



**HAL**  
open science

## **CSTB - Priorité scientifique et technique "Simulation et outils numériques" : bilan 2010-2013, rapport final**

Souheil Soubra

### ► **To cite this version:**

Souheil Soubra. CSTB - Priorité scientifique et technique "Simulation et outils numériques" : bilan 2010-2013, rapport final. CSTB - Centre scientifique et technique du bâtiment. 2013. hal-01044719

**HAL Id: hal-01044719**

**<https://cstb.hal.science/hal-01044719>**

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.

**Priorité scientifique et technique « Simulation et outils numériques » (SON)**

**Bilan 2010 - 2013**

**Rapport Final**

**Souheil Soubra avec la contribution  
des responsables des projets et des actions de recherche SON**

**Août 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](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



**Priorité scientifique et technique « Simulation et outils numériques » (SON)**

**Bilan 2010 – 2013**

**Souheil Soubra avec la contribution  
des responsables des projets et des actions de recherche SON**

Université Paris-Est, Centre scientifique et technique du bâtiment

**Août 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 : **SOUBRA S. (Coord.), Priorité scientifique et technique « Simulation et outils numériques » (SON) : bilan 2010-2013, rapport final, août 2013, 49 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

Prendre en compte les exigences de la mutation écologique et énergétique tout en respectant les contraintes de santé et de sécurité d'une part et en recherchant l'optimum économique d'autre part est l'enjeu actuel du secteur de la construction. Pour relever ce défi, il est nécessaire d'entamer une numérisation de la filière construction pour permettre des échanges plus intégrés entre les acteurs et ce de plus en plus tôt dans les projets. Ce rapport dresse le bilan des travaux menés au CSTB sur cette thématique de la numérisation de la filière et ce à différentes échelles (composants et systèmes constructifs, bâtiments, quartiers et villes). Le rapport met en avant les résultats de ces travaux puis présente les perspectives futures.

**Mots clés :** e-catalogues, maquette numérique, ville numérique, simulation multi-physiques, photogrammétrie, incertitudes, travail collaboratif

## Abstract

Taking into account the requirements for environmental and energy improvement while respecting the constraints for health and safety on the one hand and seeking economic optimum on the other hand is the current challenge of the construction industry. To meet this challenge, it is necessary to progress in the development and dissemination of numerical tools to allow more integrated information exchange between stakeholders as early as possible in the process. This report presents the work carried out at CSTB on this issue and at different scales (components and systems, buildings, neighborhoods and cities). The report highlights the results of this work and outlines future possibilities.

**Keywords:** e-catalogues, BIM, numerical cities, multi-physics simulations, photogrammetry, uncertainties, concurrent engineering

## Table des matières

<b>1. ENJEUX ET CONTEXTE.....</b>	<b>8</b>
<b>2. AMBITIONS DE LA PRIORITÉ SCIENTIFIQUE SIMULATION ET OUTILS NUMÉRIQUES .....</b>	<b>9</b>
<b>3. STRUCTURATION .....</b>	<b>11</b>
<b>4. BILAN .....</b>	<b>13</b>
<b>4.1 Référentiel Numérique.....</b>	<b>14</b>
<b>4.2 simulations multi-physiques .....</b>	<b>17</b>
<b>4.3 ville numérique.....</b>	<b>18</b>
<b>4.4 Process Lifecycle Management et travail collaboratif.....</b>	<b>22</b>
<b>4.5 Actions support.....</b>	<b>24</b>
4.5.1 Imagine .....	24
Reconstruction 3D et calibration.....	24
Sémantisation 2D.....	25
Sémantisation 3D.....	26
4.5.2 Référentiel de bâtiments types.....	28
4.5.3 Incertitudes.....	29
4.5.4 Lancer de rayons .....	30
<b>4.6 LifeBC (Lifecycle Building Card).....</b>	<b>32</b>
<b>5. PERSPECTIVES - INGÉNIERIE CONCOURANTE ET PARTAGE DES INFORMATIONS .....</b>	<b>34</b>
<b>5.1 Infrastructure de travail collaboratif .....</b>	<b>35</b>
<b>5.2 Portail de composants et systèmes e-catalogues.....</b>	<b>36</b>
<b>5.3 Renforcement des procédures de certification .....</b>	<b>39</b>
<b>5.4 Mesures d'accompagnement de la maîtrise d'ouvrage .....</b>	<b>39</b>
<b>6. PROJETS À POURSUIVRE .....</b>	<b>41</b>
<b>PUBLICATIONS .....</b>	<b>43</b>
<b>Articles de revue avec comité de lecture et d'audience internationale .....</b>	<b>43</b>
<b>Conférences avec actes.....</b>	<b>43</b>
<b>Autres publications .....</b>	<b>45</b>
<b>Thèses .....</b>	<b>47</b>
<b>Rapports de recherche .....</b>	<b>47</b>

## Liste des figures

Figure 1 : Lien entre la maquette numérique, le configurateur et les bases de données	15
Figure 2 : Reconstruction 3D de Cluny à partir d'images très haute résolution	25
Figure 3 : Détection de fenêtres : affranchissement des contraintes de rectification d'image et de régularité de la façade	26
Figure 4 : Segmentation d'un nuage de points par cohérence locale des normales	27
Figure 5 : Reconnaissance automatique des dalles et escaliers dans un modèle 3D CAO	27
Figure 6 : Visualisation de quelques exemples de la collection de maquettes numériques CSTB	29
Figure 7 : Visualisation de la maquette et sélection d'éléments du BIM en réalité augmentée en utilisant un smartphone ou une tablette	32
Figure 8 : Utilisation à l'extérieur du dispositif de Réalité Augmentée pour visualiser la mise en œuvre future d'un système d'ITE (isolation thermique par l'extérieur)	33
Figure 9 : Périmètre de l'initiative Capitole	36
Figure 10 : Lien entre les e-catalogues et la maquette numérique de l'ouvrage	38

## 1. ENJEUX ET CONTEXTE

Les enjeux du développement durable et la mutation de la filière construction nécessitent de repenser les modes de conception / réalisation / gestion des bâtiments et d'aménagement des espaces urbains, pour :

- optimiser globalement le processus de construction dans une approche systémique et pluridisciplinaire ;
- construire avec un niveau de qualité rarement atteint aujourd'hui ;
- et avec une obligation de résultats en garantissant les performances atteintes.

Ce changement important induit des défis scientifiques, technologiques, économiques et organisationnels majeurs pour l'ensemble des acteurs (maîtres d'ouvrages, gestionnaires de parc, maîtres d'œuvre, entreprises de construction, industriels, assureurs...), notamment concernant l'acquisition, le partage et l'analyse des informations. En effet, il est maintenant reconnu, à travers différentes études nationales et européennes, que l'atteinte de ces objectifs ambitieux ne pourra se faire que par une collaboration entre les acteurs pour mieux soutenir le « travailler ensemble ».

Comme cela s'est passé dans d'autres secteurs industriels (automobile, aéronautique, ...), cette intensification des échanges passe nécessairement par une numérisation de la filière qui permet :

- des échanges plus intégrés et plus ouverts entre les acteurs ;
- un engagement fort de plus en plus tôt dans les projets ;
- l'implication de tous les acteurs à différents stades du projet.

Le secteur de la construction pourra ainsi profiter des avancées de la recherche scientifique dans différents secteurs industriels en matière de numérisation et de modélisation / simulation afin de mieux :

- partager et collaborer : en effet, l'innovation est supportée dans ces secteurs par des interactions intenses et une collaboration renforcée entre toutes les parties prenantes afin d'arriver à un résultat créatif holistique apportant, dans un environnement multi-contraint, de la valeur ajoutée par rapport à des réponses plus « traditionnelles » ;
- comprendre et prédire : pour concevoir et analyser les systèmes complexes ainsi que pour approfondir la connaissance scientifique sur les sujets relatifs aux grands défis scientifiques actuels et dans des enjeux de société critiques comme l'environnement, le changement climatique ou encore la santé ;
- concevoir et piloter : qu'il s'agisse du monde de la recherche ou de celui de l'industrie, la simulation et l'optimisation numériques sont devenues incontournables pour assister la conception de produits, de procédés,

d'infrastructures de production, de surveillance et plus généralement pour le contrôle de systèmes complexes ;

- décider et agir : les simulations sont des outils d'aide à la prise de décision stratégique, permettant de réduire les cycles de conception, d'optimiser et de conduire les procédés industriels et d'estimer les risques et les attendus avant toute prise de décision. Enfin, elles sont le seul élément global permettant d'intégrer et de visualiser toutes les informations et les interactions disponibles, factuelles ou inhérentes.

À noter que les outils numériques dans le secteur de la construction sont nombreux, et pour beaucoup fournissent déjà des résultats de grande qualité. S'il est nécessaire de chercher encore à les améliorer et à fiabiliser leurs résultats, il faut aussi souligner que les enjeux se situent en grande partie au niveau de leur interopérabilité et de leurs connexions aux autres systèmes d'information utilisés durant le cycle de vie du bâtiment. En effet, comme aujourd'hui, chacun des acteurs de la filière construction continuera à utiliser demain des outils métiers spécifiques, adaptés à sa mission et le progrès majeur viendra des capacités de ces outils métiers à communiquer entre eux et à supporter ainsi un travail collaboratif entre les acteurs.

Les outils métiers de demain intégreront donc des modèles de données communs qui seront à la fois utilisés et enrichis par chacun des acteurs. Dans ce cadre, l'enjeu majeur pour la recherche du CSTB est de faire émerger ces modèles de données, et de démontrer leur applicabilité pour la réalisation d'outils logiciels collaboratifs.

## **2. AMBITIONS DE LA PRIORITÉ SCIENTIFIQUE SIMULATION ET OUTILS NUMÉRIQUES**

La priorité scientifique et technique « Simulation et outils numériques » (SON) du programme de recherche 2010-2013 du CSTB est conçue comme un programme transversal qui traite de ces problématiques et vise à contribuer à la numérisation de la filière afin d'aborder les enjeux complexes et pluridisciplinaires de la construction durable, et pouvoir :

- a. croiser différentes démarches sectorielles ;
- b. apporter des éléments scientifiquement valides au débat pour objectiver le dialogue entre les acteurs (techniques, politiques et citoyens) ;
- c. assurer le partage de l'information entre ces acteurs.

Et ce, par le développement et le déploiement de modèles de données à différentes échelles (modèles numériques construction et modèles numériques urbains) sachant que cette modélisation numérique ouvre des perspectives nouvelles en termes de visualisation des projets, de couplage avec les outils de simulation et de coordination entre les acteurs.

Ces travaux doivent permettre de développer des outils logiciels adaptés aux différentes échelles, ainsi qu'aux diverses phases d'un projet (évaluation préalable des performances, outils de simulation et de conception, évaluation des impacts environnementaux, outils d'aide à la décision, ...) pour passer du processus linéaire actuel à un processus plus intégré basé sur l'utilisation de la maquette numérique sémantique. Pour le secteur de la construction, cela permettra un meilleur partage des données, une mise en réseau des compétences variées et un rapprochement des points de vue dès la phase de conception.

En effet, il est clair que le positionnement du CSTB, basé sur un *continuum* entre sa recherche et les pistes de valorisation, permet d'envisager sereinement des possibilités de diffusion d'outils logiciels commerciaux à court terme tout en préparant, à travers des objets de recherche plus amont, des perspectives de valorisation à moyen terme.

Dans ce contexte l'objectif de la priorité scientifique SON est de promouvoir et de mettre en place une *approche intégrée en support à l'innovation* afin de donner aux différents acteurs de la construction et de la ville les moyens de répondre aux nouveaux enjeux professionnels et sociétaux auxquels ils sont confrontés.

Cette approche intégrée doit donner lieu à une *série de systèmes d'information* issus de la mutualisation des résultats de la recherche académique (théorique, expérimentale, simulation numérique intégrant les enjeux sociologiques et économiques) autour des problématiques de la construction et de la ville. Ils sont basés sur les derniers développements de la recherche académique dans les différents domaines avec une visée systémique abordant les couplages entre échelles et doivent permettre, sur la base de démonstrateurs et/ou de retour d'expérience sur les réalisations, d'évaluer les performances spécifiques des composants, ainsi que des systèmes industriels et constructifs.

En se basant sur les travaux de recherche réalisés ces deux dernières décennies en matière de modélisation / simulation numérique du cadre bâti, l'ambition est aussi de faire émerger des méthodologies pour progresser sur la fiabilité des résultats ainsi que sur la capitalisation des connaissances scientifiques liées à la modélisation physique et aux méthodes de résolution numérique.

Une attention particulière est portée à l'interopérabilité entre outils spécialisés dans différents domaines et à différentes échelles afin de proposer des solutions adaptées à une approche de travail collaboratif et pluridisciplinaire entre les acteurs.

Enfin, l'utilisation de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée qui favorisent à la fois l'optimisation technique et son appropriation via l'intégration des usages sont considérées afin de caractériser les impacts sur la performance globale dans le respect des politiques publiques.

### 3. STRUCTURATION

La priorité scientifique et technique « Simulation et Outils Numériques » a été structurée entre 2011-2013 suivant une logique d'échelle en trois axes, supportés par un quatrième axe transversal regroupant des thématiques utilisées par les différentes échelles :

1. un axe à **l'échelle des quartiers et de la ville** ;
2. un axe à **l'échelle de l'ouvrage** ;
3. un axe à **l'échelle des composants et des systèmes constructifs** ;
4. un axe transversal dédié au **travail collaboratif** et aux **actions support**.

Il existe des interfaces entre les différentes échelles et une articulation forte se dégage entre les deux échelles intermédiaires (systèmes constructifs et ouvrage) qui combinent la logique d'échelle avec le déroulement du processus de conception / réalisation : en effet le déroulement du processus fait intervenir au début la notion globalisante d'ouvrage associée à des performances attendues. Ensuite, lors du passage de l'Avant Projet Sommaire à l'Avant Projet Détaillé, les systèmes constructifs commencent à être définis à travers la consultation des solutions proposées par les industriels. Une boucle de validation doit ensuite être établie pour vérifier :

- que les solutions constructives sélectionnées permettent d'atteindre les performances globales de l'ouvrage telles qu'elles étaient envisagées au début du processus de conception ;
- la conformité de la solution préconisée par rapport aux contraintes réglementaires et au respect des exigences essentielles (stabilité, sécurité, ...).

Par ailleurs, l'échelle des quartiers et de la ville doit également être liée à celle du bâtiment afin de considérer l'ensemble (i.e. le bâtiment et son environnement) comme un système global dont les composants échangent des flux d'énergie, de matière ou d'information. Cela permet d'aborder la simulation des phénomènes physiques couplés avec l'environnement agissant sur le bâtiment (conditions météorologiques, bruit en façade, pollution extérieure, apport en lumière naturelle, ...) et, inversement, l'impact du bâtiment sur son environnement (différentes émissions dont des gaz à effet de serre, les flux de chaleur contribuant à la constitution d'îlots de chaleur urbain, les déchets, ...).

#### **Axe 1. Simuler et représenter les ambiances urbaines**

Cet axe concerne les échelles du quartier et de la ville dans une approche systémique visant à mieux comprendre les phénomènes qui y sont à l'œuvre et à développer des méthodologies et des outils, notamment des **modèles numériques**, pour mieux caractériser, gouverner, concevoir et gérer la ville durable. Il vise à faire converger les besoins entre les mondes de la recherche, de l'ingénierie, de la maîtrise d'ouvrage et de la maîtrise d'œuvre dans le champ de la modélisation urbaine, depuis la conception des villes jusqu'à leur

exploitation. L'approche strictement technologique adoptée dans un premier temps, en particulier pour les simulations environnementales (pollution de l'air, nuisances sonores, ...) doit être élargie pour intégrer des dimensions sociologiques et économiques.

## **Axe 2. Concevoir, réaliser et gérer les ouvrages**

Dans le cadre de la mutation initiée par la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement, le secteur de la construction fait face à un enjeu fort pour passer du parc de bâtiments actuel à des bâtiments à basse consommation ou à énergie positive, et à haute qualité environnementale, tout en étant sains et en respectant les autres exigences essentielles.

Cet axe se penche sur cette évolution qui va entraîner une mutation importante de l'ensemble de la chaîne de valeur de la conception, et de la réalisation, jusqu'à l'exploitation des bâtiments. La réussite passe par un travail collaboratif des acteurs qui interviennent tout au long de cette chaîne : architectes, bureaux d'études, entreprises, gestionnaires, ... Les logiciels collaboratifs basés sur une maquette numérique commune seront demain dans le secteur du bâtiment, comme ils le sont aujourd'hui dans celui de l'automobile ou de l'aéronautique un moyen essentiel pour permettre aux architectes, aux bureaux d'études et aux entreprises de travailler ensemble dès les premières phases de conception.

## **Axe 3. Numériser les composants et les systèmes constructifs**

Une réelle mutation de la filière a été initiée pour répondre aux nouveaux enjeux énergétiques et environnementaux en combinant (i) les innovations aux niveaux des matériaux, des composants et des systèmes et (ii) l'utilisation des technologies de l'information. Cet axe thématique étudie cette dimension tout en mettant l'accent sur l'apport de l'intégrabilité numérique (hybridant numérisation des catalogues de composants industriels, modélisation numérique, simulation et systèmes communicants véhiculant des mesures physiques et des événements) pour le pilotage des performances.

Il intègre les technologies nécessaires pour décrire, en détails, les caractéristiques (géométriques, topologiques et technologiques) des produits et des systèmes constructifs proposés par les industriels. Cette information riche, captée à la source, permet ensuite de créer rapidement des maquettes numériques sémantiques extrêmement précises, pour accompagner efficacement le projet de construction tout au long de son cycle de vie.

## **Axe 4. Plateforme collaborative et actions support**

Cet axe regroupe les actions support susceptibles d'être utilisées à différentes échelles et par différents acteurs utilisant la simulation et outils numériques. Il regroupe des approches méthodologiques (qualification des incertitudes, lancer de rayon, ...) et le développement d'une plateforme de travail collaboratif adaptée aux spécificités du secteur de la construction.

#### 4. BILAN

Les travaux de R&D menés dans le cadre de la priorité scientifique SON ont permis d'apporter une contribution significative à la numérisation de la filière et de positionner le CSTB comme un acteur incontournable de cette thématique. Cette numérisation représente un enjeu majeur, comme le montrent différentes études européennes et internationales, pour répondre aux défis complexes et pluridisciplinaires de la construction durable.

Les actions de recherche lancées sur l'utilisation de la maquette numérique à l'échelle de l'ouvrage (BIM pour « Building Information Model »), l'intégration des catalogues électroniques (ou e-catalogues) de produits et de systèmes constructifs issus des industriels, puis le couplage de l'ensemble (i.e. maquette numérique BIM enrichie avec les détails d'exécution des systèmes constructifs) avec des outils de simulation numérique permettant d'évaluer les performances actuelles et à venir de l'ouvrage, ont commencé à porter leurs fruits à travers des actions de recherche partenariale avec des industriels de la construction (Saint-Gobain, Legrand, ...) et des entreprises (Bouygues, ...). Des développements logiciels communs sont en cours avec ces partenaires accompagnés, pour certains, de dépôt de brevets communs.

À noter que les acteurs socio-économiques sont de plus en plus sensibles à ces thématiques et différents groupes de travail (dans les entreprises, chez les industriels et dans la sphère publique) ont été mis en place pour accompagner le déploiement opérationnel des parties les plus matures.

L'état d'avancement des actions de R&D semble assez varié (cf. présentation détaillée dans les paragraphes suivants). Les tendances globales sont néanmoins les suivantes :

- sur la maquette numérique BIM, les travaux sont avancés et les enjeux concernent maintenant plus le déploiement à travers l'accompagnement de la maîtrise d'ouvrage (notamment publique - cf. l'exemple du gouvernement anglais qui impose l'utilisation du BIM pour les bâtiments publics d'une façon graduelle d'ici 2016) pour provoquer ensuite un effet d'entraînement de l'ensemble de la filière ;
- sur les e-catalogues, un chantier est lancé mais est loin d'être terminé. Il y a en effet un travail important à réaliser sur la partie « back-office » pour permettre aux industriels de décrire eux même leurs systèmes constructifs sous une forme standardisée et exploitable par des outils logiciels ;
- sur le couplage avec les outils de simulation, des avancées ont été réalisées pour une évaluation multicritères de l'ouvrage (tableau de bord des performances incluant l'énergie, le confort, l'acoustique, l'éclairage, ...). À noter aussi la sortie d'un produit logiciel assurant l'évaluation de l'impact environnemental d'un projet à travers l'utilisation de la maquette numérique BIM (intitulé eveBIM - Elodie) ;

- sur la ville numérique, des travaux ont été lancés à l'échelle du quartier et de la ville dans une approche systémique visant à mieux comprendre les phénomènes à l'œuvre et à développer des méthodologies et des outils (modèles numériques) pour mieux caractériser, concevoir et gérer la ville durable.

Sur ces différentes thématiques, des partenariats pérennes, allant bien au-delà de la simple collaboration à travers des projets communs, ont été établis. Ils concernent :

- R&D : ENPC, IGN, TNO, Fraunhofer IGD ;
- Éditeurs de logiciels: Lascom, Autodesk, Dassault Systèmes ;
- Industriels : Saint-Gobain, Legrand, AIMCC ;
- Entreprises : Bouygues, Vinci ;
- Bureaux d'études : Egis, Syntec ;
- Autres : Veolia environnement, membres du réseau scientifique et technique du ministère (RST) (dont l'Ifsttar, l'IGN, Météo France, le Cerema [ex-CETE]...).

#### **4.1 RÉFÉRENTIEL NUMÉRIQUE**

L'objectif du projet *Référentiel numérique* est de concevoir, de mettre en œuvre et d'expérimenter une plateforme logicielle permettant d'enrichir la maquette numérique d'un projet de construction avec les informations disponibles dans différentes bases de données.

Les recherches menées durant le programme 2011-2013 se sont centrées autour de la notion de « configurateur de produit et systèmes constructifs » au format IFC (Industry Foundation Classes - cette norme ISO est le standard d'échange international et ouvert pour la maquette numérique BIM), sujet sur lequel le CSTB collabore depuis 2009 avec plusieurs industriels de la construction (et aussi, plus généralement, avec l'AIMCC).

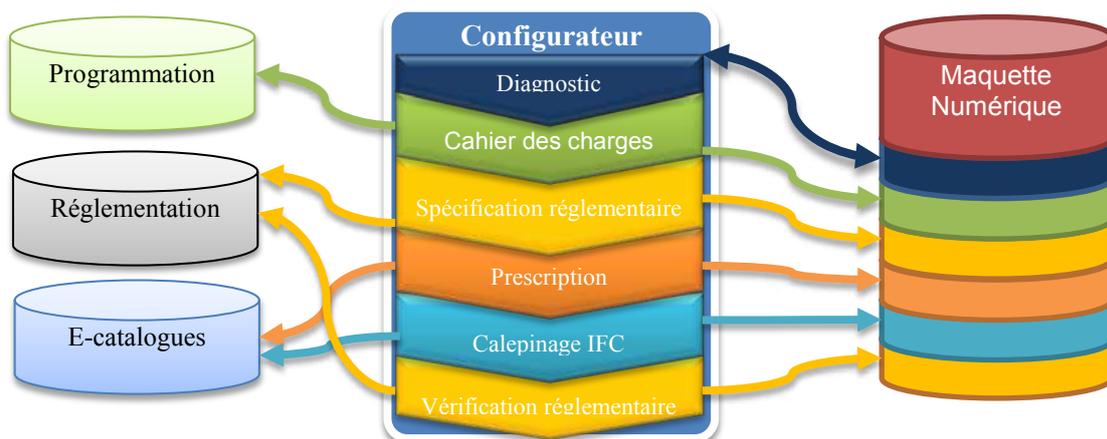
Bien qu'étant, à ce jour, appliqué essentiellement sur les produits d'isolation thermique et des équipements, le concept de configurateur est assez générique pour être à terme intégré à de nombreux systèmes ainsi qu'aux différentes phases du projet.

Partant de l'état d'un projet de construction à une phase donnée, le but d'un « configurateur » est d'aider un utilisateur (architecte, ingénieur, prescripteur, ...) à enrichir la maquette numérique du projet avec des informations détaillées utilisables par les autres acteurs, et ce, à différentes phases.

Comme indiqué sur la figure ci-dessous, l'outil « configurateur » est connecté d'une part à la maquette numérique du projet de construction et, d'autre part, à un ensemble de bases de données regroupant différentes sources d'information nécessaires ou utiles pour la suite du projet.

Le fonctionnement du configurateur, appliqué par exemple à la prescription des systèmes d'isolation, est le suivant :

- a. diagnostiquer la maquette numérique du projet de construction afin de vérifier qu'il ne manque pas d'information nécessaire au fonctionnement du configurateur. Le cas échéant l'utilisateur pourra ajouter les informations manquantes ;
- b. définir son cahier des charges, c'est-à-dire l'ensemble des contraintes techniques que le projet doit respecter : performances acoustiques, thermiques, environnementales, contraintes liés aux usages, etc. ;
- c. faire le lien entre le contexte du projet de construction et la réglementation en vigueur, afin d'exprimer les contraintes réglementaires directement dans la maquette numérique du projet ;
- d. sélectionner et spécifier les systèmes et les produits qui répondent de manière optimum aux différentes contraintes du projet, ces systèmes étant décrits par les industriels des produits de construction dans des bases de données dédiées (« e-Catalogues ») ;
- e. calepiner (mettre en œuvre), virtuellement, les systèmes spécifiés à l'étape précédente dans la maquette numérique en les traduisant dans au format ISO-IFC qui supporte la définition de la maquette numérique ;
- f. vérifier *in fine* si les systèmes sélectionnés et posés répondent bien aux contraintes réglementaires en vigueur et aux objectifs en termes performantiels.



**Figure 1 : Lien entre la maquette numérique, le configurateur et les bases de données**

En réponse aux objectifs évoqués ci-dessus, les travaux menés dans le projet *Référentiel numérique* ont permis d'obtenir les résultats suivants :

- Un travail de fond a été mené sur ce qui s'avère être un élément fondamental du projet, à savoir proposer un formalisme générique permettant aux industriels de décrire numériquement leurs catalogues de produits et de systèmes. Les réflexions sont menées dans le cadre de groupes de travail, en collaboration avec nos partenaires de l'AIMCC, sur la définition :
  - de la structuration des bases de données systèmes / produits / articles. Dans ce contexte, différentes expérimentations ont été menées dont celle axée sur l'utilisation de la norme ISO-16757 dédiée à la description de catalogues de produits,
  - d'un atelier de développement industriel permettant aux industriels de décrire, d'une façon autonome, leurs systèmes constructifs dans un formalisme adapté aux e-catalogues ;
- En collaboration avec Saint-Gobain, plusieurs prototypes de configurateurs ont été développés puis testés et présentés lors de conférences et de réunions à l'AIMCC. Ces prototypes servent de base à la définition d'un fonctionnement et d'une interface utilisateur plus génériques permettant au prescripteur de réaliser une grande partie des étapes détaillées ci-dessus. Les configurateurs de systèmes constructifs développés concernent les systèmes d'isolation thermique intérieure et extérieure (ITI et ITE), les façades semi-rigides innovantes (système F4 d'Isover) et les plafonds suspendus classiques ou décoratifs (Rigitone de Placo). Dans ce cadre, le calepinage est devenu beaucoup plus détaillé (chaque pièce d'une ossature métallique est modélisée, ainsi que ses percements qui permettent une vérification visuelle de l'assemblage). Ces configurateurs ont été dotés d'outils d'extraction documentaire permettant de calculer automatiquement des quantitatifs, mais aussi de produire des nomenclatures simplifiant la manutention et le montage ;
- Une collaboration étroite avec BuildingSmart (association internationale en charge de l'évolution et de la promotion de la norme ISO-IFC) a permis de vérifier la conformité à la norme des implémentations IFC proposées, mais aussi de communiquer, au niveau international, sur les résultats obtenus ;
- Un type particulier de configurateur dédié aux systèmes de contrôle-commande des équipements d'un bâtiment a été lancé. Un prototype a été développé permettant d'extraire un réseau d'équipements d'un modèle IFC afin de le compléter et d'en tester le comportement à l'aide d'outils de simulation numérique ;
- Un prototype de « référentiel technico-réglementaire » a été mis en place. À partir de la sémantisation de la réglementation autour de points clés réglementaires, de la formalisation du vocabulaire issu de la réglementation et de l'articulation de ce vocabulaire avec la sémantique véhiculée par la norme IFC, ce prototype permet d'interroger le REEF<sup>1</sup> automatiquement à

---

<sup>1</sup> Recueil des Eléments utiles à l'Etablissement et l'exécution des projets et marchés de bâtiments en France, produit par le CSTB

partir du contexte défini par la maquette numérique du projet de construction. Un prototype d'intégration avec le configurateur (sur le périmètre limité à la réglementation thermique) a été développé et testé.

## 4.2 SIMULATIONS MULTI-PHYSIQUES

Ce projet (intitulé Simbio 2.0) a pour objectif de développer des outils de simulation permettant d'évaluer et d'optimiser les performances des bâtiments tout au long de leur cycle de vie en matière d'énergie, d'environnement et de confort. L'originalité de ces outils est leur interopérabilité basée sur la maquette numérique. Les différentes tâches menées dans le cadre du projet sont les suivantes :

- Plateforme de conception : l'objectif ici est de définir puis de développer une plateforme logicielle dédiée à la conception des bâtiments neufs et des rénovations importantes et comportant un ensemble d'outils métiers permettant de réaliser des études de conception en matière de consommation d'énergie, d'impact environnemental, de confort thermique, de confort acoustique et de confort lumineux.

Ces outils partageront une description commune via un modèle de données de l'enveloppe, de la structure et des systèmes du bâtiment compatibles avec la maquette numérique disponible dans le BIM. La plateforme comportera les outils de construction de ce modèle de données dans le cas du neuf et de l'existant. Elle développera également les vues métiers spécifiques à chaque métier et des outils permettant d'extraire de ce modèle commun les données nécessaires à chaque vue métier.

L'extension à d'autres outils métiers orientés économie, accessibilité, santé... sera analysée dans un second temps. L'émergence de la maquette conduira à des possibilités de simulation aujourd'hui inaccessibles du fait de la difficulté à collecter l'ensemble des données requises ;

- Plateforme d'exploitation : l'objectif est de définir puis de développer une plateforme logicielle dédiée à l'analyse des performances effectives des bâtiments. Cette plateforme doit permettre de suivre un bâtiment particulier ou un ensemble de bâtiments. Elle comportera, en complément des outils de la plateforme de conception, des outils permettant d'analyser les résultats de mesure ou d'enquêtes pour recaler les modèles de conception et suggérer des modes d'amélioration du fonctionnement effectif. Ces outils seront utilisables pour faciliter une garantie de performances ;
- Simulateurs et interopérabilité des outils métiers : l'objectif est de définir les outils les plus pertinents pour répondre à une problématique métier identifiée dans le cadre de partenariats (en particulier à travers le réseau Simbio) que ce soit pour décrire les modèles, les coder, les capitaliser et les rendre interopérables. L'enjeu est d'arriver à des outils de référence qui seront utilisés dans différentes études. On intégrera parmi ces outils les bases de données de bâtiments types, les logiciels produits par le CSTB comme

Cometh / Elodie / Acoubat / Phanie / TrnSys / Simbad, ... et les outils de développement de type Simulink / Modélica-Dymola.

Dans ce cadre, une première maquette logicielle a été développée qui permet de réaliser des simulations multi-physiques pour une évaluation multicritères des performances (thermique, impact environnemental, acoustique, éclairage). En effet, en se basant sur les hypothèses unifiées et les données transversales, les cœurs de calcul des simulateurs ont pu être modifiés afin de mettre en œuvre une première chaîne de co-simulation multi physiques. Une maquette fonctionnelle est disponible sous forme d'un logiciel en ligne. L'objectif est maintenant de rendre générique les échanges entre outils pour permettre l'intégration d'autres outils de calculs et de simulation dynamique. Pour ce faire, le cahier des charges des informations nécessaires aux calculs doit être élaboré pour permettre une extraction depuis la maquette numérique BIM.

À noter que des travaux de valorisation ont par ailleurs été entrepris sur le couplage entre la maquette numérique BIM et l'outil d'évaluation de l'impact environnemental Elodie avec, comme résultat, la sortie du produit commercial associé (eveBIM - Elodie) en février 2013.

Un second volet exploré concerne le bâtiment en exploitation et son suivi tout au long de son cycle de vie. Les travaux se sont concentrés sur les méthodes de mise en œuvre de la garantie de performance énergétique d'un bâtiment. En s'appuyant sur les données de télégestions disponibles dans le projet de recherche Homes, des méthodes de prétraitement de données brutes ont été mises en place afin d'obtenir des données normalisées permettant de calculer la consommation réelle ainsi que d'extraire les informations météorologiques réelles, la température de consigne et l'occupation réelle du bâtiment. Il convient ensuite d'utiliser un simulateur dynamique pour permettre de calculer les consommations théorique du bâtiment dans les conditions réglementaires, puis les consommations théoriques recalculées avec les conditions réelles calculées précédemment.

L'analyse de l'écart entre la consommation réelle et la consommation théorique permettra de concevoir des modules de garantie de performances et de détection de défaut et de dérive.

#### **4.3 VILLE NUMERIQUE**

La ville est un objet d'étude multi-facettes qui cristallise de nombreux axes de recherche et domaines d'analyse : du génie civil, à l'architecture et l'urbanisme, des sciences humaines en passant par l'écologie et les sciences environnementales, l'étendue des disciplines à prendre en compte est large.

Les enjeux du développement durable créent de nouveaux défis d'ordre technique, énergétique, environnemental, sociétal ou liés aux usages et renforcent la nécessité de mettre en œuvre des approches plurielles pour la conception et la réalisation des projets urbains.

Pour aborder ces enjeux pluridisciplinaires et complexes, des méthodologies et des outils innovants sont nécessaires. Parmi ceux-là, la modélisation numérique constitue un élément clé permettant, dans une approche systémique, de mieux comprendre les phénomènes à l'œuvre pour mieux caractériser, concevoir et gérer la ville durable. La modélisation numérique à l'échelle de la ville permet en effet de :

- a. concevoir, construire, aménager et exploiter des espaces publics et privés de qualité accessibles à tous ;
- b. disposer de représentations de ces espaces (modèles 3D, réalité virtuelle, réalité augmentée...) afin de caractériser, d'analyser et de simuler ces espaces et leurs projets d'évolution ;
- c. organiser la communication et la concertation autour des maquettes numériques et des scénarios d'aménagement urbains.

Dans ce contexte, le projet Ville numérique vise à développer des outils à destination des acteurs de la ville facilitant la compréhension et l'évaluation intégrée d'un projet par les décideurs à l'aide d'indicateurs et de représentations pertinents. Les domaines et les disciplines visés recouvrent la qualité des ambiances, la gestion des énergies, la maîtrise des risques et la sociologie urbaine. La qualité des ambiances se veut multicritère et englobe notamment le confort visuel, le confort acoustique, la qualité de l'air, le confort aérothermique et les expositions aux ondes électromagnétiques.

L'objectif du projet est de fournir ces outils logiciels pour la simulation et l'analyse de la qualité environnementale de la ville. Il a pour ambition le développement d'outils interopérables d'acquisition, de stockage, de prévision et de représentations de données qui soient pertinentes et pérennes pour l'ensemble des acteurs travaillant à l'échelle du quartier. Ces données englobent des données physiques (mesurées ou calculées à partir de modèles) et des données immatérielles (issues d'enquêtes sur site ou en laboratoire). Les représentations vont de la cartographie 2D à la réalité virtuelle 3D (visuelle et auditive). L'ensemble de ces outils et données constitue la maquette numérique urbaine (MNU). Elle est à la fois un outil de conception (maquette d'ingénierie), un outil de concertation et un outil de décision (maquette de présentation).

Le projet a abordé les axes thématiques suivants :

- Définition des besoins et évaluations utilisateurs. Il s'agit de préciser les besoins des urbanistes et plus généralement des acteurs de la ville en termes d'indicateurs, de représentation et d'usages de la MNU. Parallèlement, cette tâche doit mettre un place une évaluation utilisateur des outils développés à travers l'organisation de séminaires internes et externes ;
- Données et couplage modules « métiers ». Il s'agit de sélectionner, d'enrichir ou de développer les schémas de données adaptés aux différents usages de la maquette. Ce travail inclut également la mise en forme des données spécifiques en entrée des moteurs de calcul « métiers » et leur extraction à

partir de données standardisées ainsi que le stockage des indicateurs mesurés et/ou calculés ;

- Outils pour la caractérisation multicritère de l'urbain. Cette tâche regroupe les efforts de conception et d'aide au développement pour l'intégration dans la MNU des différents codes de calcul « métiers » issus de recherches internes ou bien collaboratives au sein du RST. L'intégration proprement-dite dans les plateformes logicielles cibles en fait également partie ;
- Outils pour l'évaluation perceptive sonore et visuelle. Cette tâche concerne le domaine spécifique de l'évaluation perceptive des ambiances sonores et visuelles. Elle vise en particulier à améliorer la qualité des restitutions temps réel de scènes dynamiques dans le contexte de la navigation interactive et de l'immersion.

Les résultats obtenus concernent l'inventaire des récentes maquettes numériques urbaines et des cartographies utilisées dans les projets urbains, mais aussi la mise en perspective des besoins d'outillage de la maîtrise d'ouvrage pour élaborer des projets urbains durables. Dans ce cadre, quatre enjeux majeurs apparaissent pour faire évaluer les MNU :

- un enjeu de traduction des connaissances urbaines et sociales fondée sur des critères scientifiques dans les maquettes numériques urbaines, les représentations 3D étant le plus souvent centrées sur les données physiques ponctuelles sans contextualisation spatiale (périmètre projet par rapport au périmètre de réflexion urbaine) et temporelle (phases du projet urbain). De plus, les cartographies ou les représentations qui cherchent à traduire des données immatérielles (usage, perception, ambiances sonores, paysage ...) s'appuient rarement sur des données validées ;
- un besoin de définition d'un langage cartographique et 3D partagé, dans un contexte de diversification des modes de représentations de données socio-urbaines et de développement de formes hybrides, entre le langage cartographique, la maquette d'architecture et la maquette numérique, qui constituent une opportunité pour enrichir les représentations centrées sur la forme urbaine, utilisant les avancées en matière de représentations 2D de données immatérielles ;
- une optimisation des possibilités d'usages de la maquette numérique urbaine (concertation, outil collaboratif) dans le projet urbain, semblant souvent réduite à un outil de communication n'exploitant pas le potentiel de connaissance et de partage d'information qu'elle peut représenter pour une conception urbaine durable.

Un rapport de synthèse fait état de préconisations sur l'apport des outils numériques dans la conception et la concertation des projets de renouvellement urbain durable.

Par ailleurs, l'étude menée sur le format CityGML montre son intérêt en tant que schéma de données natif pour la MNU. En effet, la majorité des outils d'aide à

l'aménagement urbain sont aujourd'hui basés sur des données de types SIG (système d'informations géo référencées). Un nouveau schéma de données normalisé, le CityGML, vise à étendre les possibilités des SIG pour notamment faciliter le stockage et l'accès à des données 3D texturées ainsi que le développement de passerelles vers des modules métiers dont les données en entrée requièrent une phase de conversion depuis les données SIG.

Les travaux menés sur ce thème concernent :

- l'importation de données SIG vers le format CityGML ;
- la représentation 3D de données au format CityGML ;
- la mise en œuvre de modules permettant d'alimenter en données au format CityGML les moteurs de simulation métier et de récupérer les données calculées par ces moteurs au format CityGML.

Un cahier des charges fonctionnel d'une plateforme logicielle, support de la maquette numérique urbaine, décrit l'ensemble des fonctionnalités attendues. Ces fonctionnalités découlent d'une part du rapport de synthèse établi et, d'autre part, d'un rapport d'analyse du marché de la MNU. Les fonctionnalités principales sont :

- l'utilisation d'un modèle de données unifié au format CityGML ;
- l'édition générique des données ;
- le lancement de simulations métiers à partir du modèle permettant le stockage des résultats obtenus dans le modèle ;
- la création et la comparaison de scénarios ;
- la visualisation 3D du modèle et des résultats de simulation ;
- l'exportation et l'exploitation des résultats.

Plusieurs briques logicielles de la plateforme ont été développées suivant ce cahier des charges et sont aujourd'hui disponibles :

- brique d'importation de données SIG pour leur stockage dans le format natif standard CityGML ;
- brique de visualisation 3D des données de type terrain et bâti au format CityGML ;
- brique de visualisation des résultats de simulation du potentiel photovoltaïque ;
- brique de visualisation des résultats de simulation de la dispersion de polluants ;
- brique de visualisation des résultats de simulation acoustique sous la forme de cartes de bruit ;
- brique de visualisation dynamique des simulations de trafic routier.

Concernant les simulations auditives, le module d'auralisation terraAudio permet l'évaluation par l'écoute des nuisances liées au trafic routier. Le module utilise une nouvelle technique de synthèse temps réel des bruits source des véhicules à moteur (moteur et pneumatique). Cette technique brevetée permet la simulation auditive des trafics non-stationnaires pour lesquels les effets liés aux

accélérations et décélération de véhicules doivent être reproduits fidèlement afin de garantir la validité des évaluations par l'écoute.

Les travaux menés sur les opérateurs de reproduction de tons (ORT) doivent permettre d'améliorer le rendu visuel des simulations d'éclairage. Ces traitements graphiques sur les images visent à reproduire des sensations visuelles équivalentes à celles perçues dans le monde réel alors que les moyens de restitutions (écrans, projecteurs) ont des capacités très limitées. 3 types d'opérateurs ont été identifiés :

- Des opérateurs statiques et globaux, pouvant être mis en œuvre aisément pour une restitution en temps réel ;
- Des opérateurs statiques locaux, dont la mise en œuvre en temps réel est envisageable à condition de limiter la résolution des images traitées et/ou la finesse des traitements locaux ;
- Des opérateurs dynamiques et locaux. Les traitements semblent trop coûteux pour un traitement en temps réel et s'appuient sur des phénomènes trop complexes à modéliser.

L'articulation du projet *Ville numérique* avec les projets de R&D internes et externes a finalement permis :

- d'intégrer à la MNU le module de simulation du Potentiel Photovoltaïque issu du projet CSTB *Quartier bas carbone* ;
- d'intégrer à la MNU le module d'évaluation des indicateurs intégrés écoquartier du projet CSTB *Evaluation des projets urbains* ;
- d'impliquer les Cete dans l'évaluation opérationnelle de la plateforme logicielle en construction à travers une formation et sa mise à disposition pour des études sur des projets pilotes ;
- de poursuivre les collaborations au sein du RST (ENPC, IGN, Météo France, Ifsttar, ...).

#### **4.4 PROCESS LIFECYCLE MANAGEMENT ET TRAVAIL COLLABORATIF**

Quels que soient leurs rôles, les acteurs des projets de construction et d'urbanisme sont quotidiennement confrontés à des situations collaboratives particulières. Au-delà des tâches de conception et de réalisation qu'ils se voient attribuer, chacun doit prêter attention et se référer au travail de ses collaborateurs et partenaires. Par ailleurs, les nouvelles exigences de la construction durable induisent des contraintes supplémentaires et de nouvelles étapes dans les processus collectifs de conception et de réalisation. Il ressort de cette analyse qu'une bonne collaboration est essentielle pour s'assurer que les décisions soient partagées et que chacun contribue par son expertise à la démarche de développement durable fixée.

Or, l'utilisation de la maquette numérique BIM « en bloc » (i.e. par échange de fichier) ne correspond que partiellement à cette pratique professionnelle de collaboration hors contexte particulier (ingénierie intégrée, partenariat public-

privé [PPP], ...). Par conséquent, elle doit être considérée comme une première étape vers une approche basée sur le travail collaboratif PLM (Process Lifecycle Management) et adaptée aux processus métiers des acteurs de la construction. Cette approche PLM permettra de répartir les composants du BIM dans une logique métier (par lot, par phase, ...) tout en préservant les droits et les rôles de chacun des acteurs.

Il existe donc un besoin évident d'une plateforme de collaboration permettant de gérer les rôles et les responsabilités de chacun des acteurs. Cette plateforme devra gérer l'extraction des vues métiers adaptées à ces acteurs (conversion géométrique / sémantique / topologique entre modèles spécifiques pour chacun des domaines).

L'objectif de ce projet est donc d'initier le développement d'outils collaboratifs basés sur une maquette numérique et permettant aux acteurs de la filière construction de traiter les différentes phases depuis les premières réflexions jusqu'à l'exploitation au quotidien de l'ouvrage, et ce, en supprimant les ruptures de la chaîne numérique entre les acteurs et les phases et en supportant un processus plus récursif et plus intégré adapté aux nouveaux défis de la construction et de l'aménagement durables.

Cette action a démarré à travers une analyse des processus métiers mis en œuvre dans un projet collaboratif. Pour ce faire, une expérimentation a été mise en place réunissant une équipe de bureaux d'études originaires de la région Centre et travaillant sur la conception d'une maison individuelle :

- Aubert Structures, bureaux d'études structures ;
- Energio, bureau d'études thermiques ;
- Dumont et Maussion, Architectes ;
- Cabinet MIT, économiste de la Construction ;
- Groupe A&S, bureau de dessin en bâtiment et BIM Manager de l'opération ;
- Le CSTB qui a fourni à l'équipe projet le logiciel eveBIM permettant de visualiser les fichiers IFC.

Cette expérimentation a permis d'identifier les besoins en matière de travail collaboratif basé sur la répartition des composants BIM dans une logique métier (par lot, par phase, ...) en prenant en compte les différentes dimensions (technique, juridique, traçabilité, rôle des acteurs, ...).

Ensuite une analyse de l'offre PLM du marché a été réalisée afin d'identifier le meilleur candidat pour une adaptation de la plateforme aux besoins du secteur de la construction tels qu'identifiés par l'expérimentation. Cette analyse a permis de lancer une collaboration avec un éditeur logiciel d'une solution PLM éprouvée (Lascom), collaboration qui permet d'envisager une valorisation rapide de ces travaux de R&D à travers la commercialisation fin 2013, en partenariat entre le CSTB et Lascom, d'un outil logiciel combinant la gestion de la maquette numérique BIM et l'approche PLM (produit intitulé eveBIM - PLM).

## 4.5 ACTIONS SUPPORT

### 4.5.1 IMAGINE

La reconstruction 3D est une problématique centrale, depuis plusieurs années, du pôle Imagine (pôle de recherche commun ENPC-CSTB) avec, en particulier, des applications aux échelles de la ville et du bâtiment. La maturité de la technologie développée permet aujourd'hui de traiter de grands volumes de données – et donc de travailler à grande échelle – tout en conservant une grande fiabilité de modélisation des environnements existants. La production de modèles 3D à partir d'images acquises par divers biais est maintenant possible en quelques heures de calculs.

Depuis quelques années, les recherches du laboratoire Imagine se sont concentrées sur l'interprétation des modèles issus de ces reconstructions, avec de nombreuses applications focalisées sur le monde du bâtiment et de la construction. Et ce, afin de donner du sens à la géométrie, en l'augmentant de l'information qui lui manque : la sémantique. Il s'est alors agi de pouvoir interpréter les modèles, en reconnaissant leurs différents éléments constitutifs, de façon automatique. Ce besoin d'interprétation est notamment poussé par des applications qui nécessitent de disposer en entrée d'une richesse d'information importante. Il est alors nécessaire d'avoir des outils permettant de produire des modèles sémantisés. C'est notamment le cas de nombreuses simulations aujourd'hui existantes mais dont la finesse d'analyse pourrait être améliorée par l'apport de telles données. La sémantisation est aussi un outil extrêmement puissant de connaissance et de représentation des territoires.

Les résultats de ces actions de recherche concernent les thèmes suivants :

#### **Reconstruction 3D et calibration**

Les algorithmes de reconstruction 3D initialement développés ne permettaient pas, pour des raisons d'optimisation (de la mémoire), de traiter de grands volumes de données. La thèse de *Vu* a comblé ce manque en proposant une méthode (basée GPU - Graphics Processing Unit) permettant de traiter des blocs séparés de données, qui sont *a posteriori* mis en cohérence sur les zones frontalières des différents maillages obtenus. Un algorithme original de fusion de maillage avec respects des contraintes topologiques a ainsi été présenté. L'intérêt de l'approche est qu'elle permet de conserver la grande précision des résultats, tout en traitant de larges étendues.



**Figure 2 : Reconstruction 3D de Cluny à partir d'images très haute résolution**

L'un des points crucial préalable à toute reconstruction 3D est la calibration des caméras, étape permettant de connaître les positions relatives des caméras. Or, dans des conditions difficiles, notamment lorsque les images acquises présentent de fortes répétitions ou des changements trop importants d'échelle ou d'orientation, les travaux de *Ok* ont permis de développer un algorithme proposant un appariement de points d'intérêts par région. L'idée générale est de ne pas considérer des points uniques à mettre en correspondance entre les images, mais de se baser sur des groupes de points construits itérativement afin d'assurer une cohérence globale, aussi bien d'un point de vue géométrique que photométrique. Grâce à la robustesse de cette méthode, il est possible de calibrer jusqu'à 3 fois plus de caméras qu'avec les méthodes traditionnelles. Les temps de calculs restent également très compétitifs par rapport à l'état de l'art.

### **Sémantisation 2D**

Cette méthode de mise en correspondance de régions a été utilisée avec succès pour la sémantisation d'images de façades. En effet, en utilisant le principe d'appariement, mais en l'appliquant sur des régions d'une seule et même image, il est possible d'identifier des régions aux caractéristiques géométriques et radiométriques similaires. Ceci s'avère particulièrement intéressant pour la reconnaissance d'éléments répétitifs dans les images, telles les fenêtres lorsque l'on s'intéresse aux bâtiments. Par ailleurs, l'algorithme prenant en compte les déformations des perspectives entre les régions à apparier, la contrainte de rectification des images a pu être supprimée, de même que celle classique de l'état de l'art qui consiste à s'appuyer sur la régularité de la façade.



**Figure 3 : Détection de fenêtres : affranchissement des contraintes de rectification d'image et de régularité de la façade**

Ce détecteur de fenêtre peut ensuite être utilisé de façon robuste pour améliorer les résultats des approches de sémantisation mettant en œuvre des grammaires de forme. Les résultats sur les bases de données d'images de l'état de l'art ont ainsi pu être sensiblement améliorés aussi bien quantitativement que qualitativement.

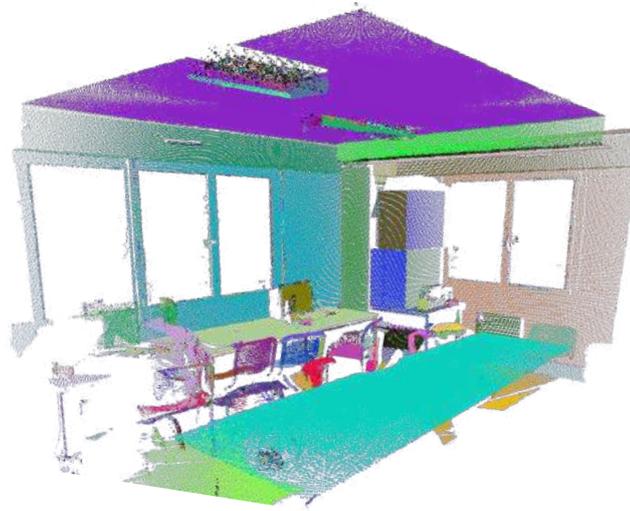
Dans la continuité de ces travaux, afin de proposer une méthode d'interprétation d'images de façades, en se basant sur la définition d'un modèle décrivant la façade comme une composition d'objets dont les contraintes peuvent être définies a priori, les travaux de Kozinski sont actuellement en cours. Leur objectif est de pouvoir à terme obtenir des reconstructions 3D sémantisées. L'approche repose sur la définition d'un graphe, chaque nœud représentant un objet, et chaque arête définissant une relation (ou contrainte) entre deux objets. Ce formalisme permet de définir une énergie sur le graphe. Un de ses termes représente les observations, un second terme un *a priori* de composition (par exemple, deux fenêtres d'un même étage ont des dimensions similaires) et un dernier terme un *a priori* de structure (par exemple, un bâtiment à un seul et unique étage est improbable).

### **Sémantisation 3D**

En parallèle des travaux portant sur la sémantisation à partir d'images, des recherches prenant en entrée une géométrie 3D (nuages de points laser ou modèles CAO) ont plus récemment été conduites. Tout comme pour l'approche 2D, lorsque l'on s'intéresse à la géométrie 3D, la première étape consiste à identifier les différents objets qui composent la scène.

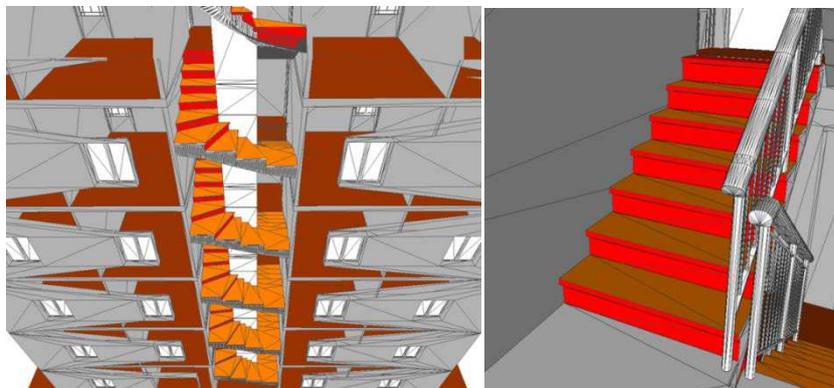
Pour la segmentation de nuages de points laser, Boulch s'est intéressé à une méthode pour l'estimation robuste (et rapide) des normales des points, c'est-à-dire, une méthode qui évite le lissage des normales aux angles des surfaces, et qui prend en compte les différences de densité. Une fois les normales correctement estimées, il devient possible de segmenter la scène en utilisant leur cohérence locale, c'est-à-dire en regroupant les points dont les normales ont des

orientations cohérentes, par exemple des plans ou des cylindres. Est alors obtenue une segmentation de la scène en objets géométriquement cohérents.



**Figure 4 : Segmentation d'un nuage de points par cohérence locale des normales**

L'interprétation sémantique des différents objets d'un modèle a en revanche été menée sur des modèles CAO, c'est-à-dire sur des modèles dont la géométrie est la plus propre possible. Cela permet de développer des approches non sensibles aux bruits et occultations, largement présents dans les nuages de points ou les reconstructions photogrammétriques. Chaque modèle étant composé de triangles, une première étape de fusion, basée sur la cohérence de leurs normales, permet de les regrouper en polygones. Ces primitives sont ensuite utilisées comme base d'une approche grammairale dont l'objectif consiste à les regrouper en éléments de haut niveau : marches et escaliers, murs, dalles, baies et leurs encadrements, toits. L'algorithme construit un graphe d'adjacence des primitives et la grammaire définit un ensemble de règles (par exemple, une marche est constituée de deux polygones orthogonaux) et d'opérateurs (par exemple, un escalier est une séquence de marches).



**Figure 5 : Reconnaissance automatique des dalles et escaliers dans un modèle 3D CAO**

Un corollaire de cette méthode de sémantisation de modèles 3D est la détection d'erreurs de modélisation géométrique. En effet, lorsqu'un élément d'un modèle n'est pas détecté par la grammaire, il est possible que ce soit dû à une erreur de modélisation.

#### **4.5.2 RÉFÉRENTIEL DE BÂTIMENTS TYPES**

Cette action a pour objectif de consolider les travaux sur la connaissance du parc de bâtiments existants par le biais de la réalisation d'un référentiel de « bâtiments types » décrivant des bâtiments réels et représentatifs. En effet, les chercheurs du CSTB doivent pouvoir appuyer leurs travaux de recherche sur un référentiel de bâtiments types documentés, nécessaires pour modéliser et évaluer l'impact des choix de modernisation durable sur la consommation globale du parc français.

L'ensemble des travaux de recherche menés entre 2007 et 2010 dans le cadre du programme de recherche « Modernisation durable de l'existant » (MDE) sur la connaissance du parc ont contribué à l'élaboration de ce référentiel. L'action de recherche « Bâtiments types » se positionne dans le prolongement de ces travaux et vise de manière spécifique à mettre à disposition des chercheurs du CSTB la description d'une collection de « bâtiments types ». Les enjeux majeurs de ces travaux sont par conséquent :

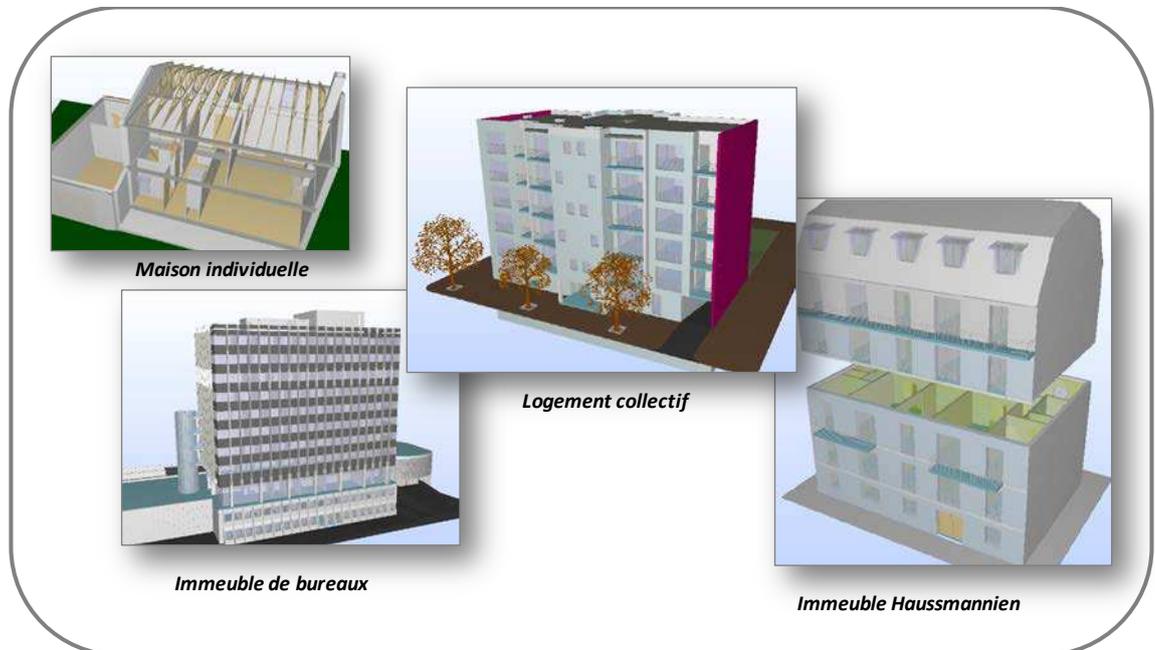
- le transfert des résultats des travaux de connaissance du parc en identifiant des bâtiments réels susceptibles d'initier de manière pertinente la réalisation d'une collection de bâtiments types du CSTB stable et reconnue ;
- la mise à disposition de ce référentiel à l'ensemble des chercheurs du CSTB selon un formalisme facilitant la mobilisation de compétences croisées et la collaboration entre chercheurs du CSTB au service d'une approche globale des aspects de modernisation durable de l'existant.

Afin de répondre en particulier à ce second point, il a été choisi de réaliser une maquette numérique (BIM au format IFC) de chacun des bâtiments de la collection. Les chercheurs du CSTB peuvent ainsi envisager de partager des données à la fois homogènes (capitalisation d'un jeu de données centralisé et partagé), fiables (une maquette enrichie par les spécialistes de chaque domaine), et compatibles avec les outils de simulation du CSTB.

La sélection des bâtiments a été réalisée selon les critères établis par les travaux de recherche MDE sur la connaissance du parc et parmi une base de données de bâtiments réels mise en place en collaboration avec une quinzaine de nos partenaires : architectes, maîtres d'ouvrage public et privé, maîtres d'œuvre, etc.

La version actuelle de la collection de « bâtiments types » regroupe 20 maquettes numériques de bâtiments réels, issus du parc français et des secteurs résidentiel et non-résidentiel. Sont représentés en particulier 5 maisons individuelles, 7 logements collectifs, 4 immeubles de bureaux et enfin 4

bâtiments d'enseignement. Dans le cadre de la réalisation de cette première collection de bâtiments, les maquettes produites proposent un premier niveau de description centré sur le bâti (enveloppe du bâtiment et agencement intérieur) suffisant pour permettre de tester le couplage avec des logiciels de calculs de différents types (environnement, énergie, acoustique, ...).



**Figure 6 : Visualisation de quelques exemples de la collection de maquettes numériques CSTB**

Une ambition forte de flexibilité a été requise pour l'ensemble des travaux afin d'offrir par la suite, la possibilité de nourrir, de compléter, voire d'ajuster ce référentiel. Il s'agit notamment de progressivement intégrer les résultats des travaux sur la base de connaissance des bâtiments existants pour converger à terme vers une typologie stable et reconnue.

#### **4.5.3 INCERTITUDES**

Cette action vise la mise en œuvre des outils nécessaires à la qualification de l'incertitude associée à un résultat d'évaluation lorsque celui-ci est obtenu par une approche purement calculatoire ou combinant essais et calculs.

Les équipes participant à l'action ont appliqué cette méthodologie dans différents domaines scientifiques :

- le comportement de cloisons de grande hauteur en cas d'incendie, mêlant simulations numériques et essais sur cloisons de taille réduite ;
- l'estimation des incertitudes dues aux différents paramètres d'entrées dans les simulations par méthodes asymptotiques de l'exposition aux

ondes électromagnétiques à l'échelle urbaine telles qu'utilisées actuellement et leur extension pour l'identification des points chauds (les plus exposés) en façade ;

- la prise en compte de matériaux brillants dans les simulations d'éclairage avec une confrontation des données de mesure brutes avec les modélisations ;
- l'étude de la représentativité des modélisations numériques dans le domaine du dimensionnement au vent par analyses comparatives avec les simulations physiques à échelle réduite en soufflerie ou les mesures sur site ;
- la validation du code d'interaction fluide-structure (IFS) à travers l'évaluation des incertitudes du code IFS par comparaisons calculs / essais dans des cas concernant la stabilité (mise en vibration) de ponts sous l'effet du vent ;
- le développement de modules génériques permettant d'étudier la propagation d'erreurs dans les moteurs de calcul énergie / environnement.

Cette action a permis aussi de fédérer une communauté de chercheurs CSTB intéressés par cette problématique de la qualification de l'incertitude. L'utilisation d'un outil commun de traitement de l'incertitude (outil open source OpenTurns) a permis de créer une synergie rapide entre les chercheurs travaillant sur cette thématique.

#### **4.5.4 LANCER DE RAYONS**

De nombreux domaines (acoustique, éclairage, thermique, ...) utilisent des méthodes géométriques pour des calculs de visibilité et d'évaluation de contributions. Elles utilisent toutes à la base des techniques de lancer de rayons, mais les utilisations sont très différentes selon les physiques traitées et donc la mise en commun de ces outils ne peut se faire directement. Il est également important de souligner que ces outils exploitent des dimensions différentes (2D, 3D, 4D), sont parfois parallélisés et peuvent exploiter les cartes graphiques.

L'objectif de cette action de recherche était de développer une bibliothèque commune de lancer de rayons permettant de capitaliser sur les améliorations apportées au fur et à mesure et de supporter les différents outils de calcul à travers une interface commune.

Le résultat est une bibliothèque logicielle de lancer de rayons, répondant aux besoins du CSTB pour ce qui concerne ses outils de simulation (éclairage, électromagnétisme et acoustique) et qui repose sur l'utilisation d'objets (*class* mère abstraite *CObject*, une primitive géométrique) et de structures accélératrices (réfèrent un ensemble d'objets). Chaque objet possède un

certain nombre de méthodes d'intersection. Les objets sont associés à une donnée personnelle (un pointeur) lorsqu'ils sont ajoutés à la structure accélératrice. Ainsi, un objet peut être uniquement une table de méthode et la donnée personnelle contenir les données géométriques associées. Mais un objet peut aussi contenir la donnée géométrique et la donnée personnelle peut alors faire le lien avec les propriétés physiques de l'objet. Seule l'unicité de cette paire objet - donnée personnelle doit être garantie.

Performante et simple d'utilisation, cette bibliothèque est déjà opérationnelle dans les applications Héliodon (ensoleillement) et Icare (acoustique). D'autres applications (exposition intérieure aux ondes électromagnétiques, ...) sont envisagées.

Deux actions de recherche partenariale peuvent être mentionnées sur cette thématique :

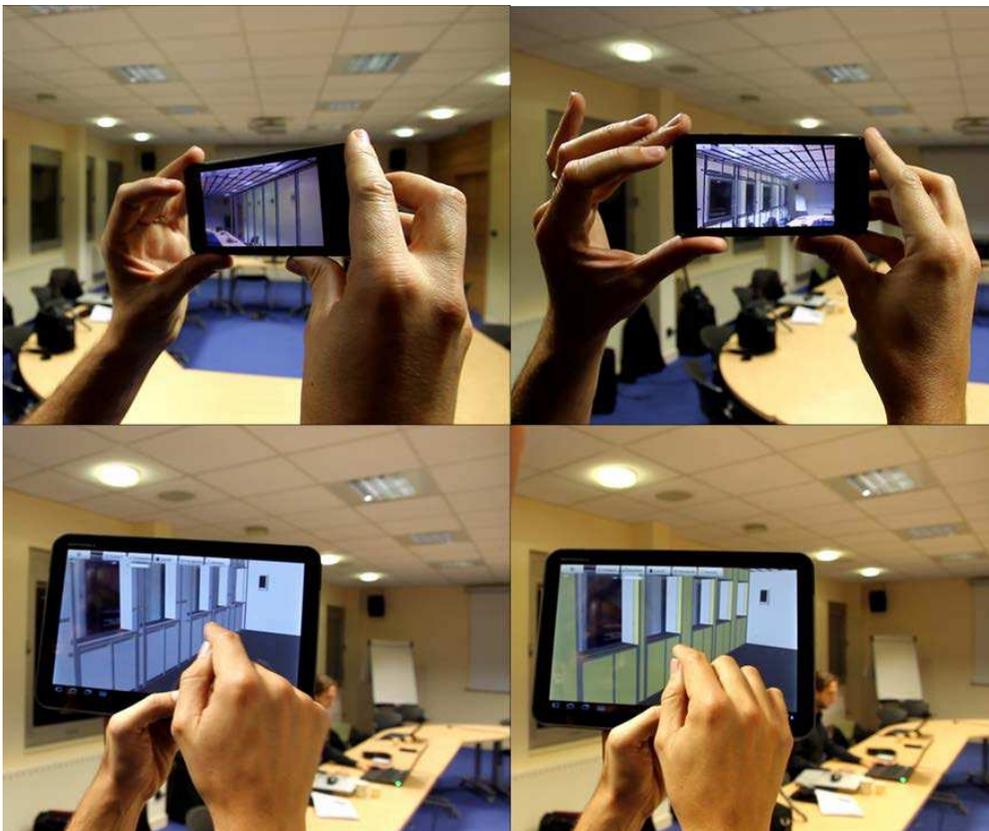
1. Le développement d'un logiciel de radiosité acoustique pour la prévision du bruit dans les milieux complexes encombrés. A l'origine, la radiosité est une méthode de simulation en thermique, mais elle est surtout utilisée en simulation d'éclairage. Fort d'une expérience d'une quinzaine d'année dans le domaine, le CSTB a appliqué cette technique à la prévision du bruit dans les milieux complexes encombrés comme les sous-capots de moteur. En effet, dans ces environnements complexes encombrés, où les sources de bruit (moteur) sont difficiles à caractériser autrement que par leur puissance rayonnée, elle permet d'obtenir des résultats de qualité avec des contraintes de modélisation beaucoup moins restrictives que les méthodes de type éléments finis. Un logiciel industriel a été développé et est actuellement utilisé par PSA depuis 2012, mais d'autres constructeurs ou équipementiers devraient être séduits par cet outil.
2. L'étude acoustique des effets d'installation d'une nacelle de réacteur sur un avion. Le CSTB a mené cette étude à la demande de la société Snecma. Prévoir les effets d'installation consiste à quantifier le bruit émis par l'avion à partir du bruit émis par la nacelle et de la forme de l'avion. Il s'agit donc de prendre en compte la forme du fuselage, des ailes, de l'empennage, ... dans la propagation des ondes acoustiques. Le CSTB a mené cette étude aux moyennes et hautes fréquences à l'aide du logiciel Icare, qui permet suite aux travaux de recherche des années précédentes de simuler les effets d'ondes rampantes ("contournement" du fuselage par les ondes) sur des formes courbes précises. La méthode utilisée permet d'obtenir des résultats rapidement tout en tenant compte des caractéristiques directives d'émission de la source. Les résultats obtenus ont été comparés par la Snecma à ceux obtenus avec une méthode d'éléments finis.

#### 4.6 LIFEBC (LIFECYCLE BUILDING CARD)

Partant du constat qu'il est intéressant de combiner l'information technique véhiculée par le BIM avec la richesse de la réalité afin de faciliter les interventions sur site, le projet interCarnot-Fraunhofer LifeBC s'est donné comme objectif de tester le couplage entre la maquette numérique et des dispositifs de réalité augmentée (comme des tablettes et des smartphones) afin de permettre à différents acteurs d'embarquer sur site des données BIM spécifiques à leurs métiers puis de mettre en correspondance ces données BIM avec les images réelles visualisées par la caméra.

Par le biais d'une technologie innovante de reconnaissance dynamique des formes, la tablette ou le smartphone permettent ainsi de visualiser, d'une façon géolocalisée, toutes les données techniques du bâtiment y compris celles relatives aux parties cachées (réseaux électriques, plomberie, couches dans les parois, ...).

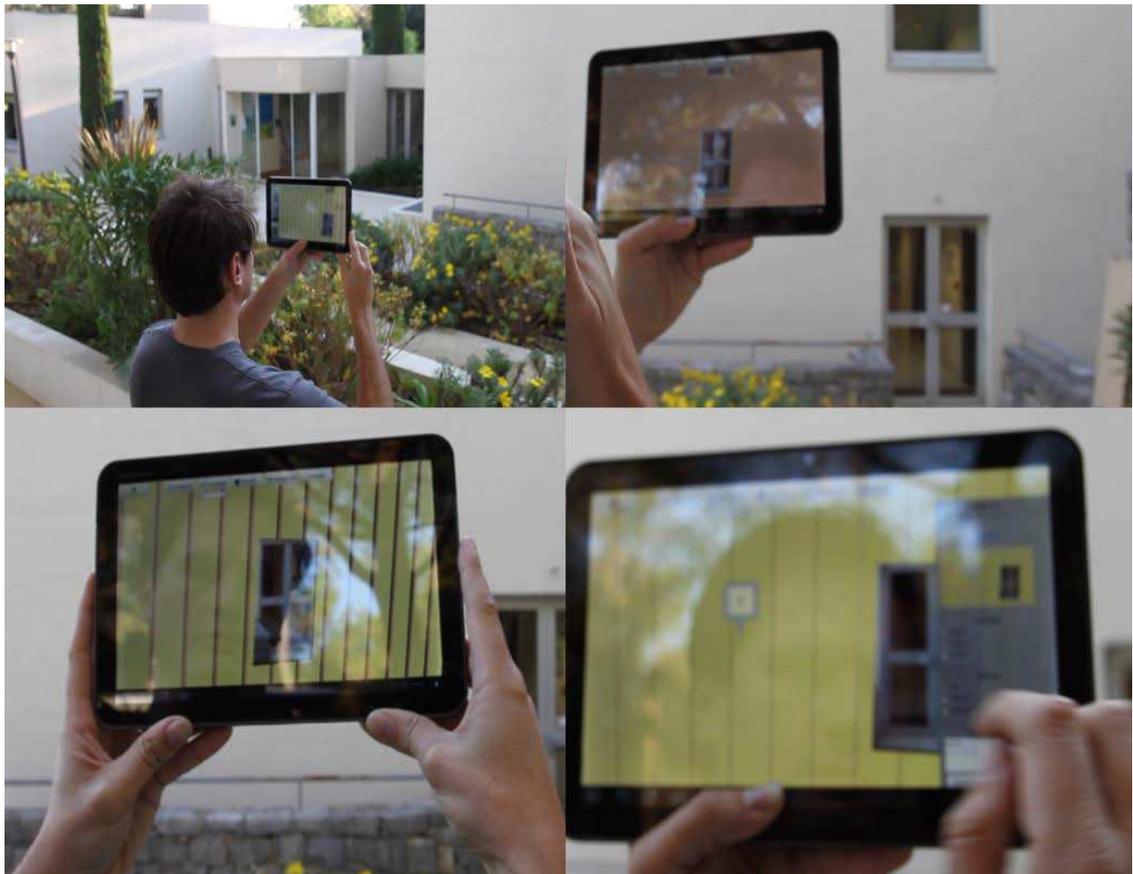
En effet, la réalité augmentée est une technologie prometteuse qui est devenue abordable car elle peut utiliser des dispositifs grand public largement diffusés (tablette / smartphone) dotés maintenant de fonctionnalités avancées (appareil photo haute définition, GPS, inertiel). Ceci permet de déduire la position et l'orientation de la caméra dans le but de corréliser l'environnement réel perçu par la caméra avec l'espace d'information géo-référencée des modèles numériques. Cela est particulièrement pertinent pour les domaines d'application où les modèles 3D sont utilisés dans les processus de planification et d'organisation.



**Figure 7 : Visualisation de la maquette et sélection d'éléments du BIM en réalité augmentée en utilisant un smartphone ou une tablette**

La dissémination du BIM à grande échelle peut clairement être facilitée par l'utilisation de ces systèmes mobiles. Effet, ces systèmes embarquent les données de la maquette BIM, qui non seulement contient l'information 3D géométrique de l'enveloppe mais peut aussi intégrer des données sur les réseaux (plomberie, systèmes électriques, etc.) ainsi que des informations sémantiques (propriétés des matériaux, caractéristiques des systèmes...). Équipé du système mobile, l'utilisateur se promène dans et autour du bâtiment et, tout en capturant le bâtiment avec la caméra, il peut reconstruire un modèle 3D du bâtiment, visualiser les données BIM (par exemple, les couches d'isolation prévues sur les parois) sous la forme de superpositions d'images réelles et numériques. Il peut aussi annoter le modèle de bâtiment 3D et documenter les rénovations prévues. Les données capturées par les dispositifs mobiles sont ensuite transférées au BIM qui intègre le modèle 3D du bâtiment et permet de réaliser différentes simulations (thermique, acoustique etc.) et d'évaluer l'impact environnemental et financier du projet.

Cette technologie avancée a été évaluée sur le bâtiment du CSTB à Sophia Antipolis qui a servi de démonstrateur. Il est utilisé pour illustrer les concepts Life-BC et, dans l'étape suivante, la technologie sera évaluée dans des cas d'utilisation industrielle. À noter que ce projet a reçu le prix du German High Tech Champions en tandem franco-allemand (CSTB et Fraunhofer IGD).



**Figure 8 : Utilisation à l'extérieur du dispositif de Réalité Augmentée pour visualiser la mise en œuvre future d'un système d'ITE (isolation thermique par l'extérieur)**

Ce projet n'a fait que souligner le potentiel que peut apporter l'utilisation des dispositifs mobiles de réalité augmentée couplée avec le BIM. En effet, ces tablettes ont la capacité aujourd'hui d'embarquer les données techniques nécessaires pour un intervenant et de les rendre ainsi disponibles en temps utile et sur site. Couplées à des algorithmes de reconnaissance des formes, elles deviennent de réels dispositifs de réalité augmentée permettant ainsi de combiner images réelles et virtuelles pour une meilleure compréhension des projets. Les applications peuvent concerner aussi bien l'échelle du bâtiment et de ses composants (information sur les différents systèmes, fiche d'intervention, ...) que l'échelle urbaine (insertion de projets dans le site, visualisation des résultats de simulation et de différents indicateurs, ...).

## **5. PERSPECTIVES - INGÉNIERIE CONCOURANTE ET PARTAGE DES INFORMATIONS**

Le contexte d'élaboration des projets de construction se complexifie avec toujours plus d'innovation pour répondre aux enjeux du développement durable tout en intégrant une gestion accrue des risques, un nombre croissant d'intervenants et un cadre réglementaire de plus en plus exigeant. Bien que les innovations technologiques, et en particulier celles liées au numérique, se sont développés d'une façon extrêmement rapide, les méthodes de travail collaboratif, pourtant indispensables à tout processus d'innovation, restent en retrait. Ces méthodes et l'ingénierie concourante qu'elles sous-tendent, permettent d'aller vers un partage des informations de plus en plus efficient entre les acteurs du projet, qu'ils soient professionnels ou représentants de l'usage et citoyens. Ils permettent de créer un processus collaboratif à haute valeur ajoutée entre les acteurs, leurs savoir-faire et leurs outils. Les données numériques à différentes échelles (composant / ouvrage / quartier / ville), qu'elles soient techniques, simulées ou mesurées, ont clairement une position centrale et fédératrice dans ce processus.

Dans ce contexte, les nouvelles orientations visent à mettre plus l'accent sur l'intégrabilité numérique entre domaines, acteurs et outils logiciels, sujet sur lequel le CSTB est clairement attendu. *A contrario*, il peut être envisagé de réduire ou de faire migrer certaines actions sur les méthodes de résolution numérique vers leurs champs d'application.

Les enjeux concernent maintenant clairement un déploiement à grande échelle au sein de la profession. Pour ce faire, 4 freins doivent être étudiés et levés :

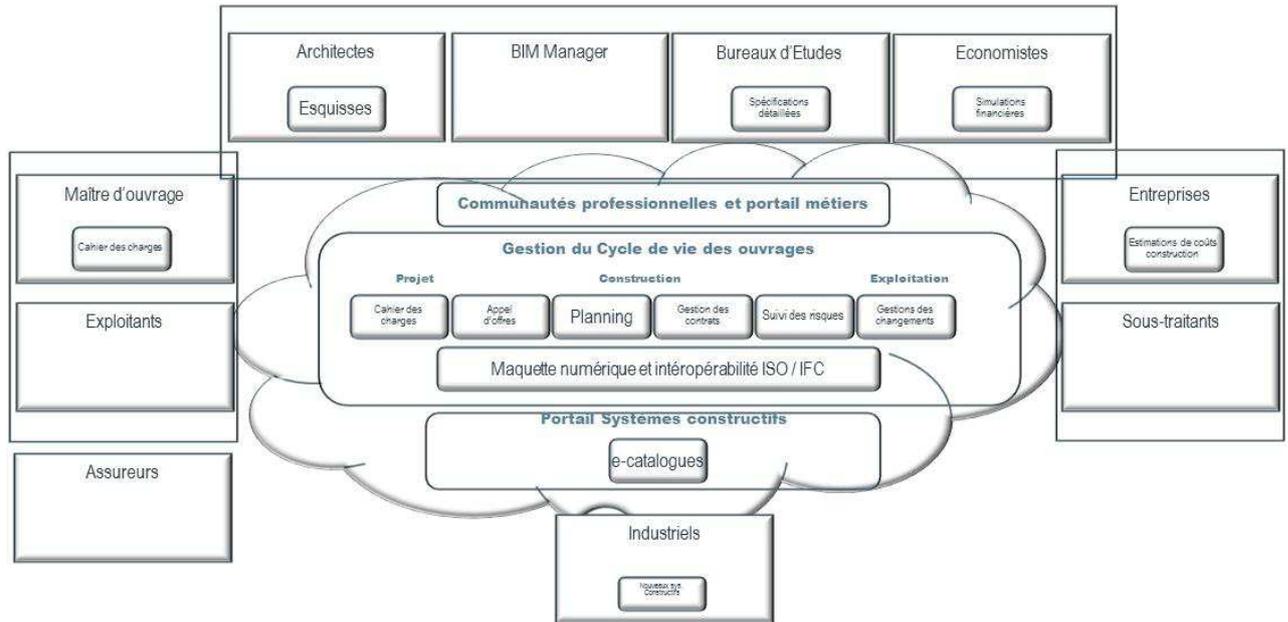
- proposer une infrastructure de travail collaboratif ;
- établir le lien entre la maquette numérique BIM et les catalogues électroniques de composants et de systèmes constructifs ;
- garantir la qualité des échanges électroniques par une procédure de certification des outils logiciels ;
- favoriser le déploiement par des mesures d'accompagnement de la maîtrise d'ouvrage.

## 5.1 INFRASTRUCTURE DE TRAVAIL COLLABORATIF

La construction est un domaine de création d'ouvrages uniques par un ensemble éphémère d'acteurs hétérogènes. En comparaison avec la création de produits manufacturés, la résolution de conflits et la responsabilité de chacun des acteurs jouent ici un rôle décisif. Or, l'utilisation de la maquette numérique BIM « en bloc » (i.e. par échange d'un fichier global) ne correspond que partiellement à la pratique professionnelle de la filière hors contexte particulier (ingénierie intégrée, PPP, ...), car elle interpelle sur différents points (responsabilité juridique, traçabilité, rôle des acteurs, ...). Par conséquent, elle doit être considérée comme une première étape vers une approche basée sur le travail collaboratif PLM (Process Lifecycle Management) et adaptée aux processus métiers des acteurs de la construction. Des travaux sont nécessaires pour l'intégrer à une solution PLM qui permet de répartir les composants du BIM dans une logique métier (par lot, par phase, ...), tout en préservant les droits et les rôles de chacun des acteurs. Trois niveaux de services doivent être traités :

- Un environnement collaboratif, centré sur la maquette numérique interopérable ISO / IFC, permettant de fluidifier et d'accélérer les processus de gestion du cycle de vie d'un ouvrage depuis la phase projet jusqu'à l'exploitation. Il agirait également comme un « coffre-fort » pour gérer et mémoriser, en version, l'ensemble du capital intellectuel lié à l'ouvrage ;
- Un portail permettant de rechercher des systèmes constructifs en fonction de critères, d'accéder à leur description électronique en 3D, de les découvrir, de les comprendre, de les sélectionner et de les simuler ;
- Un environnement pour des échanges plus informels : communautés métiers, profils riches (recherche de compétences), wiki/blog, flux RSS, tableaux de bords métiers, etc.

C'est l'objectif de l'initiative Capitoile démarrée en Octobre 2012 par le CSTB et Saint-Gobain rejoints depuis par Dassault Systèmes (DS). Cette initiative qui, sera probablement rebaptisée « Boost Construction » (en référence au projet « Boost Aéro » déjà mené par DS avec le support de la DGCIS), nécessite un soutien des pouvoirs publics pour en faire un réel projet fédérateur et mobilisateur de l'économie numérique dans le secteur de la construction.



**Figure 9 : Périmètre de l'initiative Capitale**

## 5.2 PORTAIL DE COMPOSANTS ET SYSTÈMES E-CATALOGUES

Il existe actuellement un réel goulet d'étranglement réduisant, d'une façon significative, l'appropriation par le secteur de la construction des solutions constructives innovantes, pourtant indispensables pour atteindre et garantir les performances visées par le Grenelle de l'environnement (consommation d'énergie, impact environnemental, confort, ...).

En effet, bien que les industriels de la construction investissent, souvent de façon substantielle, sur l'innovation et proposent *in fine* des solutions adaptées permettant de répondre aux exigences des bâtiments basse consommation et à énergie positive, ces solutions trouvent rarement leur chemin vers les autres acteurs de la filière de la construction. En analysant les points de blocage, il apparaît clairement que ces solutions innovantes, basées sur des composants et des systèmes de plus en plus complexes, requièrent un niveau de technicité accru dans les phases de prescription et de mise en œuvre. Or, une grande partie des acteurs (maîtrise d'œuvre, négociants, PME, ...) ne disposent pas de cette technicité, ont des difficultés à investir pour l'acquérir et finissent par adopter une posture de *statu quo* qu'ils considèrent comme prudente en continuant à utiliser les solutions traditionnelles qui ont « fait leurs preuves ».

La dissémination de l'innovation dans le secteur de la construction est ainsi bloquée avec des effets néfastes sur les industriels qui ne rentabilisent pas leurs efforts de R&D, mais aussi sur l'ensemble de la filière qui ne profite pas des solutions innovantes pour aborder les nouveaux défis liés à la transition énergétique et améliorer sa compétitivité.

Une approche novatrice pour la diffusion de l'information sur les produits et les systèmes constructifs innovants à l'ensemble des acteurs de la filière paraît indispensable. Elle doit permettre aux industriels de numériser, d'une façon formelle donc exploitable par des outils logiciels, leurs catalogues de produits et de systèmes constructifs en modélisant leurs représentations géométriques, mais aussi leurs logiques d'assemblage et leurs règles d'utilisation (notion de e-catalogues). Des applications dédiées pourront alors émerger afin d'assister le concepteur dans le choix des solutions constructives les plus adaptées à son projet à travers l'interrogation de ces e-catalogues.

Conscients de ces enjeux, certains industriels (par exemple, portail Lafarge Granulats ou Voltimum, portail des fabricants d'électricité : Philips, Legrand, Schneider Electric, Alcatel Câble, ...) ont commencé à mettre en ligne des catalogues électroniques de produits de construction. Ceux-ci ne permettent cependant pas aujourd'hui de passer de la description unitaire des produits à la description des systèmes constructifs, et encore moins d'intégrer directement ces systèmes constructifs dans une maquette numérique décrivant l'ensemble du bâtiment. Or cette intégration dans une maquette numérique de l'ouvrage est primordiale pour assurer la continuité de l'information entre les différents acteurs de la filière et permettre ainsi une évaluation aisée et précise des performances.

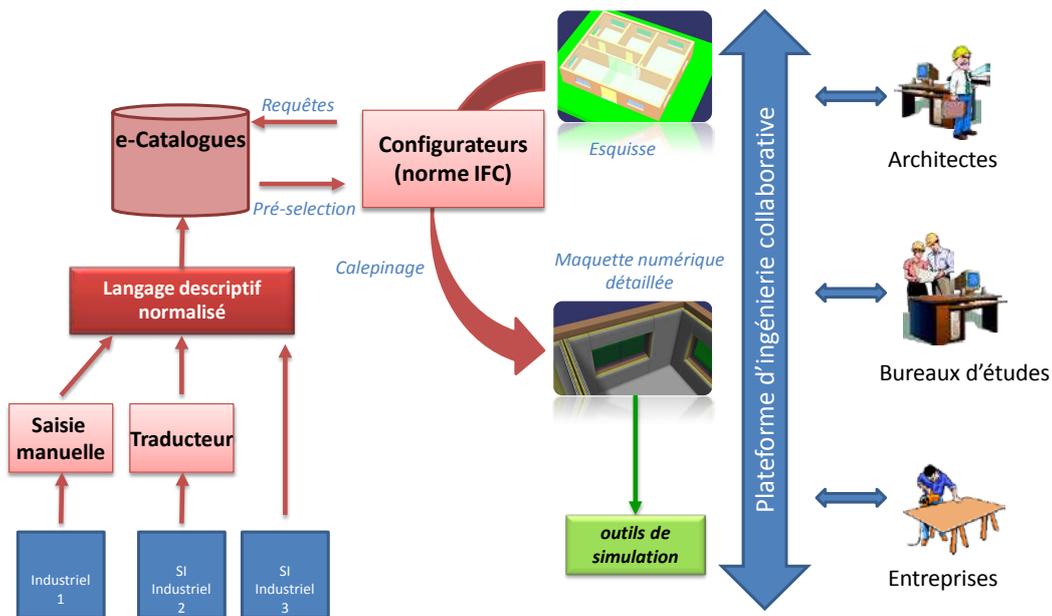
Enfin, il est nécessaire de rassurer l'ensemble des acteurs sur le fait que ces vecteurs nouveaux de diffusion de l'information sur les produits et les systèmes constructifs ne contribuent pas à la mise en place ou au renforcement de position dominante qui pourrait tendre à limiter les choix de conception. Par conséquent, il appartient aux pouvoirs publics de soutenir, au moins dans la phase de lancement, une solution ouverte basée sur l'utilisation des standards et permettant aux concepteurs de mettre en concurrence les solutions préconisées par différents industriels.

Dans ce contexte, il est nécessaire de favoriser l'émergence de ces nouveaux vecteurs de diffusion de l'information sur les produits et les systèmes constructifs à travers le développement des axes thématiques suivants :

- Permettre aux industriels de caractériser, sous une forme numérique exploitable par des logiciels, leurs composants et systèmes constructifs. Cette caractérisation doit être complète et intégrer l'ensemble des caractéristiques nécessaires pour identifier et décrire les items (géométrie, règles de mise en œuvre, logique d'assemblage, performances, données commerciales, ...). On s'attachera pour cet axe thématique à promouvoir :
  - o Le développement ou l'adoption d'un langage descriptif neutre, permettant aux industriels de décrire leurs solutions constructives de manière détaillée en y intégrant les aspects paramétrique, géométrique et technologique. Ce langage devra être développé dans une approche normalisée assurant sa pérennité et son intégration avec la norme IFC, maintenant adopté et en cours de consolidation avec la plupart des éditeurs de logiciels de maquette numérique de la filière (cf. projet BIM 2015 / TIC&PME 2015)

ainsi que son articulation avec les travaux en cours sur les dictionnaires de données techniques (cf. travaux de la commission PPBIM de l'AFNOR),

- o La mise au point d'une base de données ouverte de e-catalogues, portail de référence fourni selon un schéma « on-the-cloud » et permettant aux industriels de déposer, dans le langage descriptif précité, et de rendre visibles leurs solutions (produits et systèmes constructifs), sous une forme permettant ensuite leur intégration dans une maquette numérique IFC de l'ouvrage.



**Figure 10 : Lien entre les e-catalogues et la maquette numérique de l'ouvrage**

- Favoriser le développement d'outils informatiques qui permettent d'assister le prescripteur dans le choix des solutions constructives adaptées à son projet à travers l'interrogation par des requêtes du portail de e-catalogues (notion de configurateurs). Le résultat de ces requêtes sera une présélection des systèmes constructifs adaptés aux contraintes du projet et aux performances visées par le concepteur.

L'ensemble de l'information sur l'ouvrage, y compris la description des composants et des systèmes industriels sélectionnés par le concepteur, doit ensuite être encapsulé dans une maquette numérique du bâtiment, permettant ainsi d'assurer la continuité de l'information entre les acteurs et tout au long du processus de conception / réalisation / exploitation.

On s'attachera à générer automatiquement les détails d'exécution issus du déploiement du système constructif sélectionné dans le projet en gestation en

prenant en compte les règles de mise en œuvre préconisées par l'industriel et les spécificités (géométriques, fonctionnelles, ...) du projet. Ceci permettra au concepteur de générer rapidement et sans erreur une maquette numérique détaillée qui sera ensuite utilisée pour alimenter les outils d'évaluation et de simulation. Ceci représente un réel changement de paradigme puisque le concepteur aura la possibilité d'évaluer, d'une façon précise et très tôt dans le processus de conception, différentes approches constructives sans être freiné par la lourdeur de la saisie manuelle des détails d'exécution.

### **5.3 RENFORCEMENT DES PROCÉDURES DE CERTIFICATION**

Parmi les freins clairement identifiés pour le déploiement à grande échelle de la maquette numérique construction, celui lié au questionnement sur la qualité des échanges entre les acteurs est notable. Pour garantir cette qualité, il est nécessaire de mettre en place une procédure de certification qui vise à améliorer la confiance que les utilisateurs peuvent avoir dans les outils de maquette numérique BIM développés par les différents éditeurs, et ce en garantissant, par une procédure et un label reconnus internationalement, la qualité et la fiabilité des outils métiers. Dans le même temps, cette certification constituera une aide précieuse pour les éditeurs eux-mêmes en guidant leurs investissements dans le sens d'une offre conforme aux normes et aux standards nationaux et internationaux. Cette problématique de la qualité des logiciels a été un thème traité en toile de fond du projet « eXpert / TIC&PME 2010 » qui l'avait mis dans ses conclusions comme préalable indispensable à la future appropriation, par le marché, des technologies liées à la maquette numérique.

On s'attachera à ce niveau à compléter les procédures de certification, initiées dans le cadre du projet actuel « TIC&PME 2015/BIM 2015 », mais qui ne couvrent pas les catalogues des produits de construction, par les volets suivants :

- un suivi des nouvelles initiatives de normalisation autour de la notion de « dictionnaires » permettant de mieux décrire les systèmes et produits de construction (commission PPBIM de l'Afnor, projet « Building Smart Data Dictionary » de Building Smart International) ;
- une procédure visant à assister les industriels des produits et des systèmes constructifs dans la description de leurs solutions via un langage descriptif neutre pour les déposer sur le portail de référence ;
- une procédure visant à assister les éditeurs de logiciels pour faire évoluer leurs interfaces IFC pour pouvoir exploiter ces nouveaux e-catalogues.

### **5.4 MESURES D'ACCOMPAGNEMENT DE LA MAÎTRISE D'OUVRAGE**

L'appropriation de la maquette numérique BIM par la maîtrise d'œuvre et le monde des entreprises est déjà en marche. Il est désormais primordial de

sensibiliser la maîtrise d'ouvrages et les gestionnaires de patrimoine immobilier, qui ont encore une large méconnaissance du sujet, sur les avantages induits par l'utilisation de la maquette numérique dans la gestion du cycle de vie du bâtiment.

A ce sujet, il faut noter l'initiative anglaise visant à accompagner le déploiement de la maquette numérique BIM à travers le levier que représente la maîtrise d'ouvrage publique pour provoquer ensuite un effet d'entraînement de l'ensemble de la filière.

En effet, le 31 mai 2011, le Cabinet du gouvernement anglais a annoncé officiellement sa nouvelle stratégie pour le secteur de la construction. L'objectif global de cette initiative gouvernementale est de réduire le coût de construction des projets de 20 % et de réduire l'empreinte carbone du Royaume-Uni afin d'être en ligne avec ses engagements carbone envers la CEE. Dans ce contexte, le rapport a annoncé officiellement l'intention du gouvernement britannique de requérir un BIM 3D collaboratif (avec toutes les informations du projet et son contenu, incluant documentation et données électroniques) pour tous les projets publics dès 2016. La priorité initiale est la partie conception-construction du cycle de vie d'un projet, mais le gouvernement a insisté en disant que « les 20 % d'économie correspondent aux économies liées au capital d'investissement, cependant, nous savons que la plus grosse économie réalisée grâce au BIM se situe dans la partie gestion et maintenance du cycle de vie du projet ».

La décision du gouvernement britannique d'adopter le BIM s'est appuyée sur un rapport du groupe de travail Industrie mandaté par le département pour l'Industrie, l'innovation et les compétences. Le rapport contient un plan de déploiement suggéré et une stratégie pour permettre l'utilisation progressive du BIM dans les programmes de construction publique ainsi qu'un cadre pour les modes d'appels d'offres et de livraisons standards.

La démarche du gouvernement britannique, qui agit ainsi non pas en tant que législateur mais comme un maître d'ouvrage informé et conscient des enjeux, permet d'organiser une demande significative (et non pas un marché de niche) et pérenne. Ceci rassure les fournisseurs de technologie et les acteurs de la filière qui s'organisent pour répondre à la demande et c'est effectivement ce qui se passe actuellement.

Sans vouloir faire de mimétisme, l'exemple anglais mérite d'être suivi de près. La constitution d'un groupe de travail permettant d'examiner de près cette initiative, d'analyser ses points forts et ses éventuelles lacunes et d'en tirer des enseignements paraît tout à fait pertinente.

## 6. PROJETS À POURSUIVRE

Enfin, parmi les projets déjà lancés et qui doivent être poursuivis durant la période 2014-2017, on peut citer ceux qui concernent :

- **Composants et systèmes BIM e-catalogues** Avec la mise en place de catalogues de produits et de systèmes industriels « on the cloud » permettant aux concepteurs de faire leurs choix de prescription et de les appliquer sur leurs projets à travers l'intégration des systèmes constructifs, véhiculant les détails d'exécution, dans la maquette numérique BIM. La maquette numérique ainsi enrichie devient un élément d'information central pour l'ensemble des acteurs reproduisant fidèlement la complexité de la réalité constructive.

Pour ce faire, un travail sur la structuration des données techniques, suivi d'un effort de normalisation doit être entrepris. Il s'agit de proposer un formalisme générique permettant aux industriels de décrire numériquement leurs catalogues de produits et de systèmes constructifs.

- **Simulations multi-physiques.** Dans la continuité du projet Simbio 2.0, l'approche multi-physique pour la conception et la rénovation des bâtiments, qui est l'un des enjeux majeurs des années à venir, doit être poursuivie. En effet, pour faire face au défi climatique, les réglementations thermiques se font de plus en plus exigeantes. Dans la grande majorité des cas, le confort acoustique et visuel ainsi que l'impact sur l'environnement et sur la qualité de l'air intérieur lié aux matériaux de constructions deviennent des critères secondaires alors qu'ils peuvent avoir un impact non négligeable sur la santé humaine. Les pouvoirs publics ont déjà la volonté de fusionner les aspects énergétiques et environnementaux dès la prochaine réglementation RT2020. De plus, les problèmes de qualité d'air intérieur commencent à être pris en compte aux travers des étiquettes d'émissivité des polluants sur les produits de construction. Dans ce cadre, le CSTB se doit d'être prêt à proposer des méthodologies permettant une approche multi-physiques et pluridisciplinaire du bâtiment.
- **Information urbaine.** Ce projet doit poursuivre ses efforts de développement afin de renforcer l'offre au-delà des domaines étudiés initialement que sont le couplage trafic/nuisances acoustiques.

Dans le but de diminuer les temps de saisie et de paramétrage d'un projet, il est essentiel de placer l'effort de développement sur l'interopérabilité des outils. Ceci nécessite de généraliser les modèles SIG afin d'y intégrer la possibilité d'y inclure des représentations 3D texturées, ainsi que des passerelles d'échange standardisée depuis le format CityGML vers les entrées et sortie des outils métiers. Ces travaux doivent être réalisés en co-programmation avec l'IGN.

Dans ce contexte, les travaux sur la sémantisation des bâtiments existants doivent être poursuivis dans le cadre de la co-programmation Imagine avec l'ENPC et au-delà (collaboration avec l'IGN, les membres du RST, ...). En

effet, il existe un réel besoin de produire des maquettes numériques sémantisées à plusieurs échelles (bâtiment / quartier / ville) pour alimenter ensuite différents outils d'évaluation et de simulation. Les travaux à venir devront mettre l'accent sur l'adéquation entre le niveau de détails du maillage produit et les besoins en termes de simulation. En effet, il n'est pas nécessaire de produire des maillages très fins si les phénomènes physiques observés ou les outils utilisés n'ont pas besoin de cette précision. Il s'agira donc d'utiliser des techniques de reconnaissance des primitives géométriques pour produire le maillage avec le niveau de détails adapté. Cela permet ensuite, et en se basant sur d'une part les travaux sur la morphologie urbaine et, d'autre part, sur le référentiel de bâtiments types, de produire une maquette numérique « simulable » du cadre bâti au sens où elle reproduit les caractéristiques du parc existant sans pour autant véhiculer toute la complexité, ce qui en fait un réel outil d'aide à la décision permettant d'éclairer et d'accompagner les orientations stratégiques et politiques. Le développement d'une offre basée sur cette approche permettra ensuite de répondre aux besoins des collectivités territoriales, des aménageurs, des gestionnaires et des pouvoirs publics.

## PUBLICATIONS

### ARTICLES DE REVUE AVEC COMITÉ DE LECTURE ET D'AUDIENCE INTERNATIONALE

1. BOULCH, S., HOUILLIER, R., MARLET, R., TOURNAIRE, O., Semantizing Complex 3D Scenes using Constrained Attributes Grammars. *Computer Graphics Forum*, 32(5): 33-42, 2013
2. BOULCH, S., ET MARLET, R., Fast normals estimation for point clouds with sharp features using a robust randomized hough transform. *COMPUTER GRAPHCS FORUM*, 31(5): 1765-1774, 2012
3. VU, H.H., LABATTUT, P., PONS, J.P., KERIVEN, R., High Accuracy and Visibility-Consistent Dense Multiview Stereo. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 34(5):889-901, 2012
4. ALLÈNE, C., AUDIBERT, M., COURPIE, M., KERIVEN, R., Some links between extremum spanning forests, watersheds and min-cuts. *Image and Vision Computing*, 28(10): 1460-1471, 2010
5. LAFARGE, F., KERIVEN, R., et BRÉDIF, M., Insertion of 3D-Primitives in Mesh-Based Representation: Towards Compact Models Preserving the Details. *IEEE Transactions on Image Processing*, 19(7): 1683-1694, 2010
6. PEYRÉ, G., PÉCHAUD, M., KERIVEN, R., COHEN, L., Geodesic Methods in Computer Vision and Graphics. *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, 5(3-4):197-397, 2010
7. LABATTUT, P., PONS, J.P., KERIVEN, R., Robust and Efficient Surface Reconstruction from Range Data. *Computer Graphics Forum*, 28(8): 2275-2290, 2009

### CONFÉRENCES AVEC ACTES

1. MOULON, P., MONASSE, P., MARLET, R., Adaptative Structure from Motion with a contrario model estimation. *ACCV 2012 – Proceedings of the 11th Asian Conference on Computer Vision, Lectures Notes in Computer Science*, vol. 7727, p. 257-270, 2012
2. OK, D., KOZINSKI, M., MARLET, R., PARAGIOS, N., High-Level Bottom-Up Cues for Top-Down Parsinf of Façade Images. *3DIMPVT – Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Joint 3DIM/3DPVT Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission*, 2012
3. OK, D., MARLET, R., AUDIBERT, J.Y., Efficient and Scalable 4<sup>th</sup> Order Match Propagation. *ACCV 2012 – Proceedings of the 11<sup>th</sup> Asian conference*

- on Computer Vision, Lectures Notes on Computer Science, vol. 7724, p. 460-473, 2012.
4. TOURNAIRE, O., PONS, J.P. KERIVEN, R., SOUBRA, S., Modélisation 3D Urbaine Automatique par Photogrammétrie Haute Résolution. Colloque du GIS Modélisation Urbaine « La Modélisation de la Ville : du Modèle au Projet Urbain », 2011
  5. LAFARGE, F., KERIVEN, R., BRÉDIF, M., VU, H.H., Hybrid multi-view reconstruction by Jump-Diffusion. CVPR 2010, 23<sup>rd</sup> IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, p. 350-357, 2010
  6. CHAUVE, AL., LABATUT, P., PONS, J.P., Robust piecewise-planar 3D reconstruction and completion from large-scale unstructured point data. CVPR 2010, 23<sup>rd</sup> IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, p. 1261-1268, 2010
  7. CHAUVE, AL., PONS, J.P., AUDIBERT, J.Y., KERIVEN, R., Transductive Segmentation of Textured Meshes. 9th Asian conference on Computer Vision (ACCV 2009), vol. 5995 de Lecture notes in Computer Science, p. 1261-513, 2010
  8. DALALYAN, KERIVEN, R., Sparse learning approach to the problem of robust estimation of camera locations. ICCV – IEEE 12<sup>th</sup> International Conference on Computer Vision Workshops, p. 436-443, 2009
  9. LABATUT, P., PONS, J.P., KERIVEN, R., Hierarchical shape-based surface reconstruction for dense multi-view stereo. IEEE 12<sup>th</sup> International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), p. 1598-1605, 2009
  10. LAFARGE F., KERIVEN, R., BRÉDIF, M., Combining meshes and geometric primitives for accurate and semantic modeling. BMVC – British Machine Vision Conference, p. 38.1-38.11, 2009
  11. VU, H.H., KERIVEN, R., LABATUT, P., PONS, J.P., Towards a high-resolution large-scale multi-view stereo. CVPR – Proceedings of Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, p. 1430-1437, 2009
  12. JANK, Z., PONS, J.P., Spatio-Temporal Image-Based Texture Atlases for Dynamic 3D Models. IEEE International Workshop on 3D Digital Imaging and Modeling, 2009
  13. CHARIOT, KERIVEN, R., GPU-boosted online image matching. ICPR – 19<sup>th</sup> International conference on Pattern Recognition, p. 1-4, 2008
  14. PONS, J.P., SOUBRA, S., 3D Reconstruction of large scale city models as a support to sustainable development. *Cooperative Design, Visualization and Engineering*, p. 172-175, 2008

**AUTRES PUBLICATIONS**

1. NOÉ, N., GAUDAIRE, F., DIARRA BOUSSO LO, M., Estimating and Reducing Uncertainties in Ray-Tracing Techniques for Electromagnetic Field Exposure in Urban Areas. Proc. of IEEE Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications, 2013, Torino; IT
2. DEMOUGE, F., FAURE, X., Natural Ventilation Design for Low-Rise Building : Comparison between a Nodal Model and Wind Tunnel Tests. Building Simulation, 2013, Chambéry, FR
3. FAURE, F., DEMOUGE, F., «ensitivity analysis on the definition of wind driven natural ventilation potential. Building simulation, 2013, Chambéry, FR
4. HUOVILA P., ANTUNA-ROZADO C., SOUBRA S., TRINIUS W., ECOBIM, Value driven life cycle based sustainable business models. Sustainable Building 2013, Implementing sustainability: barriers and chance, April 24-26, 2013, Munich, DEU.
5. MAILLARD J., JAGLA J., Auralisation du bruit des transports terrestres en milieu urbain. Acoustique et Technique, 2012
6. SOUBRA S., HUOVILA P., HYVARINEN J., PALOS S., FIES B., LEBEGUE E., Linking IFCS and BIM to sustainability assessment of buildings. CIB W78 29th International conference on the Applications of IT in the AEC Industry, October 17-19, 2012, Beyrouth, LBN
7. GAUDAIRE, F., NOE, N., DUFOUR, J.B., DE SEZE, R., 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, 5, Décembre 2012
8. JAGLA, J., MAILLARD, J., Method of analyzing and synthesizing engine noise, its use and associated system, Patent WO 2012/143659, 2012
9. JAGLA J., MAILLARD J., MARTIN N., Sample-based engine noise synthesis using a harmonic synchronous overlap-and-add method. Proc. of IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing, 2012, 373-376
10. MAILLARD J., JAGLA J., Auralization of non-stationary traffic noise using sample based synthesis - Comparison with pass-by recordings. Proc. of Internoise 2012, New York City, New York
11. KAHN S., OLBRICH M., ENGELKE T., KEIL J., RIESS P., WEBEL S., GRAF H., BOCKHOLT U., PICINBONO G., Beyond 3D "as-built" information using mobile AR enhancing the building lifecycle management. Cyberworlds 2012, Proceedings of the 2012 International conference on Cyberworlds,

September 25–27, 2012, Darmstadt, DEU, IEEE Computer Society Conference Publishing Services, 2012, p. 29-36 [ISBN 978-0-7695-4814-2] [doi:10.1109/CW.2012.12]

12. SOULA J., LECLERCQ L., MAILLARD J., VAN-MAERCCKE D., ZIBOUCHE K., Couplage de simulations environnementales au sein d'une maquette numérique urbaine. Colloque « La modélisation de la ville : du modèle au projet urbain », Ecole des Ponts Paris Tech, Marne La Vallée. 23-24 février 2011
13. GRAF H., SOUBRA S., PICINBONO G., KEOUGH I., TESSIER A., KHAN A., Lifecycle building card : toward paperless and visual lifecycle management tools. SimAUD 2011, Proceedings of the 2011 Symposium on simulation for architecture and urban design, April 4-7, 2011, Boston, MA, USA
14. SOUBRA S., HANS J., PICINBONO G., Information modeling and simulation to support sustainable construction. CIB W078–W102 2011 Conference "Computer knowledge building", October 26-28, 2011, Sophia-Antipolis, FRA
15. CORMIER, A., ROBERT, S., ROGER, P., HILAIRE, B., Towards a BIM-based service-oriented platform for a collaborative multidisciplinary teamwork. CIB W078–W102 2011 Conference "Computer knowledge building", October 26-28, 2011, Sophia-Antipolis, FRA
16. DEMOUGE, F., LE ROUX, N., et FAURE, X., Numerical Validation for Wind Driven Ventilation Design. 32nd AIVC Conference, Brussels, BEL, 2011
17. FAURE, X., et LE ROUX, N., "On the potential of wind-driven ventilation for dwellings and low rise buildings," Roomvent 2011 - Trondheim, NOR, 2011
18. NOÉ, N., GAUDAIRE, F., 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, TUR, 2011
19. OLBRICH M., GRAF H., KAHN S., ENGELKE T., KEIL J., RIESS P., WEBEL S., BOCKHOLT U., PICINBONO G., Augmented reality supporting user-centric building information management. The visual computer, 29/10/2013
20. SOUBRA, S., Combining 3D models and simulations to meet the design challenges of the twenty-first century. in Collaborative Construction Information Management, Taylor & Francis, 2009 [ISBN 13: 978-0- 415-48422-0]

**THÈSES**

1. OK, D., Mise en correspondance Robuste et Détection d'Eléments Visuel Appliquées à l'Analyse de Façades. Thèse de Doctorat, Université Paris-Est, 2011
2. VU, H.H., Large-scale and high-quality multi-view stereo. Thèse de Doctorat, Université Paris-Est, 2011

**RAPPORTS DE RECHERCHE**

1. BELZITI D., CHAUVE A., Boîte à outils R&D CSTB pour l'évaluation intégrée des opérations d'aménagement urbain durable. Rapport final de la tâche 4 du projet de recherche « Evaluation des projets Urbains », CSTB/TIDS, Janvier 2013
1. BAILLY E., DURET H., TUAL M. Quels apports des maquettes numériques urbaines dans les projets urbains durables ? Tâche 1 du projet de recherche « Ville Numérique », CSTB/DESH, Mai 2013
2. CARRE S., Incertitudes associées à l'usage de sources surfaciques équivalentes. Rapport CSTB EN-ECL 13.07.L, 2013
3. DEMOUGE F., FAURE X., MATHIS : modèles physiques et guide de l'utilisateur. Rapport CSTB n°EN-CAPE-190-L-V0, 2013
4. DEMOUGE F., FAURE X., PIRIOU J., Confrontation des logiciels MATHIS et SIREN. Rapport CSTB n° EN-CAPE-189-L-V0,2013
5. FERY R., LAHRECH SRUN A., 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, 2013
6. HAAS B., TIJANI, K., GAY C., Méthodes d'études de sensibilité : Application à COMETH. Rapport CSTB, 2013
7. NOE N., Prise en compte de la réflexion par la façade pour un récepteur situé justement en façade. Rapport CSTB n°EN-DSC/2<sup>E</sup> 13.01.R, 2013
8. NOE N., 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<sup>E</sup> 13.02.R, 2013
9. NOE N., Réduction de l'incertitude dans l'estimation du point chaud d'exposition aux ondes électromagnétiques Rapport CSTB n°EN-DSC/2<sup>E</sup> 13.03.R, 2013

10. SOULA J., Maquette Numérique Urbaine : Etat des lieux et perspectives face au marché. Projet de recherche « Ville Numérique », CSTB/TIDS. MOD-EVE-12-187-RE, Mai 2013
11. SOULA J., Maquette Numérique Urbaine : Spécifications fonctionnelles pour eveCity 3.0. Projet de recherche « Ville Numérique », CSTB/TIDS, MOD-EVE-13-048-RE, Mai 2013
12. TOURNAIRE O., Données et couplages moteurs externes - CityGML. Projet de recherche « Ville Numérique », CSTB/TIDS, Octobre 2013
13. AGUINAGA, S., Simulation Numérique des Souffleries du CSTB Nantes. Rapport CSTB n°EN-CAPE 11-253 L-V0, 2012
14. BAILLY E., DURET H., Cahier des charges ville Développement Durable. Plateforme interactive 3D pour la co-conception d'un projet de renouvellement urbain durable. Projet de recherche « Ville Numérique », CSTB/DESH, Septembre 2012
15. SIRARA, J., Simulation Numérique des Souffleries du CSTB Nantes. Rapport CSTB EN-CAPE 12.078 R-V0, 2012
16. DANBON, F. PATRUNO, L., Code IFS - appropriation par CAPE, Développements et validations complémentaires sur un tablier de pont. Rapport CSTB n°EN-CAPE 13.008 L-V0, 2012
17. LECLERCQ L., SOULA J., Impact et modélisation du trafic urbain au sein des maquettes numériques. Prototype et scénarios d'utilisation. Rapport final de l'action de recherche, CSTB/TIDS, Février 2010
18. AUGISEAU V., BELZITI D., BONETTO R., Plateforme d'intégration logicielle. Rapport final de la tâche 4 du projet de recherche « Evaluation des projets urbains », CSTB/TIDS, Novembre 2011
19. GUILHOT, J., Recalage climatique par simulation numérique - Comparaisons des approches Fluent, OpenFOAM et TopoWind. Rapport CSTB n°EN-CAPE 11-069-L-V1, 2011
20. GUILHOT, J., 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
21. LECLERCQ L., BECARIE C., SOULA J., Maquette Numérique Urbaine : modèles, réseaux et simulation de trafic. Rapport final de l'action de recherche « Maquette Numérique Urbaine », CSTB/TIDS, Avril 2010

**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)

**CSTB**  
*le futur en construction*

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