



Présentations  
de la 8<sup>ème</sup> Matinée Décennale  
du 22 mai 2014

# Effets du vent, des essais en soufflerie à la modélisation numérique



Les opinions et déclarations exprimées dans cette publication n'engagent que leurs auteurs.

# SOMMAIRE

Préface .....	4
<b>1</b> Effets du vent sur les structures .....	5
<b>2</b> La simulation CFD (Computational Fluid Dynamics) au service du dimensionnement au vent des ouvrages .....	11
<b>3</b> Effets du vent, des essais en soufflerie à la modélisation numérique .....	19

# Préface

*Notre huitième Matinée Décennale, le 22 mai 2014, s'est intéressée aux effets du vent sur les ouvrages. Pour les bâtiments simples, les règlements de construction indiquent les sollicitations dues au vent, toutefois qu'en est-il des ouvrages complexes ?*

*Pour les ouvrages complexes, il faut recourir à des méthodes de simulation. La méthode traditionnelle utilisée jusqu'à présent consistait en des essais en soufflerie sur une maquette reproduisant l'ouvrage que l'on souhaitait construire. Plus récemment, nous avons vu apparaître une autre approche des effets du vent sur les constructions : la modélisation numérique. Cette méthode soulève plusieurs questions : est-elle fiable ? Reproduit-elle fidèlement la réalité ? Ses résultats sont-ils pertinents ?*

*Nous avons voulu aborder le sujet avec un esprit ouvert, en étudiant les inconvénients et les avantages de la simulation numérique et en nous posant également des questions sur les méthodes plus traditionnelles.*

*Trois intervenants ont donné vie à ce débat. Christian Barré, Responsable thématique Vent Ouvrages au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), a évoqué les effets du vent et la simulation physique, en soufflerie. Eric Delboulbé, Docteur en mécanique des fluides, gérant d'Optiflow, bureau d'étude spécialisé dans la simulation numérique des effets du vent, en a exposé les principes. Enfin, Philippe Hostalery, Ingénieur Chef de Projet Spécialiste Charpente et Coordinateur des affaires complexes au Bureau Veritas a transmis sa vision et son opinion sur les deux méthodes.*

*Dans la tradition chère à SCOR Global P&C de partage du savoir et des expériences, nous vous souhaitons bonne lecture et nous tenons à votre disposition pour en discuter davantage.*

**Jean Tuccella,**  
*Directeur Département Décennale,  
SCOR Global P&C*

# 1

## EFFETS DU VENT SUR LES STRUCTURES

Christian Barré,  
*Ingénieur d'Études et Recherches au Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Responsable thématique Vent-Ouvrages.*

Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) a pour mission de rassembler, développer et partager avec les acteurs de la construction les connaissances scientifiques et techniques déterminantes pour faire progresser la qualité et la sécurité des bâtiments et de leur environnement. Ces connaissances portent sur l'ensemble des enjeux socio-économiques de sécurité, de santé, de confort, d'environnement et d'énergie qui s'imposent aux bâtiments, aux quartiers et aux villes. L'étude des effets du vent tient une place centrale dans les activités du CSTB. Ainsi, avant d'être confronté aux effets du vent sur le terrain, chaque projet de construction doit faire l'objet de tests.

L'ingénierie du vent est un domaine d'expertise qui repose sur des connaissances approfondies en matière d'aérodynamique et de comportement des structures et qui dispose d'outils tels que l'approche réglementaire et les approches de simulation des effets du vent. L'approche réglementaire reste la base de

l'étude des effets du vent. Pour les cas complexes, elle est suppléée par la simulation physique, à échelle réduite ou à échelle 1, et par la simulation numérique. Ces deux approches de simulation ne s'opposent pas mais se complètent. La connaissance peut également se construire sur l'étude des effets du vent sur les structures existantes, appelée étude vraie-grandeur. Ce retour d'expérience permet d'apprendre et de recalibrer nos systèmes de simulation physique ou numérique. Toute cette expérience est accessible au travers de la bibliographie. La somme des travaux scientifiques des experts publiés dans des revues internationales constitue un patrimoine de connaissances partagées qui peut être appliqué. Les hommes des souffleries et les numériciens sont d'abord des ingénieurs en aérodynamique, qui ont acquis une excellente connaissance des structures et qui ont recours à l'ensemble de ce fond de connaissances.

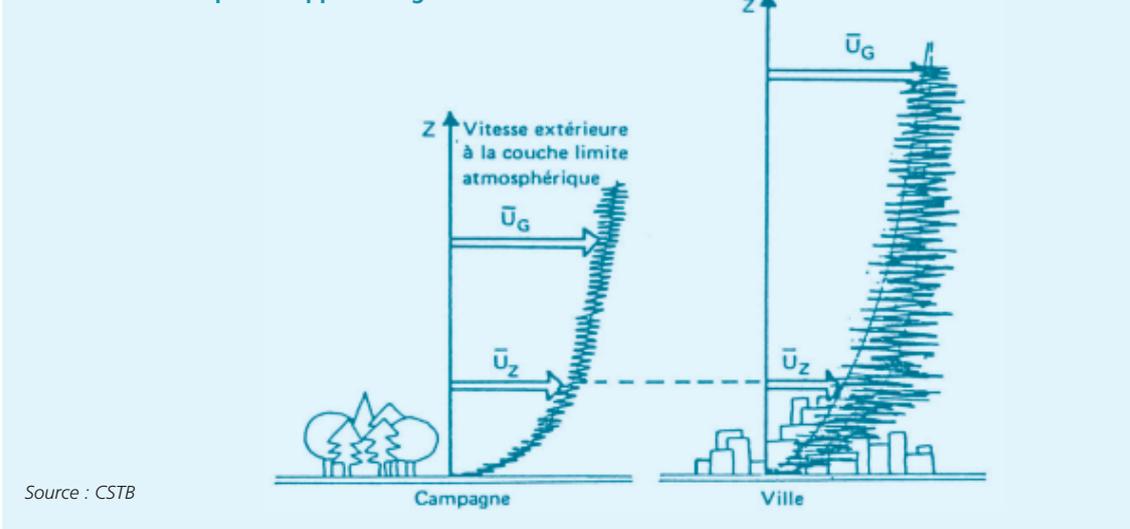
### Qu'est-ce que le vent ?

Pour rester simple, les vents circulent plutôt des hautes pressions vers les basses pressions. Cet écoulement général interagit avec les rugosités de la surface du sol : mer, rase campagne ou bocage, banlieue ou centre-ville. Ces rugosités génèrent une couche limite, autrement dit la vitesse du vent varie en fonction de la hauteur, les particules d'air en contact avec ces rugosités étant ralenties tandis que celles se trouvant en altitude le sont moins, voire pas du tout. Cette variation en fonction de la hauteur est appelée le « gradient de vitesse ». Les rugosités, qui sont des obstacles pour l'écoulement du vent,

provoquent également des fluctuations de la vitesse ou turbulences.

La vitesse du vent doit être vue en trois dimensions. Chaque composante fluctue en fonction du temps ; ce caractère instationnaire s'exprime en termes de fréquence. Le vent a un contenu énergétique : il peut donc exciter les structures dont les fréquences des modales sont situées dans la gamme de ses fréquences turbulentes. Le vent a aussi des dimensions, appelées échelles de turbulence, dans lesquelles les fluctuations de vitesse sont relativement cohérentes.

Figure 1 : La vitesse du vent, extérieure à la couche atmosphérique, varie en fonction de la hauteur. Cette caractéristique est appelée le gradient de vitesse.



Source : CSTB

## Importance de la condition d'entrée

Outre la variation de vitesse, l'action de la turbulence sur l'orientation du vecteur vitesse agit directement sur les structures. Pour illustrer cette action, considérons le cas simple d'une plaque exposée à un vent parallèle à la plaque. Dans le cas d'un écoulement sans turbulence (stationnaire), la force normale à la plaque (portance) est nulle car l'écoulement est symétrique. Mais le vent est turbulent (instationnaire), la vitesse à un instant  $t$  peut être en incidence par rapport à la plaque et la force normale instantanée est non nulle. C'est cet événement instantané qui dimensionne la structure au vent, un point important à considérer.

En matière de simulation des effets du vent, que ce soit une simulation physique à échelle réduite ou une simulation numérique, pour faire apparaître l'action instationnaire du vent, il est nécessaire que l'écoulement d'entrée du domaine (soufflerie ou

domaine numérique) traduise le caractère turbulent du vent.

En soufflerie à couche limite atmosphérique (exemple de la soufflerie du CSTB à Nantes), la turbulence est reproduite au moyen de rugosités placées à l'amont de la maquette. Ces obstacles permettent de simuler les caractéristiques du vent, c'est-à-dire, le gradient de vitesse, l'intensité de turbulence, l'énergie en fonction de la fréquence et la taille des tourbillons à l'échelle de la maquette.

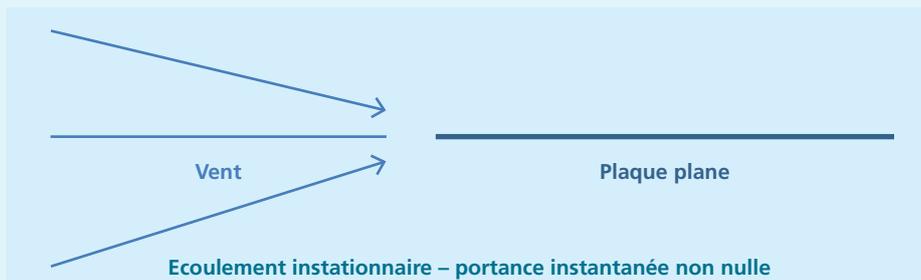
L'expérimentateur doit également s'assurer que les comportements simulés à échelle réduite en soufflerie sont représentatifs des comportements vraie-grandeur. Cette garantie est assurée en respectant des conditions de similitude qui traduisent au travers de nombres sans dimension des rapports des phénomènes physiques.

Figure 2 : Effets de la turbulence

Chart 1



Chart 2



Source : CSTB

## La soufflerie physique : un outil d'aujourd'hui

La soufflerie à couche limite atmosphérique est un outil relativement récent. Celle du CSTB a une trentaine d'années. Les souffleries à couche limite atmosphérique sont encore construites. Il s'agit donc bien d'un outil d'aujourd'hui, en cours de développement.

La métrologie évolue rapidement elle aussi. À titre d'exemple, pour mesurer les efforts en soufflerie, nous disposons de :

- balances dynamométriques : elles permettent de mesurer en fonction du temps les six composantes du tenseur des efforts, trois forces et les trois moments associés. Comme le vent est instationnaire, les balances doivent avoir une réponse suffisamment rapide pour capter l'instant dimensionnant associé à la rafale de vent maximum et à la direction la plus

défavorable. Ces balances sont très rigides afin de pouvoir capter l'instant majorant de l'effort sur la structure.

- scanners de pression : il s'agit de capteurs de pression qui ont la capacité d'être acquis en synchrone à chaque instant. Le CSTB a développé un scanner capable d'acquérir 1000 voies de pression à 1000 hertz, soit 1 million d'informations/seconde pour identifier la variation du champ de pression en 1000 points de l'enveloppe d'un bâtiment. À partir d'un champ de pression instantané défini sur un grand nombre de points de mesure, il est ainsi possible d'identifier les efforts globaux instationnaires par intégration sur l'enveloppe des pressions locales.

## Types d'études menées en soufflerie

Les études climatiques permettent de caractériser le vent sur un site, par exemple le long du tablier d'un pont. La vitesse du vent peut être mesurée directement sur le site de construction au moyen d'un mât anémométrique et complétée si nécessaire par des approches soufflerie sur maquette topographique à une échelle réduite.

Les études d'ambiances climatiques concernent le

confort du piéton au niveau du sol ou en terrasses de bâtiments. Il est possible d'optimiser les espaces extérieurs de façon à garantir le confort ou au moins limiter les zones d'inconfort.

En matière de dimensionnement au vent, plusieurs approches fonction du comportement de la structure vis-à-vis du vent sont proposées :

Figure 3 : Maquette rigide de la tour Phare dans la soufflerie du CSTB



Source : CSTB

- Lorsque les déplacements de la structure vraie-grandeur restent faibles, ils ne peuvent pas modifier le champ de pression exercé par le vent sur l'enveloppe. On peut alors simuler le comportement de la structure au moyen d'une maquette rigide. C'est généralement le cas pour les bâtiments. Cette approche quasi-statique permet de caractériser les efforts locaux pour le dimensionnement de l'enveloppe à l'échelle du mètre carré et les efforts globaux tels que les forces ou les moments de renversements. La contribution dynamique de la structure peut ensuite être déterminée par calcul.

Figure 4 : Pont de Tacoma – Flottement en torsion avant destruction du tablier



Source : CSTB

- Lorsque les déplacements sont importants, ils peuvent modifier considérablement les champs de pression. L'approche quasi-statique n'est plus représentative du comportement de la structure. C'est le cas des structures souples comme les ponts, pour lesquelles des instabilités aérodynamiques peuvent apparaître. Un exemple célèbre est l'accident du pont de Tacoma, survenu en 1941. Ce pont a été détruit quelques mois après sa mise en service, alors que le vent ne soufflait qu'à environ 60 km/h. Ce n'est pas la force du vent qui a brisé le pont, mais bien un effet aéroélastique de couplage entre le déplacement du tablier et la force exercée par le vent. Afin de reproduire le comportement des structures souples, il faut construire une maquette qui représente le comportement dynamique de la vraie structure. Les déplacements de la maquette sont l'image à l'échelle du comportement de la structure vraie-grandeur.

## Étude de la stabilité des ponts

---

La première étape consiste à vérifier la stabilité du tablier sur maquette sectionnelle rigide accrochée à un jeu de ressorts permettant de représenter le premier mode de flexion et le premier mode de torsion. Cette approche, généralement réalisée à une échelle du 1/50<sup>ème</sup>, permet de représenter finement la géométrie du tablier et de caractériser l'instabilité de détachement tourbillonnaire et l'instabilité de flottement. Si nécessaire, il est possible de modifier la géométrie du tablier de façon à éliminer ou réduire au maximum le détachement tourbillonnaire et repousser la vitesse critique de flottement au-delà des vitesses possibles sur le site avec une marge de sécurité suffisante.

Une fois assurée la stabilité du tablier, on doit préciser la réponse du tablier au vent turbulent. Afin de représenter le comportement de l'ensemble de la structure, on construit une maquette qui reproduit le comportement dynamique en flexion et en torsion de la vraie structure. Il s'agit de maquettes composées de cordes tendues sur lesquelles sont représentés les éléments de voussoir non jointifs de façon à limiter l'amortissement. Les déplacements de la maquette sont l'image à l'échelle du comportement de la structure vraie-grandeur. On obtient ainsi la réponse de l'ouvrage en mesurant directement les déplacements de la structure soumis à la turbulence du vent.

Pendant la phase de construction, avant clavage des fléaux de tablier, les ponts sont particulièrement sensibles aux effets du vent. Il faut donc s'assurer de la stabilité sous vent de tempête. Comme pour le pont en service, une maquette simulant les modes de la structure intégrant le tablier et le pylône peut être construite.

Certaines instabilités ne peuvent être étudiées à l'échelle 1, comme l'interaction du vent et de la pluie sur les haubans. Cette interaction est connue depuis peu de temps. En soufflerie, nous avons pu comprendre pourquoi elle se produisait et surtout découvrir comment l'annuler. Concrètement, les gouttes de pluie viennent s'agglomérer sur le hauban et forment un filet continu dont le mouvement excite le hauban. Pour détruire l'excitation, il faut détruire ce filet d'eau, d'où l'existence des hélices que l'on peut observer sur les haubans des grands ponts.

Compte tenu de leur sensibilité au vent, la réponse au vent de ces grands ouvrages est vérifiée sur site après leur mise en service. Ce retour d'expérience montre que les résultats des approches expérimentales en soufflerie coïncident fort bien avec l'observation du comportement vraie grandeur. C'est un point important de l'expertise en aérodynamique : la maîtrise des approches de simulation se nourrit du retour d'expérience de la vraie grandeur.

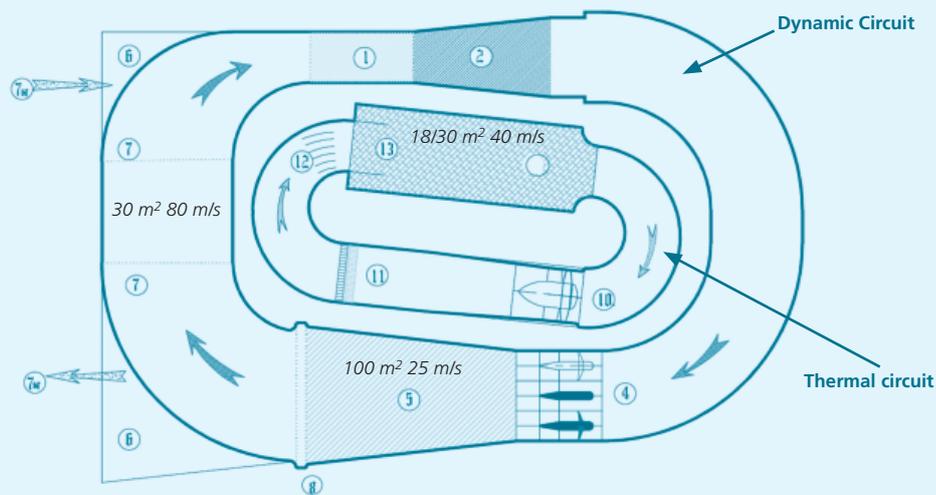
# Simulation physique échelle 1

## LA SOUFFLERIE JULES VERNE DU CSTB DE NANTES

La soufflerie climatique Jules Verne permet de travailler directement à l'échelle 1. Dans l'une de ses trois veines d'essais, on peut reproduire le vent, la pluie calibrée en quantité et en diamètre de gouttes ou encore des vents de sable. Il est ainsi possible de tester la tenue

au vent de petites structures ou d'éléments de façade jusqu'à 280 km/h, de caractériser des phénomènes de mouillabilité d'enveloppe ou d'étanchéité à la pluie ou encore de valider l'étanchéité au sable de systèmes mécaniques.

Figure 5



Le circuit dynamique de la soufflerie Jules Verne comporte trois veines d'essais, qui permettent de reproduire la structure spatio-temporelle du vent, la pluie et les vents de sable jusqu'à 90 km/h ou encore de mesurer des coefficients aérodynamiques de véhicules automobiles jusqu'à 280 km/h. Le circuit thermique permet de reproduire un très large éventail de paramètres climatiques combinés à un écoulement d'air pouvant atteindre 140 km/h.

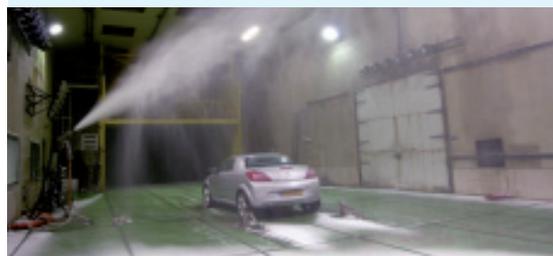
Figure 6



Source : CSTB

En raison des fortes vitesses qu'elle atteint, cette soufflerie permet aussi de travailler à grand nombre de Reynolds sur modèle à échelle réduite. Cette possibilité est mise à profit dans le cadre d'études de la stabilité des trains rapides ou encore de simulation dans l'air d'écoulements hydrodynamiques (Figure 6).

Figure 7



Source : CSTB

La chambre expérimentale du circuit thermique est un simulateur de climat qui permet outre la reproduction du vent, de contrôler la température de  $-32^{\circ}$  à  $+50^{\circ}$  et le taux d'hygrométrie de l'air, de reproduire la neige, le brouillard, le givrage ou encore simuler un ensoleillement au moyen de rampes de projecteurs. Cette soufflerie équipée d'un banc à rouleaux est très adaptée à l'automobile (Figure 7).

Dans le domaine du bâtiment, les problématiques d'accumulation de neige, d'accumulation du givrage, ainsi que la fonte et la chute des blocs de givre peuvent aussi être étudiées.

## Un cas concret de complémentarité des approches : la Tour Phare

Le projet de la Tour Phare dans le quartier d'affaires de la Défense illustre bien la complémentarité des approches menées au CSTB. La Tour Phare, avec ses 297 mètres, sera presque aussi haute que la Tour Eiffel. Les études climatiques ont permis de préciser les caractéristiques du vent sur le site de construction. L'approche numérique a été utilisée pour un prédimensionnement de la structure.

Les charges aérodynamiques locales, globales et le comportement dynamique de la tour ont été étudiés en soufflerie sur modèle physique à échelle réduite. Le comportement de la double-peau de la tour au vent et au givrage, ainsi que l'impact visuel et les éventuels phénomènes aéroacoustiques ont été testés à l'échelle 1 en soufflerie climatique. Enfin, les ambiances climatiques ont été étudiées.

Figure 8



Tests échelle 1 sur prototypes de la double peau de la **Tour Phare** :

- Charges locales, comportement dynamique et aéroacoustique,
- Impact visuel
- Comportement à la neige et au gel, combinatoire des événements vent/neige et vent/gel

Source : CSTB

## Physique et numérique : deux simulations complémentaires

Le CSTB réalise au quotidien des simulations physiques et numériques. A notre sens, ces deux approches sont complémentaires et doivent se nourrir l'une de l'autre. La simulation physique ne doit pas être considérée comme la simulation d'hier, tandis que le numérique serait la simulation de demain. Ces deux outils permettent de traiter des mêmes domaines et, en

raison de leur complémentarité, d'aller plus loin dans bien des cas ; ils sont tous les deux au service d'une expertise aérodynamique mise en œuvre par des professionnels. Le savoir-faire de ces experts, qui disposent du recul aussi bien sur leurs outils que sur le champ plus général de la connaissance aérodynamique, est essentiel.

# 2

## LA SIMULATION CFD AU SERVICE DU DIMENSIONNEMENT AU VENT DES OUVRAGES

Eric Delboulbé  
*Docteur en mécanique des fluides,  
gérant du bureau d'études Optiflow*

Créé en 1998 par de jeunes docteurs en mécanique des fluides, le bureau d'études Optiflow applique depuis seize ans les fruits des recherches en mécanique des fluides numérique aux problématiques architecturales et urbaines. Compte tenu de nos expériences antérieures, nous pouvons nous targuer d'avoir plus de vingt ans de savoir-faire dans le domaine de l'application de la simulation numérique à l'étude des effets du vent, ce qui fait de nous des précurseurs dans ce domaine. Nous sommes basés à Marseille et disposons d'un bureau à Turin. Nous possédons nos propres moyens

très importants de calcul.

La simulation numérique en Mécanique des Fluides (CFD : Computational Fluid Dynamics) existe depuis une trentaine d'années. Son utilisation a d'abord été destinée aux domaines de la défense, de l'aéronautique, puis de l'automobile. Les capacités croissantes de calcul et la connaissance de la physique du vent nous ont progressivement permis d'appliquer ces technologies aux problématiques liées aux écoulements du vent autour de bâtiments puis au sein de villes.

### La CFD (Computational Fluid Dynamics), qu'est ce que c'est ? \_\_\_\_\_

La CFD est la résolution des équations qui régissent la mécanique des fluides par des outils numériques. Ces équations, dites de Navier-Stokes, sont les lois de conservation de la masse et de la quantité de mouvement. Il s'agit d'équations extrêmement complexes aux dérivées partielles, auxquelles peuvent venir se greffer d'autres équations en rapport avec les variables thermiques ou le transport de polluant. Des méthodes mathématiques sont utilisées pour les transformer en équations algébriques qu'il est possible de résoudre grâce à des méthodes numériques complexes basées sur des bilans locaux de flux dans de petits volumes d'air. Ces volumes sont obtenus par une opération de maillage, qui consiste à décomposer le domaine de calcul (volume d'air qui entoure l'objet auquel on s'intéresse) en petits sous-volumes dans lesquels sont réalisés les bilans des équations à résoudre. Ainsi, dans chaque

petit volume élémentaire, également appelé cellule, une équation algébrique donnant la valeur de la variable locale en fonction des valeurs de cette même variable dans toutes les cellules avoisinantes est ainsi obtenue. Le système d'équations ainsi constitué est gigantesque car le maillage est souvent composé de dizaines de millions de cellules.

Idéalement, il faudrait que la taille de chaque cellule soit telle qu'il n'y ait pas de variation possible de la variable traitée en son sein. Or, pour le vent, les variations spatiales et temporelles des phénomènes physiques sont tellement petites qu'il faudrait un nombre de cellules colossal pour répondre à cette exigence. Nous utilisons donc des méthodes qui permettent d'utiliser des cellules plus grandes tout en tenant compte de ce qui se passe à des échelles spatiales inférieures.

Dans le domaine architectural et urbain, les outils de

simulation numérique sont applicables à l'étude de la climatique et de la physique des ouvrages et des espaces urbains. Il est également possible d'entrer dans les ouvrages afin d'observer ce qui s'y passe. Il ne s'agit pas là de se préoccuper des effets du vent, mais plus globalement du comportement thermique et aérodynamique

de grands volumes architecturaux associés aux systèmes climatiques qui y sont intégrés. La simulation peut en effet permettre de modéliser les mouvements d'air, les échanges thermiques associés à ces mouvements et donc d'aider à concevoir des systèmes climatiques performants des ouvrages.

## Soufflerie physique et soufflerie numérique : principales caractéristiques

Penchons-nous maintenant spécifiquement sur l'application de la simulation numérique au dimensionnement au vent. L'objectif majeur de telles études est de déterminer les charges quasi-statiques exercées par le vent sur un ouvrage en considérant que ce dernier ne se déforme pas, comme c'est le cas en soufflerie physique. Il est toutefois possible d'utiliser les résultats des simulations numériques pour appréhender la réponse dynamique de la structure aux charges de vent sur ces ouvrages.

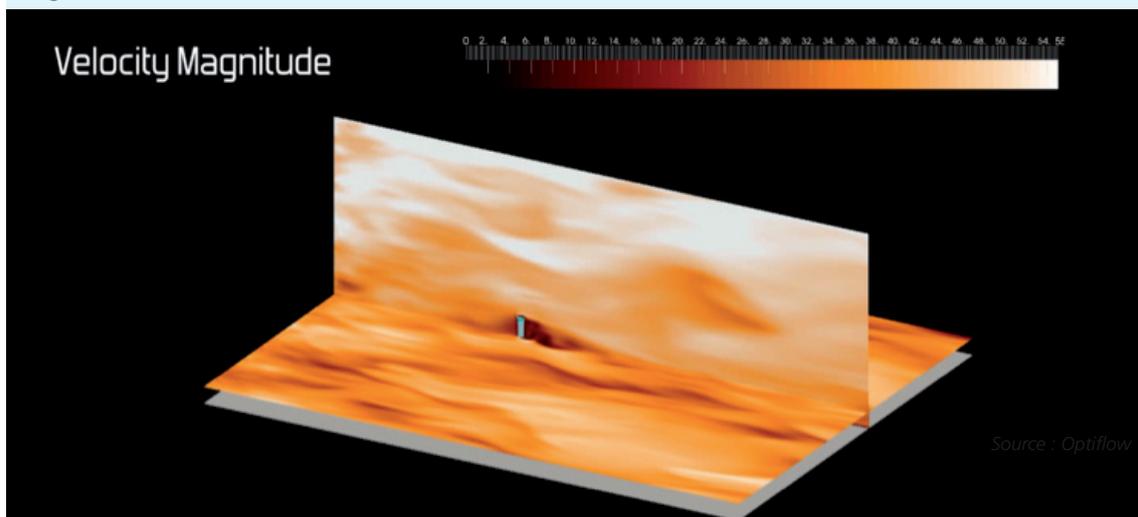
En CFD, comme cela est le cas en soufflerie, la première étape consiste à reproduire le vent. Sur le plan de ses caractéristiques moyennes, le vent voit sa vitesse augmenter et son intensité de turbulence diminuer avec l'altitude. Il est bien sûr nécessaire de parvenir à modéliser ces caractéristiques moyennes mais cela n'est pas suffisant. Il est également impératif de s'assurer que le vent modélisé reproduise bien le contenu fréquentiel de la turbulence du vent réel (rafales, tourbillons...). En soufflerie physique, la démarche employée pour cela est empirique. Des blocs ou des appendices de taille importante sont d'abord utilisés pour créer les grosses

structures turbulentes puis de plus petits blocs, plus près de la maquette, vont interagir avec ces grosses structures à proximité du sol et reproduire une turbulence réaliste du vent. Il y a autant de formes et d'agglomérats de blocs qu'il y a de souffleries. Chacune a ses secrets de fabrication, tous sensés reproduire la vérité mais tous un peu différents...

En soufflerie numérique, nous utilisons des générateurs numériques qui délivrent un signal aléatoire à l'entrée de notre domaine de calcul qui va contenir toutes les échelles de temps et d'espace du vent.

La figure 1 représente l'intensité de la vitesse du vent. Dans cette illustration, le vent vient de la gauche. Plus la couleur est claire, plus la vitesse du vent est importante. Il est visible que le vent imposé sur l'ouvrage n'est pas un vent constant. Il intègre des turbulences dont le niveau varie verticalement et latéralement. La nature du vent est évidemment dépendante de ce qu'il a trouvé sur son chemin avant d'arriver sur l'ouvrage. Il peut donc être différent en fonction de la direction du vent. Tous ces éléments doivent être considérés lors de la modélisation du vent qui va impacter l'ouvrage étudié.

Figure 1



La maquette construite en soufflerie physique utilise différents matériaux, historiquement plutôt du bois, du plexiglas, mais aujourd'hui de plus en plus de résine

en raison de l'utilisation de plus en plus fréquente de l'impression 3D qui permet d'aller plus loin dans les détails géométriques des maquettes. Généralement,

L'échelle utilisée pour les grands ouvrages bâtis est au 1/200<sup>ème</sup> ou 1/250<sup>ème</sup>. Ce point laisse à réfléchir aux phénomènes liés à la réduction d'échelle, au problème de la similitude entre ce qui se passe autour d'un ouvrage à l'échelle 1 et d'un ouvrage à une échelle réduite, particulièrement pour les obstacles aux formes un petit peu arrondies, qui posent plus de difficultés que les obstacles à arêtes vives.

En soufflerie numérique, la maquette existe bien, mais elle est numérique. L'échelle est réelle la plupart du temps, mais elle peut être réduite pour limiter les temps de calcul. Une fois la maquette numérique 3D de l'ouvrage conçue, nous positionnons autour de cette dernière tous les éléments susceptibles d'exercer une influence sur le vent qui va se développer autour du projet étudié. En soufflerie physique, on désire avoir les maquettes les plus grandes possibles afin de limiter les problèmes de similitudes et permettre de les instrumenter plus facilement. Toutefois, plus la maquette est de taille importante, moins il est possible d'ajouter des éléments autour, car les frontières latérales et verticales de la veine de la soufflerie sont évidemment figées. En soufflerie numérique, la taille du domaine de calcul n'est pas une limite. Il est donc possible de modéliser l'environnement de l'ouvrage sur une très grande distance à ce dernier si nécessaire.

En soufflerie physique, il faut ensuite implanter

des capteurs de prise de pression et les relier aux enregistreurs. Des tubes en plastique ou en métal sont utilisés pour cette liaison entre les capteurs et les centrales d'acquisition. Ces éléments de mesure peuvent donc se trouver autour de l'ouvrage étudié et donc présenter un caractère intrusif. Enfin, des balances dynamométriques sont utilisées pour déterminer les charges globales des parties des ouvrages qui sont pesées.

En numérique, ces contraintes n'existent pas. Nous sommes capables d'obtenir les valeurs des variables traitées partout dans notre domaine de calcul. La seule chose à faire est de gérer cette abondance de résultats afin d'alimenter efficacement les personnes qui vont utiliser nos études. En soufflerie physique, une mesure ponctuelle est réalisée puis est interpolée ou extrapolée pour fabriquer une information continue. C'est l'inverse en soufflerie numérique. On part d'une information continue pour la moyennner spatialement afin de faciliter son exploitation. Or, l'opération de moyenne est largement moins génératrice de source d'erreur que celle d'interpolation.

En numérique, une fois les simulations préparées, une importante partie du travail reste à faire. Il convient en effet de réaliser les simulations, ce qui requiert l'utilisation de très puissants calculateurs, capables de résoudre efficacement des centaines de millions d'équations pour réaliser les simulations.

## Des mesures aux résultats similaires

Les données mesurées en soufflerie se présentent sous forme d'évolutions temporelles des pressions exercées au niveau des capteurs pariétaux (au nombre de 500 à 1000) et de composantes du torseur aérodynamique obtenues par les balances dynamométriques.

En soufflerie numérique, nous disposons de plusieurs dizaines, voire centaines de milliers de points de mesure sur la surface de l'ouvrage. Pour les valeurs locales, nous ne stockons généralement que les valeurs de pointes des pressions utilisées pour le dimensionnement des façades et des couvertures et en particulier pour l'ancrage des éléments qui les constituent (même si nous pouvons enregistrer toutes leurs évolutions temporelles si besoin).

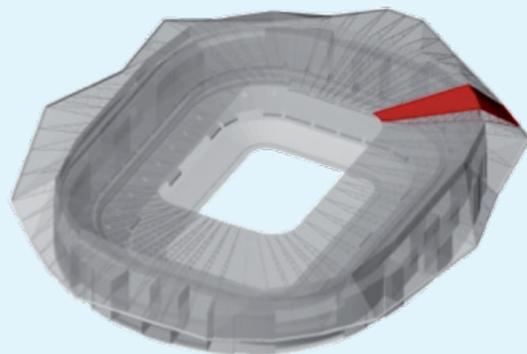
Pour ces valeurs locales, le résultat obtenu est quasiment similaire entre numérique et soufflerie physique, même s'il est plus fin spatialement en numérique. Pour les valeurs globales, les résultats sont également du même ordre.

La différence existe pour les charges semi-globales. Il est en effet souvent nécessaire d'avoir recours à une échelle intermédiaire de traitement. Dans l'exemple du stade de Lyon (Figure 2) par exemple, le bureau d'étude en charge du dimensionnement de la structure de la couverture du stade voulait savoir comment se comportait chacune des sous structures de cette dernière.

En soufflerie physique, il serait nécessaire, pour

répondre à cette demande, de réaliser une interpolation des valeurs ponctuelles de pressions obtenues. Cette opération nécessiterait un calibrage entre les résultats directs de la balance et ceux résultant de l'intégration spatiale des pressions ponctuelles sur la couverture. Il s'agit d'opérations compliquées, sources d'erreurs non négligeables. En soufflerie numérique, on obtient directement les charges qui sont appliquées sur tous les sous-ensembles du stade préalablement identifiées par des calculs intégraux des différentes composantes des efforts obtenus en tous leurs points.

Figure 2 : Stade de Lyon



Source : Optiflow

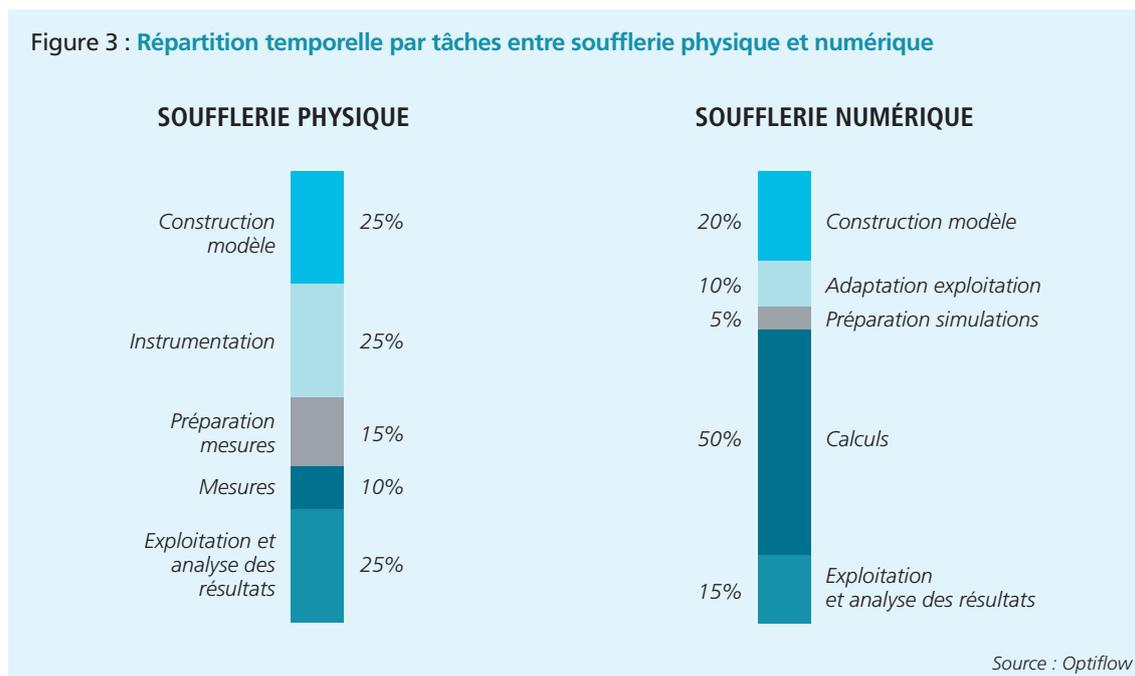
## Une échelle de temps différente

En soufflerie physique, les préparatifs prennent beaucoup de temps : construction de la maquette, instrumentation, préparation des mesures... Les mesures en elles-mêmes sont toutefois relativement rapide alors que l'analyse et la transformation des résultats peuvent être des opérations très lourdes.

En CFD, nous n'avons pas de construction physique de maquette, ni d'instrumentation. Nous effectuons

toutefois un découpage d'exploitation en préparation à l'exploitation des résultats, et la préparation des simulations, mais ces tâches ne prennent pas énormément de temps. En revanche, la réalisation des calculs prend à peu près la moitié du temps de l'étude lorsque le nombre de directions de vent à étudier est important. L'exploitation des résultats est plus courte qu'en soufflerie en raison de la préparation en amont.

Figure 3 : Répartition temporelle par tâches entre soufflerie physique et numérique



Les deux méthodes ont leurs sources d'incertitudes, voire d'erreurs.

Avec le numérique, elles sont de plusieurs ordres :

- Comme évoqué précédemment, le filtre appliqué aux structures modélisées dépend directement de la taille des cellules du maillage utilisé pour la réalisation des simulations. Une réduction de la taille de ces cellules pour économiser du temps de calcul aura donc des répercussions potentiellement énormes sur la qualité des simulations réalisées.
- Les choix de paramétrage des modèles : nous travaillons sur son optimisation depuis vingt ans, et le maîtrisons donc bien. Cette situation ne nous empêche pas de continuer à suivre attentivement les travaux et avancées scientifiques universitaires consacrés à ces sujets afin de continuer à affiner nos choix.

En soufflerie physique, les sources d'incertitude principales sont :

- le facteur d'échelle et les phénomènes de similitude entre ce qui se passe à une échelle réduite et ce qui se passe à une échelle réelle
- les effets de blocage de veine
- les limitations des instruments de mesure
- le caractère ponctuellement intrusif de certains moyens de mesure.

Nous avons participé à certaines campagnes dont le but était de comparer, sur des objets relativement simples, les résultats de mesures réalisées dans différentes souffleries physiques et, parallèlement, entre les résultats de simulations numériques réalisées par différentes équipes. Les écarts observés entre les mesures en soufflerie entre elles et les résultats des simulations numériques entre eux se sont avérés être du même ordre de grandeur.

## Avantages et inconvénients

---

La soufflerie physique a un côté très rassurant. C'est facile à comprendre et à visualiser ; on met un objet dans un canal de vent et on mesure. La simulation numérique est beaucoup plus opaque, beaucoup moins facile à appréhender au premier abord. Les prestataires sont rares en soufflerie physique. Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) est le seul en France et il est très compétent. Toutefois, le marché est aujourd'hui européen, voire bientôt mondial, et toutes les souffleries n'atteignent pas la même finesse d'analyse et d'expertise. Le numérique est financièrement beaucoup plus abordable à mettre en œuvre, ce qui est son danger principal. Son utilisation peut en effet s'avérer extrêmement dangereuse lorsqu'elle l'est par des personnes qui n'appliquent pas la rigueur scientifique nécessaire à son bon usage et à l'obtention de résultats valables.

En soufflerie physique, les moyens de mesure sont limités, le nombre de prises de pression est restreint et la pesée d'une partie de l'ouvrage est impossible. La CFD est un outil formidable en raison de la quantité de données qui peuvent être extraites. Elle donne accès à des dizaines ou des centaines de milliers de résultats, supprimant le risque généré par l'interpolation.

Il est également possible de s'immerger dans les écoulements afin de regarder ce qui se passe autour de l'ouvrage, à la fois pour comprendre et pour quantifier les phénomènes aérodynamiques qui se développent autour de ce dernier.

En soufflerie numérique, comme c'est le cas en soufflerie physique, nous sommes confrontés à la limitation de la fréquence d'acquisition. En soufflerie cela est dû à la limite physique de la méthode de mesure alors qu'en simulation cela est principalement dû à une limitation des moyens de calcul. Dans un futur proche, cela devrait donc être beaucoup plus facile à résoudre en numérique avec l'augmentation croissante de la puissance des supercalculateurs.

Les études en soufflerie physique sont relativement chères et les délais longs, même si le CSTB travaille à la réduction de ces délais, et que l'impression 3D permet de gagner du temps. Ainsi, indépendamment de la disponibilité des moyens d'essais, entre la lettre de commande et la remise d'un rapport sur un gros projet, deux mois et demi à trois mois minimum se sont écoulés. Avec la CFD, ces délais peuvent être ramenés à un ou deux mois, pour des coûts inférieurs et plusieurs projets peuvent être conduits en simultané.

## Identifier un bon prestataire numérique

---

Le numérique est extraordinaire que s'il est bien utilisé. Dans le cas contraire, il peut être catastrophique. La performance de la simulation numérique est entièrement dépendante du prestataire. Le numérique n'est rien sans des personnes compétentes et rigoureuses derrière des moyens de calcul très importants.

Le prestataire choisi doit tout d'abord maîtriser la physique, celle très spécifique du vent et de l'aérodynamique des ouvrages bien sûr, mais également celle de la structure afin d'être en mesure d'anticiper les besoins des bureaux d'études en charge de leur dimensionnement. Les outils mathématiques sont au service du contrôle du vent autour d'ouvrages et d'éléments qui peuvent être d'échelles, de forme et de nature très différentes. Tout cela a évidemment une incidence sur la manière de construire les simulations. Ensuite, le prestataire doit utiliser des outils de calculs qui ont été éprouvés. Le logiciel doit être adapté à la problématique traitée et, s'agissant des effets du vent, il faut des outils qui permettent de modéliser les

échelles turbulentes de façon précise. Il est important de comprendre qu'il sera toujours possible de transmettre à un maître d'ouvrage des images d'écoulement, mais il est infiniment plus complexe de transmettre des résultats valides. Un bon prestataire de soufflerie numérique doit de plus disposer de moyens de calcul extrêmement puissants. Il est absolument impossible de réaliser des simulations de dimensionnement au vent sur des moyens informatiques classiques.

Il faut évidemment également des prestataires ayant une longue expérience de l'utilisation du numérique pour modéliser la physique très particulière des écoulements de vent autour d'ouvrages bâtis. Cela fait vingt ans que nous travaillons sur la confrontation des résultats des simulations avec des mesures en soufflerie sur des éléments de forme d'abord très simple puis beaucoup plus compliquée. Il s'agit, à travers ces démarches, d'optimiser tous les paramètres qui interviennent dans la bonne reproduction numérique de ce type d'écoulement.

## Quelques cas concrets

Nous avons travaillé sur de nombreux ouvrages sensibles aux effets du vent, et en premier lieu des stades : stade de Lyon, stade Jean Bouin à Paris, stade Gabriel-Montpied à Clermont-Ferrand, stade de la route de Lorient à Rennes... Nous étudions également des ouvrages de grande hauteur, comme des tours de contrôle ou des hôtels. Nous avons, par exemple, récemment eu l'occasion d'étudier les effets du vent sur une tour du soleil dotée d'un habillage en moucharabieh avec des trous de quelques millimètres. Pour modéliser proprement ce qui se passait sur cette tour, il fallait arriver à modéliser proprement l'influence de la porosité du moucharabieh sur les effets du vent. Cela a nécessité la mise au point d'une méthodologie d'étude spécifique adaptée à ce problème.

Pour le stade de Lyon, nous nous sommes intéressés au dimensionnement au vent de l'ouvrage, et en particulier de sa couverture, puis au confort des gradins et des abords du stade. Pour ce faire, nous avons réalisé une modélisation 3D au sein de laquelle nous avons intégré, autour du stade, tout ce qui pouvait avoir une incidence sur le vent impactant ce dernier. Une fois les simulations réalisées, nous avons transmis en premier

lieu des cartographies de pression maximum et minimum exercées, toutes directions de vent confondues, sur sa couverture et ses façades. Nous avons ensuite réalisé des analyses globales ou semi-globales de cette couverture qui nous ramènent à la question du fléau évoquée précédemment. Nous avons donc étudié le phénomène de soulèvement et d'écrasement de ce fléau, en identifiant les valeurs maximales de ces sollicitations et des moments de renversements dans les deux sens, en avant ou en arrière. Le bureau de contrôle a alors souhaité que des mesures en soufflerie physique soient réalisées pour comparer leurs résultats à ceux de simulations numériques. La comparaison s'est faite direction de vent par direction de vent, l'idée étant de pouvoir comparer les phénomènes rencontrés. Le résultat a mis en évidence des différences ponctuelles très raisonnables, mais le comportement d'ensemble est globalement le même. Afin d'aller plus loin dans l'analyse, nous avons comparé les efforts sur l'ensemble de la couverture en fonction de la direction du vent, effort latéral, effort longitudinal et effort vertical. En matière d'écrasement, les différences étaient relativement conséquentes, mais les autres mesures étaient tout à fait cohérentes.

## S'adapter à chaque cas particulier

La tour de contrôle d'un aéroport irakien a été conçue avec une double peau. Il fallait donc dimensionner ce qui se passait sur l'ensemble de la tour mais aussi sur ses différents éléments d'habillage ; la double peau, les façades vitrées. Entre les deux peaux de la tour, la distance est relativement faible, de l'ordre de 30 à 40 centimètres. Le vent est capable de circuler dans la double peau, qui est ouverte en partie haute, en partie basse et à certaines hauteurs. Il faut identifier les pressions sur la peau extérieure et la peau intérieure et

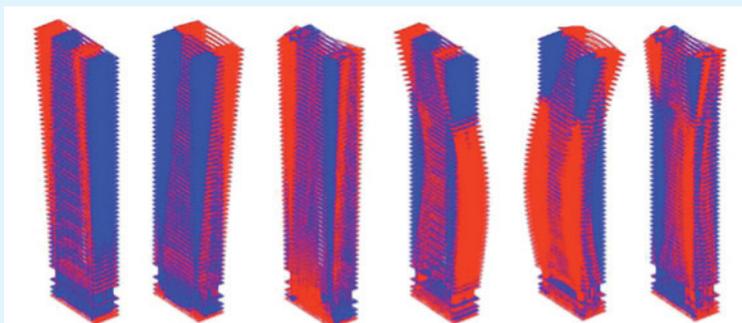
peser les efforts exercés sur des parties de la tour qui ont des structures et des habillages différents.

Dans le cas de l'aéroport de Mayotte, la spécificité tenait à une couverture posée sur une structure bois. Les façades, poreuses, sont construites à base de lames en bois ajourées larges de 10 cm. En soufflerie physique, une lame de 10 cm à une échelle de 1/100ème ou de 1/200ème est impossible à instrumenter. En CFD il a été possible de mesurer les pressions qui s'exercent localement sur chacune de ces lames.

### « LES EFFETS DYNAMIQUES DU VENT »

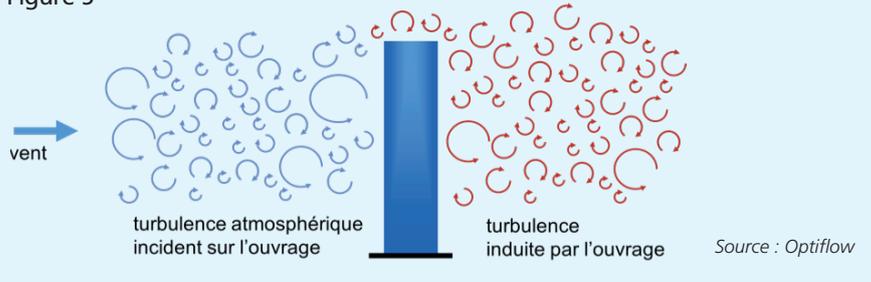
Lorsque l'on observe ce qui se passe autour d'un bâtiment soumis au vent, on constate que des structures tourbillonnaires très importantes peuvent prendre naissance autour de ce dernier et jouer un rôle important sur les sollicitations qu'il subit. Ces efforts, variables dans le temps, sont capables d'exciter les principaux modes de vibration de la structure de l'ouvrage étudié (figure 4 et figure 5 page suivante).

Figure 4 : Principaux modes de vibration d'une tour (Rosa et al., JWEIA, 2012)



Source :  
Optiflow

Figure 5

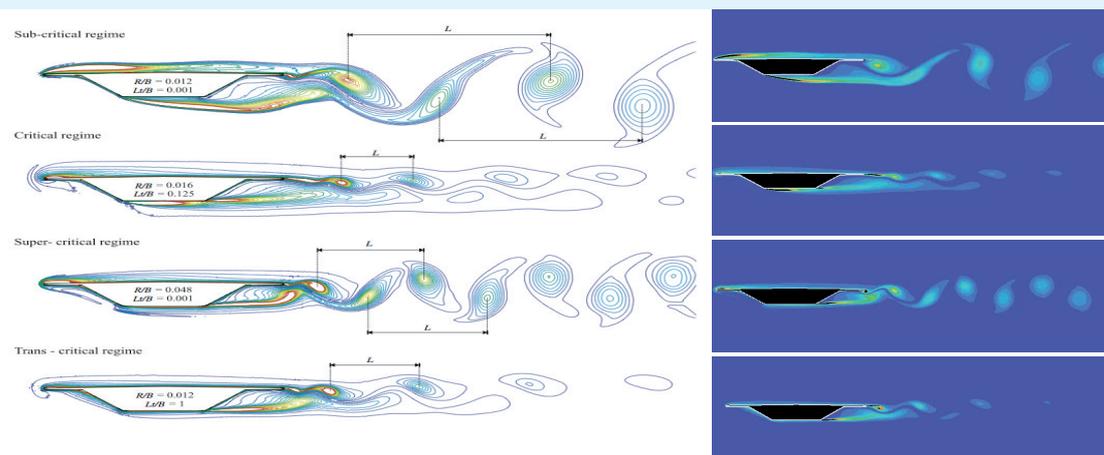


## ÂÉRODYNAMIQUE DES TABLIERS DE PONT

Les ponts sont des ouvrages très sensibles dont le comportement aérodynamique peut varier très vite en fonction des éléments d'habillage que l'on dispose dessus (barrières, garde-corps, trottoirs etc.). Dans le cas du pont Sunshine Skyway en Floride, deux souffleries différentes avaient été sollicitées pour faire des mesures. L'une avait mise en évidence une portance globale positive alors que l'autre enregistrait une portance négative. Il s'est avéré que cette différence était associée à la qualité de modélisation de certains petits détails géométriques du tablier. Dans une des souffleries, la maquette avait été réalisée par soudage, les arêtes apparaissaient vives.

Dans l'autre, le matériau avait été plié et il restait ainsi un rayon de courbure au niveau de ces arêtes. En comparant des tabliers de pont présentant différents rayons de courbure et en les soumettant à des écoulements présentant différentes échelles de turbulences, nous avons mis à jour, par le biais de simulations numériques, quatre régimes de vent. Ces régimes étaient associés à des longueurs de détachement tourbillonnaire très différentes et donc, potentiellement, à des résonances tout aussi différentes avec les fréquences propres du pont. Ce sont des aspects caractéristiques des possibilités de modélisation de la CFD.

Figure 6 : Aérodynamiques des tabliers de pont



Source: Publication POLITO-OPTIFLOW dans le Journal of Wind Engineering and Industrial Applications en 2010

## Améliorer le confort des espaces

Le dimensionnement au vent est loin d'être la seule application de la CFD. Pour être complets, citons encore la climatique et la physique urbaine, la physique des ouvrages et certaines applications connexes.

La climatique et la physique urbaine concernent principalement le confort des espaces urbains. Des études de confort au vent peuvent ainsi être menées et complétées avec des études d'ensoleillement, grâce à l'utilisation de modèles solaires.

En numérique, nous sommes capables d'ajouter au vent de la pluie, de la grêle ou de la neige, de manière à anticiper les effets couplés du vent et de ces intempéries.

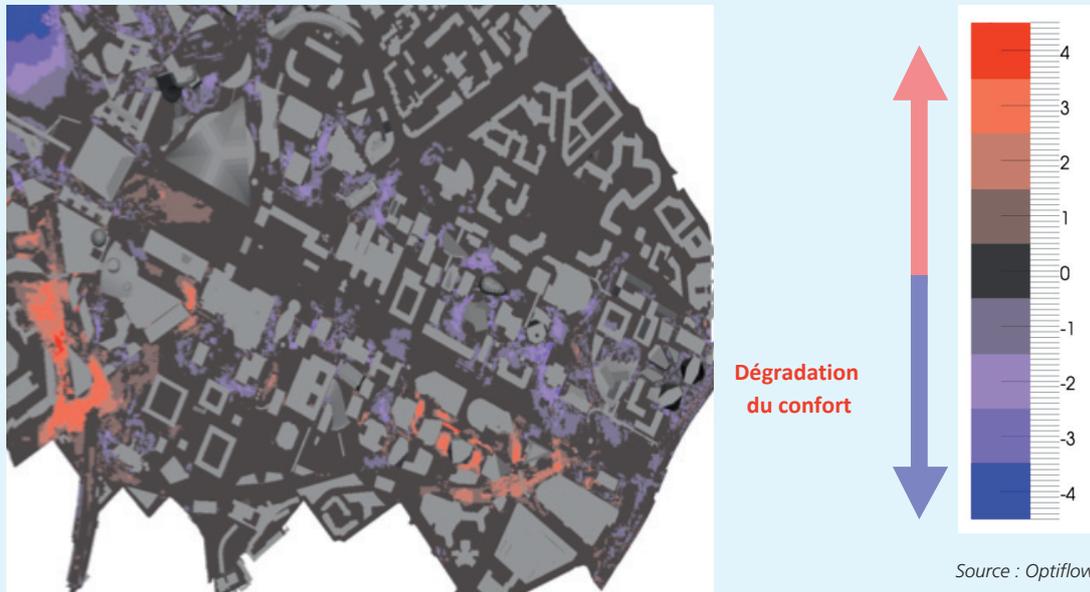
Les performances énergétiques des bâtiments peuvent être influencées par des constructions nouvelles qui peuvent prendre naissance à sa proximité. Un bâtiment à l'origine isolé qui se retrouve nouvellement encadré par deux tours va voir son environnement aéraulique transformé. Un frottement de vent plus intense peut alors entraîner une déperdition thermique plus importante et mettre à mal les systèmes thermiques conçus au départ pour cet immeuble.

Nous avons travaillé sur l'ensemble du quartier de la Défense. La dalle de la Défense n'est pas un espace connu pour son confort : beaucoup de courants d'air, de zones d'ombres... Il fallait anticiper l'influence que

l'évolution du quartier allait exercer sur le confort de sa dalle. Nous avons étudié trois projections temporelles : 2010, 2015 et 2020, en fonction des programmes

architecturaux connus à ce jour, et avons modélisé les écoulements de vent et l'ensoleillement pour chacune de ces situations (Figure 7).

Figure 7 : Evolution du confort au vent de la dalle du quartier de la Défense  
Comparaison 2020/2015



L'idée suivie tout au cours de cette étude était de transmettre à nos clients des éléments d'une excellente rigueur scientifique mais toutefois très faciles à interpréter par des personnes ne possédant pas une culture scientifique avérée. Nous avons quantifié l'influence de la présence de nouveaux ouvrages sur le confort des piétons et l'ensoleillement des terrasses de la dalle ou des façades des bâtiments afin d'anticiper les problèmes qui pourraient en résulter.

En matière de climatique et de physique des ouvrages, nous pouvons, grâce au numérique, entrer à l'intérieur des bâtiments pour traiter le confort hygro-thermique des grands volumes climatisés par le biais de systèmes thermiques traditionnels ou de systèmes de ventilation naturelle.

Il est également possible d'étudier l'engouffrement du vent et de ce qu'il peut transporter dans les ouvrages: la pluie, la neige, éventuellement le sable. Il est également possible de se pencher sur les problèmes de qualité de l'air d'ouvrages sensibles comme peuvent

l'être les piscines par exemple.

Enfin, les applications connexes de la CFD nous amènent à évoquer l'avenir. Nous pouvons déjà, grâce à la simulation numérique, étudier l'ensablement d'une structure, ou estimer le potentiel éolien d'une zone géographique. Dans le futur, la thématique ancienne et récurrente de l'éolien urbain pourrait devenir un sujet d'application.

Simuler les effets du vent sur les ouvrages est essentiel. Mais, physique ou numérique, une simulation est-elle préférable à l'autre ? Leurs coûts sont relativement similaires. La réactivité de la CFD est plus importante et ses délais de réalisation sont un peu plus courts. Les sources d'erreurs existent dans les deux cas même si elles sont différentes. Que l'on opte pour une soufflerie physique ou numérique, la difficulté principale est sans doute de trouver l'équipe compétente, capable de maîtriser tous les aspects de la simulation. Les acteurs fiables sont malheureusement aujourd'hui très peu nombreux.

# EFFETS DU VENT, DES ESSAIS EN SOUFFLERIE À LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE

Philippe Hostalery,  
Ingénieur Chef de Projet, Spécialiste Charpente,  
Coordinateur des affaires complexes,  
Bureau Veritas, BL CTC/IASM

Les affaires complexes en ingénierie requièrent une attention spécifique et soulèvent des difficultés propres comme l'évaluation de l'action du vent sur une structure. La mesure du vent n'est que le premier pas des études, l'objectif ultime est de déterminer la nature de la matière susceptible de lui résister.

Le cadre législatif et réglementaire de notre mission de contrôle technique repose essentiellement sur la loi Spinetta du 4 janvier 1978, modifiée en juillet 2008. Celle-ci établit une présomption de responsabilité décennale pour tout constructeur d'ouvrage. Elle impose l'assurance obligatoire des travaux de bâtiment et le contrôle technique obligatoire pour un certain nombre d'ouvrages, dont la liste s'allonge régulièrement.

L'article R 111-40 du Code de la construction et de l'habitation précise que le contrôleur technique intervient à deux moments :

- Au cours de la phase de conception, il procède à l'examen critique de l'ensemble des dispositions techniques du projet.
- Pendant la période d'exécution des travaux, il s'assure notamment que les vérifications techniques qui incombent à chacun des constructeurs énumérés à l'article 1792-1 (1°) du code civil s'effectuent de manière satisfaisante.

Le contrôleur technique s'assure également de la bonne exécution des travaux.

## Quand les règles de calcul ne suffisent plus

La première question qui se pose est celle de la pertinence des études portant sur les effets du vent.

- Pour les ouvrages courants, il existe des références, les points de contrôle sont relativement faciles à déterminer.
- Pour un ouvrage complexe, d'autres méthodes ou d'autres visions de l'ouvrage doivent être recherchées.

À partir de quand quittons-nous le cadre connu des règles de calcul et nous tournons-nous vers les études en soufflerie ? La réponse à cette question se trouve dans les textes. Pour déterminer les actions du vent sur une structure, les constructeurs ont recours, en première

intention, aux règles de calcul. Pour la France, il s'agit des règles NV 65 et de l'Eurocode 1, parties 1 à 4. La difficulté vient du fait que ces règles ne traitent que de quelques cas particuliers et « simples ». Pour les autres cas, la simulation est nécessaire. L'article RIII.6.4 des règles NV 65 indique que les bâtiments qui ne sont pas décrits dans les règles de calcul, ou dès lors qu'ils sont répétés à un grand nombre d'exemplaires ou, encore, qu'ils sont de formes inhabituelles, doivent faire l'objet d'essais en soufflerie.

Grâce aux outils informatiques de conception dont disposent les architectes, les objets inhabituels sont

de plus en plus fréquents. Le même article RIII.6.4 des règles NV 65 précise que « *les ouvrages de dimensions exceptionnelles par leur hauteur ou leur portée, occupant une situation inaccoutumée, soumis à de dangereux effets de sillage ou sujets à des oscillations forcées ou gênantes ou désagréables doivent faire l'objet d'études particulières* ». Qu'elle soit numérique ou physique, c'est alors à la simulation qu'il est fait appel.

L'annexe nationale française de la norme NF EN 1991 1-3 précise les conditions et le domaine d'emploi des différentes méthodes pour évaluer les effets du vent. Cette annexe ayant été écrite il y a déjà quelques années, il est nécessaire de tenir compte des évolutions techniques. Jusqu'à récemment, les réticences vis-à-vis de la soufflerie numérique restaient importantes, toutefois aujourd'hui, dans certains cas comme le stade de Lyon, cette méthodologie a prouvé son utilité réelle. Pour la soufflerie atmosphérique, rappelons les points sensibles : la représentation correcte du

vent et l'adéquation de la taille de la maquette, les risques d'erreurs liées à des surfaces courbes trop lisses, la bonne représentation du comportement dynamique pour les maquettes aéro-élastiques (masse, rigidité, amortissement) et enfin la compatibilité de l'instrumentalisation avec les mesures.

Pour la soufflerie numérique, il faut être vigilant quant aux limites des capacités informatiques pour des constructions de grandes dimensions lorsque l'on utilise les méthodes de résolutions directes. Les simplifications sont risquées quand elles conduisent à déterminer non plus les valeurs de pointe des actions mais des valeurs moyennes : celles-ci ne peuvent pas être utilisées telles quelles pour dimensionner une structure pour des modélisations statistiques.

Enfin, la simulation des grandes échelles ouvre des perspectives nouvelles. Lyon en est un bon exemple, démontrant qu'il est judicieux de se développer dans ce domaine aujourd'hui.

### L'EXEMPLE DU STADE DE NICE

Figure 1 : Stade de Nice : association d'une résille bois à facettes et de tubes métalliques



Figure 2 : Maquette 3D du Stade de Nice



Figure 3 : Deux séries d'appui du Stade de Nice



Source : CSTB

Le stade de Nice a été étudié uniquement en soufflerie physique. La difficulté de ces souffleries réside dans les millions d'informations qu'elles fournissent. Trop d'information tue l'information. Il est alors nécessaire de revenir à des choses simples.

Le stade de Nice est doté d'une structure particulière : une résille bois à facettes sous-tendue par des portiques métalliques, qui travaillent ensemble (Figure 1).

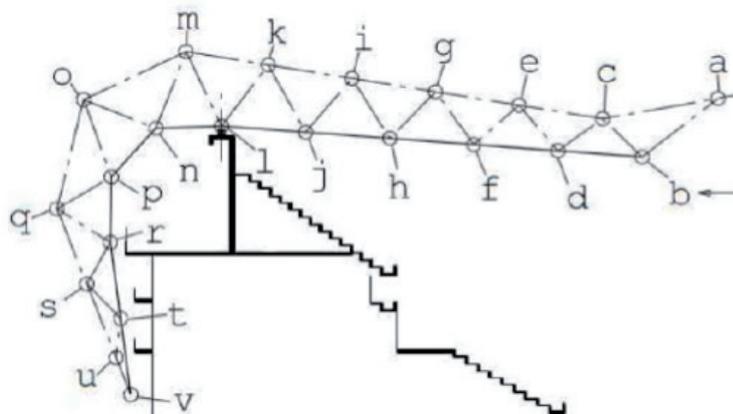
Les études de vent ont été réalisées au CSTB à Nantes. Pour les maquettes, l'impression 3D est un sérieux atout par rapport à ce que nous faisons il y a vingt ans (Figure 2).

Le stade de Nice, au bord de la mer, se situe à la limite des 6 kilomètres de la ligne qui détermine la zone de rugosité « zéro ». Il a été retenu donc que l'ouvrage était situé en zone de rugosité « zéro » (bord de mer). Les études de vent ont été intégrées dans le modèle d'exécution des constructeurs.

Compte tenu des différentes particularités, Bureau Veritas a fait le choix d'un modèle indépendant de vérification. En cherchant dans la littérature, nous avons repris et utilisés des règles de calcul émises en Suisse (SIA 261) pour ce type d'ouvrage. La structure du stade de Nice est supportée par deux séries d'appuis, des appuis bas posés sur une ceinture circulaire du stade et des appuis hauts posés sur une poutre béton (Figure 3).

Sur les extrados en appui haut, nos calculs donnaient 67 tonnes de soulèvement. De son côté, le bureau d'études n'avait identifié aucun soulèvement. Bien sûr, notre résultat de 67 tonnes était très approximatif, puisque calculé sur un modèle simplifié, mais l'écart entre 67 et zéro était trop important pour qu'il ne reflète pas une

certaine réalité. Les ingénieurs du bureau d'études ont donc repris tous leurs calculs pour en définitive obtenir un soulèvement de 40 tonnes. Il fallait donc changer la forme de l'assemblage de l'appui haut pour reprendre ce soulèvement.



## Quand le numérique complète la soufflerie atmosphérique

Il ne faut pas opposer le numérique et le physique. Il s'agit de deux outils différents avec leurs particularités, leurs atouts propres. La soufflerie atmosphérique repose sur davantage d'expérience. Nous sommes confrontés à quelque chose de physique, que nous connaissons bien, que nous maîtrisons. La soufflerie numérique est rapide, peut-être plus souple d'emploi. Les informations obtenues sont plus nombreuses, plus localisées, mais nous manquons encore de recul.

L'exemple de la fondation Louis Vuitton est une bonne illustration de l'utilisation combinée des deux types

de simulation. En 2009, ont été étudiés les effets du vent en soufflerie atmosphérique sur un projet qui comportait quatorze voiles. Puis, alors que le radier était en cours de construction, l'architecte a modifié le projet en revenant, en particulier, à douze voiles (Figure 4). Les modifications de l'ouvrage étaient de ce fait trop importantes pour que les études en soufflerie sur l'ouvrage initial soient applicables telles quelles. Le planning ne pouvait toutefois accepter les délais d'études en soufflerie atmosphérique. Nous nous sommes alors tournés vers le numérique.

Figure 4 : Fondation Louis Vuitton

Le projet initial et ses 14 voiles



Le projet modifié et ses 12 voiles



Une première modélisation numérique a été réalisée sur la base du projet initial, afin d'évaluer l'écart avec les études en soufflerie atmosphérique. Une seconde modélisation numérique a été réalisée sur le projet final. L'écart déterminé précédemment a été repris par les constructeurs dans leurs études. En parallèle,

une nouvelle campagne sur le projet en soufflerie atmosphérique a été lancée, dont les résultats ont été utilisés dans la justification finale des ouvrages.

Grâce au numérique, nous avons donc pu travailler, reprendre les travaux et continuer à avancer. En effet, un chantier est toujours sujet à des contraintes de planning.

## Le stade de Lyon : le numérique validé par l'atmosphérique

Pour le stade de Lyon, il était prévu de ne faire que des études numériques, car les délais pour une étude en soufflerie physique étaient trop longs. Pour le contrôleur technique, il était indispensable de conforter cette étude par une comparaison avec les résultats d'une étude plus classique en soufflerie atmosphérique. Les études numériques ont donc été

calibrées par des études en soufflerie atmosphérique, réalisée par le CSTB, en les limitant à un nombre réduit de cas. Les concordances sur cinq directions de vent ont été vérifiées, les résultats des simulations numériques, ajustés pour certains cas, ont pu être utilisés pour la justification des ouvrages (Figure 5).

Figure 5 : Stade de Lyon – Cinq directions de vent étudiées



Pour que la comparaison ait un sens, elle a été menée en confrontant les résultats obtenus par incidence de vent. La comparaison a été réalisée sur les directions 0°, 90°, 180° auxquelles on a rajouté les directions particulières 30° et 135° présentant les extrêmes d'écrasement et de soulèvement.

L'avenir du numérique est là. Pour des ouvrages comme les stades, les souffleries atmosphériques peuvent fournir des calibrages qui permettront petit à petit de créer des dossiers de référence pour les souffleries numériques. La simulation numérique est un moyen d'anticiper et

d'extrapoler des données car sa force est de pouvoir isoler les zones de calcul. L'atmosphérique et le numérique sont des outils complémentaires qui permettent d'avoir des visions différentes des ouvrages.



Toute reproduction totale ou partielle de ce document doit faire l'objet d'une autorisation préalable du Responsable de la Publication.

