

# CONGRÈS

COMPTE RENDU

17, 18, 19 septembre 2012  
Paris, France

## VENTILATION 2012 X<sup>e</sup> CONFÉRENCE INTERNATIONALE SUR LA VENTILATION INDUSTRIELLE

### LES NOUVEAUX ENJEUX DE LA VENTILATION

La ventilation combinée à l'épuration et la filtration est une technique universelle d'assainissement de l'air d'un espace de vie, d'un lieu de travail ou de l'environnement d'un procédé. Cette technologie de l'air propre, bien qu'étant éprouvée et robuste, doit faire face à de nouveaux enjeux résultant des récentes évolutions techniques et sociétales.

Les connaissances acquises dans les domaines de la santé au travail et de la santé environnementale conduisent aujourd'hui les états à faire évoluer leurs politiques publiques et à réviser la réglementation en matière de gestion du risque d'exposition des populations aux substances dangereuses. Par exemple, en Europe, les valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) de nombreux agents chimiques dangereux sont réduites. Pour ne citer qu'un cas, la VLEP du Cr VI intervenant dans le traitement surfacique de nombreux métaux

ou polymères sera réduite en France d'un facteur 50 dans les deux prochaines années.

Le développement mondial des nanotechnologies et la production croissante de nanomatériaux manufacturés posent question sur l'exposition associée des salariés à des aérosols nanostructurés dont l'impact potentiel sur la santé est encore mal connu. En application d'une « précaution raisonnée », la mise en place de mesures de prévention rigoureuses s'impose.

Enfin, dans un contexte de raréfaction des énergies fossiles, d'augmentation du coût de l'énergie et de réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments et de leurs systèmes représente un enjeu majeur.

Ces évolutions récentes amènent les professionnels de la ventilation à revisiter les performances des systèmes de ventilation, de captage des polluants, de confinement et de filtration. Ces méthodes de prévention sont-elles suffisantes pour assurer, en toutes circonstances, la santé et la sécurité des populations exposées à la fabrication ou à la dégradation de ces

- ▶ Jean-Raymond FONTAINE, INRS
- ▶ François DURIER, CETIAT
- ▶ Corinne MANDIN, OQAI, CSTB
- ▶ Corinne PRÉVOST, Laurent RICCIARDI, IRSN

agents chimiques dangereux? Comment en tenir compte lors de la conception d'un procédé ou d'une machine? La réduction des émissions à la source et l'intégration d'un système de captage des poussières ou des vapeurs constituent une stratégie classique de prévention tandis que la normalisation reste parallèlement peu explicite en la matière. Que ce soit les machines portatives pour le travail du bois, les finisseurs pour la pose des enrobés sur les routes ou les presses à injecter pour la transformation des matières plastiques, aucun étiquetage réglementaire n'éclaire l'utilisateur sur les quantités de polluants émises par ces matériels.

Dans un autre registre, on constate que la population des sociétés modernes passe plus de 80% de son temps dans des espaces intérieurs, en étant exposée aux émissions des matériaux de construction et de décoration de ces lieux, de leurs équipements et à celles des activités qui s'y déroulent. Près de 75% des salariés travaillent dans le secteur tertiaire et une grande partie d'entre eux dans des bureaux à raison de 8 heures par jour. Ces populations sont donc exposées à de faibles doses de nombreuses substances chimiques durant de longues périodes, voir toute une vie. Parallèlement, les contraintes de réduction des consommations d'énergies fossiles n'ont cessé de réglementer la construction: isolation et étanchéité des enveloppes, gestion du renouvellement d'air, dépendance aux énergies renouvelables. Sur la base de données toxicologiques et épidémiologiques, les pouvoirs publics commencent à définir des « valeurs guides » pour les concentrations des substances chimiques présentes dans les espaces intérieurs. Bien sûr la stratégie d'amélioration de la qualité de l'air intérieur s'appuie en premier lieu sur un choix de matériaux et de produits les moins émissifs et, globalement, sur la réduction à la source des émissions. Mais elle passe également par une optimisation des systèmes de ventilation, du dimensionnement et de la mise en œuvre à l'utilisation et la maintenance. Des développements technologiques pour traiter simultanément les contraintes énergétiques et sanitaires doivent dès à présent être engagés et, à terme, pris en compte dans les futurs codes de la construction. Par ailleurs, le bruit émis et transmis par les systèmes de ventilation doit être réduit.

Enfin, les techniques de confinement initialement développées pour l'industrie nucléaire sont soumises à des tests de robustesse de plus en plus

sévères. Elles sont également adaptées pour traiter d'autres applications très sensibles comme la gestion du risque infectieux dans les hôpitaux ou la conception des laboratoires de sécurité pour la manipulation des agents bactériologiques.

Tous ces sujets et enjeux majeurs ont été abordés dans le congrès international « Ventilation 2012 » et ont fait l'objet de conférences, de communications orales et affichées et de plusieurs ateliers. Cet article présente le contenu de la dixième conférence d'un cycle, initié en 1985 à Ottawa par le professeur Goodfellow et poursuivi aujourd'hui à Paris par l'INRS, en partenariat avec le CSTB, l'OQAI, le CETIAT et l'IRSN.

Les principales thématiques traitées sont reprises ci-dessous avec, pour chacune d'entre elles, une brève description des sujets abordés suivie d'une sélection de quelques résumés choisis pour illustrer les communications présentées.

## **VENTILATION INDUSTRIELLE – CONTRÔLE DES ÉMISSIONS – CAPTAGE LOCALISÉ – OPTIMISATION DES SYSTÈMES**

Onze communications ont été présentées. Les principaux sujets abordés portaient sur l'évaluation et le contrôle des émissions de polluants par les procédés et les machines: modélisation des poussières émises par un jet de particules tombant d'un silo (Zeren *et al.*), caractérisation du dépôt de particules dans les conduits de ventilation (Havet *et al.*), métrologie des poussières de bois émises par les scies à panneaux (Keller *et al.*), évaluation des systèmes d'aspiration localisée sur les tables de découpe automatisée des métaux (Braconnier *et al.*), performances des systèmes de captage des fumées de bitume sur les finisseurs (Bonthoux *et al.*), efficacité des filtres à particules diesel dans les travaux souterrains (Mayer *et al.*), risque ATEX dans les réseaux de captage (Janès *et al.*) Plusieurs études d'évaluation ou d'optimisation d'enceintes ventilées ont également été présentées: confinement d'une sorbonne à rideau d'air (Huang *et al.*), paramètres d'influence de l'efficacité d'une cabine

ouverte (Saunders *et al.*), caractéristiques aérauliques des enceintes de petite taille pour le retrait d'amiante (Pocok *et al.*).

Un atelier a également permis de confronter divers retours d'expérience sur l'efficacité et le cycle de vie des systèmes de captage localisés.

### **ATELIER - AMÉLIORATION DE L'EFFICACITÉ DE LA VENTILATION LOCALISÉE EN MILIEU DE TRAVAIL**

■ **Animation:** J. Saunders (HSL, Royaume Uni)

■ **Participants:** E. Marteau (CRAMIF, France), E. Weiss (Festool, Allemagne), H. Goodfellow (Tenova Goodfellow Inc, Canada), J.-R. Fontaine (INRS, France), R. Wolyzella (BG, Allemagne)

La ventilation localisée est une solution d'ingénierie conçue pour réduire l'exposition des travailleurs aux polluants aéroportés tels que les poussières, brouillards, fumées, vapeurs ou gaz. Elle constitue souvent la principale mesure de prévention de l'exposition employée sur le lieu de travail. Cependant, dans bien des cas, la ventilation localisée ne permet pas de protéger efficacement les travailleurs.

Cet atelier a été l'occasion d'étudier pourquoi les systèmes de ventilation localisée sont inefficaces et d'examiner comment améliorer leurs performances.

Une série d'intervenants venus d'horizons divers et s'intéressant aux performances des systèmes de ventilation localisée (préventeurs, chercheurs, concepteurs de machines et de systèmes de ventilation localisée, etc.) ont tenté de répondre à ces questions et donné leur point de vue par des présentations de courte durée. L'atelier a aussi permis une description de la démarche adoptée par certains pays pour améliorer la prévention par la ventilation localisée.

### **Principales conclusions de l'atelier**

Indépendamment des différences de réglementations entre les différents pays représentés (Allemagne, Royaume-Uni, France, Canada), les orateurs et les participants ont décrit des problématiques très similaires: absence de spécification du besoin par l'entreprise utilisatrice, conception souvent un peu légère du système de captage par le fournisseur, absence de données de réception, absence de formation des utilisateurs... Il a égale-

ment été souligné qu'une bonne conception d'un captage localisé nécessite une caractérisation des sources de polluant mais qu'en pratique cette étape est souvent ignorée. A cet égard une piste de solution pourrait être un étiquetage des machines en fonction de la quantité de substances dangereuses émises par unité de temps. Cette information constituerait un critère de choix supplémentaire pour l'employeur lors de l'acquisition d'un nouveau matériel.

Toutes les pistes d'amélioration citées interviennent très en amont dans le processus de mise en œuvre des moyens de prévention. Si elles ne sont pas conduites avec diligence, aucune opération de contrôle ou de maintenance ne pourra améliorer efficacement un système défaillant.

Enfin, bien qu'étant réglementaires dans la plupart des pays représentés, les mesures de contrôle périodique des performances des systèmes de ventilation localisés sont rarement réalisées et souvent mal interprétées.

Une amélioration suggérée par les participants pourrait être de rassembler dans une norme les bonnes pratiques à mettre en place durant tout le cycle de vie d'une installation de captage localisé pour faciliter le dialogue entre utilisateur, concepteur, installateur, organisme de contrôle et préventeur.

■ Les communications suivantes ont été sélectionnées pour parution dans *International Journal of Ventilation*.

### Évaluation des performances des systèmes d'aspiration des fumées de bitume équipant les finisseurs

F. Bonthoux, C. Patrascu, INRS, France

► Entre 2009 et 2011, l'INRS a évalué les performances des systèmes d'aspiration des fumées de bitume équipant les finisseurs utilisés pour réaliser le revêtement des routes. Destiné à réduire l'exposition du conducteur de la machine, le dispositif capte les fumées au niveau de la vis de répartition de l'enrobé à chaud, siège principal des émissions, pour les rejeter en partie haute de la machine avec une vitesse suffisante pour éviter les retours vers le poste de pilotage. L'évaluation a été réalisée par gaz traceur (SF<sub>6</sub>) en se basant sur le protocole proposé par le NIOSH. Les premiers tests ont montré les limites de cette méthodologie, notamment par les effets indésirables sur la mesure de la mise en situation de la machine dans un hall d'essais; la mise en place de bâches en vue d'isoler la machine du rejet d'air capté modifie

largement les écoulements. La poursuite des tests par gaz traceur à l'extérieur, en situation plus représentative d'un fonctionnement réel, a permis de montrer que pour ces machines, le captage devait impérativement être intégré dès la conception. L'implantation des divers systèmes de refroidissement (moteur diesel, compresseur hydraulique), dont les rejets, s'ils sont mal orientés, dégradent fortement l'efficacité du captage, doit faire l'objet d'une attention particulière.

### Étude des paramètres influant sur l'efficacité d'une cabine de captage ouverte en façade

J. Saunders, HSL, UK

► Les cabines ventilées ouvertes en façade sont couramment utilisées dans l'industrie pour prévenir l'exposition des salariés à divers produits chimiques. Ces cabines tendent à avoir une conception basique et ne sont souvent rien de plus qu'une structure en forme de boîte dont la partie frontale est ouverte pour offrir un accès au travailleur, avec un dispositif d'extraction à l'arrière pour capter l'air pollué. Cette conception oblige le travailleur à se tenir debout devant l'ouverture, ce qui bloque le flux d'air. L'objectif de cette étude expérimentale était de déterminer les paramètres de conception influant sur l'efficacité de ces petites cabines. Tous les essais ont été réalisés avec et sans mannequin sur une cabine autonome construite spécialement. L'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>), utilisé comme gaz traceur, était émis en différents points de l'enceinte. Des échantillons d'air étaient prélevés dans la zone respiratoire du mannequin et la concentration de SF<sub>6</sub> était mesurée. Deux déflecteurs arrière différents et quatre types de collerettes fixées sur le pourtour de l'ouverture étaient testés pour des vitesses frontales de 0,3 à 0,7 ms<sup>-1</sup>. Les résultats montrent que l'ajout d'un déflecteur à l'arrière, ou l'augmentation de la profondeur de la cabine, améliore l'uniformité des vitesses d'air en l'absence de mannequin. La présence d'un mannequin devant la cabine crée une zone de « sillage » fortement turbulente devant lui. Ce « sillage » interagit avec le tourbillon contre le plancher de la cabine. Sur les quatre collerettes testées, une seule, permettant le passage de l'air entre la paroi de la cabine et la collerette, réduisait significativement la concentration de SF<sub>6</sub> dans la zone respiratoire du mannequin. Cette collerette a été considérée comme la conception la mieux adaptée pour les petites cabines partiellement ouvertes.

## SYSTÈMES DE VENTILATION

Une session comprenant cinq communications a été consacrée à la filtration de l'air dans les systèmes de ventilation ou de conditionnement d'air.

Les résultats présentés concernent, en premier lieu, les méthodes pour l'évaluation sur site de l'efficacité de filtration de centrales de traitement d'air, dont la mise en œuvre apparaît comme possible (Ginestet *et al.*), et le vieillissement accéléré de filtres à air sur une installation de test (Liard *et al.*). D'autres résultats ont aussi été exposés sur le comportement des filtres dans des conditions particulières, voire extrêmes: croissance microbienne sur des filtres contaminés par des bactéries ou des spores dans une centrale de traitement d'air à l'arrêt et relargage de microbes lors de son redémarrage (Forthomme *et al.*), cinétique de colmatage de filtres à haute efficacité par des aérosols issus d'un incendie (Ouf *et al.*), le colmatage de filtres par des particules métalliques ultrafines issues de procédés de métallisation et moyens de nettoyage ou de décolmatage les plus adaptés (Grippari *et al.*).

Une session a été consacrée au confinement de polluants dans des bâtiments industriels, avec quatre publications.

Une synthèse des incidents ou des pannes rencontrés sur des systèmes de ventilation de bâtiments abritant des installations nucléaires en France sur une période de 5 ans a été faite par Berne *et al.* Salliou *et al.* ont étudié expérimentalement les débits à travers des orifices carrés ou circulaires pour déterminer leurs coefficients de décharge. L'influence du vent sur les débits de fuite liés à des défauts d'étanchéité de bâtiments industriels dont l'atmosphère intérieure doit être confinée (installations nucléaires) a été examinée par Le Roux *et al.*; cette étude a fait appel à des essais sur maquettes placées en soufflerie. Enfin, une soupape hydraulique innovante permettant, en cas d'incendie dans un bâtiment confiné, l'échappement des gaz chauds vers un local annexe, ainsi que leur refroidissement et le piégeage des aérosols, a été présentée (D. Bois).

■ Les deux communications suivantes ont été sélectionnées pour une parution dans la revue *International Journal of Ventilation*. Un résumé en est présenté ci-dessous.

## Effacité in situ des filtres à particules et à gaz des centrales de traitement d'air dans les bâtiments industriels et non industriels

A. Ginestet, D. Pugnet, A. Tissot, M. Heninot, CETIAT, France

► Les centrales de traitement d'air sont utilisées pour fournir un mélange d'air neuf et recyclé aux bâtiments. Elles utilisent des filtres à particules et à gaz pour la protection des éléments des centrales et pour la fourniture d'air propre aux occupants. Il existe des méthodes normalisées pour la détermination en laboratoire des performances des filtres à particules (EN 779 en Europe et ANSI/ASHRAE 52.2 aux États-Unis) et des filtres à gaz (ANSI/ASHRAE 145.2-2011 aux États-Unis) et le projet de norme internationale ISO/DIS 10121-2. Les résultats des essais permettent de comparer les filtres entre eux, mais ils ne permettent pas de prédire les performances des filtres en utilisation réelle (sur site) car les polluants d'essais utilisés en laboratoire ne sont pas représentatifs des polluants réels. La recommandation EUROVENT 4/10 décrit la mesure de la perte de charge et de l'efficacité de filtration sur site des filtres des centrales de traitement d'air (un filtre ou un ensemble de filtres en fonction de la taille des centrales). Il est possible de vérifier que l'efficacité des filtres est celle qui est attendue et que les filtres sont correctement installés sans fuites ni bipasses. Les résultats des mesures donnent aussi des informations sur la date de remplacement des filtres en fonction de leur perte de charge. La recommandation EUROVENT 4/10 a été utilisée pour le développement du guide ASHRAE 26-2008 et du projet de norme internationale ISO/DIS 29462. Pour les filtres à gaz, il n'existe pas de document décrivant la mesure en utilisation réelle (sur site) de leur efficacité. Cet article présente des exemples de résultats de détermination sur site de l'efficacité de filtres à particules et à gaz (une méthode originale est présentée pour ces derniers). Il montre que les méthodes utilisées sont adaptées à l'inspection de la fonction filtration des centrales de traitement d'air.

### Etude de l'influence du vent sur le confinement des polluants à l'intérieur des locaux industriels

N. Le Roux, X. Faure, C. Inard, S. Soares, L. Ricciardi, IRSN, France

► Les bâtiments industriels, tels que ceux rencontrés dans l'industrie

nucléaire, sont équipés d'un réseau de ventilation dont le rôle principal est de garantir le confinement des polluants au sein de l'installation en situation de fonctionnement normale, dégradée ou accidentelle. Le réseau de ventilation est dimensionné de manière à maintenir les locaux en dépression par rapport à l'environnement extérieur. L'air, pris à l'extérieur, circule ainsi depuis les locaux présentant les risques de contamination les plus faibles vers les locaux à risques de contamination élevés, avant d'être filtré puis rejeté dans l'atmosphère. Le vent induit des champs de pression au niveau des communications extérieures de l'installation qui peuvent modifier les écoulements aérauliques internes, notamment les débits de fuite des locaux. Afin d'étudier les effets combinés du vent et d'une ventilation mécanique, une méthodologie permettant d'établir des expérimentations à échelle réduite pour prédire les écoulements isothermes, en régime permanent ou transitoire, a été développée puis validée numériquement et expérimentalement. L'application de cette méthodologie à deux configurations nucléaires de référence a abouti à la réalisation de campagnes expérimentales, au sein de la soufflerie climatique Jules Verne du CSTB. L'objectif était d'étudier le confinement dans ce type de configurations soumises aux effets du vent. Il a ainsi été montré que les effets du vent, en régime permanent, peuvent entraîner une perte partielle ou totale du confinement des polluants, que le réseau de ventilation soit en fonctionnement ou à l'arrêt. De plus, la turbulence du vent génère des fluctuations importantes des pressions et des débits, pouvant ainsi induire des inversions instantanées des fuites, qui ne sont pas identifiées en régime permanent. A partir de ces résultats expérimentaux, le code à zones SYLVIA, développé par l'IRSN et utilisé notamment pour appuyer les évaluations de sûreté des installations nucléaires, a été validé pour prendre en compte les effets du vent, en régimes permanent et transitoire.

### ATELIER MÉTHODES ET MOYENS POUR LA MESURE DE DÉBITS D'AIR SUR SITE

■ **Animation:** I. Caré (CETIAT, France)

■ **Participants:** C. Welinder (SWEMA, Suède), Ch. Bats (APAVE, France), Caillou (CSTC, Belgique), F. Bonthoux (INRS, France)

La mesure des débits d'air sur site est un paramètre critique pour la réception et le suivi des installations de ventilation.

La méthodologie à mettre en place pour réaliser ces mesures est très différente selon que l'on cherche à réaliser une mesure de débit d'air pour une bouche de petite dimension ou pour un grand diffuseur d'air de type tertiaire ou industriel (qui peut présenter des géométries très variables). Les méthodes relatives aux mesures de débit en conduit sont basées sur des mesures de profils de vitesse. Les méthodes proposées peuvent varier en fonction du nombre de points de mesure et de leur position afin d'optimiser le rapport temps passé/exactitude.

Les pratiques ne sont pas harmonisées et il n'est pas rare de devoir faire face à des désaccords client/fournisseur lors de la réception des installations de ventilation.

L'objectif de cet atelier était de faire le point sur les méthodes de mesure sur site du débit d'air de ventilation, ainsi que les erreurs attendues en fonction des conditions d'installation et de mesure. Des retours d'expérience concrets mettant en évidence les problématiques rencontrées sur site ont été exposés. Plus précisément, les présentations ont fait un panorama des normes applicables (C. Welinder) et des difficultés rencontrées sur le terrain pour les mettre en œuvre (C. Bats). Elles ont aussi porté sur l'impact des méthodes de mesures et des conditions d'essais sur la précision de la détermination du débit d'air, que ce soit en conduit (F. Bonthoux) ou à un terminal de soufflage ou de reprise de l'air (S. Caillou).

## DIFFUSION DE L'AIR ET DES POLLUANTS

Cinq sessions regroupant vingt-et-une communications ont été consacrées à cette thématique, associant simulations numériques de type CFD (Computational Fluid Dynamics) et expérimentations.

Un grand nombre de communications a tout d'abord porté sur la caractérisation, voire l'optimisation, de différents types de diffuseurs d'air, ainsi que sur l'impact de ces derniers sur les écoulements d'air à l'intérieur de locaux ventilés. Ainsi, Prozuments *et al.* ont réa-

lisé une étude expérimentale sur quatre types de diffuseurs (simple, perforé, à buse, à jet hélicoïdal) afin de déterminer le domaine de fonctionnement optimal de chacun d'eux en fonction du débit d'air. Meslem *et al.* ont mené une étude CFD visant à optimiser un système innovant de panneau perforé à orifices lobés. Un système de ventilation muni de 36 jets confluent a fait l'objet d'une étude expérimentale et numérique par Svensson *et al.*, et Koskela *et al.* ont développé un modèle CFD simplifié du jet d'air issu d'un diffuseur à jet hélicoïdal. Le confort thermique obtenu avec des diffuseurs plafonniers couplés avec un plafond ou un plancher rafraîchissant a été étudié par Ruiz *et al.* Enfin, les écoulements internes dans une poutre froide active ont été étudiés par simulation par Freitag *et al.*

Un nombre important de communications a également porté sur la simulation des écoulements d'air et des transferts de polluants associés à l'intérieur de locaux, enceintes ou bâtiments ventilés de taille variable, en particulier de très grand volume: silo tour à fourrage (Bahoul *et al.*), musée (Kurabuchi *et al.*), salle polyvalente (Lestinen *et al.*), station de métro souterraine (Adibi *et al.*), bâtiment de réacteur nucléaire (Mohand-Kaci *et al.*)... La ventilation par déplacement a fait plus spécifiquement l'objet de deux études, l'une sur un modèle réduit (Lin et Lin), l'autre sur un local d'essai de hauteur variable (Mustakallio *et al.*). Une étude CFD et expérimentale s'est par ailleurs intéressée à l'évaluation de méthodes de calcul des âges locaux et aux critères d'efficacité de la ventilation par mélange (Ricciardi *et al.*). Des simulations d'écoulements d'air ont également été réalisées dans des équipements de réseaux de ventilation, tels qu'un caisson de filtration (Mathis *et al.*).

Dans leur très grande majorité, les résultats de simulation présentés ont été obtenus à l'aide de logiciels CFD commerciaux (ANSYS CFX/Fluent...) en utilisant une approche de type RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes). Les modèles de turbulence les plus utilisés sont des modèles du premier ordre à deux équations. Le modèle k- $\epsilon$  standard, cité dans huit communications, s'avère bien adapté pour simuler les écoulements à grande échelle. Le modèle k- $\omega$  SST, cité dans cinq communications, permet quant à lui une meilleure description locale, en particulier en sortie de diffuseur.

L'ensemble de ces simulations a, le plus souvent, fait l'objet d'une validation

expérimentale portant, selon les études, sur des valeurs locales de vitesse, de température, d'âges locaux de l'air, de concentration en traceur gazeux ou particulaire ou encore d'humidité. Dans l'ensemble, un bon accord avec l'expérience est observé, même si quelques auteurs (Mustakallio *et al.*, Freitag *et al.*) suggèrent l'utilisation d'approches plus sophistiquées (LES, SAS, DES...) pour mieux décrire certains types d'écoulement (panache thermique, séparation, recirculation...). Gélain *et al.* montrent, quant à eux, l'importance du schéma numérique de discrétisation du terme d'advection sur la simulation de la dispersion de gaz lourds ou légers dans un local. Enfin, on notera, dans certaines communications, le développement de modèles spécifiques traitant du transport et du dépôt de particules (Mohand-Kaci *et al.*, Sagot *et al.*), de la condensation de vapeur d'eau (Kurabuchi *et al.*) ou de phénomènes physiques propres au cas étudié (modèle de verrière dans une installation de culture hors sol, Katoh *et al.*).

Des travaux expérimentaux ont été présentés (Sattari *et al.*) sur l'analyse par PIV de l'efficacité de ventilation d'un local équipé d'une ventilation pulsée (le débit d'air soufflé variant avec une fréquence de 0,5 Hz) ou sur la comparaison de différents types d'anémomètres pour la mesure des vitesses d'air dans un local (Kandzia *et al.*).

En conclusion, de l'ensemble des travaux présentés, il ressort que la simulation CFD est un outil largement répandu et globalement bien adapté à la prédiction, à l'analyse et à l'optimisation de la diffusion d'air.

■ Les trois communications suivantes ont été sélectionnées pour une parution dans la revue *Journal of Ventilation*.

#### Modèle CFD pour un diffuseur à jet hélicoïdal en modes « chauffage » et « refroidissement »

H. Koskela, H. Maula, FIOH, Finlande

► L'objectif de cette étude est de développer un modèle CFD simplifié, susceptible d'être utilisé dans des simulations d'écoulements d'air à l'intérieur de grands locaux, du jet issu d'un diffuseur hélicoïdal. Ce type de diffuseur crée un écoulement complexe avec une forte induction d'air, ce qui ne facilite pas la simulation. Deux configurations d'écoulement ont été étudiées: un jet hélicoïdal radial pour le refroidissement et un jet hélicoïdal compact descendant

pour le chauffage. Les dimensions du modèle ont été calquées approximativement sur la géométrie du diffuseur. Les conditions limites ont été calculées à partir de la quantité de mouvement et des débits massiques mesurés aux ouvertures du diffuseur. La perte de quantité de mouvement estimée entre le diffuseur et le plan de mesure le plus proche a été ajoutée à la quantité de mouvement à l'entrée. Le modèle a été validé dans des conditions isothermes pour les deux modes et dans des conditions non isothermes pour le mode « chauffage », à partir de mesures des distributions de vitesse à différentes distances du diffuseur. Il a été mis en évidence que le modèle permettait de prédire de manière satisfaisante les écoulements et les vitesses dans les deux modes. Deux modèles de turbulence ont été utilisés lors des simulations: k- $\epsilon$  et SST. Les différences entre les résultats des deux modèles sont faibles.

#### Etude de l'environnement intérieur du bâtiment principal du Musée national d'art occidental en vue d'élaborer un plan de réhabilitation

T. Kurabuchi, T. Ogasawara, H. Ochiai, S. Lee, Université de Tokyo, Japon

► Le Musée national d'art occidental est le seul ouvrage de Le Corbusier au Japon, et sa construction date de 50 ans. Il est apparu urgent, pour la préservation de ce lieu culturel, de procéder à une réhabilitation complète en maintenant la fonction de musée d'art et en restaurant la conception originale de Le Corbusier. Cette étude a tout d'abord consisté à déterminer les caractéristiques actuelles des écoulements d'air, par des mesures des débits d'air du système de conditionnement d'air, des pressions internes et de la distribution des âges de l'air. Ces mesures montrent qu'il existe des infiltrations d'air dans le bâtiment, le débit d'air extrait étant supérieur au débit d'air neuf. Par ailleurs, l'âge de l'air est plus élevé dans l'espace d'exposition que dans le hall d'entrée, et plus faible dans le restaurant. Enfin, les vitesses d'air le long des parois varient fortement selon les lieux, les vitesses maximales étant de l'ordre de 0,7 m/s.

Des parois de verre, qui n'existaient pas dans la conception d'origine de Le Corbusier, ont été installées pour séparer l'espace d'exposition du hall d'entrée, afin d'éviter d'éventuelles perturbations par des sources extérieures. Une étude prédictive par CFD de l'environnement aérodynamique dans les conditions de la conception d'origine a été réalisée, en

faisant varier les zones de conditionnement d'air. Cette étude montre que, si la conception d'origine était restaurée avec le zonage actuel de l'air conditionné, il y aurait un risque accru de condensation sur une surface vitrée du hall d'entrée. Il a cependant été mis en évidence que ce risque de condensation serait significativement réduit par une subdivision du zonage de l'air conditionné et une modification du réglage dans chacune des zones ainsi définies.

### Etude par PIV de la qualité de la ventilation dans certaines zones occupées d'un modèle de pièce 2D, en présence de débits d'air variables rapidement

A. Sattari, M. Sandberg, University of Gävle, Suède

► Le mode de distribution d'air le plus courant est celui de la ventilation par mélange, résultant d'un apport d'air permanent via un système de ventilation mécanique. Ce type de ventilation peut créer des problèmes de courants d'air ou de stagnation de l'air dans certaines zones occupées, ce qui a des répercussions sur l'efficacité de la ventilation. Compte tenu de ces inconvénients, il importe de développer de nouveaux systèmes de distribution d'air. L'étude présentée ici s'inscrit dans le cadre d'une série de projets pour l'amélioration de la qualité de la ventilation par l'introduction de variations de débits. De précédentes études (Sandberg & Elvsen, 2004; Wigö & Knez, 2005; Sattari *et al.*, 2011) ont montré que des variations rapides du débit d'air permettent de réduire la stagnation et d'augmenter l'efficacité de la ventilation. Cette technique innovante de distribution d'air est abordée par l'analyse des champs de vecteurs vitesse établis par PIV (Particle Image Velocimetry) sur certaines zones mortes d'un modèle réduit de pièce bidimensionnelle. Les dimensions du modèle sont de 30x20x1.0 cm et le fluide utilisé est de l'eauensemencée en particules de traceur, et circulant en circuit fermé. Un dispositif mécanique permettant de faire varier le débit produit des pulsations dans le débit introduit. Le cas de référence, sans pulsation, correspond à un écoulement stationnaire; avec l'introduction de variations de débit de soufflage, l'écoulement devient instationnaire avec production de tourbillons, ce qui améliore le mélange. Ce phénomène est étudié au niveau de certaines zones mortes, pour le cas de référence et pour le cas avec variations rapides du débit à fréquence fixe. Une comparaison entre les deux cas est menée à partir des schémas d'écoulement observés, en faisant

appel aux profils de vitesse, aux lignes de courant et à l'analyse statistique des champs de vecteurs obtenus (intensité de la turbulence, etc.).

## EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS ET DES PROCÉDÉS

Plusieurs communications ont concerné la récupération d'énergie sur l'air extrait des bâtiments pour préchauffer/rafraîchir l'air neuf de ventilation. Cette technique permet une réduction significative de la consommation énergétique des bâtiments.

Ainsi, le fonctionnement d'un système de ventilation double flux à récupération de chaleur faisant appel à deux échangeurs de chaleur air-eau à tubes et ailettes revêtues d'un matériau adsorbant a été étudié par Park *et al.* Huber *et al.* ont montré comment piloter un système de ventilation double flux en façade à partir des capteurs de température, d'humidité, de concentrations en COV et en CO<sub>2</sub>. Enfin, une évaluation de l'efficacité énergétique d'un récupérateur air/air dans une centrale de traitement d'air dans un atelier de plasturgie a été présentée par Rapp, montrant une économie d'énergie de 350 kWh/jour.

Oura *et al.* ont présenté les performances d'une fenêtre à isolation dynamique.

Rodhin *et al.* ont évalué le potentiel d'amélioration de l'efficacité énergétique de chaînes et d'atelier de peinture dans l'industrie automobile, en particulier par la réduction des débits d'air mis en œuvre.

Enfin, Hoffmann *et al.* ont étudié un système de refroidissement de racks dans des centres de calcul.

### Etude expérimentale de l'efficacité des systèmes de refroidissement intégrés aux racks des centres de calcul

M. Hoffmann, R. Streblow, D. Muller, Université de Aachen, Allemagne

► Avec l'augmentation de la puissance de calcul dans les racks de serveurs informatiques, il est de plus en plus souvent nécessaire de recourir au refroidissement intégré (refroidissement direct des racks). Cela signifie qu'un dispositif de refroidissement par rack, ou pour deux racks, commande le débit d'air et

la puissance frigorifique uniquement au niveau de ce ou ces racks. Ce mode de refroidissement offre la possibilité de mettre en œuvre des densités de traitement élevées et de régler la température avec précision, compte tenu du faible volume ciblé. La consommation d'énergie pour le refroidissement représentant parfois jusqu'à 50% de la consommation totale d'énergie d'un centre de calcul, l'efficacité du refroidissement joue un rôle majeur dans l'efficacité énergétique d'un centre de calcul. La façon la plus simple d'économiser l'énergie est l'application de niveaux de températures et de débits d'air optimisés. Des tests ont donc été réalisés pour étudier l'influence de différents réglages de température sur l'efficacité du refroidissement et la performance d'ensemble de deux systèmes de refroidissement à eau glacée. On a fait varier la température de l'air traité et de l'eau glacée alimentant les unités de refroidissement pour étudier si elles assuraient le refroidissement requis même à haute température. On a également fait varier l'emplacement de la production de chaleur en cas de charge partielle, et la charge thermique globale. Les résultats montrent que l'efficacité du refroidissement augmente dans l'ensemble lorsque la température de l'eau est augmentée, mais d'autres facteurs interviennent. La température de l'air dépasse significativement le niveau fixé dans certaines configurations de charge partielle. Selon la stratégie de mesure mise en œuvre, la variation de position de la charge thermique influe en outre sur le profil de température sur la hauteur du rack, ainsi que sur la performance globale du dispositif.

## QUALITÉ DE L'AIR INTÉRIEUR

Pour la première fois, la conférence « Ventilation » s'est élargie à la thématique de la ventilation et de la qualité de l'air dans les bâtiments résidentiels et tertiaires. La première conférence invitée et quatre sessions ont été consacrées à ce sujet.

La première session, dédiée aux immeubles de bureaux, a été l'occasion de présenter le projet européen OFFICAIR (<http://www.officair-project.eu/>) et, plus particulièrement, la revue bibliographique réalisée dans ce cadre

sur la ventilation dans les bâtiments à usage de bureaux. D'une part, le recensement des normes et des réglementations dans les différents pays européens a été présenté. Il montre une grande hétérogénéité des valeurs de référence. Ainsi, les débits de ventilation minimaux (apport d'air « neuf », pris à l'extérieur du bâtiment) vont de 5,6 à 11 l/s/personne dans la plupart des pays européens, sauf en République tchèque et Slovaquie (14 l/s/personne). Ces débits sont nettement inférieurs à la valeur de 25 l/s/personne, recommandée afin de réduire la prévalence du syndrome des bâtiments malsains. D'autre part, l'inventaire des résultats de mesure des débits de ventilation dans les immeubles de bureaux européens atteste de données lacunaires et disparates. Globalement les valeurs existantes respectent les réglementations nationales, mais sont inférieures à la valeur de 25 l/s/personne. Fin 2013, le projet OFFICAIR fournira des données sur la ventilation et la qualité de l'air intérieur dans les immeubles de bureaux neufs ou rénovés dans huit pays européens. Cette session a aussi été l'occasion de présenter la campagne nationale de l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI) qui démarre en 2013 dans 300 bâtiments de bureaux tirés au sort dans la France entière (<http://www.oqai.fr>).

Lors de la session consacrée aux écoles et aux crèches, les résultats de la campagne de mesure réalisée de septembre 2009 à juin 2011 dans 310 écoles et crèches de toute la France, y compris les départements d'outre-mer, ont été présentés. Cette campagne a été conduite en préparation de la surveillance obligatoire de la qualité de l'air intérieur dans certains bâtiments recevant du public, en vigueur depuis juillet 2012. Le résumé de cette campagne est donné ci-dessous. Le constat d'un mauvais renouvellement d'air dans les écoles et crèches est commun à la plupart des pays européens. Des travaux réalisés au Portugal ont été présentés lors de la conférence et convergent avec les résultats français.

Enfin, la conférence a été l'occasion de présenter les tout premiers résultats du projet européen HealthVent ([www.healthvent.eu](http://www.healthvent.eu)). L'un des objectifs de ce projet est d'élaborer des lignes directrices pour une ventilation des bâtiments (immeubles de bureaux, écoles, crèches et logements) satisfaisante pour prévenir l'apparition d'effets sur la santé associés à une mauvaise qualité de l'air intérieur. Deux exposés ont été présentés relatifs à la ventilation dans les logements. Tout

d'abord, une approche originale a été élaborée pour calculer le taux de ventilation « optimal » considérant l'exposition des occupants aux polluants émis par des sources intérieures, d'une part, et en provenance de l'extérieur, d'autre part. L'objectif est d'identifier la meilleure stratégie de ventilation garantissant l'évacuation des polluants de l'air intérieur sans pour autant faire pénétrer « trop » de pollution extérieure. Cet optimum est calculé à partir de l'évaluation des impacts sur la santé pour quatre scénarios différents de ventilation, incluant deux configurations de filtration de l'air entrant. Ces impacts sont calculés à l'échelle de la population de chaque pays européen à partir de la méthode communément utilisée des DALY (disability-adjusted life years ou « années de vie ajustées sur l'incapacité », à savoir les années de vie perdues en raison d'une mortalité prématurée et les années de vie productives perdues en raison d'incapacités).

Un autre volet du projet HealthVent a consisté à modéliser les taux de ventilation dans les logements des pays européens. Le résumé de ce travail est également présenté ci-dessous.

Les résultats finaux du projet HealthVent sont attendus pour mi-2013.

■ Communications sélectionnées pour une publication dans *International Journal of Ventilation*.

### Niveaux de confinement et taux de renouvellement de l'air dans des écoles et crèches françaises

O. Ramalho, C. Mandin, J. Ribéron, G. Wiyart, CSTB, France

► Une campagne pilote a été réalisée de septembre 2009 à juin 2011 dans 310 écoles et crèches réparties dans l'ensemble des régions de France (y compris les départements d'outre-mer). Cette campagne expérimentale a été conduite dans le cadre de la préparation de la surveillance obligatoire de la qualité de l'air intérieur dans certains bâtiments recevant du public. Plusieurs paramètres ont été mesurés dans 900 salles de classe ou d'activités: le benzène, le formaldéhyde et le dioxyde de carbone. Ce dernier a permis la détermination des niveaux de confinement de l'air en présence des enfants ainsi que des taux de renouvellement de l'air nocturnes caractéristiques des débits d'infiltration d'air. Les niveaux de confinement de l'air ont été notés de 0 (confinement nul) à 5 (confinement extrême) selon la fréquence et l'intensité des occurrences de

concentration de CO<sub>2</sub>. En outre, un diagnostic simple de chaque bâtiment décrivant le bâtiment, ses équipements, les comportements d'usages et l'environnement extérieur a été réalisé. Les résultats montrent des niveaux de confinement de l'air très variés d'une pièce à l'autre: confinement faible voire nul dans 30% des salles, moyen ou élevé (48%) et très élevé voire extrême (21%). Les crèches sont globalement moins confinées que les écoles, ce qui peut s'expliquer par des conditions de ventilation plus favorables et des densités d'occupation plus faibles. A l'opposé, les écoles élémentaires sont globalement plus confinées que les autres établissements. Les taux de renouvellement d'air nocturnes dans les écoles et crèches ont été calculés à partir des décroissances des niveaux de CO<sub>2</sub> enregistrés dans les salles de classe et d'activité par une méthode de calcul automatisée. Les valeurs obtenues sont faibles, avec une valeur médiane de 0,2 vol/h. Un système de ventilation est présent dans 63% des crèches, mais dans 17% seulement des écoles maternelles ou élémentaires. Les systèmes de ventilation les plus fréquents sont des systèmes mécaniques en simple ou double flux sans balayage avec bouches d'extraction ou de soufflage directement dans les salles.

### Proportion de logements en Europe ayant des taux de ventilation inférieurs à la limite générale européenne

A. Asikainen, O. Hänninen, N. Brelih, W. Bischof, T. Hartmann, P. Carrer, P. Wargocki, NIHW, Finlande

► Le taux de ventilation des bâtiments est réglementé dans la plupart des pays européens, afin d'assurer un renouvellement d'air tel que l'air intérieur soit suffisamment propre pour les personnes séjournant dans les bâtiments. Afin d'estimer les bénéfices sanitaires d'une régulation de la ventilation, il faudrait disposer d'informations sur les taux réels de renouvellement d'air. Or on dispose de peu de données à l'échelle des populations sur les taux de ventilation mesurés dans les pays européens. Pour combler cette lacune, nous avons élaboré un modèle bayésien permettant de combiner les informations provenant des données météorologiques existantes, des législations nationales et des codes de la construction, tout en tenant compte des tendances climatiques, pour estimer les distributions de probabilités des taux de renouvellement d'air dans 26 pays européens. Nous avons également analysé les distributions obtenues par rapport

aux statistiques nationales sur les bâtiments, pour produire des informations sur le nombre de bâtiments dont les taux de ventilation sont inférieurs au niveau communément exigé de 0,5 renouvellement par heure. Selon les résultats, le taux de renouvellement d'air moyen dans les logements en Europe varie entre 0,61 en Europe du Nord et 1,01 en Europe du Sud, avec des écarts types de 0,46 et 0,76 respectivement; la moyenne des 26 pays européens, pondérée en fonction de la population des pays, s'établit à 0,74/h. Nous avons admis que la distribution était log-normale au niveau national, et une analyse plus poussée des distributions a montré qu'en moyenne, 39 % des logements dans ces 26 pays avaient des taux de renouvellement d'air inférieurs à 0,5/h, ce qui correspond au total à près de 52 millions de logements, soit un nombre de personnes de près de 187 millions. Le pourcentage de logements ayant un taux de renouvellement inférieur à 0,5/h est très variable selon les pays, puisqu'il s'établit à 23 % à Chypre et en Grèce et à 51 % en Irlande.

## SUJETS ÉMERGEANTS : NANOPARTICULES, CONTAMINATION AÉROPORTÉE EN MILIEU HOSPITALIER

Cette session, en particulier dédiée aux sujets émergents, a permis de regrouper deux thématiques actuellement récurrentes dans différents congrès et séminaires internationaux: la dispersion des polluants particuliers dans les milieux hospitaliers et la prévention des risques sanitaires liés à l'émission industrielle de nanoparticules. Ainsi, concernant l'action de la ventilation sur la distribution des concentrations particulières dans des zones hospitalières de type chambre, une conférence invitée dédiée et cinq communications ont été présentées; par ailleurs, six communications ont permis de rendre compte des préoccupations scientifiques liées à la présence des nanoparticules dans les systèmes ventilés. La conférence invitée, présentée par G. Kasper (KIT, Allemagne), a d'ailleurs permis d'introduire cette dernière thématique en début de session.

Dans un souci de réduction du risque

d'infection croisée par voie aérienne, les différentes communications dédiées à l'étude des transferts en milieu hospitalier se sont attachés à caractériser d'abord, numériquement et/ou expérimentalement, les distributions spatio-temporelles des concentrations particulières émises notamment par le patient et leur évolution dynamique selon les dispositifs de ventilation mis en place. Ainsi, K.C. Mendonça *et al.* ont présenté un modèle de calcul, basé sur une approche zonale, pour prédire les dispersions hétérogènes des concentrations en particules au sein d'une chambre d'hôpital. Une étude expérimentale réalisée par A. A. Aliabadi *et al.* a décrit en outre les performances de la ventilation d'une chambre d'hôpital dans différentes configurations, en vue de réduire l'exposition des soignants et visiteurs aux particules émises par le patient.

Présentée en poster, une étude mixte, expérimentale et numérique, a permis de caractériser l'efficacité de ventilation par déplacement d'air d'une chambre d'hôpital à quatre lits (T. Yamanaka *et al.*). Par ailleurs, des auteurs se sont intéressés à l'efficacité du confinement des chambres par différents dispositifs d'isolement, telle cette étude expérimentale des effets de différents facteurs influant sur les fuites d'air au travers des portes de chambres. Le facteur prépondérant obtenu est l'écoulement d'air induit par le mouvement d'ouverture d'une porte battante, plus que par le passage d'une personne (P. Kallomaki *et al.*). L'étude expérimentale menée par J.W Tang *et al.* sur cette même préoccupation confirme un meilleur maintien de confinement assuré par une porte simple coulissante en regard des trois autres types de portes testées, notamment les portes battantes.

Les six communications consacrées à la description du comportement aérodynamique des nanoparticules en milieu ventilé concernent des études à la fois numériques et expérimentales dédiées à la description des phénomènes de dispersion et de dépôt des particules au sein d'un écoulement d'air. Ainsi, R. Guichard *et al.* ont présenté des travaux d'intégration, au sein d'un code de mécanique des fluides numérique, d'un modèle permettant l'évaluation et la caractérisation de l'exposition professionnelle à des aérosols nanostructurés, en prenant en compte, en particulier, leur propriété de coagulation lors de leur transport depuis la source d'émission. Quant à A. Mehel *et al.*, ils se sont attachés à évaluer numériquement l'influence de la turbulence des écoule-

ments d'air par rapport au mécanisme de dépôt électrochimique. L'étude du transport des nanoparticules, comparé à celui d'un gaz passif au travers d'une barrière de confinement dynamique d'une enceinte ventilée, montre l'absence d'un comportement spécifique des nanoparticules dans les conditions opératoires testées, ce qui constitue un résultat intéressant pour le suivi des performances de confinement de ce type d'enceintes, très souvent mises en œuvre en laboratoire.

Le thème de la filtration des nanoparticules est également évoqué par A. Mayer dans son exposé décrivant les risques de concentrations élevées en nanoparticules au sein d'habitacles de véhicules, lesquelles peuvent être considérablement abaissées par différents systèmes de filtration adaptés. S. Bourrous *et al.* ont présenté une étude purement expérimentale du colmatage des filtres plissés par des agrégats nanoparticulaires représentatifs d'un aérosol de combustion. Ils explorent notamment l'évolution de la perte de charge des filtres lors des étapes de filtration en surface et en profondeur au sein du média filtrant. L'étape de traitement des déchets initialement nanostructurés par un procédé d'incinération a été abordé par S. Derroug.

■ Communications sélectionnées pour une publication dans *International Journal of ventilation*.

**Modélisation de la coagulation des nanoparticules et de leur transport en conduite**  
R. Guichard, A. Tanière, E. Belut, N. Rimbart, INRS, France

► L'intérêt croissant porté aux nanoparticules par l'industrie entraîne des inquiétudes du point de vue de l'hygiène industrielle, notamment si l'on considère le cas d'un aérosol nano-structuré émis par un procédé et présentant un risque sanitaire par inhalation. Il est établi qu'entre la source de nanoparticules et leur dépôt ou inhalation, le phénomène de coagulation contribue à faire évoluer rapidement la granulométrie de l'aérosol. Dans ce contexte, la modélisation de la coagulation constituerait donc un outil précieux pour l'évaluation et la caractérisation des expositions professionnelles. Un modèle sans écoulement, basé sur l'approche du bilan de population avec prise en compte de la dimension fractale des agrégats, a déjà été validé sur des résultats expérimentaux en enceinte homogène fermée. Ici nous décrivons l'intégration de ce bilan de population dans les équations de transport d'un

code de mécanique des fluides numérique afin d'obtenir l'évolution spatio-temporelle d'un aérosol de nanoparticules. Le principe consiste à ajouter un terme source pour la coagulation dans les équations de convection-diffusion des moments de la distribution granulométrique. Pour l'évaluer, nous proposons dans un premier temps de suivre le transport des propriétés globales de l'aérosol en conduite pour un écoulement uniforme à vitesse constante. Cette configuration d'écoulement à une dimension permet d'obtenir des solutions analytiques utiles pour valider l'implémentation du modèle. Les prochaines étapes dans la modélisation de la dynamique d'un nuage de nanoparticules consisteront à étendre les simulations à des cas tridimensionnels qui pourront être appliqués à des situations réelles.

### Les différents modes d'ouverture des portes comme facteurs contribuant aux ruptures de confinement dans les chambres d'isolement à l'hôpital

*J.W. Tang, C.A. Klettner, A.D. Nicolle, J. Pantelic, R.K. Su, H. Koskela, P. Mustakallio, P. Kalliomäki, D.K.W. Cheong, C. Sekhar, K.W.Tham, FIOH, Finlande*

► Divers types de portes sont utilisés dans l'aménagement des chambres d'isolement destinées à recevoir des patients infectieux ou immunodéprimés. Cette variabilité de conception peut être due à l'espace disponible et/ou à des questions de coût. En utilisant un colorant alimentaire, nous avons étudié visuellement les effets qualitatifs des modes d'ouverture des portes sur la dissémination d'air potentiellement contaminé vers et depuis une chambre d'isolement individuelle; pour cela, nous avons utilisé des modèles réduits hydrauliques simplifiés, en similitude de Reynolds, avec prise de vues par caméra multi-angle et mouvements d'ouverture de porte et de passage des personnes programmables. Ces maquettes hydrauliques ont été conçues avec soin, pour qu'il soit possible d'extrapoler les résultats aux conditions réelles. Quatre types de portes ont été testés: portes coulissantes simple et double, portes battantes simple et double, en combinaison avec une personne entrant dans la pièce ou en sortant. Les images vidéo ont été éditées, synchronisées et présentées dans des séries d'écrans divisés. Il ressort de cette expérience que les portes battantes doubles sont celles qui présentent le plus grand risque de fuite vers ou depuis la chambre, suivies, par niveau de risque décroissant,

des portes battantes simples, des portes coulissantes doubles et des portes coulissantes simples. L'effet relatif des déplacements humains sur la propagation d'une contamination potentielle était maximal avec les portes coulissantes, car le flux d'air total induit était important par rapport à celui résultant de la seule ouverture de porte. Cependant, dans le cas des portes battantes, les flux d'air induits par l'ouverture étaient nettement plus importants. D'autres expériences avec simulation d'une ventilation sont nécessaires, mais au vu des résultats obtenus, il apparaît déjà que les portes coulissantes sont beaucoup plus efficaces pour l'aménagement des chambres d'isolement à l'hôpital.

## CONCLUSION

Bien que le captage localisé soit une solution assez universelle pour résoudre les problèmes d'exposition aux substances dangereuses, des difficultés de mise en œuvre sur le terrain ont été relayées par les participants indépendamment des réglementations en vigueur dans les différents pays. Les pistes d'amélioration concernent la mise en place de normes pour l'étiquetage des machines en fonction de leur émission de substances dangereuses ou de normes visant à harmoniser les pratiques des interlocuteurs tout au long du cycle de vie des installations de ventilation (spécification des besoins, conception, réception, maintenance...).

Par ailleurs, la mesure des débits d'air sur site est un paramètre critique pour la réception et le suivi des installations de ventilation. Un atelier, consacré à cette question a permis de faire un état des lieux des normes applicables, des difficultés rencontrées sur le terrain pour les mettre en œuvre et de l'impact des méthodes de mesures et des conditions d'essais sur la précision de la mesure.

Les sujets relatifs à la filtration ont concerné l'évaluation sur site de l'efficacité de filtration de centrales de traitement d'air et le comportement de filtres dans des conditions particulières: croissance de microorganismes sur des filtres contaminés, cinétique de colmatage de filtres à haute efficacité par des aérosols issus d'un incendie et colmatage de filtres par des particules métalliques ultrafines issues de procédés de métallisation.

Une session a été consacrée au confinement de polluants dans des bâtiments industriels, abritant des installations nucléaires en France.

Dans le domaine de la maîtrise de la diffusion d'air et de polluants, l'outil de simulation numérique (CFD) couplé à une validation expérimentale se généralise tant pour le diagnostic que pour l'optimisation de configurations aussi diverses qu'un silo tour à fourrage, une serre pour de la culture hors sol, un musée, une salle polyvalente, une station de métro souterraine, un bâtiment de réacteur nucléaire ou différentes unités terminales de diffusion d'air.

Plusieurs communications ont concerné la récupération d'énergie sur l'air extrait des bâtiments pour préchauffer/rafraîchir l'air neuf de ventilation: présentation de systèmes innovants ou évaluation sur site de systèmes éprouvés. Une réduction significative des besoins énergétiques des bâtiments a été généralement constatée.

Une session a été consacrée aux méthodes de prévention collectives applicables aux procédés mettant en œuvre des nanoparticules: transport d'un aérosol nanométrique de la source jusqu'aux voies respiratoires d'un salarié, évaluation des propriétés de confinement de différentes enceintes ventilées, filtration de nanoparticules au sein d'habitacles, colmatage des filtres par des agrégats nanoparticulaires représentatifs d'un aérosol de combustion... Les perspectives concernent notamment la prise en compte de la morphologie de l'aérosol dans l'évaluation des systèmes.

Sur le volet des bâtiments résidentiels et tertiaires, la conférence a montré la diversité des problématiques selon les lieux de vie (bureaux, logements, écoles, crèches). Elle a confirmé la nécessité d'obtenir davantage de données sur la ventilation dans les immeubles de bureaux, mais aussi le besoin d'outils et de capteurs, afin de permettre le suivi et la maintenance des systèmes mécaniques en place et de répondre aux attentes des occupants en matière de santé et de confort.

Le prochain congrès ventilation aura lieu à Shanghai en 2015.

Les communications sont disponibles sur le site: <http://www.inrs-ventilation2012.fr/fr/content/programme>