

Utilisation des codes de calcul de ventilation prévisionnelle

Exemples et limites actuelles

Gérard AUBERTIN
INRS*, service Thermique, Ventilation

La conception des systèmes de ventilation industrielle est souvent rendue difficile de par la complexité et la variété des typologies d'écoulement rencontrées et de par le peu de données disponibles bien validées. Les codes de calcul généraux de mécanique des fluides peuvent, à terme, constituer des outils d'aide potentiellement intéressants pour les bureaux d'études. Le présent article a pour but d'illustrer sur quelques cas simples les possibilités de ces outils, mais également d'en préciser les limites d'utilisation. Les exemples présentés ont été traités à l'aide du code de calcul de ventilation prévisionnelle EOL développé par l'INRS à l'intention de ses partenaires des caisses régionales d'assurance maladie chargés de la prévention des maladies professionnelles. Le code est spécialement dédié à l'étude des problèmes de ventilation industrielle. Une extension éventuelle de ses modalités de diffusion est à l'étude.

Les modèles numériques sont basés sur la résolution des équations hydrodynamiques de transport pour la masse, la quantité de mouvement, la température, la concentration en polluants, etc. A cause de la turbulence, seules les valeurs moyennes de ces variables peuvent être considérées. Les effets dus à la turbulence sont incorporés en utilisant une viscosité turbulente. Cette dernière est habituellement calculée à partir d'un modèle k-ε. Divers autres modèles de turbulence existent. A titre d'exemple, citons une extension du modèle k-ε permettant de traiter les effets apparaissant à bas nombre de Reynolds. Cette extension est particulièrement intéressante pour les écoulements de ventilation qui contiennent souvent des zones à basses vitesses où les phénomènes visqueux sont non négligeables.

Les équations aux dérivées partielles du modèle physique sont transformées en équations algébriques non linéaires par la méthode des volumes finis ou des éléments finis. Une majorité de logiciels de mécanique des fluides utilise aujourd'hui les volumes finis.

Les équations sont alors résolues par linéarisations successives. Pour un maillage contenant N³ nœuds, le nombre d'équations à résoudre est de l'ordre de 10 N³. Plusieurs milliers de linéarisations sont généralement

nécessaires pour atteindre la convergence. Pour les écoulements tridimensionnels, la puissance de calcul requise dépasse les possibilités des ordinateurs personnels actuels.

Utilisation des codes de calcul Données à fournir et résultats attendus

Le modèle physique et les algorithmes de calcul constituent le cœur des codes de calcul de ventilation prévisionnelle. Pour l'utilisateur, le fonctionnement de la partie calcul est relativement transparent. Les données que l'utilisateur doit introduire en entrée et les principales informations qu'il peut espérer obtenir en sortie sont présentées ci-après.

Données en entrée

- Il s'agit des données suivantes :
- géométrie du local à traiter : bien que certains codes soient interfacés avec des logiciels de DAO, en pratique seuls des locaux à géométrie relativement simple sont traités (coordonnées cartésiennes, polaires, curvilignes). Le maillage est généralement généré automatiquement ;
 - conditions aux limites : vitesse dans les ouvertures ou à défaut pression, température ou densité de flux thermique, débit massique des sources de polluant ;
 - conditions initiales : elles sont généralement prises par défaut mais peuvent être imposées (concentration initiale en polluant, par exemple).

Données en sortie

Elles sont essentiellement présentées sous forme graphique. Ce sont :

- champ des vitesses en tout point du maillage généré dans le local. Des coupes réalisées dans le local facilitent la compréhension de l'écoulement.
 - champ de concentration en polluants : des courbes ou surfaces isoconcentration permettent la localisation des zones bien ventilées et des zones de fluide mort ;
 - champ des températures : mise en évidence de la stratification thermique dans les locaux ;
 - efficacité de la ventilation (EOL) : en simulant l'émission d'un traceur, soit dans les dispositifs d'introduction d'air neuf, soit aux points d'émission des polluants et en introduisant le concept d'âge des particules fluides depuis leur émission, on calcule les âges locaux au moyen de ces particules.
- A partir de ces âges, on peut définir et calculer plusieurs grandeurs caractéristiques de la ventilation d'un local :
- l'efficacité du captage d'un système d'aspiration localisé ;
 - l'efficacité de la distribution d'air neuf. L'efficacité augmente lorsque le temps mis par l'air neuf pour atteindre un point particulier ou se distribuer globalement dans le local diminue ;
 - l'efficacité relative à l'élimination des polluants par la ventilation générale. Cette efficacité augmente lorsque la concentration locale ou moyenne dans le local diminue.

Les deux dernières grandeurs donnent globalement une idée sur le type d'écoulement considéré (piston, déplacement, mélange, court-circuit). Les grandeurs de base telles que la concentration ou la température restent cependant la référence sur le plan de l'hygiène ou du confort.

Exemples

Dans le but d'illustrer l'apport potentiel des techniques numériques pour le concepteur, nous présenterons trois exemples concernant tous des locaux du tertiaire. Les deux premiers cas seront étudiés dans l'approximation bidimensionnelle, le dernier cas correspond à un écoulement tridimensionnel. Des applications relatives à la ventilation des locaux industriels et en particulier concernant les systèmes de captage localisés ont été considérées dans [1], [3].

Ventilation d'un bureau [3]

Cet exemple illustrera l'intérêt de calculer les âges internes. Il s'agit de la ventilation d'un bureau ; le local est présenté à la figure 1. La configuration est supposée être bidimensionnelle. L'entrée et la sortie d'air sont placées sur le mur de gauche. Un bureau se trouve près du mur opposé. Un ventilateur soufflant vers le plafond est placé sur le mur de droite. Deux cas sont considérés dans l'approximation isotherme : le ventilateur fonctionne (cas 1) ou il est à l'arrêt (cas 2).

L'âge interne de l'air en un point P du local représente le temps moyen écoulé depuis l'instant où l'air entre dans la pièce jusqu'au moment où il arrive en P.

* Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles.

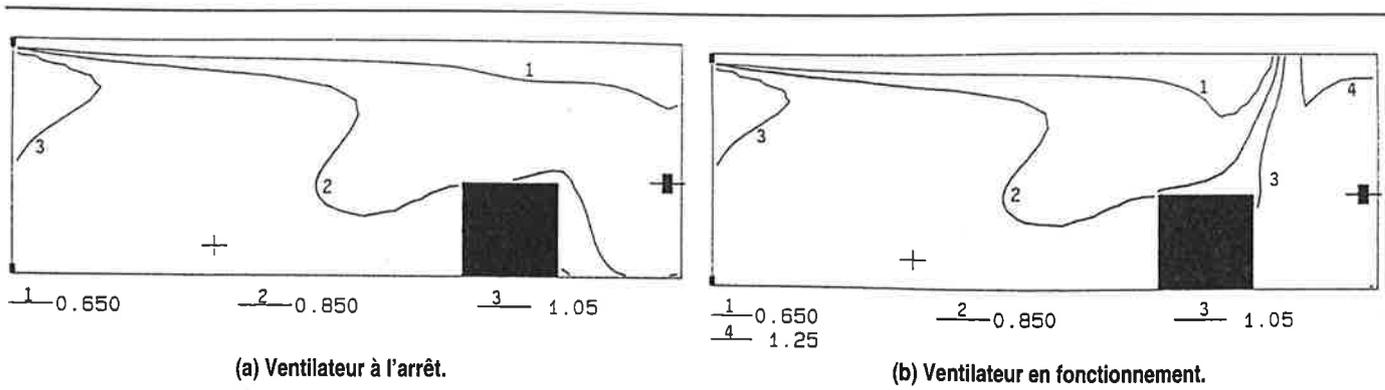


Fig. 2. Âges internes calculés dans un bureau (EOL 2D). Tous les temps sont normalisés par le temps nominal

Les cartes d'âges internes calculées avec EOL 2D sont représentées à la figure 2. Une comparaison des deux cartes révèle que, dans la zone occupée (zone à droite du bureau), les âges de l'air sont à peu près 40 % plus élevés lorsque le ventilateur fonctionne (cas 1). En fait, le ventilateur produit un tourbillon de recirculation qui empêche l'air neuf d'atteindre la zone occupée (fig. 3).

Transition dans l'écoulement non isotherme associée à un local chauffé par le sol [4]

Dans cet exemple, nous considérons un écoulement dans une pièce rectangulaire bidimensionnelle de dimensions $L \times H = 9 \text{ m}^2$ (fig. 4). De l'air à $20 \text{ }^\circ\text{C}$ est introduit sur le côté gauche de la pièce avec un profil de vitesse uniforme $U_0 = 0,455 \text{ m/s}$. L'entrée, de hauteur $h = 0,168 \text{ m}$, est localisée juste sous le plafond. La sortie d'air se trouve sur le mur droit de la pièce juste au-dessus du sol (hauteur de la sortie $h' = 0,42 \text{ m}$).

Un flux de chaleur uniforme à travers le sol réchauffe l'air de la pièce. Les effets de convection thermique sont caractérisés par le nombre d'Archimède Ar défini par :

$$Ar = \frac{\beta g h \Delta T_0}{U_0^2}$$

où β , g et ΔT_0 sont respectivement le coefficient de dilatation, l'accélération gravifique et la différence de température entre l'air entrant et l'air sortant. Ce cas a été simulé à l'aide du logiciel EOL 2D avec un modèle de turbulence k-ε standard.

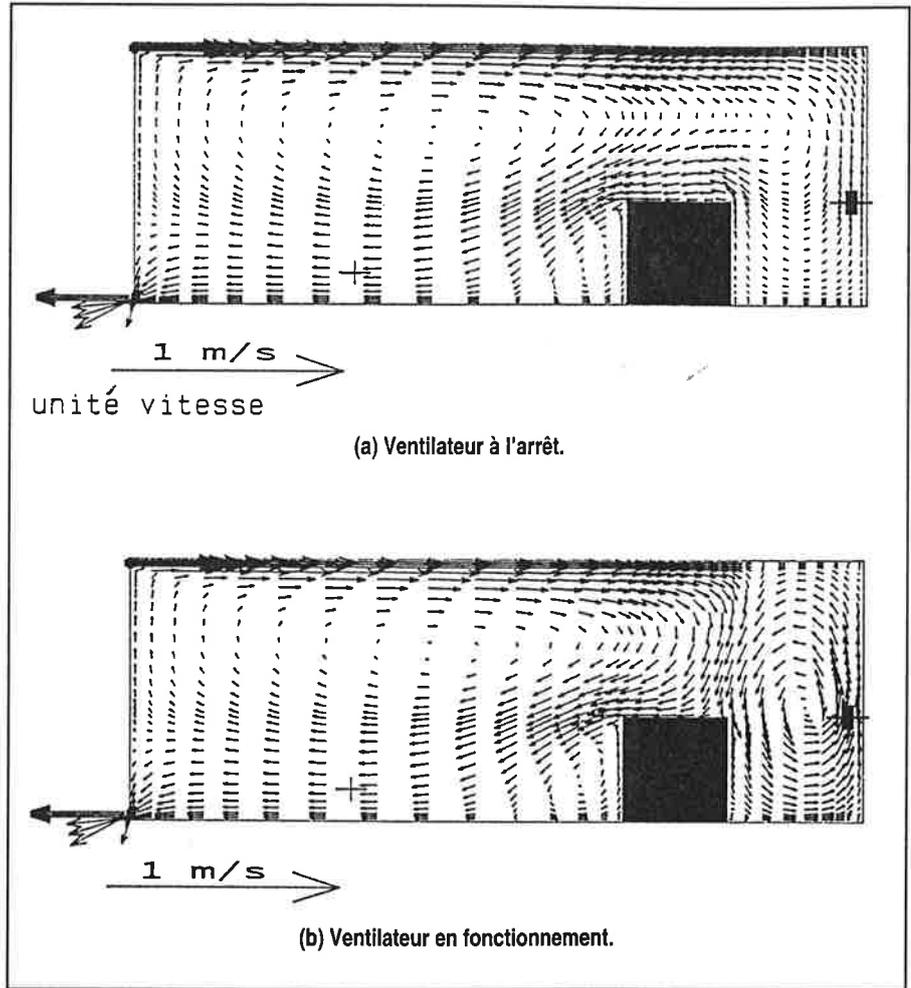


Fig. 3. Champs de vitesses calculés dans un bureau.

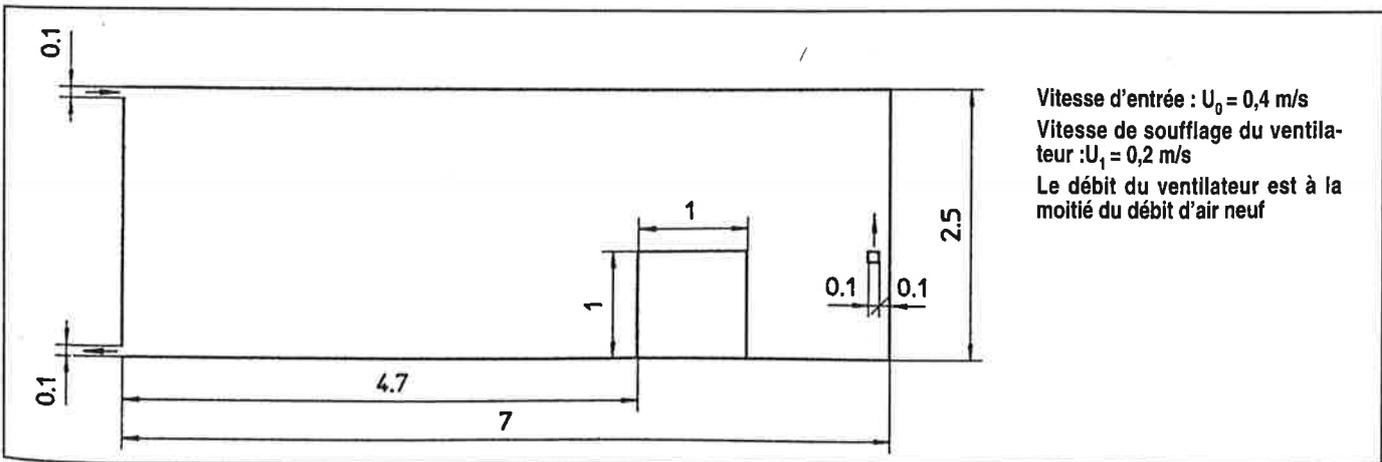


Fig. 1. Configuration du bureau.

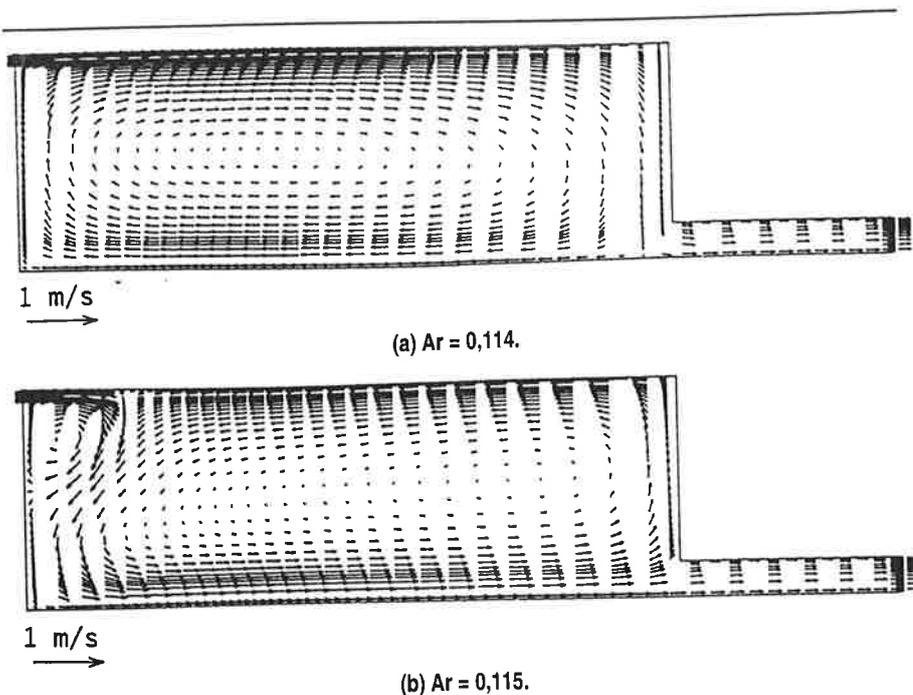


Fig. 4. Champs de vitesses calculés dans une pièce chauffée par le sol pour deux valeurs du nombre d'Archimède.

Pour les faibles nombres d'Archimède, le jet d'air issu de la fente d'entrée atteint le mur vertical opposé et établit un tourbillon principal dans le sens gauche-droite (similaire au cas isotherme) (fig. 4a). Par contre, pour des valeurs plus élevées du flux thermique, l'air introduit est dévié en direction du sol du fait de sa température initiale inférieure à celle de l'air circulant dans le local, ce qui conduit à un tourbillon principal de sens inversé (fig. 4b). Le renversement du sens de rotation de l'écoulement conduit à une modifica-

tion radicale de la distribution des températures. Par exemple, la zone située près du sol côté entrée, qui était très chaude à la figure 5a, est directement refroidie par l'air entrant à la figure 5b.

Le nombre d'Archimède critique Ar_c pour lequel se produit le passage d'un régime d'écoulement à un autre situé entre 0,114 et 0,115.

Nous référons à [4] pour une analyse plus détaillée de ce phénomène.

Écoulement tridimensionnel généré par un diffuseur d'air complexe

Dans le cadre de l'annexe 20 de l'IEA, des études numériques et expérimentales ont été réalisées pour analyser les écoulements d'air dans un local parallélépipédique simple ($L \times l \times H = 4,2 \text{ m} \times 3,6 \text{ m} \times 2,5 \text{ m}$). L'air est introduit dans la pièce par l'intermédiaire d'un diffuseur complexe (fait de 84 buses) situé près du plafond. Il est repris par l'intermédiaire d'une extraction rectangulaire située sous l'entrée d'air. Nous présenterons des résultats numériques et expérimentaux pour l'écoulement en situation isotherme [5].

Le local est décrit à la figure 6a. Le diffuseur d'entrée d'air est représenté à la figure 6b. Il est composé de 4 rangées de 21 buses de 1,2 cm de diamètre, 1,5 cm de long réparties sur un rectangle de 0,71 m de large sur 0,17 m de haut. Les buses sont orientées vers le plafond en faisant un angle de 40° avec l'horizontale. L'extraction d'air se fait par une bouche rectangulaire de 0,3 m de large sur 0,2 m de haut.

L'étude expérimentale s'est faite en simulation hydraulique sur maquette. Un modèle réduit au sixième a été construit en altuglas et étudié dans le banc de simulation hydraulique de l'INRS. Les conditions dynamiques de l'écoulement ont été définies à partir d'une similitude de Reynolds : dimensions réduites d'un facteur 6, vitesses réduites d'un facteur 2,6. Le débit a été choisi de manière à obtenir trois renouvellements d'air par heure. L'acquisition des trois composantes de la vitesse moyenne s'est faite par anémométrie laser à effet Doppler. La vitesse moyenne a été calculée à partir de 3 072 valeurs de vitesses instantanées.

La simulation de l'écoulement a été réalisée avec le logiciel EOL 3D. La difficulté essentielle réside dans la condition limite associée au diffuseur d'air. Ce dernier comprenant 84 jets répartis sur une surface de $0,71 \times 0,17 \text{ m}$, il est hors de question de pouvoir modéliser chaque jet. En effet, les maillages requis seraient énormes et même sur un CRAY-2, les temps de calcul seraient considérables.

Nous avons utilisé le modèle de la boîte [5], en principe applicable quel que soit le diffuseur. La condition limite au niveau du diffuseur a été remplacée par des conditions limites associées aux points situés sur les faces verticales d'une boîte entourant le diffuseur. Chaque face part du plafond et a une hauteur de 20 cm. Les faces verticales sont localisées dans les plans suivants : $x = 0$; $x = 1$; $z = 0,5$; $z = -0,5$.

Seules les composantes u_x et u_z ont été fixées dans le calcul. Leurs valeurs ont été déterminées à partir de lois d'échelle (jet oblique frappant une paroi et couche limite).

Le plan $z = 0$ est un plan de symétrie. Les calculs ont été effectués dans un demi-local. Le maillage comprenait $32 \times 36 \times 26$ mailles.

Une image globale de l'écoulement fournie par la simulation numérique est représentée à la figure 7. L'air entrant dans le local forme un jet tridimensionnel qui, après impact sur le plafond, s'élargit en se dirigeant vers la face avale et les faces latérales. Lorsqu'il atteint la face avale, l'air se répartit vers les côtés et vers le sol. Dans les coins de la face avale, deux colonnes verticales de recirculation sont présentes. Elles résultent de

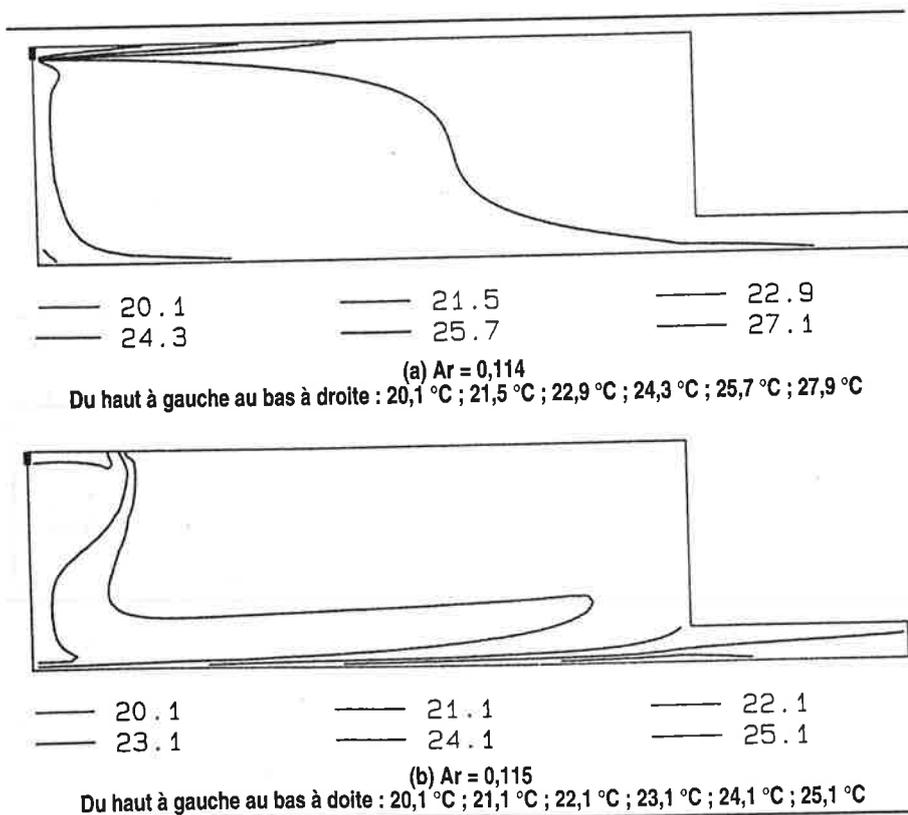


Fig. 5. Isothermes calculées dans une pièce chauffée par le sol pour deux valeurs du nombre d'Archimède.

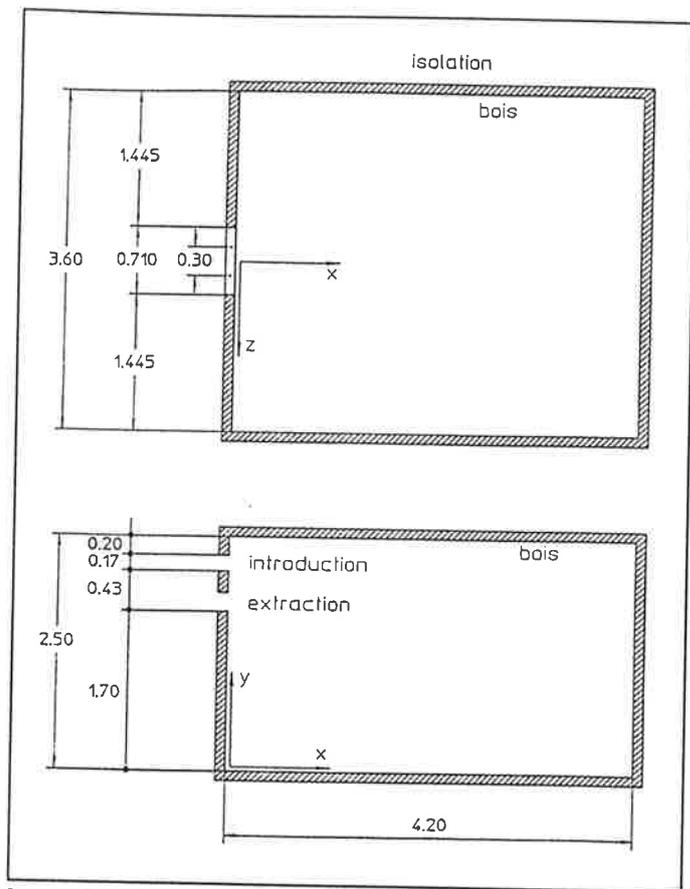


Fig. 6a. Géométrie du local.

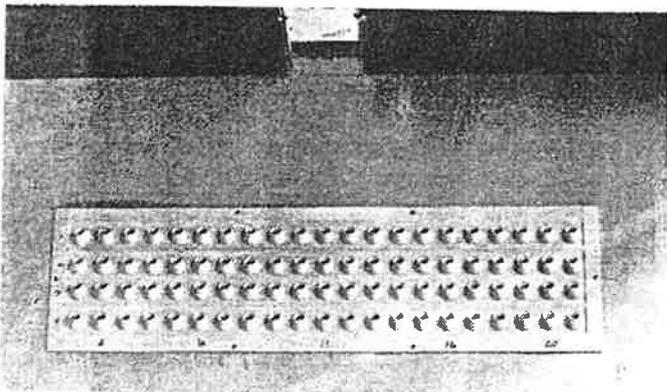


Fig. 6b. Diffuseur d'air.

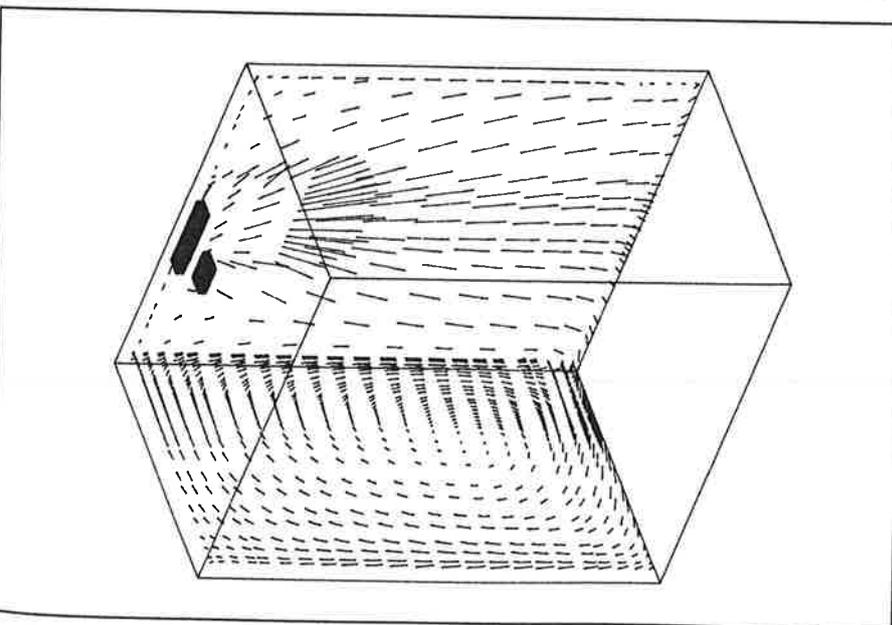


Fig. 7. Champ de vitesse tridimensionnel calculé avec EOL 3D.

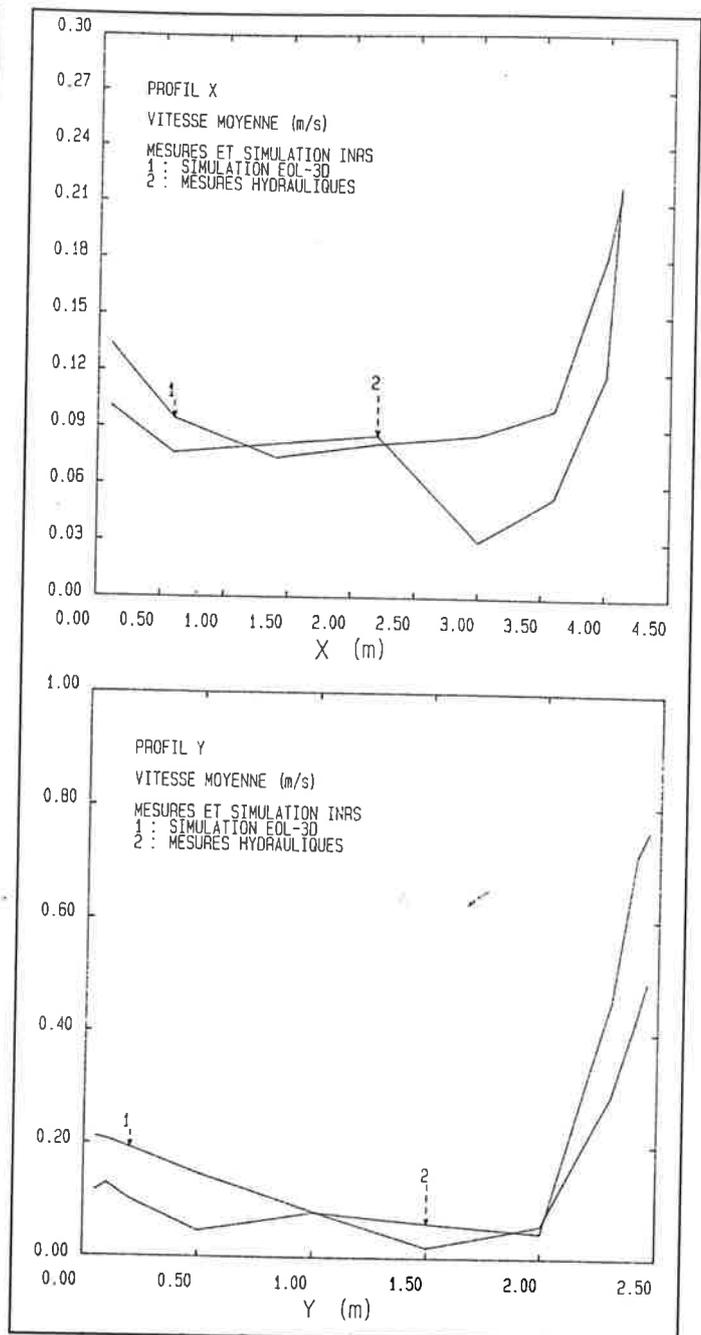


Fig. 8. Profils de vitesses moyennes. Comparaison entre valeurs calculées EOL 3D et valeurs mesurées sur maquette hydraulique.

l'interaction entre deux courants opposés. L'un vient du plafond en suivant l'écoulement du jet ; l'autre résulte du retour vers les faces latérales du fluide qui a atteint la face aval.

La comparaison entre résultats numériques et mesures en simulation hydraulique pour les vitesses évaluées le long de deux profils caractéristiques est représentée à la figure 8.

Profil X : intensité du vecteur vitesse évaluée le long de la ligne X parallèle à l'axe des x et de coordonnées (y ; z) = (1 ; 0).

Profil Y : intensité du vecteur vitesse évaluée le long de la ligne Y parallèle à l'axe des y et de coordonnées (x ; z) = (2,2 ; 0).

L'accord entre calcul et expérience est satisfaisant étant donné la complexité du diffuseur d'entrée. Le creux présent dans le profil X au voisinage de x = 3 a été reproduit de manière un peu moins prononcée par d'autres expérimentations ; il n'est présent dans aucun résultat de simulation. Une analyse plus complète comprenant notamment des visualisations par tomographie laser est contenue dans [5].

Limites des techniques prévisionnelles

Les configurations rencontrées en situation industrielle sont généralement trop complexes pour être traitées intégralement par simulation numérique. Les difficultés essentielles résident tant dans la détermination des conditions limites, qui sont souvent mal connues ou difficiles à modéliser, que dans la complexité des géométries qui nécessiteraient des maillages énormes engendrant des calculs hors de la portée des ordinateurs actuels. Ainsi, le dernier exemple illustre la difficulté relative à la modélisation d'un diffuseur d'air. En situation industrielle, le problème se poserait avec des parois, des sources chaudes, des ouvertures non contrôlées, des sources de polluant. Chacun de ces éléments devra être modélisé en se basant sur des lois d'échelle ou sur une simulation numérique réalisée à l'échelle de l'élément à représenter.

Les phénomènes anisothermes sont très délicats à modéliser et la convergence des algorithmes est souvent difficile à obtenir. Le deuxième exemple est, à cet égard, très révélateur.

Les modèles physiques utilisés dans les programmes de calcul nécessitent le respect de certaines hypothèses ; malheureusement, les logiciels sont souvent peu explicites à ce sujet. Ainsi, par exemple, le modèle de turbulence k- ϵ n'est valable que pour des écoulements fortement turbulents. Les écoulements de ventilation contiennent souvent des régions à basse vitesse (zones mortes, zones

proches des parois) où la turbulence est faible. Dans ce cas, il faut modifier le modèle k- ϵ standard en y introduisant des termes relatifs aux effets visqueux. On parle alors de modèles à « bas nombre de Reynolds » [6]. En présence de phénomènes anisothermes, l'emploi du k- ϵ standard peut conduire à des valeurs erronées pour les coefficients de transfert thermique au niveau des parois [7]. Nous référons à [7, 8, 9] pour des exemples d'écoulements de ventilation nécessitant

l'utilisation d'un modèle de turbulence à bas nombre de Reynolds. Le logiciel EOL teste systématiquement la validité du modèle k- ϵ au voisinage des parois et indique les régions susceptibles de poser problème.

Toutes ces limites soulignent l'intérêt de la validation expérimentale qui reste l'élément de progrès indispensable tant pour tester les modèles numériques que la fidélité avec laquelle les conditions limites peuvent être simulées. ■

RÉFÉRENCES

- [1] BRACONNIER R., REGNIER R., BONTHOUX F. — *Efficacité d'une fente d'aspiration sur une cuve de traitement de surface : mesures en laboratoire et simulation numérique bidimensionnelle*, Cahiers de Notes Documentaires, 1991, 144, ND 1841, pp. 463-478.
- [2] FONTAINE J.R., GARDIN P., SOUMOY V., AUBERTIN G. — *Criteria for the evaluation of general ventilation systems : numerical and physical simulations*. In : *Ventilation'88*. Proceedings of the 2nd International Symposium on Ventilation for Contaminant Control, London, 1988, pp. 143-153. J.H. Vincent, Ed. Pergamon Press (1988).
- [3] FONTAINE J.R., BRACONNIER R., RAPP R., SERIEYS J.C., CUNIN J.C. — *EOL : A computational fluid dynamics software designed to solve air quality problems*. *Ventilation'91 Symposium*, Cincinnati, USA (1991).
- [4] BRACONNIER R. — *Simulations numériques d'un écoulement bidimensionnel dans un local chauffé par le sol*. A paraître.
- [5] FONTAINE J.R., BIOLLEY F., RAPP R., SERIEYS J.C., CUNIN J.C. — *Ventilation flow analysis. Flow visualization and LDA measurements in water scale models, validation of numerical*

results. In : *Air Movement and Ventilation Control within Buildings*. Proceedings of the 12th AIVC Conference, Ottawa (1991).

[6] JONES W.P., LAUNDER B.E. — *The calculation of Low Reynolds number phenomena with a two-equation model of turbulence*. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 16, pp. 1119-1130 (1973).

[7] QINGYAN Ch., MOSER A., HUBER A. — *Prediction of buoyant, turbulent flows by a Low-Reynolds number k- ϵ model*. *ASHRAE Transactions*, 96 (1990).

[8] DAVIDSON L., FONTAINE J.R. — *Calculation of the flow in a ventilated room using different finite-difference schemes and different treatments of the walls*. In : *TODOROVIC B., NOVAK P., KULIC E. (Ed.) The Second World Congress on Heating, Ventilating and Air Conditioning*. Ciima 2000, Rehva Edition, Amersfoort, Netherlands, Vol. III, pp. 219-225 (1989).

[9] BRACONNIER R., REGNIER R., BONTHOUX F. — *An experimental and numerical study of the capture of pollutants over a surface treating tank equipped with a suction slot*. In *Ventilation'91*. Proceedings of the 3rd International Symposium on Ventilation for Contaminant Control, Cincinnati (1991).

LES PRIX ADEME

Nouveauté à ExpoTherm, la remise des Prix Ademe par Michel Mousel, président de l'Agence, le 24 novembre, destinés à récompenser des initiatives ayant favorisé la formation et la diffusion de l'information dans la climatisation.

LA FORMATION

Un Prix Ademe a été décerné au **LYCÉE TECHNOLOGIQUE DE DIGNE** qui a innové en 1988 en mettant sur pied, pour la première fois en France, une formation du niveau BTS en domotique. Depuis, cette initiative a été reprise par d'autres établissements d'enseignement. De plus, un prolongement de ce BTS a été créé en 1991 : le DEUST qui correspond à une formation BAC + 2.

Un Prix Ademe a été attribué au **LYCÉE LA MARTINIÈRE**, lycée d'enseignement technique lyonnais réputé pour la qualité de la formation qu'il dispense. Dans le cadre d'ExpoTherm, le prix Ademe récompense particulièrement la section Equipement-Technique-Energie pour ses actions dans le domaine de la climatisation et ses nombreux partenariats avec les entreprises qui mettent à sa disposition des matériels performants.

L'INFORMATION

Un Prix Ademe a récompensé **LE JOURNAL DU CHAUFFAGE**, dernier-né de la presse professionnelle qui propose une formule différente et dynamique afin d'élargir la diffusion de l'information dans le secteur du chauffage. Michèle FOURRET — rédactrice en chef du journal — a largement contribué, par la qualité de ses articles, au succès de la publication.

Un prix a été remis au **CENTRE EDF/GDF D'INFORMATION DU BATIMENT** qui a fêté cette année son 20^e anniversaire. Par ses nombreuses actions, cet organisme a su établir une collaboration fructueuse avec la presse et les professionnels dans les domaines de l'utilisation du gaz et de l'électricité. La palette des services offerte par Cegibat est complète : information permanente, publication de document, action technique, exposition technique.



La remise des prix Ademe. On reconnaît au centre Michèle Fourret, à l'extrême gauche Louis Voillot et à l'extrême droite Jean-Pierre Harrang, directeur du Cegibat.

L'Ademe a enfin récompensé **Louis VOILLOT** qui a fait sa carrière en qualité de gestionnaire technique de grands patrimoines immobiliers où il s'est distingué par sa recherche permanente de solutions novatrices. Il a été l'un des premiers climaticiens français à s'intéresser aux problèmes physiologiques et à amorcer le débat avec le corps médical. Élu président de l'AICVF en 1985, il a, au prix d'un engagement personnel hors du commun, transformé la respectée et discrète association, en un partenaire actif et recherché de la climatisation. Désormais administrateur général, il reste un homme de conviction et d'enthousiasme.