

Des outils de calcul avancés pour optimiser les performances des électrofiltres

Un modèle numérique avancé a été développé par le Centre de recherche du Groupe ABB qui, par une meilleure compréhension des phénomènes intervenant dans les électrofiltres, devrait permettre d'accroître encore plus l'efficacité de cette technologie, au demeurant déjà très performante. Le modèle établit, pour la première fois, la corrélation entre, d'une part, la géométrie de l'électrofiltre (électrodes émissives, plaques collectrices) et les paramètres d'exploitation (écoulement principal, caractéristiques du gaz et charge électrique) et, d'autre part, les performances du procédé d'électrofiltration. Les résultats des calculs sont visualisés et présentés à l'aide de puissantes interfaces graphiques. La simulation numérique devrait permettre à l'avenir de réduire le coût des sites pilotes et des essais en conditions réelles.

La séparation des fines particules de poussières ou des gouttelettes des fumées est obligatoire dans de nombreux procédés industriels [1]. Le dépolluage efficace des gaz rejetés est indispensable pour des activités aussi différentes que la production d'énergie électrique, d'acier et de ciment, la fabrication du papier et des métaux non-ferreux. Dans l'industrie chimique, l'électrofiltration est utilisée, notamment, dans le traitement des phosphates, le raffinage du pétrole et la production d'acide sulfurique.

L'application de loin la plus importante de l'électrofiltration est la séparation des particules de cendre volante des gaz chauds rejetés par les centrales thermiques au charbon [1]. Une centrale importante de 500 MW brûle en moyenne 200 tonnes de charbon par heure. Les résidus en cendres varient de 10 à 40% en fonction de la qualité du charbon. La majeure partie de ces cendres se trouvent dans les fumées sous forme de particules de 0,1 à 100 µm. Plusieurs tonnes de cendres volantes doivent ainsi

être récupérées par filtration des fumées, dont le débit volumique peut atteindre 2,5 millions de m³/h. L'efficacité des gros dépollueurs électrostatiques est proche de 99,9%. Dans un électrofiltre, une charge électrique est utilisée pour charger les particules de cendre et des champs électriques sont utilisés pour attirer les cendres chargées et les séparer du flux gazeux. Les cendres se déposent alors sur de grandes plaques collectrices d'où elles sont entraînées vers des trémies et évacuées par un système de maintenance. Le plus étonnant, c'est que le pro-

céde complet consomme très peu d'énergie. En effet, dans les centrales thermiques modernes, moins de 0,1% de l'électricité produite est utilisée pour l'électrofiltration.

ABB est un des premiers fournisseurs d'équipements de contrôle de la pollution de l'air, avec plus de 60 années d'expérience dans le dépolluage industriel. A ce jour, nous comptons plus de 3500 installations importantes d'électrofiltration.

Les électrofiltres pour la protection de l'environnement

Les électrofiltres sont utilisés sur les sites industriels pour le dépolluage des fumées et des gaz de haut-fourneau avant leur rejet dans l'atmosphère. Les électrofiltres constituent le principal équipement de protection de l'environnement car ils filtrent les émissions polluantes. Ils sont également largement utilisés pour récupérer les précieux produits chimiques ou métaux en suspension dans les gaz rejetés.

Dans un électrofiltre, on trouve de grandes plaques d'électrodes collectrices mises au potentiel de terre. Entre ces plaques, des électrodes en forme de fils fins, appelées électrodes émissives, sont alimentées en tension c.c. négative de 50 à 110 kV.

Une effluve se produisant à proximité des électrodes émissives forme des ions qui deviennent immédiatement négatifs dans le flux gazeux environnant. Ces ions migrent vers les plaques collectrices, tout en se fixant sur les particules de poussières qu'ils rencontrent. Ces particules sont alors chargées négativement et sont captées, sous l'action du champ électrique, par les plaques collectrices sur lesquelles elles se déposent.

Des décennies d'applications pratiques et de travaux de recherche poussés ont fait de l'électrofiltration un domaine de haute technologie. Des progrès permanents, notamment par la simulation avancée, permettent de réduire encore plus la quantité de poussières résiduelles contenue dans les gaz rejetés. En optimisant la géométrie des électrodes et leur alimentation électrique, on peut agir sur le mouvement des particules en fonction de leur taille et ainsi améliorer la filtration pour que le «problème des poussières» n'en soit plus un.

Dr Ulrich Kogelschatz Walter Egli

Centre de recherche du Groupe ABB
(Suisse)

Dr Edgar A. Gerteisen

Centre suisse de calcul scientifique
(CSCS), Manno (Suisse)



Vue de la centrale de Fayette (Lower Colorado River Authority, La Grange, Texas). Cette centrale thermique au charbon compte 3 chaudières de 600/600/450 MW, toutes équipées d'électrofiltres ABB.

1

Configuration de base d'un électrofiltre

A l'entrée du filtre, le débit des fumées à traiter est ralenti et dirigé vers plusieurs caissons parallèles qui peuvent atteindre 15 m de hauteur et d'une largeur moyenne de 0,3 à 0,4 m **2**. Les parois sont en général en acier doux. Les électrodes émissives haute tension sont montées au centre des caissons. Une haute tension négative est appliquée pour produire une effluve entre les électrodes émissives et les plaques collectrices mises à la terre. Les particules de cendre sont chargées dans l'effluve et se déplacent sous l'influence des champs électriques intenses vers les parois des caissons qui jouent le rôle de plaques collectrices. Les cendres ainsi captées forment un dépôt qui se détache et retombe au bas des plaques sous l'action de chocs produits par frappe. Pour un dépoussiérage maximum, les fumées passent dans huit segments, également appelés champs. La longueur maximale de chaque champ est de 5 m. La largeur de l'électrofiltre est fonction du nombre de caissons requis pour obtenir un débit d'environ 1 m/s. La largeur totale

d'un électrofiltre de grandes dimensions peut atteindre 45 m, constitué en général de trois sections de 3 x 15 m.

Principe fondamental de l'électrofiltration

L'électrofiltration est un procédé assez complexe et son optimisation exige des connaissances pluridisciplinaires. La description quantitative de l'effluve exige des connaissances approfondies en physique des plasmas, alors que l'étude de l'écoulement du flux gazeux relève de la mécanique des fluides. Des écoulements secondaires importants sont le fait des interactions entre le mouvement des ions et l'écoulement principal. L'étude de la charge électrique des poussières est du domaine du spécialiste en électrostatique et l'optimisation de l'alimentation en haute tension spécifiée par les concepteurs des électrofiltres incombe aux ingénieurs électriciens. Chez ABB, des équipes de recherche internationales composées de spécialistes d'horizons différents travaillent donc en étroite collaboration avec les ingénieurs des centres techniques du Groupe

pour résoudre les problèmes et élaborer les solutions. C'est ce type de collaboration qui sert de trait d'union entre les activités de recherche du Groupe et l'expérience acquise sur le terrain, les données collectées sur les sites pilotes et au sein des laboratoires.

Le centre de recherche du Groupe ABB en Suisse a ainsi fait équipe avec le Centre de calcul scientifique récemment créé à Manno en Suisse méridionale pour un projet de développement d'outils de calculs avancés pour toutes les phases du procédé d'électrofiltration. Le centre de Manno, spécialisé dans les calculs scientifiques complexes, est annexé à l'Institut fédéral suisse de technologie de Zurich. Outre ses compétences en modélisation/simulation numérique, le centre contribue au projet avec un supercalculateur NEC SX4 qui compte parmi les plus rapides du monde. L'objectif du projet était de mieux comprendre le procédé de dépoussiérage en suivant les trajectoires suivies par les particules de poussières le long des sections d'électrodes émissives, jusqu'à leur captation sur les plaques collectrices ou leur évacuation de l'électro-

filtre. Les outils de calcul devaient, à terme, permettre d'optimiser la géométrie des électrodes et les paramètres d'exploitation pour toutes les applications.

La nature pluridisciplinaire du projet imposait l'utilisation de bases de données avancées, capables de gérer et d'assurer l'interopérabilité de différents progiciels et différentes stations de travail au supercalculateur NEC SX4 du centre de Manno. Le concept de modularité retenu a permis de développer les progiciels de manière indépendante. **2** illustre la structure de la base de données utilisée. Le choix délibéré de l'ouverture offrait plusieurs avantages dont les principaux sont: les différents progiciels peuvent être remplacés à tout moment par des progiciels plus avancés; les données peuvent être échangées directement entre les différentes plateformes matérielles et les résultats des calculs peuvent être visualisés et représentés sous forme animée avec des interfaces graphiques très avancées. La simulation numérique de problèmes aussi complexes génère des fichiers de données très lourds. Toutefois, les systèmes modernes de visualisation permettent de présenter ces résultats d'une manière intuitive pour l'ingénieur de conception avec comparaison aux données mesurées. Différentes vues en coupe et en perspective, avec différentes couleurs, ainsi que des animations vidéos permettent de représenter et de simuler la réalité physique.

Le modèle numérique traite de manière théorique les principaux phénomènes physiques. Actuellement, le modèle décrit les phénomènes physiques dans un filtre «propre». Dans la réalité, le problème se complique du fait de la présence d'une couche de cendres filtrées, de ses propriétés résistives, du renvoiement et de l'agrégation des particules, ainsi que des conditions d'exploitation proches de la limite de production d'étincelles. Ces problèmes plutôt d'ordre pratique et qui sont en général traités par les concepteurs d'électrofiltres, exercent également une influence importante sur leurs performances.

Modélisation de l'effet couronne

Une étape importante du projet fut franchie avec la modélisation de l'effet couronne, incluant la description de la répartition

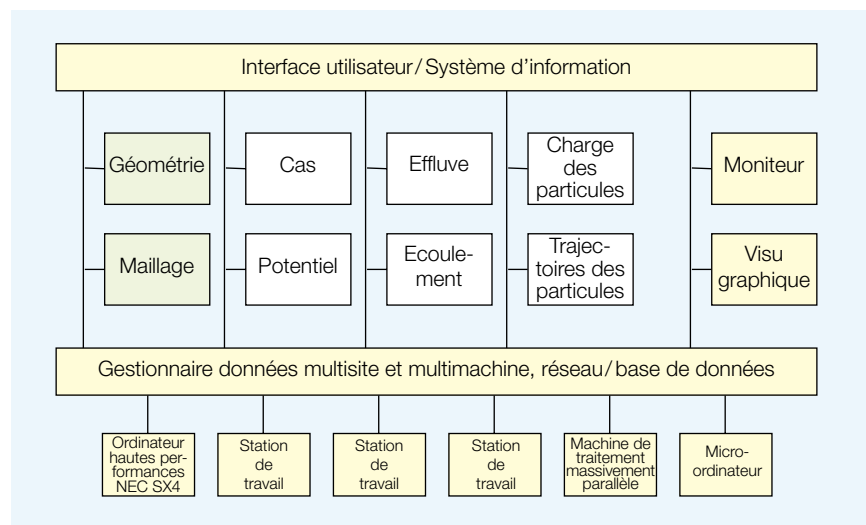


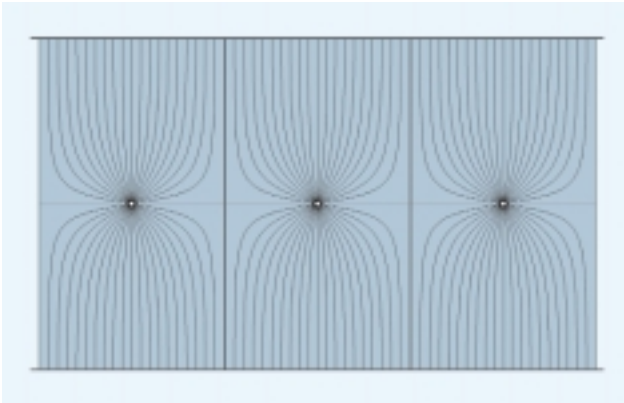
Plan de construction d'un électrofiltre ABB de type FAA. En pénétrant dans l'électrofiltre, le débit des fumées est ralenti et dirigé vers des caissons pouvant atteindre de 15 m de haut.

2

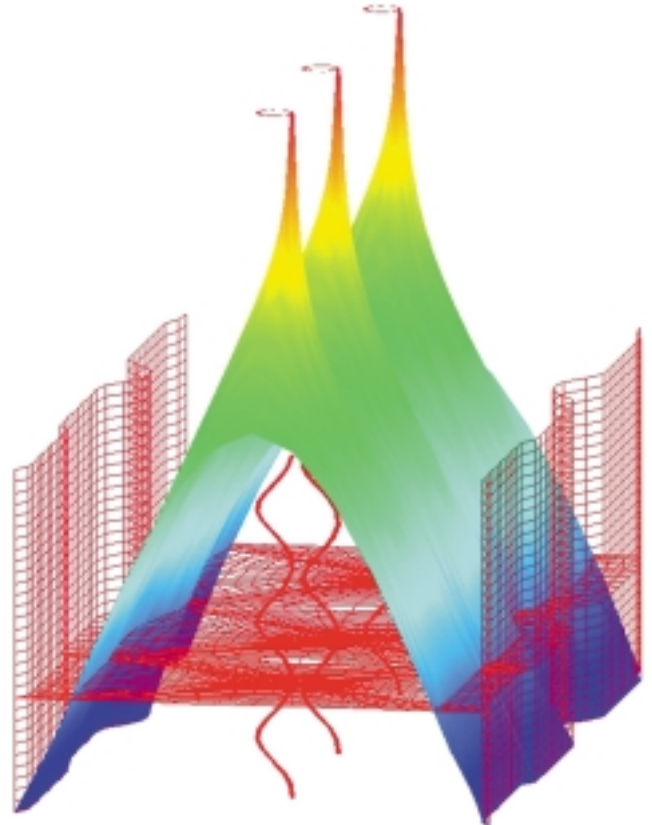
Concept de la base de données avancée pour l'interopérabilité logicielle et matérielle des différents sites

3





Lignes de champ électrique des électrodes émissives en forme de fils dans un caisson aux parois planes **4**



Potentiel électrique des électrodes émissives hélicoïdales entre plaques collectrices de forme spéciale **5**

de la densité de courant, des champs électriques et des densités d'ions dans un électrofiltre de géométrie complexe [2, 3]. De nombreux électrofiltres ABB récents utilisent des électrodes émissives de forme hélicoïdale qui exigent une représentation 3D. Lorsque la tension dépasse la *tension de seuil*, il y a formation d'une effluve dans laquelle du courant circule de l'électrode haute tension vers les plaques collectrices mises à la terre. Une couche très fine de plasma actif au voisinage des électrodes haute tension produit des électrons ainsi que des ions positifs et négatifs. Une polarité négative étant utilisée, les ions positifs ne se déplacent que sur une très courte distance jusqu'à l'électrode émissive, alors que les électrons et les ions négatifs commencent leur migration vers les plaques collectrices mises à la terre. Dans l'air ou la fumée, les électrons libres sont rapidement convertis en ions négatifs selon un procédé appelé fixation. Il s'ensuit que le volume des caissons est pratiquement rempli d'ions négatifs qui relient les zones de plasma actif au potentiel de terre au niveau des plaques collectrices. La zone de plasma actif n'occupant qu'une infime partie du volume disponible

des caissons, l'effet couronne peut être décrit de manière adéquate avec les équations qui régissent une zone de dérive d'ions unipolaires:

$$\mathbf{E} = -\nabla\Phi = -\text{grad } \Phi \quad (1)$$

$$\nabla^2\Phi = \text{div grad } \Phi = -\rho/\epsilon_0 \quad (2)$$

$$\mathbf{j} = \rho\mathbf{v} = \rho\mu\mathbf{E} \quad (3)$$

$$\nabla\cdot\mathbf{j} = \text{div } \mathbf{j} = 0 \quad (4)$$

Dans ces équations \mathbf{E} = le champ électrique, Φ = le potentiel, ρ = la densité de la charge électrique, \mathbf{j} = la densité de courant, \mathbf{v} = la vitesse des ions, μ = le mouvement des ions, et ϵ_0 la permittivité du vide. La densité de la charge électrique ρ englobe la charge par diffusion ionique et les charges accumulées par les particules solides. Ces équations démontrent la forte interaction entre le courant \mathbf{j} , la densité de la charge électrique ρ et le champ électrique \mathbf{E} . Les propriétés de la couche de plasma actif autour de l'électrode émissive n'entrent en jeu dans l'équation qu'à la condition limite. Dans le modèle de l'effet couronne, l'emplacement et l'extension latérale des zones de plasma actif sont calculés en même temps que les propriétés de la zone de dérive des ions. La zone de

plasma est correctement décrite en introduisant des coefficients d'ionisation et de fixation, qui sont des propriétés caractéristiques du gas utilisé (ex., air ou fumée).

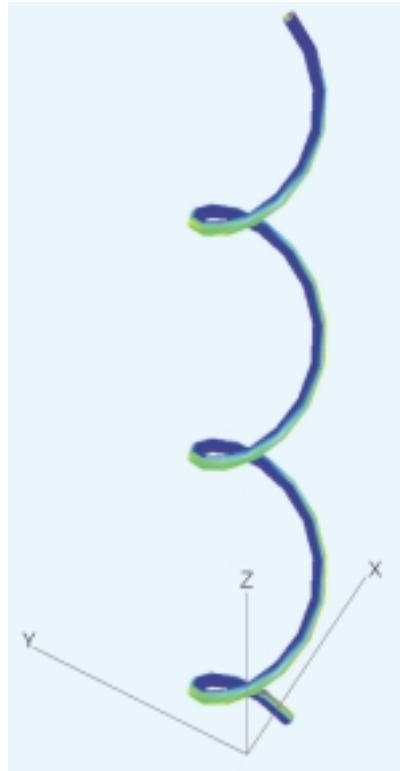
Pour les calculs, le défi consistait à trouver une solution pour cette série d'équations différentielles avec une précision suffisante dans le volume complet des caissons. Des maillages spéciaux furent créés pour prendre en compte les forts gradients au voisinage des électrodes émissives et pour gérer la forme complexe de ces dernières.

4 est une coupe selon le plan horizontal d'un caisson avec des électrodes de fils et des plaques collectrices à surface plane. Les courbes représentent les lignes de champ électrique, qui coïncident pratiquement avec le parcours des ions négatifs entre les électrodes émissives et les parois des caissons. La représentation 3D avec électrodes hélicoïdales et plaques collectrices de forme spéciale montre un phénomène plus complexe. Le potentiel électrique représenté en **5** fait apparaître une chute brutale de potentiel entre les électrodes contiguës au centre du caisson. La forme hélicoïdale des électrodes

émissives offre des avantages importants, en ce sens qu'elle contribue pour beaucoup à la bonne répartition de la densité de courant dans le caisson et au niveau de la plaque collectrice. Les électrodes s'apparentent à des ressorts tendus fixés à des cadres métalliques, la tension ayant un effet d'auto-centrage. De même, les électrodes hélicoïdales sont moins sensibles aux défauts d'alignement que les électrodes en forme de fils fins ou de lamelles. Par ailleurs, le frappage sur le cadre métallique provoque la vibration des électrodes, moyen efficace pour les débarrasser des dépôts de cendres. Les paramètres qui peuvent être optimisés sont le diamètre du fil ainsi que le pas et le diamètre de l'hélice. La forme spéciale des plaques collectrices (cf. figure 5) répond à des contraintes mécaniques (rigidité et résistance mécanique) ainsi qu'à des contraintes électriques et de dynamique des fluides.

Répartition des ions et densité de courant

Les ions qui migrent des zones de plasma actif autour des électrodes émissives suivent les lignes de champ électrique jusqu'à la plaque collectrice. Le modèle de l'effet couronne détermine la position et l'extension latérale de ces zones de plasma actif le long de l'électrode hélicoïdale. **6** est une vue agrandie d'une section d'hélice. Les zones actives se



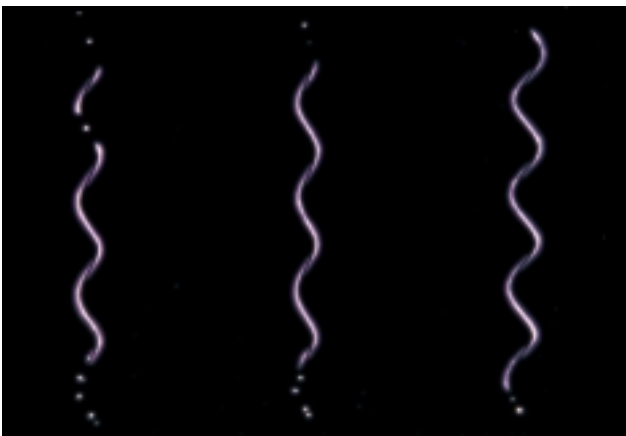
6 *Répartition calculée de la charge en ions sur un segment de l'électrode émissive hélicoïdale. Les régions actives sont situées principalement sur la face externe de l'hélice car le champ électrique est fortement réduit sur la face interne du fait de l'effet de blindage des parties contiguës de l'hélice.*

Echelle des couleurs: $0 < \rho < 1.5 \cdot 10^{-5} \text{ As/m}^3$

trouvent essentiellement sur la face externe de l'hélice car le champ électrique est fortement réduit sur la face interne du fait de l'action de blindage des parties contiguës de l'hélice. Ce phénomène apparaît également sur les photographies de l'effluve sur les électrodes hélicoïdales **7**. Un trait légèrement foncé sur la face interne de l'hélice indique un effet couronne fortement réduit. Ceci a une incidence importante sur la répartition de la densité d'ions dans le caisson **8**. En rouge, les zones où la densité de charge d'ions est la plus forte. Ces zones se situent à proximité de l'électrode hélicoïdale et sont dirigées en fonction de la forme de la plaque collectrice et de l'écartement des électrodes émissives. Les résultats des calculs confirment la présence d'importantes zones bleues de densité d'ions négligeable. Il est donc clair que l'écartement des électrodes émissives doit être optimisé en fonction de la forme des plaques collectrices. Au fil des ans, les performances des électrofiltres ont été améliorées en s'appuyant sur des courbes de répartition de courant mesurées en laboratoire.

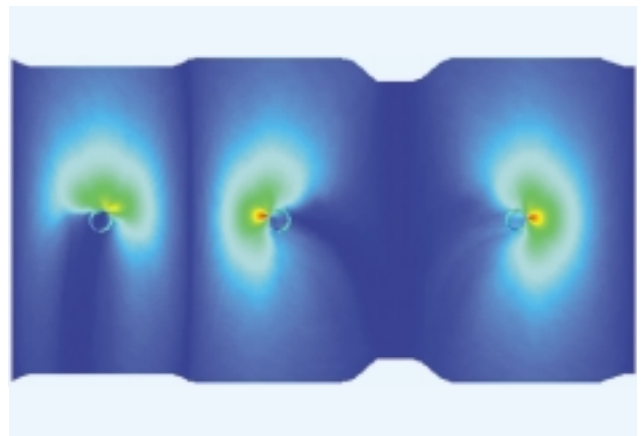
Les calculs de densité de courant **9** montrent la répartition dans le volume du caisson et sur les plaques collectrices. On observe la même répartition dans le dépôt de poussières sur la plaque collectrice. Cette répartition est clairement liée au pas et à l'écartement des électrodes hélicoïdales.

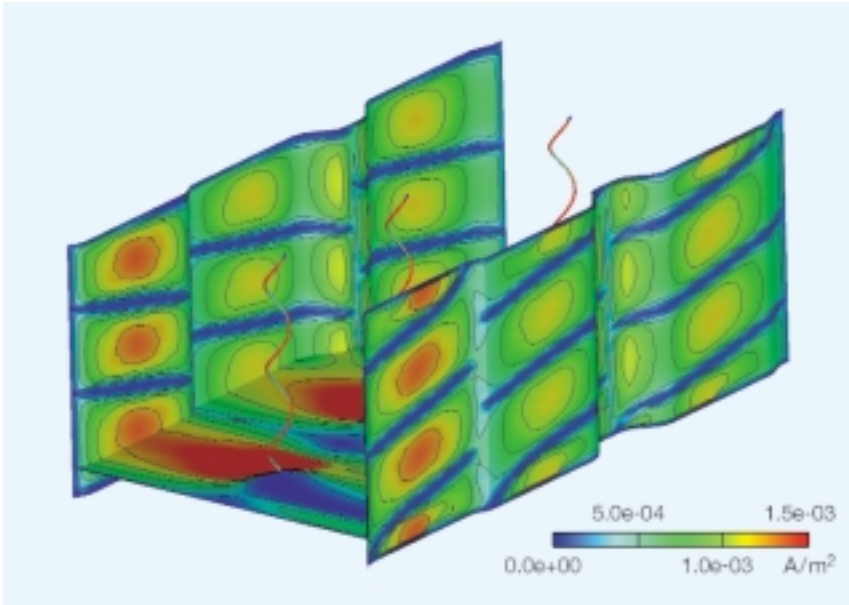
7 *Photographie de l'effluve sur les électrodes haute tension hélicoïdales. Le trait légèrement foncé sur la face interne de la spirale indique un effet couronne très réduit.*



8 *Trois coupes horizontales différentes de la densité de charge d'ions calculée dans un caisson à électrodes hélicoïdales*

Echelle des couleurs: $0 < \rho < 10^{-4} \text{ As/m}^3$





Densité de courant calculé dans un caisson à électrodes émissives hélicoïdales et plaques collectrices de forme spéciale. La densité est fonction du pas et de l'écartement des électrodes hélicoïdales.

9

Des mesures de courant réalisées sur une plaque collectrice segmentaire par le centre technologique d'ABB pour le contrôle de la pollution de l'air (Växjö, Suède) ont non seulement révélé les mêmes schémas de répartition de la densité de courant, mais elles sont également en accord quantitatif presque total avec les modèles numériques. De même, à la fois les données expérimentales et les calculs ont mis en évidence des zones de densité de courant pratiquement nulles au niveau des plaques collectrices [4]. La

forme hélicoïdale des électrodes émissives garantit une répartition très stable du courant d'effet couronne, offrant des performances supérieures aux électrodes de forme différente.

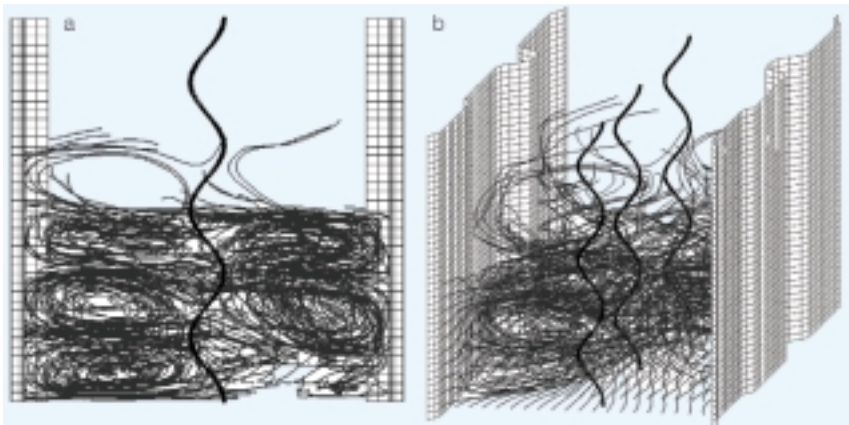
Vent électrique

Les ions qui se déplacent dans le flux gazeux à des vitesses d'environ 100 m/s créent un «vent électrique», également appelé «vent ionique» ou «vent d'effet couronne». La force de la charge élec-

trique, ρE , qui agit transversalement à l'écoulement principal induit des écoulements secondaires qui modifient complètement l'écoulement turbulent d'origine, entraînant la séparation des écoulements et produisant des turbulences au niveau des raidisseurs des plaques et des électrodes émissives. Sachant que la masse des ions est presque identique à celle des molécules de gaz neutre, un transfert efficace du moment a lieu entre les ions accélérés et le gaz environnant. En utilisant conjointement un progiciel de calcul d'écoulement et le modèle d'effet couronne, on a pu calculer les schémas des écoulements résultants 10. Les calculs montrent des structures tourbillonnaires tridimensionnelles très prononcées. Pour valider ces calculs, ABB a la chance de disposer d'une base de données très complète. Celle-ci contient à la fois des données qualitatives obtenues par visualisation en coupe par faisceaux laser et des données quantitatives obtenues à partir de mesures de vélocimétrie par effet Doppler (au laser) [5]. Il est intéressant de constater que l'écoulement initial est déjà très différent après passage par seulement quelques électrodes émissives. 11 illustre une coupe verticale entre la seconde et la troisième électrodes hélicoïdales après pénétration dans l'électrofiltre. Plus les tensions d'effet couronne sont élevées, plus les écoulements transversaux sont intenses, écoulements de courants alternants à des vitesses comparables à la vitesse de l'écoulement principal.

Vue de face (a) et perspective (b) de quelques schémas d'écoulement dans un caisson à électrodes émissives hélicoïdales et plaques collectrices de forme spéciale

10

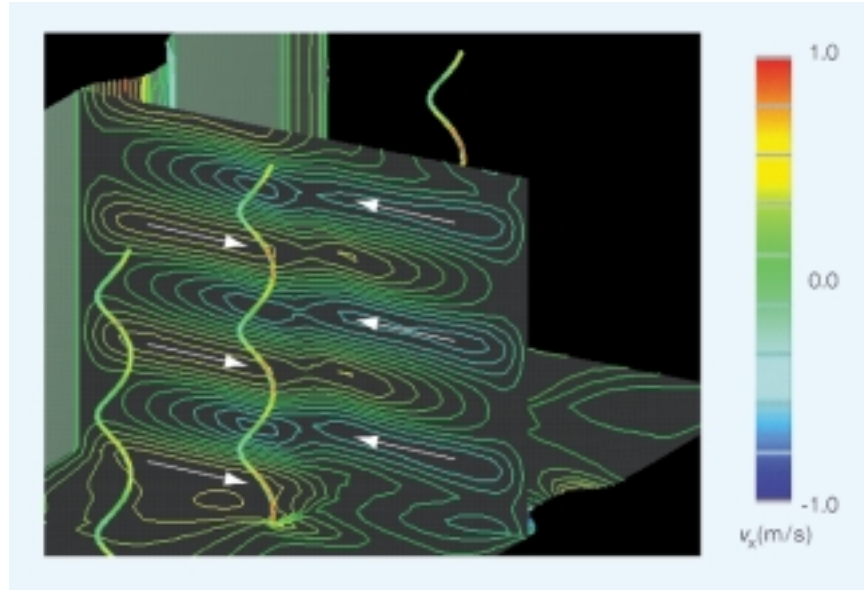


Charge électrique des particules de poussières

Les particules de cendre volante qui pénètrent dans l'électrofiltre passent par de nombreuses électrodes émissives lors de leur parcours dans le caisson. Elles entrent en collision avec les ions négatifs dont la concentration et la vitesse varient. De même, l'intensité du champ électrique varie tout au long de leur parcours. Deux mécanismes physiques de base interviennent pour la charge électrique des particules de poussières. Le premier, appelé *Charge par choc* implique la fixation des ions à la surface des particules jusqu'à atteindre une charge de saturation (qui varie selon la taille de la particule de pous-

sière et de l'intensité du champ électrique). La vitesse initiale du procédé varie en fonction de la concentration d'ions que la particule «voit» pendant son parcours dans la zone des électrodes émissives. Au fur et à mesure que les particules de poussières accumulent leur charge par fixation d'ions, d'autres ions commencent à être repoussés par la particule, réduisant le taux de charge. Lorsque la charge de saturation est atteinte, on arrive à un état d'équilibre où tout ion supplémentaire est rejeté, ramenant le taux de charge à zéro. La charge par choc est le mécanisme qui intervient principalement pour les particules de rayon supérieur à 1 µm.

Pour les particules plus petites, un mécanisme physique différent, appelé *charge par diffusion ionique* s'avère plus efficace. Ce mécanisme varie en fonction de l'agitation thermique aléatoire des ions et des collisions en résultant avec les particules de poussières. A dire vrai, la charge par choc et la charge par diffusion ionique interviennent simultanément dès qu'une particule de poussière pénètre dans l'électrofiltre. Par conséquent, les équations différentielles décrivant les mécanismes de charge électrique doivent être résolues en même temps que celles déterminant la tra-



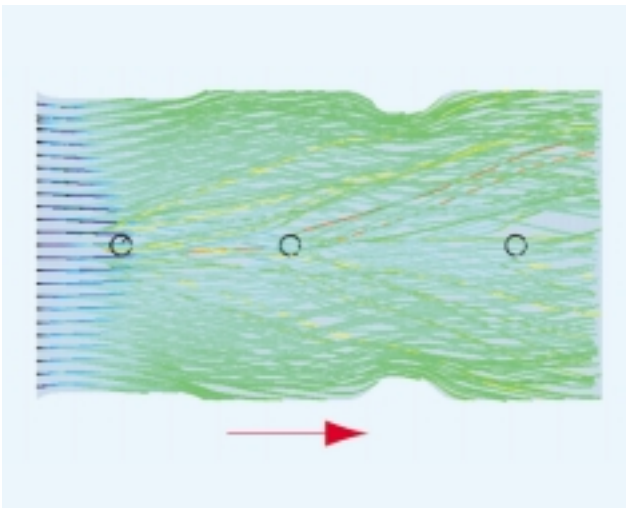
11 Schémas des écoulements transversaux sur un plan vertical perpendiculaire à l'écoulement principal entre la deuxième et la troisième électrodes émissives

jectoire des particules [6]. Les calculs montrent qu'une particule de 5 µm dans un électrofiltre peut accumuler plusieurs milliers de charges élémentaires alors qu'une particule de 0,3 µm accumule rarement une centaine de charges élémen-

taires. Les particules qui passent à proximité des électrodes émissives peuvent déjà avoir atteint des niveaux de charge assez élevés après une courte distance parcourue. Sur **12**, des couleurs sont utilisées pour différencier les niveaux de char-

12 Trajectoires des particules de 2 µm, vues de dessus. Les couleurs indiquent les charges élémentaires (0-975) accumulées par une particule de cendre volante.

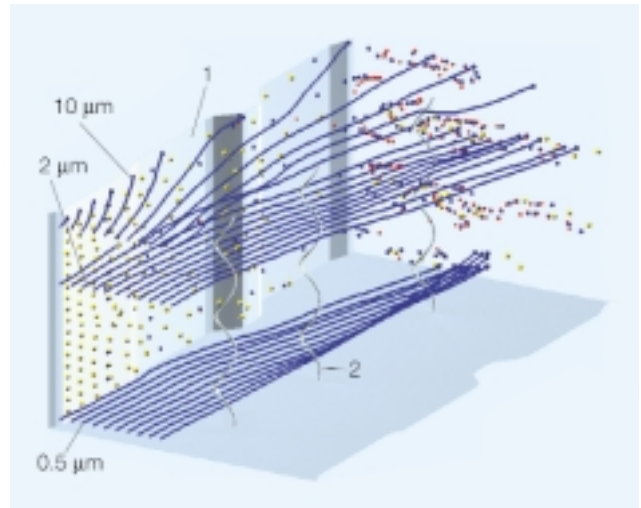
Flèche rouge Sens de l'écoulement



13 Perspective des trajectoires des particules

Haut: Particules de 10 µm
Milieu: Particules de 2 µm
Bas: Particules de 0,5 µm

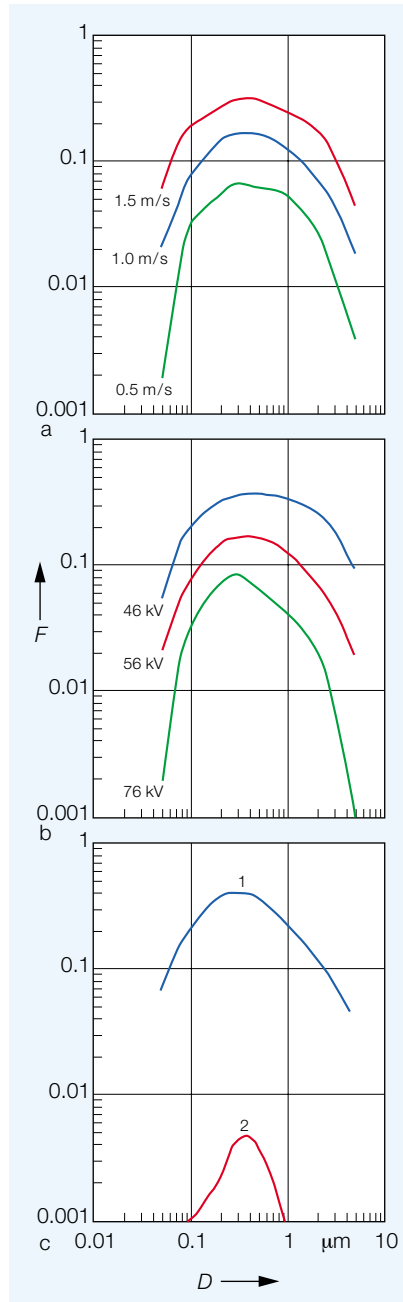
1 Plaque collectrice 2 Electrode émissive



ge des particules le long de leur trajectoire. En rouge, une charge accumulée élevée, en bleu une charge nulle, et en vert et jaune des niveaux intermédiaires.

Les trajectoires suivies par les particules

Une fois que le champ d'écoulement, les propriétés de l'effet couronne et les charges des particules ont été déterminés, on peut calculer les forces totales agissant sur chaque particule ; elles sont composées des forces électriques, $q_p E$, plus la force d'inertie et le frottement dans le fluide. Pour ce faire, un progiciel de poussée des particules spécial est utilisé, développé à l'origine pour suivre le parcours des particules dans les expériences de fusion nucléaire. A ce stade, il y a mise à contribution de tous les progiciels pour résoudre l'équation de déplacement de chacune des particules de cendre volante. A la figure 13, qui est une perspective de la trajectoire des particules, on voit clairement que le déplacement des particules est fortement influencé par l'effet couronne et par les écoulements secondaires en plus de l'écoulement principal. Des particules de trois tailles différentes (10 µm, 2 µm et 0,5 µm de diamètre) pénètrent dans l'électrofiltre sur différents plans horizontaux. Un nombre important de grandes particules accumulent suffisamment de charge pour être entraînées vers la paroi par les forces électriques, ceci déjà après une courte distance. Quelques particules de taille moyenne et un nombre plus important de petites particules sont prises dans un tourbillon qui, dans un premier temps les entraîne vers le centre du caisson, les éloignant des plaques collectrices. 12 montre une grande quantité de particules de 2 µm sur différents plans, vus de dessus. La plupart des particules accumulent une charge moyenne (vert) très rapidement après pénétration dans l'électrofiltre. Une partie des particules accumule des charges plus importantes (jaune, rouge), particules qui sont très fortement déviées vers la plaque collectrice par les forces électriques. Après trois électrodes seulement, on observe une réduction considérable de la concentration en particules. Dans l'exemple illustré, 22 % des particules sont sur les plaques collectrices après avoir passé trois électrodes émissives.



Courbes de pénétration montrant l'influence de différentes géométries et différents paramètres d'exploitation sur la captation des particules 14

- a Influence de la vitesse d'écoulement (plaques planes, écartement 40 cm, longueur 12 m, 45 électrodes)
- b Influence de la tension appliquée (plaques planes, écartement 40 cm)
- c Influence du «vent électrique» (56 kV, plaques de forme spéciale)

D Diamètre des particules
F Pénétration fractionnaire

Courbes de pénétration

Les outils de calcul puissants que nous venons de décrire peuvent être utilisés pour étudier l'influence de différents paramètres sur les performance d'un électrofiltre. A cet effet, les trajectoires de quelque 2000 particules de chaque taille ont été calculées pour un électrofiltre important de 12 m de long. Les particules passent le long de 45 électrodes émissives hélicoïdales.

Les résultats des calculs peuvent être représentés sous la forme de courbes de pénétration fractionnaires 14, sur lesquelles la fraction des particules en sortie de l'électrofiltre est relevée pour chaque taille de particules. Sur ces courbes, la valeur maximale correspond aux particules d'un diamètre approximatif de 0,5 µm. Ces résultats sont qualitativement en accord avec des mesures réalisées en aval sur des électrofiltres utilisés dans des centrales thermiques au charbon pulvérisé. 14a montre l'influence de la vitesse à l'entrée. Pour une particule de 4 µm, la pénétration est réduite par un facteur de 10 lorsque la vitesse d'écoulement est réduite par un facteur de 3. 14b montre la très forte influence de la tension appliquée. Du fait de cette influence, les électrofiltres fonctionnent autant que possible à la tension maximale admissible – caractérisée par l'apparition d'étincelles à la tension disruptive et provoquant la chute de la tension. Les électrofiltres modernes sont commandés par des dispositifs électroniques qui permettent de travailler à la tension maximale admissible, mais qui admettent l'apparition d'un certain nombre d'étincelles (en moyenne 10 par minute; jusqu'à 150 par minute dans certaines applications). Les résultats les plus surprenants sont ceux des courbes de 14c, qui montrent l'influence du vent électrique. Ces courbes illustrent par ailleurs l'intérêt des simulations numériques avancées. Dans ces simulations, il est virtuellement possible de supprimer le vent électrique en annulant l'interaction entre l'effluve et l'écoulement. Dans la réalité, cela n'est bien sûr pas possible. Ce subterfuge nous a toutefois permis de répondre à une question largement débattue depuis des décennies, à savoir quel rôle joue le vent électrique dans le procédé d'électrofiltration. Contribue-t-il ou, au contraire, entrave-t-il la captation des particules, et son

rôle est-il négligeable? La modélisation a permis de démontrer que le vent électrique exerce une influence négative, voire contre-productive. En comparant les deux courbes de **14c**, on découvre que la captation de poussières pourrait être améliorée de deux points environ en supprimant l'effet du vent électrique. Ainsi, il serait intéressant de réfléchir à des géométries et des conditions d'exploitation qui réduiraient l'influence du vent électrique.

De la forme des courbes de pénétration, il découle que les particules entre $0,1 \mu\text{m}$ et $1 \mu\text{m}$ de diamètre sont les plus difficiles à capturer. Les plus grosses particules accumulent de nombreuses charges élémentaires avec pour résultat des forces électriques intenses. Pour ce qui est des très petites particules de poussières, elles sont également efficacement captées du fait de la réduction du coefficient de traînée (glissement Cunningham) pour les particules de cette taille.

Excitation intermittente et pulsée

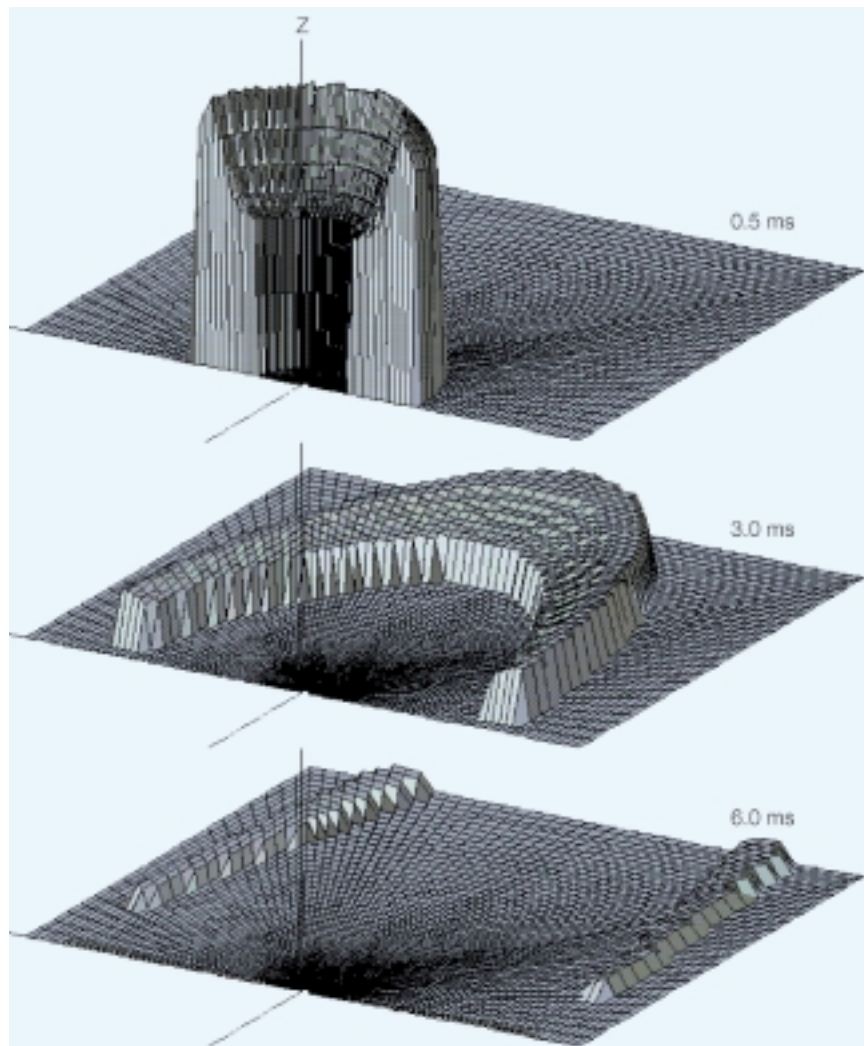
Les résultats décrits jusqu'ici font référence à un régime stable dans lequel une haute tension constante est appliquée aux électrodes émissives. En réalité, la haute tension fournie par les ensembles de transformateurs/redresseurs de fréquence fluctue au double de la fréquence du réseau. Dans les redresseurs HF plus performants, la tension est proche d'une tension parfaitement continue [7]. L'excitation intermittente est utilisée dans de nombreuses applications. Des interruptions dans le courant de charge peuvent être introduites en supprimant un certain nombre d'alternances dans le redresseur, avec pour résultat une haute tension plus fluctuante avec des impulsions de l'ordre de la milliseconde. Des impulsions HT beaucoup plus courtes peuvent être obtenues avec des réseaux conformateurs d'impulsions. L'excitation pulsée consiste à superposer des impulsions HT de courte durée à une tension c.c. de base. Ces méthodes ont principalement été développées pour améliorer la captation des poussières de résistivité élevée. En corollaire, la consommation électrique a encore été réduite.

Pour certaines applications, l'excitation c.c. a été abandonnée pour les raisons

suivantes. Dans une effluve électrique en régime stable, le courant et la tension sont étroitement liés à la caractéristique courant/tension, qui est essentiellement fonction de la disposition des électrodes et des caractéristiques du gaz. L'utilisation de tensions transitoires offre une marge de liberté supplémentaire pour optimiser la captation des poussières. L'excitation intermittente et pulsée permet de réduire le courant équivalent continu tout en maintenant une bonne répartition du courant. Cette répartition varie en fonction de l'intensité de la formation de la couronne d'effluves (pointes HT). Des conséquences spéciales à prévoir lorsque la durée des impulsions est plus courte que le temps de transfert des ions, c'est-à-dire le temps

nécessaire aux ions pour migrer de l'électrode émissive vers la plaque collectrice. Dans un électrofiltre classique, cette migration prend plusieurs millisecondes. De même, ces conséquences peuvent être analysées avec le modèle de l'effet couronne [8, 9]. **15** illustre la forme du nuage d'ions en déplacement produit par une impulsion HT d'une durée de $300 \mu\text{s}$ à trois moments différents pendant la migration. Le nuage d'ions présente des bords avant et arrière bien définis ainsi qu'une forme essentiellement déterminée par la géométrie des électrodes et du caisson et, bien sûr, par la durée des impulsions. L'écoulement principal du flux gazeux avec les particules de poussières en suspension ne se déplace que de quelques millimètres pen-

15 *Forme d'un nuage d'ions en déplacement produit par une impulsion haute tension de $300 \mu\text{s}$ de durée. Z est la position de l'électrode émissive en forme de fil.*



dant ce temps de transfert des ions. En utilisant des impulsions courtes, on peut ajouter des charges aux particules de poussières, sans ajouter beaucoup de vitesse transversale à l'écoulement et arriver à une répartition plus homogène du courant au niveau des plaques collectrices. On améliore l'efficacité de la captation des poussières, plus particulièrement pour les cendres volantes de résistivité élevée [10].

Conclusions

Depuis longtemps, on tente de modéliser et d'extrapoler les performances des électrofiltres. Les premiers travaux sont à l'origine de la célèbre équation de Walther Deutsch (1925) établissant la relation entre l'efficacité du dépolluage par un électrofiltre et, d'une part, la zone de captation spécifique et, d'autre part, la vitesse de migration fictive vers la plaque collectrice. Cette relation fut ultérieurement affinée et a été très largement utilisée pour le dimensionnement des électrofiltres. Dans ces modèles intégraux, le retour d'expérience ainsi que les données collectées lors des essais sur site pilote sont utilisés pour calculer la vitesse de migration pour une nouvelle application.

Le modèle numérique qui vient d'être développé s'appuie plutôt sur les phénomènes physiques de base intervenant dans l'électrofiltration. Il vise à prévoir des conditions d'exploitation inconnues, ainsi qu'à comprendre et quantifier l'influence de différentes géométries. Il est utilisé pour étudier l'impact de différents paramètres électriques ainsi que la composition, la température et la vitesse d'écoulement du gaz. Actuellement, ce modèle numérique suppose des conditions d'exploitation des électrofiltres sans phénomène d'effet couronne inverse.

Une telle modélisation n'est devenue possible que récemment à la suite d'avancées scientifiques dans les domaines de la physique des plasmas, de la dynamique des fluides et des calculs sur ordinateurs. Il semble aujourd'hui possible de traiter l'électro-hydrodynamique complète d'une effluve dans un écoulement transversal, de même que résoudre les équations de charge et de déplacement des particules. Il est évident que les résultats obtenus avec ces progiciels de calcul aussi complexes doivent être validés par une expéri-

mentation. Les résultats obtenus à ce jour en comparant les caractéristiques mesurées, les répartitions mesurées de densité de courant et les courbes de pénétration mesurées sont très encourageants.

Les exemples illustrés montrent qu'il est aujourd'hui possible de recourir à la simulation numérique pour optimiser les performances des électrofiltres et quantifier l'influence des différents paramètres. La technique de la simulation numérique devrait permettre de réduire le coût des sites pilotes et des essais en conditions réelles. Il ressort déjà que de les modèles numériques seront utilisés par les concepteurs comme outils complémentaires pour tester de nouvelles idées sur les procédés avancés d'électrofiltration. Certains aspects pratiques n'ayant pas encore été traités par simulation numérique, le retour d'expérience et les essais en site pilote continueront de jouer un rôle important dans la conception des électrofiltres au cours des années à venir.

Bibliographie

- [1] K. Porle, K. R. Parker: Dry type precipitator applications in applied electrostatic precipitation. Blackie Academic & Professional, London, 1997, 349–381.
- [2] W. Egli, O. Riccius, U. Kogelschatz, R. Gruber, S. Merazzi: Computation of the charge density distribution in a 3D electric field. 6th Joint EPS-APS Intern. Conf. on Physics Computing (PC'94), Lugano 1994, 535–542.
- [3] W. Egli, U. Kogelschatz: Corona current and space charge distribution in precipitator configurations. XXII Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG XXII), Hoboken, NJ, 1995, vol 1, 119–120.
- [4] W. Egli, U. Kogelschatz, T. Persson: Three-dimensional corona current distribution in complex ESP configurations. 6th Intern. Conf. on Electrostatic Precipitation (ICESP VI), Budapest 1996, 166–171.
- [5] C. Halldin, R. Håkansson, L. E. Johansson, K. Porle: Particle flow field in a commercial design ESP during intermittent energization. 6th Intern. Conf. on Electrostatic Precipitation (ICESP VI), Budapest 1996, 406–416.
- [6] W. Egli, U. Kogelschatz, E. A. Gerteisen, R. Gruber: 3D computation corona, ion induced secondary flows and particle motion in technical ESP configurations.

Journal of Electrostatics 40&41 (1997), 425–430.

- [7] M. Pihl: Meilleure dynamique de régulation pour filtres électriques par une nouvelle alimentation haute tension. Revue ABB 2/98, 43–47.
- [8] W. Egli, U. Kogelschatz, E. A. Gerteisen: Pulsed corona in an electrostatic precipitator configuration. XXIII Proc., XXIII Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases (ICPIG XXIII), Toulouse, 1997, vol II, 236–237.
- [9] E. A. Gerteisen, W. Egli, U. Kogelschatz: Solution methods for ion flows in electrostatic precipitators. Proc. Fourth Europ. Computational Fluid Dynamics Conf. (ECCOMAS), Athens, 1998, 1140–1147.
- [10] N. Klippel, S. Stutz, U. Kogelschatz: ESP efficiency measurements with a flexible pulsed power supply. 7th Intern. Conf. on Electrostatic Precipitation (ICESP VII), Kyongju, Korea, 1998, 388–395.

Adresses des auteurs

Dr Ulrich Kogelschatz
Walter Egli
ABB Corporate Research Ltd
CH-5405 Baden-Dättwil
Suisse
Téléfax: +41 56 493 4569
E-mail:
ulrich.kogelschatz@chrcr.abb.com
walter.egli@chrcr.abb.com

Dr Edgar A. Gerteisen
Swiss Center for Scientific Computing
(CSCS)
CH-6928 Manno
Suisse
E-mail:
egerteis@cscs.ch