



HAL
open science

CSTB - Incertitudes associées aux évaluations par modélisation et par approches combinées, rapport final

Stéphanie Vallerent, Julien Guilhot, François Demouge, Xavier Faure, Sylvain Aguinaga, Frédéric Danbon, Benjamin Haas, Seddik Sakji, Samuel Carré, Nicolas Noe, et al.

► **To cite this version:**

Stéphanie Vallerent, Julien Guilhot, François Demouge, Xavier Faure, Sylvain Aguinaga, et al.. CSTB - Incertitudes associées aux évaluations par modélisation et par approches combinées, rapport final. CSTB - Centre scientifique et technique du bâtiment. 2013. hal-01044805

HAL Id: hal-01044805

<https://cstb.hal.science/hal-01044805>

Submitted on 24 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.

Simulation et outils numériques

Incertitudes associées aux évaluations par modélisation et par approches combinées

Rapport final

VALLERENT Stéphanie

Novembre 2013

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

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

Simulation et outils numériques

**Incertitudes associées aux évaluations par
modélisation et par approches combinées**

Rapport final

VALLERENT Stéphanie

Université Paris-Est, Centre scientifique et technique du bâtiment,
Direction sécurité structure et feu

Collaborateurs : J. GUILHOT, F. DEMOUGE, X. FAURE, S. AGUINAGA, F.
DANBON, B. HAAS, S.SAKJI, S. CARRE, N. NOE, J-V. HECK

Novembre 2013

© 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 : **VALLERENT S. (coord.), Incertitudes associées aux évaluations par modélisation et par approches combinées, rapport final, CSTB, novembre 2013, 43 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

Le développement d'outils numériques, indispensables pour gérer la complexité grandissante des modes constructifs, nécessite de pouvoir quantifier la précision des résultats obtenus par une approche purement numérique ou combinant essais et calculs. Dans ce contexte, la confiance en la modélisation des phénomènes est un point important, mais il n'est pas le seul car un certain nombre d'incertitudes existent. Ainsi, l'objectif de cette action support à la priorité scientifique et technique "Simulation et outils numériques" du programme de recherche 2010-2013 du CSTB, était la mise en œuvre des outils nécessaires à la qualification de la précision associée à un résultat d'évaluation lorsque celui-ci est obtenu par une approche purement calculatoire ou combinant essais et calculs.

Mots clés : simulation numérique, incertitude, précision

Abstract

With the increasing use of numerical simulation that is needed to handle the increasing complexity of buildings, one needs to quantify the accuracy of the results. The confidence in these results comes first from the validity of the used models but not only. Indeed a certain number of uncertainties exist. Therefore, the aim of the action was to evaluate the precision of the result that are obtained only by numerical simulation or by the combination of simulation and experiments, and, if necessary, to improve this result.

Keywords: numerical simulation, uncertainty, precision

Table des matières

INTRODUCTION.....	8
1. INCERTITUDES DANS LE DOMAINE DE LA CLIMATOLOGIE, DE L'AERODYNAMIQUE, DE LA POLLUTION ET DE L'EPURATION.....	9
1.1 Recalage climatique par simulation numérique.....	9
1.2 Benchmark des codes aérauliques	11
1.3 Optimisation de la modélisation numérique des souffleries du CSTB	15
1.4 Validation code d'interaction fluide structure	21
2. INCERTITUDES DANS LE DOMAINE DE L'ENERGIE ET DE L'ENVIRONNEMENT	24
2.1 Méthode globale d'application de la propagation d'incertitudes couplées appliquée au moteur de calcul COMETH	24
2.2 Méthodes d'analyse de sensibilité et de propagation d'incertitudes pour l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments.....	25
3. INCERTITUDES DANS LE DOMAINE DE LA RESISTANCE AU FEU DES STRUCTURES.....	26
3.1 impact des cinétiques de feu non conventionnel sur les structures	26
3.2 modélisation probabiliste des cloisons de grande hauteur en situation d'incendie	28
4. INCERTITUDES DANS LE DOMAINE DE L'ÉCLAIRAGE ET DE L'ELECTROMAGNETISME	30
4.1 Incertitudes associées à l'usage de sources surfaciques équivalentes en éclairage	30
4.2 Estimation et réduction de l'incertitude dans la modélisation de l'exposition aux ondes électromagnétiques	36
CONCLUSION.....	40
LIVRABLES ET PUBLICATIONS	41
Rapports de recherche	41
Publications	41

Liste des tableaux

Tableau 1: Corrélation et erreur absolue pour 4 parcours avec les méthodes 2009 et 2013.....**Erreur ! Signet non défini.**

Liste des figures

Figure 1 : Instrumentation de la maquette et mise en place dans la soufflerie (2011) ...	11
Figure 2 : Corrélation entre le coefficient de pression interne mesuré en soufflerie et calculé avec Mathis	12
Figure 3 : Maquette de petit collectif dans la soufflerie	13
Figure 4 : Corrélation entre le coefficient de pression interne C_p mesuré en soufflerie et calculé avec Mathis	13
Figure 5: Maillage des 3 souffleries	16
Figure 6 : Ecoulements des souffleries représentés par des lignes d'émissions	17
Figure 7 : Utilisation de zones poreuses anisotropique (en rouge) pour guider les écoulements	18
Figure 8: Impact du positionnement de nids d'abeille dans la SC1; à gauche, nid d'abeille entre le deux coudes ; à droite: nid d'abeille en aval du convergent.....	19
Figure 9: Aubages dans la veine d'essai pour redresser l'écoulement	20
Figure 10 : A gauche : dispositif pour l'étude de maquette de pont de grande longueur; à droite : dispositif de vrillage contrôlé de l'écoulement dans la SC2.....	20
Figure 11 : Description générale de la procédure de validation	22
Figure 12: Schéma adopté dans l'interfaçage d'OpenTURNS avec Safir.....	28
Figure 13 : Suivi de chemins bidirectionnel et cache d'enregistrements adaptatifs	30
Figure 14 : Restitution fidèle de l'éclairage direct et indirect, position des enregistrements	31
Figure 15 : Sources surfaciques équivalentes pour l'illumination du point R.....	32
Figure 16 : Modélisation de la brdf moyenne pour différentes incidences et étendues de sources	33
Figure 17 : Luminance de l'enregistrement en fonction du nombre de SSE.....	34
Figure 18 : Erreur relative en fonction du nombre de SSE.....	34
Figure 19: Visualisation interactive (en bleu : le centre des enregistrements)	35
Figure 20 : Cartographie du champ électrique émis par une antenne située en haut du bâtiment à gauche. Les bâtiments sont représentés en roses et l'espace est divisé en 3 zones décrites ci-après.	37
Figure 21 : Prise en compte des bâtiments courbes avec différents modèles.	38
Figure 22 : Comparaison simulation-mesure sur un parcours à Munich.....	39

INTRODUCTION

Le développement d'outils numériques, indispensables pour gérer la complexité grandissante des modes constructifs, nécessite de pouvoir quantifier la précision des résultats obtenus par une approche purement numérique ou combinant essais et calculs. Dans ce contexte, la confiance en la modélisation des phénomènes est un point important, mais il n'est pas le seul car un certain nombre d'incertitudes existent.

Il existe tout d'abord des incertitudes dites épistémiques, liées à une insuffisance ou à un manque de précision de la connaissance humaine (Quelle est l'épaisseur de la couche d'isolant ? Les débits d'air sont-ils ceux prévus ?). Ces incertitudes se retrouvent ensuite dans les données utilisées pour renseigner les outils de calcul. Il est parfois possible de réduire ces incertitudes en réalisant, par exemple, un certain nombre de mesures, mais il faut cependant garder à l'esprit qu'il est impossible de maîtriser l'ensemble des paramètres d'un bâtiment, même neuf. Ceci établit donc un postulat de départ avec lequel il faut travailler et pose la question de la démarche à suivre pour s'en accommoder.

Il existe également des incertitudes liées à la variabilité d'un paramètre. Cette dernière est, dans certains cas, contrôlée par l'homme. On peut ainsi citer l'hétérogénéité d'une matière fabriquée, par exemple la teneur en eau dans le béton. Parfois, cela n'est pas le cas, comme par exemple pour un événement aléatoire comme la force du vent, ou bien la variabilité naturelle d'un paramètre non contrôlable comme l'hétérogénéité d'un sol.

Ainsi l'objectif de cette action de recherche support était la mise en œuvre des outils nécessaires à la qualification de la précision associée à un résultat d'évaluation lorsque celui-ci est obtenu par une approche purement calculatoire ou combinant essais et calculs. Cette action, transverse aux différents projets de recherche de la priorité scientifique et technique "Simulation et outils numériques", a servi de support au développement des outils numériques en apportant une confiance supplémentaire dans les résultats obtenus. De par la nature même du sujet traité, elle rassemblait des chercheurs provenant de directions très variées à savoir la Direction climatologie, aérodynamique, pollution, épuration (CAPE), la Direction acoustique et éclairage (DAE), la Direction énergie et environnement (DEE) et enfin la Direction sécurité, structures et feu (DSSF). Ainsi, les travaux réalisés au cours du cycle 2011-2013 abordaient des aspects très variés du bâtiment. Le point commun de ces travaux réside dans l'évaluation du niveau de précision, voire l'amélioration de la précision, des résultats de calculs numériques.

Le présent rapport est organisé quatre parties, correspondant aux thématiques traitées par les quatre directions du CSTB impliquées dans cette action support.

1. INCERTITUDES DANS LE DOMAINE DE LA CLIMATOLOGIE, DE L'AERODYNAMIQUE, DE LA POLLUTION ET DE L'EPURATION

1.1 RECALAGE CLIMATIQUE PAR SIMULATION NUMÉRIQUE

Responsable : Julien GUILHOT

Lors de la construction de nouveaux ouvrages d'art (par exemple de type stade, pont, tour de grande hauteur...), une étude de dimensionnement au vent s'avère nécessaire. Cette étude se base alors sur la prise en compte d'une vitesse de référence du vent caractéristique du site étudié. Néanmoins, la définition de cette vitesse de référence nécessite une profondeur de données importante et ne peut donc généralement se faire qu'au niveau d'une station météorologique, souvent éloignée de quelques kilomètres du site étudié. Il faut alors procéder à une étude de recalage climatique permettant d'établir les corrélations entre les caractéristiques du vent entre deux sites, qui permettra de transposer les données mesurées à la station au niveau du site. Ces corrélations sont essentiellement dépendantes de deux paramètres : les effets liés à la topographie (soit le relief entre les deux sites) et ceux liés à la rugosité (soit les frottements issus du type d'occupation du sol : rase campagne, bocage, zone industrialisée, forêt, zone urbaine...). Les recalages climatiques sont aujourd'hui effectués par simulation numérique avec des codes de mécanique des fluides.

Les travaux présentés ici concernent la modélisation numérique des écoulements atmosphériques et s'inscrivent dans la continuité de travaux précédemment réalisés au sein de la Direction CAPE depuis 2005. Plus précisément, l'objectif de ces travaux était d'optimiser les modèles numériques permettant la réalisation de recalage climatique et d'en évaluer la pertinence. Trois codes de calculs CFD commerciaux ont été étudiés: l'un généraliste (Fluent), l'autre spécialisé (TopoWind) et un code open source (OpenFOAM).

Pour chacun de ces trois codes de calcul, et en fonction de leurs caractéristiques propres, différents travaux ont été menés conjointement ou spécifiquement afin de leur permettre de répondre au mieux aux exigences du recalage climatique par approche numérique. Parmi les différentes actions réalisées, on citera :

- Les actions concernant les problématiques de maillage. En effet, les résultats sont très dépendants du maillage associé, c'est-à-dire de la discrétisation volumique du domaine de calcul, particulièrement au niveau de la couche limite près du sol. Des stratégies de maillage ont été établies et des tests de sensibilité réalisés afin d'obtenir le meilleur rendement entre coût du calcul et précision des résultats ;
- Les actions relatives à l'optimisation du modèle de turbulence à mettre en œuvre. La résolution des équations de Navier-Stokes est ici basée sur une approche moyennée (dite RANS) qui nécessite l'ajout d'équations de fermetures. Ces équations peuvent être diverses et font appel à des constantes empiriques qui doivent être choisies pour être les plus adaptées aux phénomènes modélisés ;
- Les actions liées à l'adaptation d'OpenFOAM. Des développements spécifiques ont notamment été réalisés pour permettre l'écriture et la bonne prise en compte des conditions limites avec cet outil de modélisation ;

- Les actions concernant à évaluer et quantifier le rôle joué par le modèle de canopée sous TopoWind.

Afin d'évaluer les stratégies et les développements effectués, ces logiciels ont été mis à l'épreuve sur des « cas réels » permettant de comparer leurs résultats. Deux cas ont été sélectionnés. Le premier correspond à celui de l'emplacement du nouveau stade de Nice. Il s'agit d'un cas particulièrement intéressant car le domaine étudié comprend non seulement des variations de relief importantes, mais également une grande variété de gammes de rugosités différentes. Le second cas est situé au Maroc aux abords d'un pont sur l'Oued Bouregreg. Ce cas est moins discriminant que le premier mais a la particularité d'avoir fait l'objet de mesures en soufflerie permettant de réaliser une comparaison avec des données obtenues expérimentalement. Il s'agit également de compléter le *benchmark* débuté lors de travaux précédents sur des cas plus académiques tels que la colline d'Askervein ou le site de La Clape.

Les simulations réalisées ont permis de mettre en évidence les caractéristiques des trois codes de calculs testés et également de confronter leurs différentes approches et leurs résultats. Ainsi, pour le cas du site du futur stade de Nice dans la plaine du Var, les trois logiciels génèrent des résultats notablement différents mais ces différences ont pu être en grande partie expliquées.

La confrontation avec les mesures réalisées en soufflerie pour le second cas permet d'aboutir à quelques conclusions supplémentaires. Ainsi, le code de calcul TopoWind a confirmé ses limites.

Même s'il présente les avantages d'un logiciel dédié à ce type d'étude (facilité de mise en œuvre, rapidité d'exécution, post-traitement adapté...), le recours à un maillage automatique, et surtout un modèle de turbulence très robuste mais moins élaboré, conduisent à des résultats trop approximatifs.

En revanche, les résultats obtenus via Fluent restent très pertinents et constituent une approche fiable pour la modélisation de ces phénomènes. L'utilisation de ce code est encore néanmoins limitée par le coût de la licence associée et des temps de calcul assez importants lorsqu'il n'est pas possible de recourir aux calculs en parallèle.

Dans ce contexte, OpenFOAM apparaît d'autant plus attrayant. En effet non seulement, la qualité de ces résultats est équivalente à celle obtenue avec Fluent, mais son statut de code Open Source permet une rapidité d'exécution puisque le nombre de licence n'est pas limité et que le calcul parallèle est possible. De plus la loi de paroi spécifique à la prise en compte des rugosités, disponible depuis la version 2.1 et testée ici, ainsi que les derniers développements réalisés en 2012 lui confère une plus grande facilité de mise en œuvre. Une étape reste encore néanmoins problématique avec l'utilisation de ce code : le maillage. En effet, les critères de maillage à respecter pour ce type de simulation sont assez stricts et pour l'instant non atteignables avec le mailleur proposé par OpenFOAM. L'utilisation de Gambit (mailleur associé à Fluent) s'avère encore pour l'instant nécessaire.

1.2 BENCHMARK DES CODES AÉRAULIQUES

Responsables : François Demouge et Xavier Faure

Aujourd'hui, plusieurs logiciels de simulation développés ou utilisés au CSTB traitent pour tout ou partie de la ventilation interne dans les bâtiments (exemple : Mathis, Siren, Comis, Trnsys...). Ces différents codes, qui ont vocation à être diffusés en externe ou utilisés dans le cadre de l'expertise, présentent des fonctionnalités relativement proches. Ce travail de recherche avait pour objectif d'évaluer la performance de ces différents codes en confrontant les hypothèses de calcul, les méthodes de résolution et les résultats obtenus sur des "cas test".

Une première confrontation du code de calcul thermo-aéraulique Mathis (Modélisation de l'Aéraulique, de la Thermique et de l'Hygrométrie InStationnaire d'un bâtiment), développé par la direction CAPE, a été réalisée en 2011 sur des essais en soufflerie traitant du cas de la ventilation naturelle des logements individuels (Figure 1).



Figure 1 : Instrumentation de la maquette et mise en place dans la soufflerie (2011)

Cette confrontation a permis de valider l'emploi d'un modèle modal comme Mathis pour dimensionner un système de ventilation naturel. Ainsi, même s'il est nécessaire de recourir à des essais en soufflerie ou bien à des calculs CFD poussés pour obtenir le coefficient de pression externe qui s'applique sur les différentes façades d'un bâtiment, le travail effectué a montré l'utilité d'un modèle nodal pour étudier un grand nombre de configurations (différentes architectures intérieures et tailles d'ouvertures).

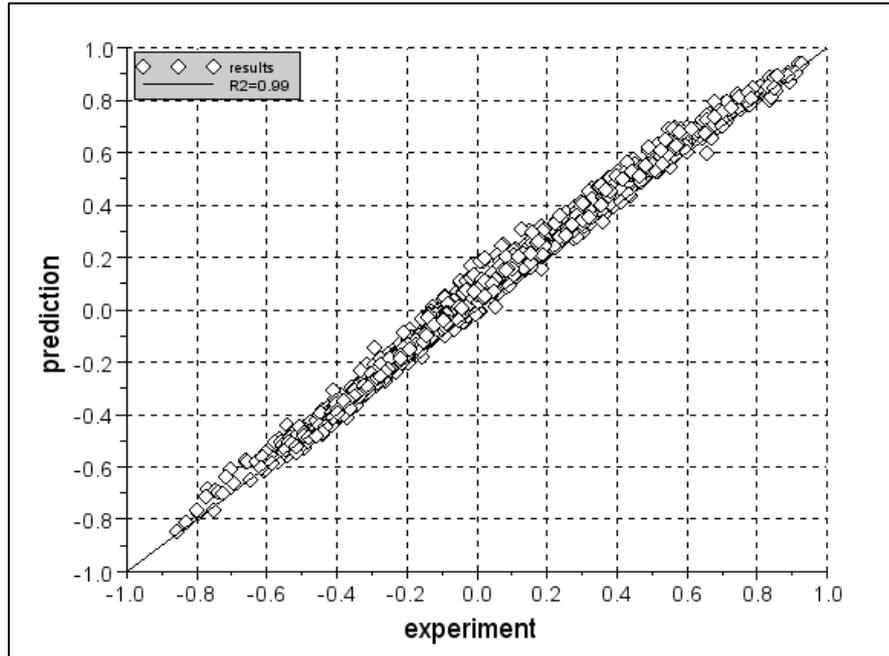


Figure 2 : Corrélation entre le coefficient de pression interne mesuré en soufflerie et calculé avec Mathis

En 2012, la confrontation du code Mathis à des essais en soufflerie a été poursuivie en se concentrant sur un petit immeuble collectif de quatre étages. Dix architectures internes ont été étudiées en faisant varier la section des portes, la présence ou non d'un conduit shunt et en inversant les deux étages supérieurs. Quatre configurations d'ouvrant ont été examinées ainsi que dix-huit incidences de vent et deux niveaux de turbulence de ce dernier. Les champs de pression interne et externe ont été mesurés.

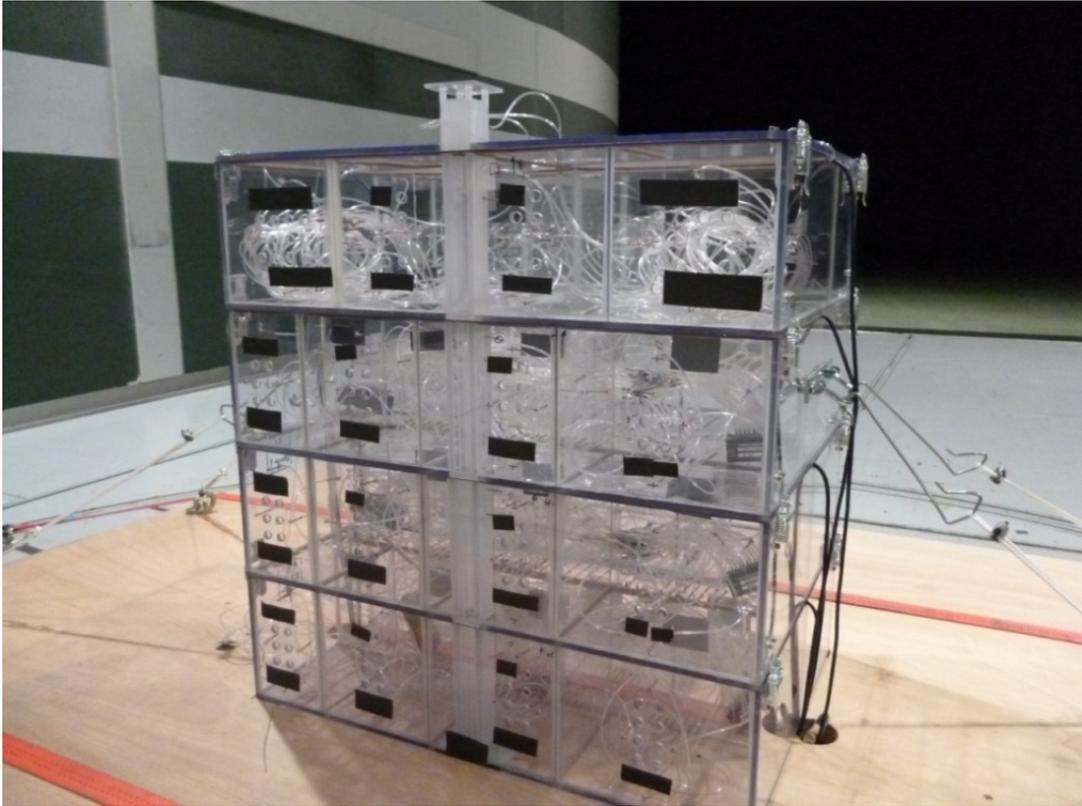


Figure 3 : Maquette de petit collectif dans la soufflerie

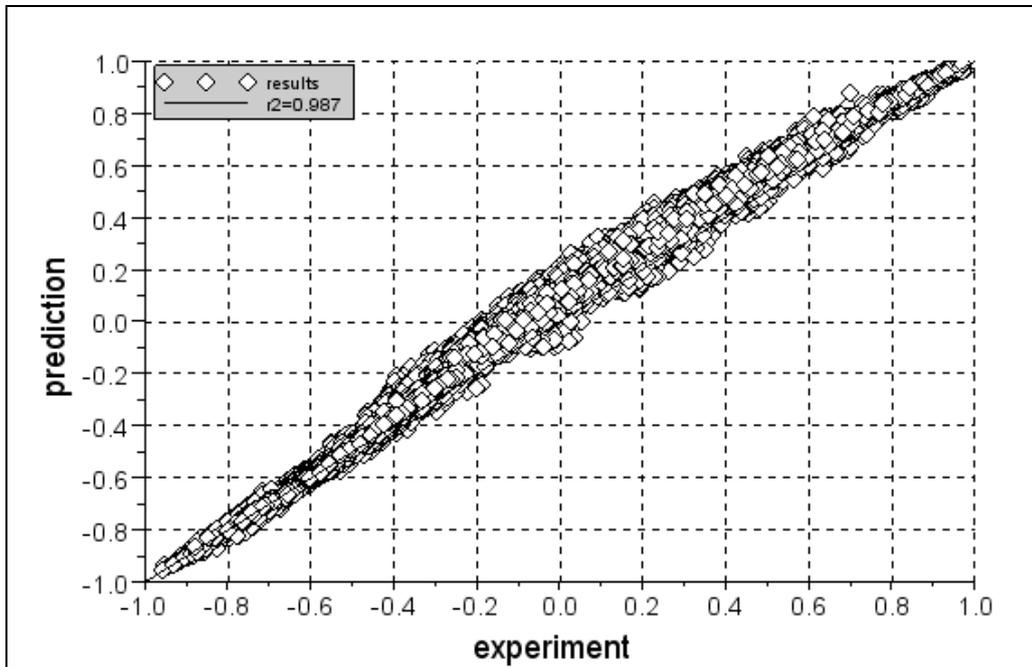


Figure 4 : Corrélation entre le coefficient de pression interne C_p mesuré en soufflerie et calculé avec Mathis

A nouveau, la comparaison a montré un bon accord entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux. Du point de vue de l'ingénieur, cette

confrontation permet de valider l'utilisation d'un modèle nodal comme Mathis pour le dimensionnement d'un système de ventilation naturelle.

Ce travail a également permis de proposer des pistes d'amélioration du modèle, en mettant l'accent sur le coefficient de décharge des ouvertures externes et son évolution avec l'incidence du vent. Toutefois, des recherches apparaissent comme encore nécessaires pour proposer une correction générale de l'équation de l'orifice capable de reproduire correctement l'interaction entre l'écoulement à l'ouverture et le vent traversier auquel cette dernière est soumise.

Les travaux se sont ensuite concentré en 2013 sur des études de sensibilité au paramètre, afin de mettre en évidence les paramètres de la simulation les plus influents sur le résultat cible (taux de renouvellement d'air, potentiel de ventilation [débit cible de l'arrêté du 24 mars 1982], champs de pression interne, etc.). Cette étude a été conduite avec le logiciel OpenTURNS, développé par EDF R&D. La première partie de ce travail a consisté à coupler ce logiciel avec le logiciel Mathis. Une étude de sensibilité aux paramètres de la simulation en situation de ventilation naturelle a ensuite été réalisée. L'objectif de cette étude était de répondre à la question suivante : quel paramètre, entre le coefficient de décharge des ouvertures externes et la surface des portes internes, est le plus important dans le taux de renouvellement d'air de la cuisine ?

L'étude a ainsi permis de montrer que l'importance relative de ces deux paramètres était fortement liée au taux d'ouverture des locaux (rapport défini comme le rapport entre la surface d'ouverture externe et la surface d'ouverture intérieure). Ainsi, l'idée largement répandue que les incertitudes sur le coefficient de décharge peuvent être négligées, car elles auraient moins d'influence que celles liées au comportement de l'occupant (qui ouvre ou ferme les portes intérieures), peut être une erreur pour certaines gammes de taux d'ouverture. Même si ces conclusions peuvent sembler triviales, il a été démontré que l'attention devrait être portée là où les pertes de charges sont les plus importantes.

Par ailleurs, toujours en 2013, une confrontation entre les logiciels Mathis et Siren a été réalisée sur des cas de logements individuels ventilés mécaniquement. Ce travail a permis de conforter la robustesse des deux outils et la confiance de l'utilisateur dans les résultats obtenus. Il a été ainsi montré que les deux outils conduisent aux mêmes résultats lorsque l'on utilise les mêmes hypothèses et les mêmes données d'entrées, pour des temps de calculs similaires. Ces travaux ont également permis de d'identifier et de corriger des erreurs dans les codes sources des deux logiciels. Enfin, en parallèle de ce travail, une première version du guide de l'utilisateur du logiciel Mathis a été finalisée.

1.3 OPTIMISATION DE LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES SOUFLERIES DU CSTB

Responsable : Sylvain AGUINAGA

Chercheur associé : Johan SIRARA

Le site du CSTB de Nantes possède plusieurs souffleries aux caractéristiques très différentes. Le travail présenté ici se focalisait sur trois d'entre elles:

- La soufflerie climatique 1 (SC1), dite également "circuit dynamique". C'est une soufflerie à recirculation à veine fermée. Elle se caractérise par des veines de grandes dimensions et une vitesse de vent élevée (80m/s) dans la veine haute vitesse. Le flux est généré par six ventilateurs tournant à vitesse continue, la vitesse de l'écoulement est ajustée par l'inclinaison des pâles. Elle peut également fonctionner en circuit ouvert, mais cet aspect n'est pas traité dans cette étude ;
- La soufflerie climatique 2 (SC2), dite également "circuit thermique". C'est une soufflerie à recirculation à veine semi-ouverte. Elle se caractérise par ses capacités thermiques où la température est ajustable de -25°C à +50°C. La vitesse maximum dans la veine d'essai est de 40 m/s. Le flux est généré par un ventilateur de 6 m de diamètre, le calage des pales est fixe, la vitesse de l'écoulement est contrôlée par la vitesse de rotation du ventilateur ;
- La nouvelle soufflerie atmosphérique (NSA). C'est une soufflerie à recirculation à veine fermée. Elle se caractérise par une veine d'essai de très grande longueur qui permet de générer des couches limites atmosphériques en plaçant des petites aspérités en amont de la maquette. La vitesse maximum est de 20m/s. Le flux est généré par un ventilateur à pales fixes, la vitesse de l'écoulement est ajustée par la vitesse de rotation du moteur

Chacune de ces souffleries possède ses forces et ses faiblesses. Les limitations des écoulements générés sont connues et prises en compte de façon empirique. Des mesures ponctuelles de la vitesse et de la direction de l'écoulement ont été réalisées, permettant de caractériser ces limitations. Cependant, compte tenu des grandes dimensions de ces installations, il est difficile de pouvoir caractériser et comprendre l'ensemble de ces écoulements.

La simulation numérique en mécanique des fluides permet quant à elle de modéliser l'ensemble de l'écoulement de la soufflerie, et d'accéder à l'ensemble des caractéristiques de l'écoulement en tout point du domaine discrétisé.

L'objectif de ce travail était donc de proposer une modélisation des ces trois souffleries assez représentative des écoulements générés en réalité.

Le travail effectué entre 2011 et 2013 se décomposait ainsi en plusieurs étapes :

- Constitution d'une géométrie 3D adaptée aux calculs CFD et premières simulations d'écoulement ;
- Impact de la modélisation des nids d'abeille sur la précision des calculs ;
- Proposition d'amélioration et d'évolution des souffleries existantes.

Constitution de la géométrie 3D et résultats des premières simulations

Le travail effectué en 2011 a constitué principalement en la mise au point d'une méthodologie de modélisation des souffleries. Un important travail de constitution d'une géométrie 3D adaptée aux calculs CFD a d'abord été effectué. Ces géométries ont été réalisées à partir de plans papiers d'archive ou de CAOs déjà existantes, mais non adaptées à la CFD.

Le maillage de ces géométries et les simulations numériques de l'écoulement se sont effectuées avec le code OpenSource OpenFOAM. Le maillage intégré à cette solution OpenSource s'est avéré suffisant pour obtenir des résultats, même si les maillages obtenus, notamment au niveau des couches limites, restent perfectibles. Le maillage étant entièrement automatique, la marge de manœuvre de l'utilisateur pour améliorer la qualité du maillage reste extrêmement limitée.

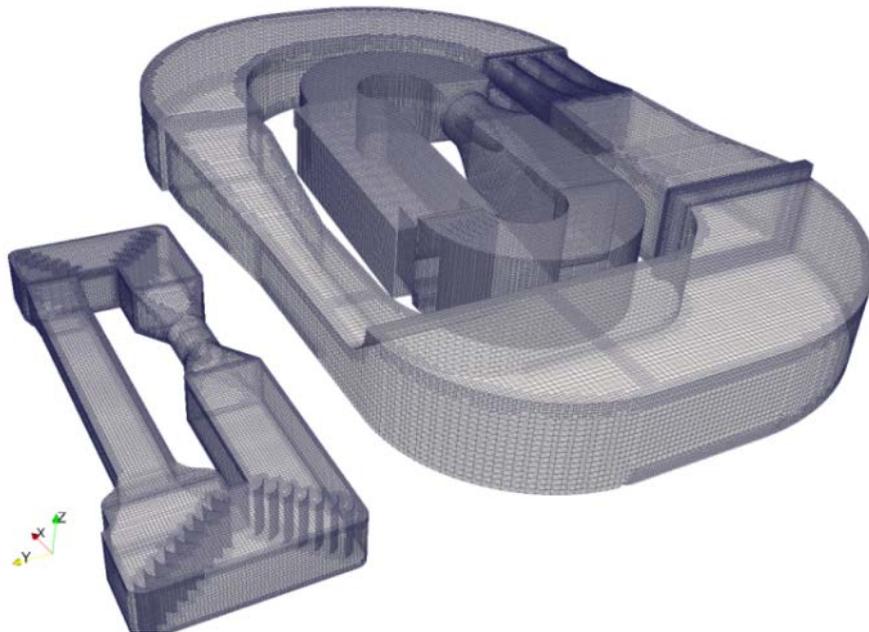


Figure 5: Maillage des 3 souffleries

Les simulations de l'écoulement ont reposées sur des simulations Rans (Reynolds Average Navier Stokes) très classiques. Plusieurs modèles différents de résolution (algorithmes de résolution) ont été testés. Une attention particulière s'est portée sur la meilleure façon de représenter les ventilateurs des souffleries. En effet, un maillage complet des pales en rotation des souffleries aurait induit un coût de calcul prohibitif. Plusieurs solutions sont possibles afin de représenter le saut de pression motrice induit par les ventilateurs. Au final, le choix du meilleur modèle s'est fondé sur un compromis entre la représentativité du modèle et la stabilité du calcul.

Les résultats obtenus se sont montrés très encourageants. Les cartographies de vitesses obtenues sont très pertinentes vis à vis des observations effectuées sur site. Les principaux décollements de l'écoulement semblent être bien restitués par la simulation numérique.

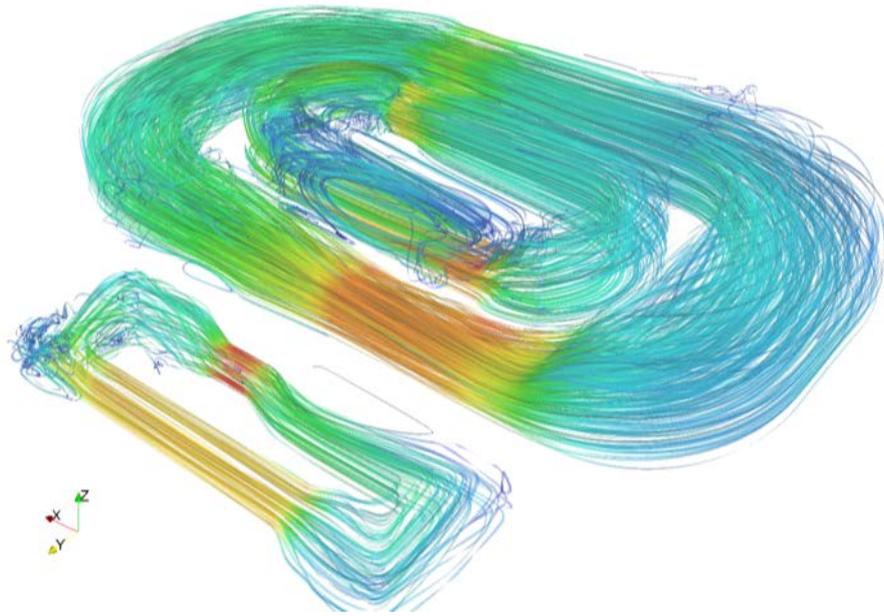


Figure 6 : Ecoulements des souffleries représentés par des lignes d'émissions

Des essais de corrections de l'écoulement ont été effectués, notamment par la mise en place d'aubages, afin d'entériner la pertinence de l'utilisation de la CFD pour ce travail. Cependant l'analyse des résultats n'a pu être plus poussée plus en avant sur cette première action.

Impact de la modélisation des nids d'abeille sur la précision des calculs

Dans un premier temps le travail de recherche mené en 2013 a porté sur la modélisation des nids d'abeille servant à redresser les écoulements et des échangeurs de chaleur. Afin de modéliser les pertes de charge, l'approche retenue a consisté à utiliser des surfaces infiniment minces appelées "porous baffles", permettant de simuler une porosité avec un saut de pression négatif fonction de la vitesse de l'écoulement à la traversée de la singularité. Cette approche est relativement simple à mettre en place mais présente deux inconvénients. Tout d'abord cette variation violente de la pression à la traversée d'une surface mince induit des instabilités dans le calcul, notamment sur des approches explicites. Deuxièmement, elle ne permet pas de représenter le guidage de l'écoulement à la traversée de l'échangeur, la direction du vecteur n'étant pas modifiée à la traversée de la surface mince. Cette approche ne peut donc pas être appliquée pour la modalisation de nids d'abeille. Pour ces derniers, une tentative avait été effectuée dans la cadre d'un travail de fin d'études avec un nid d'abeille présentant de très grosses mailles. Le maillage associé à ce nid d'abeille entraînait un nombre de mailles très conséquent et augmentait de façon prohibitive le temps de calcul. De plus les résultats obtenus n'étaient pas probants.

Le code OpenFOAM propose un solveur dédié permettant la simulation d'écoulements dans des milieux poreux. Une des particularités de l'approche est de pouvoir prescrire une porosité anisotrope. Afin de représenter les échangeurs de chaleur et les nids d'abeilles, l'idée était alors de les représenter par un milieu poreux d'épaisseur non nulle (égal à l'épaisseur réelle de l'échangeur ou du nid d'abeille) et de prescrire une porosité nulle dans les deux directions normales de l'écoulement. Une porosité représentative des pertes de charges à la traversée de l'échangeur ou du nid d'abeille était alors prescrite dans la direction de l'écoulement.

Un cas simplifié de changement brusque de la direction de l'écoulement dans un canal rectangulaire a été effectué afin de valider la pertinence de l'approche. Les résultats sont assez remarquables, l'écoulement étant bien dirigé dans la direction souhaité lors de la traversée de la zone poreuse. L'utilisation de cette dernière n'impose en aucun cas un quelconque raffinement du maillage et le vecteur vitesse est orienté systématiquement dans le sens de la porosité non nulle. Ce qui est assez remarquable, c'est la stabilité de l'algorithme de résolution devant une telle contrainte sur l'écoulement. Ceci implique par contre d'utiliser le solveur SimplePorousFoam qui est un algorithme explicite stationnaire. Or, les précédents travaux ont montrés que l'utilisation du solveur pimpleFoam, algorithme implicite semi-stationnaire, entraînait de meilleurs résultats. Cependant il semble que le SimplePorous Foam fasse appel à une approche dérivée implicite qui tend justement à éviter les problèmes rencontrés avec SimpleFoam.

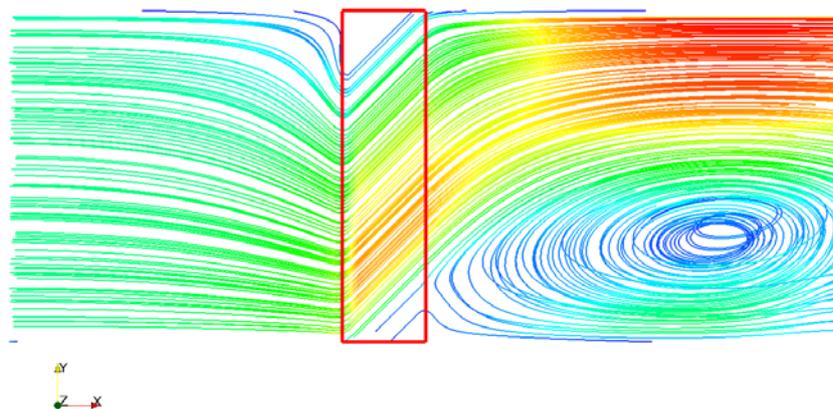


Figure 7 : Utilisation de zones poreuses anisotropique (en rouge) pour guider les écoulements

Cette méthode a été mise en application sur l'écoulement de la SC1 en mettant en place un nid d'abeille idéal, successivement en amont puis en aval du coude-convergent. Ceci a permis de montrer que même avec un écoulement redressé en amont de coude-convergent, on obtient forcément un écoulement vrillé dans la veine haute vitesse. En mettant un nid d'abeille en aval du coude-convergent, on redresse bien l'écoulement. Mais compte tenu des vitesses très importantes

dans la veine, la mise en place d'un tel dispositif entraînerait des pertes de charges prohibitives.

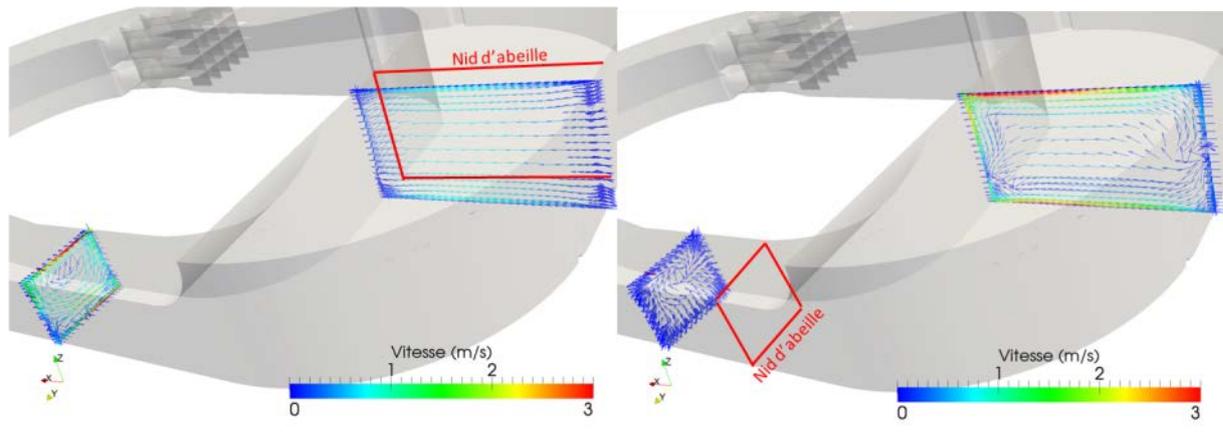


Figure 8: Impact du positionnement de nids d'abeille dans la SC1; à gauche, nid d'abeille entre le deux coudes ; à droite: nid d'abeille en aval du convergent

Proposition d'amélioration et d'évolution des souffleries existantes

Une partie du travail a porté sur la correction de l'écoulement dans la veine de la soufflerie SC1 afin de résoudre deux problèmes en particulier:

- l'homogénéité de la vitesse de l'écoulement sur la largeur de la veine environnement ;
- le vrillage de l'écoulement dans la veine haute vitesse.

Pour le premier problème, des solutions ont été identifiées imposant des aubages à la fois à l'entrée et à la sortie de la veine environnement.

Pour le vrillage de l'écoulement dans la veine haute vitesse aucune solution optimale d'aubage n'a pu être trouvée. Les investigations sur l'écoulement ont montré que le problème de vrillage est seulement induit par le coude-convergent qui est une des particularités de la soufflerie SC1. Le problème étant que l'adjonction d'aubages cloisonne le flux dans le coude-convergent et induit des compressions différentes de l'écoulement au sein de chaque cloisonnement. L'adjonction d'aubages induit ainsi plus de problèmes qu'elle n'en résout.

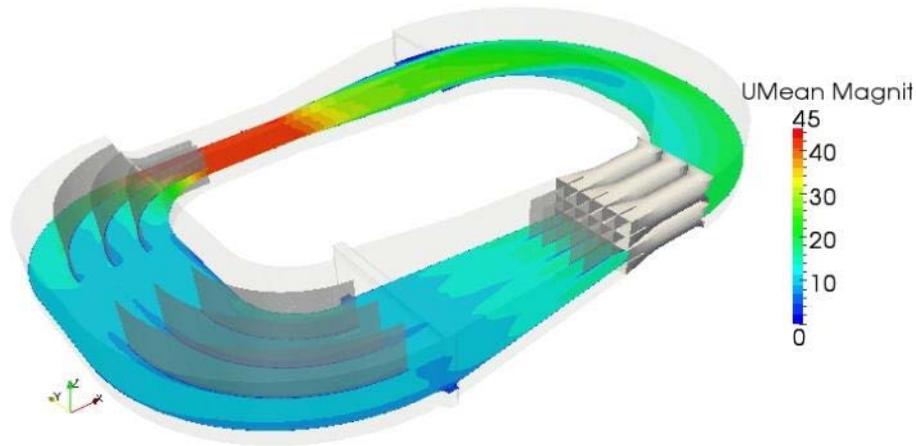


Figure 9: Aubages dans la veine d'essai pour redresser l'écoulement

Ont également été testées des évolutions possibles des fonctionnalités des souffleries :

- vrillage contrôlé de l'écoulement dans la SC2 pour l'étude de navires à voile de grandes dimensions ;
- guidage de l'écoulement de la veine environnement pour l'étude de maquettes de pont de grandes dimensions.

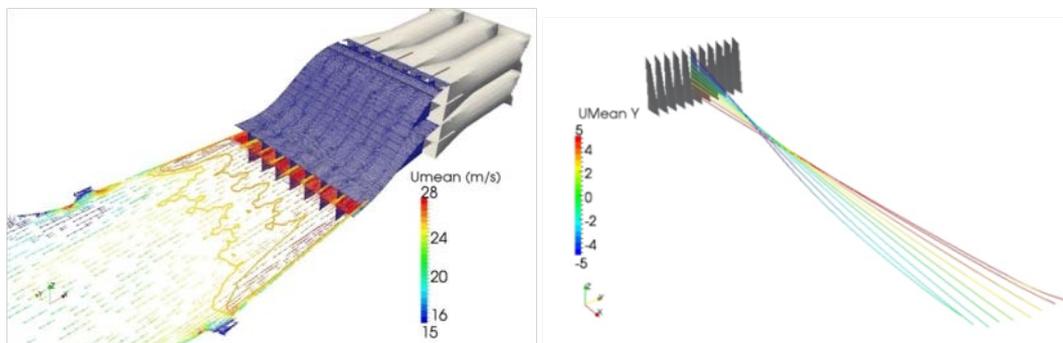


Figure 10 : A gauche : dispositif pour l'étude de maquette de pont de grande longueur; à droite : dispositif de vrillage contrôlé de l'écoulement dans la SC2

1.4 VALIDATION CODE D'INTERACTION FLUIDE STRUCTURE

Responsables : Frédéric Danbon et Kamel Zibouche

Depuis plusieurs années, le code d'interaction fluide structure IFS développé par la Direction technologies de l'information et diffusion du savoir (TIDS) du CSTB a fait l'objet de tests de validation par comparaisons calculs / essais dans des cas concernant la stabilité (mise en vibration) de ponts sous l'effet du vent.

En effet, pour ces problématiques du génie civil à hauts nombre de Reynolds, la réponse apportée jusqu'à présent par les ingénieurs repose sur des approches expérimentales classiques, précises, mais coûteuses. L'alternative numérique pour traiter ce type d'expertise est donc intéressante, mais les performances du code doivent encore être démontrées sur des configurations d'étude plus subtiles.

Deux objectifs étaient visés au cours de ce travail de recherche : d'une part continuer à évaluer les incertitudes du code IFS et d'autre part l'installer au sein de la direction CAPE tout en permettant la "prise en main" de ce code, qui repose sur la maîtrise d'outils de maillage (Salome) et de calcul (Code Saturne), qui jusque-là n'étaient pas présents à CAPE.

L'installation et l'appropriation par CAPE du code IFS "en l'état" sur un cas déjà documenté (pour lequel des essais en soufflerie ont été réalisés) ont montré de sérieux écueils des codes Salomé, pour obtenir un maillage de bonne qualité, et Saturne, sur la partie calcul d'écoulement. Ainsi, plutôt que de valider le code IFS dans sa globalité - par l'identification des vitesses critiques de sensibilité aux détachements tourbillonnaires en flexion, et en torsion, et l'analyse de la stabilité du tablier (au galop et ou flottement) -, la validation s'est faite par étapes successives de complexité croissantes.

Elle a donc consistée dans un premier temps à valider l'approche de calcul d'écoulement fluide (calcul CFD), en terme de modèle de turbulence (RANS), de conditions aux limites (vent uniforme, vent plus réaliste respectant le spectre de Von Karman, ...) et de maillage (techniques de maillage déformant compatibles avec les modèles de loi de paroi), par la comparaison des coefficients aérodynamiques stationnaires simulés (portance, traînée, moment de rotation ou tangage) avec ceux mesurés expérimentalement. Dans un second temps, c'est la qualité des simulations instationnaires qui a été contrôlée.

Les développements d'une procédure de calcul ont été entrepris afin de valider la partie calcul d'écoulement par comparaison avec les résultats de simulations fournis par deux codes distincts : un code industriel, le code Fluent, qui, compte tenu de ses récentes évolutions lui permettent de prévoir les mouvements de corps rigides sous l'effet du vent, en libérant certains degrés de liberté (rotation, translation verticale dans notre cas), et le code Saturne, code généraliste de mécanique des fluides numérique (code CFD) développé par EDF sur lequel ont été entrepris les développements initiaux du code ISF développés au CSTB par TIDS.

Ces développements ont porté sur :

- le calcul des coefficients aérodynamiques stationnaires (portance, traînée, tangage) d'un tablier de pont ;

- le calcul des coefficients aéroélastiques instationnaires (coefficients de Scanlan) par la méthode des vibrations forcées.

La procédure de calcul implique :

- Une automatisation de la déformation du maillage (loin du tablier) pour prendre en compte les différentes incidences du vent, ceci afin de gagner du temps en évitant la reconstruction systématique de maillages pour chaque incidence à tester ;
- Des calculs en stationnaires permettant d'extraire les coefficients aérodynamiques ;
- Des calculs en instationnaires avec vibration forcée en flexion ou en torsion du tablier afin de déterminer les coefficients instationnaires de Scanlan ;
- Un programme, sous Matlab, d'exploitation des efforts mesurés en instationnaire, et des déplacements forcés pour l'extraction des coefficients aéroélastiques.

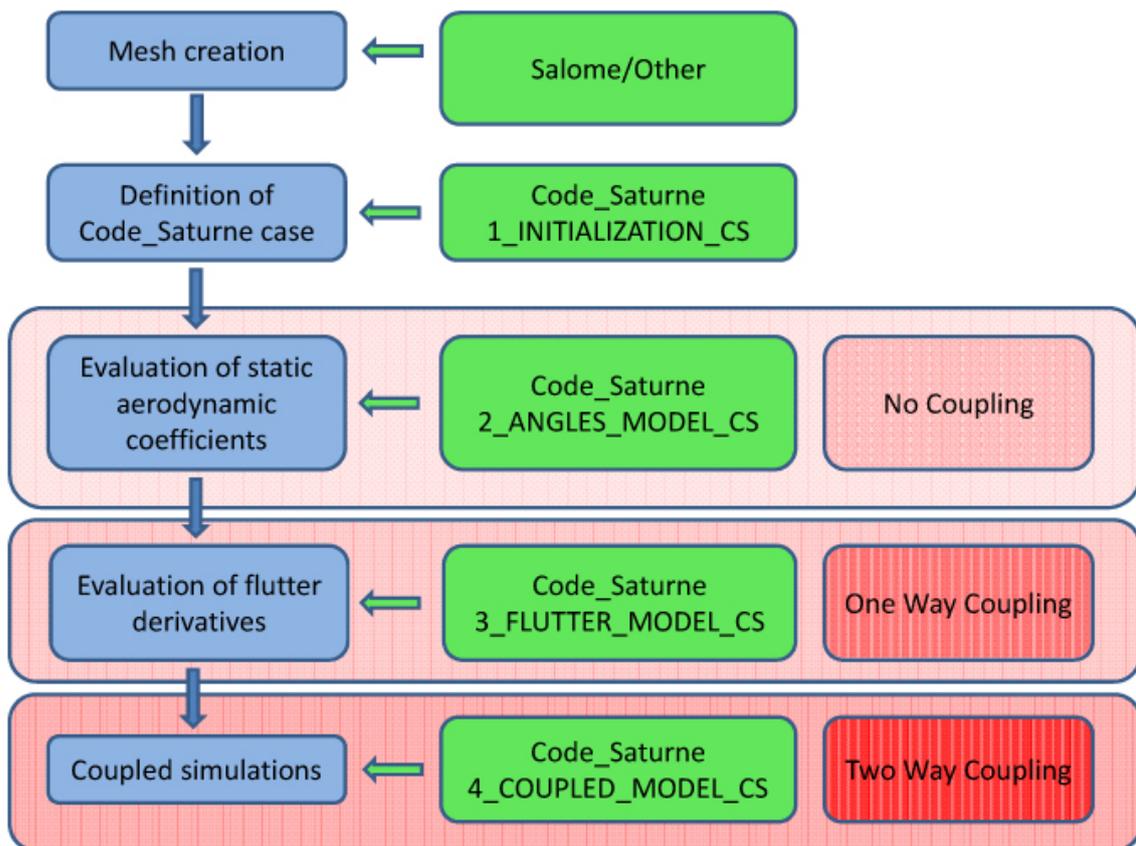


Figure 11 : Description générale de la procédure de validation

Compte tenu de ces différents développements, il est apparu que les comparaisons pour le tablier du pont de Russky et celui du pont du Bosphore en termes de coefficients stationnaires et instationnaires sont très bonnes avec

Fluent. Des problèmes de divergence proche de la sortie du domaine sont apparus avec le Code Saturne, et n'ont pas été résolus. Ce constat pose un inévitable souci, car l'essentiel des développements du code ISF ont été produits jusque-là pour s'appuyer sur l'utilisation du code CFD open source développé par EDF et distribué sous licence GNU GPL depuis 2007, en particulier afin de conserver la maîtrise complète des différentes parties calculatoires (type de modèles, hypothèses...). Il semblerait que les développements actuels de ce code ne permettent pas d'aboutir au niveau de fiabilité escompté sur la partie modélisation fluide, même en stationnaire, et ce, de manière incompréhensible au vu des équations et modèles Rans désormais classiques sur lequel il s'appuie. La pertinence du choix de ce code est donc actuellement remise en cause.

2. INCERTITUDES DANS LE DOMAINE DE L'ENERGIE ET DE L'ENVIRONNEMENT

Responsable : Benjamin Haas

Chercheurs associés : Khadija Tijani, Rofaida Lahrech, Pascal Schetelat

2.1 MÉTHODE GLOBALE D'APPLICATION DE LA PROPAGATION D'INCERTITUDES COUPLÉES APPLIQUÉE AU MOTEUR DE CALCUL COMETH

L'utilisation de la simulation numérique prend une place toujours croissante dans le secteur du bâtiment. Que ce soit en conception/rénovation ou en audit, les outils de calculs sont désormais présents. Leur utilisation quasi-systématique va de pair avec un questionnement sur leur fiabilité, d'autant plus que se structure l'offre de garantie de performance énergétique, qu'elle soit intrinsèque ou effective.

Dans le cadre de cette action support, la recherche sur les incertitudes dans le domaine de l'énergie visait à étudier l'état de l'art des méthodes d'analyse et de sensibilité, et à les appliquer au moteur de calcul Cometh du CSTB, pour

1. valider les méthodes utilisées par le CSTB en les comparant avec des études déjà effectuées sur d'autres outils ;
2. réaliser des études innovantes pour ce type d'outil de calcul en l'appliquant à des bâtiments basse consommation ;
3. proposer des applicatifs et des méthodologies partageables en interne au CSTB.

Cette recherche était cofinancée par le projet ANR Fiabilite. D'autres études similaires ont été financées par le projet ANR Memoire.

Les principaux aboutissements sont les suivants

1. Une implémentation des méthodes de sensibilité a été faite en utilisant la méthode Morris développée en C# ainsi qu'en Python ;
2. Un nouveau couplage Python-Cometh, prouvant que Cometh est pilotable, sans passer par des fichiers intermédiaires, par le langage Python. Cette approche Python était initialement guidée par la volonté de réaliser un couplage avec le logiciel OpenTurns de propagation d'incertitude mais ce sujet n'a pas été mené à son terme. Tous les verrous ont cependant été levés ;
3. Des résultats de sensibilités comparables aux études effectuées dans le cadre d'autres projets
4. De nouvelles études permettant d'enquêter sur les liens entre des paramètres « cachés » (c'est-à-dire souvent considérés comme conventionnels) et des paramètres réglables, en particulier les liens entre

chauffage par vecteur air, perméabilité et infiltrations. Ceci devrait donner lieu à un article en 2014.

2.2 MÉTHODES D'ANALYSE DE SENSIBILITÉ ET DE PROPAGATION D'INCERTITUDES POUR L'ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE ÉNERGÉTIQUE DES BÂTIMENTS

Comment garantir l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments avant travaux et après travaux en tenant compte des incertitudes intrinsèques au modèle thermique et des incertitudes sur les données d'entrées ? Quelle est le facteur d'importance des données sur un bâtiment et quel est l'impact sur la consommation évaluée selon les niveaux et les difficultés de recueil de données lors des audits de bâtiments ?

Une méthode d'analyse de sensibilité et des incertitudes a été développée dans le cadre du projet Memoire de l'ANR-Habisol 2010 [ANR-10-HABISOL-006-01]. La méthode combine deux approches simultanément, l'une sur l'analyse de sensibilité et l'autre sur l'analyse et la propagation d'incertitudes avec l'utilisation de méthodes statistiques existantes adaptées au cadre de l'application de l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments. La méthode Morris est utilisée pour l'analyse de sensibilité afin de déterminer les variables critiques les plus influentes sur la variable d'intérêt (résultat intéressé). Une méthode de propagation d'incertitude est développée pour l'analyse d'incertitude via la méthode Wilks, permettant de donner un intervalle de confiance à 90/90 sur la variable d'intérêt telle que la consommation globale en énergie primaire dans le champ d'étude concerné.

Dans le cadre de cette action support *Incertitudes associées aux évaluations par modélisation et par approches combinées*, l'outil développé dans le projet Memoire a fait l'objet d'investigations afin de valider sa robustesse et son applicabilité au calcul de la performance énergétique des bâtiments. L'outil ainsi développé a été testé sur différentes configurations de bâtiments et avec différents codes de calcul afin de juger de sa validité et de sa robustesse. L'outil a été "validé" par comparaison entre les cas et selon la cohérence des résultats obtenus. Enfin, un manuel d'utilisation de l'outil a été rédigé. L'outil est actuellement opérationnel et est utilisé dans le cadre de différentes études.

3. INCERTITUDES DANS LE DOMAINE DE LA RESISTANCE AU FEU DES STRUCTURES

3.1 IMPACT DES CINÉTIQUES DE FEU NON CONVENTIONNEL SUR LES STRUCTURES

Responsable : Seddik Sakji

Les évolutions récentes en matière de sécurité incendie, et en particulier de résistance au feu des ouvrages, conduisent à étudier les structures en termes d'objectifs au lieu de vérifier, seulement, leur conformité à des prescriptions normatives. Cette évolution vers une réglementation moins prescriptive a été accompagnée depuis plusieurs années par des recherches, tant sur la connaissance du comportement des matériaux que sur l'évaluation de la réponse des structures. Parallèlement, des réflexions sur la méthodologie de telles études ont été formalisées dans le cadre du Plan national ingénierie de la sécurité incendie (PNSI). Les travaux menés dans ce cadre ont mis en évidence de nombreux champs pour lesquels des développements théoriques et expérimentaux sont encore nécessaires.

Les effets de l'action thermique sur une structure sont multiples, on distingue :

- les effets sur les caractéristiques thermophysiques (conductivité thermique, chaleur spécifique et masse volumique) régissant le transfert thermique dans le matériau ;
- les effets sur les caractéristiques thermiques (dilatation thermique et la loi de comportement) intervenant directement sur la réponse mécanique ;
- les effets sur la microstructure (écaillage pour les bétons, combustion pour les matériaux organiques) ayant un effet indirect sur le transfert thermique dans les éléments constituant la structure ainsi que sur le comportement mécanique par modification, lors du chargement thermique, des caractéristiques géométriques des éléments de structure.

Tous ces effets induisent un comportement non linéaire que l'on doit rajouter à la non linéarité géométrique des structures devant être prise en compte pour une analyse en état limite ultime ou de service (défaut d'aplomb, irrégularité des sections, ...).

Lorsque l'on se place à l'échelle d'une structure et que l'on vise à faire une prédiction du comportement à l'état limite accidentel sous sollicitation de feu, la réponse structurale dépend de ses particularités (complexité géométrique, conditions aux limites, interaction inélastique avec d'autres éléments supports), et plus particulièrement du matériau utilisé. En effet, les éléments en charpentes métalliques présentent une plus grande vulnérabilité sous sollicitation de feu du fait de leur forte conduction thermique (25 fois plus importante que celle du béton à titre d'exemple) et par conséquent un échauffement plus rapide, induisant un affaiblissement des caractéristiques mécaniques plus rapide. De plus, de par leur résistance, les éléments d'une structure en charpente métallique sont conçus en éléments non massifs à l'état limite ultime et de service, de telle sorte qu'ils développent rapidement des phénomènes d'instabilité locale (voilement, déversement et flambement) à l'état limite accidentel. Ainsi, une structure en construction métallique dimensionnée d'une

manière optimale à l'état limite ultime et de service ne dépasse guère les vingt minutes sous sollicitation de feu. Pour les structures en béton armé, la phénoménologie du comportement au feu est relativement différente puisque d'une part, la diffusion thermique est sensiblement moindre que celle de l'acier et d'autre part, les éléments sont conçus en éléments massifs comparés aux éléments en acier devant garantir la même résistance (le rapport entre la résistance en compression de l'acier et celle du béton est de l'ordre de 12).

L'une des questions de fond soulevée par l'approche performantielle relative à l'estimation de la résistance au feu est l'impact des cinétiques de feu non conventionnel sur les structures. En effet, les études de résistance au feu conduites dans ce cadre prennent en compte de façon beaucoup plus réaliste les champs de températures induits par des incendies susceptibles de se produire, ce qui impose de passer d'une sollicitation thermique conventionnelle pour laquelle un retour d'expérience est disponible, vers des actions thermiques non conventionnelles, donnant une plus grande variété de caractéristiques (flux, température, répartition spatiale). La prise en compte de cette variabilité de paramètres, de leur interaction et de leurs conséquences sur la réponse structurale demande le développement de méthodes permettant des simulations numériques couvrant le domaine du possible. De plus, le manque de retour d'expérience concernant l'impact d'une sollicitation thermique non conventionnelle sur le comportement structural impose de faire l'analyse avec des méthodes de prédiction robustes, permettant de prendre en compte les erreurs induites par les incertitudes sur les paramètres. Pour ces raisons, le travail entrepris concerne le développement d'outils permettant le couplage probabiliste entre un code de calcul thermomécanique (Safir), utilisé par le CSTB pour l'estimation de la résistance au feu des structures, et OpenTurns, outil développé par EDF permettant, entre autres, de probabiliser les paramètres, d'effectuer des simulations Monte-Carlo ainsi que le traitement statistique des données. Ce travail a été effectué par la programmation de routines permettant d'interfacer les deux codes en contournant la difficulté qui vient du fait que la version Safir dont dispose le CSTB est une « boîte noire » pour laquelle on n'a pas accès au code interne.

Pour tester la procédure de couplage, un exemple d'application portant sur la résistance au feu d'un plancher alvéolaire a été effectué en prenant comme paramètres incertains le coefficient d'échange convectif et la température initiale. Les résultats obtenus ont permis, entre autres, de mettre en évidence la sensibilité de la réponse structurale à ces deux paramètres. Cet outil, d'ores et déjà disponible, permettra de développer une multitude d'applications pouvant répondre à des questions d'actualité posées dans le domaine de la résistance au feu. Il permettra aussi, et dans le cadre de l'approche performantielle, une meilleure optimisation des composants tout en conservant le degré de fiabilité des systèmes exigé par la réglementation.

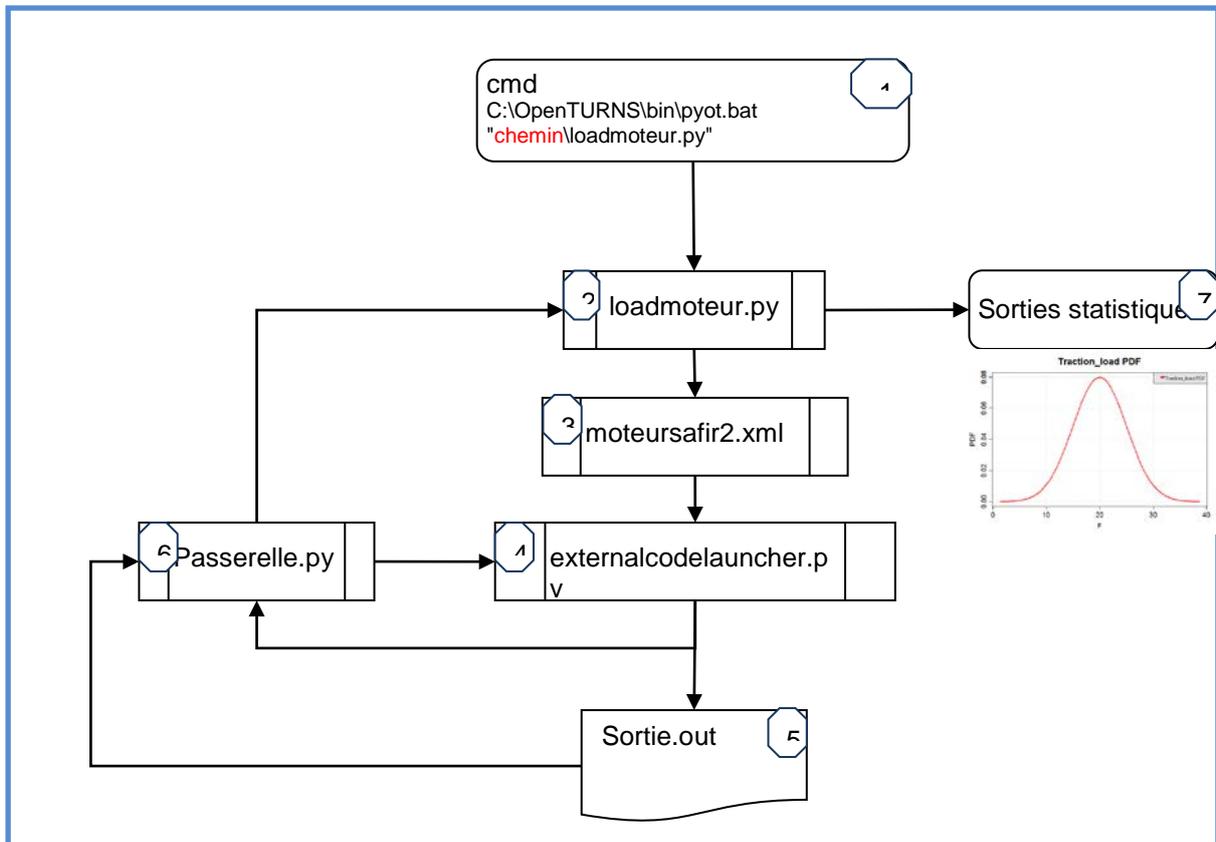


Figure 12: Schéma adopté dans l'interface d'OpenTURNS avec Safir

3.2 MODÉLISATION PROBABILISTE DES CLOISONS DE GRANDE HAUTEUR EN SITUATION D'INCENDIE

Ce travail de recherche a été effectué en 2011 et s'est appuyé sur les travaux de thèse de Thanh Trung DO¹.

Les résultats obtenus sont les suivants :

- Fin d'une campagne expérimentale portant sur le comportement probabiliste à températures élevées des assemblages entrant dans la composition des cloisons légères en plaques de plâtre sur ossature métallique, cloisons supports de l'action de recherche. Cette campagne est venue clore la composante expérimentale de l'action de recherche qui a nécessité la conception et la mise en œuvre d'un banc d'essais original dédié à la caractérisation du comportement thermomécanique des constituants des

¹ Cf. Analyse expérimentale et modélisation du comportement non linéaire thermomécanique de cloison en plaques carton-plâtre-carton, vissées et soumises à des charges thermiques et mécaniques

DO T.T., Th. doct. en génie civil, Université Paris-Est Marne-la-Vallée, décembre 2011, 158 p.

cloisons en situation d'incendie. Ce banc associe un panneau radiant à une presse sur laquelle des équipements spécifiques ont été conçus pour réaliser des essais en flexion, traction, compression et cisaillement ;

- Simulations du comportement thermomécanique des cloisons sous chargements thermiques avec le modèle probabiliste développé dans la thèse. Le modèle comprend deux approches de modélisation probabiliste : une approche non paramétrique pour le comportement des plaques de parement et une approche paramétrique pour les assemblages ;
- Mise en forme du logiciel aux éléments finis développé en interne pour les besoins de l'action de recherche. L'approche probabiliste non paramétrique adoptée est très invasive dans la mesure où elle conduit à réécrire les matrices de rigidité élémentaires et nombre de procédures de calcul. La solution apparaissant la meilleure à l'époque pour satisfaire efficacement ce besoin était de développer un code de calcul aux éléments finis dédié. L'architecture du code a été entièrement pensée pour en faire un outil simple d'accès. Une passerelle a été développée en 2011 vers les pré et post-processeurs du logiciel Marc (MSC Software) pour permettre une entrée des données efficace et une lecture des résultats aisée.

4. INCERTITUDES DANS LE DOMAINE DE L'ÉCLAIRAGE ET DE L'ELECTROMAGNETISME

4.1 INCERTITUDES ASSOCIÉES À L'USAGE DE SOURCES SURFACIQUES ÉQUIVALENTES EN ECLAIRAGE

Responsable : Samuel CARRE

En simulation d'éclairage, la prise en compte des matériaux brillants est beaucoup plus complexe que s'ils sont mats ou s'ils ont un comportement spéculaire idéal. Afin d'éviter le calcul coûteux de certains termes de l'équation de luminance, les travaux de recherche réalisés ont amené à proposer la mise en place de sources surfaciques équivalentes (SSE).

Cette astuce nécessite le pré-calcul puis la modélisation du comportement des matériaux soumis à divers types de sources lumineuses (positions, étendues). L'exploitation d'algorithmes génétiques permet de déterminer les paramètres des modèles, en introduisant une première source d'approximation.

Durant la simulation d'éclairage, l'environnement lumineux doit également être assimilé à un ensemble de sources surfaciques équivalentes qu'il convient de définir de manière dynamique. Cette phase constitue une deuxième source d'erreur. Toutefois, l'incertitude globale ne se réduit pas au cumul des approximations réalisées à chaque étape. Les comparatifs réalisés prouvent, au contraire, que l'approche des sources surfaciques équivalentes est particulièrement intéressante pour des matériaux rugueux ou pour les matériaux très brillants placés dans des environnements relativement uniformes.

La technique du suivi de chemins a été retenue pour prendre en compte plus aisément les matériaux brillants, dans des scènes pouvant être illuminées par de très nombreuses sources d'éclairages surfaciques. Les temps de calcul sont ainsi moins dépendants de la complexité de la scène et de son étendue, et libère de tous les problèmes de maillages.

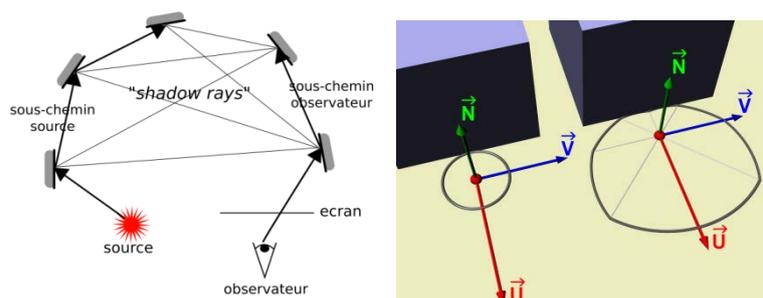


Figure 13 : Suivi de chemins bidirectionnel et cache d'enregistrements adaptatifs

Cette technique est particulièrement intéressante lorsqu'elle est associée à un cache d'éclairage : l'exploitation de la cohérence spatiale réduit fortement le nombre de chemins à évaluer. Afin de réduire le nombre d'enregistrements dans ce cache et d'y intégrer les effets de l'éclairage direct, les travaux menés par le CSTB les années précédentes ont conduit à la définition d'enregistrements adaptatifs.

Cette méthode a été étendue à la prise en compte des milieux participatifs (brouillards, fumées) mais reste limitée aux matériaux diffus.

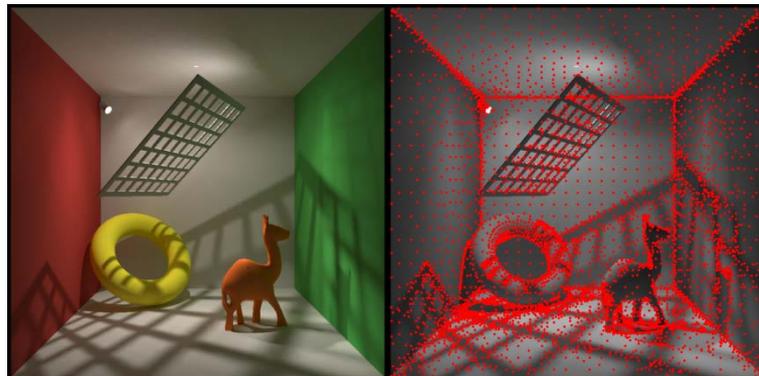


Figure 14 : Restitution fidèle de l'éclairage direct et indirect, position des enregistrements

Pour les matériaux brillants, la détermination de la luminance d'un élément de surface (ce qui est perçu) fait intervenir le facteur de réflexion bidirectionnelle des matériaux (brdf).

Ce terme est particulièrement long à évaluer et inadapté au principe du cache d'éclairage. En effet, la seule valeur d'éclairage n'est pas suffisante car il faut disposer de la distribution angulaire de luminance de l'environnement. La technique la plus courante consiste généralement à stocker cette distribution, de manière compacte, à l'aide de projections dans des bases de fonctions (harmoniques sphériques, ondelettes).

Cette approche n'est pas suffisante car la distribution du flux incident est définie en champs lointain. A proximité de l'enregistrement, la distribution ne peut donc pas être déduite de cette seule information et des informations de gradients actuels. La méthode du suivi de chemin permet un repérage des surfaces visibles depuis la position de l'enregistrement, et la distribution de l'éclairage peut être déduite des apports associés à chaque chemin. Cette technique, exploitée lors de précédents travaux, décrit alors des sources ponctuelles équivalentes (SPE).

La décomposition adaptative de l'hémisphère peut directement être exploitée pour la construction de sources surfaciques équivalentes définies par les paramètres suivants :

- position équivalente ;
- angle solide équivalent (ou surface équivalente) ;
- éclairage apporté (ou luminance équivalente).

Les SSE ne correspondent pas nécessairement à des surfaces ou à des parties des surfaces de la scène. Cette représentation garantit cependant la même distribution du flux incident que les SPE ou qu'une répartition stockée sous la forme d'harmoniques sphériques. Le niveau de décomposition maximum de l'hémisphère définit la taille des plus petites sources surfaciques équivalentes pouvant être représentées. Cette décomposition adaptative permet donc potentiellement une définition angulaire locale beaucoup plus fine qu'une représentation par harmoniques sphériques (pour un même coût de stockage).

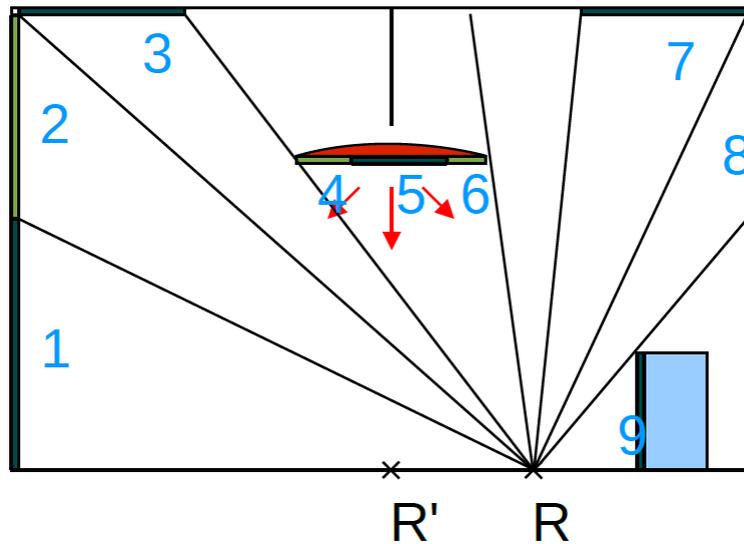


Figure 15 : Sources surfaciques équivalentes pour l'illumination du point R

Afin de simplifier l'équation de luminance, le domaine d'intégration est divisé de manière à ce que chaque partie corresponde à la localisation d'une source surfacique équivalente.

L'hypothèse principale de l'approche consiste à supposer que la luminance d'une source surfacique équivalente est constante dans l'angle solide qui lui est associé.

Cette relation peut alors être formulée de manière similaire à celle exploitée pour les matériaux diffus, pour lesquels la luminance est définie en fonction de l'éclairement.

Cette formulation fait intervenir un terme (équivalent au facteur de réflexion pour les matériaux diffus) qui correspond à la fonction de réflexion bidirectionnelle moyenne dans l'angle solide associé à cette source surfacique équivalente.

La brdf moyenne (fonction 2D) est tabulée et pré-calculée pour une discrétisation très fine et est approximée à l'aide d'un modèle de Lafortune dont les propriétés sont particulièrement intéressantes pour la représentation de brdf. Les paramètres de ce modèle sont déterminés à l'aide d'un algorithme génétique, en partie exécuté sur la carte graphique.

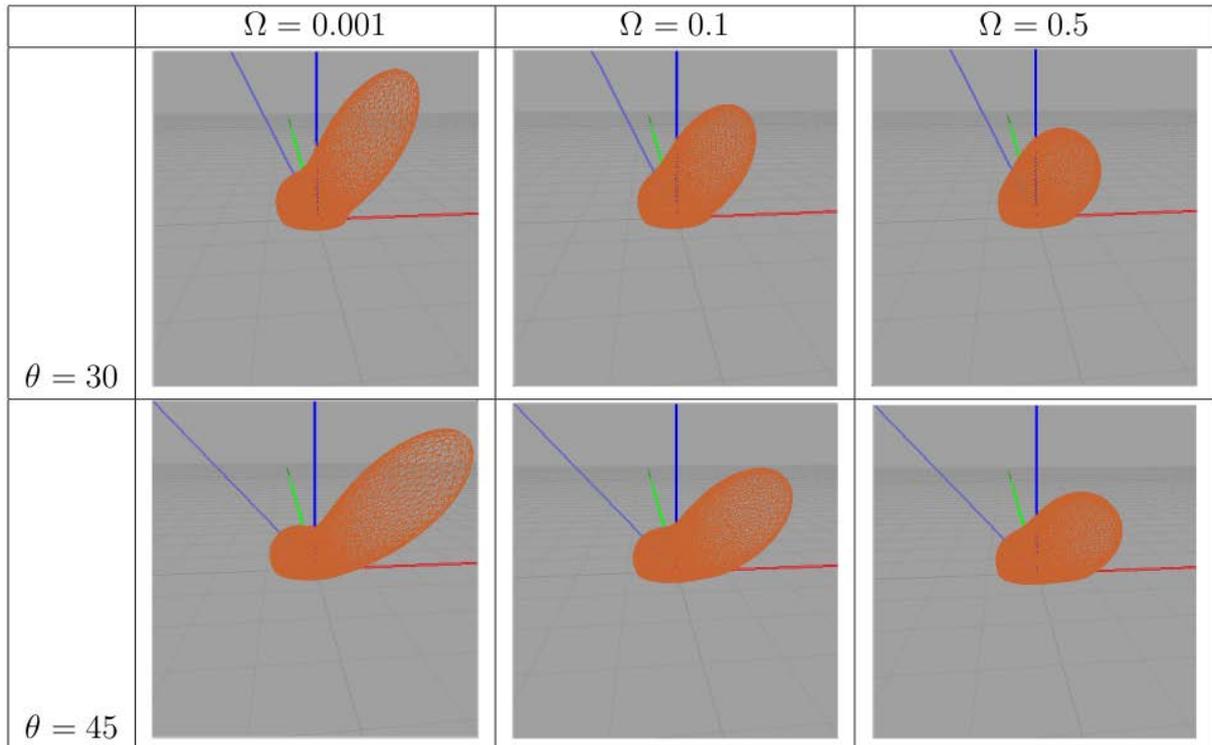


Figure 16 : Modélisation de la brdf moyenne pour différentes incidences et étendues de sources

L'algorithme génétique détermine les meilleurs paramètres du modèle, permettant de minimiser l'écart absolu et relatif avec la référence (brdf moyennée). Ce processus est relativement long mais n'est réalisé qu'au moment de la définition des caractéristiques des matériaux (après des mesures en laboratoire par exemple). Sur la base de matériaux au comportement simple, les travaux ont permis d'observer que ce processus de modélisation représente une faible source d'erreur (environ 2 % d'erreur). Sur la base de données de mesures, les résultats sont moins satisfaisants (parfois plus de 10 % d'erreur relative). L'exploitation d'un modèle plus adapté doit être envisagée.

La détermination de l'environnement lumineux d'un enregistrement construit une structure arborescente non régulière dont les feuilles représentent des sources ponctuelles équivalentes.

L'algorithme mis en place pour définir les SSE s'appuie donc sur une sélection adaptative des nœuds de cette arborescence, de manière à pouvoir reconstruire de manière fidèle la luminance de l'élément de surface quelle que soit la direction d'observation.

Deux aspects peuvent être la source de fortes approximations mais l'erreur globale est fortement liée à la combinaison de deux caractéristiques :

- la brillance du matériau ;
- la variabilité de l'environnement lumineux.

Si le matériau est assez diffus et/ou si l'environnement présente de grandes surfaces uniformes, les approximations réalisées auront peu d'effet sur l'erreur globale réelle. Dans le cas présenté ci-dessous, un matériau très brillant est placé dans un environnement très variable. Cela correspond donc à un cas très défavorable pour la méthode.

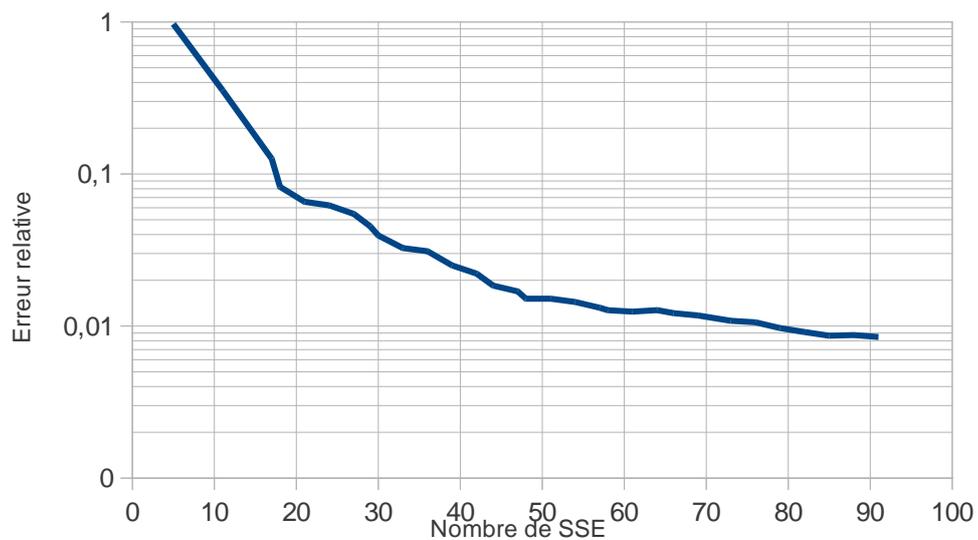
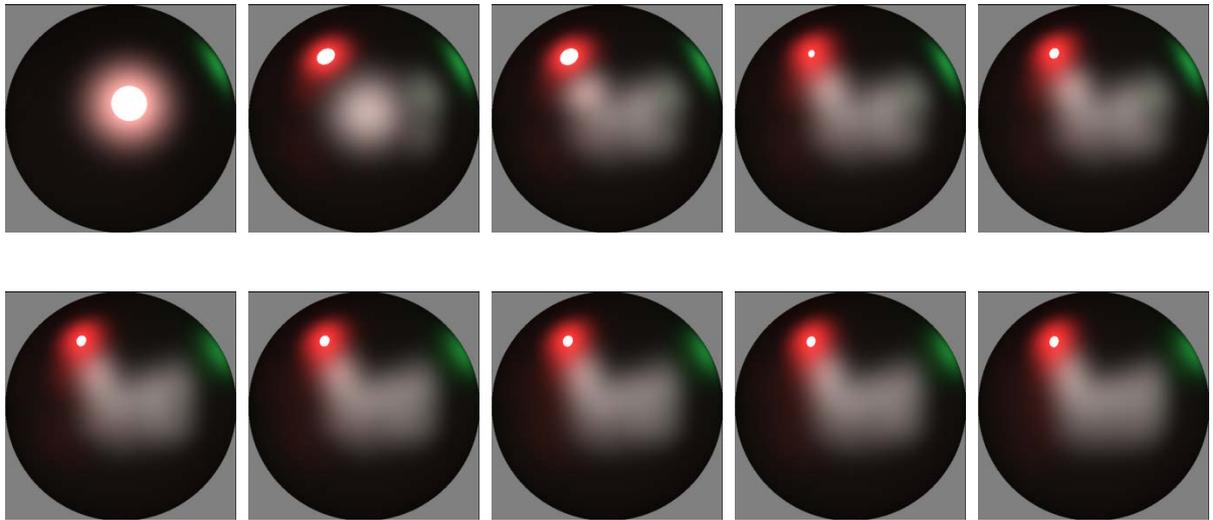


Figure 18 : Erreur relative en fonction du nombre de SSE

Cette technique a été mise en oeuvre pour une visualisation en temps réel des résultats. En exploitant les capacités de calcul des cartes graphiques, via le langage OpenCL, les opérations suivantes peuvent être fortement parallélisées :

- Projection des entités géométriques dans le plan de l'image, repérage de la position, de la normale et de l'identificateur de surface pour chaque pixel ;
- Identification rapide des enregistrements associés à chaque élément de surface, à l'aide d'une structure accélératrice (kdtree), pour chaque pixel ;
- Exploitation des SSE de chaque enregistrement exploitable, pour chaque pixel :
 - o détermination de l'éclairement,

- application de la brdf, combinaison avec les caractéristiques spectrales et d'éventuelle texture,
- interpolation.

Cette mise en oeuvre a été testée sur une scène complexe (260 000 facettes, 240 000 enregistrements) contenant des objets brillants. Ces travaux ont permis de tester l'ensemble de la chaîne logicielle (modélisation des brdfs, sélection des SSE, définition des enregistrements) sur le résultat final produit.

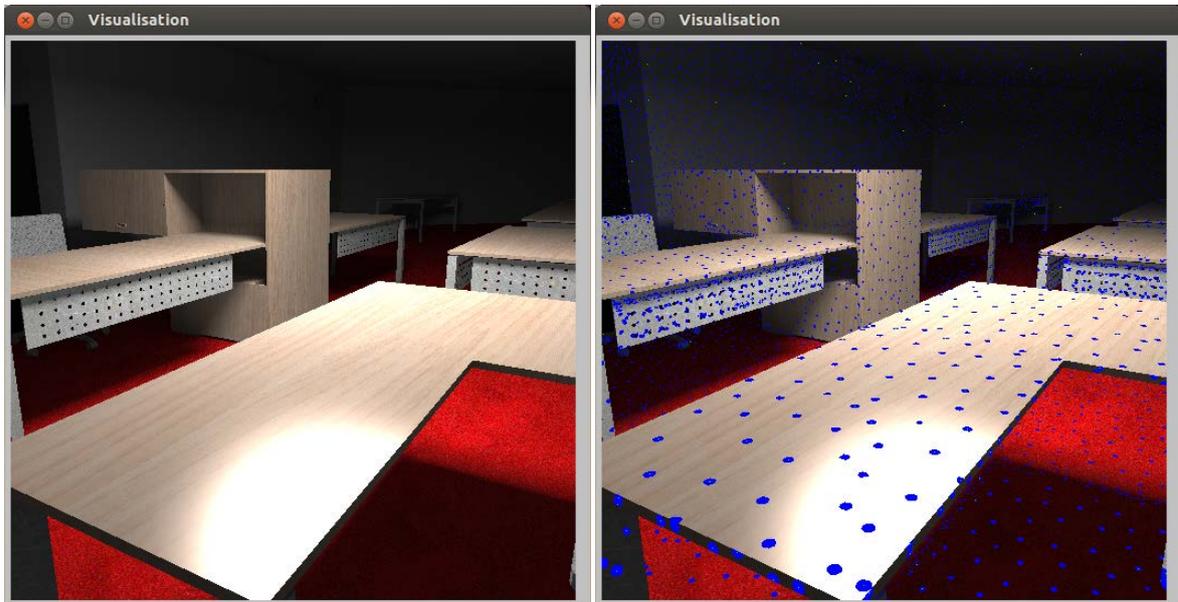


Figure 19: Visualisation interactive (en bleu : le centre des enregistrements)

Globalement, mis à part quelques artefacts visuels au niveau de quelques ombres et à proximité des objets, l'erreur globale est conforme aux seuils fixés pour la modélisation des brdfs et pour la détermination des sources surfaciques équivalentes.

Toutefois, il a été constaté que la modélisation du comportement moyen de la brdf des matériaux était plus problématique lorsque des résultats de mesure sont exploités. Le modèle exploité étant probablement inadapté, l'algorithme génétique ne parvient pas à déterminer des paramètres satisfaisants pour l'ensemble du « lobe ».

De même, les capacités limitées du modèle de brdf force l'algorithme à générer un nombre parfois important de sources surfaciques équivalentes.

La définition d'un modèle plus complet, permettant de mieux contrôler la forme du « lobe » et/ou de prendre en compte des sources surfaciques équivalentes non uniformes, pourrait permettre l'exploitation de cette technique par la prise en compte de matériaux encore plus brillants.

4.2 ESTIMATION ET REDUCTION DE L'INCERTITUDE DANS LA MODÉLISATION DE L'EXPOSITION AUX ONDES ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Responsable: Nicolas NOE

Chercheurs associés: Mame Diarra Bousso LO, François GAUDAIRE

Le questionnement autour de l'impact des ondes électromagnétiques générées par les antennes de téléphonie mobile a mis en évidence le besoin d'outils numériques permettant la modélisation de l'exposition à l'échelle de la ville.

Les méthodes de calcul et les outils logiciels associés développés au CSTB ont notamment été utilisés pour l'état des lieux du COMOP « Réduction de l'exposition aux ondes électro-magnétiques » issu du Grenelle des ondes. Le logiciel Mithra-REM est aussi utilisé dans la région de Bruxelles-Capitale pour la délivrance de permis d'environnement aux opérateurs de téléphonie mobile. De manière générale, la cartographie de l'exposition aux ondes électromagnétiques ("cadastre électromagnétique") intéresse à la fois pouvoirs publics, collectivités locales et opérateurs.

Il est donc primordial que la méthode de calcul utilisée pour la modélisation de l'exposition aux ondes électromagnétique soit la plus robuste possible. C'est pourquoi ce travail de recherche avait pour objectif l'estimation et la réduction des incertitudes dans la méthode de calcul, avec comme objectif à moyen terme d'aller vers une méthode d'ingénierie fiable et robuste.

Méthodologie

Les différentes incertitudes influant sur les résultats ont tout d'abord été quantifiées et classées selon trois catégories :

- incertitudes liées aux émetteurs (position, orientation, diagramme de rayonnement, puissance, ...). Ces paramètres et leurs incertitudes sont uniquement connus des opérateurs ;
- incertitudes liées à l'environnement (profil du sol, position et forme des bâtiments, propriétés diélectriques des matériaux, ...). Étant donné la masse de données, les données géométriques doivent être considérées en l'état. Quand aux matériaux, si la typologie des bâtiments (ancien, industriel, ...) peut donner des indications, les valeurs restent largement méconnues ;
- incertitudes liées au modèle de calcul (limites des méthodes asymptotiques, paramètres des algorithmes géométriques comme la distance de propagation ou l'ordre de réflexion, post-traitement des résultats, ...).

Le travail de recherche s'est porté sur ce dernier type d'incertitudes.

Trois zones caractéristiques, où les comportements sont différents, ont également été identifiées (Figure 20) :

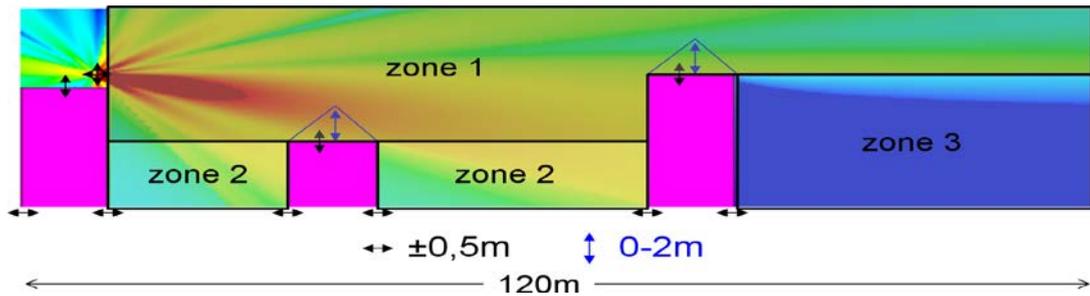


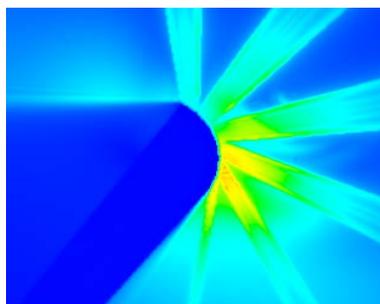
Figure 20 : Cartographie du champ électrique émis par une antenne située en haut du bâtiment à gauche. Les bâtiments sont représentés en roses et l'espace est divisé en 3 zones décrites ci-après.

- En zone 1, la plupart de l'énergie vient du champ direct (dans le lobe principal de l'antenne). Le champ électrique dans cette zone dépend essentiellement des caractéristiques de l'émetteur.
- En zone 2, la plupart de l'énergie vient des trajets réfléchis. Le champ électrique dans cette zone dépend de la forme et des propriétés électromagnétiques des bâtiments à proximité de l'émetteur.
- En zone 3, la plupart de l'énergie vient des trajets diffractés. Le champ électrique dépend alors essentiellement du modèle de diffraction et de la coupe de bâtiment le long du trajet.

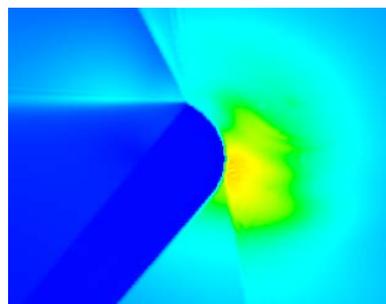
L'étude des incertitudes et de la sensibilité aux paramètres de calcul a été réalisée avec l'outil OpenTURNS.

Principaux résultats

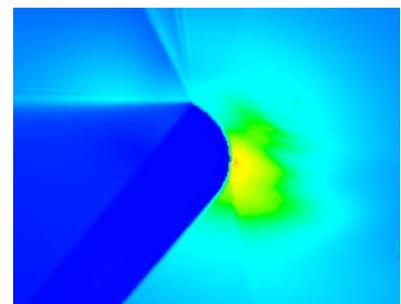
Ce travail de recherche a permis d'estimer l'incertitude et surtout de réduire la variabilité des résultats aux changements mineurs des données d'entrée. Par exemple, la méthode de propagation a été étendue pour prendre en compte correctement les bâtiments courbes, et donc s'affranchir de la discrétisation de ceux-ci, réduisant ainsi une source d'incertitude (Figure 21).



modèle plan



modèle courbe



modèle courbe corrigé

Figure 21 : Prise en compte des bâtiments courbes avec différents modèles.

Un aspect important du travail a consisté à rechercher une meilleure précision dans l'estimation des "points atypiques" (points particulièrement exposés). Ces points étant généralement situés dans le faisceau principal de l'antenne (en zone 1), il est essentiel de caractériser précisément leur position et le champ électrique associé. Pour cela une méthode dynamique de positionnement précis de ces points en cours de calcul a été mise au point.

D'autres points ont également été abordés. Ainsi, la précision des calculs pour estimer le champ électrique à proximité des émetteurs a été améliorée en utilisant une divergence de source linéique.

Par ailleurs, l'étude d'incertitude et de sensibilité a permis de mettre en évidence les paramètres de calcul qui influent réellement sur le résultat, et de les positionner de manière pertinente. Les résultats ont ainsi été améliorés : les corrélations entre mesure et simulation sont meilleures et l'erreur absolue a diminué (Tableau 1 et Figure 22):

Tableau 1 : Corrélation et erreur absolue pour 4 parcours avec les méthodes 2009 et 2013

parcours →	Munich #0		Munich #1		Munich #2		Poitiers	
	corr.	erreur	corr.	erreur	corr.	erreur	corr.	erreur
CSTB2009	0.93	7.1 dB	0.80	7.3 dB	0.93	8.6 dB	0.87	5.5 dB
CSTB2013	0.94	6.6 dB	0.81	7.2 dB	0.94	8.4 dB	0.92	4.6 dB

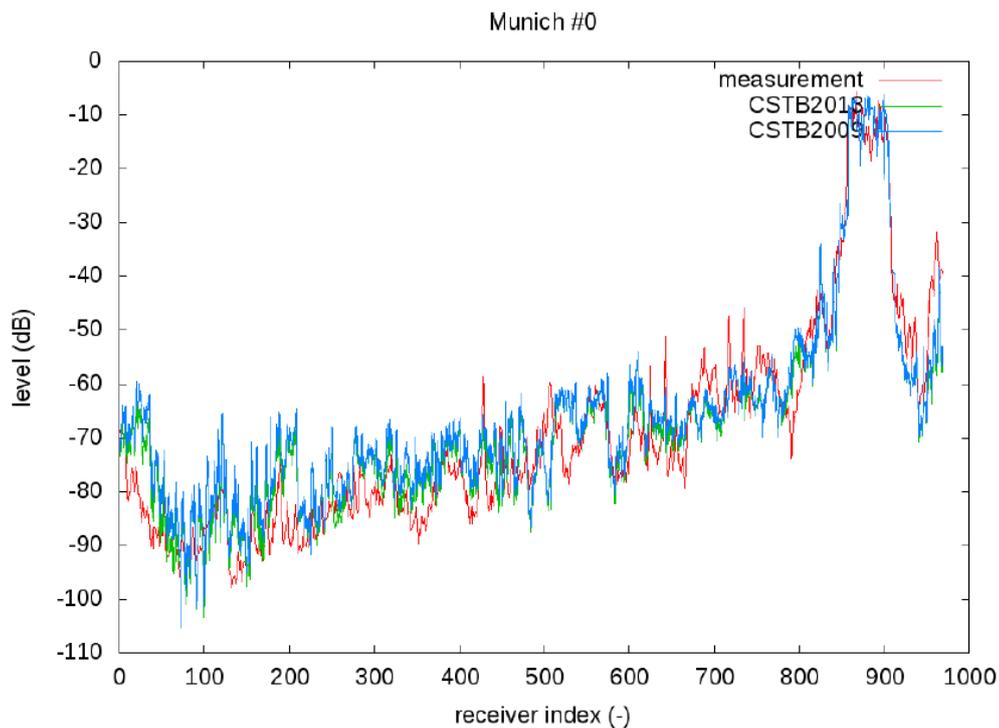


Figure 22 : Comparaison simulation-mesure sur un parcours à Munich

Les travaux réalisés dans ce travail de recherche ont ainsi permis de mieux comprendre le comportement global de la modélisation de l'exposition aux ondes électromagnétiques en milieu urbain, et d'adapter en conséquence les méthodes de calcul utilisées au CSTB afin d'avoir une représentation plus pertinente de la réalité.

CONCLUSION

L'objectif de cette action support était la mise en œuvre des outils nécessaires à la qualification de la précision associée à un résultat d'évaluation lorsque celui-ci est obtenu par une approche purement calculatoire ou combinant essais et calculs. Les travaux réalisés ont concerné de nombreux domaines : la climatologie, la ventilation, l'éclairage, l'acoustique, la sécurité incendie et l'énergie. Ils ont permis d'augmenter la confiance dans les résultats obtenus en estimant les incertitudes associées au résultat et parfois, également, d'augmenter la précision des résultats en améliorant les modèles utilisés. Cette confiance dans les résultats issus de simulations est un élément indispensable pour accompagner l'utilisation croissante des outils numériques de manière à bien appréhender la complexité des bâtiments.

LIVRABLES ET PUBLICATIONS

RAPPORTS DE RECHERCHE

J. Guilhot, Recalage climatique par simulation numérique - Comparaisons des approches Fluent, OpenFOAM et TopoWind, rapport CSTB n°EN-CAPE 11-069-L-V1, 2011

J. Guilhot, Recalage climatique par simulation numérique – Comparaison de trois codes et application à un cas réel, rapport CSTB n°EN-CAPE 12.294 I-V0, 2011

S. Aguinaga, Simulation Numérique des Souffleries du CSTB Nantes, rapport CSTB n°EN-CAPE 11-253 L-V0, 2012

J. Sirara, Simulation Numérique des Souffleries du CSTB Nantes, rapport CSTB EN-CAPE 12.078 R-V0, 2012

F. Demouge, X. Faure, MATHIS : modèles physiques et guide de l'utilisateur, rapport CSTB n°EN-CAPE-190-L-V0, 2013

F. Demouge, X. Faure, J. Piriou, Confrontation des logiciels MATHIS et SIREN, rapport CSTB n° EN-CAPE-189-L-V0, 2013

F. Danbon, L. Patruno, Code IFS – appropriation par CAPE, développements et validations complémentaires sur un tablier de pont, rapport CSTB n°EN-CAPE 13.008 L-V0, 2012

N. Noé, Prise en compte de la réflexion par la façade pour un récepteur situé justement en façade, rapport CSTB n°EN-DSC/2^E 13.01.R, 2013

N. Noé, Estimation de l'incertitude due à la substitution d'un modèle champ proche d'émetteur radio-électrique (sous la forme d'une décomposition en dipôles avec diagramme de rayonnement en 3D complexe) par un modèle champ lointain (défini par deux coupes de gain dans les plans horizontal et vertical), rapport CSTB n°EN-DSC/2^E 13.02.R, 2013

N. Noé, Réduction de l'incertitude dans l'estimation du point chaud d'exposition aux ondes électromagnétiques, rapport CSTB n°EN-DSC/2^E 13.03.R, 2013

S. Carré, Incertitudes associées à l'usage de sources surfaciques équivalentes, rapport CSTB EN-ECL 13.07.L, 2013

B. Haas, K. Tijani, C. Gay, Méthodes d'études de sensibilité : application à COMETH », rapport CSTB-DEE, 2013

A. Fery, R. Lahrech, A. Srun, Méthodes d'analyse de sensibilité et de propagation d'incertitudes pour l'évaluation de la performance énergétique des bâtiments - Développement et validation de l'outil AS&AI, rapport CSTB-DEE, 2013

PUBLICATIONS

X. Faure, N. Le Roux, On the potential of wind-driven ventilation for dwellings and low rise buildings, Roomvent 2011, Trondheim, Norway

F. Demouge, N. Le Roux, X. Faure, Numerical Validation for Wind Driven Ventilation Design, 32nd AIVC Conference, Brussels, 2011

F. Demouge, X. Faure – " Natural Ventilation Design for Low-Rise Building: Comparison between a Nodal Model and Wind Tunnel Tests, Building Simulation 2013, Chambéry, France

X. Faure, F. Demouge, Sensitivity analysis on the definition of wind driven natural ventilation potential, Building simulation, Chambéry, France, 2013

N. Noé, F. Gaudaire, Reflection on Curved Surfaces in a 2.5D Ray-Tracing Method for Electromagnetic Waves Exposure Prediction in Urban Areas, - Proceedings of the XXXth URSI General Assembly, Istanbul, Turkey, 2011

F. Gaudaire, N. Noé, J-B. Dufour, et al., Méthode d'analyse de l'exposition des populations et de la couverture radio des réseaux de téléphonie mobile GSM et UMTS, Revue de l'Electricité et de l'Electronique, n° 5, décembre 2012

N. Noé, F. Gaudaire, M. Diarra Bousso Lo, Estimating and Reducing Uncertainties in Ray-Tracing Techniques for Electromagnetic Field Exposure in Urban Areas, Proceedingfs of IEEE Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications, Torino, 2013

T. T. Do, C. Soize, J.-V. Heck, Computational Nonlinear Thermomechanical Model of Large Light Partition Walls Based on Experimental Analysis and Probabilistic Models, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 28/2, p. 81–97, February 2013

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

CSTB
le futur en construction

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU BATIMENT | MARNE-LA-VALLÉE | PARIS | GRENOBLE | NANTES | SOPHIA-ANTIPOLIS