

Simulation numérique 3D pour optimiser l'aérodynamique des ventilateurs de grande puissance

Dr. Wilfried Rick, Dr. Eribert Benz, Alain Godichon

Alors que les études expérimentales continuent de jouer un rôle important en mécanique des fluides, la simulation numérique est de plus en plus utilisée pour l'analyse détaillée des phénomènes d'écoulement. Chez ABB, la technique de simulation numérique d'écoulement des fluides CFD (*Computational Fluid Dynamics*), basée sur la résolution des équations Navier-Stokes 3D (dans les trois dimensions de l'espace), est utilisée en phase de conception des ventilateurs hautes performances pour optimiser la configuration des composants et réduire au minimum les études expérimentales. Cette technique permet notamment d'améliorer les performances globales des ventilateurs, de développer les nouveaux produits plus rapidement et avec un moindre degré d'incertitude. La simulation numérique a en outre montré que les calculs CFD peuvent être systématiquement utilisés pour intégrer les caractéristiques d'écoulement des machines dans de nombreuses autres applications.

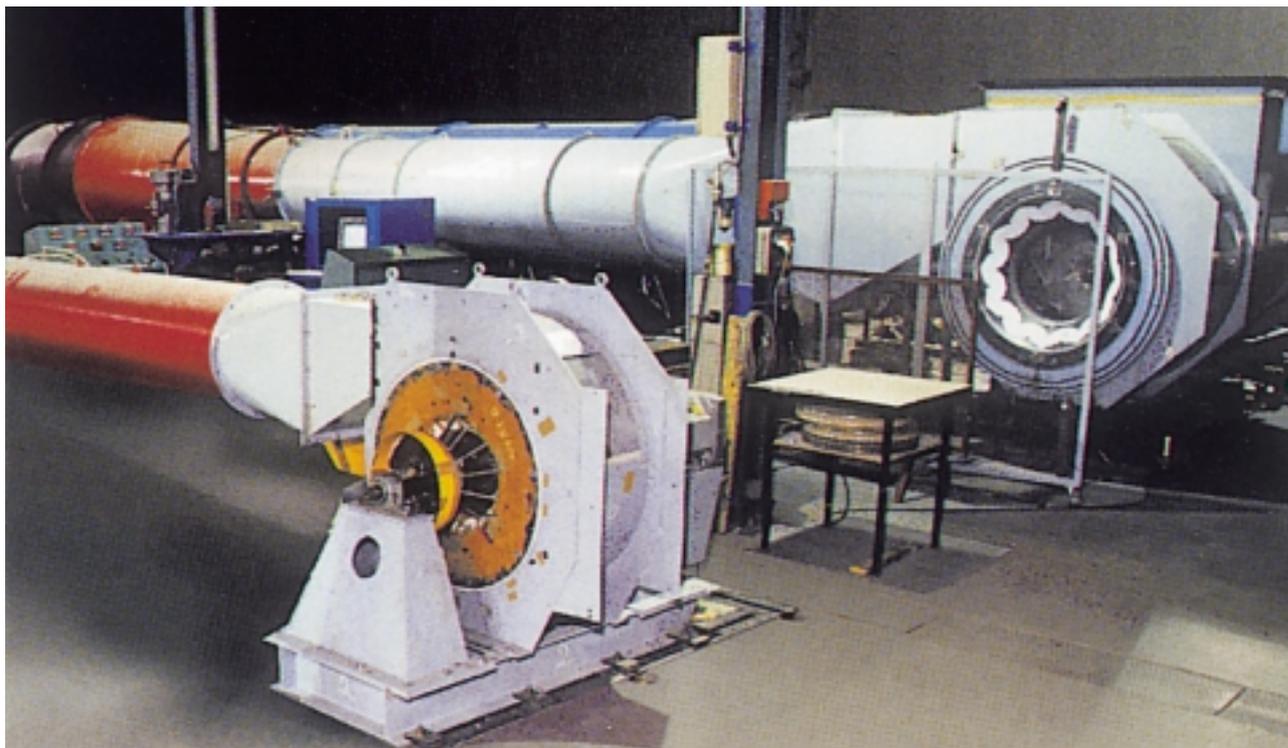
Outre l'approche expérimentale, la plupart des constructeurs de ventilateurs utilisent beaucoup les calculs empiriques d'écoulement monodimensionnels (1D) ou bidimensionnels (2D) pour déterminer les propriétés aérodynamiques fondamentales de leurs machines [1]. Vu le faible nombre de travaux publiés sur l'utilisation des calculs CFD pour comprendre les écoulements internes des ventilateurs centrifuges, on suppose que les constructeurs de ce type de machine appliquent encore couramment les lois de similitude et développent de nouveaux produits à partir de développements précédents. Cette méthodologie, qui a

fait la preuve de sa fiabilité, suppose l'exploitation de bases de données volumineuses; elle est, par ailleurs, fastidieuse et ne permet pas de connaître avec précision le comportement des écoulements dans la machine. Pour mieux comprendre le schéma des écoulements dans les canaux interaubes ou dans l'enveloppe du ventilateur, des essais longs et coûteux sont nécessaires. Pour pallier ces inconvénients, les ingénieurs d'ABB Solyvent Ventec utilisent la simulation numérique CFD basée sur la résolution des équations Navier-Stokes 3D pour concevoir les ventilateurs. Il s'agit d'une méthode systématique de conception et de développement qui

permet d'optimiser et de repenser la configuration des ventilateurs tout en réduisant au minimum les essais. Qui plus est, les calculs CFD permettent de mieux comprendre les phénomènes d'écoulement et donc d'améliorer les performances des ventilateurs, d'accélérer le développement de produits nouveaux tout en minimisant le degré d'incertitude et les coûts.

Concevoir des ventilateurs industriels en adéquation avec des besoins nouveaux

Sur le marché traditionnel des ventilateurs centrifuges, le critère de base de sélection des



1 Pour ses ventilateurs, le Groupe ABB dispose de plusieurs laboratoires d'essais aux normes internationales et nationales (ISO, AMCA, NF, BS, etc.).

produits était, jusqu'à une date récente, leur coût d'achat, leur simplicité de fabrication et d'installation étant prioritaire sur l'amélioration de leurs performances. Mais aujourd'hui, avec un marché devenu mondial et hyper compétitif, on accorde une priorité croissante au coût d'exploitation. Les ventilateurs de soufflage ou de tirage de grande puissance utilisés dans les centrales thermiques, par exemple, doivent offrir aujourd'hui un rendement aérodynamique élevé sur une plage de fonctionnement beaucoup plus large qu'il y a quelques années.

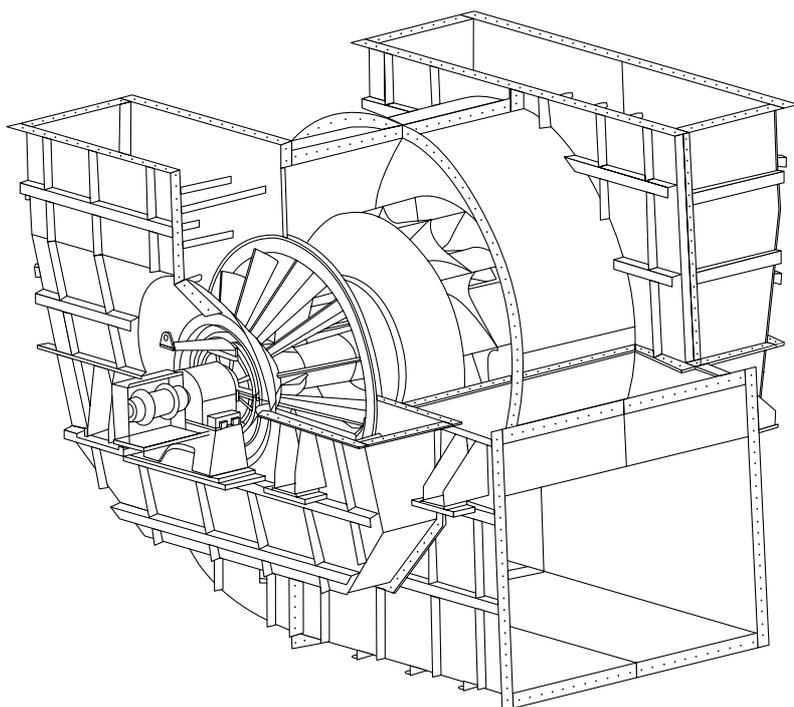
Pour illustrer les avantages de la technique de simulation numérique dans la prédiction des performances et l'étude détaillée de l'aérodynamique des ventilateurs, nous avons choisi un ventilateur centrifuge à double entrée et vitesse spécifique élevée, à vanelles orientables à l'entrée (pour la régulation du débit) et à enveloppe. Ce ventilateur est illustré en 2.

Sur l'illustration, on distingue les capots d'aspiration, le pavillon d'aspiration avec les vanelles orientables à l'entrée de celui-ci et la roue à double entrée qui refoule l'air dans une enveloppe de largeur constante et de section variable à partir d'un bec unique. Les vanelles orientables servent à adapter le débit d'air aspiré à la charge tout en maintenant un flux d'entrée d'air correct dans la roue. A vitesse de rotation constante, la prérotation du flux d'air à l'entrée obtenue en faisant varier la position angulaire des vanelles réduit par ailleurs la pression fournie par le ventilateur, de telle sorte que le point de fonctionnement de la machine peut être contrôlé et modifié pour chaque orifice de résistance constante du circuit.

Les vanelles sont montées sur l'entrée conique du pavillon d'aspiration. En général, les vanelles des ventilateurs industriels sont constituées d'aubes planes en tôle orientables sur une ouverture de 90° . Cette conception simple et économique facilite leur fabrication,

minimise les pertes en position complètement ouverte et permet d'obtenir un débit quasi nul en position fermée. Cependant, la giration circouférentielle du débit d'air au niveau des vanelles pour une charge non nominale donne naissance à un écoulement complexe avec des effets tridimensionnels importants qui rendent les outils de calcul traditionnels quelque peu inadaptés pour calculer les pertes de pression ou analyser l'interaction vanelles/roue.

La roue à double entrée limitée par des cônes du côté des aspirations est un modèle hautes performances avec des aubes couchées en arrière de type profilé. En régime nominal, le coefficient de débit est de 0,307 et le coefficient de pression de 1,0 ce qui correspond à une vitesse spécifique de 1,65. Le nombre de Mach et le nombre de Reynolds sont, respectivement, de 0,14 et $0,6 \times 10^6$, rapportés dans chaque cas aux conditions d'arrêt, à la vitesse périphérique de la roue et à la largeur de la roue.



2 Représentation simplifiée d'un ventilateur de soufflage, montrant les capots d'aspiration, les vanelles orientables à l'entrée et l'enveloppe.

Une méthodologie basée sur un code de calcul sélectionné

La technique de calcul numérique des écoulements CFD est un outil très puissant de prédiction des phénomènes d'écoulement complexes et permet de mieux comprendre ce qui se passe réellement dans les turbomachines. ABB Solyvent-Ventec et une équipe de chercheurs du Groupe ABB¹ ont utilisé cette technique en phase de conception des ventilateurs centrifuges. Les résultats ont montré que la technique CFD est suffisamment précise pour calculer les performances de ces ventilateurs.

Un code commercialisé de calcul CFD a été utilisé pour étudier l'aérodynamique du ventilateur décrit (on suppose dans ce cas l'écoulement à fluide incompressible). Le code de calcul, qui résout les équations Navier-Stokes moyennées sur des mailles structurées, fut appliqué, d'une part, à un canal interaube de la roue couplé à des vanelles à l'aspiration et, d'autre part, au système couplé du rotor complet du ventilateur et de l'enveloppe. Le maillage

des surfaces du domaine de calcul de l'enveloppe illustré en **3** montre uniquement la moitié de la roue et de l'enveloppe. Pour mieux visualiser la configuration de l'aubage, une partie du disque de la roue a été supprimée.

Tous les calculs d'écoulement en régime stationnaire s'appuient sur un modèle de turbulence utilisant le modèle K-ε standard à nombre de Reynolds élevé en association avec une fonction de paroi pour la fermeture des équations Navier-Stokes moyennées.

Dans tous les cas, les modèles de calcul CFD utilisés ont pris en compte les effets de l'écoulement de recirculation le long du cône de la roue résultant de l'écoulement dans le jeu entre le pavillon d'aspiration fixe et le cône de la roue en rotation. En général, une approche avec surface de mélange (*mixing plane*) a été utilisée aux

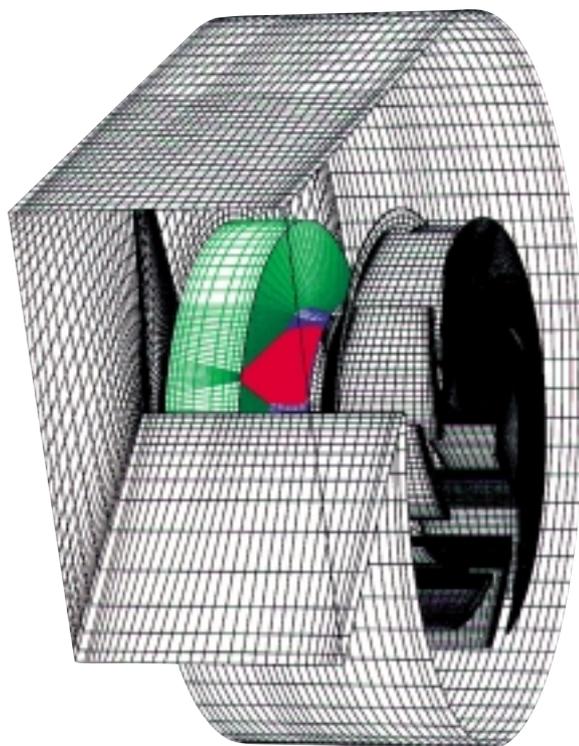
¹ Les activités de recherche du Groupe ABB dans ce domaine ont depuis été transférées à ABB ALSTOM POWER TECHNOLOGY Ltd.

Ventilateurs industriels: des machines de haute technologie

Les ventilateurs sont présents partout et il en existe de toutes les tailles et de toutes les formes. Dans les procédés thermiques, ils sont utilisés pour déplacer des gaz, de la vapeur et des mélanges gaz/solides, pour des besoins de ventilation, refroidissement, séchage, climatisation ou combustion. On les retrouve également dans les centrales électriques, dans les réseaux routiers (tunnels), dans les secteurs industriels du ciment, de la chimie/pétrochimie et de l'extraction minière. A une échelle plus réduite, ils servent à refroidir les composants électroniques et les moteurs.

La forte compétitivité sur les marchés mondiaux est à l'origine de nombreuses innovations technologiques. Celles-ci ont progressivement été mises en œuvre: d'abord dans le secteur de l'aéronautique, ensuite dans les turbines à gaz fixes des centrales de production d'énergie et, enfin, dans les compresseurs et ventilateurs industriels. ABB, leader sur le marché des ventilateurs, a fait le choix délibéré d'exploiter les développements les plus récents.

Les travaux de R&D dans ce domaine ont permis d'approfondir les connaissances théoriques qu'ABB met à profit pour améliorer l'aérodynamique de ses ventilateurs, comme le montre cet article. Par ailleurs, en prenant en compte la dimension «environnement» dans la conception de ses produits, ABB propose des ventilateurs à haut rendement énergétique. Nous citerons les ventilateurs hélicoïdes d'ABB Fläkt (jusqu'à 2,5 MW de puissance absorbée) et les ventilateurs centrifuges, fabriqués par ABB Solyvent-Ventec (jusqu'à 5 m de diamètre de roue et 10 MW de puissance absorbée).



3 Maillage de l'enveloppe et de la roue. Ces modèles numériques permettent de comprendre le comportement des écoulements dans les composants des ventilateurs.

interfaces entre le maillage fixe et le maillage tournant. A l'interface avec le maillage fixe de l'enveloppe, cependant, une approche avec rotor en position figée (*frozen rotor*) a été utilisée car la variation circonférentielle de l'écoulement en aval de la périphérie de la roue pourrait être importante comparée à l'écoulement obtenu en sortie d'un seul canal interaube. (L'approche avec *surface de mélange* est basée sur une moyenne circonférentielle uniforme aux interfaces des mailles; l'approche avec *rotor en position figée* donne les variations circonférentielles sur l'interface sans modification relative de la position des mailles dans le temps.) Les niveaux de débit-masse et de turbulence ont été imposés aux limites d'entrée du domaine de calcul.

Les calculs ont été effectués pour quatre points de fonctionnement différents à vitesse de rotation constante et à des régimes situés entre 80% et 140% du débit nominal. La position complètement ouverte (0°) des vannes a été utilisée pour étudier les conditions de fonctionnement en régime nominal et hors régime nominal (débit élevé à 140%). A des fins de comparaison, des angles de réglage des vannes de 60° et 45° , mesurés à partir du plan méridien, ont été utilisés respectivement pour obtenir 80% et 90% du débit nominal.

Analyse détaillée des écoulements

Nous utilisons ci-après quelques exemples de résultats de calculs CFD réels obtenus avec un

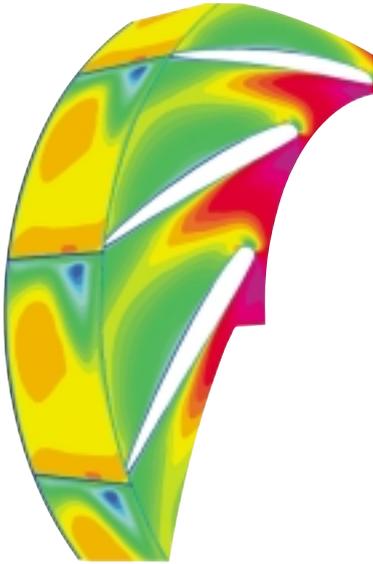
ventilateur centrifuge afin de montrer l'intérêt de la simulation numérique pour comprendre des phénomènes physiques complexes. Ils permettront également au lecteur de se rendre compte du niveau de précision de cette technique qui est, pour le concepteur, un outil fiable et performant dans la recherche d'optimisation des composants des turbomachines.

Il est bien connu que l'angle d'incidence de l'écoulement sur une aube de la roue est un paramètre important de l'aérodynamique des ventilateurs. Par exemple, si la charge sur l'aube ou le niveau d'incidence positive (point de stagnation déplacé vers la face en pression de l'aube) est élevé, des gradients de pression défavorables agissant sur la face en dépression de l'aube contribuent à la croissance de la couche limite et, par là même, au risque de séparation de la couche limite et de décollement autour des aubes associé à d'importantes pertes. Par ailleurs, on sait que la perte des profils est insensible à l'incidence à faibles nombres de Mach à l'aspiration, ce qui est particulièrement vrai pour les profils à bords d'attaque légèrement arrondis.

Une distribution d'incidence uniforme le long de l'attaque de l'aube peut cependant contribuer à fortement améliorer le rendement et élever la pression [1]. Pour valider la conception de l'aubage de la roue centrifuge en question, caractérisée par un fort écoulement méridien dirigé vers l'amont du bord d'attaque de l'aube et un écoulement au jeu qui vient frapper le bord d'attaque au niveau du cône de la roue, il est indispensable de bien comprendre le schéma d'écoulement sur le bord d'attaque de l'aube.

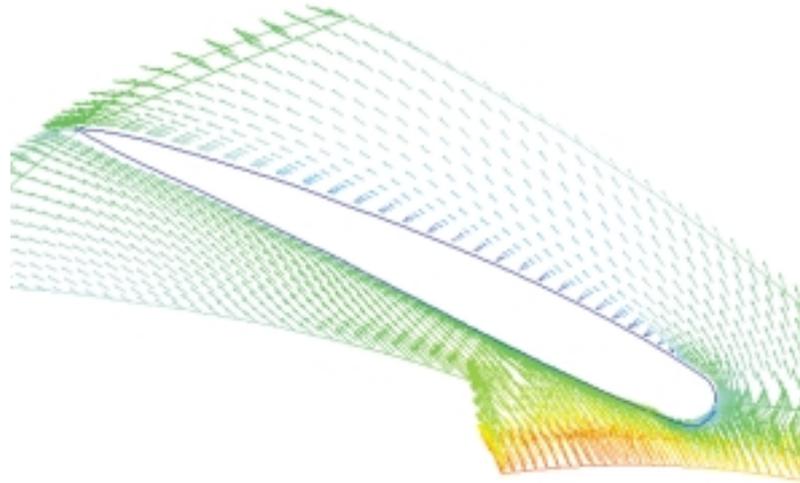
Schéma d'écoulement en régime nominal

Le schéma d'écoulement au voisinage du cône de la roue et de la sortie de la roue en régime



4 Distribution des vitesses à charge nominale. Schéma d'écoulement au voisinage du cône de la roue et de la sortie de la roue.

nominal est illustré en **4** par la distribution des vitesses. On y voit clairement la formation type d'un jet/sillage en aval de la roue, qui provoque l'accumulation d'un fluide de faible énergie cinétique dans la région voisine du cône/face en dépression de l'aube et d'un fluide à forte énergie cinétique dans la zone disque/face en pression de l'aube. La génération d'un vortex le long du canal interaube peut s'expliquer par les forces centrifuges qui prévalent dans la zone de courbure de l'écoulement axial à l'écoulement radial (ces forces dirigent le fluide à faible quantité de mouvement du bord d'attaque vers le cône) et les forces de Coriolis qui agissent dans la partie radiale du canal (forçant le fluide à faible énergie cinétique à s'éloigner des parois du disque et du cône pour se diriger vers la face en dépression de l'aube). Toutefois, sur la figure **5**, qui illustre le champ vectoriel d'écoulement correspondant, on ne voit aucun retour de fluide



5 Champ vectoriel d'écoulement à charge nominale (cône de la roue). La simulation CFD montre que, même à régime nominal, l'écoulement dans la couche limite de long de la face en dépression est proche de la séparation, phénomène appelé «décollement».

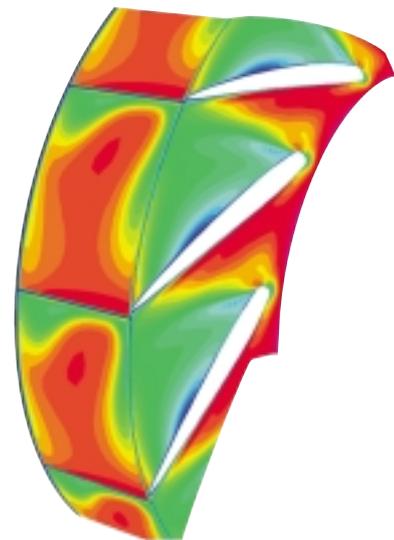
de dans cet écoulement. Néanmoins, la simulation numérique montre que, même en régime nominal, l'écoulement dans la couche limite le long de la face en pression de l'aube est proche du décollement (séparation d'écoulement) du fait de l'incidence négative sur le bord d'attaque de l'aube et de la diffusion imposée plus en aval. Ce phénomène est décrit en détails en [2].

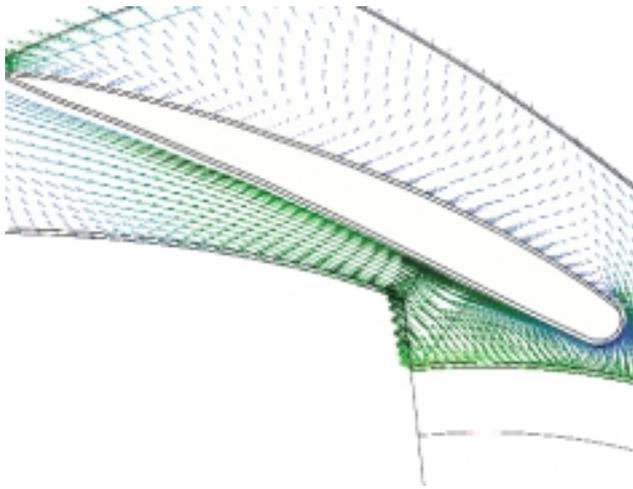
Schéma d'écoulement à charge partielle

A 80% de charge nominale avec prégratation de l'air aspiré par orientation à 60° des vanelles, la

6 Distribution des vitesses à charge partielle avec la prégratation créée à l'aspiration par orientation à 60° des vanelles. On voit que le sillage est moins prononcé.

charge sur les aubes est réduite et le sillage devient moins prononcé **6**. Contrairement à ce qui se passe à débit nominal, la région à faible vitesse sur la face en pression de l'aube à mi-longueur de corde et le champ vectoriel d'écou-



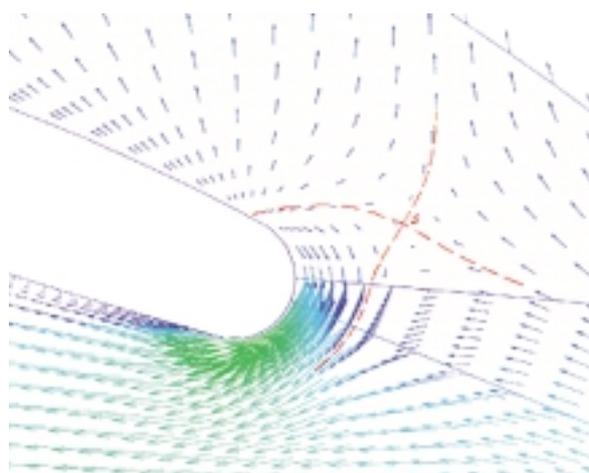


7 Champ vectoriel d'écoulement à charge partielle (côté cône de la roue).
Un écoulement radial centripète est visible dans cette partie de la roue.

ment au niveau du cône de la roue révèlent un écoulement radial centripète sur cette partie de la roue **7**. Ce phénomène s'explique par un vortex de décollement au bord d'attaque qui se forme sur la face en pression de l'aube et qui trouve son origine dans la séparation au bord d'attaque en bout d'aube du fait d'une incidence négative importante. Ce vortex modifie l'écoulement sur la paroi du cône et provoque le retour précité de l'écoulement le long du cône au niveau de la face en pression de l'aube. Une analyse détaillée de l'écoulement, injecté à partir de la cavité latérale du ventilateur à travers le jeu entre le pavillon d'aspiration fixe et le cône en rotation dans l'écoulement d'entrée dans cette région, indique qu'il contribue à l'incidence négative sur le bord d'attaque de l'aube au niveau du cône de la roue. De même l'écoulement au jeu, qui donne naissance à un écoulement de circulation le long du cône de la roue, est aussi la cause d'une perte de débit du ventilateur.

L'écoulement au niveau du bord d'attaque proche du disque de la roue a également été étudié en détail à ce point de fonctionnement hors régime nominal. Contrairement à l'inciden-

ce négative importante prédite au bord de l'aube, le champ vectoriel d'écoulement illustré en **8** montre une incidence positive importante sur le bord d'attaque entraînant la formation d'un vortex sur ce bord d'attaque. Celui-ci est lié au fait que l'écoulement d'entrée dans la couche limite sur le disque ne peut supporter le gradient de pression en regard du bord d'attaque légèrement arrondi et commence à se séparer



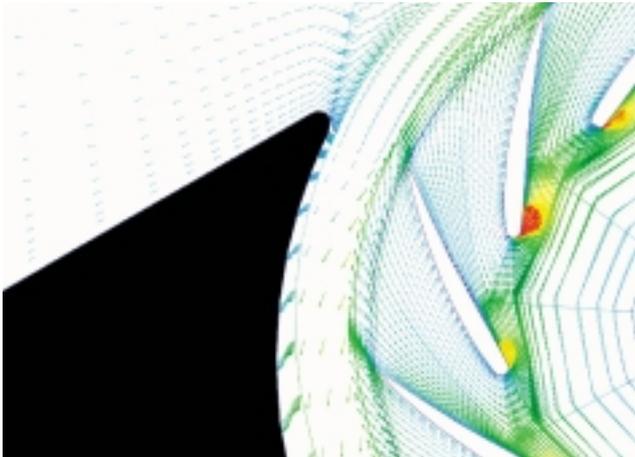
8 Champ vectoriel d'écoulement à charge partielle (côté disque de la roue). L'incidence positive importante sur le bord d'attaque est à l'origine de la formation d'un vortex au niveau du bord d'attaque.

en amont. Ce phénomène est associé à la formation d'un vortex qui entoure la couche limite et s'enroule autour du bord d'attaque. La ligne issue du point de stagnation, qui divise l'écoulement entre les régions de face en pression et de face en dépression de ce tourbillon de bord d'attaque est illustrée en **8**. La couche limite, qui se reforme au-delà de la ligne de séparation, connaît une forte expansion autour du bord d'attaque de l'aube. Cela provoque une séparation plus en aval dans l'angle disque/face en dépression de l'aube, du fait d'un gradient de pression défavorable.

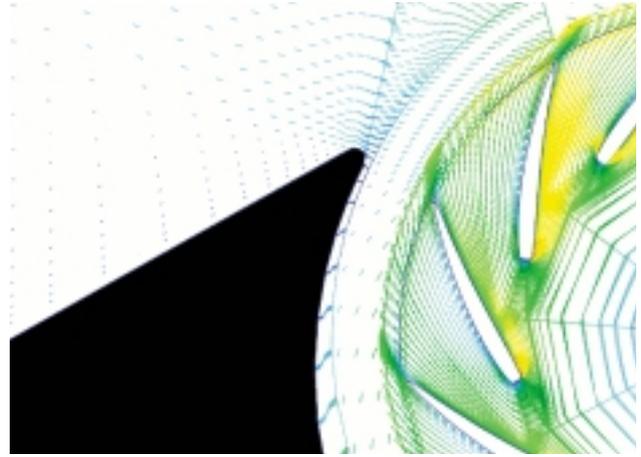
Adaptation de l'écoulement de la roue à l'enveloppe

Pour prédire le rendement global du ventilateur et localiser les pertes les plus importantes, il est également indispensable d'étudier le comportement de l'écoulement dans l'enveloppe.

En fonction de l'écoulement en sortie de roue pour lequel l'enveloppe est conçue, il n'y a qu'un seul point de fonctionnement par courbe



9 Champ vectoriel d'écoulement de la roue et de l'enveloppe à charge nominale. Le point de stagnation se situe sur le bord d'attaque du bec d'enveloppe.



10 Champ vectoriel d'écoulement de la roue et de l'enveloppe à 140 % du débit nominal. Le fluide présente un retour dans la conduite de sortie de diffusion de l'enveloppe, de sorte que le point de stagnation se situe dans le passage sous le bec d'enveloppe.

à vitesse constante (normalement le point nominal) pour lequel l'enveloppe impose une distribution circulaire de pression quasi uniforme en périphérie de la roue. Lorsqu'on s'éloigne de ce point de fonctionnement, un champ de pression asymétrique en périphérie se produit dans l'enveloppe, provoquant une variation circulaire de la charge sur l'aube et du débit-masse distribué au niveau des différents canaux interaubes et qui est à l'origine d'une forte interaction non stationnaire de l'écoulement entre la roue et la paroi de l'enveloppe. L'approche avec rotor en position figée quasi stationnaire, avec le rotor fixe par rapport au bec de l'enveloppe, est utilisée à des fins de simplification et pour réduire les temps de calcul.

A débit nominal, le point de stagnation de la ligne de courant, qui sépare l'écoulement d'entrée dans l'enveloppe de l'écoulement de sortie, se situe en extrémité du bord d'attaque du bec d'enveloppe. A des débits supérieurs, l'enveloppe est trop petite pour écouler le fluide, qui s'accélère alors de manière circulaire. La pression statique dans la première section de transition de l'enveloppe est, par conséquent,

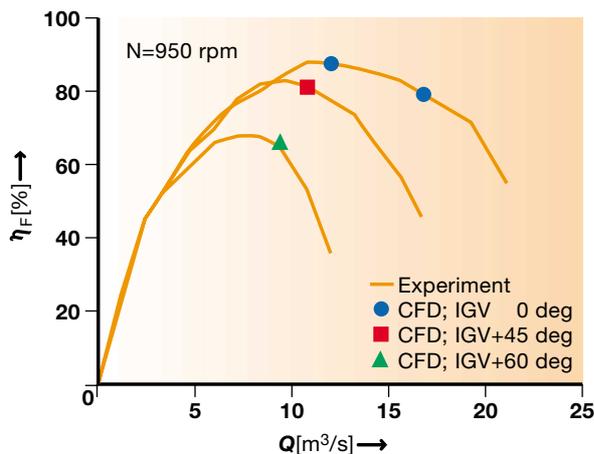
plus élevée qu'à l'extérieur, c'est-à-dire à l'entrée du diffuseur. Le point de stagnation se déplace à l'intérieur de l'enveloppe et le gradient de pression statique correspondant refoule le fluide dans le diffuseur. A l'inverse, à des débits faibles, le fluide est décéléré jusqu'à la sortie du diffuseur, de telle sorte qu'il est forcé à l'intérieur de l'enveloppe sous le bec et le point de stagnation se déplace le long de la paroi de l'enveloppe vers la sortie du diffuseur.

La figure 9 montre le champ d'écoulement au niveau du bec d'enveloppe à charge nominale. Comme nous l'avons dit plus haut, le point de stagnation se situe sur le bord d'attaque du bec du fait de la pression circulaire uniforme au niveau de l'entrée dans l'enveloppe. Les canaux interaubes au voisinage du bec d'enveloppe sont affectés localement par une contrepression supérieure qui réduit l'écoulement traversant associé à une charge supérieure sur les aubes et des angles d'incidence positive importants. Nous rappelons qu'à un débit-masse élevé (140% du débit nominal), le fluide est repoussé dans la conduite de sortie de diffusion de l'enveloppe. Ainsi, le point de

stagnation se situe au début de l'enveloppe sous le bec. Le refoulement associé connaît un fort épanouissement autour du bord d'attaque du bec, suivi par une très importante séparation de l'écoulement du fait du gradient de pression défavorable présent dans cette section de sortie de l'enveloppe 10.

Performances: comparatifs mesures/prédictions par calcul CFD

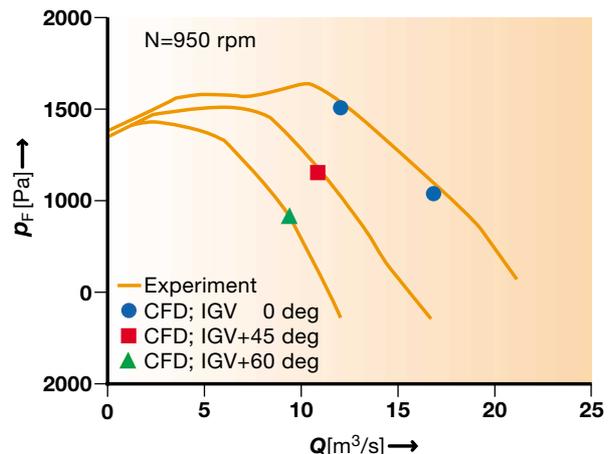
ABB Solyvent-Ventec a mesuré les performances sur un banc d'essai à l'échelle et comparé les mesures d'élévation de pression et de rendement global aux prédictions des calculs CFD. Sur les figures 11 et 12, on distingue une parfaite concordance entre les mesures et les prédictions. Le degré d'incertitude du rendement global prédit (sans prendre en compte les pertes par frottement des paliers) pour des régimes entre 80% et 140% du débit nominal est inférieur à 1,5%. Les résultats montrent que la méthode CFD permet de prédire de manière correcte la structure complexe de l'écoulement. De même, l'analyse détaillée des schémas



11 Courbes de performances montrant la bonne concordance entre les valeurs mesurées sur banc d'essai à l'échelle et les prédictions des calculs CFD.

η_F Rendement du ventilateur

Q Débit



12 Courbes de pression en sortie du ventilateur en fonction du débit. Comparaison des valeurs mesurées et des prédictions des calculs CFD.

p_F Pression en sortie du ventilateur

Q Débit

d'écoulement locaux offre une meilleure compréhension des performances d'un ventilateur spécifique. Par ailleurs, une connaissance approfondie du comportement des écoulements donne au concepteur une meilleure vue d'ensemble des performances des ventilateurs centrifuges dans leur plage de fonctionnement complète.

Evaluation de plusieurs variantes de conception

Comme le montrent les résultats de nos travaux la simulation numérique permet une étude très détaillée des phénomènes d'écoulement interne. L'utilisation d'une autre méthode, notamment la méthode expérimentale, serait beaucoup plus longue et coûteuse.

Ce qui est certain, c'est que de tels schémas d'écoulement ne peuvent être connus en utilisant

des équations empiriques 1D ou 2D, même si la résolution de ces équations reste justifiable pour l'optimisation en phase de pré-étude. Le code de calcul CFD doit être utilisé en même temps que d'autres outils de conception pour constituer un système intégré d'évaluation des différentes variantes de conception. Cette étude vient corroborer la longue expérience d'ABB dans l'utilisation des codes CFD en conception des ventilateurs, confirmant que la précision de la méthode numérique – même pour le calcul de ventilateurs complets – est suffisante pour justifier son utilisation systématique dans la recherche d'optimisation des performances des ventilateurs dans une large gamme d'applications.

Adresses des auteurs

Dr Wilfried Rick

Dr Eribert Benz

ABB Corporate Research Center Ltd

Boîte postale 5102

CH-5405 Baden-Dättwil

Suisse

Fax: +41 56 486 7359

wilfried.rick@ch.abb.com

eribert.benz@ch.abb.com

Alain Godichon

ABB Solyvent-Ventec SNC

Boîte postale 67

F-69882 Meyzieu-Cedex

France

Fax: +33 3 854 17322

alain.godichon@fr.abb.com

Bibliographie

[1] **I. Bennett, M. Veza**: Flows within industrial centrifugal fans. VDI reports no. 1249, 1996.

[2] **W. Rick**: CFD analysis of the radial fans DXW, DZW. Internal ABB report, ABB CHCRC, Sept 1998.