



# Du bon air sous terre

ABB optimise la ventilation des mines souterraines

MICHAEL LUNDH, JAN NYQVIST, MATS MOLANDER – Août 2010 : trente-trois mineurs chiliens piégés par 700 m de fond, aux confins du désert d'Atacama, l'un des plus arides au monde, font la Une de la presse internationale. Ce drame nous ramène à l'essentiel : pour survivre dans les profondeurs de la Terre, les « 33 » avaient besoin d'eau, de nourriture ... et d'air ! À l'échelle de la planète, la flambée du prix des matières premières fait des ressources jusqu'ici inaccessibles un filon

économiquement viable. Hélas, l'argument de la rentabilité ne suffit pas à surmonter les obstacles pour extraire ces ressources du bout du monde. Les limites physiques, qui définissent le périmètre du possible, sans danger, demeurent. Certes, les techniques ne cessent de progresser pour lever ces verrous et atteindre de nouveaux gisements. Encore faut-il que les systèmes qui les sous-tendent évoluent au même rythme.

La ventilation est un poste très énergivore (environ 100 GWh/an) qui peut absorber 50 % de la consommation énergétique totale de la mine.

#### 1 Conduit de ventilation dans une mine souterraine



**D**e nos jours, les mines souterraines atteignent souvent -2500 m, voire -3600 m pour certaines mines d'or, soit l'équivalent de près de dix fois la hauteur de la tour Eiffel! La tendance est aux forages de plus en plus profonds, au milieu de nulle part. Rien d'étonnant à ce que l'industrie minière, pourtant très mécanisée et habituée aux terrains hostiles, cherche à s'automatiser pour répondre aux exigences de sécurité, de développement durable et de productivité.

Une mine souterraine est un lieu confiné où l'air ambiant est vicié par l'utilisation d'engins à moteur diesel qui rejettent des gaz dangereux et nocifs (monoxyde et

est donc indispensable pour fournir de l'air frais aux lieux de travail (galeries, chantiers, ateliers) → 1 et garantir la santé et la sécurité du personnel. Cet « aérage » interagit fortement avec la production. C'est aussi un poste très énergivore (de l'ordre de 100 GWh/an) qui peut absorber 50 % de la consommation énergétique totale de la mine.

Dans les exploitations modernes, de gros ventilateurs de surface insufflent l'air frais qui est ensuite diffusé sous terre par des ventilateurs auxiliaires et/ou des régulateurs d'air. Selon la profondeur de la mine, l'air peut être chauffé ou rafraîchi. La ventilation « à la demande », qui consiste à n'alimenter que des en-

droits ciblés, selon la quantité appropriée et seulement pendant la durée nécessaire, est à la pointe des techniques de gestion de la ventilation, même si de nombreux sites miniers en sont dépourvus.

**En plus de l'aérage servant à maintenir une atmosphère acceptable dans les chantiers d'extraction, on peut chauffer ou rafraîchir l'arrivée d'air.**

dioxyde de carbone, oxydes d'azote), les sautages d'explosifs, la présence naturelle de radon (rayonnements ionisants) et le dégagement de méthane (grisou des mines de charbon). Une bonne ventilation

On lui reproche toutefois l'absence de commande en boucle fermée (rétroaction) et une modélisation complexe ou peu performante du rapport ventilateurs/régulateurs.

#### Photo p. 35

Un tiers du cuivre mondial est extrait des mines du désert chilien d'Atacama.  
Crédit photo : © 2013 Michael Vogel

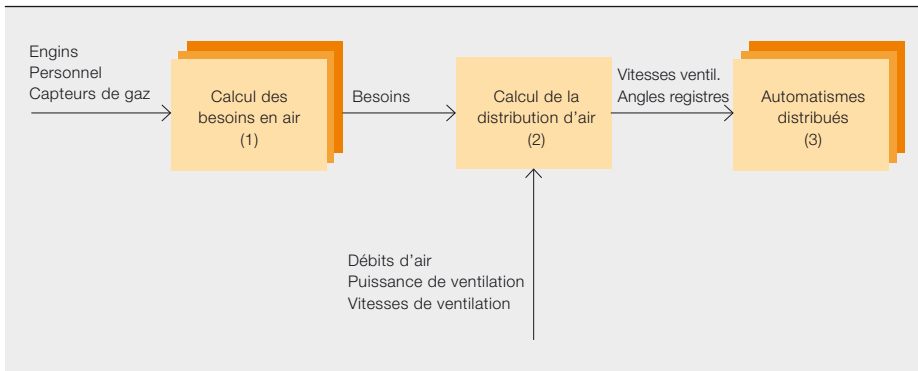


ABB propose aujourd'hui une méthode exclusive de régulation coordonnée des ventilateurs et régulateurs pour fournir automatiquement une quantité d'air suffisante, fiable et éco-énergétique à tous les chantiers de la mine. La solution s'appuie sur des modèles empiriques et des mesures de capteurs (température, débit, gaz, etc.). Des modèles multi-

du *process* est souvent affaire de compromis entre des objectifs contradictoires, un problème d'optimisation revient à trouver la meilleure solution. La création d'un modèle dynamique du site est donc capitale. Mais l'exercice est chronophage : dans les exemples classiques de commande avancée de procédés industriels, la construction d'un modèle

suffisamment performant est la partie la plus laborieuse de la stratégie de régulation. La modélisation passe normalement par une phase d'essais au cours de laquelle on sollicite les entrées du procédé pour exciter les sorties.

Les signaux résultants sont enregistrés puis traités pour obtenir un modèle mathématique du procédé. C'est l'étape d'« identification du système » [2].

Notre nouvelle méthode d'optimisation de la ventilation souterraine s'inspire de ce principe. Problème ? La mine évolue en permanence : des cavités sont percées quand d'autres sont fermées et abandonnées, des ventilateurs et conduits d'aérage sont ajoutés au fur et à mesure de l'avancement du front de taille... sans compter les modifications imprévues de la configuration du site, suite à un sautage, par exemple. Grâce à une identification automatisée du système s'appuyant sur des données opérationnelles ou des expériences déclenchées, le modèle dynamique peut aisément s'adapter à ces nouvelles conditions.

Grâce à une identification automatisée du système s'appuyant sur des données opérationnelles ou des expériences déclenchées, le modèle dynamique s'adapte aisément aux nouvelles conditions minières.

### Des modèles multivariables décrivent la façon dont les variations de vitesse de ventilation influent à la fois sur les écoulements d'air et la pression sur les appareils.

variables décrivent la façon dont les modifications de vitesse des ventilateurs influent à la fois sur les écoulements d'air et la pression sur les appareils. En s'appuyant sur des paramètres obtenus par empirisme à partir de données opérationnelles, ces modèles s'adaptent sans peine aux nouvelles conditions d'exploitation.

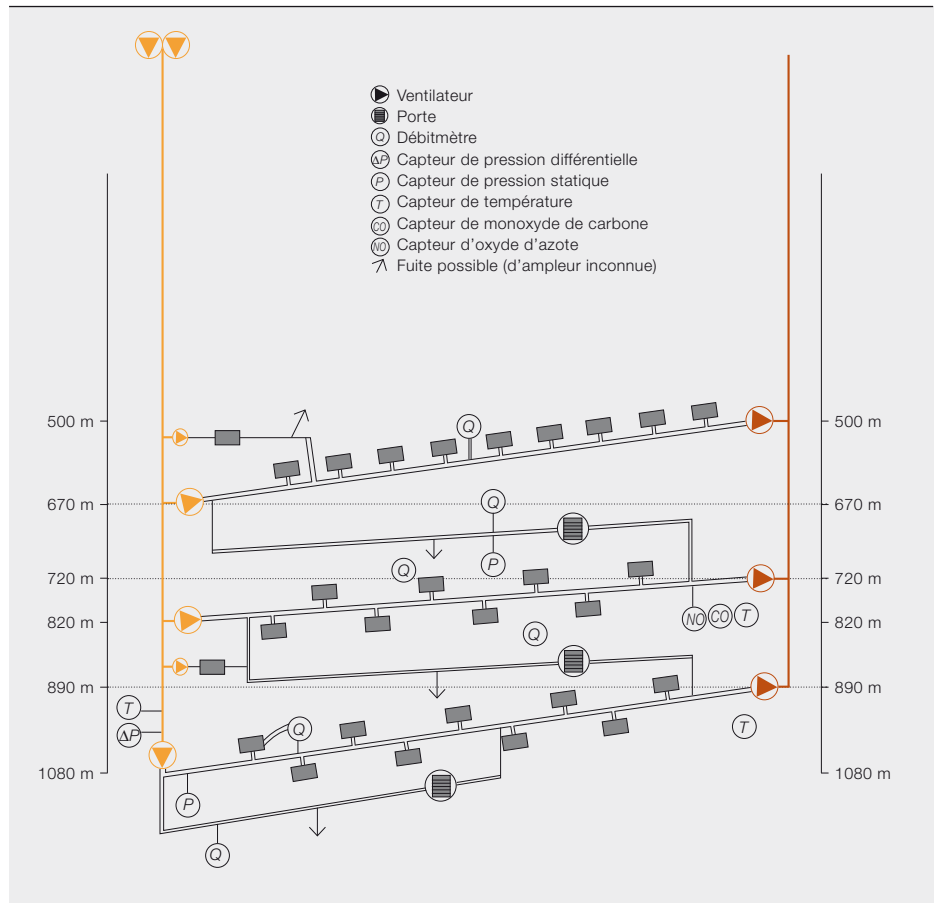
#### Prédire pour anticiper

La commande avancée fait recette dans de nombreux secteurs industriels, comme la chimie et le raffinage. La méthode la plus répandue est la « commande prédictive par modèle » [1], née dans les années 1970.

Un régulateur prédictif fait appel à un modèle explicite qui permet d'anticiper à tout moment l'évolution du procédé et, partant, de calculer la commande optimale pour obtenir les résultats souhaités. Sachant que le comportement désiré

La vitesse de ventilation optimale est calculée à partir des besoins en air dans plusieurs galeries, des caractéristiques des ventilateurs et de leurs moteurs.

### 3 Représentation schématique de la mine pour essais



#### Aperçu

Notre méthodologie de régulation de la ventilation minière s'apparente à la ventilation à la demande. Les deux solutions comportent trois niveaux fonctionnels → 2 :

1) Le premier calcule les besoins réels en air dans les différentes galeries, compte tenu des allers et venues de véhicules et de la présence de personnel sur certains chantiers. Ces besoins peuvent aussi être donnés par les capteurs qui mesurent les concentrations de gaz de l'atmosphère minière. Dans certaines galeries, on a intérêt à réduire au minimum le débit d'aérage pour contrôler celui des rampes d'accès, par exemple.

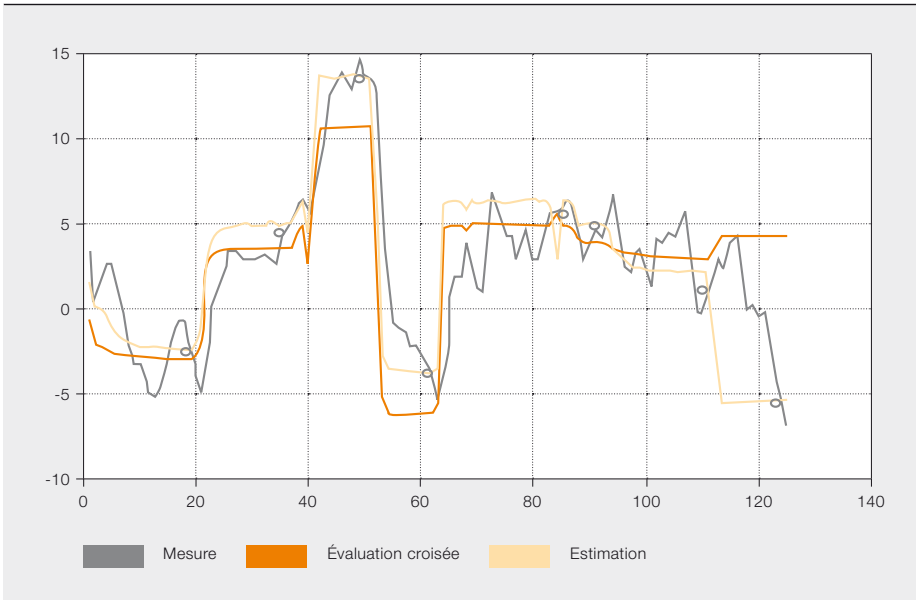
2) Le deuxième niveau de fonctionnalités détermine la distribution d'air en optimisant la vitesse des ventilateurs d'aérage. La vitesse optimale est calculée à partir des besoins en air de plusieurs galeries, des caractéristiques des ventilateurs et de leurs moteurs. On peut y ajouter les angles d'ouverture des registres d'air. Le calcul de ces deux paramètres sert à minimiser la puissance totale consommée par les ventilateurs. Cette minimisa-

tion se fonde sur un modèle qui établit le rapport entre les modifications de vitesse

Les paramètres de vitesses de ventilateurs et d'angles de registres d'air sont calculés pour minimiser la puissance totale réelle nécessaire à l'aérage.

des ventilateurs et les variations de débit d'air et de puissance absorbée réelle.

3) Les valeurs optimales des vitesses de ventilation et des angles de registres fournissent les consignes aux automatismes distribués.



Dans notre nouvelle solution de commande prédictive par modèle, la distribution d'air globale est optimisée au deuxième niveau.

#### Modéliser

La distribution d'air dans la mine dépend, nous l'avons vu, des vitesses de ventilation et, le cas échéant, des angles d'ouverture des registres, qui sont les actionneurs du système de contrôle-commande. Il y a interaction entre ces derniers et la circulation d'air dans toute la mine; en d'autres termes, tout changement de vitesse d'un ventilateur, par exemple, se répercute sur le débit d'air dans la galerie équipée du ventilateur en question, mais aussi dans les autres cavités de la mine. Cette interdépendance, qui complique le pilotage et l'optimisation des courants d'air minier, doit être prise en compte par le modèle.

Pour décrire la mine, il est possible de recourir à des modèles multivariables dynamiques, très utilisés notamment dans l'industrie du raffinage. Reste que leur construction est une lourde tâche qui ne va pas dans notre sens puisque le site minier évolue en permanence, le sautage d'explosifs pouvant ouvrir accidentellement de nouvelles voies d'air. Il n'est ni commode ni utile de passer des semaines à bâtir un nouveau modèle qui reflète systématiquement chaque modification de la mine.

Nous emploierons ici un modèle multivariable statique simple, capable de reproduire l'interaction et l'impact des changements survenus au niveau des

La régulation maintient l'aérage souhaité dans plusieurs galeries, tout en minimisant la puissance absorbée par les ventilateurs.

actionneurs. Ce modèle est décrit sous la forme incrémentale

$$\begin{aligned} \Delta Q &= H_q \Delta \beta \\ \Delta p &= H_p \Delta \beta \\ \Delta E &= H_e \Delta (\beta^3) \end{aligned}$$

avec  $Q$  = vecteur des débits d'air mesurés;  $p$  = vecteur des pressions sur les ventilateurs;  $\beta$  = vecteur des vitesses de ventilation;  $E$  = vecteurs des puissances de ventilation;  $\Delta$  = delta entre deux échantillons. Les coefficients des matrices  $H_q$ ,  $H_p$  et  $H_e$  sont déduits d'expériences simples ou de données opérationnelles normales qui permettent d'automatiser l'identification du système.

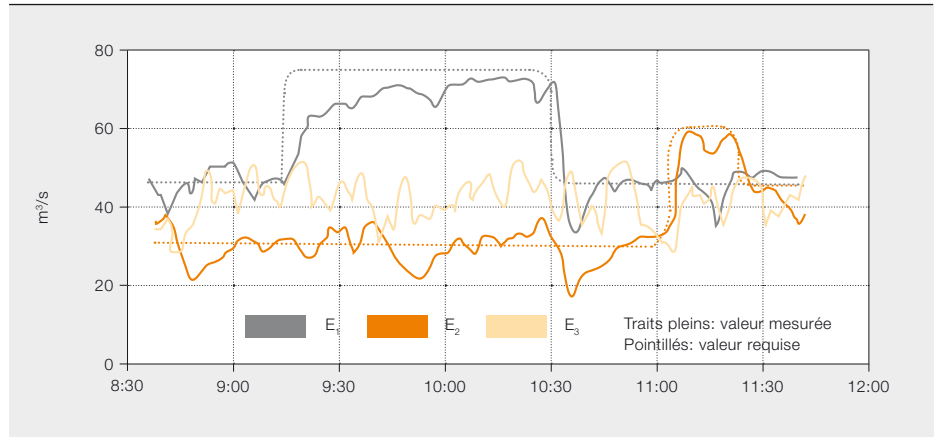
#### Mesurer

Pour identifier le modèle de réseau de ventilation minière et l'utiliser aux fins de commande, il faut mesurer les variables suivantes :

- Concentrations de gaz et/ou débits d'air en plusieurs endroits du site à piloter;
- Puissance des ventilateurs à commander;
- Vitesse des ventilateurs à commander;
- Pressions sur les ventilateurs.

Le va-et-vient des engins dans les zones d'activité fait varier les besoins d'aérage des galeries et oblige à modifier la vitesse des ventilateurs en conséquence.

## 5 Réglage du débit d'air en réponse à chaque échelon de la demande



L'automate ajuste la vitesse réelle des ventilateurs aux besoins en air du moment.

les valeurs filtrées des signaux de mesure.

### Piloter

Rappelons que l'objectif recherché est de maintenir l'aérage souhaité dans plusieurs galeries tout en minimisant la puissance absorbée par les ventilateurs. Les galeries alimentant les lieux de travail doivent donc avoir un courant d'air supérieur au débit requis, tandis que les autres galeries sont amenées à réduire au minimum l'aérage.

Ce pilotage peut se formuler comme un problème d'optimisation visant à déterminer les nouvelles vitesses de ventila-

### Tester

Notre méthode de gestion optimisée de la ventilation a été testée dans une mine souterraine en activité, déjà équipée d'un réseau ABB de ventilation à la demande reliant tous les ventilateurs et capteurs du site.

Sur le schéma simplifié → 3, la zone pilotée se compose de trois étages d'exploitation, situés entre -500 m et -1080 m. Elle compte deux ventilateurs de surface, relayés par un ventilateur en entrée et un ventilateur en sortie de chaque étage :

l'amenée d'air frais est représentée en orange, le retour d'air vicié, en ocre. À chaque étage et dans les rampes d'accès, la vitesse de l'air est mesu-

## La mine peut naturellement évoluer sans baisse d'activité ou de performance.

tion pour minimiser la puissance réelle consommée.

Sont alors prises en compte les contraintes sur le débit d'air et les pressions différentielles :

$$Q_{lo} \leq Q(k) \leq Q_{hi}$$

$$\Delta p_{lo} \leq \Delta p(k) \leq \Delta p_{hi}$$

auxquelles s'ajoutent les limitations sur les vitesses de ventilation :

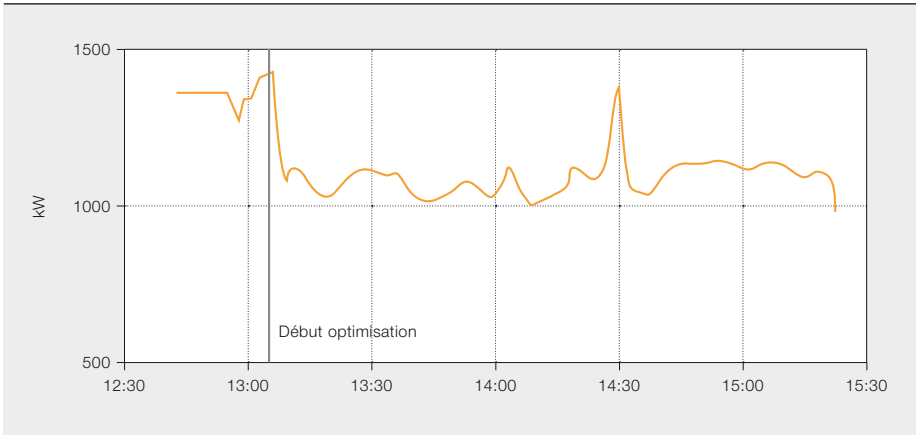
$$\beta_{lo} \leq \beta(k) \leq \beta_{hi}$$

Ce problème est résolu de façon cyclique avec le calcul des nouvelles vitesses de ventilation. Les valeurs initiales de chaque optimisation sont fournies par

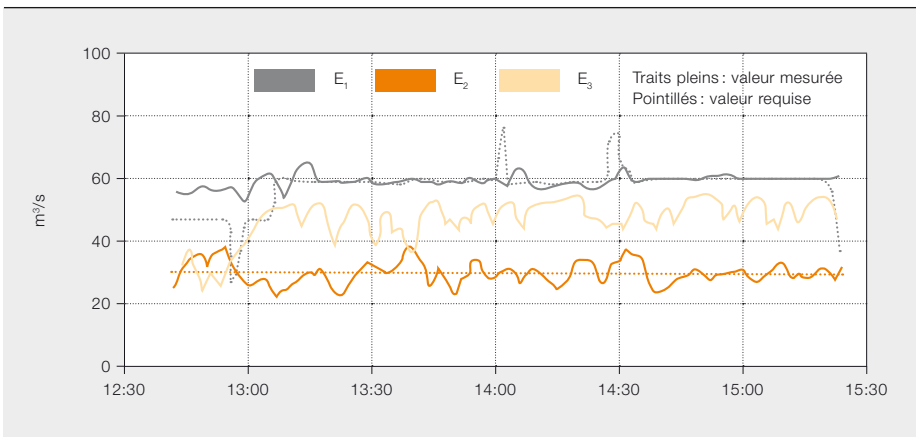
rée par des débitmètres à ultrasons, repérés par la lettre  $Q$ . L'augmentation de la pression statique est également mesurée pour chaque ventilateur.

Le va-et-vient incessant des engins dans les zones d'activité fait varier les besoins d'aérage des galeries et oblige le système de ventilation à la demande à modifier la vitesse des ventilateurs en conséquence. Ce contexte fournit l'excitation nécessaire pour identifier le modèle. Après un filtrage adéquat et la suppression des variations haute fréquence, les modèles statiques de la mine sont identifiés par simple ajustement selon la méthode des moindres carrés. Une évaluation de deux de ces modèles est illustrée en → 4 : l'un fut

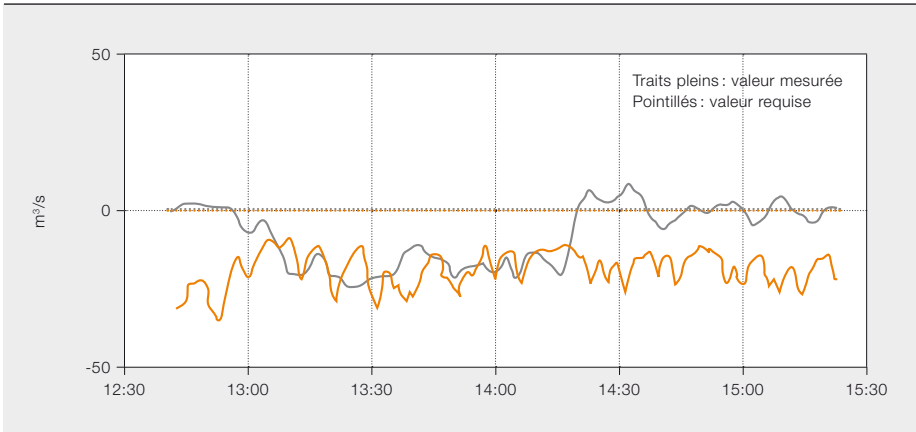
## 6 Tracé du modèle représentant la diminution de puissance de ventilation



6a Puissance totale



6b Débits des étages de production



6c Débits des rampes d'accès

identifié avec les mêmes données que les mesures tracées en jaune (« Estimation »), l'autre avec un jeu de données totalement différent (tracé orange « Évaluation croisée »).

Partant de ces modèles, l'optimiseur de ventilation fut testé pendant deux jours, aux étages de production qu'il pilotait. L'enregistrement d'essais 800xA → 5 montre comment le système règle le débit d'air du 1<sup>er</sup> étage  $E_1$  (trait plein gris) et du 2<sup>e</sup> étage  $E_2$  (trait plein orange) en

réponse à chaque changement d'échelon de la demande réelle (pointillés gris et orange).

Un autre enregistrement → 6 effectué en exploitation prouve que l'optimiseur réduit nettement la puissance consommée par les ventilateurs (de 30 à 50 %) par rapport au système existant tout en conservant les mêmes débits d'air pour satisfaire aux besoins d'aéragé des galeries.

L'environnement de travail bénéficie d'un apport d'air frais de qualité optimale, en quantité adaptée à chaque activité.

### Valider

Il ressort de ces essais que la mise en œuvre de modèles empiriques simples dans un réseau de ventilation souterrain permet

- de gérer automatiquement la qualité et la quantité d'air requise dans l'environnement de travail ;
- de s'adapter aux nouvelles conditions d'exploitation liées à l'avancement de la mine ;
- de réduire sensiblement la puissance de ventilation en optimisant les charges réparties sur les ventilateurs ;
- de renforcer et de fiabiliser la gestion de la ventilation par une commande en boucle fermée.

Ces modèles d'optimisation dynamique de la ventilation présentent bien des avantages : l'exploitant voit baisser ses coûts de fonctionnement et l'atmosphère minière gagne en qualité en recevant exactement la quantité d'air requise par l'activité. Le modèle s'accorde à la nature évolutive de la mine, garantissant une optimisation continue de l'aéragé, même dans les conditions extrêmes des sites les plus reculés.

**Michael Lundh**

**Jan Nyqvist**

**Mats Molander**

ABB Corporate R&D

Västerås (Suède)

michael.lundh@se.abb.com

jan.nyqvist@se.abb.com

mats.a.molander@se.abb.com

### Bibliographie

- [1] Qin, S. J., Badgwell, T. A., *A survey of industrial model predictive control technology*, Control Engineering Practice 11, p. 733–764, 2003.
- [2] Ljung, L., *System Identification: Theory for the user*, Prentice Hall, 1999.