RECHERCHE TECHNIQUE · FRONTIÈRE DE LA MÉCANIQUE DES FLUIDES

Navier–Stokes explose : la CFD des ventilateurs tient-elle ?

Le tournant de 2026 n'invalide pas la CFD du ventilateur : il précise où faire confiance aux équations et où l'ingénieur doit s'appuyer sur l'essai.

Article technique · Équipe éditoriale SUNXFAN · 2026-11

Web: https://en.sunxfan.com/fr/blog/navier-stokes-blowup-cfd-fan-engineering/

Dans le monde du ventilateur, nous négocions avec l'air chaque jour. Chaque arc de roue et chaque courbe de volute reposent sur le même système d'équations : Navier–Stokes. Elles décrivent le mouvement d'un fluide visqueux — le socle mathématique de la prévision météorologique, de la conception aéronautique et de l'aérodynamique de chaque ventilateur centrifuge et axial que nous fabriquons.

Depuis plus de vingt ans, une question pèse sur ce socle : en trois dimensions, avec des données initiales régulières, la solution reste-t-elle régulière indéfiniment, ou peut-elle « exploser » en temps fini en portant la vitesse ou la vorticité à l'infini ?

En 2026, cette question a réellement bifurqué. Non parce qu'elle a été résolue, mais parce que la communauté mathématique a commencé à prendre au sérieux une possibilité longtemps écartée : que l'explosion soit le comportement intrinsèque d'un fluide en conditions extrêmes, et que la régularité soit le cas qui demande une explication supplémentaire.

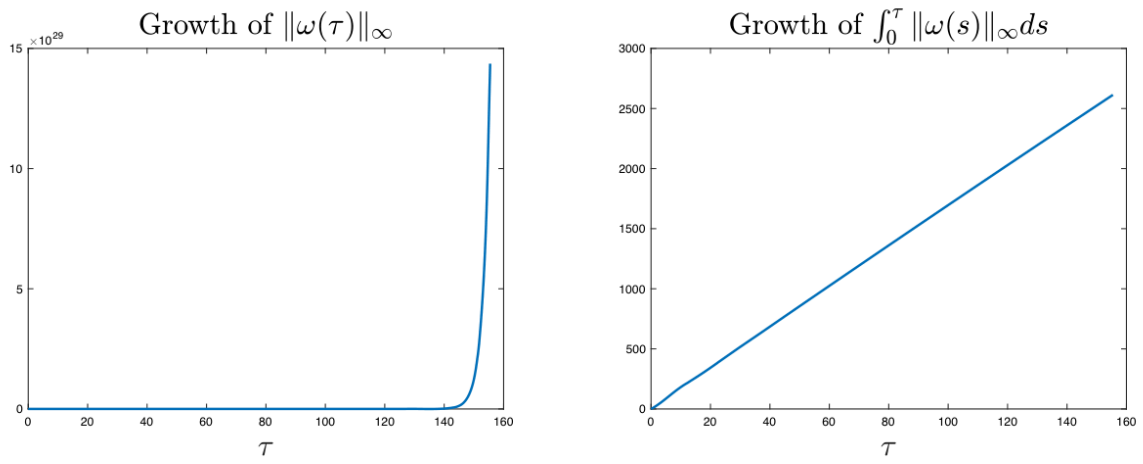


Fig. 15 Growth of maximum vorticity for the rescaled Navier-Stokes model. Left plot: the amplification of

Figure 1 — Évolution de la vorticité pour les équations de Navier–Stokes 3D dans un cadre axisymétrique généralisé. La vorticité maximale croît brutalement en temps fini et la vorticité intégrée viole le critère de Beale–Kato–Majda, soit exactement la signature numérique que laisserait une singularité en temps fini. Figure originale : référence 1 (Hou, J. FoCM 2026, Fig. 15/16).

1. Le tournant de 2026 : trois lignes de preuves convergentes

1.1 L'explosion forcée d'OpenAI : un choc pour la discipline, pas un verdict

Le 8 septembre 2026, OpenAI a annoncé qu'un système multi-agents avait construit, en une petite centaine d'heures — environ 88 —, une explosion en temps fini pour les équations de Navier–Stokes incompressibles 3D, sous l'action d'un terme de forçage régulier à support compact, le tout vérifié en Lean 4. À ne lire que le titre, on croirait une réponse directe au problème du Millennium.

L'examen critique n'a pas tardé. Un audit Lean indépendant a montré que la formalisation compilée ne traduisait pas fidèlement le manuscrit en langage naturel : le lemme 8.6 revendique le contrôle de l'opérateur inverse à m+4 dérivées, alors que le code Lean en exige m+5. L'objection de fond porte sur l'énoncé du problème lui-même. La version du Millennium est sans forçage et à énergie finie ; la construction d'OpenAI

s'appuie sur un forçage régulier conçu pour injecter en permanence de l'enstrophie dans les grands nombres d'onde. Qu'une explosion forcée réponde à une question non forcée est très loin d'être tranché. Le Clay Mathematics Institute n'a validé aucun résultat, et OpenAI a déclaré ne pas revendiquer le prix.

1.2 Le PINN de Caltech : un profil auto-similaire dans un monde sans forçage

Face à la voie forcée d'OpenAI, une équipe de Caltech a construit, à l'aide d'un réseau de neurones informé par la physique, un profil d'explosion auto-similaire pour les équations d'Euler 3D — sans forçage, sans domaine borné, en espace libre. Terence Tao a publiquement soutenu cette approche la veille de l'annonce d'OpenAI. Sa portée est méthodologique : rien n'est injecté de l'extérieur ; on laisse les équations développer leur propre singularité, ce qui se rapproche de l'image d'une instabilité hydrodynamique intrinsèque.

1.3 Le consensus se déplace : de « prouver la régularité » à « comprendre l'explosion »

Plus que toute preuve isolée, c'est le déplacement du consensus lui-même qui compte. En 2026, Tao a déclaré sans détour que la pensée de la discipline avait changé et que la conjecture de régularité était désormais largement tenue pour fausse : certaines données initiales exploseraient en temps fini. Tout au long de 2025–2026, des groupes indépendants ont rapporté des constructions ou des preuves solides issues de l'étirement en chaîne de tubes tourbillonnaires, du verrouillage topologique et de mécanismes de cascade. L'effort collectif quitte la démonstration de la régularité des solutions pour décrire quand et comment elles échouent.

2. La géométrie de l'explosion : une boucle de rétroaction d'étirement tourbillonnaire

Si Navier–Stokes peut s'emballer, c'est à cause d'un mécanisme géométrique auquel un écoulement 3D n'échappe pas : l'étirement tourbillonnaire. Étirez un tube tourbillonnaire le long de son axe et la conservation du moment cinétique le force à tourner plus vite et à s'amincir ; tourner plus vite amplifie encore l'étirement. C'est une boucle de rétroaction positive. La question mathématique est de savoir si la dissipation visqueuse est toujours assez forte pour la contenir.

Les calculs de Caltech montrent la conséquence avec netteté : dans les équations axisymétriques généralisées, la vorticité maximale croît comme $O(1/(T-t))$ en temps fini et la vorticité intégrée viole le critère de Beale–Kato–Majda, ce qui marque la formation d'une singularité en temps fini. La viscosité joue ici un rôle contre-intuitif. Parce que la régularisation visqueuse rend la solution plus régulière et plus stable, elle peut renforcer l'alignement non linéaire qui alimente l'étirement tourbillonnaire au lieu de l'amortir.

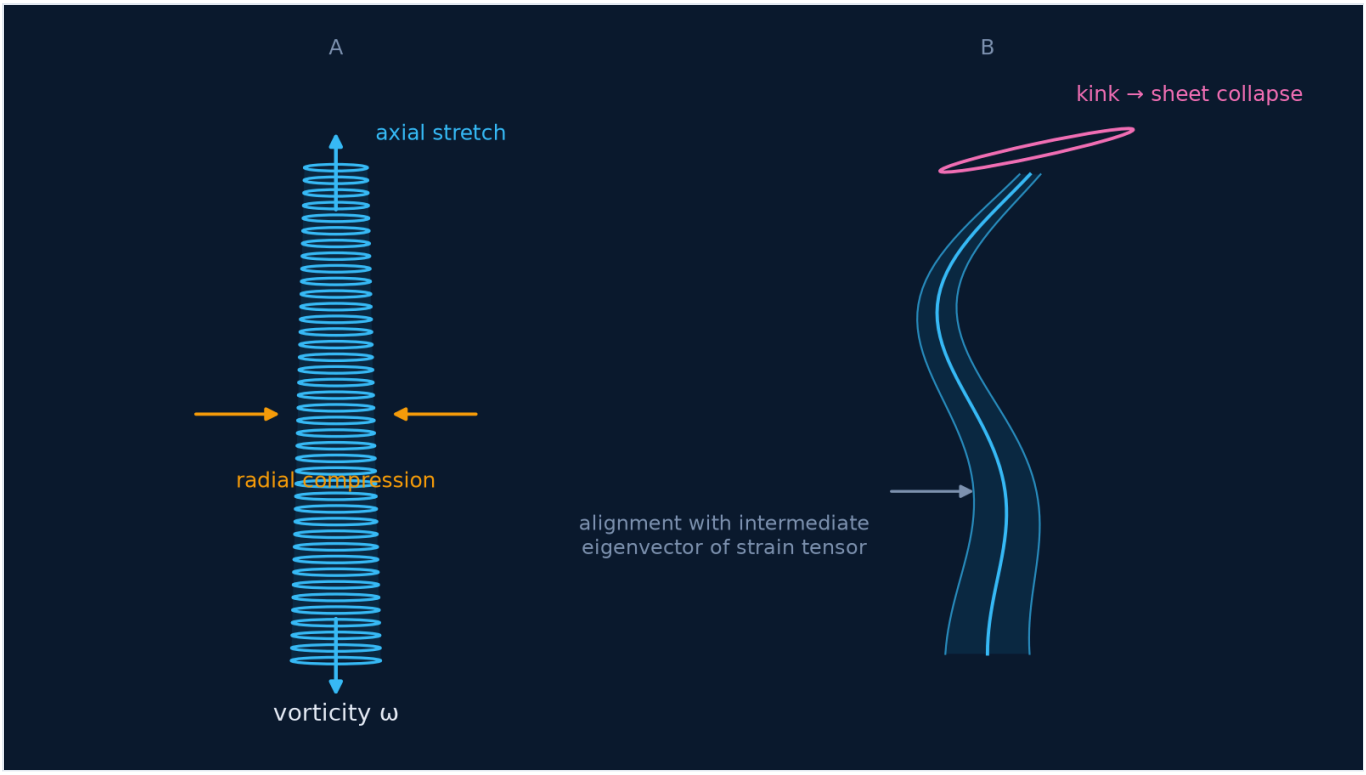


Figure 2 — Schéma de l'étirement d'un tube tourbillonnaire. À mesure que le tube s'étire axialement et se comprime radialement, la vorticité tend à s'aligner sur le vecteur propre intermédiaire du tenseur des taux de déformation, et le tube finit par se plier et s'effondrer en nappes. C'est la géométrie du terme d'étirement lui-même. Figure originale : référence 2 (Ruhr-Universität Bochum, Fig. 2.3) ; redessinée ici pour plus de clarté.

3. Ce que cela signifie pour l'ingénieur ventilation : une conclusion souvent mal lue

La lecture erronée la plus répandue est celle-ci : si Navier–Stokes peut exploser, alors la CFD — et la conception de ventilateurs qui s'y appuie — ne seraient plus valables.

C'est l'inverse qui est vrai. L'explosion est un énoncé sur un modèle continu à résolution infinie, en conditions extrêmes. La CFD d'ingénierie ne résout jamais ce problème-là. Elle résout une version apprivoisée : géométrie bornée, maillage discret, fermeture de turbulence RANS ou LES, et une cible définie en termes d'écoulement moyen. Ce que l'ingénieur affronte au quotidien n'est pas une vorticité qui part à l'infini, mais des gradients raides, des structures tourbillonnaires mal résolues, des décollements et des fermetures qui cessent discrètement de fonctionner dans certains régimes.

Une simulation des grandes échelles (LES) de 2025 sur des ventilateurs axiaux de refroidissement électronique rend cette « non-régularité d'ingénierie » visible. Aux pressions de refoulement normales (0 et 6 mmH_2O), l'écoulement côté aspiration reste attaché, des tubes tourbillonnaires d'entrée appariés apparaissent avec une bonne cohérence et les tourbillons de fuite en bout de pale sont nettement définis. À 12 mmH_2O, une zone de décollement apparaît au bord d'attaque et le tourbillon décollé se déploie en spirale vers le bout de pale. À la condition de décrochage, soit 18 mmH_2O, les tubes tourbillonnaires d'entrée disparaissent entièrement, remplacés par une turbulence de grande échelle chaotique et diffuse, tandis que la zone de décollement côté

aspiration s'étend sur environ 80 % de la hauteur de pale et 20 % de la corde. Aucune singularité n'apparaît nulle part dans ce tableau — mais un fait s'impose : les fermetures de turbulence tiennent en écoulement attaché et perdent leur crédibilité dès que le décollement s'étend et que le décrochage approche.

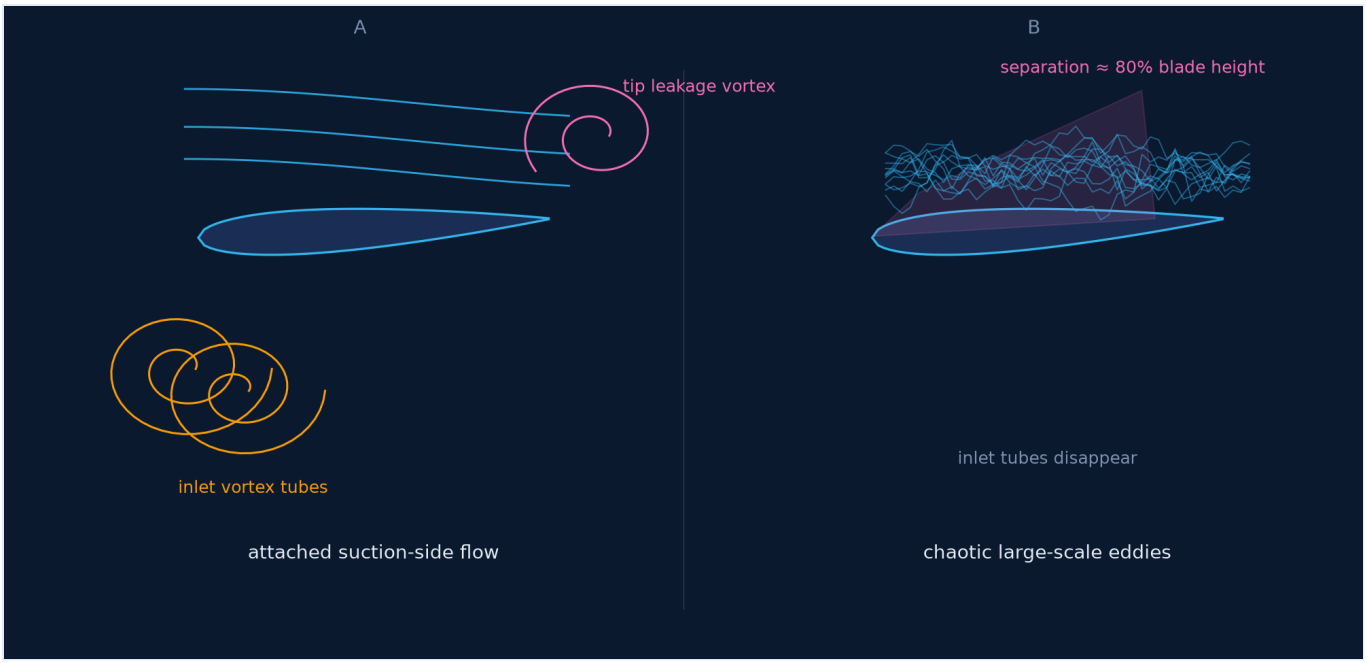


Figure 3 — Structure de l'écoulement d'un ventilateur axial, conditions normales contre décrochage. À gauche, écoulement attaché côté aspiration, tubes tourbillonnaires d'entrée cohérents et tourbillons de fuite en bout de pale bien définis ; à droite, les tubes d'entrée ont disparu, la turbulence de grande échelle domine et la zone de décollement s'étend sur la pale. C'est la réalité non régulière que la CFD d'ingénierie traite chaque jour, et elle marque la limite de validité de la fermeture. Figures originales : référence 3 (Applied Acoustics 2025, Fig. 15–18) ; schéma redessiné ici.

4. Le point de vue SUNXFAN : un modèle exact est une variable d'efficacité et de bruit

Un fait trop souvent sous-estimé dans l'industrie du ventilateur : chaque point d'efficacité aérodynamique et chaque décibel de bruit gagné provient, en dernier ressort, d'une description plus exacte de la structure de l'écoulement.

Qu'un ventilateur centrifuge EC conserve son îlot de haut rendement en charge partielle dépend de la capacité des écoulements secondaires et des tourbillons de décollement à l'intérieur de la roue à rester dans l'enveloppe prévue. Une étude CFD portant sur un ventilateur centrifuge multicellulaire à pales incurvées vers l'avant a mis en évidence une vaste zone de recirculation dans le coude à l'entrée de la roue, un décollement marqué déclenché au bord d'attaque des pales et une interaction jet–sillage entre la languette de volute et le sillage de la roue — source majeure d'instationnarité et de bruit discret. Une autre étude d'écoulement interne, menée sur le même type de machine, a également observé recirculation et grandes structures tourbillonnaires dans les canaux inter-pales, même au point de meilleur rendement. Rien de tout cela n'est une singularité mathématique, mais tout cela est la même équation de Navier–Stokes exprimée à l'échelle de l'ingénierie.

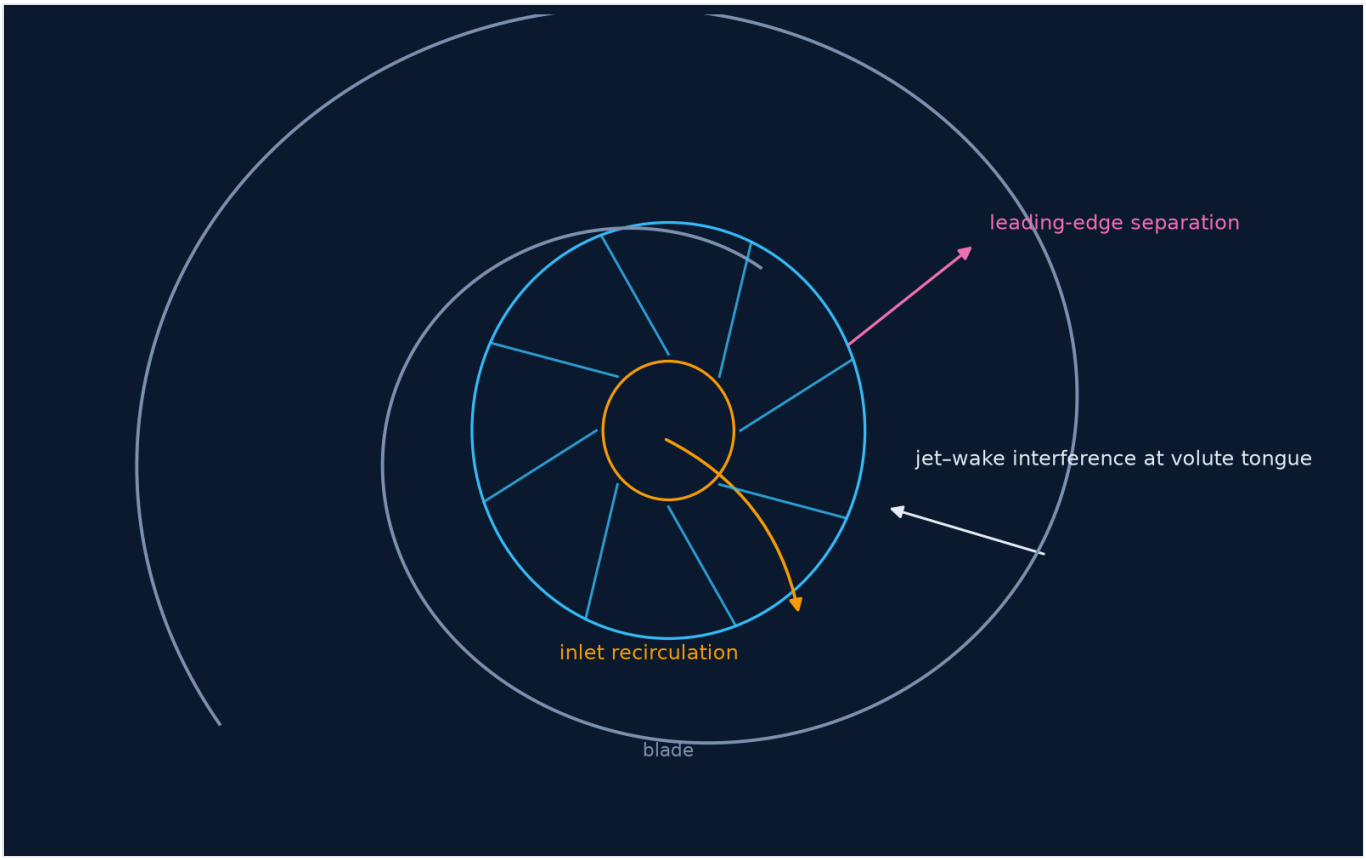


Figure 4 — Lignes de courant et champ de vitesse à l'intérieur d'une roue centrifuge. La recirculation à l'entrée, le décollement au bord d'attaque et l'interférence jet–sillage près de la languette de volute sont les sources essentielles des pertes de rendement et du bruit discret. Aucune singularité n'intervient, et c'est pourtant la même équation de Navier–Stokes à l'échelle de l'ingénierie. Figures originales : référence 4 (TU Darmstadt, Fig. 9/12) ; schéma redessiné ici.

La valeur pratique de la frontière mathématique de 2026 n'est pas la preuve de l'explosion elle-même. C'est la culture de simulation qu'elle encourage : une CFD consciente de son domaine de validité, où l'on sait quels points de fonctionnement le modèle peut porter et lesquels exigent un raffinement local, une autre fermeture ou un retour à l'essai physique. Pour les applications CVC, le refroidissement des centres de données et du stockage d'énergie, l'air propre et les architectures 800V HVDC que sert SUNXFAN, cela signifie juger plus clairement quelles décisions aérodynamiques peuvent être confiées à la CFD et lesquelles doivent être ancrées dans des données mesurées.

5. Conclusion : les mathématiques admettent que le fluide peut s'emballer, l'ingénierie apprend à vivre avec

Le problème d'existence et de régularité pour Navier–Stokes est loin d'être résolu en 2026. Le résultat d'OpenAI est contesté, la construction de Caltech attend encore une vérification indépendante, et le million de dollars du Clay Institute reste sans preneur. Ce qui a changé, en revanche, c'est l'hypothèse par défaut : la régularité globale n'est plus tenue pour acquise, et la structure, les conditions et les conséquences de l'explosion constituent désormais une cible de recherche légitime.

Pour l'ingénieur qui se tient derrière un ventilateur, c'est une posture familière. Nous n'avons jamais possédé un monde d'écoulements durablement réguliers. Nous possédons le décollement, le mélange, l'instationnarité et des couches limites aux prises avec un gradient de pression adverse. La frontière a bougé parce que les mathématiques ont enfin admis, dans leur langage le plus rigoureux, ce que l'ingénierie affronte chaque jour : l'air ne se tient pas toujours bien. Le véritable travail d'ingénierie reste de livrer un ventilateur efficace, silencieux et fiable là où il ne se tient pas bien.

References

1. Hou, T. Y. *J. FoCM* (2026) : croissance rapide de la vorticité maximale et critère de blow-up de BKM dans les équations de Navier–Stokes axisymétriques généralisées.
2. Ruhr-Universität Bochum, thèse de doctorat, Figure 2.3 : étirement de tubes tourbillonnaires et effondrement en nappes.
3. *Applied Acoustics* (2025) : LES de ventilateurs axiaux de refroidissement électronique en conditions normales et au décrochage, Fig. 15–18.
4. TU Darmstadt : analyse CFD d'un ventilateur centrifuge, vitesses et lignes de courant, Fig. 9–12.
5. Zenodo, « A Structural Dismantling of OpenAI's 'Finite-Time blowup for Navier–Stokes' », septembre 2026.
6. Zenodo, « Navier–Stokes Lost in Translation », octobre 2026 : sur le décalage de formalisation Lean et la distinction entre énoncés forcés et non forcés.
7. Terence Tao, commentaires publics sur l'évolution du consensus concernant la régularité de Navier–Stokes, 2026.

À propos de SUNXFAN® : SUNXFAN fabrique des ventilateurs centrifuges et axiaux industriels EC, DC et AC pour le CVC, la gestion thermique des centres de données et du stockage d'énergie, et les applications d'air propre, y compris des ensembles de ventilation conçus pour les architectures 800V HVDC. Nous sommes convaincus qu'une attention soutenue aux questions les plus fondamentales de la mécanique des fluides est ce qui maintient l'efficacité et la fiabilité des systèmes de ventilation sur le long terme.