



# Émissions sous surveillance

Un contrôle prédictif « intelligent » pour améliorer l'écobilan des sites industriels

NUNZIO BONAVIDA, FEDERICO CALLERO – Connaître avec précision et fiabilité les émissions polluantes d'un procédé industriel, à tout instant, est crucial pour mettre en œuvre les actions adéquates visant à maintenir cette pollution sous le seuil légal. Les industries de *process*, de plus en plus soumises à la pression réglementaire, ont donc commencé à s'équiper de systèmes de management environnemental (SME) pour surveiller, recueillir et traiter ces données. Si l'on dénombre en théorie plusieurs types de contrôles, le plus efficace et le plus fiable est la

surveillance en continu des émissions (SCE) dans laquelle des instruments à réponse rapide acquièrent et affichent en temps réel un flux ininterrompu de données. La surveillance prédictive des émissions (SPE) suscite également un intérêt croissant; elle s'appuie sur un modèle empirique pour prédire les concentrations de substances polluantes, à partir des données du procédé. La solution a démontré sa validité dans le cadre d'un SME global mis en place dans l'un des plus grands complexes de traitement du gaz naturel au monde.



**S**elon la norme ISO 14001, un système de management environnemental (SME) doit permettre à une entreprise d'élaborer des procédures et d'évaluer l'efficacité pour mettre en œuvre une politique et des objectifs environnementaux, de s'assurer de leur conformité avec cette politique et de démontrer ladite conformité [1]. Dans cette optique, un SME type remplit plusieurs fonctions :

- la collecte et le traitement des données environnementales ;
- l'élaboration d'indicateurs clés de performance environnementale ;
- la planification de l'évaluation de cette performance ;
- le calcul des émissions et l'édition de bilans ;
- l'archivage et les vérifications aux fins d'audit.

La surveillance en continu des émissions est une méthode bien connue et fiable qui s'appuie sur des instruments de collecte et de transport des échantillons, un analyseur, des matériels et logiciels

d'enregistrement et de traitement des données. Elle peut être [2] → 1 :

- *extractive* : prélèvement de l'échantillon au niveau de la cheminée ;
- *in situ* : détection automatisée avec mesure des émissions en continu ou à intervalles réguliers ;
- *paramétrique* : solution alternative à la mise en place d'un système de surveillance en continu des émissions (SSCE) classique.

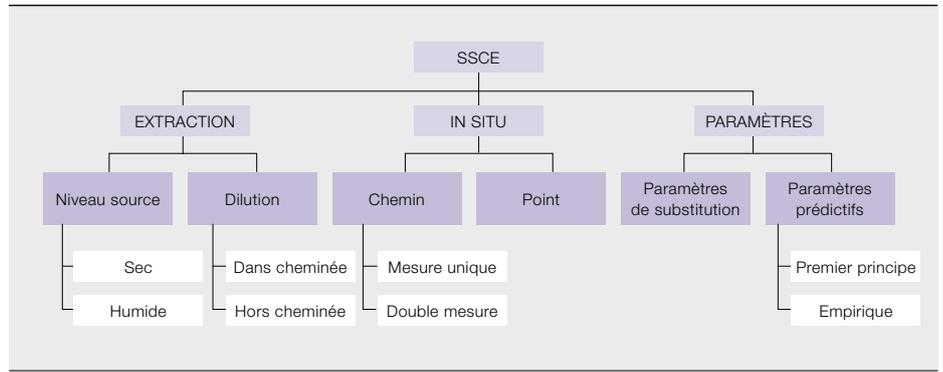
La méthode paramétrique peut se baser sur des paramètres prédictifs ou de substitution. Ces derniers permettent de déterminer la conformité d'une source d'émission aux valeurs normalisées. L'acquisition des valeurs des paramètres passe toutefois par une phase complexe d'essais et de validation. La méthode prédictive est employée quand un seul paramètre ne suffit pas pour bien décrire la relation entre les conditions du procédé et les niveaux d'émission. La démarche fait appel à la modélisation, qui joue aujourd'hui un rôle important dans les systèmes de gestion des émissions → 2.

Un système de surveillance prédictive des émissions (SSPE), également appelé « analyseur inférentiel », ne peut pas mesurer directement les émissions ; il lui faut un modèle empirique pour prédire les concentrations à partir des données du procédé (débit de combustible, charge, pression et température ambiante). C'est en fait le seul moyen d'obtenir un flux continu de valeurs d'émission (estimées) dans des usines dépourvues de SSCE portable, qui pratiquent des mesures *in situ* (à intervalles réguliers) ou des campagnes de mesures. Dans ces cas, l'usine peut louer un SSCE d'appoint qui collectera une quantité suffisante de données d'émission pour bâtir et valider le modèle. Une fois ce modèle certifié, l'analyseur inférentiel prend le

---

**Photo ci-dessus**

Le terminal de gaz naturel liquéfié du Norvégien Statoil, sur l'île de Melkoya, tout près du Cap Nord, est équipé d'une gamme complète de matériels électriques et d'automatismes ABB. Le gaz du gisement de Snøhvit est puisé de plates-formes sous-marines, transporté par gazoduc jusqu'à la raffinerie où il est refroidi avant d'être liquéfié, puis exporté par bateau.



L'acquisition temps réel de données précises et fiables sur la pollution d'un procédé industriel est cruciale pour engager les actions visant à maintenir les taux d'émission sous le seuil réglementaire.

relais [4]. Le SSPE peut également servir de secours au SSCE en place. Quel que soit son rôle, il remplit avantageusement plusieurs fonctions → 3.

Dans de nombreuses applications, les systèmes logiciels s'avèrent tout aussi précis que les systèmes matériels comme les SSCE. De plus, les analyseurs virtuels offrent d'autres fonctionnalités [5] :

- Identification des principales variables à l'origine des émissions ;
- Validation automatique des capteurs ;
- Reconstitution des niveaux d'émission à partir des données historiques, en cas de défaillance du matériel ;
- Contribution aux stratégies d'optimisation du procédé.

La réglementation actuelle impose des mesures périodiques au niveau de la cheminée ainsi qu'une surveillance en continu des émissions pour démontrer le respect des limites légales et repérer les éventuels dépassements. Or un SSCE classique ne peut pas anticiper le franchissement des seuils d'émission. Par contre, un SSPE permet aux ingénieurs de production d'établir une corrélation directe entre divers paramètres d'exploitation, de prédire les émissions et de prendre des mesures d'ajustement pour éviter les dépassements. Les méthodes de surveillance des émissions polluantes sont différemment accueillies dans le monde : de nombreuses réglementations européennes exigent désormais explicitement des systèmes de surveillance à redondance logicielle tandis que certains États américains autorisent le recours à l'intelligence artificielle (IA) avec des modèles de type SSPE.

#### Technologie sous-jacente

La performance d'un SSPE, qui est avant tout un analyseur logiciel, repose sur un puissant outil d'élaboration et de mise en

œuvre de modèles. Les techniques de modélisation doivent être efficaces et fiables tout en remplissant les fonctions requises d'acquisition et de traitement des données, de test des modèles, etc.

La plate-forme Optimize<sup>IT</sup> IMP (*Inferential Modeling Platform*) est une suite logicielle ABB de développement et de déploiement d'applications évoluées, pilotées par les données. Deux environnements sont proposés :

- *IMP Model Builder* : conception et développement de l'application ;
- *IMP Online* : déploiement et suivi du projet en ligne.

IMP intègre des techniques ultra-modernes d'analyse de données et de modélisation (réseaux de neurones, algorithmes génétiques, régression linéaire multiple, scripts de calcul, par exemple), y compris des outils et algorithmes hérités de l'intelligence artificielle : une collection d'outils extrêmement complexes, intégrés à un espace de travail intuitif s'appuyant sur les concepts d'interface homme-machine (IHM) les plus modernes [6]. La plate-forme IMP est chargée dans un PC qui communique par protocole OPC (*OLE for Process Control*) avec le système de contrôle-commande distribué contenant les variables du procédé et les données de l'analyseur (si le SSPE est utilisé en secours). À partir des données process temps réel, le modèle produit une estimation des émissions, qui peut être surveillée sur une IHM dédiée ou renvoyée à l'interface opérateur du système de contrôle-commande.

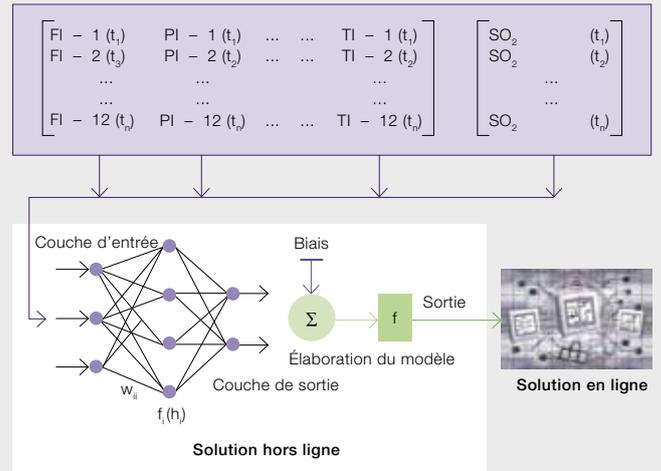
#### Le SSPE en action

En 2007, ABB remporta un contrat de fourniture d'un SME complet, conforme aux exigences de l'Agence de protection de l'environnement américaine EPA

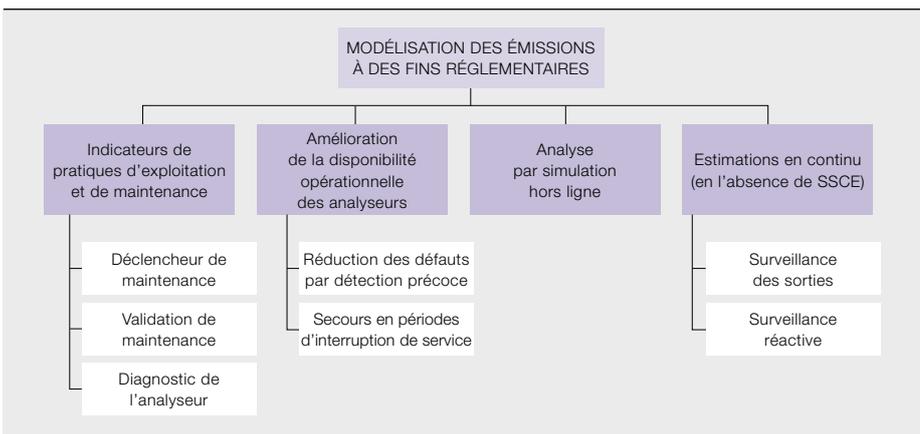
## 2 Le rôle clé de la modélisation dans les systèmes de gestion des émissions

La modélisation consiste à formuler des expressions mathématiques qui décrivent le comportement d'un procédé ou d'un appareil, à partir d'une approche théorique ou empirique [3]. Un modèle théorique repose sur des principes scientifiques comme la conservation de la masse et de l'énergie, ou les lois de la thermodynamique, tandis qu'un modèle empirique est élaboré à partir des données *process* du site. La modélisation donne en général une estimation précise en temps réel de grandeurs difficiles à mesurer et permet d'exploiter, entre autres, des corrélations qui, à défaut, seraient masquées ou négligées, et de mieux comprendre le procédé. Les grandeurs estimées sont souvent appelées variables « inférentielles », qualificatif qui s'applique également au modèle. Les stratégies de commande avancée des procédés reposent généralement sur des modèles inférentiels.

La relation entre les données d'entrée (variables mesurées disponibles) et les données de sortie (variable à estimer) est établie lors de la phase d'élaboration du modèle. Un logiciel spécial importe, prétraite et filtre les groupes de données historiques qui doivent inclure tous les échantillons possibles de la grandeur à estimer. Le modèle développé doit subir des essais complets et être validé sur une plage de fonctionnement aussi large que possible ; il peut ensuite être mis en ligne et alimenté avec les données *process* temps réel. Le prétraitement sert en général à identifier les états transitoires ainsi qu'à éliminer les valeurs aberrantes ou erronées. Il s'applique aussi à la sortie du modèle pour améliorer sa fiabilité et sa précision.



## 3 Domaines d'application potentiels des SSPE

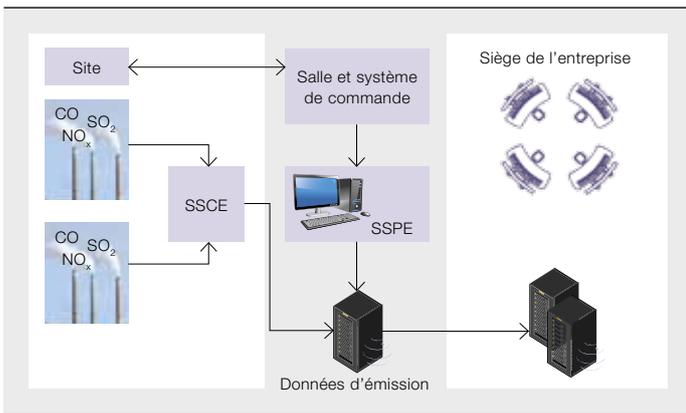


(Environmental Protection Agency), pour l'usine d'un géant gazier du Golfe. Ce complexe, l'un des plus grands au monde, comporte huit trains de traitement et deux trains d'injection d'une capacité de 100 milliards de mètres cubes par jour pour produire du gaz commercialisable, des liquides de gaz naturel (LGN), des condensats et du soufre. Le projet a exigé l'installation d'un SSCE (provisoire), d'un SSPE et d'un système d'acquisition des données spécifique pour mesurer les émissions en vue de la conformité aux exigences sanitaires et sécuritaires, et améliorer le procédé → 4.

Les deux trains d'injection de gaz (A et B) sont configurés en parallèle. Chacun est équipé de deux compresseurs axiaux

à deux étages (C101 et C102) → 5. Chaque compresseur est entraîné par une turbine à gaz (TG) dont le SSPE surveille les émissions. Les turbines des étages haute pression (HP) et basse pression (BP) sont alimentées en gaz marchand. Les turbines HP fonctionnent toujours à vitesse constante, à près de 100% de leur vitesse maximale. Si la vitesse de la turbine BP peut varier selon les conditions de fonctionnement de l'usine, elle est surtout tributaire de la disponibilité du gaz marchand. La plupart du temps, les deux trains fonctionnent ensemble, proches de leur charge maximale. Cependant, lorsque la production de gaz est faible ou nulle, l'un d'eux fonctionne à vitesse ou charge réduite. En été, période de fortes chaleurs, le rendement global du sys-

Un SSPE permet aux ingénieurs de production d'établir une corrélation directe entre diverses variables d'exploitation, d'anticiper les émissions et de prendre des mesures pour éviter les dépassements.



tème est restreint pour ménager le matériel.

Le SSPE joue ici un rôle clé car il surveille exclusivement les turbines à gaz. Afin de concevoir le modèle le plus satisfaisant, un analyseur SSCE temporaire fut monté dans chaque cheminée pour recueillir les données d'émission tandis que le système de contrôle-commande distribué collectait directement les données du

IMP offre un environnement convivial pour l'analyse en composantes principales (ACP) → 6, puissante technique de représentation et d'analyse de la variabilité d'un système. L'ACP permet aux ingénieurs d'identifier un sous-ensemble minimal de variables les plus représentatives parmi un grand nombre de paramètres process. Autre avantage: l'ACP identifie les différents réglages du procédé et les dysfonctionnements, ainsi

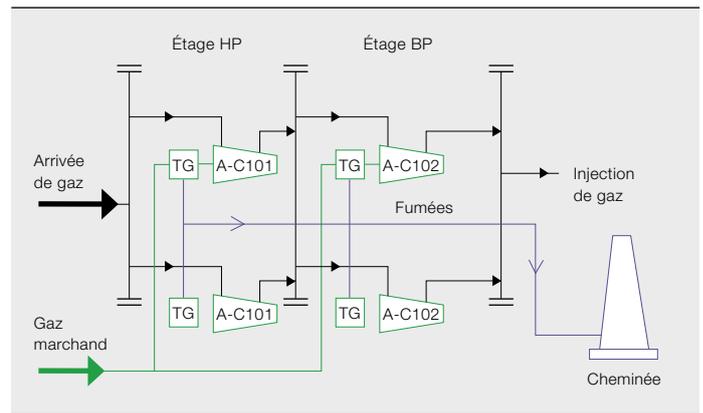
que les interdépendances des entrées (variables process) et sorties (émissions).

Une fois la phase de traitement terminée, quelque 1700 enregistrements (valeurs de procédé et d'émission échantillonnées à l'heure) et

35 variables servirent de base à l'élaboration des modèles :

- Principaux paramètres du procédé (arrivées d'air et de gaz, débit d'alimentation, charge du compresseur, température entre les étages de la turbine et température des gaz de cheminée);
- Mesures météorologiques clés (température de l'air et hygrométrie);
- Mesure des polluants atmosphériques ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  et fumées).

Les réseaux de neurones artificiels à couches sans connexion arrière (*feed-forward*), puissante technique de modélisation utilisée en IA, constituèrent la meilleure solution de la plate-forme IMP pour construire les modèles les plus



fiables et robustes. Chaque ensemble de modèles se caractérise par le nombre de couches masquées, de variables d'entrée (telles que les principaux paramètres du procédé mentionnés ci-dessus) et de paramètres fluctuants. Pour éviter tout sur-apprentissage et garantir la pertinence et la robustesse du modèle, les 1700 valeurs d'entrée furent réparties en trois sous-ensembles: apprentissage (50%), essai (25%) et validation (25%). Une fonction particulière de la plateforme IMP permet de déterminer la sensibilité d'une seule variable d'entrée au type d'émission estimée.

Ce système fut intégré au contrôle-commande distribué et les valeurs d'émission estimées furent configurées pour être écrites dans le SME, par protocole série Modbus.

#### Franc succès

Une fois le système installé, une société indépendante américaine fut chargée d'évaluer sa conformité EPA. La certification fut attribuée au terme de 18 essais de 30 minutes chacun, pour moitié à 95% de charge du compresseur, et pour l'autre, à 100%.

À l'issue de chaque essai, les émissions estimées par le SSPE étaient comparées à celles mesurées par le SSCE pour déterminer la précision relative<sup>1</sup> du SSPE. Les émissions de chaque polluant étant dans les limites fixées par l'EPA, le système fut certifié et validé par le client → 7.

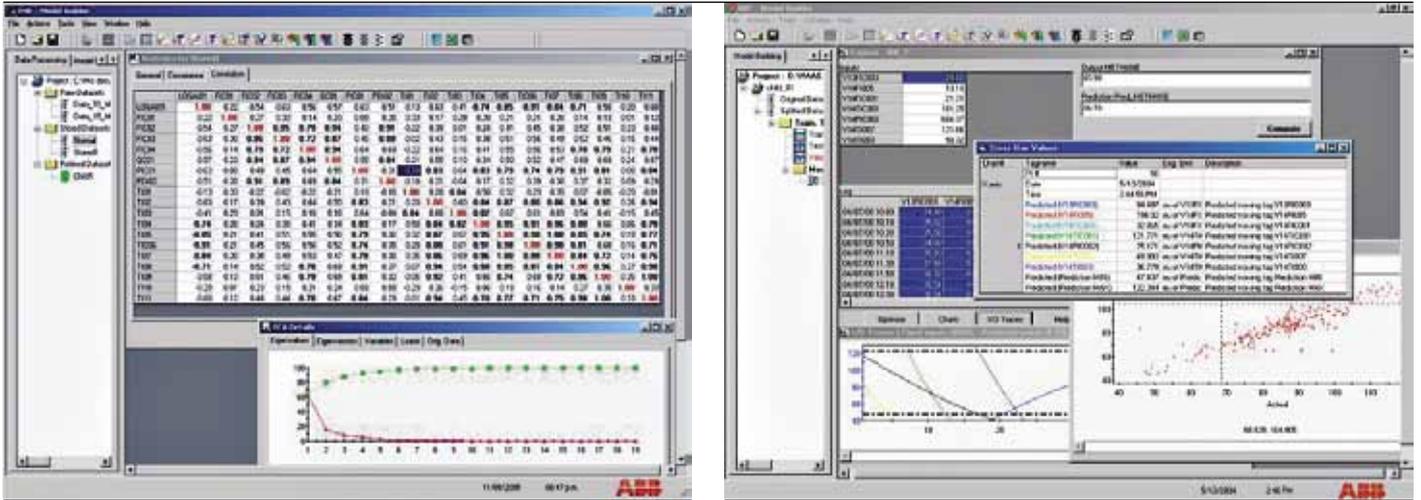
#### Note

$$1 \text{ Précision} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \text{abs}(Y_j - Y_j^*)$$

avec:  $Y_j$  = estimation SSPE,  $Y_j^*$  = composition réelle,  $n$  = nombre d'échantillons utilisés pour la comparaison.

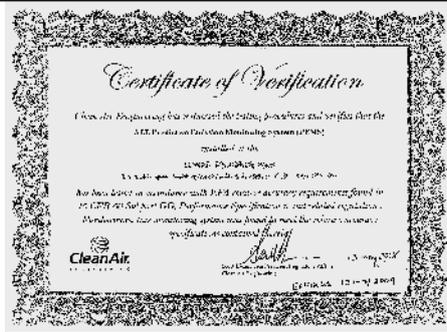
## La certification de l'Agence de protection de l'environnement américaine (EPA) fut attribuée au terme de 18 essais de 30 minutes chacun, dans deux conditions d'exploitation différentes.

procédé par OPC. Cette étape dura près de six semaines pour couvrir un maximum de conditions de fonctionnement. La conception et la validation du modèle, le traitement des données et la mise en œuvre sur site furent ensuite réalisés avec la plate-forme IMP d'ABB. L'étape du traitement est primordiale pendant l'élaboration d'un modèle empirique. Pour commencer, des outils mathématiques et statistiques complexes permirent de définir le jeu de variables d'entrée et le meilleur schéma de modélisation de l'usine. À cet égard, il fallait impérativement trouver le taux d'échantillonnage optimal pour identifier les conditions et la dynamique du procédé, et fournir un nombre adéquat d'ensembles de données correctes pour créer des modèles justes et précis.



7 Bilan et certificat environnemental du SSPE

Substance	À 95 % de charge	À 100 % de charge
Oxygène	< 10 %	< 10 %
NO <sub>x</sub>	< 10 %	≈ 15 %
SO <sub>2</sub>	Indécelable (<1 ppm)	Indécelable (<1 ppm)
CO	< 10 %	< 15 %
CO <sub>2</sub>	< 10 %	< 10 %



Cette innovation ABB est la première à être certifiée EPA dans les pays du Golfe.

Ce SSPE innovant est le premier à être certifié EPA dans les pays du Golfe. Sa réussite ouvre la voie à de futures applications dans ce domaine : pour preuve, une autre *major* du pétrole et du gaz teste actuellement cette technologie pour la déployer dans des pays du pourtour méditerranéen et du Golfe persique. Parmi les avantages d'un SSPE « intelligent » et facilement adaptable, citons :

- une performance reconnue et validée par les agences environnementales mondiales ;
- l'amélioration de la disponibilité du SSCE ;
- le remplacement des analyseurs traditionnels, lorsque le SSCE est indisponible ou inutilisable.

Outre ces atouts, les fonctions de simulation offertes par la fonction d'ABB permettent aux industriels d'envisager des améliorations du procédé en environnement non intrusif, de déterminer les meilleures pratiques d'exploitation et de tester en amont les systèmes d'optimisation pour se conformer à la réglementation environnementale en vigueur.

**Nunzio Bonavita**  
**Federico Callero**  
 ABB SpA  
 Gênes (Italie)  
 nunzio.bonavita@it.abb.com  
 federico.callero@it.abb.com

**Bibliographie**

- [1] ISO 14001, <http://www.iso14000-iso14001-environmental-management.com/14000.htm>, consulté en août 2011.
- [2] « Continuous emission monitoring systems for non-criteria pollutants », *EPA Handbook*, août 1997.
- [3] Bonavita, N., Matsko, T., « Neural network technology applied to refinery inferential analyzer problems », *Hydrocarbon Engineering*, p. 33–38, décembre 1999.
- [4] Samdani, G. S., « Software takes on air monitoring », *Chemical Engineering*, p. 30–33, décembre 1994.
- [5] Bonavita, N., Formenton, A., Pavan, E., *Inferential Modeling for Environmental Applications: the Predictive Emission Monitoring Approach*, Livre blanc d'ABB, 2005.
- [6] Bonavita, N., Martini, R., Matsko, T., « Improvement in the Performance of Online Control Application via Enhanced Modeling Techniques », *ERTC Computing Conference*, Milan, juin 2003.