiabilité qui fait dire à M. von der Fecht : « Notre expérience des variateurs ABB me permet d'affirmer qu'ils sont fiables et répondent à nos besoins. »

# Des économies d'énergie fertiles

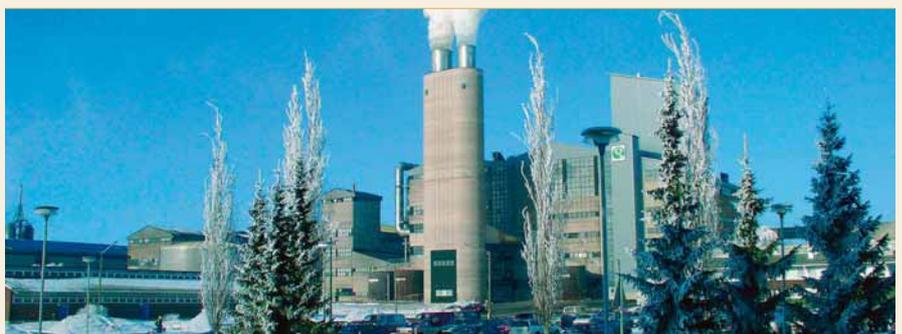
**La rénovation de cinq installations de ventilation de l'usine d'engrais de Kemira GrowHow en Finlande a permis d'économiser plus de 4000 MWh/an. Les moteurs et organes mécaniques de régulation des débits existants ont été remplacés par des moteurs ABB et des variateurs ABB industrial drive, un investissement financé par les économies d'énergie !**

Le Finlandais Kemira GrowHow Oy est un des plus gros producteurs européens d'engrais et de phosphates

pour la nutrition animale <sup>10</sup>. L'entreprise, qui exploite des sites de production à travers l'Europe, annonce un chiffre d'affaires net de 1,26 milliards d'euros (2005) et emploie 2700 personnes.

L'usine Kemira GrowHow de Uusikaupunki, située au sud-ouest du pays, compte deux lignes de production d'engrais et deux unités de fabrication d'acide nitrique. Le projet de modernisation des installations de ventilation

<sup>10</sup> L'usine Kemira GrowHow de Uusikaupunki en Finlande fabrique des produits chimiques industriels et des engrais. L'installation de variateurs de vitesse ABB a engendré 4000 MWh d'économies annuelles.



d'une des lignes d'engrais remonte à 2005. A la suite d'un diagnostic énergétique complet de l'usine, Kemira GrowHow s'adressa à la société de services énergétiques (SSE) Inesco Oy pour identifier les gisements potentiels d'économies d'énergie, tout spécialement dans les installations aérodynamiques de l'usine.

**Les nouveaux moteurs et variateurs nous ont permis d'économiser plus de 4000 MWh/an, soit 150 000 euros ou 2800 tonnes de CO<sub>2</sub>.**

#### L'apport de la vitesse variable

Comme beaucoup de procédés de l'industrie chimique, les lignes de production d'engrais **ii** intègrent de nombreux ventilateurs pour la circulation des gaz, des fumées et de l'air. La société Inesco examina neuf ventilateurs d'une puissance de 132 à 630 kW, et en choisit cinq pour une étude approfondie. Ces derniers étaient entraînés par des moteurs électriques raccordés directement au réseau et tournant à vitesse maximale. Les débits de ventilation étaient régulés par des organes mécaniques (aubes directrices) dont certains étaient presque en fin de vie et nécessitaient un remplacement rapide, investissement chiffré à plusieurs dizaines de milliers d'euros par ventilateur.

Au vu de ces chiffres et des résultats du prédiagnostic énergétique d'Inesco, Kemira GrowHow décida de s'affranchir des organes mécaniques et d'équiper les cinq ventilateurs de moteurs et de variateurs de vitesse ABB pour moduler les débits en fonction des besoins réels.

#### Economies d'énergie

«Depuis que nous avons installé les moteurs et variateurs ABB, nous avons économisé plus de 4000 MWh d'électricité par an», affirme Jari Lintula, responsable de l'automatisation de l'usine. Cela équivaut à 150 000 euros, au tarif de l'électricité pour les consom-

mateurs industriels, ou à une réduction de 2800 tonnes d'émissions de CO<sub>2</sub>.

Qui plus est, les variateurs ABB ont également amélioré le facteur de puissance<sup>6)</sup>, permettant de résoudre un problème d'échauffement dans un des transformateurs d'alimentation des moteurs des ventilateurs.

#### Des prévisions confirmées

La modernisation des ventilateurs, effectuée lors de l'arrêt planifié de l'usine, n'a que peu perturbé la production et mobilisé le personnel du site. Jari Lintula insiste sur les gains réalisés :

«Les nouveaux moteurs et variateurs fonctionnent maintenant depuis plusieurs milliers d'heures avec des performances qui confirment les gains escomptés. En fait, nous avons été surpris de la précision de nos calculs. Il semble que les économies d'énergie réalisables avec les variateurs dans ce type d'application de ventilation peuvent être anticipées avec un haut degré de fiabilité. Elles sont tangibles, il ne s'agit pas d'un simple argument commercial.»

Il confirme également que l'intégration de variateurs de vitesse dans une usine chimique ne pose absolument aucun problème du point de vue de la conduite des procédés. En plus de fiabiliser cette conduite, il souligne l'importance de la performance énergétique :

«Nous cherchons activement de nouveaux gisements d'économie d'éner-

gie. Je suis sûr que nous pouvons utiliser des variateurs de vitesse pour d'autres applications.»

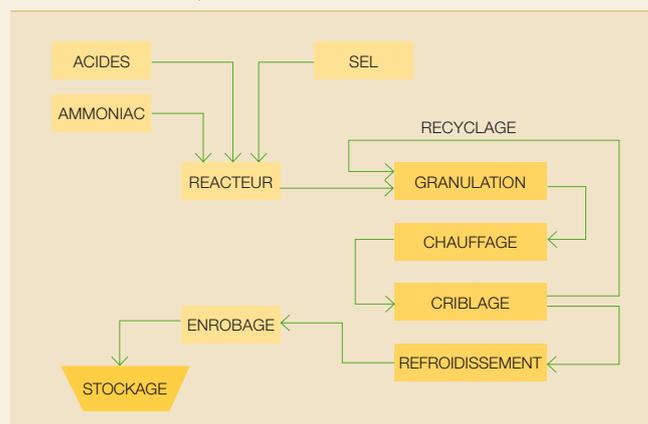
#### Sociétés de services énergétiques (SSE)

Après comparaison des différentes solutions, Kemira GrowHow choisit de rationaliser sa consommation énergétique et décida de travailler avec la SSE Inesco. Ce type d'entreprise développe, installe et finance des projets d'efficacité énergétique et de réduction des coûts de maintenance de sites sur plusieurs années.

En Finlande, Inesco est pionnière dans son domaine avec, à son actif, plusieurs projets couronnés de succès dans différents secteurs comme les industries électro-intensives du papier, de la métallurgie et de la chimie.

Pour Kemira GrowHow, le principal avantage de cette démarche d'efficacité énergétique est de s'appuyer sur un prestataire externe pour la plupart des études techniques, la consultation des fournisseurs et autres prestations courantes. Autre intérêt : le contrat de services énergétiques prévoit le financement des investissements par les économies d'énergie réalisées. Au cours des trois ans du contrat, Kemira GrowHow versera une commission à Inesco, représentant 80% de la baisse de la facture d'énergie. Au terme des trois ans, Kemira GrowHow prendra pleinement possession des équipements installés et tirera directement profit des économies.

**ii** Procédé de fabrication des engrais (avec l'aimable autorisation de Kemira GrowHow)



Pour en savoir plus sur Kemira GrowHow : [www.kemira-growhow.com](http://www.kemira-growhow.com) et sur Inesco : [www.inesco.fi](http://www.inesco.fi)

#### Note

<sup>6)</sup> Rapport entre la puissance réelle et la puissance apparente. Un facteur de puissance élevé diminue les pertes.

## Produits d'efficacité énergétique

# Une université économise des millions de dollars en rénovant une chaudière

**En réduisant les émissions polluantes d'une chaudière, l'université du Texas a diminué sa consommation d'électricité de 746 000 kWh et celle de combustible de plusieurs centaines de gigajoules (GJ). Un investissement rentabilisé en moins d'un an.**

Le campus d'Austin (UTA) de l'université du Texas est le fleuron de cette institution académique de renom. Accueillant 50 000 étudiants, il s'étend sur 170 hectares aux abords de la ville d'Austin. Ses besoins de chauffage et d'énergie sont couverts par les chaudières et les turbines à gaz de la centrale *Hal C. Weaver Power Plant*, qui fournit l'électricité, la vapeur, l'eau refroidie et déminéralisée ainsi que l'air comprimé à quelque 200 bâtiments du campus.

**Doper le rendement d'une chaudière**  
Dans le sillage d'un projet de réduc-

<sup>12</sup> Les variateurs de fréquence modulent avec précision les débits d'air, permettant d'optimiser la gestion de la combustion dans le réseau de tirage forcé de la chaudière.



tion des émissions polluantes de sa centrale pour se conformer aux exigences de qualité de l'air de l'Etat du Texas, l'université a eu la bonne surprise de voir sa facture énergétique annuelle fondre de 500 000 dollars. Ces économies résultent de la modernisation d'une seule chaudière de 68 tonnes avec un système innovant appelé Compu-NOx™. Celui-ci contrôle les émissions d'oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), groupe de gaz à l'origine de pluies acides et de pollution atmosphérique. La chaudière 3 qui émettait à elle seule 137 t/an d'oxyde d'azote n'en rejette plus que 19 t/an.

Compu-NOx est un système breveté et ultramoderne de gestion de la combustion des chaudières développé par l'entreprise Benz Air Engineering de Las Vegas (Nevada). «Au départ, la modernisation de la chaudière visait à réduire les émissions de NO<sub>x</sub>; à l'arrivée, nous produisons plus d'énergie avec moins de gaz grâce à un rendement de combustion supérieur. Cela nous a permis de mettre en veilleuse nos chaudières de secours et d'économiser plusieurs centaines de milliers de dollars par an», note Juan M. Ontiveros, directeur des utilités et de la gestion énergétique de UTA.

«Les prévisions initiales tablaient sur une économie annuelle de 500 000 dollars pour la modernisation de la première chaudière; or, du fait de la hausse continue du prix des combustibles, l'université a de fortes chances d'économiser 1 million de dollars supplémentaire suite à la modernisation de la chaudière 3 à elle seule», confie Robert Benz, président de Benz Air Engineering.

### Les variateurs modulent les débits d'air de combustion

Pour moduler avec précision les débits d'air, le système de contrôle des émissions Compu-NOx de Benz Air

Engineering utilise des variateurs de vitesse <sup>12</sup>, plutôt que des organes mécaniques. «Le système Compu-NOx exploite le rapport linéaire absolu entre la vitesse de rotation des ventilateurs et le débit d'air de ventilation comme élément de base pour contrôler la combustion», ajoute M. Benz.

Avec les variateurs ABB, on régule très précisément les débits d'air, ce qui explique les gains de rendement et la baisse des émissions polluantes de la chaudière 3 qui sont passées de 175 ppm de NO<sub>x</sub> à moins de 25 ppm sans même installer de nouveaux brûleurs. Grâce aux variateurs ACS800 d'ABB, les économies annuelles atteindraient 746 000 kWh d'électricité et 338 000 GJ de combustible.

Pour l'université, le retour sur investissement est inférieur à 12 mois avec des économies qui continueront sur plusieurs années grâce au système de recirculation des fumées et à la commande en vitesse variable des ventilateurs.

#### Per Wikstroem

ABB Switzerland Ltd.  
Turgi (Suisse)  
per.wikstroem@ch.abb.com

#### Jukka Tolvanen Akseli Savolainen

ABB Oy, Drives  
Helsinki (Finlande)  
jukka.tolvanen@fi.abb.com  
akseli.savolainen@fi.abb.com

#### Peter Barbosa

ABB Corporate Research  
Baden-Dättwil (Suisse)  
peter.barbosa@ch.abb.com

#### Remerciements

La Revue ABB tient à remercier les personnes suivantes pour leur contribution : Steve Ruddel, ABB UK (Les variateurs ABB mettent du vert dans une usine papetière) et Ken J. Graber, ABB USA (Une université économise des millions de dollars en rénovant une chaudière).

#### Encadré ABB, leader mondial de la variation de vitesse

ABB est le premier fournisseur mondial de variateurs de vitesse. En collaboration étroite avec son réseau de partenaires distributeurs, ABB propose une gamme complète de variateurs et de systèmes d'entraînement à haut rendement énergétique pour une large palette d'applications industrielles. L'offre inclut des convertisseurs de fréquence et des variateurs de vitesse à courant continu de 180 W à 100 MW, de même que des solutions dédiées pour des applications « métiers ». Cette offre s'accompagne d'un éventail complet de services qui garantit aux clients d'ABB le meilleur retour sur investissement possible.

Retrouvez ABB sur [www.abb.com](http://www.abb.com).

Pour une information détaillée sur les variateurs de vitesse et l'efficacité énergétique, cf. [energy@fi.abb.com](mailto:energy@fi.abb.com) (variateurs BT) ou [mvdrives@ch.abb.com](mailto:mvdrives@ch.abb.com) (variateurs MT)

# Moteurs à haut rendement énergétique

ABB optimise les performances de ses moteurs électriques sur leur cycle de vie complet

Roelof Timmer, Mikko Helinko, Ritva Eskola



Si les moteurs à haut rendement consomment moins d'énergie, il importe également d'optimiser leurs performances sur leur durée de vie complète en tenant compte de plusieurs facteurs: adéquation à l'application, dimensionnement, fiabilité des organes de roulement et du bobinage. ABB fabrique des moteurs de qualité à haut rendement énergétique qui répondent aux impératifs de fiabilité et de disponibilité des industriels.

## Produits d'efficacité énergétique

Les moteurs électriques à haut rendement entrent dans le cadre du programme de l'Union européenne (UE) de réduction des consommations énergétiques et des émissions de CO<sub>2</sub>. Pour ces machines, l'UE a créé trois classes de rendement : Eff1 à Eff3, la classe Eff1 étant la plus élevée. Cette initiative a joué un rôle de premier plan dans la réduction du nombre de moteurs à faible rendement en exploitation, à tel point que la classe Eff1 est désormais perçue par certains non seulement comme un marquage de rendement, mais également un gage de qualité.

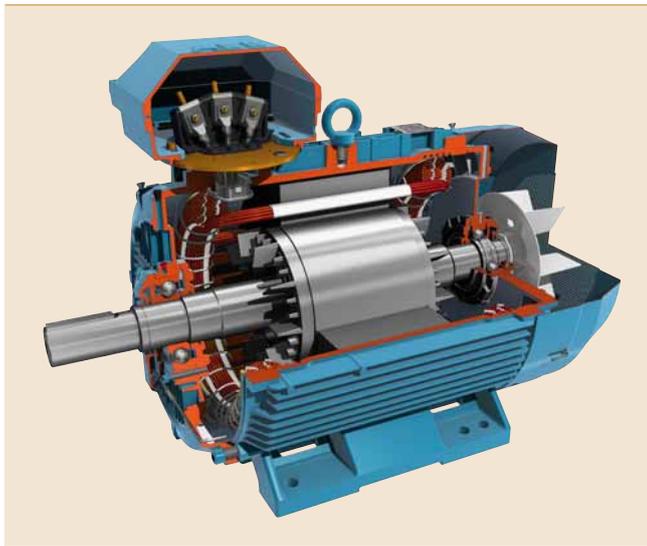
A présent, le programme européen évolue pour harmoniser les méthodes de mesure des rendements afin de comparer plus facilement les moteurs de différents constructeurs.

Depuis très longtemps, ABB s'est fait l'avocat des moteurs à haut rendement. Dès l'origine, sa politique a été de proposer en standard et sur stock des moteurs à haut rendement, c'est-à-dire sans délai et sans surcoût.

Ainsi, au lancement du programme de l'UE, tous les moteurs ABB affichaient les valeurs de rendement des classes Eff1 et Eff2, les moteurs Eff1 étant inclus dans la gamme standard de produits ABB.

Concevoir et fabriquer des moteurs fiables avec de bonnes performances au démarrage et en fonctionnement suppose un juste équilibre entre plusieurs facteurs : rendement et coût bien sûr, mais également conception des organes de roulement, des encoches et du ventilateur, niveaux d'échauffement, de vibration et de bruit. Seul un arbitrage judicieux entre ces facteurs donnera des moteurs alliant qualité, fiabilité, rendement élevé, longue durée de vie et masse optimale. Plutôt que de se polariser sur le rendement, ABB préfère une démarche de gestion du cycle de vie qui vise à tirer le maximum de ces machines tout en minimisant les coûts induits sur leur durée d'utilisation. Outre le rendement, la gestion du cycle de vie souligne l'importance de la fiabilité et de la disponibilité.

Moteur M3BP



La consommation électrique est en général le plus gros poste de dépenses des moteurs. A juste titre, la montée en flèche des coûts énergétiques a braqué les projecteurs sur leurs dépenses d'énergie et leur rendement. Dans de nombreuses régions du monde, les pouvoirs publics prennent des mesures pour inciter les industriels à s'équiper en moteurs à haut rendement. Ainsi, certains constructeurs dopent le rendement de leurs moteurs sans prêter attention aux autres facteurs de performance.

#### Concevoir pour un rendement élevé

Pour ABB, la clé du rendement élevé d'un moteur au coût global minimisé est la recherche de la meilleure qualité à chaque étape de sa conception et de sa fabrication.

Le rendement d'un moteur exprime le rapport de la puissance utile (mécani-

que) sur sa puissance absorbée (électrique). Les pertes du moteur, sous forme de chaleur, correspondent à la différence entre ces deux mesures de puissance. Pour accroître le rendement, il faut donc réduire les pertes.

Les pertes du moteur se répartissent en cinq grandes catégories, dont deux – pertes dans le fer et pertes par ventilation et par frottement – sont des pertes à vide car elles restent constantes quel que soit le niveau de charge. Les pertes en charge, quant à elles, varient en fonction de la charge et regroupent les pertes Joule, les pertes

rotoriques et les pertes supplémentaires **Encadré 1**. Toutes ces pertes peuvent être atténuées par une étude et une exécution ad hoc, c'est-à-dire en veillant à la qualité de conception et de fabrication des moteurs.

Les pertes dans le fer résultent de l'énergie requise pour vaincre l'opposition aux champs magnétiques fluctuants dans le matériau du circuit magnétique. Les concepteurs peuvent diminuer ces pertes en utilisant un acier de meilleure qualité et en rallongeant le circuit magnétique pour réduire l'induction magnétique.

Les pertes par ventilation et par frottement sont dues à la résistance de l'air et au frottement des roulements. Dans les moteurs de haute qualité, on les réduit en sélectionnant des organes de roulement et des garnitures d'étanchéité plus performants, et en améliorant le refroidissement et la conception du ventilateur. Celui-ci doit être suffisamment puissant pour assurer un bon refroidissement, sans l'être trop pour ne pas nuire au rendement ni accroître le niveau sonore. Dans les moteurs ABB, les dimensions et le pas des aubes varient d'un modèle à l'autre pour des résultats optimisés.

Pour ce qui concerne les pertes en charge, les pertes Joule (ou pertes I<sup>2</sup>R) sont le fait d'un échauffement dû à la circulation de courants dans la résistance du bobinage stator. Elles peuvent être réduites en optimisant la

**Encadré 1** Répartition des pertes dans un moteur M3BP d'ABB

Pertes à vide	Pertes dans le fer	18%
	Pertes par ventilation et par frottement	10%
Pertes en charge	Pertes Joule	34%
	Pertes rotoriques	24%
	Pertes supplémentaires	14%

conception des encoches du stator avec des tôles en acier à faibles pertes, aussi uniformes et fines que possible pour maximiser l'intensité des champs magnétiques. Elles doivent également être soigneusement alignées pour des canaux bien droits. Il va de soi que plus les tôles sont fines, plus elles sont chères à fabriquer, un alignement précis mettant en œuvre des techniques de production spécialisées.

Les pertes rotoriques sont dues aux courants de rotor et aux pertes dans le fer. Dans les moteurs à haut rendement, ces pertes sont réduites en augmentant les dimensions des barres conductrices et des bagues d'extrémité pour diminuer la résistance. Enfin, les pertes supplémentaires résultent de flux de fuite induits par les courants de charge. Elles peuvent être atténuées en améliorant la géométrie des encoches.

#### A températures inférieures, fiabilité supérieure

Les moteurs qui ne fonctionnent qu'occasionnellement ou dans des applications non critiques ne doivent pas nécessairement être ultrafiabiles. Bien évidemment, un moteur qui tombe en panne pose toujours problème sans pour autant porter à conséquence. Dans certains secteurs ou procédés industriels, toutefois, la fiabilité est une priorité absolue. Dans des procédés en continu comme, par exemple, les applications de refroidissement dans l'industrie du pétrole et du gaz ou l'entraînement des machines à papier, les arrêts de production intempestifs doivent être évités à tout prix. Une durée d'indisponibilité de quelques minutes peut coûter aussi cher qu'un moteur neuf.

La fiabilité est également un critère important pour les constructeurs de machines (OEM) dont les produits intègrent des moteurs. La défaillance du moteur remet en cause la fiabilité de la machine et la réputation de son constructeur.

Pour la fiabilité de ses moteurs, ABB applique la même logique que pour le rendement : c'est la qualité qui est déterminante, tout particulièrement celle des matériaux utilisés. Sachant qu'ils interviennent en moyenne pour

55% du coût d'un moteur, il est clair qu'un constructeur qui veut sabrer ses coûts, lésinera sur la qualité des matériaux au détriment de la fiabilité de ses produits.

Les deux sources de défaillance les plus courantes des moteurs sont les organes de roulement et le bobinage qui pèsent sur leur fiabilité globale. La température de fonctionnement du moteur a le plus fort impact sur la durée de vie de ces composants. Un moteur à haut rendement et de bonne qualité tournant à pleine charge peut afficher un échauffement normal de 60 à 80 °C, celui-ci pouvant atteindre 100 °C pour les moteurs de moindre qualité. L'échauffement peut être supérieur uniquement dans les moteurs conçus pour des températures plus élevées et donc dotés d'un système d'isolement capable de supporter cet échauffement.

Pour une fiabilité maximale, la qualité des organes de roulement est particulièrement importante **Encadré 2**. Les concepteurs doivent sélectionner le type de roulement adapté à l'application et à la charge, et ensuite établir le programme de lubrification approprié au vu des spécificités de l'environnement et des conditions opératoires. Les qualités lubrifiantes de la graisse se dégradant aux hautes températures, il faut éviter un échauffement excessif. Une baisse de 10 à 15 °C de la température de fonctionnement doit, en théorie, doubler la durée de vie de la graisse des roulements.

Un échauffement interne excessif affecte également la durée de vie du bobinage. Dans ce cas, c'est l'isolant des fils de cuivre qui se dégrade aux hautes températures. Une élévation de 10 °C de la température de fonctionnement peut diviser par deux la durée de vie du bobinage. C'est la raison pour laquelle la plupart des moteurs sont fabriqués en classe d'isolation F (155 °C) mais conçus pour fonctionner en classe d'échauffement B (130 °C). L'échauffement des moteurs est un des critères de performance qui fait l'objet d'efforts continus de recherche.

Autre facteur de fiabilité du bobinage : la tension d'épreuve qui mesure l'inté-

grité du bobinage. Les bobinages peuvent en général supporter une tension d'environ 1200 V ; des moteurs peuvent aller jusqu'à 1400 V voire plus si le bobinage est apte à encaisser des pointes de tension supérieures, notamment lorsqu'ils sont alimentés par certains variateurs de vitesse **1**.

Il faut garder à l'esprit que la fiabilité peut ne pas être l'élément décisif dans tous les environnements d'exploitation. Ainsi, par exemple, l'industrie du pétrole et du gaz donne la priorité à la sécurité. Les moteurs opèrent souvent dans des environnements très difficiles, notamment à des températures extrêmement élevées ou basses,

#### Encadré 2 Organes de roulement

Pour optimiser la fiabilité des moteurs, les organes de roulement doivent :

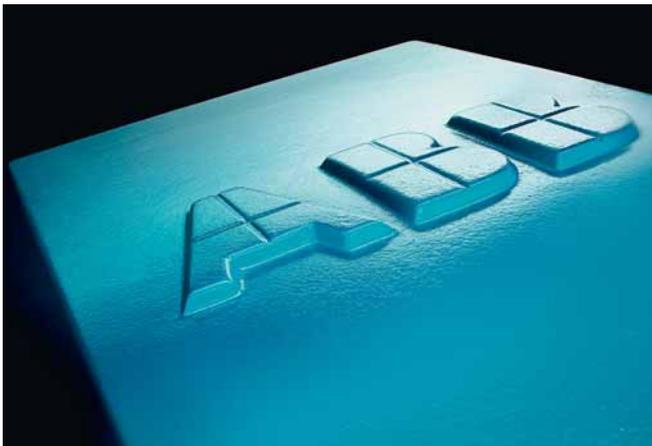
- être fournis par un fabricant de renom ;
- être adaptés à la charge et à la vitesse ;
- disposer d'un jeu interne adapté à la température de fonctionnement ;
- utiliser une graisse adaptée à la température de fonctionnement ;
- être relubrifiables si un service de maintenance interne existe (dans le cas contraire, il est préférable d'utiliser des roulements graissés à vie).

#### 1 Caractéristiques d'un bobinage



- Compact avec un bon taux de remplissage des encoches ;
- Faibles dimensions des têtes de bobines ;
- Bonne qualité du cuivre ;
- Bonne qualité du système de bobinage ;
- Bonne qualité de l'isolant des encoches, des systèmes d'imprégnation et des systèmes d'isolation de phases.

## Produits d'efficacité énergétique



ou à des ambiances poussiéreuses ou humides. ABB bénéficie d'une très grande expérience dans la fourniture de moteurs à la fois pour les procédés industriels classiques et les environnements extrêmes. Cette expérience est mise à profit pour développer et fabriquer des moteurs de haute qualité qui, en plus d'être conformes aux prescriptions normatives et aux règles de sécurité, conservent leur haut niveau de rendement et de fiabilité sur toute leur durée de vie.

#### Qualité et performance, même combat

Les moteurs électriques – véritables chevilles ouvrières de l'industrie moderne – peuvent jouer un rôle impor-

tant dans nos initiatives de réduction des consommations énergétiques et des émissions de CO<sub>2</sub>. On estime que les moteurs absorbent 65% de l'énergie électrique consommée par le secteur industriel et que la production d'électricité servant à les alimenter émet chaque année 37 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>. Au vu de ces chiffres, même de faibles gains de rendement ont un impact positif à l'échelle du globe.

Les utilisateurs sont également fortement incités financièrement à s'équiper de moteurs à haut rendement, même avec un surcoût à l'achat de 5 à 7% (grosses puissances) ou de

15 à 20% (petites puissances), surcoût qui est très rapidement récupéré par les économies d'énergie induites. Les coûts énergétiques du moteur sur sa durée de vie peuvent représenter jusqu'à 100 fois l'investissement initial.

Pour autant, le rendement d'un moteur n'est qu'une des composantes de ses performances et la facture d'électricité qu'un élément de son coût global. Sa fiabilité – ainsi que les dépenses de maintenance et les temps d'indisponibilité du fait de problèmes de fiabilité – peuvent peser encore plus lourd dans certaines applications. Par son expérience et son savoir-faire, ABB a une compréhension fine des rapports complexes qui existent entre rendement, masse, échauffement, niveau de bruit et vibrations, pour optimiser les performances au démarrage et en fonctionnement. En fabriquant des moteurs de haute qualité et en cherchant à minimiser le coût global sur la durée de vie, ABB garantit l'excellence des performances à tous les niveaux.

#### Encadré 3 Rendement énergétique des moteurs : trois règles d'or

##### Éviter de rebobiner un moteur

Un moteur rebobiné accuse une baisse de rendement de 1% pour les puissances supérieures à 30 kW et jusqu'à 2% pour les plus petites puissances. Cette perte de rendement est moindre dans les moteurs de haute qualité que dans ceux de qualité inférieure.

##### Éviter de surdimensionner un moteur

Pour plusieurs raisons, les utilisateurs achètent souvent des moteurs surdimensionnés. Des essais réalisés dans l'industrie des procédés indiquent que les moteurs fonctionnent en moyenne à seulement 50 à 60% de leur charge nominale au détriment de leur rendement (à charge partielle). En remplaçant des moteurs en sous-charge notable par des moteurs plus petits et à haut rendement, on dope les performances des systèmes.

##### Commander les moteurs en vitesse variable

Il est vain d'utiliser un moteur à haut rendement si le système d'entraînement global est contre-performant<sup>1)</sup>. Dans de nombreuses applications de pompage et de ventilation, par exemple, les débits restent régulés par action mécanique. Faire tourner les moteurs à pleine vitesse alors que seules les petites vitesses de rotation sont indispensables est un véritable gâchis. La variation de vitesse optimise la commande et la régulation de vitesse des moteurs avec, à la clé, d'importantes économies d'énergie. Une étude récente de l'université de Lappeenranta en Finlande a montré que la commande en vitesse variable des installations de pompage en parallèle peut induire des économies d'énergie de près de 70%. Outre son activité Moteurs, ABB est leader mondial sur le marché de la vitesse variable.

<sup>1)</sup> Cf. *Les variateurs de vitesse au rendez-vous de l'efficacité énergétique*, p. 73

##### Roelof Timmer

ABB Oy, Automation Technologies  
Helsinki (Finlande)  
roelof.timmer@fi.abb.com

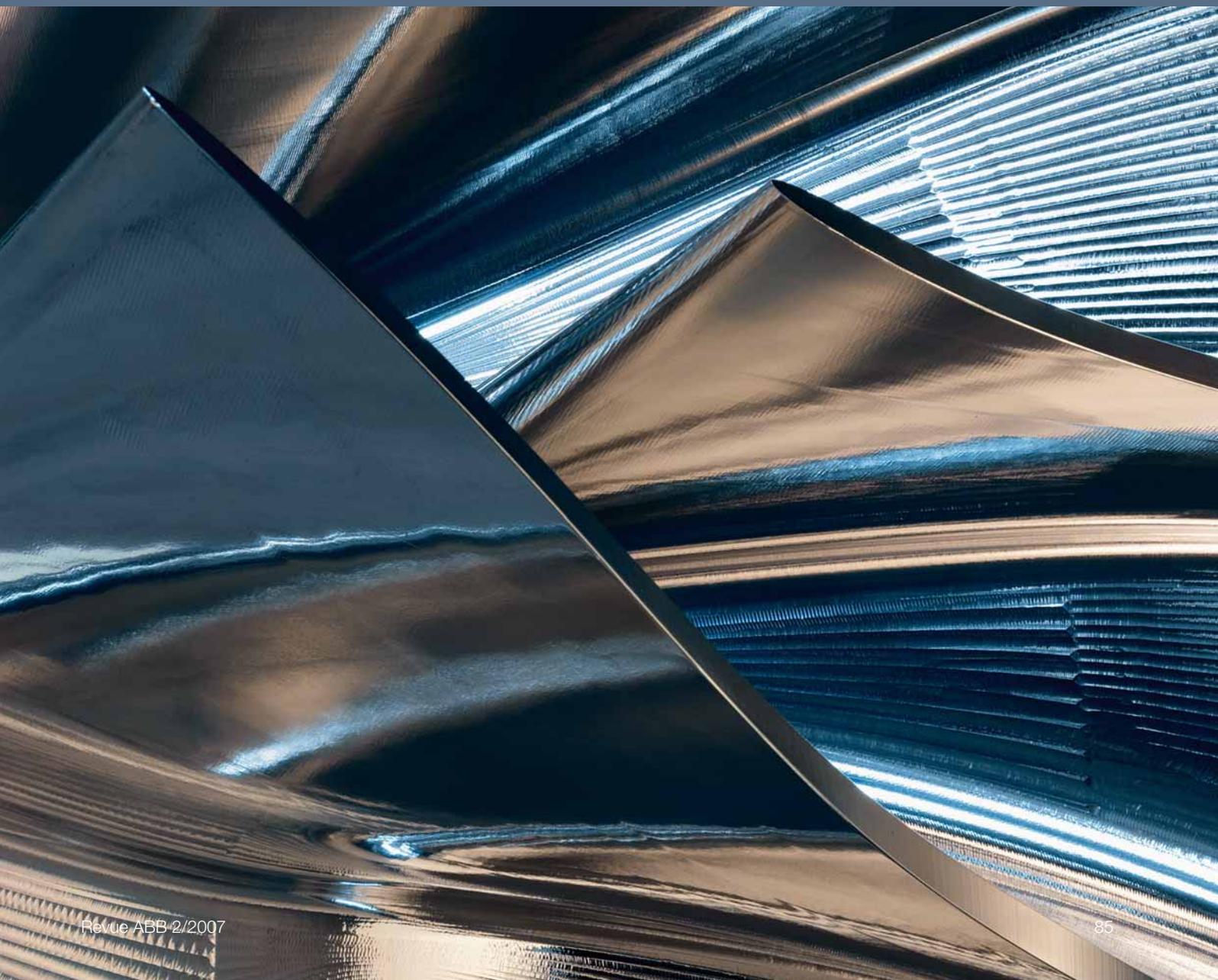
##### Mikko Helinko

Ritva Eskola  
ABB Oy, Motors  
Vaasa (Finlande)  
mikko.helinko@fi.abb.com  
ritva.eskola@fi.abb.com

# Il était une fois... le turbocompresseur ABB

Malcolm Summers

Des océans du globe aux cimes de l'Himalaya, des étendues glacées de l'Arctique au désert aride d'Australie, les turbocompresseurs de gaz d'échappement ABB sont durs à la tâche. Chronique d'une idée plus que centenaire devenue un produit de haute technologie, performant et fiable à l'extrême.



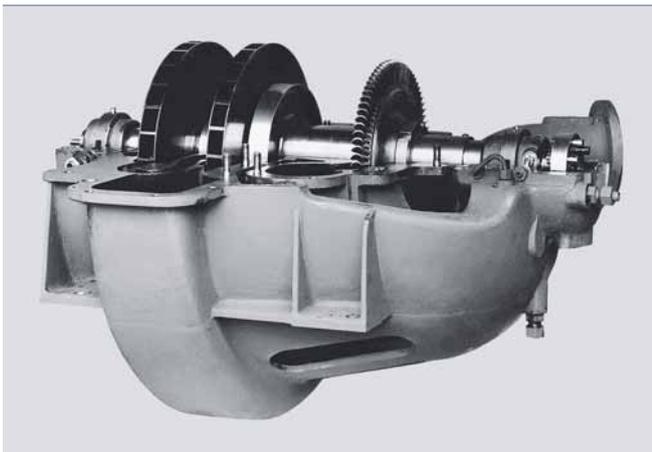
## ABB, ÉTERNEL PIONNIER

**A** l'instar de nombreuses autres idées qui, de tout temps, font progresser la technologie, le turbocompresseur de gaz d'échappement a d'abord connu une évolution lente. C'est en 1905 que l'ingénieur suisse Alfred Büchi <sup>1</sup> breveta ce qu'il décrivait comme un «moteur compound fortement suralimenté», constitué d'un moteur Diesel, d'un compresseur axial et d'une turbine axiale calés sur un même arbre. Tandis qu'Alfred Büchi poursuivait ses travaux, d'autres inventeurs dans le monde rencontraient un certain succès avec des compresseurs mécaniques. Mais A. Büchi était également confronté à une concurrence sur son propre terrain. En 1920, de petits turbocompresseurs équipaient l'aviation française et américaine, les gros turbocompresseurs

<sup>1</sup> Alfred Büchi: son brevet de 1905 inaugura l'ère des turbocompresseurs de gaz d'échappement.



<sup>2</sup> Premier turbocompresseur au monde pour gros moteur Diesel (1924)



n'étant pas encore perçus comme économiquement viables.

### Premiers succès

En 1923, la publication en Allemagne des résultats concluants d'essais de suralimentation à basse pression avec un moteur Diesel quatre temps changea la donne. Brown Boveri, l'une des deux compagnies fondatrices d'ABB, décida de développer des turbocompresseurs en s'appuyant sur son savoir-faire dans la fabrication des turbines et des compresseurs.

Entre 1945 et 1960, la flotte marchande mondiale doubla de taille avec un impact majeur sur le marché des turbocompresseurs.

La même année, l'entreprise suisse SLM (*Schweizerische Lokomotiv- und Maschinenfabrik*) expérimentait un moteur deux temps dont elle désirait doper la puissance et le rendement. Brown Boveri préconisa un turbocompresseur pour alimenter les soufflantes de balayage, machine qui fut ensuite commandée par SLM. En juin 1924, le VT402, premier turbocompresseur de gaz d'échappement pour moteur Diesel de grande puissance, sortait de l'usine Brown Boveri de Baden en Suisse <sup>2</sup>.

L'intérêt était également marqué dans le secteur maritime. L'année précé-

dente, les chantiers navals allemands Vulkan commandèrent deux grands paquebots, chacun propulsé par deux moteurs Diesel MAN quatre temps de dix cylindres turbocompressés. Alfred Büchi supervisa lui-même la conception et la fabrication des turbocompresseurs. Lancés en 1926, ces deux navires furent les premiers dans l'histoire de la marine à être équipés de moteurs suralimentés par turbocompresseurs.

### Le «Bureau de Büchi»

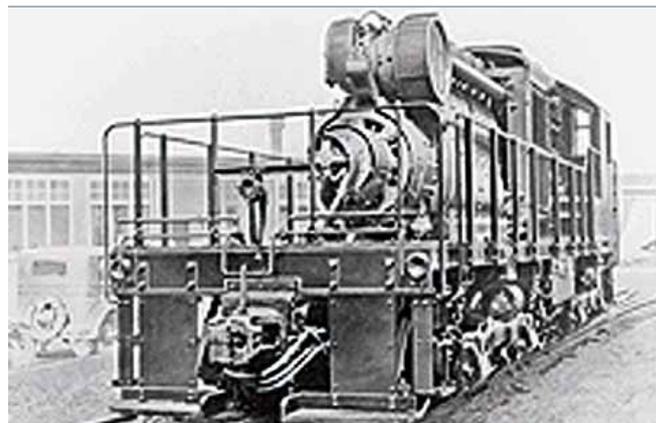
En 1925, A. Büchi déposa, en nom propre, un brevet qui lui valut une renommée mondiale: il y détaillait les atouts du régime pulsé pour une suralimentation basse pression, véritable révolution attendue de tous. Une nouvelle société, plus connue sous le nom de «Bureau de Büchi»<sup>1)</sup>, vit le jour l'année suivante. Tandis qu'Alfred Büchi s'occupait du bureau d'études et des relations clients, Brown Boveri fabriquait les turbocompresseurs et SLM fournissait les moteurs Diesel pour les essais.

Un turbocompresseur plus performant et plus gros, le VT592, fut livré à SLM en 1927 pour un second moteur expérimental, affichant des résultats impressionnants. Des contrats de licence furent signés entre le Bureau de Büchi et les principaux motoristes. Les premiers essais sur locomotives diesel-électriques furent réalisés <sup>3</sup>. Les turbocompresseurs ouvrirent également la voie à une exploitation plus écono-

### Note

<sup>1)</sup> Le Bureau fut dissout en 1941.

<sup>3</sup> Ce moteur ALCO 8 cylindres, 912,7 CV, était caractéristique des modèles suralimentés par Brown Boveri à la fin des années 30 (modèle illustré: VTx 350)



## ABB, ÉTERNEL PIONNIER

mique des centrales d'énergie fixes au diesel.

En 1932, une gamme standardisée de turbocompresseurs fut spécifiée, définissant neuf tailles pour des diamètres de compresseurs de 110 à 750 mm. Une architecture modulaire et la standardisation poussée à son maximum permirent une adaptation à un large éventail de moteurs. Ainsi, par exemple, les roulements à rouleaux montés en externe facilitaient considérablement la maintenance.

#### Lancement du VTR..0

Dès 1940, une nouvelle gamme de turbocompresseurs était à l'étude chez Brown Boveri. Baptisée VTR, elle intégrait un compresseur ouvert à flux radial (d'où le R), un rotor léger, des roulements à rouleaux montés en externe pour une grande souplesse et un système autolubrifiant. La standardisation des composants permit une production en grande série; la mise sur le marché en 1945 de la gamme VTR..0 marqua une étape décisive dans l'histoire des turbocompresseurs BBC/ABB. En affichant un rendement du compresseur de 75% pour un taux de compression de 2, prémices d'avancées prometteuses, cette gamme inaugurerait une ère nouvelle <sup>4</sup>.

#### La marche triomphale de la suralimentation par turbocompresseur

Entre 1945 et 1960, la flotte marchande mondiale doubla de taille avec un

impact majeur sur le marché des turbocompresseurs. Durant cette période, les pressions de suralimentation augmentèrent lentement mais régulièrement. Si les VTR d'origine pouvaient être équipés indifféremment de compresseurs basse ou haute pression, ces derniers étaient pénalisés par un débit volumique restreint. Au fil des ans, cette restriction s'estompa, permettant des taux de compression à pleine charge frôlant régulièrement 3.

En 1925, A. Büchi déposa, en son nom, un brevet qui lui valut une renommée mondiale : il y détaillait les atouts du régime pulsé pour une suralimentation basse pression, véritable révolution attendue de tous.

Les progrès constants de la technologie de la turbosuralimentation contribuèrent, au début des années 50, à un nouvel élan. En octobre 1952, le pétrolier de 18000 tonnes *Dorthe Maersk* prit la mer. Sorti des chantiers navals danois A. P. Møller, il s'agissait du tout premier navire propulsé par un moteur Diesel deux temps turbosuralimenté (B&W, 6 cylindres). Avec deux turbocompresseurs latéraux VTR630, la puissance du moteur passa de 5608,3

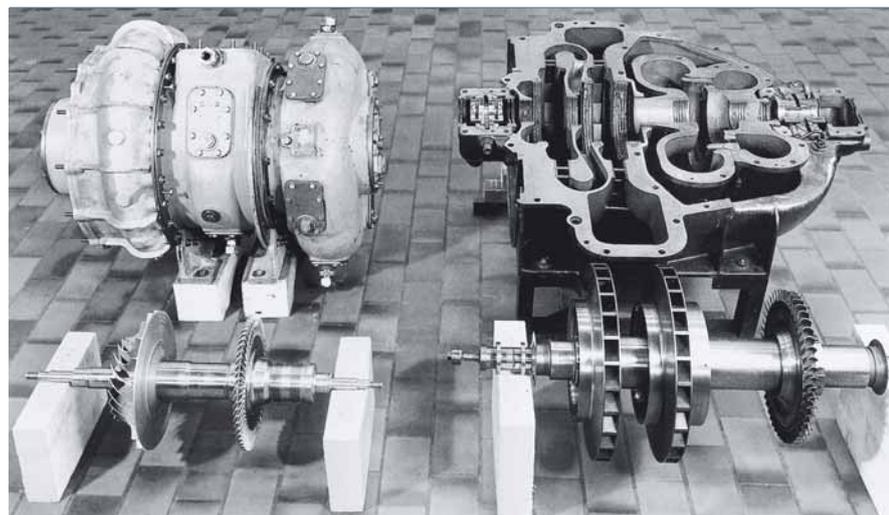
à 8113,3 CV (4123,7 kW à 5965,6 kW). Le *Dorthe Maersk* marque une étape décisive dans la suralimentation des moteurs deux temps marins.

A cette époque, d'importants projets de collaboration avec les motoristes virent le jour, démontrant une fois de plus l'intérêt de relations étroites entre ces derniers et les fabricants de turbocompresseurs. Il importait, en effet, d'expliquer la nouvelle technologie, d'exploiter au mieux l'énergie des gaz d'échappement en régime pulsé et, surtout, d'adapter la conception des tuyaux d'échappement.

A partir de 1955, Brown Boveri signa plusieurs contrats de licence importants dont un d'une grande portée : en 1958, une licence fut accordée au Japonais *Ishikawajima-Harima Heavy Industries* (IHI) pour la fabrication de turbocompresseurs BBC/ABB. L'entreprise IHI qui, à l'époque, fabriquait des moteurs sous licence Sulzer, poursuivait son expansion en Asie et, ce faisant, assura aux turbocompresseurs ABB une position dominante dans cette région du monde.

La construction navale était florissante, le pétrole et les carburants étaient bon marché. L'industrie des moteurs Diesel était en plein essor et le VTR..0, avec son rendement global proche de 56%, à son apogée. Les moteurs équipés de turbocompresseurs BBC/ABB ne cessaient de battre des re-

<sup>4</sup> Evolution de la technologie des turbocompresseurs entre 1924 et 1945. Conçus pour la même taille de moteur, le VTR320, plus compact (gauche), affiche un taux de compression plus élevé que son prédécesseur le VT402.



<sup>5</sup> Moteur Diesel deux temps Sulzer, 32859 CV, modèle 9 RLA90 fabriqué par le Japonais IHI avec trois turbocompresseurs VTR714



## ABB, ÉTERNEL PIONNIER

cords de puissance et de rendement.

### Entrée en scène du VTR..1

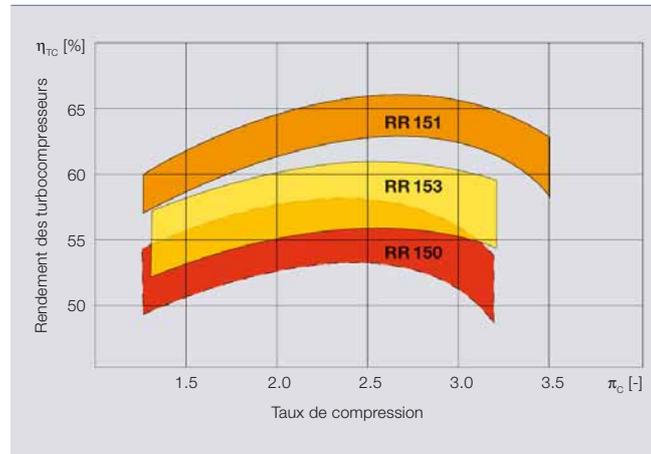
Les années 50 et 60 ont vu se développer de nouveaux compresseurs possédant des rendements, des taux de compression et des débits supérieurs avec des roulements à rouleaux plus performants et des supports moteur renforcés. En 1970, des compresseurs aux débits plus élevés firent leur apparition avec un carter de sortie des gaz élargi et une admission de la turbine modifiée.

Toutes ces améliorations furent intégrées en 1971 dans une nouvelle gamme, le VTR..1. Dès lors, Brown Boveri pouvait proposer des turbocompresseurs au rendement global proche de 60% pour un large éventail d'applications. Si auparavant, ils avaient régulièrement mais lentement gagné en puissance, cette gamme marqua un premier grand bond en avant.

### Encore plus loin avec le VTR..4

Au milieu des années 70, le VTR..1 avait atteint les limites du concept original du VTR; une nouvelle gamme de turbocompresseurs aux composants totalement repensés était alors sur les planches à dessin. Au terme d'essais sur prototype, le VTR..4 fut dévoilé dans la presse spécialisée fin 1978 et mis sur le marché l'année suivante. Libéré des contraintes imposées par le premier VTR, son rendement gagnait 5% et plus pour un taux de

6 Turbocompresseur RR..1 avec turbine à flux mixte et rotor de compresseur à ailettes retournées



compression dépassant 4. Le VTR..4 permit une augmentation spectaculaire du rendement thermique à pleine charge des gros moteurs qui, de 38–40%, était porté à des valeurs crêtes de 44–46% 6.

Une version compacte du VTR..4 intégrant le plus grand nombre de ces composants vit le jour en 1980 avec le VTC..4 qui créa de nouveaux débouchés sur le marché américain et équipa avec succès des locomotives indiennes puis chinoises. L'évolution du marché justifia alors le développement d'une version non refroidie du VTR..4.

Une nouvelle étape fut atteinte en 1985 avec le RR..1 6. Essentiellement destiné aux moteurs quatre temps haute vitesse, le RR..1 franchit de nouveaux seuils de rendement pour les petits turbocompresseurs, domaine que Brown Boveri avait sérieusement

investi dès 1968 avec le RR150.

Les années suivantes, le RR..1 contribua au succès des moteurs haute vitesse dans les groupes électrogènes de secours, la propulsion maritime ou encore les véhicules non routiers. Conçu pour des puissances de 500 à 1800 kW, il participa également à la généralisation des turbocompresseurs dans les moteurs à essence en Europe et aux États-Unis.

La gamme VTR..4 connaissait, quant à elle, de nouvelles avancées, avec des pointes de rendement avoisinant les 75% pour le VTR..4E en 1989 et des taux de compression supérieurs à 4 pour le VTR..4P, mis sur le marché en 1991.

### La génération TPS/TPL met le turbo!

En 1989, suite à la création du groupe ABB, né de la fusion d'ASEA et de BBC, l'activité Turbocompresseurs est gérée par une nouvelle entité appelée *ABB Turbo Systems Ltd*. Le changement de dénomination s'accompagna d'une autre avancée. En effet, au milieu des années 80, des études de marché révélèrent le besoin d'une nouvelle technologie de turbocompresseurs dans tous les principaux domaines d'application. Le secteur de la construction de moteurs était en pleine restructuration: seules quelques entreprises plus solides et plus innovantes développaient de nouvelles générations de moteurs Diesel et à essence qui exigeraient des

7 Les porte-conteneurs constituent un marché important pour les plus gros turbocompresseurs ABB.



## ABB, ÉTERNEL PIONNIER

turbocompresseurs plus performants en termes de rendement, de taux de compression et de débit.

À l'aube des années 90, ABB entreprit de développer des turbocompresseurs plus compacts, plus légers et plus performants pour succéder aux gammes VTR, VTC et RR. Deux gammes repensées de fond en comble, TPS et TPL, virent le jour.

#### Le TPS fait son apparition

Depuis le lancement des premiers turbocompresseurs RR en 1968, le marché des moteurs Diesel et à essence haute et moyenne vitesse a rapidement évolué. ABB décida donc de développer une nouvelle génération de petits turbocompresseurs de forte puissance, proposés en quatre tailles, pour anticiper les besoins de ce secteur. Tout d'abord, deux turbocompresseurs avec des taux de compression atteignant 4,5 et des rendements supérieurs à 84% furent mis au point.

Les progrès des moteurs Diesel et à essence débouchèrent également, au milieu des années 90, sur une version du TPS avec turbine à géométrie variable considérée comme la solution idéale pour les moteurs Diesel de plus en plus équipés de systèmes à un seul conduit d'échappement, ainsi que pour les moteurs à essence qui réclament une régulation précise du rapport air/carburant (A/C) appelée «régulation lambda».

#### Lancement du TPL

La gamme TPL fut développée pour les gros moteurs Diesel et à essence

modernes de plus de 2500 kW. À cette fin, les ingénieurs ABB conçurent de nouvelles turbines axiales, un système de paliers innovant et deux étages distincts de compresseur centrifuge.

Le TPL.-A, premier turbocompresseur de cette nouvelle gamme à être commercialisé, était destiné aux moteurs Diesel et à essence quatre temps de 2500 kW à 12500 kW. Dès son lancement en 1996, il s'imposa sur le marché. Cinq tailles couvraient les besoins applicatifs des moteurs principaux et auxiliaires des navires aux centrales d'énergie fixes.

L'augmentation continue du rendement des moteurs et des turbocompresseurs a toujours été le fruit d'une collaboration étroite entre ABB et les principaux motoristes.

Trois ans plus tard, ABB lançait le premier turbocompresseur de sa gamme TPL.-B, destiné principalement au marché des gros moteurs Diesel deux temps modernes des navires de haute mer (5000 à 25000 kW par turbocompresseur) <sup>7</sup>.

Au départ, quatre tailles semblaient suffire pour répondre aux besoins à moyen terme du marché. Par la suite, un cinquième modèle encore plus puissant (TPL91) fut développé pour les chantiers navals qui envisageaient la construction de navires porte-

conteneurs géants de type Post-Panamax. Nouveau défi pour les ingénieurs ABB : concevoir des turbocompresseurs compacts pour des moteurs développant plus de 100000 bhp de puissance au frein. La solution ? Un rotor innovant plus court et un nouvel ensemble diffuseur/turbine à pression constante. Le support moteur fut également simplifié avec une cuve à huile intégrée <sup>8</sup>.

#### Un nouveau turbocompresseur pour la traction

Le TPL sert également de base au TPR, le turbocompresseur ferroviaire lancé par ABB en 2002. Conçu spécialement pour satisfaire aux besoins de puissance, de robustesse et d'éco-performance des applications de traction, il intègre une turbine à haut rendement, un carter mono-entrée de gaz amélioré et un seul pied de fixation.

#### La course aux taux de compression

La montée en puissance spécifique des moteurs est allée de pair avec un besoin urgent de réduire leurs émissions polluantes, ce qui a conduit la plupart des moteurs récents à inclure un «cycle Miller»<sup>2)</sup> sous une forme ou une autre. Pour ceux-ci et pour les futurs moteurs de conception avancée, ABB a développé la gamme TPS.-F <sup>9</sup>. Trois nouvelles gammes couvrent les

#### Note

<sup>2)</sup> Principe de base du cycle Miller : le temps de compression peut être plus court que le temps de détente par la fermeture précoce ou tardive de la soupape d'admission. En maintenant constantes la puissance moteur et la pression de suralimentation, on réduit le remplissage des cylindres alors que la pression et la température y restent inférieures, ce qui permet de limiter les émissions polluantes.

<sup>8</sup> Montage du turbocompresseur TPL91-B

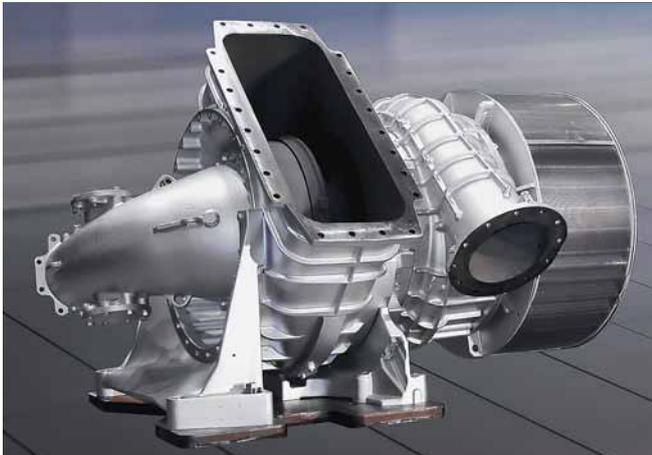


<sup>9</sup> Turbocompresseur TPS.-F



## ABB, ÉTERNEL PIONNIER

**10** Le TPL76...-C a été développé pour la nouvelle génération de moteurs quatre temps.



puissances moteur de 500 à 3300 kW et affichent des taux de compression à pleine charge de 5,2 avec un rotor de compresseur en alliage d'aluminium.

Le TPS...-F était également le premier turbocompresseur ABB à technologie de recirculation grâce à une fente de soutirage autour du rotor qui, tout en améliorant les écoulements, renforce la garde au pompage. Cette fente élargit le domaine de travail sans pénaliser le rendement.

### Un turbocompresseur pour les moteurs quatre temps nouvelle génération

En ce début de millénaire, le marché des moteurs quatre temps renforce ses exigences en matière de rendement et de pollution. ABB a donc décidé d'utiliser la plate-forme modulaire du TPL

**Encadré** Moteur turbocompressé : comment ça marche ?

La puissance d'un moteur à combustion interne varie selon la quantité d'air et de carburant injectée dans ses cylindres et sa vitesse de rotation. En introduisant une plus grande quantité d'air sous haute pression dans les cylindres, le turbocompresseur dope la puissance du moteur. Les gaz d'échappement du moteur, dont la température est proche de 600 °C, sont dirigés à grande vitesse sur les ailettes d'une turbine qui entraîne un rotor de compresseur calé sur le même arbre. En tournant, ce rotor aspire l'air ambiant au travers d'un filtre-silencieux, le comprime et l'envoie via un post-refroidisseur à l'admission d'air du moteur qui l'injecte dans les cylindres.

pour créer sa nouvelle gamme TPL...-C qui, en conjuguant nouveaux composants et technologies innovantes, répond spécifiquement aux besoins de ce futur marché **10**.

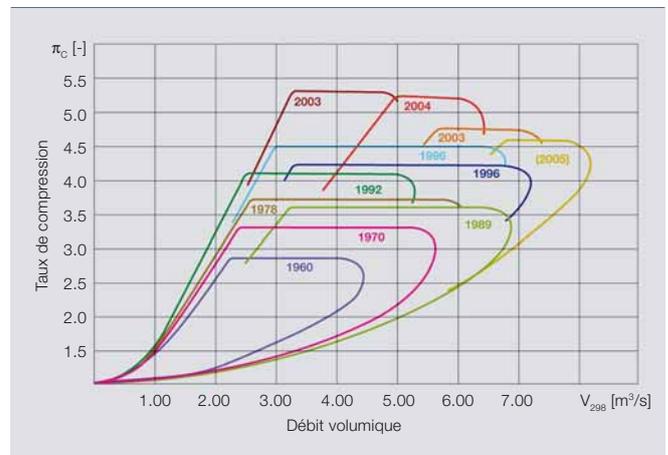
### La montée en puissance spécifique des moteurs est allée de pair avec un besoin urgent de réduire leurs émissions polluantes.

Développée pour les derniers moteurs Diesel et à essence quatre temps de puissance moyenne de 3000 à 10 000 kW (par turbocompresseur), la gamme TPL...-C est équipée de deux versions de turbine : la première est utilisable à la fois en régime à pression quasi constante et en régime pulsé, la seconde uniquement en régime à pression quasi constante. Le refroidissement par air (option) du compresseur est une innovation qui élargit le champ d'application des rotors en alliage d'aluminium, offrant ainsi aux clients une alternative économique aux rotors en titane lorsque des taux de compression très élevés sont nécessaires.

### Un siècle d'innovation

Un siècle après le brevet d'Alfred Büchi en 1905<sup>3)</sup>, le turbocompresseur à gaz d'échappement est devenu un complément indispensable des moteurs Diesel et à essence. Au fil des décennies, les investissements en R&D ont permis des avancées technologi-

**11** Evolution des performances des compresseurs équipant les turbocompresseurs ABB depuis 1960 (pleine charge, compresseur en aluminium)



ques et conceptuelles prodigieuses, étayées par les progrès réalisés et les performances sans cesse accrues **11**.

L'augmentation continue du rendement des moteurs et des turbocompresseurs a toujours été le fruit d'une coopération étroite entre ABB et les principaux motoristes qui fixent ensemble les objectifs de développement. Cette collaboration est appelée à se renforcer face à une demande croissante pour des « systèmes intégrés turbocompressés » plutôt que pour des turbocompresseurs comme composants individuels.

Avec ses gammes TPS et TPL à la pointe de la technologie, ABB a trouvé de dignes successeurs à ses gammes hautes performances VTR et RR. Le marché réclamant toujours plus de pression de suralimentation et de rendement, notamment pour réduire les émissions polluantes des moteurs, l'avenir appartient aux turbocompresseurs mariant ces qualités avec des performances accrues et une maintenance allégée.

### Malcolm Summers

ABB Turbo Systems Ltd.  
Baden (Suisse)  
malcolm.summers@ch.abb.com

### Note

<sup>3)</sup> Pour un historique complet des turbocompresseurs BBC/ABB, cf. édition du centenaire de *Turbo Magazine* (2/2005) publiée par ABB Turbo Systems.

## Rédaction

Peter Terwiesch  
Chief Technology Officer  
Group R&D and Technology

Clarissa Haller  
Corporate Communications

Ron Popper  
Sustainability

Friedrich Pinnekamp  
Group R&D and Technology

Nils Leffler  
Chief Editor  
nils.leffler@ch.abb.com

## Edition

ABB Schweiz AG  
Corporate Research  
ABB Review/REV  
CH-5405 Baden-Dättwil  
Suisse

La *Revue ABB* paraît quatre fois par an en anglais, français, allemand, espagnol, chinois et russe.

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

La *Revue ABB* est proposée gratuitement à tous ceux et celles qui s'intéressent à la technologie et à la stratégie d'ABB. Pour vous abonner, contactez votre correspondant ABB ou directement le bureau de la rédaction de la revue.

Editeur © 2007  
ABB Ltd, Zurich (Suisse)

## Impression

Vorarlberger Verlagsanstalt GmbH  
AT-6850 Dornbirn (Autriche)

## Maquette

DAVILLA Werbeagentur GmbH  
AT-6900 Bregenz (Autriche)

## Traduction française

Brigitte Fessard  
bfessard@wanadoo.fr

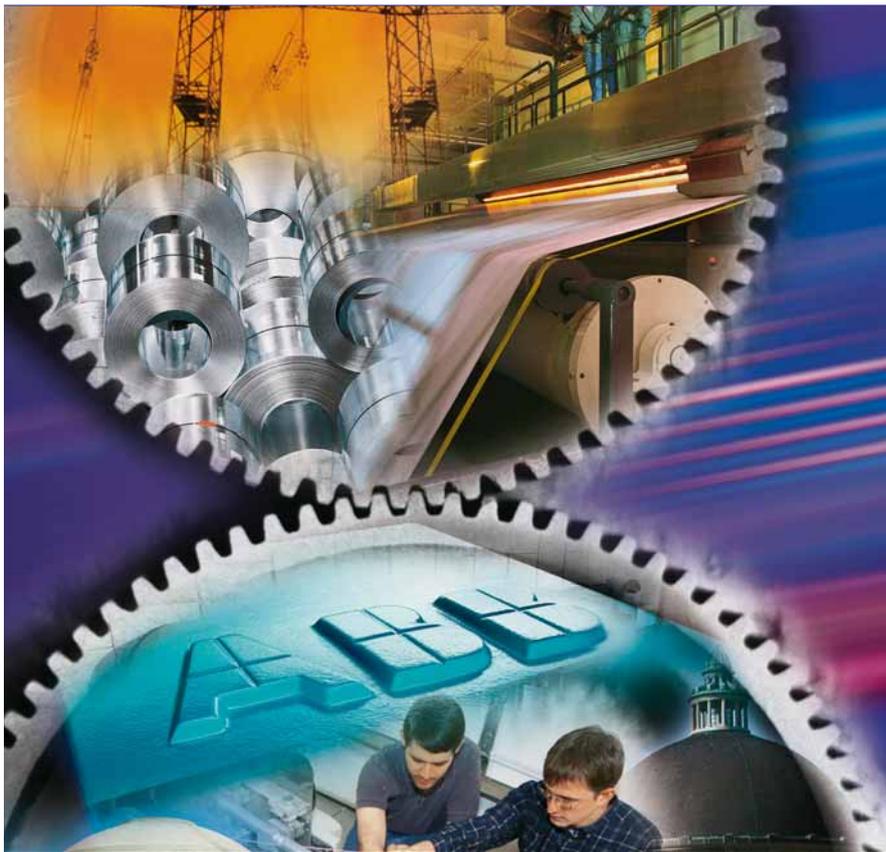
## Avertissement

Les avis exprimés dans la présente publication n'engagent que leurs auteurs et sont donnés uniquement à titre d'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: 1013-3127

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

Dans le numéro 3/2007



## L'union fait la force

De nombreuses innovations majeures d'ABB sont le fruit d'une collaboration avec ses clients. Le groupe a passé des accords stratégiques avec ceux-ci pour l'aider à définir et éprouver de nouveaux produits très en amont du cycle de développement. La confiance mutuelle qui sert de liant à ce travail de collaboration bénéficie à l'ensemble du secteur industriel. Les partenariats avec les fournisseurs sont tout aussi importants car ils permettent aux deux parties de conforter leur avance technologique tout en poursuivant un objectif commun.

Dans le domaine de la recherche, ABB collabore avec plus d'une cinquantaine de grandes universités à travers le monde, dont le *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), l'université Carnegie Mellon et l'université chinoise de Tsinghua. Ces partenariats font travailler de jeunes talents tout en élargissant la palette de produits ABB.

Outre les articles qui décriront quelques réussites exemplaires dans toutes les branches d'activité d'ABB, le prochain numéro de la *Revue* décrira certains des principes de base de la collaboration avec des partenaires de la recherche industrielle.

Notre rédacteur en chef depuis 2003, Nils Leffler, signe avec ce numéro sa dernière contribution à la *Revue ABB*. Sous sa direction, la maquette a été modernisée et le contenu rédactionnel a évolué : les rubriques sectorielles ont été remplacées par des dossiers thématiques qui touchent l'ensemble des activités du groupe. Cette évolution est saluée par une forte hausse du tirage trimestriel (plus de 60 000 exemplaires). De même, le grand nombre d'articles repris dans la presse professionnelle internationale témoigne de la qualité de notre revue.

Avec le numéro 3/2007 de la *Revue*, Nils Leffler passe la main à Friedrich Pinnekamp.

Cut 100 million  
tons of CO<sub>2</sub>  
and it's amazing  
what you save.



© 2005–2007 ABB

Advanced power and automation technologies that reduce emissions  
and help protect the environment. Visit us at [www.abb.com](http://www.abb.com)

Power and productivity  
for a better world™

