



**HAL**  
open science

## **CSTB - Vulnérabilité du cadre bâti aux aléas climatiques : bilan 2011-2013, rapport de synthèse**

Philippe Delpech, Olivier Flamand, Adel Benidir, Graham Knapp, Christian Barré, Jean-Paul Bouchet, Frédéric Deliancourt, Frédéric Danbon, Alexis Bloch, Sébastien Courtine, et al.

### ► To cite this version:

Philippe Delpech, Olivier Flamand, Adel Benidir, Graham Knapp, Christian Barré, et al.. CSTB - Vulnérabilité du cadre bâti aux aléas climatiques : bilan 2011-2013, rapport de synthèse. CSTB - Centre scientifique et technique du bâtiment. 2014. hal-01026509

**HAL Id: hal-01026509**

**<https://cstb.hal.science/hal-01026509>**

Submitted on 21 Jul 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## **Maîtrise des risques**

# **Vulnérabilité du cadre bâti aux aléas climatiques Bilan 2011-2013**

### **Rapport de synthèse**

DELPECH Philippe (Coord.)

FLAMAND Olivier, BENIDIR Adel, KNAPP Graham, BARRE Christian, BOUCHET Jean-Paul, DELIANCOURT Frédéric, DANBON Frédéric, BLOCH Alexis, COURTINE Sébastien, SALAGNAC Jean-Luc, FLORENCE Céline, MARCHAND Dorothee, FLORI Jean-Paul, AXES Jean-Michel, PALIER Pierre, GUILHOT Julien, DEMOUGE François, DE OLIVEIRA Fabrice, LENOIR Dominique, AGUINAGA Sylvain, VIGANO Alessandro, COURBOIS Adrien, REVUZ Julia, SHENG Risheng, HECK Jean-Vivien, GRILLAUD Gérard, VINOT Benoit, SETTE Paul

Université Paris-Est, Centre scientifique et technique du bâtiment, Direction climatologie - aérodynamique - pollution - épuration, Direction économie et sciences humaines, Direction sécurité structures et feu, Direction technologies de l'information et diffusion du savoir

**Février 2014**

#### **CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT**

SIÈGE SOCIAL > 84 AVENUE JEAN JAURÈS | CHAMPS-SUR-MARNE | 77447 MARNE-LA-VALLÉE CEDEX 2

TÉL. (33) 01 64 68 82 82 | FAX. (33) 01 60 05 70 37 | SIRET 775 688 229 000 27 | [www.cstb.fr](http://www.cstb.fr)

ÉTABLISSEMENT PUBLIC À CARACTÈRE INDUSTRIEL ET COMMERCIAL | RCS MEAUX 775 688 229 | TVA FR 70 775 688 229

MARNE-LA-VALLÉE | PARIS | GRENOBLE | NANTES | SOPHIA-ANTIPOLIS

© 2014 CSTB



Ce texte est distribué sous les termes de la licence Creative Commons Attribution 3.0 non transposé **(CC BY 3.0)**

Le texte complet de la licence est disponible à l'adresse suivante :  
<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/legalcode>

Résumé des droits et conditions de la licence :

⇒ **Vous êtes libre de :**

- partager (reproduire, distribuer et communiquer) l'œuvre ;
- remixer, adapter l'œuvre ;
- d'utiliser cette œuvre à des fins commerciales.

⇒ **Selon les conditions suivantes :**

- Attribution (paternité, crédit) : vous devez attribuer l'œuvre de la manière indiquée par l'auteur de l'œuvre ou le titulaire des droits (mais pas d'une manière qui suggérerait qu'ils vous approuvent, vous ou votre utilisation de l'œuvre).

Toute citation d'extraits, reproduction ou utilisation doit obligatoirement faire apparaître la référence de ce document sous la forme : **Delpech P. (coord.), Vulnérabilité du cadre bâti aux aléas climatiques : bilan 2011-2013, rapport de synthèse, CSTB, février 2014, 39 p.**

⇒ **Comprenant bien que**

- les droits suivants ne sont en aucune manière affectés par la licence :
  - Vos prérogatives issues des exceptions et limitations aux droits exclusifs ou *fair use* ;
  - Les droits moraux de l'auteur que rien dans ce contrat ne diminue ou ne restreint.
- A chaque réutilisation ou distribution de cette œuvre, vous devez faire apparaître clairement au public la licence selon laquelle elle est mise à disposition. La meilleure manière de l'indiquer est un lien vers cette page web : <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/deed.fr>.

## Résumé

Les vulnérabilités aux aléas climatiques actuels et futurs constituent des enjeux de sécurité des usagers, mais concernent également les dommages aux biens, les coûts de remise en fonctionnement et de résilience du cadre bâti. Dans le cadre de ce projet, les actions de recherche ont consisté à cartographier les divers aléas, à développer les recherches sur les impacts de certains d'entre eux, à améliorer les techniques d'investigation et à contribuer à la mise en œuvre des évolutions de la prise en compte des aléas dans l'acte de construire.

**Mots clés :** aléas climatiques, modélisation, soufflerie, bâtiments, ponts, inondations, pluie, neige, vent

## Abstract

Vulnerabilities to current and future climate hazards are safety issues for users, but also cover property damages, costs of restoring functioning and resilience of the built environment. As part of this project, the research activities consisted in mapping the various hazards, developing research on the impacts of some of them, improving investigative techniques and contributing to the implementation of changes taking into account the hazards in the act of building.

**Keywords:** climatic hazards, modelling, wind tunnel, buildings, bridges, flooding, rain, snow, wind

## Table des matières

<b>OBJECTIFS 2011 – 2013 DU PROJET .....</b>	<b>6</b>
<b>1. ETUDE DES IMPACTS PAR ALÉAS CLIMATIQUES – IDENTIFICATION DES VULNÉRABILITÉS DES ÉLÉMENTS DU CADRE BÂTI PAR ALÉA.....</b>	<b>9</b>
<b>1.1 Effet du vent sur les haubans d’ouvrages d’art – Galop sec .....</b>	<b>9</b>
<b>1.2 Effet du vent sur les structures particulières au comportement mal connu..</b>	<b>12</b>
1.2.1 Efforts sur les structures légères .....	12
1.2.2 Similitudes des porosités et des appendices équivalents à échelle réduite .....	13
1.2.3 Stabilité des grues à tour .....	16
<b>1.3 Impact des inondations et des précipitations intenses sur les bâtiments et les structures.....</b>	<b>19</b>
1.3.1 Le risque inondation .....	19
1.3.2 Mesure des événements de pluie intense – impact des pluies battantes sur les ouvrages semi-ouverts .....	20
<b>2. DÉVELOPPEMENT DES OUTILS MÉTHODOLOGIQUES PLURIDISCIPLINAIRE VISANT À L'ANALYSE ET À LA RÉDUCTION DE LA VULNÉRABILITÉ DU CADRE BÂTI .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1 Développement des techniques de mesures en soufflerie atmosphérique ...</b>	<b>22</b>
<b>2.2 Conception optimisée des maquettes d'études .....</b>	<b>25</b>
<b>2.3 Effet combiné de la houle et du vent sur les structures offshore .....</b>	<b>26</b>
<b>2.4 Modélisation numérique et expérimentale des phénomènes de givrage par accréation de neige collante .....</b>	<b>27</b>
<b>2.5 Méthodes numériques dans le domaine de l'ingénierie du vent, modèles numériques de mécanique des fluides et Dimensionnement au vent des structures de grandes dimensions. ....</b>	<b>29</b>
<b>3. CONTRIBUTIONS AUX ÉVOLUTIONS DU CADRE TECHNICO-RÉGLEMENTAIRE TRAITANT DES ACTIONS CLIMATIQUES SUR LE CADRE BÂTI.....</b>	<b>32</b>
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>34</b>
<b>LISTE DES RÉFÉRENCES.....</b>	<b>35</b>
<b>Communications et articles.....</b>	<b>35</b>
<b>Rapports .....</b>	<b>36</b>
<b>Thèses .....</b>	<b>38</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Essais en soufflerie, gaines des haubans du pont de Rusky, le plus long du monde (Freyssinet).....	10
Figure 2 : Essais en soufflerie, déformation d'une poutre gonflable .....	13
Figure 3 : Lignes de courant dans le sillage du modèle de train idéalisé défini par Mair & Stewart, 1985. Résultats obtenus par mesures PIV, $Re=4.10^5$ , angle de dérapage : $45^\circ$ (à droite). Schéma du dispositif mis en œuvre pour la mesure de couche limite sur le train (à droite) .....	16
Figure 4 : Expertise d'implantation de grue de chantier et identification des perturbations des écoulements générant les phénomènes d'instabilité .....	16
Figure 5 : Evaluation des conditions de stabilité des grues à tour - construction de la recommandation R406 (INRS) incluant un critère de distance vis-à-vis d'une construction .....	18
Figure 6 : Inondation de la ville de Bellegarde provoquée par la crue du Rhône en 2003	19
Figure 7 : Pluviomètre hydrostatique - comparaison en site naturel à Nantes .....	20
Figure 8 : Comparaison des mesures des pluviomètres traditionnels à augets et hydrostatique sur 10 min au cours d'une année d'exposition (à gauche), et comparaison des intensités de pluie maximum mesurées au cours d'une matinée par les pluviomètres à augets sur 10 min et hydrostatique sur 10 min et 30 s (à droite).....	21
Figure 9 : Capteurs de pressions multiplexés (à gauche), et mise en place d'une mesure de pression dans une maquette en soufflerie (à droite) .....	23
Figure 10 : Evolution des dimensions des plaques supérieures au cours de l'étude fréquentielle (à gauche), et final de la balance dynamométrique (à droite) .....	24
Figure 11 : Conception de la maquette aéroélastique du pont de Gand.....	25
Figure 12 : Mesure du vent turbulent produit par le système de soufflage au-dessus du bassin de houle de l'Ecole centrale de Nantes, comparaison des spectres de vent expérimental et de Ochi & Shin. ....	26
Figure 13 : Réalisation du système de soufflage de simulation du vent off-shore sur le bassin de houle de l'Ecole centrale de Nantes, et test de qualification de la maquette d'éolienne flottante dynamiquement semblable .....	27
Figure 14 : Modélisation expérimentale d'accrétion de neige humide sur un cylindre en soufflerie climatique – Simulation numérique de l'écoulement diphasique et de l'accrétion .....	29
Figure 15 : Représentation des isovaleurs de vorticité $20s^{-1}$ (à gauche) et $50s^{-1}$ (à droite). Représentation selon la vitesse instantanée .....	30
Figure 16 : Représentation d'un cas de charge vent sur l'enveloppe d'un stade .....	31
Figure 17 : Masque de saisie du logiciel Eurobat .....	33

## **OBJECTIFS 2011 – 2013 DU PROJET**

L'amélioration de la sécurité et du confort des espaces urbains vis-à-vis des effets des charges climatiques est le principal objectif de ce projet. L'objectif à long terme est l'amélioration de la qualité de vie dans les environnements construits. Pour ce faire, les travaux ont porté sur l'évaluation qualitative et quantitative des effets du climat, vent, précipitation et inondations par l'identification et le développement de méthodes et d'outils opérationnels au service des concepteurs, des urbanistes et des auteurs des politiques publiques d'aménagement, de façon à contribuer à la réduction des risques climatiques dans le cadre bâti.

Les impacts des aléas climatiques sur le cadre bâti sont très divers. Ils sont, dans la majorité des cas, dommageables à la sécurité des personnes et des biens et d'une façon générale à la qualité de vie. Ces aléas ont, par le passé, produits d'énormes pertes humaines et économiques qui ont touché durement les populations et les pouvoirs publics (à l'échelle régionale et nationale) aussi bien que les acteurs économiques et financiers (société d'investissement, assureurs, ...). L'augmentation des pertes dues aux événements climatiques peut être autant attribuée aux migrations des populations (et des biens) vers des zones exposées, qu'aux probables évolutions des conditions environnementales. Par ailleurs, des constructions de plus en plus ambitieuses ont été rendues possibles par les développements technologiques (bâtiments de grandes hauteurs, ponts à long tablier, infrastructures de productions d'énergie à grande échelle, tours techniques élancées,...) qui les rendent sensibles aux effets du climat et en particulier au vent. Rappelons à ce sujet que l'impact du vent est souvent un facteur décisif dans le processus de décision de la conception et de la construction d'un ouvrage au regard de son utilité.

Les tempêtes sont le risque naturel le plus significatif en termes de pertes de biens assurés<sup>1</sup>. L'impact global cumulé des tempêtes sur les constructions est plus lourd que pour n'importe quel autre risque naturel. Les tempêtes affectent également les systèmes de transport et de distribution d'énergie, avec parfois des conséquences dramatiques en coût humain ou en interruption de service.

Par exemple, huit tempêtes majeures ont été dénombrées en 1990 et ont causé des dommages étendus dans au moins dix pays européens. Les pertes totales au cours de cette seule année ont été estimées à 15 milliard d'Euro. Les tempêtes historiques de décembre 1999, Lothar et Martin, ont frappé une grande partie de l'Europe, du sud-ouest de la France et du nord de l'Italie jusqu'au Danemark et à l'Allemagne. La semaine du 21 décembre 1999 peut être considérée comme une semaine noire à l'échelle européenne, avec près d'une centaine de morts et plusieurs milliards d'Euro de pertes cumulées, des coupures d'électricité dans

---

<sup>1</sup> D'après la Fédération Française des sociétés d'assurance (FFSA), les dommages cumulés sur la période 1988-2007 (11.3 Md € au titre du régime d'assurance CAT-NAT) le situent en deuxième position derrière les tempêtes (16.6 Md € au titre du régime d'assurance Tempête-Grêle-Neige (TGN)) et devant le risques retrait-gonflement des argiles (RGA) (5.9 Md € au titre du régime d'assurance CAT-NAT) (FFSA, 2009).

beaucoup de grandes villes, des dommages importants aux infrastructures vitales et des pertes énormes de ressource forestières avec des millions d'arbres déracinés.

L'une des raisons de ces pertes importantes est le grand nombre de zones densément construites, et par conséquent une concentration importante de richesses, dans les régions relativement exposées aux grandes tempêtes qui ont leur origine dans l'océan Atlantique. Les zones urbaines de ces régions peuvent souffrir de manière répétée de dommages cumulés au cours de leur durée de vie. Les bâtiments de grandes dimensions sont particulièrement sensibles aux agressions climatiques. Certaines caractéristiques peuvent augmenter la sensibilité au vent, comme la présence de vides dans les structures ou encore des arrangements particuliers de bâtiments qui induisent l'amplification des vitesses locales du vent.

En situation de vent modéré, la nature des écoulements de vent peut avoir un impact significatif sur les performances et l'usage des bâtiments en affectant le fonctionnement du chauffage et de la ventilation. A vitesse de vent plus élevée, pour certaines configurations de l'environnement urbain, les problèmes d'accumulation de neige et de pénétration de pluie battante dans les espaces semi-ouverts des bâtiments peuvent devenir critiques. Souvent, l'érection d'un nouveau bâtiment dans un environnement construit sans considération préalable sur les effets induits peut détériorer le microclimat local.

Il est probable que l'évolution du climat induise une plus grande variabilité des conditions climatiques. Cette instabilité se manifesterait par l'intensification des événements climatiques extrêmes, comme l'aggravation des sécheresses dans les zones arides, ou l'augmentation des fortes précipitations dans les régions humides, comme en Europe du Nord, qui induirait des situations d'inondations fréquentes et longues ou encore la submersion plus probable des zones côtières.

De ce fait, il est important de réexaminer l'ensemble des impacts potentiels des aléas climatiques, y compris ceux qui semblaient moins pertinents jusqu'à présent. La synthèse des aléas climatiques pris en compte dans la réflexion ainsi que leurs principaux effets sur le cadre bâti est présentée dans le tableau 1.

Alors que les compétences du CSTB se situent au premier plan dans certains domaines, son expertise ne couvre que partiellement d'autres domaines. Dans tous les cas, le projet de recherche a également pour ambition de maintenir et de développer les échanges avec les partenaires scientifiques et techniques, français et étrangers, pour contribuer à l'élaboration de réponses collectives aux enjeux liés aux risques climatiques.

Pour examiner les aspects scientifiques, techniques et économiques relatifs à la vulnérabilité du cadre bâti, le projet est structuré suivant trois tâches :

1. Etude des impacts par aléa climatique et identification des vulnérabilités des éléments du cadre bâti à chaque échelle par aléa: le travail vise à fournir les éléments de référence et à faire l'état des lieux des capacités du CSTB, et de ses partenaires en la matière, ainsi que des efforts nécessaires pour combler les carences ;

2. Développement des outils méthodologiques pluridisciplinaire visant à l'analyse et à la réduction de la vulnérabilité du cadre bâti : élaboration et évaluation des moyens d'expertise ;
3. Contributions aux évolutions du cadre technico-réglementaire traitant des actions climatiques sur le cadre bâti et prise en compte des enjeux économiques dans la conception des ouvrages: l'objectif est de permettre la mise en œuvre de l'augmentation de la résilience du cadre bâti aux contraintes climatiques.

Aléa climatique fondamental	Température						Vent			Autres aléas climatiques
			Précipitations							
Aléa impactant (combinaison aléas fondamentaux)	Vague de froid	Canicule	Pluie / humidité	Neige	Pluie givrante Grêle	Mouvement de terrain	Inondation (crue, côtière, ruissellement urbain, ...)	Pluie battante, cyclone	Vent fort	Foudre Rayonnement UV
		Ilot de chaleur urbain							Tempête Tornade	
Effets sur les usagers et le cadre bâti	Confort intérieur et extérieur Santé			Sécurité		Sécurité, santé				
	Consommation d'énergie		Condensation Infiltrations	Charges mécaniques, Givrage					Défaut de ventilation	Perturbations électromagnétiques,  Dommages mécaniques, chimiques, ...  Incendie
	Contraintes mécaniques, dilatation			Blocage de mécanismes		Charges mécaniques  Destruction partielle ou totale (immobilier et mobilier)				
	Sollicitations mécaniques sur structure (retrait-gonflement des argiles)		Infiltrations							
Incendie (foyer externe)				Chocs/bris						

**Tableau 1 : Aléas climatiques fondamentaux et leurs impacts sur la cadre bâti**

## **1. ETUDE DES IMPACTS PAR ALÉAS CLIMATIQUES – IDENTIFICATION DES VULNÉRABILITÉS DES ÉLÉMENTS DU CADRE BÂTI PAR ALÉA**

### **1.1 EFFET DU VENT SUR LES HAUBANS D'OUVRAGES D'ART – GALOP SEC**

L'attention portée à la problématique de la **vibration des câbles de pont** est récente. Le phénomène particulier de galop sec a été découvert il y a moins de 10 ans. Dès lors, le nombre croissant de publications sur ce sujet montre le grand intérêt de la communauté scientifique pour ce domaine. Au moment de l'émergence des préoccupations concernant la vibration des câbles, il y a une vingtaine d'années, le CSTB avait développé une expertise de premier plan dans ce domaine avec la mise en évidence et l'identification théorique et expérimentale des phénomènes d'excitation aérodynamiques dues aux concomitances des événements de pluie et de vent. Ces travaux avaient fourni le cadre d'une thèse sur le phénomène d'excitation des haubans de ponts, réalisée au CSTB par Olivier Boujard et soutenue en 2007.

Par la suite, le leadership mondial sur la thématique est passé au Canada, où le CNRC a développé un savoir-faire reconnu. L'action de recherche avait pour ambition d'explorer de nouvelles pistes de réflexion et de renouveler l'expertise du CSTB dans ce domaine.

L'intérêt pour le sujet est alimenté par les consultations périodiques de maîtres d'œuvre d'ouvrages d'art et des commandes d'études de structures en construction qui pourraient subir les phénomènes d'excitations dues aux actions combinées de la pluie et du vent (pont Firth of Forth en Ecosse,...). La méthode préconisée par le CSTB il y a 20 ans se révèle être toujours la plus appropriée pour prévenir l'apparition du phénomène. Elle consiste à concevoir une gaine de câble dont la surface extérieure est marquée par une aspérité hélicoïdale de 1,2 mm de haut et de 3 mm de large, dont le pas est de 550 mm.

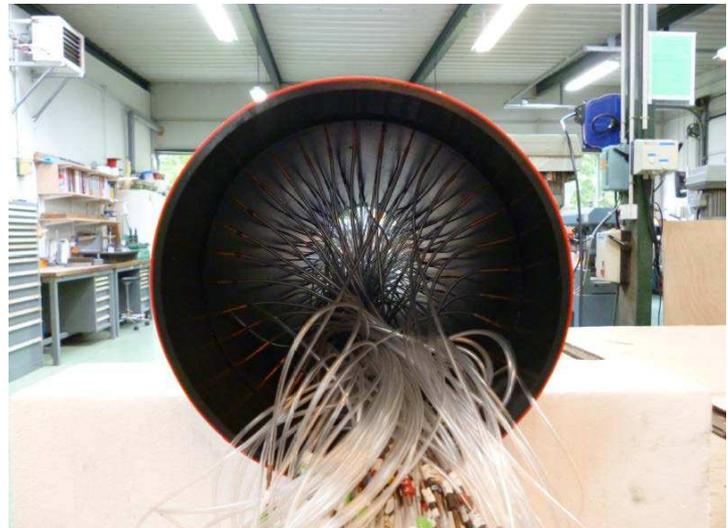
Les conditions critiques d'apparition du phénomène de galop sec des câbles inclinés correspondent à une gamme étroite du nombre de Reynolds des écoulements de vent autour d'un câble, entre  $2 \cdot 10^5$  et  $4 \cdot 10^5$ . Il s'agit d'un phénomène bistable particulier de di-symétrisations de l'écoulement, dit "de détachement à une bulle", qui apparaît de manière aléatoire dans le régime critique et qui provoque un effort de portance sur un profil supposé symétrique. Le phénomène est d'autant plus pénalisant qu'il se manifeste dans une gamme de fréquence proche de la fréquence propre des haubans, soit autour de 2Hz, si cela correspond à la fréquence propre de l'ouvrage. Il est étudié expérimentalement par des essais en soufflerie, au cours desquels l'attention est portée sur les paramètres de rugosité et de circularité des gaines.

L'intérêt de la recherche réalisée dans le cadre de la thèse d'A. Benidir commencée en 2011, était d'établir une réponse concrète à l'impact des défauts de fabrication des gaines en polyéthylène haute densité (PEHD) sur le comportement aérodynamique des câbles de ponts.

Les études ont été réalisées avec des éléments de gaines de câble réels extraits d'ouvrages. La méthode expérimentale mettait en œuvre des mesures de pressions pariétales à la périphérie de la gaine du câble permettant de détecter

les conditions d'apparition de la bulle. En pratique, l'élément de câble utilisé pour les études en cours est équipé de neuf couronnes de mesures de pression synchrone, soit un total de 288 prises de pression.

Les scanners de pression PSI de 32 voies collectent les données des pressions en surface à la fréquence de 200 Hz. La campagne d'essai a concerné dans une première phase les gaines lisses, pour les diamètres de 140, 200, 250 et 355 mm. L'ensemble de ces diamètres de gaine a été testé en soufflerie et la phase de traitement est désormais achevée. La recherche inclut également un volet qui concerne la caractérisation des surfaces, notamment la mesure du défaut de circularité des gaines et leur rugosité. Des capteurs de déplacement laser ont été utilisés afin de mesurer les défauts de fabrication. La norme DIN 8074 qui encadre la construction de ce type de gaine exige une tolérance de l'ordre de 1 % du diamètre sur le défaut d'excentricité. La mesure des paramètres de rugosité a été effectuée par un rugosimètre 3D de résolution 7,5 micromètre, et opérée par l'Ifsttar de Nantes.



**Figure 1 : Essais en soufflerie, gaines des haubans du pont de Rusky, le plus long du monde (Freysinet)**

Les résultats obtenus ont permis de confirmer que les défauts de circularité tolérés par la norme de fabrication des gaines d'irrigation DIN 8074, affectent considérablement le comportement aérodynamique des câbles. Le défaut de circularité, qui atteint quelques millimètres, est l'irrégularité de surface qui a le plus d'impact sur les transitions en régime critique comparé à la rugosité de surface (un paramètre de quelques micromètres). Cela est dû au fait que le défaut de circularité se prolonge le long du tube, alors que la rugosité n'est pas corrélée spatialement. C'est donc l'excentricité de la gaine qui est à l'origine de la corrélation spatiale du phénomène bistable.

Les résultats montrent encore que pour un défaut de circularité plus grand que ceux indiqués par la norme DIN 8074, mais qui ne modifie pas de manière importante la forme circulaire de la gaine, le phénomène bistable se cantonne à

un nombre limité de couronnes (mesures faites avec la gaine de diamètre  $D=140$  mm). En revanche, si le défaut de circularité est plus important, par exemple dans le cas d'un diamètre de gaine  $D=250$  mm, on peut observer une extension du phénomène bistable le long du tube, jusqu'à atteindre 8 couronnes sur les 9 instrumentées. L'analyse de la rugosité de surface montre qu'aucune corrélation spatiale des paramètres de rugosité n'a été observée. Le caractère aléatoire des profils de rugosité le long du tube permet d'assimiler la rugosité à un bruit blanc.

Plusieurs communications dans des colloques nationaux et internationaux ont été réalisées [Benidir et al 2012, Benidir et al 2013, Flamand et al 2013].

Au cours du cycle de recherche 2014-2017, une nouvelle série de tests sera menée sur des gaines (PEHD) rugueuses qui disposent en surface d'un filet hélicoïdal (appelé dans certain cas des nervures). Les premiers tests seront statiques, avec la même instrumentation que dans les essais sur gaines lisses. L'objectif est de déterminer l'impact de cette rugosité de surface sur les transitions en régime critique, notamment le caractère bistable de la transition laminaire turbulent désigné par l'abréviation TrBL0-TrBL1 selon le classement adopté par la communauté des aérodynamiciens.

Des tests dynamiques pourraient être également programmés, lorsque l'analyse des tests statiques sera achevée.

## **1.2 EFFET DU VENT SUR LES STRUCTURES PARTICULIÈRES AU COMPORTEMENT MAL CONNU**

Les efforts engendrés par le vent sur les structures à parois continues (façades, toitures) de forme simple sont assez bien pris en compte par les codes, mais d'autres structures, pourtant répandues, ne sont à ce jour pas couvertes par des règles de conception fiabilisées.

### **1.2.1 EFFORTS SUR LES STRUCTURES LÉGÈRES**

Les effets des conditions climatiques sur les structures gonflables (halls d'exposition, hôpitaux temporaires, hangars de stockage ou de protection), en fort développement depuis une vingtaine d'année, sont mal connus. Il en résulte une carence réglementaire à l'échelle mondiale qui pose problème pour fiabiliser le dimensionnement du fait de la souplesse inhérente à ce type de structures. Pour cette raison, la Communauté européenne a engagé des travaux préparatifs à l'élaboration d'un Eurocode (Working group WG5 lancé en 2011) dédié aux structures membranaires. Quelques études expérimentales sur des éléments gonflables de type poutre ont été réalisées en laboratoires par le passé. Le CSTB avait réalisé des tests en soufflerie dans les années 80 pour évaluer les charges de vent sur des structures à simple paroi dont l'ensemble du volume devait être maintenu en surpression. Cependant, il n'existe pas à l'échelle internationale de données sur de grandes structures gonflables soumises à des conditions climatiques classiques telles que la neige et le vent. Cela nécessite en effet une proximité d'équipe de recherches spécialisées dans les structures gonflables (une dizaine reconnues dans le monde) et de moyens expérimentaux de grande dimension.

Alors que les travaux sur les textiles tendus semblent concorder avec les textes des Eurocodes existant, avec un assez bon retour d'expérience, les travaux sur les structures pressurisées nécessitent encore de lever des verrous scientifiques. Plusieurs approches sont possibles pour dimensionner des structures gonflables. L'approche de type poutre (analytique ou élément fini) permet de pré-dimensionner les structures en ramenant leur étude à celle de la fibre moyenne. Il est possible de modéliser par exemple un chargement statique de neige ou de vent et de calculer les déformées des bâtiments. Les approches de type membrane 3D permettent, outre le comportement global de la structure, d'étudier des phénomènes locaux tels que les apparitions de plis, les contacts entre parois, etc. Les dimensionnements se font aujourd'hui principalement à l'aide des règles neige et vent. Les points d'études sont les déplacements des tensions dans les tissus, les efforts dans les haubans ainsi que les efforts aux ancrages.

A partir de quelques modèles de dimensionnement disponibles dans les laboratoires de génie civil, partenaires du CSTB, qui s'intéressent à ce sujet, le but de l'étude était de confronter les modèles prédictifs à des mesures expérimentales sur des structures instrumentées de grande dimension soumises à la neige, au vent, et à des variations de température.

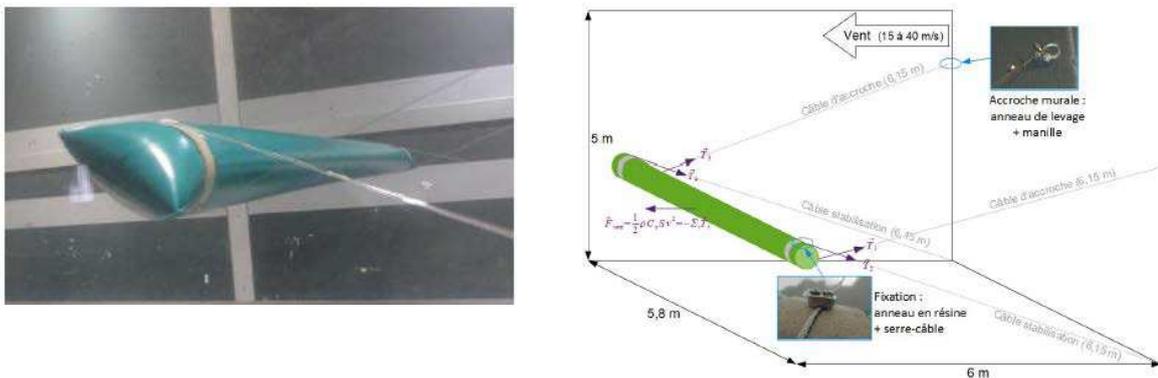
L'action de recherche a été développée dans le cadre de la thèse d'Alexis Bloch, commencée en 2012. La période passée a permis de mettre au point la méthode d'essai des structures gonflables en soufflerie. Une instrumentation spécifique a

été mise en œuvre : trajectographie 3D et corrélation d'images. Plusieurs campagnes d'essais en soufflerie ont été réalisées.

Les premières identifications des paramètres d'un modèle de déplacement de Le Van et Wielgosz par corrélation sur les résultats de la trajectographie issus d'un essai ont été réalisées.

Le développement d'un modèle pour la ruine a été engagé. La validation de ce modèle est en cours de réalisation à l'aide du code Safe, de même que la confrontation aux résultats d'essais. Ce travail sera poursuivi au cours de la prochaine période.

L'aboutissement de ces travaux permettra de proposer une méthode de dimensionnement et de prévision du comportement des structures gonflables compatible avec le format Eurocodes. Il s'agit également d'établir une règle de similitude afin de pouvoir exploiter des essais à échelle réduite. Le travail s'appuie sur des modèles analytiques et numériques qui sont corrélés à des essais en soufflerie grâce à des techniques de corrélation d'image et de trajectographie.



**Figure 2 : Essais en soufflerie, déformation d'une poutre gonflable**

### 1.2.2 SIMILITUDES DES POROSITÉS ET DES APPENDICES ÉQUIVALENTS À ÉCHELLE RÉDUITE

De nombreux bâtiments prestigieux adoptent une stratégie de couverture partielle perméable au vent et aux autres agents climatiques. La raison peut en être climatique (centre commercial à Oman) ou architecturale (canopée des Halles à Paris). Les outils modernes de conception des bâtiments (modélisation 3D), incitent également les architectes et les concepteurs à imaginer des formes plus complexes que par le passé en intégrant diverses fonctions techniques d'isolation, de ventilation, de protection solaire,... Il en résulte une demande accrue de la profession pour simuler les effets du vent sur ces éléments de façades complexes (écaillés, porosités,...).

La reproduction de la porosité de ces toitures sur les modèles à échelle réduite en soufflerie et la représentativité des résultats d'essais posent des problèmes encore non résolus. Il est, en effet, difficile d'étudier à très petite échelle l'effet du vent sur des porosités. En pratique, cela impose de travailler à plusieurs

échelles, en réalisant par exemple une maquette au 1/200<sup>e</sup> pour évaluer l'impact du vent sur l'ouvrage entier et une maquette au 1/10<sup>e</sup> pour évaluer les efforts sur les détails architecturaux. Un recalage entre les deux maquettes est alors nécessaire.

Ce recalage peut nécessiter des études avec des maquettes du même ouvrage à des échelles intermédiaires. L'alternative consiste à faire appel aux méthodes de simulation numérique par CFD pour compléter les études expérimentales en soufflerie. Les deux approches sont complémentaires, la CFD permet d'accéder à la compréhension de la nature 3D des écoulements tandis que les mesures en soufflerie sont garanties de la prise en compte des effets de la turbulence et des événements extrêmes (effets de pointe).

Le choix de l'approche est déterminé par la nature du projet et par les questions des concepteurs. Par exemple, dans le cas d'un ouvrage de grande dimension pour lequel seule la connaissance des efforts en quelques points particuliers est requise, une approche globale du vent à l'échelle du quartier peut être réalisée par CFD, tandis que les points particuliers de l'ouvrage sont étudiés expérimentalement par une modélisation physique en soufflerie.

L'outil numérique est également utilisé pour définir les paramètres de la modélisation physique. Ainsi, dans le cas de l'étude de la canopée des Halles, un calcul CFD a permis de déterminer la porosité équivalente des vantelles.

Un calcul CFD est également mis en œuvre pour identifier un point dans l'écoulement, indépendant de l'effet que l'on est en train d'étudier ou une série de points qui peuvent servir pour le recalage des paramètres de la modélisation physique (vitesse, pression et localisation dans le champ aérodynamique).

Les perspectives dans ce domaine sont de faire appel plus systématiquement à une approche combinée calculs CFD et tests en soufflerie. Une méthodologie pour identifier les cas critiques a été configurée (vent léchant, espacement des éléments de façades,...). Une approche plus générale doit être trouvée et appliquée sur des exemples concrets représentatifs des différents cas les plus courants (ouvertures multiples dans une toiture, filets et résilles, écailles, ...).

La question de la similitude des écoulements autour des **appendices en toiture** est une problématique commune aux domaines de la construction et du transport ferroviaire. L'échelle à laquelle les détails doivent être reproduits sur les maquettes nécessite ainsi une bonne compréhension de leur impact sur l'écoulement aérodynamique global. La prise en compte des appendices pose un problème supplémentaire car deux tailles de référence coexistent (celle de la structure principale et celle de l'appendice) pour établir un seul et même critère de similitude.

Cette question est traitée dans le cadre de la thèse de Frédéric Deliancourt commencée en novembre 2011 et consacrée à l'aérodynamique des véhicules ferroviaires. L'un des objectifs de la recherche est de déterminer les conditions de stabilité des trains en situation de vent traversier. Celle-ci est évaluée à partir des coefficients aérodynamiques du véhicule qui définissent le comportement du train. La détermination expérimentale des coefficients aérodynamiques se base sur l'étude en soufflerie de maquettes de train à échelle réduite. Au cours des essais, la maquette est pesée à l'aide d'une balance aérodynamique qui permet

de déterminer les différentes composantes des efforts aérodynamiques induits par l'écoulement de l'air sur le véhicule.

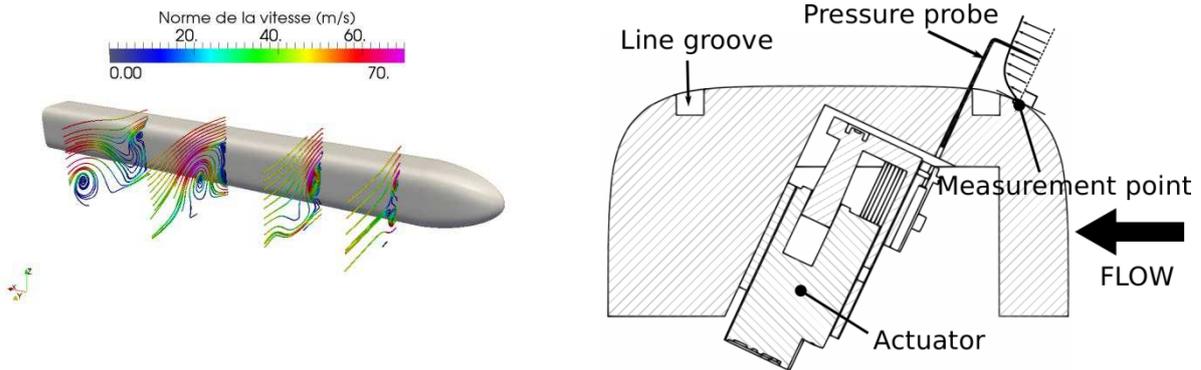
Les premiers résultats de ces travaux concernent la topologie des écoulements. Le sillage des trains présente deux régimes d'écoulements majeurs qui dépendent de l'angle de dérapage (angle entre l'écoulement incident et l'axe du corps). A faible angle de dérapage, et jusqu'à des angles modérés (de l'ordre de 50°), l'écoulement est similaire à celui engendré par un corps élancé. Au-delà d'un certain angle critique qui dépend de la forme du train, celui-ci est pleinement détaché.

Les travaux réalisés ont permis une meilleure compréhension des mécanismes à l'origine de ces deux régimes d'écoulement.

L'étude d'appendices de toiture modélisant des câbles haute tension a été conduite sur deux maquettes différentes. Ces appendices sont de faible dimension par rapport à la taille du train (quelques pourcents de sa hauteur). Ces travaux ont montré en particulier que :

- Les efforts aérodynamiques sont modifiés de manière significative lorsque les appendices sont ajoutés sur le toit du train. Cette modification des efforts, qui dépend de la taille des appendices, conduit à une augmentation du moment de renversement du train, et donc à une augmentation du risque de renversement ;
- L'étude du sillage du train par visualisations laser et mesures PIV (Particle Image Velocimetry) indique une faible dépendance de son organisation générale à la présence de détails en toiture ;
- L'analyse de la répartition de la pression autour des corps d'étude montre une modification de la pression principalement localisée sur le toit du train. Cette modification est particulièrement importante dans la zone amont de la ligne de toiture située au vent. Des calculs ont mis en évidence une contribution très importante de cette zone aux efforts aérodynamiques, ce qui a conduit à étudier en détail l'évolution de la pression en amont de l'obstacle situé au vent ;
- En première approximation, la configuration d'une ligne positionnée sur le toit du train peut être comparée à celle d'un obstacle monté en paroi. Dans ce type de configuration, la répartition de pression est pilotée par le rapport entre la taille de l'obstacle et la couche limite sur la paroi.

Pour le cycle de recherche 2014-2017, les travaux de recherche seront consacrés à la détermination expérimentale de **l'épaisseur de la couche limite sur le train** afin de la comparer à la taille des appendices de toiture.

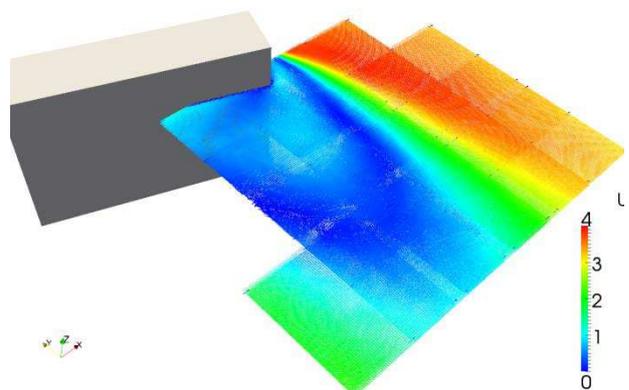


**Figure 3 : Lignes de courant dans le sillage du modèle de train idéalisé défini par Mair & Stewart, 1985. Résultats obtenus par mesures PIV,  $Re=4.10^5$ , angle de dérapage :  $45^\circ$  (à droite). Schéma du dispositif mis en œuvre pour la mesure de couche limite sur le train (à droite)**

### 1.2.3 STABILITÉ DES GRUES À TOUR

L'identification des perturbations des écoulements de vent générant les phénomènes d'instabilité des grues à tours est abordée de manière expérimentale. L'interaction bâtiment/grue est générée par les zones de sillage et de cisaillement de l'écoulement développé en aval du bâtiment générateur de l'interaction. L'action de recherche avait pour objectif d'améliorer la compréhension de l'interaction par une démarche conjointe de visualisation des écoulements dans ces zones, de métrologie anémométrique et de mesure des comportements de maquettes à échelle réduite de grues localisées dans un plan de masse reproduit.

L'identification des zones de sillage et de cisaillement a été réalisée par des mesures PIV, par métrologie de champs instantanés de vitesse, ...



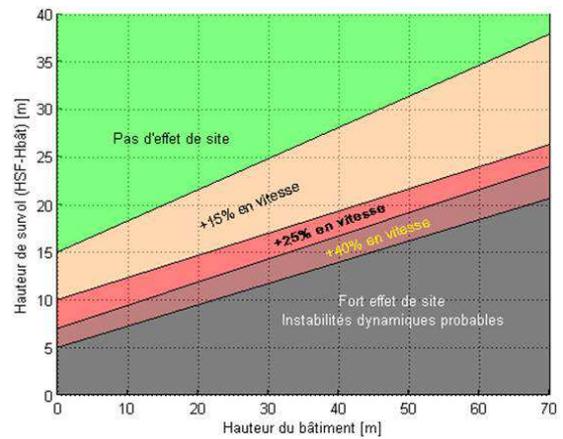
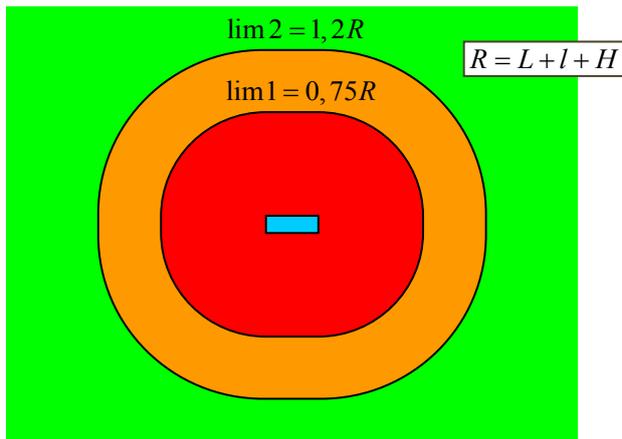
**Figure 4 : Expertise d'implantation de grue de chantier et identification des perturbations des écoulements générant les phénomènes d'instabilité**

**La validation de la simulation à échelle réduite du comportement des grues à tour** nécessite la connaissance des comportements observés à la vraie grandeur (autorotations, remontées au vent, etc.). Une veille sur les phénomènes constatés sur des chantiers réels a donc été menée en partenariat avec des bureaux de contrôle, et se poursuivra lors du prochain cycle de recherche 2014-2017. L'évènement en vraie grandeur est documenté par le bureau de contrôle puis peut être simulé par le CSTB à échelle réduite. Les comportements en vraie grandeur et à échelle réduite sont alors comparés en fonction des conditions météorologiques (vitesse et direction du vent) établies sur le site lors de l'évènement. Cette veille concerne de l'ordre de 2 à 3 évènements chaque année.

**En parallèle, le développement du parc de maquettes en similitude des grues réelles** a été poursuivi. Les paramètres de la similitude sont : le maître couple de la flèche et de la contre-flèche, et la répartition de masse. Les maquettes sont dynamiquement semblables si les critères de similitudes sont respectés. Les géométries caractéristiques des flèches et contre-flèches permettant de couvrir l'essentiel des besoins des essais en soufflerie ont été déterminées. Ce parc doit permettre de couvrir l'ensemble des modèles du marché, en permanente évolution, en collaboration avec les industriels du domaine. Les étalonnages à réaliser sur chaque maquette consistent en un recalage avec les modèles existant du point de vue du maître couple (pesée aérodynamique différentielle des flèches et contre-flèches au moyen de balance de précision). Les valeurs d'effort mesurées se situent entre 5 et 10 g. Les valeurs typiques de majoration des maîtres couples transversaux en référence aux valeurs longitudinales sont de l'ordre de facteurs 2,5 à 3.

Parmi les difficultés expérimentales pénalisantes, mentionnons la reproduction des frottements. Sur les maquettes à échelle réduite, le frottement doit être réduit au minimum. La meilleure solution actuellement fait appel à un appui sur un pointeau qui forme le pivot de la grue.

Les études de caractérisation des phénomènes d'interaction bâtiment/grues menées en collaboration avec l'INRS ont été finalisées en 2012. Elles permettent de prédire de façon simplifiée le risque d'interaction. Une introduction de ces résultats dans la recommandation R406 de l'INRS relative à la stabilité des grues à tour est en cours.



**Figure 5 : Evaluation des conditions de stabilité des grues à tour - construction de la recommandation R406 (INRS) incluant un critère de distance vis-à-vis d'une construction**

## 1.3 IMPACT DES INONDATIONS ET DES PRÉCIPITATIONS INTENSES SUR LES BÂTIMENTS ET LES STRUCTURES

### 1.3.1 LE RISQUE INONDATION

Comme dans le reste du monde, les inondations constituent un risque majeur sur le territoire national où 17 millions de personnes habitent en zones inondables. Pour faire face à cette situation, la prévention reste l'outil essentiel, notamment à travers la maîtrise de l'urbanisation en zone inondable via le plan de prévention des risques naturels. Cette réglementation va de l'interdiction de construire à la possibilité de construire sous certaines conditions. Ces conditions concernent les bâtiments, qu'ils soient existants ou à construire.

En collaboration avec les pouvoirs publics, le CSTB a contribué à la définition de ces conditions et à leur diffusion par le biais de guides concernant la remise en état après inondation, l'évaluation de la vulnérabilité des bâtiments, les travaux de réduction de la vulnérabilité, et la qualification des batardeaux. Le CSTB a mené également d'autres travaux portant, par exemple, sur le comportement des matériaux ou l'évaluation de solutions innovantes comme les bâtiments amphibies<sup>2</sup>.

Les mesures visées par ces guides trouvent leurs limites du fait qu'il est quasi impossible d'empêcher durablement l'eau de pénétrer dans un bâtiment ordinaire entouré d'eau. Aussi est-il indispensable d'aborder la question de la prévention des inondations en agissant de manière cohérente aux différentes échelles : du bassin versant au bâtiment en passant par la zone urbanisée. Pour ce faire, le CSTB apporte sa contribution à des projets réunissant des partenaires intervenant à ces différentes échelles. Ces travaux contribuent à rendre opérationnel le concept de résilience urbaine vis-à-vis de cet aléa particulier.



**Figure 6 : Inondation de la ville de Bellegarde provoquée par la crue du Rhône en 2003**

<sup>2</sup> Salagnac J-L. *Vulnérabilité des bâtiments à l'inondation : qualification du comportement des matériaux*, Décision attributive de subvention n° Y05-29 du 28/10/05, DGUHC

Salagnac J-L. *Bâtiments amphibies et autres solutions pour construire en zone inondable*, Décision attributive de subvention n° Y05-30 du 18/10/05, DGUHC

### 1.3.2 MESURE DES ÉVÉNEMENTS DE PLUIE INTENSE – IMPACT DES PLUIES BATTANTES SUR LES OUVRAGES SEMI-OUVERTS

L'intérêt porté aux événements de pluies extrêmes est initialement motivé par le développement des toitures végétalisées pour lesquelles il est nécessaire de déterminer les coefficients de ruissèlement et d'imperméabilité moyennés sur l'année.

Une approche rationnelle pour déterminer ces coefficients fait appel à des mesures expérimentales permettant de réaliser un bilan hydrique des toitures végétalisées, à partir de l'identification des caractéristiques d'absorption, de ruissèlement et d'évaporation en fonction des événements de pluie caractéristiques d'une année type du climat local.

L'évaluation de ces coefficients ne peut être faite qu'en se référant à des données de pluviométrie fiable sur des périodes courtes (quelques minutes). De ce point de vue les données disponibles auprès de Météo-France, mesurées au pas de 10 mn, ne conviennent pas car elles ne permettent pas d'identifier les intensités maximum qui peuvent intervenir au cours de périodes courtes.

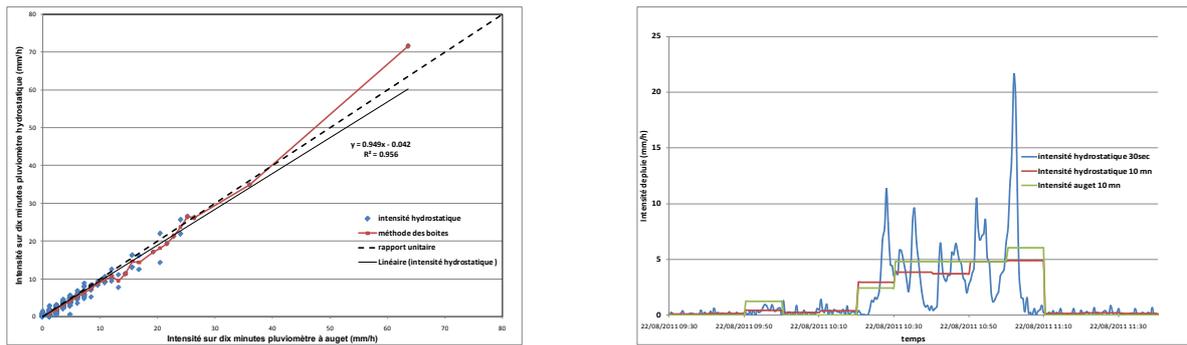
Il était donc nécessaire de mettre en œuvre un capteur de pluie spécifique. Il s'agit d'un capteur dont le cône de captation est identique aux collecteurs des pluviomètres météo. Il réalise une mesure hydrostatique du volume d'eau accumulée dans une colonne selon une sensibilité élevée. Les mesures sont réalisées à la fréquence de 1 Hz et moyennées pour restituer un résultat à l'échelle de la minute. Une purge automatique est opérée entre deux mesures.



**Figure 7 : Pluviomètre hydrostatique - comparaison en site naturel à Nantes**

Une comparaison entre le prototype du pluviomètre hydrostatique et PWS Campbell Scientific a été réalisée. Les résultats montrent une bonne corrélation sur 10 minutes, en revanche la dispersion est plus importante sur 1 minute.

La fidélité des mesures obtenues avec ce capteur de pluie a été validée en référence aux pluviomètres traditionnels au cours d'une période supérieure à une année en condition naturelle. Les résultats d'analyses ont également validés la pertinence de l'approche retenue en mettant en évidence des profils temporels marqués par des pics d'intensité de pluie très supérieurs aux valeurs lissées sur 10 minutes restituées par les pluviomètres traditionnels.



**Figure 8 : Comparaison des mesures des pluviomètres traditionnels à augets et hydrostatique sur 10 min au cours d'une année d'exposition (à gauche), et comparaison des intensités de pluie maximum mesurées au cours d'une matinée par les pluviomètres à augets sur 10 min et hydrostatique sur 10 min et 30 s (à droite).**

Ce pluviomètre a permis d'obtenir un descriptif fin de la pluie sur le site de Nantes à partir des mesures continues faites sur une période de 2 ans et 6 mois (mai 2011 à janvier 2014) avec la définition des caractéristiques statistiques des épisodes de pluie à partir d'un échantillonnage au pas de temps de 30 secondes.

Ainsi, les lois de distribution de fréquence de cumul et de durée de pluie des épisodes ont pu être modélisées par une loi de Weibull dont les paramètres ont été définis. De même, la loi de distribution des fréquences d'intensité sur 30 secondes à l'intérieur de chaque épisode a pu être représentée de façon relativement satisfaisante par une loi log-normale dont les coefficients ont été définis.

Enfin, une première approche de définition des fonctions d'autocorrélation à l'intérieur des épisodes de pluie a été réalisée, nombre de ces fonctions pouvant être approximées par une loi exponentielle décroissante dont l'échelle de temps permet de décrire les caractéristiques d'évolution de l'épisode pluvieux.

L'ensemble de ces lois devraient permettre la reproduction réaliste d'épisodes de pluie, que ce soit pour des modèles numériques ou pour une modélisation en soufflerie.

Les perspectives de cette recherche sont, d'une part, de fidéliser le moyen de mesure pour des pluies naturelles de plus fortes intensités (la fréquence des événements intenses qui restent rares en Pays de la Loire) et d'élaborer une statistique des profils de pluie à l'échelle du territoire.

#### Validation des simulations numériques des phénomènes de pluie battante

La réalisation d'un test grandeur nature dans une architecture semi-ouverte de type stade, pour disposer de données expérimentales vraie grandeur, n'a pas été retenue car jugée trop complexe et surdimensionnée vis-à-vis des ressources disponibles.

L'approche comparative a été réalisée, à partir d'un cas réel (le futur stade Arena 92). Des simulations de pluie battante ont été réalisées avec deux codes de calcul de mécanique des fluides (l'un commercial : Fluent, l'autre open source : OpenFOAM).

## **2. DÉVELOPPEMENT DES OUTILS MÉTHODOLOGIQUES PLURIDISCIPLINAIRE VISANT À L'ANALYSE ET À LA RÉDUCTION DE LA VULNÉRABILITÉ DU CADRE BÂTI**

### **2.1 DÉVELOPPEMENT DES TECHNIQUES DE MESURES EN SOUFFLERIE ATMOSPHÉRIQUE**

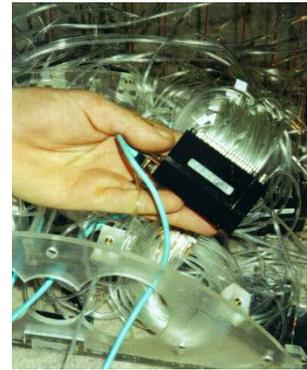
Depuis plusieurs années les capacités de mesure de pression utilisable pas le CSTB pour les études en soufflerie était limitées à 512 voies à 200 Hz. L'augmentation des performances du système de mesure est devenue un enjeu majeur pour le maintien du niveau d'expertise du CSTB dans le domaine de l'ingénierie du vent. Les motivations sont d'ordres techniques et concurrentiels.

Les formes sophistiquées des ouvrages modernes sont de plus en plus complexes et intègrent des éléments structurels plus fins. Cela nécessite une augmentation de la résolution spatiale de mesure pour évaluer fidèlement la réponse des structures aux sollicitations du vent ainsi qu'une amélioration de la résolution temporelle d'analyse pour mieux représenter le spectre en fréquence des efforts.

**Le développement d'un scanner de pression synchrone 1000 voies 1000 Hz a été entrepris pour pallier ces limitations.** Il s'agit d'un processus d'amélioration continu sur la période 2011-2015, dont l'investissement total est estimé à 310 k€.

Les travaux réalisés à ce jour ont permis d'augmenter la fréquence d'acquisition de 200 Hz à 600 Hz et des essais de faisabilité d'acquisitions 1000voiesx1000Hz ont été réalisés. En particulier, le principe du filtrage numérique des signaux a été validé. Le but à atteindre nécessite des développements complémentaires pour faire fonctionner l'ensemble de la vingtaine de nouveaux capteurs multiplexés à 70 kHz qui a été acquis. Rappelons que l'objectif est de développer un scanner de pression synchrone 1000 voies 1000 Hz, soit 1 million de données/seconde. Cela nécessite la mise en œuvre d'une horloge de multiplexage des capteurs et de pilotage de l'acquisition ainsi qu'une électronique d'alimentation des capteurs stabilisée et insensible aux parasites de l'environnement.

De plus, les acquisitions usuelles peuvent durée de 2 à 3 minutes, et aboutir à des fichiers de données de 240 à 360 Mo. Cela nécessite de fiabiliser la technologie de transfert du flux de données vers le système d'acquisition (identification d'éléments compatibles pour traiter 2 Mo/s de transfert vers les volumes de stockage informatique). Enfin une suite logicielle spécifique devra être développée pour tirer parti de l'investissement matériel. Parmi les éléments de cette suite logicielle, on peut indiquer le module d'acquisition LabView et le module de filtrage numérique sous MatLab.

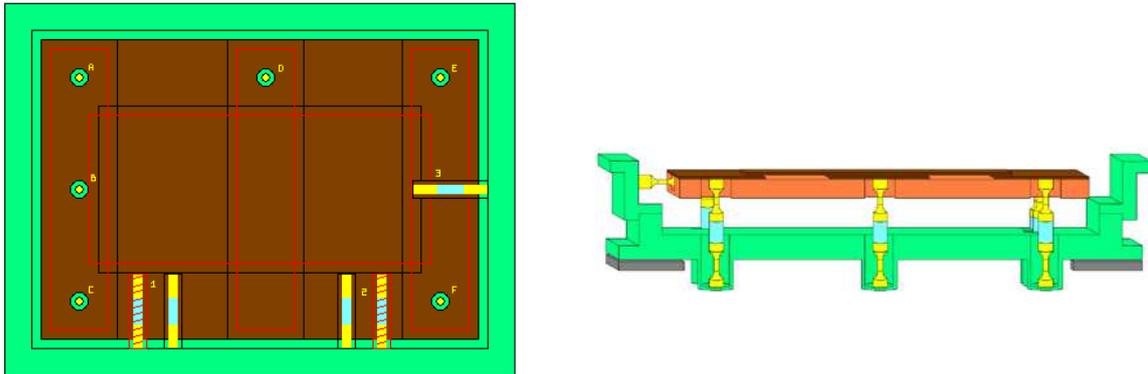


**Figure 9 : Capteurs de pressions multiplexés (à gauche), et mise en place d'une mesure de pression dans une maquette en soufflerie (à droite)**

Les balances dynamométriques sont les principaux systèmes de mesure en soufflerie permettant d'évaluer directement les efforts aérodynamiques appliqués sur les structures complètes. Leur développement et l'évolution des techniques métrologiques associées ont donc une grande importance. Les gammes de mesures des balances disponibles au CSTB sont très larges. Compte tenu de la diversité des applications et des moyens expérimentaux mis en œuvre, les gammes de mesures concernées peuvent aller de quelques grammes à quelques tonnes.

De nouvelles applications suscitent des développements continus de ces systèmes de mesure, qui compte tenu de leurs spécificités doivent être conçus par les utilisateurs eux-mêmes. Les performances recherchées sont dictées par les contraintes de mesure de valeurs moyennes et instantanées et ont trait à la sensibilité, au découplage des composantes, à l'intégrabilité dans les maquettes d'études et à la réponse en fréquence. Ces contraintes ont prévalu lors de la conception d'une nouvelle **balance isostatique à faible encombrement** destinée à être positionnée sous le plancher de la soufflerie atmosphérique du CSTB pour suppléer les défauts devenus rédhibitoires d'une balance datant de la fin des années 70. En particulier, la conception hyperstatique de cette ancienne balance ne permettait pas un découplage matriciel des voies de mesures.

Les compétences accrues en calcul des structures des équipes du CSTB permettent désormais de concevoir ces outils de manière plus fiable et avec davantage de précision que par le passé.



**Figure 10 : Evolution des dimensions des plaques supérieures au cours de l'étude fréquentielle (à gauche), et final de la balance dynamométrique (à droite)**

Le développement d'un **système d'acquisition hybride analogique/numérique** était rendu nécessaire par l'arrivée dans le parc de capteurs, de nouveaux instruments de mesure intégralement numériques (sondes Cobra, balances ATI). La synchronisation actuellement utilisée de plusieurs PC d'acquisition dédié chacun à un type de capteur est techniquement difficile et financièrement sans avenir. L'adaptation des modes d'enregistrement aux capteurs de demain permet l'acquisition de signaux de natures différentes sur un même système, assurant ainsi la simultanéité des mesures.

Jusqu'à aujourd'hui les approches en soufflerie consistaient à adapter la simulation du vent au type de vent déterminé par le site d'implantation de l'ouvrage. Une réflexion sur la méthode de simulation du vent à échelle réduite a permis de définir une nouvelle approche consistant à utiliser une simulation physique unique pour l'ensemble des vents à simuler. L'approche de recherche précise la méthodologie expérimentale de la normalisation des mesures par la pression dynamique mesurée en un point particulier de l'ouvrage et évalue également le biais inhérent à l'utilisation de cette simplification. Les avantages attendus sont une meilleure maîtrise de la simulation et un gain de temps sur chacune des études menée en soufflerie.

Traditionnellement, les mesures en soufflerie sont réalisées avec des maquettes statiques. Les développements technologiques récents de systèmes de mesures dynamiques permettent de réaliser des mesures de déplacements de systèmes mobiles avec une bonne résolution. Ainsi l'adaptation d'un **système de trajectographie** optique 3D, dans une soufflerie du CSTB, et sa synchronisation avec les autres systèmes de mesures analogiques, ouvrent tout un champ nouveau d'application (analyse vibratoire d'ouvrage, suivi de trajectoire,...). Le système adapté par les ingénieurs du CSTB acquiert jusqu'à 20 points dans l'espace à la fréquence de 400Hz et avec une résolution spatiale de 1 mm dans un volume de 15 m<sup>3</sup>.

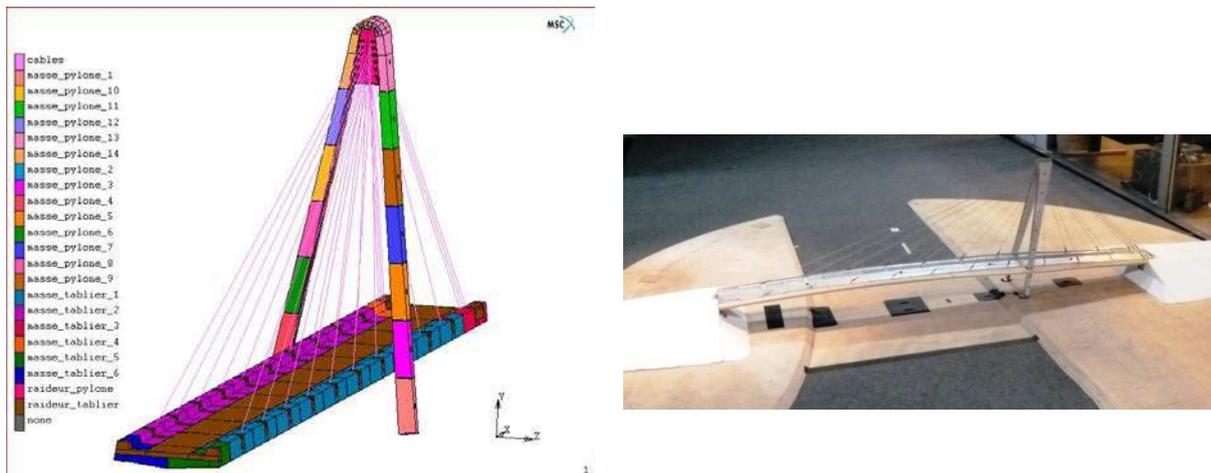
## 2.2 CONCEPTION OPTIMISÉE DES MAQUETTES D'ÉTUDES

La conception des maquettes pour les études en soufflerie bénéficie des évolutions des modes de conception des ouvrages réels. Ainsi, l'adoption par les équipes de conception des ouvrages des modèles numériques 3D et BIM (Building Information Model) et de la modélisation par éléments finis, permet de disposer de grandeurs de dimensionnement utilisables pour la conception virtuelle des maquettes aérodynamiques.

La maquette numérique 3D d'un ouvrage permet de prendre en compte l'ensemble des masses et des raideurs de la structure telle qu'elle sera modélisée à échelle réduite par une maquette physique en soufflerie. A partir des résultats de calculs par éléments finis, il est possible de reproduire les modes de vibration avec une grande confiance et en plus grand nombre. La maquette peut être ainsi mieux conçue, avec une meilleure maîtrise *a priori* de son comportement.

Ceci est d'autant plus important que les structures étudiées sont légères. Ainsi, avec les ouvrages élancés modernes, comme certains tabliers de pont, la masse d'air qui les entoure doit être prise en compte dans le calcul dynamique et dans les simulations. La masse étant un paramètre critique pour les calculs de déplacement et de vibration, une erreur de 10 à 20 % est possible si cette précaution n'est pas prise.

Par ailleurs, la durée même du processus de conception de la maquette et de mise en œuvre de l'étude en soufflerie se trouve grandement optimisée par cette approche. Le gain de temps en phase de conception ainsi qu'au cours de la phase d'étalonnage de la maquette s'ajoute à une plus grande souplesse dans la gestion du projet, incluant notamment des possibilités accrues de sous-traitance.



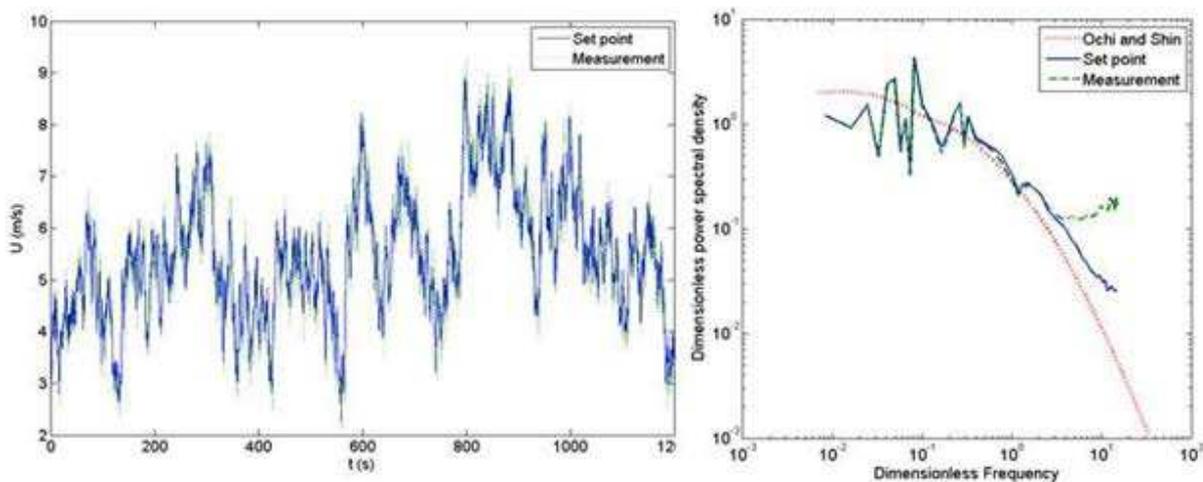
**Figure 11 : Conception de la maquette aérodynamique du pont de Gand**

## 2.3 EFFET COMBINÉ DE LA HOULE ET DU VENT SUR LES STRUCTURES OFFSHORE

L'étude des moyens de simulation des effets combinés de la houle et du vent sur les structures offshore était motivée par le manque de connaissances des conditions environnementales à considérer pour l'implantation des futures fermes éoliennes off-shore au large des côtes françaises, en particulier en Pays de la Loire.

La méthode privilégiée pour cette recherche a consisté à extrapoler une méthode d'étude, à échelle réduite, sur le bassin de houle de l'Ecole centrale de Nantes. Les règles de similitude à respecter ont conduit à privilégier le respect du nombre de Froude.

Le moyen d'essai finalisé permet de reproduire le vent offshore avec une composante turbulente proche de celle modélisée par le spectre de Ochi et Shin, soit un spectre plus riche en fréquence basse que les spectres de vent terrestres habituellement considérés, jusqu'à 0.01 Hz à comparer aux basses fréquences de 0.1 Hz pour les vents terrestres.



**Figure 12 : Mesure du vent turbulent produit par le système de soufflage au-dessus du bassin de houle de l'Ecole centrale de Nantes, comparaison des spectres de vent expérimental et de Ochi & Shin.**

En parallèle, l'étude a conduit à la mise au point d'une maquette d'éolienne flottante à l'échelle du 1/50<sup>ème</sup>. Il s'agit d'une maquette dynamiquement semblable qui reproduit les premiers modes propres d'un pylône réel avec un entrainement forcé du rotor permettant la mesure des efforts de poussée sur le rotor (premier mode de flexion de la tour à 0,3 Hz, dimensionnement avec respect des masses, des inerties et de la position du centre de gravité du système). La recherche a permis de valider la méthode d'étude au cours de deux séries de mesures en bassin qui ont permis de caractériser l'éolienne. La méthode proposée consiste à construire un rotor équivalent en termes d'efforts de trainée avec des pales d'éolienne qui reproduisent les efforts de trainée à un nombre de Reynold de l'écoulement inférieur à la réalité. Le vrillage des pales est

modifié par rapport à la forme réelle afin de maintenir le profil de trainée le long des pales ainsi que la localisation des points de décollement de l'écoulement.

Les essais réalisés sur le bassin de houle de l'Ecole centrale de Nantes au cours du mois de juillet 2012 étaient les premiers essais de ce type réalisés en France avec un modèle d'éolienne flottante de cette taille, soumise à la fois à la houle et au vent. Le dispositif de soufflage étudié et optimisé donne entière satisfaction pour la reproduction du vent marin.



**Figure 13 : Réalisation du système de soufflage de simulation du vent off-shore sur le bassin de houle de l'Ecole centrale de Nantes, et test de qualification de la maquette d'éolienne flottante dynamiquement semblable**

## **2.4 MODÉLISATION NUMÉRIQUE ET EXPÉRIMENTALE DES PHÉNOMÈNES DE GIVRAGE PAR ACCRÉTION DE NEIGE COLLANTE**

Cet axe de recherche est consacré à l'étude du givrage atmosphérique des structures par accrétion de neige collante. Les particules à la base de ce type d'accrétions sont caractérisées par un mélange d'eau liquide et de glace quantifié par un paramètre sans dimension : la teneur en eau liquide: TEL définie comme le ratio de la masse liquide sur la masse totale de la particule.

La recherche a pour objectif de développer la simulation numérique des phénomènes de givrage couplée à une approche expérimentale. *In fine*, il en est attendu d'accéder à l'évaluation quantitative et qualitative des accrétions de neige collante sur les structures de génie civil (façades des bâtiments, pylônes, câbles,...) et aéronautiques.

L'approche expérimentale, réalisée dans la soufflerie climatique du CSTB, a été consacrée à l'étude de l'effet de la TEL sur la formation d'une accrétion de neige sur une structure de test. La TEL peut être ajustée expérimentalement en modifiant la température ambiante à laquelle les tests sont réalisés. Les résultats peuvent être synthétisés par un coefficient  $\beta$  défini comme le ratio entre le flux massique de l'accrétion, et le flux massique de neige incidente. Une difficulté majeure de l'approche expérimentale réside dans l'évaluation précises des conditions aux limites (tailles de particules, TEL) du flux de particules impactant

la structure, Or ces gradeurs sont primordiales afin de les corrélérer à l'évolution du coefficient  $\beta$ .

Les conditions aux limites du modèle d'accrétion ont donc été évaluées par simulation numérique afin de déterminer les deux paramètres suivant : la distribution en taille des particules à l'amont de la structure et la TEL associée.

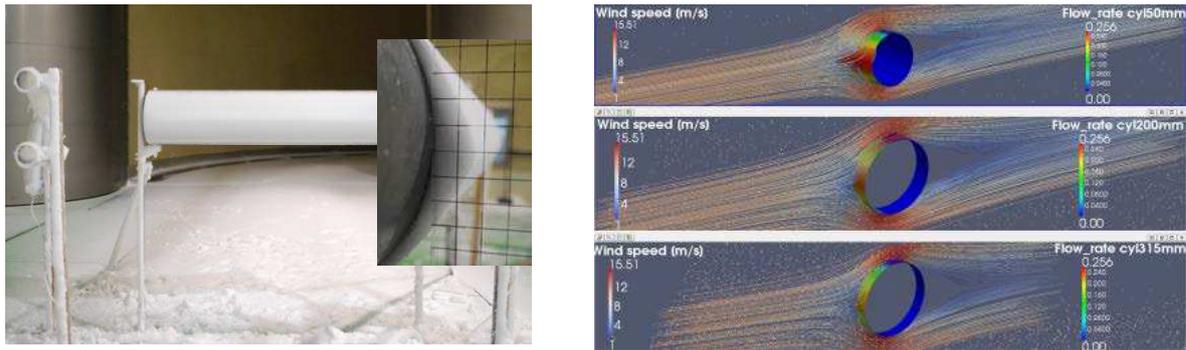
Une première partie du modèle repose sur la simulation numérique du givrage progressif des particules d'eau issues du canon à neige dans l'environnement froid de la soufflerie. Un modèle de transport des particules dans un écoulement d'air uniforme, couplé à un modèle thermique du givrage, permet de quantifier l'état thermique des particules et leur TEL pour un temps de vol similaire à celui qu'elles ont en soufflerie.

La seconde partie du modèle numérique d'accrétion concerne l'analyse du comportement dynamique des particules transportées par le flux d'air à proximité de la structure expérimentale, quantifié par le nombre de Stokes. La capacité des particules à impacter la structure est synthétisée par le coefficient de collision  $\eta_1$  ratio du flux de particules qui impactent la surface et du flux de particules incident.

Une approche diphasique a été retenue utilisant une modélisation dite lagrangienne du transport de particules discrètes, reposant sur un calcul préalable de l'écoulement de l'air autour de la structure. Le calcul des trajectoires de chacune des particules introduites dans l'écoulement permet de déterminer si elles impacteront la structure ou non. Le code OpenFOAM a été utilisé pour cette modélisation.

L'analyse croisée du coefficient  $\beta$  évalué expérimentalement avec celle du coefficient  $\eta_1$  évalué numériquement permet d'évaluer la capacité des particules à s'accrocher à la surface en fonction de la TEL. Le transport par le flux et le collage à la structure sont ainsi décorrélés. Le résultat est évalué par le coefficient de collage  $\eta_2$  qui est le ratio du nombre de particules qui collent à la surface sur le nombre de particules qui impactent la surface. Une étude numérique de ce coefficient  $\eta_2$  a été implémentée dans le modèle numérique lagrangien en s'appuyant sur l'angle d'impact entre la particule et la surface. Cependant le comportement de ce modèle n'a pas été jugé satisfaisant en comparaison aux valeurs de  $\eta_2$  déduites de l'analyse croisée expérimentale/numérique.

En parallèle, les moyens de mesures des particules givrantes produites en soufflerie doivent être complétés par une sonde de type "King" ou "Nevzorov" qui permet de déterminer en temps réel le rapport des phases liquide/solide des particules au moment de l'impact. Le principe de mesure est simple mais nécessite d'être adapté aux spécificités des conditions de simulation en soufflerie climatique.



**Figure 14 : Modélisation expérimentale d'accrétion de neige humide sur un cylindre en soufflerie climatique – Simulation numérique de l'écoulement diphasique et de l'accrétion**

## **2.5 MÉTHODES NUMÉRIQUES DANS LE DOMAINE DE L'INGÉNIEURIE DU VENT, MODÈLES NUMÉRIQUES DE MÉCANIQUE DES FLUIDES ET DIMENSIONNEMENT AU VENT DES STRUCTURES DE GRANDES DIMENSIONS.**

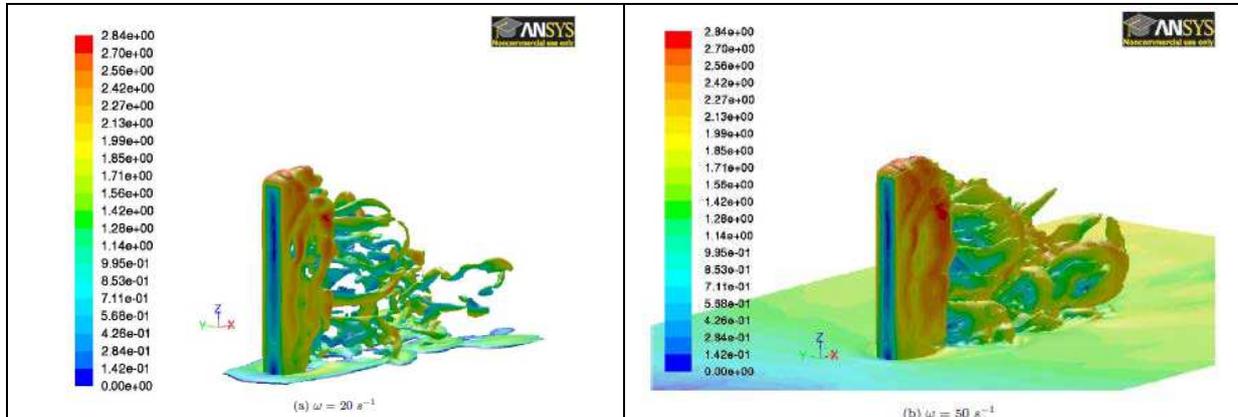
Les modèles numériques de mécanique des fluides (codes CFD) permettant notamment de simuler les actions du vent sur les bâtiments sont, grâce au développement des moyens de calculs, en constante évolution. Le calcul numérique CFD est complémentaire des mesures en soufflerie, notamment pour ce qui concerne les évaluations à grande échelle (ville ou même région). Néanmoins, les possibilités du calcul selon des méthodes RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) reste limitées aux champs de vitesses moyens en excluant de fait la reproduction des phénomènes transitoires et des effets de pointes (rafales de vent).

Les méthodes LES (Large Eddy Simulation) sont intéressantes dans ce domaine. Jusqu'à présent réservées aux milieux universitaires, ces méthodes peuvent aujourd'hui être appliquées à l'échelle de l'ouvrage. La modélisation de la turbulence par approche LES et la réalisation de maillage avec une description fine de la couche limite sont maintenant envisageables.

Cependant, l'utilisation de ces méthodes requiert une phase de validation ou d'évaluation de leurs limites qui doit s'appuyer sur une analyse comparative des cas étudiés en simulations physiques.

L'objectif de ce projet de recherche, soutenue par un travail de thèse initié en octobre 2013, est de faire progresser l'application des techniques LES dans le domaine du bâtiment. La validation numérique / expérimentale se fera par comparaison avec les valeurs mesurées en soufflerie à couche limite atmosphérique ou sur site (champs de vitesse instationnaires par PIV, charges locales par mesure des pressions et charges globales par mesure des forces ou intégrations des pressions synchrones). Le projet inclut la génération d'un vent turbulent représentatif des vents forts en vraie grandeur, la production et l'évaluation des signaux de vitesse et de pressions et leur traitement statistique, ainsi que des approches de vérification et de validation.

L'expérience de plusieurs ingénieurs de la direction CAPE du CSTB dans l'application de la CFD à l'échelle du quartier et à l'échelle du bâtiment avec le modèle LES est valorisée dans ce cadre.



**Figure 15 : Représentation des isovalues de vorticité  $20\text{s}^{-1}$  (à gauche) et  $50\text{s}^{-1}$  (à droite). Représentation selon la vitesse instantanée**

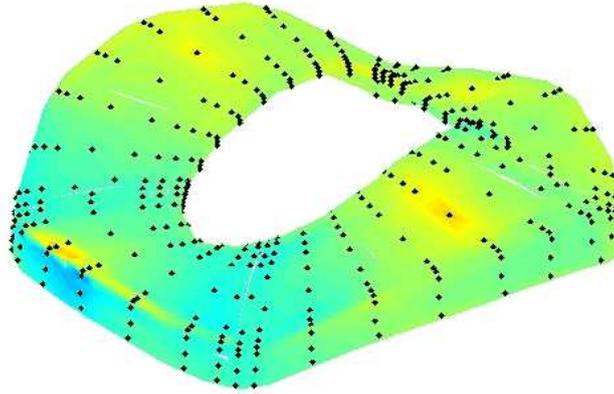
**Dimensionnement au vent des structures de grandes dimensions, à partir d'un nombre restreint de chargements statiques équivalents aux chargements aérodynamiques réels.**

Le vent est souvent le paramètre dimensionnant des structures de grandes dimensions, comme par exemple les couvertures de stades. Il crée un champ de pression aérodynamique de part et d'autre de l'enveloppe de la couverture qui génère des sollicitations dans toute la structure support. Sur la base de la connaissance du champ de pression induit par le vent obtenu par des essais en soufflerie, fluctuant dans le temps et dans l'espace, et du comportement mécanique de la structure déduit d'une modélisation par éléments finis, il est possible de calculer l'ensemble des sollicitations résultantes dans la structure afin d'effectuer des vérifications de résistance. Ces sollicitations résultent de l'action directe du vent par l'intermédiaire des pressions aérodynamiques (actions quasi-statiques) et de la réponse de la structure sous la forme de forces d'inertie résultant de la participation des modes de vibration de la structure (actions dynamiques).

Cependant, l'identification de toutes les grandeurs de dimensionnement de chaque élément de la structure en termes d'effort interne, de déplacement, d'accélération, etc. devient vite rédhibitoire pour les concepteurs compte tenu du nombre de paramètres mis en jeu, et conduit à rechercher des approches simplifiées et sécuritaires.

L'objectif de la recherche, développée dans le cadre d'un projet de thèse à débiter en 2014, est de construire une méthodologie d'optimisation et de simplification des cas de charges aérodynamiques pour le dimensionnement d'une structure de grandes dimensions soumise au vent. Cette méthodologie doit permettre d'extraire une série limitée de chargements statiques équivalents, tels qu'ils permettent de couvrir l'ensemble des grandeurs de dimensionnement pour toutes les réponses de la structure, en prenant en compte à la fois les effets

quasi-statiques et dynamiques. Pour cela, les outils d'analyse de l'état de l'art seront mis en œuvre (analyse en composantes principales, Linear Discriminant Analysis, Clustering, Proper Orthogonal Decomposition..) dans le but d'identifier ces cas de charge principaux et les incertitudes associées.



**Figure 16 : Représentation d'un cas de charge vent sur l'enveloppe d'un stade**

### **3. CONTRIBUTIONS AUX ÉVOLUTIONS DU CADRE TECHNIQUE-RÉGLEMENTAIRE TRAITANT DES ACTIONS CLIMATIQUES SUR LE CADRE BÂTI**

#### **Adaptation du cadre réglementaire du dimensionnement au vent**

Les règles NV65 ont été pendant très longtemps le document technique normatif en vigueur dans le domaine de la construction en France. Bien qu'encore utilisables pendant quelques années, ces règles sont aujourd'hui remplacées par l'Eurocode 1, partie 1-4 "Actions du vent" (NF EN 1991-1-4) publié en novembre 2005 à titre de norme, accompagné de l'Annexe nationale française (NF EN 1991-1-4/NA) édité en mars 2008.

Cette évolution doit être accompagnée comme en témoignent les demandes récentes de définition des vitesses de vent réglementaires dans les DOM hors période cyclonique. Ceci a mené par exemple, en 2012, à une définition des vents extrêmes sur le nouveau département de Mayotte, de manière à placer ce territoire dans le giron de la codification nationale<sup>3</sup>.

Depuis 1965, la connaissance du vent et de ses effets a beaucoup progressé en raison de l'enrichissement des bases de données climatologiques et des modélisations plus élaborées du vent naturel turbulent. En parallèle, la connaissance des actions du vent sur les constructions s'est également enrichie par le développement des simulations physiques en soufflerie à couche limite atmosphérique turbulente.

L'Eurocode 1 intègre toutes ces évolutions ainsi que la prise en compte d'une sensibilité plus marquée des structures modernes soumises au vent. Cette sensibilité résulte de l'utilisation de matériaux plus performants, et de méthodes de calcul aux éléments finis très précises qui permettent de construire plus léger et de plus en plus élancé. Ainsi, l'Eurocode propose pour les constructions très élancées des méthodes détaillées pour estimer les effets dynamiques du vent.

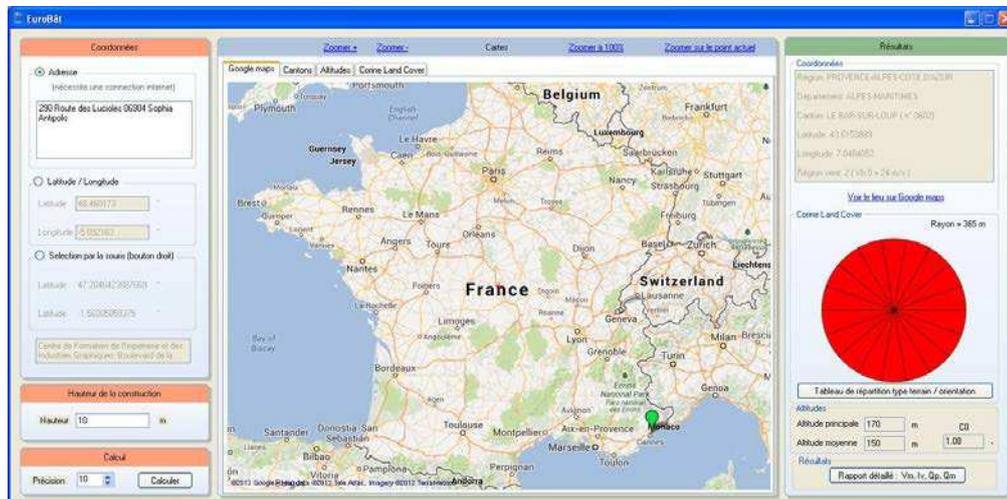
Il est cependant de première importance du point de vue sécuritaire et économique d'évaluer l'impact du changement de réglementation dans les cas les plus usuels de bâtiments de forme classique non élancée (habitat pavillonnaire et collectif, bâtiments industriels et immeubles de bureaux, correspondant aux constructions courantes à base rectangulaires sur lesquelles peut s'appliquer la méthode simplifiée III - 2,9 des règles NV65) construits dans des conditions d'environnement les plus fréquentes (zones suburbaines et urbaines).

Suite à la présentation comparative et pédagogique des normes NV65 et Eurocodes "Vent" menée en 2010, une version informatique de ce travail a été entreprise, destinée aux professionnels à des fins de sensibilisation. Une application informatique baptisée EuroBat a été réalisée. Elle permet de définir automatiquement les conditions de vent pour lesquelles un ouvrage doit être dimensionné. Ce calcul est réalisé à partir d'une base réglementaire "Eurocode vent" et de l'utilisation de bases de données géographiques, topographiques et sur la nature des sols par un système SIG. En parallèle, une veille a été

---

<sup>3</sup> Eurocode 1: Actions sur les structures. Parties 1-4 : Actions générales — Actions du vent. Annexe nationale à la NF EN 1991-1-4:2005NF. Septembre 2012

maintenue pour comparer les vitesses observées lors de chaque phénomène climatique fort aux vitesses règlementaires.



**Figure 17 : Masque de saisie du logiciel Eurobot**

## CONCLUSION

L'achèvement de l'objectif global du projet, à savoir l'optimisation de la réalisation des ouvrages vis-à-vis des questions de sécurité, de confort et de réduction des risques climatiques, requiert la production d'outils opérationnels, de méthodes pratiques de modélisation, de métrologie et d'analyses pour les chercheurs, ainsi que de règles à l'usage des concepteurs. . L'usage conjoint de techniques expérimentales en soufflerie, pour la modélisation physique des phénomènes, et de simulations numériques est nécessaires pour y parvenir. Des mesures *in situ* à échelle réelle sont aussi parfois requises pour valider les résultats.

Le travail de recherche sur la conception des espaces urbains est entrepris par des équipes pluridisciplinaires impliquant des chercheurs ayant des compétences en structures, en aérodynamique, en climatologie, voire en sciences humaines et sociales. Les chercheurs doivent être en contact régulier avec les demandeurs et utilisateurs de ces espaces.

## LISTE DES RÉFÉRENCES

### COMMUNICATIONS ET ARTICLES

Magalhaes F., Caetano E., Cunha A., Flamand O., Grillaud G., Ambient and free vibration tests of the Millau Viaduct: evaluation of alternative processing strategies , *Engineering structures*, 45, December 2012, p. 372–384

Lemonsu A., Koukoku-Arnaud R., Desplat J., Salagnac J.L., Masson V., Evolution of the Parisian urban climate under a global changing climate *Climatic change*, 116/3-4, February 2013, p 679-692

Mebarki A., Valencia N., Salagnac J.L., Barroca B. Flood hazards and masonry constructions: a probabilistic framework for damage, risk and resilience at urban scale, *Natural hazards and earth system sciences*, 12/5, special issue "Natural hazard resilient cities", May 2012, p.1799-1809

Garvin S., Zevenbergen C., Salagnac J.L. Urban flood resilience: beyond vulnerability using innovative non-structural measures, *Flood risk 2012*, Proceedings of the 2nd European conference on flood risk management, November 19-23, 2012, Rotterdam, NLD, CRC Press, 2013, p. 1441-1443

Benidir A., Flamand O., Galop sec des câbles inclinés, *Conférence Câbles 2012*, Isttar, 27 et 28 novembre 2012

Benidir A., Flamand O., Roughness and shape effects on an inclined circular cylinder, *Proceeding of EACWE 2013*, Cambridge, UK, July 7-11, 2013

Benidir A., Flamand O., Gaillet L., Dimitriadis G., Roughness and circularity defect on circular cylinder in critical regime: Wind tunnel experiments on bridge stays cables protection tubes in dry conditions, soumis au *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, décembre 2013

Flamand O., De Oliveira F., Stathopoulos-Vlavis A., Papanikolas P., Conditions for occurrence of vortex shedding on a large cable stayed bridge. Full scale data from monitoring system, *Proceeding of EACWE 2013*, Cambridge, UK, July 7-11, 2013

Courbois A., Flamand O., Toularastel J.L., Ferrant P., Rousset J.M. Applying relevant wind generation techniques to the case of floating wind turbines, *Proceeding of EACWE 2013*, Cambridge, UK, July 7-11, 2013

Pigolotti L., Mannini C., Bartoli G., Flamand O., Computational investigation on the unsteady pressures on two towers at close distance, *Proceeding of EACWE 2013*, Cambridge, UK, July 7-11, 2013

Deliancourt F., Sicot C., Aguinaga S., Borée J., Bouchet J-P., Simulation of details in wind tunnel testing - Application to railway trains, *48th Applied Aerodynamics Symposium*, 2013

Pigolotti L., Mannini C., Bartoli G., Flamand O., Computational investigation on the unsteady pressures on two towers at close distance, Proceeding of EACWE 2013, Cambridge, UK, July 7-11, 2013

Marchand D., Colbeau L., Dynamiques individuelles et communautaires de résilience après Xynthia, Gestion des risques naturels - Leçons de la tempête Xynthia, Editions Quae, 2012

SMARTeST, 2013. Flood Resilience Technologies; report of the EU-FP7 project n° 244102: Smart Resilience Technology, Systems and Tools [En ligne : <http://www.floodresilience.eu/>]

DGALN, Référentiel de travaux de prévention de l'inondation dans l'habitat existant, 2012. [En ligne : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Referentiel-de-travaux-de.html>]

MEDDTL, Construire en montagne : la prise en compte du risque torrentiel, 2010 [En ligne : [http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/GUIDE\\_CONSTRUIRE\\_EN\\_MONTAGNE.pdf](http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/GUIDE_CONSTRUIRE_EN_MONTAGNE.pdf)]

Vigano A. Delpech P., Aguinaga S., Guffond D., Borée J., Wind tunnel assessment of atmospheric icing and wet snow accretions on structures, Proceeding of ICSE, Fukui, Japan, 2012

Vigano A. Delpech P., Aguinaga S., Guffond D., Borée J., Wind Tunnel Assessment of Atmospheric Icing and Wet Snow Accretions on Structures, Proceeding of EACWE 2013, Cambridge, UK, July 7-11, 2013

Flamand O., Danbon F., Rossi F., Wind forces on complex shape individual roofs – a contribution to codification, Proceeding EACWE 2013, Cambridge, UK, July 7-11, 2013

## **RAPPORTS**

Courtine S., Barre C., Confrontation observations vraie grandeur / essais en soufflerie sur le chantier Fontanel, "Vénissieux Démocratie" à Vénissieux (69), CSTB, 2013

Flori JP., Etat d'avancement de la mise au point d'un capteur de pluie hydrostatique, CSTB, 2012

Flori JP., Capteur hydrostatique et caractéristiques de pluviométrie à Nantes, CSTB, 2013

Salagnac JL., Marchand D., Florence C., Delpech P., Axes JM., Impact des inondations sur le cadre bâti et ses usagers, CSTB, 2013

Lenoir D., De Oliveira F., Système d'acquisition hybride analogique/numérique, CSTB, 2013

Grillaud G., Considérations sur la simulation du vent en soufflerie, CSTB, 2012

De Oliveira F., Développement d'un scanner de pression synchrone 1000 voies 1000 Hz, CSTB, 2013

GAILLETON A., Conception d'une balance dynamométrique, CSTB, 2012

GAILLETON A., Contrôle des écoulements dans une grande soufflerie avec ventilateurs libres. Contrôle de la turbulence par la mise en série de ventilateurs, CSTB, 2012

DIAKITE B., Conception d'un système de régulation thermique d'un capteur de particules givrantes mise en œuvre du système dans la soufflerie climatique du CSTB de Nantes, CSTB, 2013

Berthaut J., Barré C., Stabilité des Grues à tour, bilan 2012, CSTB, EN-CAPE 12. 204 C-V0, 2012

Heck J.V., Etude par voie analytique des effets aéroélastiques sur une structure simple selon l'approche quasi stationnaire. Travail préparatoire à une évolution du logiciel DYCAST, CSTB, 2013

Aguinaga S., Formation des accrétions de neige collante sur les structures : modélisation numérique, CSTB, 2013

## THÈSES

### **Courbois A., Étude expérimentale du comportement dynamique d'une éolienne offshore flottante soumise à l'action conjuguée de la houle et du vent, Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2013.**

Ce travail porte sur l'étude expérimentale du comportement dynamique d'une éolienne flottante sous l'action conjuguée de la houle et du vent. Pour cela, nous avons développé un nouveau moyen d'essai permettant la génération de vent sur le bassin de houle de l'École Centrale de Nantes. La qualification aérodynamique de ce dispositif a mis en évidence un faible taux de turbulence et une bonne homogénéité spatiale. Ce dispositif permet également

la génération de fluctuations par contrôle de la vitesse de rotation des ventilateurs. Dans un second temps, un modèle réduit d'éolienne flottante a été dimensionné à l'échelle du 1/50e suivant une méthodologie adaptée à ce type d'essai. Cette maquette a ensuite été étudiée en bassin afin de caractériser son comportement sous l'action de la houle et du vent. L'influence de la direction principale de la houle par rapport au vent ainsi que de fluctuations basses fréquences caractéristiques d'un spectre de vent marin est aussi évoquée dans ce document.

Les résultats de ces essais ont finalement fait l'objet d'une première comparaison avec un modèle numérique développé au LHEEA. Parallèlement, les résultats des essais ont également été comparés avec une approche simplifiée remplaçant le rotor par un disque équivalent en termes de traînée aérodynamique afin de valider ou non ce type de simplification.

### **Vigano A., Experimental and Numerical modeling of wet snow accretion on structures, Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2012.**

The present work aims at studying the atmospheric phenomenon of wet-snow accretion to structures. This phenomenon may induce severe damages to structures. Freezing particles which generate wet-snow accretions are characterized by a mixed phase ice/water. The particle state is quantified by a dimensionless parameter: the liquid water content  $LWC$  defined as the ratio of the particle liquid mass to the whole particle mass. Both experimental and numerical approaches are undertaken to investigate the subject. The experimental approach, undertaken in a climatic wind tunnel, is based on the  $LWC$  effect on the accretions obtained on a test structure. The particle  $LWC$  is tuned by adjusting the ambient temperature of the test chamber. The results are synthesized by a coefficient  $\beta$  defined as the ratio of the accretion mass flux to the snow mass flux. A first numerical model assesses the boundary conditions of the accretion model, i.e. the particle size distribution upstream the structure and the associated  $LWC$ . The first part of accretion model concerns the study of the particle behavior close to the structure which is quantified with a Stokes number. The efficiency of particles to impact the structure is synthesized by a dimensionless parameter  $\eta_1$ . The analysis of the experimental coefficient  $\beta$  according to  $\eta_1$  is developed. This allows to study the efficiency of particles to stick on the structure as a function of the  $LWC$ . The result is synthesized by the  $\eta_2$  coefficient. The second part concerns an attempt to model the accretion shape by the sticking efficiency  $\eta_2$  as a function of the particle-surface angle of impact. A series of perspectives are presented.

**SIEGE SOCIAL**

84, AVENUE JEAN JAURÈS | CHAMPS-SUR-MARNE | 77447 MARNE-LA-VALLÉE CEDEX 2  
TÉL. (33) 01 64 68 82 82 | FAX (33) 01 60 05 70 37 | [www.cstb.fr](http://www.cstb.fr)

