



**HAL**  
open science

## Projet Ville Numérique : rapport final

Julien Soula, Michel Andre, Ludovic Leclercq, Katia Chancibault, D Schertzer, Grégoire Pigeon

### ► To cite this version:

Julien Soula, Michel Andre, Ludovic Leclercq, Katia Chancibault, D Schertzer, et al.. Projet Ville Numérique : rapport final. [Rapport de recherche] IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. 2013, 45 p. hal-01436689v2

**HAL Id: hal-01436689**

**<https://hal.science/hal-01436689v2>**

Submitted on 23 Mar 2017

**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.

# Projet Ville Numérique

## Rapport final

Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie

Subvention n° 09 AST CV 001



Rapport final du projet Ville Numérique

**Coordination et compilation** : Julien Soula



## Sommaire

Sommaire .....	2
1. Introduction et vie du projet .....	4
1.1. Présentation et objectifs initiaux .....	4
1.2. Chiffres clés .....	4
1.3. Vie du projet .....	4
1. Axe « Production de modèles 3D urbains à faible coût » .....	5
1.1. Volet « Acquisition de données » .....	5
1.1.1. Mise en place d'un système d'acquisition d'images haute résolution .....	5
1.1.2. Réflexion sur la cartographie tridimensionnelle des réseaux souterrains en ville .....	8
1.2. Traitement de données .....	11
1.2.1. Recalage de données multi sources pour la modélisation 3D urbaine dense .....	11
1.2.2. Sémantisation des modèles 3D urbains .....	12
1.2.3. Extraction de routes 3D .....	15
1.2.4. Génération de maillages à partir de modèles 3D urbains .....	17
2. Axe « Couplage des phénomènes physiques » .....	19
2.1. Couplage "Trafic / nuisances" .....	19
2.1.1. Interfaçage des codes de simulation de trafic. ....	19
2.1.2. Modélisation de la pollution atmosphérique liée à la circulation automobile en zone urbaine ....	21
2.1.3. Évaluation des nuisances sonores liées au trafic en milieu urbain .....	23
2.2. Couplage "hydrologie de surface / bilan énergétique urbain" .....	26
2.2.1. Modélisation et paramétrisation hydrologique de la ville (long-terme et échelle de la ville) .....	26
2.2.2. Approche hydrologique de la ville multi-échelle (court-terme et échelles fines) .....	29
2.3. Couplage « météorologie / climat / demande énergétique » .....	32
2.3.1. Amélioration du fonctionnement énergétique du modèle de climat urbain TEB .....	32
3. Axe « Interopérabilité » .....	35
3.1. Echelles spatiales et temporelles .....	35
3.1.1. Réflexion méthodologique .....	35
3.1.2. Étude des problèmes de compatibilité entre les différentes formes de représentation du trafic aux différentes échelles urbaines .....	36
3.1.3. Interfaçage entre bases de données IGN et modèle météorologique .....	39
4. Valorisation .....	41



4.1.	Transfert technologique vers l'opérationnel .....	41
4.2.	La charte Ville Numérique .....	41
4.3.	Séminaire de restitution du 11/09/2013 .....	42
5.	Bilan et perspectives .....	44

Le présent rapport compile les principaux résultats **scientifiques** des tâches du projet au sein de synthèses demandées aux responsables des tâches. Il permet une lecture rapide des avancées réalisées en 4 ans, avec la possibilité de se référer aux livrables pour entrer dans les précisions des travaux effectués. Pour les financements engagés et les autres informations, se référer au tableau Excel fourni avec les livrables.

## 1. Introduction et vie du projet

### 1.1. Présentation et objectifs initiaux

Lancé fin 2009 par le ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement (MEDDTL, aujourd'hui le Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie ou MEDDE), et piloté par le Centre scientifique et technique du Bâtiment (CSTB), le projet « Ville Numérique » a réuni 12 équipes de recherche de stature internationale aux compétences uniques, appartenant aux 5 établissements du Réseau scientifique et technique du Ministère du Développement Durable suivants : le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), l'École des Ponts ParisTech (ENPC), l'Institut National de l'information Géographique et forestière (IGN), l'Institut français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR) et Météo France.

« Ville numérique » avait pour but d'étudier et de développer différents éléments constitutifs d'une plateforme de simulation intégrée de la ville, en fédérant la grande diversité des expertises complémentaires de ces organismes (traitement d'images, traitement géométrique, formats d'échange de données, SIG3D, génération de maillages, calcul scientifique, architecture logicielle, visualisation scientifique).

Cette plateforme ayant vocation à devenir un outil d'évaluation environnementale multicritères de projets d'aménagements urbains, le projet visait donc à développer des indicateurs environnementaux fiables et **interopérables**, à partir de l'étude de phénomènes physiques de la ville tels que le trafic, l'acoustique, l'aérodynamique, l'hydrologie, et la météorologie : Consommation énergétique, rejets de gaz à effet de serre, qualité de l'air, mobilité, bruit, flux d'eau et de polluants...

Le projet visait en outre à lever les verrous, en particulier techniques, pour la mise en œuvre de plateformes informatiques permettant l'intégration des différents outils de gestion, de pilotage et de modélisation utilisés par les acteurs des territoires, notamment urbains. Cela implique notamment l'interopérabilité des modèles mathématiques et des outils informatiques, faisant émerger des interfaces concrètes entre partenaires, aussi bien au niveau scientifique que logiciel. Des fonctionnalités de réalité virtuelle sont également mises en œuvre, afin de visualiser et intégrer aisément les résultats dans un environnement 3D immersif.

### 1.2. Chiffres clés

- ⇒ 4 ans. 915k€ d'enveloppe globale dont 530k€ financés par le CGDD/DRI du MEDDE.
- ⇒ 4 thèses, 5 postdocs, 2 CDD niveau Master
- ⇒ + d'une quinzaine de publications en relation avec les travaux de recherche
- ⇒ Plus d'une dizaine d'évènements (conférences, séminaires, présentations...)
- ⇒ 3 projets ANR initiés suite à des réflexions du consortium Ville Numérique : ANR TrafiPollu (2011), ANR EUREQUA (2011), ANR SEMAPOLIS (2013). Participation aux ANR VEGDUD, MUSCADE...

### 1.3. Vie du projet

Plusieurs portages ont été modifiés au cours des 4 années de projet : **Jean-Philippe Pons**, premier coordinateur a été remplacé par **Julien Soula** en 2010 lorsqu'il a lancé la société Acute3D (valorisant ainsi une partie des recherches sur l'acquisition 3D). Quelques changements de responsabilités de tâches ont été observés, dus essentiellement à des réorganisations internes ou des changements de fonctions. Elles sont indiquées dans le tableau général des livrables. En janvier 2011, la fusion entre l'INRETS et le LCPC pour former l'IFSTTAR a d'ailleurs réduit structurellement le nombre d'organismes à 5 au lieu de 6.

Enfin, quelques modifications d'ordre scientifique ont donné lieu à la réalisation d'un avenant (fourni avec les livrables) à l'annexe scientifique modifiant les tâches 1.1.1, 1.1.2 et 2.2. Des précisions seront données dans les tâches correspondantes.

## 1. Axe « Production de modèles 3D urbains à faible coût »

L'un des objectifs majeurs du projet était de concevoir et de développer des technologies de production automatique de modèles 3D urbains sémantisés de haute précision à partir d'images aériennes et terrestres.

### 1.1. Volet « Acquisition de données »

#### 1.1.1. Mise en place d'un système d'acquisition d'images haute résolution

##### *Partenariat et chercheurs ayant participé aux travaux*

**Responsable** : Renaud Marlet (ENPC-IMAGINE) depuis 2011 (départ de Renaud Keriven pour Acute3D)

Le travail a impliqué deux organismes, l'ENPC et le CSTB, déjà réunis depuis janvier 2009 dans une équipe de recherche commune (IMAGINE) bi-localisée, à Marne-la-Vallée et à Sophia Antipolis. Les échanges pour cette tâche se sont donc inscrits naturellement dans la dynamique d'équipe déjà en place, avec des outils standards de partage de code et de travail collaboratif (SVN), et des formats de données standard également (images, scans laser). Les chercheurs ayant directement participé aux travaux sur cette tâche sont les suivants.

- ⇒ Martin de La Gorce (ENPC/IMAGINE), chercheur sur financement Bouygues
- ⇒ Renaud Keriven (ENPC/IMAGINE), chercheur permanent
- ⇒ Renaud Marlet (ENPC/IMAGINE), chercheur permanent
- ⇒ Pascal Monasse (ENPC/IMAGINE), chercheur permanent
- ⇒ Jean-Philippe Pons (CSTB/IMAGINE), chercheur permanent
- ⇒ Olivier Tournaire (CSTB/IMAGINE), chercheur permanent

Les chercheurs qui ont déjà bénéficié des productions de cette tâche (données acquises) sont les suivants :

- ⇒ Alexandre Boulc'h (ENPC/IMAGINE), doctorant
- ⇒ Hoang-Hiep Vu (ENPC/IMAGINE), doctorant

##### *Contexte et évolution des objectifs*

Le projet Ville Numérique prévoyait le financement partiel d'une sphère de capture d'images omnidirectionnelle (voir ci-contre), composée d'une trentaine d'appareils photographiques de haute résolution, pouvant être aéroportée ou fichée sur un mât dans un véhicule terrestre. La sphère complète devait faire l'objet d'un livrable, accompagnée d'un jeu de données photographiques très basse altitude réalisé à l'aide de la sphère sur un site expérimental.

Mais le projet Ville Numérique a démarré officiellement avec un important retard. Pour assurer la cohérence d'ensemble du système complet à construire, et pour mener à bien les campagnes d'acquisition programmées, l'achat du complément de sphère dû être réglé sur les fonds propres du laboratoire avant le début officiel du projet, donc avant délai pour être effectivement facturable sur le projet.



Figure 1: La sphère de capture démontée



Figure 2: Exemple de la mise en œuvre terrestre ou aérienne de la sphère et des résultats obtenus sur Cluny

Par ailleurs, l'équipe IMAGINE travaille depuis plusieurs années sur des données issues de scans laser, plus précis que la photogrammétrie, mais aussi plus coûteux et moins flexibles — en fait complémentaire de la photographie. Cependant, IMAGINE ne disposait pas de son propre dispositif d'acquisition. Elle était tributaire des rares sources disponibles et ne pouvait réaliser ses propres expériences en grandeur réelle. Il était envisagé, hors Ville Numérique, qu'IMAGINE se dote d'un scanner laser pour disposer de moyens propres d'acquisition de nuages de points 3D. Mais les fonds du laboratoire ont été utilisés pour l'achat du complément de matériel photographique pour la sphère, plus prioritaire à l'époque. De ce fait, les expériences avec des données laser ont dû être réalisées avec des données non maîtrisées qui pouvaient être disponibles, ou avec des scans laser simulés à partir de maquettes numériques de bâtiments (Building Information Model).

Pour remédier à cela et contribuer au projet Ville Numérique, un **avenant** au contrat a été signé, qui a remplacé la réalisation de la sphère photographique par l'achat d'un scanner laser, de coût équivalent. Comme indiqué ci-dessus, ce dispositif laser est en fait complémentaire de la sphère photographique.

### Résultats principaux et valorisation

La sphère photographique omnidirectionnelle a été réalisée, et des images ont été acquises sur 3 sites d'expérimentation :

- ⇒ dans les rues de Cluny (3 jours de campagne au sol dans un véhicule électrique),
- ⇒ au-dessus de la vallée de Chamonix (30 mn en vol et une demi-journée au sol),
- ⇒ au-dessus de Cagnes-sur-Mer (dans le cadre d'un contrat du CSTB).



**Figure 3: Acquisition avec le scanner laser FARO Focus 120 au pied du bâtiment Coriolis (nouveaux locaux du laboratoire IMAGINE) à Champs sur Marne**

Ces images ont permis d'étudier le problème de passage à l'échelle des techniques de reconstructions 3D. Des solutions opérationnelles à ce problème sont présentées dans la thèse de Hoang-Hiep Vu (2011). Les reconstructions effectuées ont aussi servi de vitrine lors de la création de start-up Acute3D (2011), issue d'IMAGINE, qui valorise la technologie de reconstruction 3D.

Le scanner laser permet pour sa part de poursuivre sur des données réelles des travaux amorcés sur des données synthétiques [Boulc'h et al. 2013], pour la production de maquettes numériques de bâtiments sémantisés. Cependant, les premiers résultats publiés sont attendus après la fin du projet Ville Numérique, notamment du fait de l'achat tardif du matériel.



## Livrables

Les livrables initialement prévus dans le contrat étaient la sphère photographique et un jeu de données photographiques très basse altitude réalisé à l'aide de la sphère sur un site expérimental. L'avenant au contrat les remplace par le scanner laser et un jeu de données sur un site expérimental en 2013. Nous avons choisi de livrer l'ensemble. Les livrables sont donc les suivants.

- ⇒ [1.1.1-L0] Livrable initial décrivant l'utilisation de la sphère (livré à mi-projet)
- ⇒ [1.1.1-L1] Le matériel (scanner laser et sphère photographique) est visible sur demande dans les locaux de l'ENPC.
- ⇒ [1.1.1-L2] Les données étant vraiment très volumineuses (près de 0,8 To, soit 1200 CD-ROM ou 170 DVD), nous n'en livrons qu'une petite fraction représentative. L'ensemble des données est disponible sur demande à l'ENPC.
- ⇒ [1.1.1-L3] Thèse de Hoang-Hiep Vu [Vu 2011], qui s'appuie sur les données acquises.

## Références

- ⇒ [Vu 2011] Hoang-Hiep Vu. *Stéréo multi-vues à grande échelle et de haute qualité*. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est. Décembre 2011.
- ⇒ [Boulc'h et al. 2013] Alexandre Boulch, Simon Houllier, Renaud Marlet, Olivier Tournaire. *Semantizing Complex 3D Scenes using Constrained Attribute Grammars*. Computer Graphics Forum (to appear, 2013). 11th Eurographics Symposium on Geometry Processing (SGP 2013), Genoa, Italy, July 2013.

### 1.1.2. Réflexion sur la cartographie tridimensionnelle des réseaux souterrains en ville

#### Objectifs initiaux, partenariat et moyens

**Responsable** : Bruno Lemaire (ENPC-LEESU) depuis 2012, remplaçant Bruno Tassin.

Dans le volet d'acquisition de données (volet 1.1), Bruno Tassin, directeur du Laboratoire eau environnement et systèmes urbains (LEESU), avait proposé la réalisation de l'état de l'art de la cartographie des réseaux souterrains (tâche 1.1.2), premier pas vers l'intégration des réseaux souterrains dans la plateforme tridimensionnelle de Ville numérique, qui devait être suivie par des transferts de technologie pour la numérisation tridimensionnelle des réseaux souterrains en collaboration avec les laboratoires d'imagerie du projet Ville numérique, puis par le développement d'outils d'exploitation de ces cartes numériques 3D, par exemple pour identifier les pathologies des réseaux et ou pour optimiser la gestion de ce patrimoine. Cette tâche devait initialement être réalisée pour la fin 2010 par un post-doc de 6 mois pour un budget de 25 k€.

#### Evolution des objectifs

Les choses ont évolué sans perdre de vue l'objectif final. L'objectif de la tâche a été étendu : en plus de l'état de l'art (techniques et méthodes d'archivage, circuit de l'information, interactions entre les exploitants de réseaux, l'Etat, les collectivités territoriales, les fournisseurs de logiciels), le rapport analyse les besoins des exploitants en « modèles numériques de réseaux » et la plus-value que l'usage de la cartographie 3D peut apporter à la gestion et à la protection des réseaux souterrains.

Bruno Lemaire, enseignant-chercheur AgroParisTech au LEESU et Patricia Bordin, chercheur à l'Institut de recherche en constructibilité de l'Ecole supérieure des travaux publics (ESTP), ont encadré Mathias Beley pour son projet de fin d'études à l'ESTP entre le 5 mars et le 6 juillet 2012.

Dans l'**avenant** signé en février 2013, le budget de la tâche sur la cartographie des réseaux souterrains a donc été réduit à 3,5 k€ et la majeure partie (21,5 k€ sur les 25 k€ prévus initialement) transférée à la tâche 2.2 de Daniel Schertzer du LEESU sur la modélisation et la paramétrisation hydrologiques de la ville.

### Résultats

A propos de la disponibilité des données nécessaires à la cartographie 3D, Mathias Beley a réalisé une enquête auprès de :

- ⇒ l'Institut de l'environnement industriel et des risques (INERIS), en charge du guichet unique pour les données sur les réseaux souterrains à destination des entreprises de travaux
- ⇒ les services du conseil général du Val-de-Marne, avec lesquels le LEESU a de nombreuses relations, et qui exploitent un réseau d'assainissement départemental,
- ⇒ les services du canton de Genève, en particulier le service de mensuration officielle dont la réflexion sur la cartographie tridimensionnelle est particulièrement avancée,
- ⇒ les services des villes de Paris et de Créteil, ainsi que de l'agglomération de la Plaine centrale, située autour de Créteil, pour toucher des collectivités locales de différentes tailles qui possèdent des réseaux délégués à des entreprises exploitantes.

**Conclusions principales** : en France, les exploitants de réseaux souterrains assurent la numérisation et la mise à jour des plans. Ils sont tenus de communiquer la position précise de leurs réseaux aux entreprises de travaux même si celles-ci les sollicitent rarement. Pour limiter les accidents liés aux endommagements des réseaux enterrés, l'Etat a mis en place un guichet unique accessible en ligne, géré par l'INERIS, sur le modèle danois et suédois : les exploitants de réseaux sensibles en agglomération doivent géoréférencer leur position dans le système légal (RGF93) à 40 cm près dans les trois dimensions avant 2019.

Mais la numérisation des plans de réseaux est peu avancée (seulement 60 % de la surface de Paris par exemple, sans parler des petites communes), rendue difficile par l'hétérogénéité des fonds de plan qui repèrent les réseaux par rapport à la voirie et au bâti, et par le manque de précision des plans. Souvent, par mesure d'économie, l'exploitant ne fait pas appel à un géomètre pour dresser le plan de récolement en fin de travaux, et utilise un fond de plan récupéré. Le référentiel à grande échelle de l'IGN, payant, a une précision métrique insuffisante pour des informations à l'échelle du 1/200. La réglementation prévoit depuis 2012 que l'autorité locale publique compétente établit et met à jour un référentiel à très grande échelle. Il serait souhaitable qu'il soit public, gratuit et que l'on aide les petites collectivités locales dans cette tâche.

Par ailleurs, de nombreuses investigations complémentaires seront nécessaires pour atteindre la précision attendue pour le guichet unique. Pour localiser les réseaux existants, les techniques non intrusives ne fournissent que des informations partielles et ne permettent pas d'atteindre une précision décimétrique (détecteurs acoustiques pour les conduites, d'ondes radio pour les réseaux électriques et de télécommunications, géoradar). La fouille ouverte reste la technique traditionnelle la plus fiable. Des alternatives encore peu développées sont l'installation de puces RFID sur les réseaux ou le levé des conduites en y introduisant une sonde gyroscopique.

La confidentialité des données reste de rigueur en France et l'échange de plans entre exploitants ou avec les collectivités locales reste limité. Peu de collectivités locales se sont lancées dans la constitution de bases de données des réseaux souterrains (Strasbourg, Rennes, Nice, Orléans). Elles ont commencé par établir un référentiel à très grande échelle. Elles comptent parmi les plus grandes, car cela requiert un personnel qualifié. Les expériences à l'international montrent que c'est possible. Dans le canton de Genève, le service de la mensuration officielle fournit un cadastre de précision centimétrique, centralise les informations sur les

réseaux et les rend accessibles gratuitement à tous les exploitants. Au Québec, les exploitants de réseaux échangent leurs informations depuis 20 ans au sein d'une association.

Ainsi on est encore loin de disposer des données nécessaires pour réaliser la cartographie tridimensionnelle des réseaux souterrains, ce qui montre l'importance de développer le sujet.

### Valorisation

Ce travail sera valorisé a posteriori dans un article dans une revue technique française.

A terme, l'intérêt sera d'injecter les éléments cartographie souterraine dans un modèle standard et 3D, comme le BRGM a commencé à le faire pour le sous-sol. Ainsi les utilisations potentielles seront particulièrement riches : on peut citer par exemple la réalité augmentée sur tablette pour aider à la visualisation des réseaux enterrés depuis la surface.

### Livrables

[1.1.2-L0] Rapport de la tâche constitué d'une rapide introduction et du rapport de travail de fin d'études de Mathias Beley : « Cartographie tridimensionnelle des réseaux souterrains en ville ».

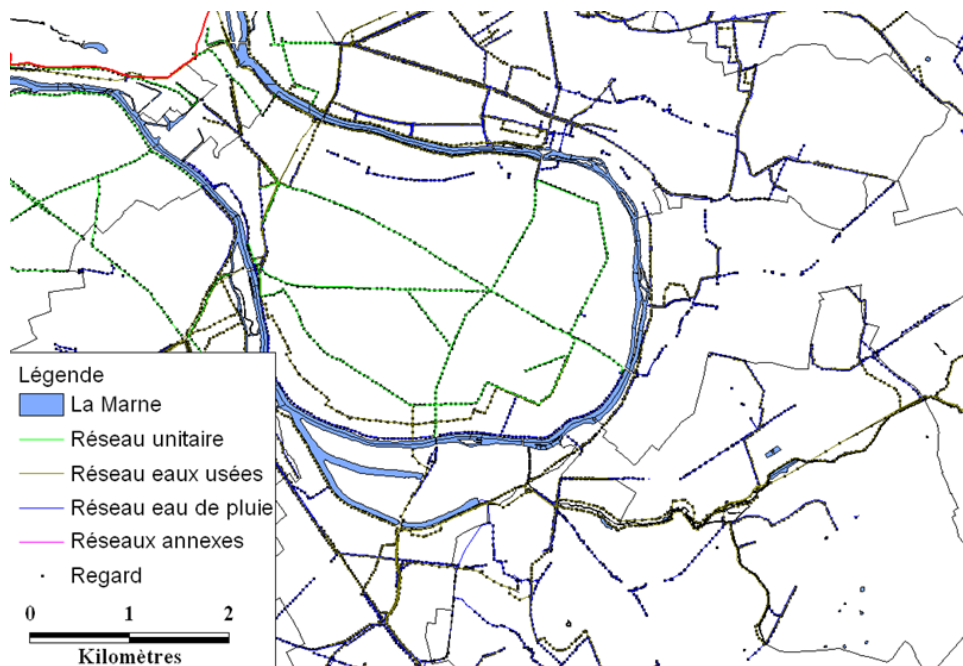


Figure 4: Exemple de données SIG sur les réseaux d'assainissement

## 1.2. Traitement de données

### 1.2.1. Recalage de données multi sources pour la modélisation 3D urbaine dense

#### *Partenariat et chercheurs*

**Responsable** : Olivier Tournaire (CSTB-MODEVE) depuis 2012

- ⇒ Laboratoire IMAGINE (ENPC / CSTB) : Achraf Ben Hamadou (post-doctorant ; 12 mois ; 2011-2012) ; Olivier Tournaire (responsable) ; Renaud Marlet (encadrant)
- ⇒ Laboratoire MATIS (IGNF) : Nicolas Paparoditis (responsable) ; Marc Pierrot-Deseiligny (encadrant)

#### *Objectifs*

Cette tâche a consisté à développer une première approche de fusion de données images acquises depuis des points de vue aérien et terrestre. L'objectif est de pouvoir produire des modèles 3D urbains à partir de ces sources de données qui permettent de bénéficier d'une vision détaillée de l'ensemble des éléments de la ville :

- ⇒ Toits et cours intérieures depuis les images aériennes
- ⇒ Vue détaillée des façades et de la route depuis les images terrestres.

#### *Résultats*

Pour réaliser cette tâche, nous disposons de données aériennes acquises en 2009 (10cm de résolution), sur le chantier test de la Mairie du XII<sup>e</sup> arrondissement de Paris. De même, les images issues du système de cartographie mobile *Stéréopolis* sur cette même zone ont été utilisées.

L'approche proposée repose sur de la fusion des maillages obtenus séparément par, d'une part les images aériennes, et, d'autre part les images terrestres. Pour la reconstruction des maillages, la première étape consiste à calculer la calibration de chacun des jeux de données (chacune ayant donc son repère propre) avec la bibliothèque *OpenSource OpenMVG* (<http://imagine.enpc.fr/~moulonp/openMVG/>). Une fois les caméras calibrées, la suite logicielle *ImagineMVS* a ensuite pu être mise en œuvre pour calculer les maillages issus des images terrestres et aériennes. A cette étape, nous disposons donc de deux maillages qu'il convient maintenant de fusionner. Ceci est réalisé en remettant dans le même repère les maillages, grâce aux coordonnées GPS disponibles, et en en détectant les zones de recouvrement. A partir de ces zones communes, un algorithme de fusion de maillage est appliqué. Cet algorithme, étant donnée sa formulation a une tendance naturelle à favoriser les mailles les plus fines, donc les mailles terrestres. Le résultat en sortie est un maillage fusionné, donc schématiquement, les toits sont reconstruits à partir des images aériennes, et les façades et rue à partir des images terrestres.

Cette tâche a permis d'explorer la faisabilité de fusionner des jeux de données différents pour obtenir une modélisation 3D urbaine dense et profitant de la meilleure résolution des données en tout point de l'espace. Elle a également permis d'ouvrir des pistes de recherche, notamment sur la fusion de maillage et la calibration.

#### *Livrables*

- [1.2.1-L1] Rapport final de la tâche
- [1.2.1-L2] Jeux test de données (extrait)

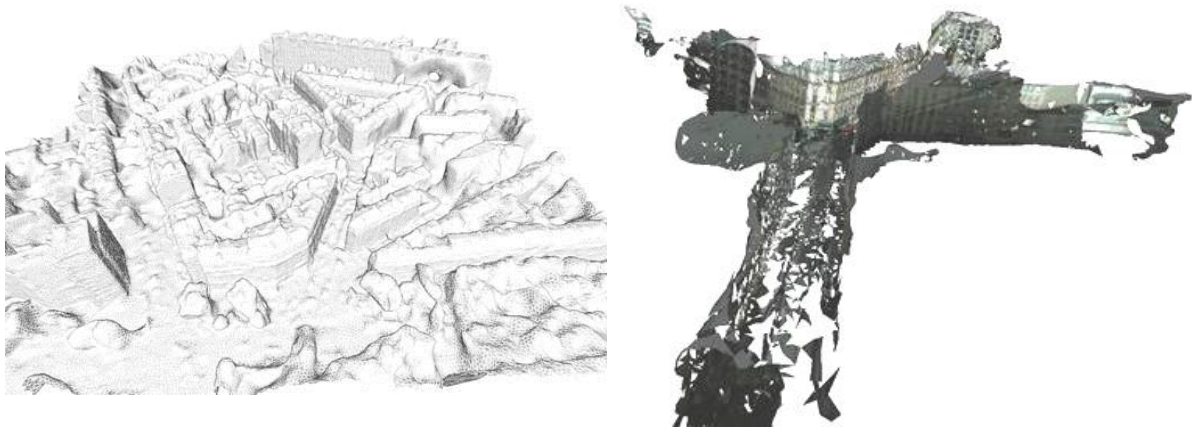


Figure 5: Reconstruction de la zone test à partir de 8 images aériennes (à gauche) et d'une centaine d'images terrestres (à droite)

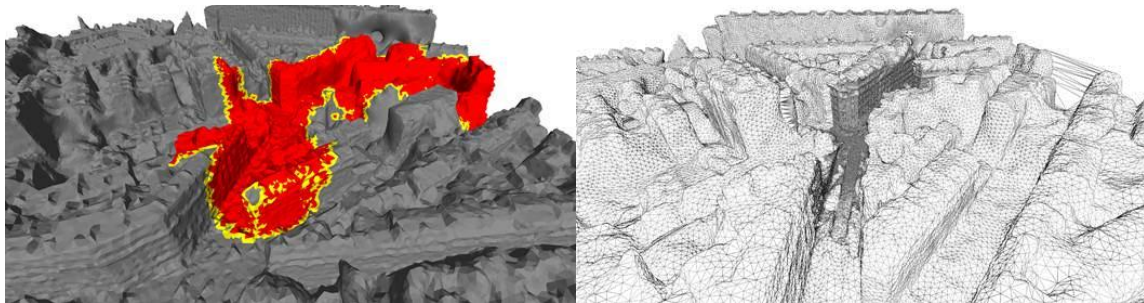


Figure 6: Recouvrement (en rouge) entre les maillages aérien et terrestre (sur le maillage aérien). En jaune, la frontière du recouvrement (les faces adjacentes à des faces du recouvrement). A droite, fusion des maillages aérien et terrestre.

## 1.2.2. Sémantisation des modèles 3D urbains

### *Partenariat et chercheurs*

**Responsable** : Renaud Marlet (ENPC-IMAGINE) depuis 2012 en remplacement de Jean-Yves Audibert.

Le travail a impliqué deux organismes, l'ENPC et le CSTB, déjà réunis depuis janvier 2009 dans une équipe de recherche commune (IMAGINE) bi-localisée, à Marne-la-Vallée et à Sophia Antipolis. Les chercheurs ayant directement participé aux travaux sur cette tâche sont les suivants.

- ⇒ Jean-Yves Audibert (ENPC/IMAGINE), chercheur permanent
- ⇒ Mateusz Kozinski (ENPC/IMAGINE), doctorant en cofinancement CSTB+ENPC,
- ⇒ Renaud Marlet (ENPC/IMAGINE), chercheur permanent
- ⇒ David Ok (ENPC/IMAGINE), doctorant en cofinancement CSTB+ENPC,
- ⇒ Olivier Tournaire (CSTB/IMAGINE), chercheur permanent

Les échanges pour cette tâche se sont inscrits naturellement dans la dynamique d'équipe déjà en place, avec des outils standards de partage de code et de travail collaboratif (SVN), et des formats de données standard également (images).

### *Contexte et évolution des objectifs*

La simulation sur la ville nécessite non seulement des modèles géométriques mais aussi une connaissance de la sémantique des surfaces et volumes modélisés. Par exemple, l'évaluation de la performance énergétique a besoin de connaître où sont les ouvertures (portes, fenêtres), les toits et leur nature.

La tâche 1.2.2 a recouvert le travail de thèse de David Ok, financé à 100% par le CSTB et l'ENPC. Son objectif était d'étudier les techniques de sémantisation automatique d'images de bâtiments.

Le travail s'est concentré sur la détection des éléments architecturaux (murs, fenêtres, etc.). D'autres questions initialement envisagées, comme le recalage avec des images thermographiques, la reconnaissance de typologies de construction, et la caractérisation de matériaux, ont été écartées pour se concentrer sur la question centrale de la segmentation sémantique.

Il était aussi prévu de réaliser une base de données d'images pour affiner et tester les techniques de sémantisation. Or une telle base de données a vu le jour par ailleurs au début de la thèse de David Ok, et s'est très rapidement imposée comme un standard de fait pour l'évaluation des techniques de sémantisation [Teboul 2010]. Il a donc été décidé de ne pas faire de nouveau développement, mais au contraire d'exploiter au maximum les données existantes.

### Résultats principaux et valorisation

Les principaux résultats sont :

- ⇒ une technique robuste de détection d'objets répétés qui permet notamment la localisation précise et robuste de fenêtres sur une façade [Ok et al. 2012a],
- ⇒ une technique d'extraction et d'exploitation de données de haut niveau qui améliore substantiellement (plus précise, plus rapide, plus robuste) une technique d'analyse sémantique d'images de façades (identification des zones correspondant au mur, aux fenêtres, aux portes, au toit, etc.) [Ok et al. 2012b],
- ⇒ une technique robuste de mise en correspondance de groupes de points saillants dans une image, qui est utilisée de manière sous-jacente pour la détection de fenêtres, mais qui permet aussi d'améliorer la robustesse et la précision des calibrations d'images pour la photogrammétrie. Cette technique a contribué à la victoire d'IMAGINE au challenge international PROVisG Mars 3D (2011), qui visait à comparer diverses technologies de calibration et de reconstruction 3D dans la perspective de futures explorations planétaires robotisées.

Les avancées sur la question de la sémantisation de façades ont aussi contribué à l'obtention en 2013, avec d'autres partenaires (INRIA/ENS Ulm, INRIA Sophia Antipolis, GREYC, Acute3D), d'un financement ANR : le projet SEMAPOLIS. Ce projet, qui concerne l'analyse sémantique visuelle et la reconstruction 3D sémantisée d'environnements urbains, a un coût total de 3.700k€, financé par l'ANR à hauteur de 800k€.

### Livrables

- ⇒ [1.2.2-L1] Deux publications dans des conférences internationales avec actes et comité de lecture [Ok et al. 2012a, Ok et al. 2012b].
- ⇒ [1.2.2-L2] La thèse de doctorant de David Ok [Ok 2013].
- ⇒ [1.2.2-L3] Une vidéo qui illustre les productions du système de détection de fenêtres et de sémantisation de façades.

### Bibliographie

- ⇒ [Ok et al. 2012a] David Ok, Renaud Marlet, Jean-Yves Audibert. *Efficient and Scalable 4th-order Match Propagation*. In 11th Asian Conference on Computer Vision (ACCV 2012), Daejeon, November 2012.
- ⇒ [Ok et al 2012b] David Ok, Mateusz Kozinski, Renaud Marlet, Nikos Paragios. *High-Level Bottom-Up Cues for Top-Down Parsing of Facade Images*. In 2nd Joint 3DIM/3DPVT Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission (3DIMPVT 2012), Zürich, October 2012.

- ⇒ [Ok 2013]. David Ok. Mise en correspondance robuste et détection d'éléments visuels appliquées à l'analyse de façades. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est. Mars 2013.
- ⇒ [Teboul 2010] Olivier Teboul. Ecole Centrale Paris Facades Database, Benchmark 2010 & 2011. <http://vision.mas.ecp.fr/Personnel/teboul/data.php>



Figure 7: En 2D : amélioration de la détection de fenêtres : affranchissement des contraintes de rectification d'image et de régularité de la façade (à gauche) et analyse sémantique des images de façades par approche grammair (à droite)

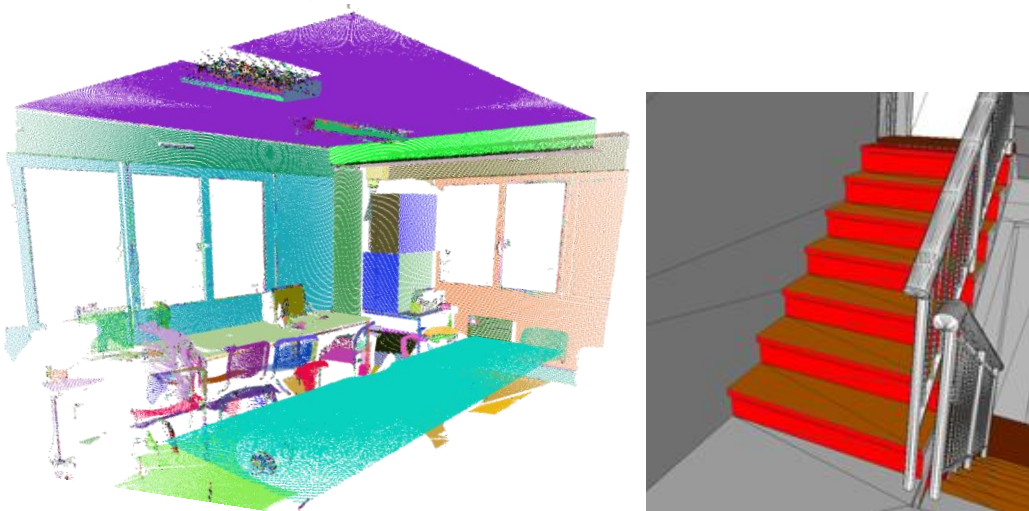


Figure 8: En 3D : segmentation d'un nuage de points par cohérence locale des normales (à gauche) et reconnaissance automatique des dalles et escaliers (en rouge) dans un modèle 3D CAO (à droite)

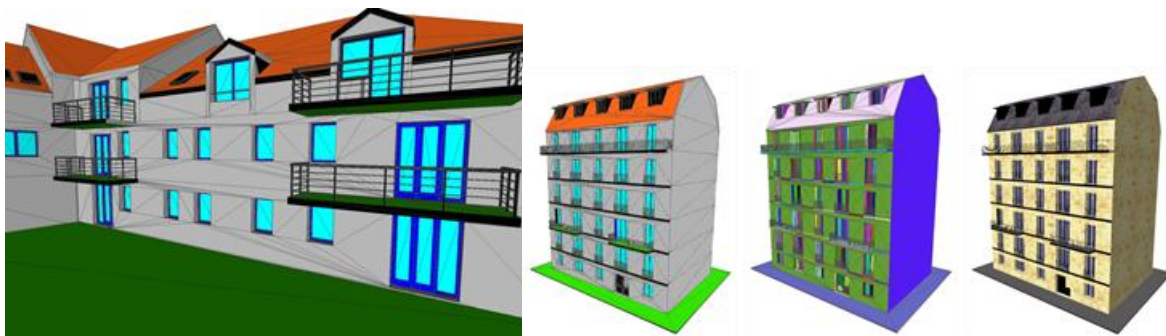


Figure 9: Sémantisation complète d'un modèle 3D CAO de bâtiment (à gauche : dalles, murs, toits, balcons, baies, encadrements) et processus de texturation automatique à partir des résultats de sémantisation par identification des différents éléments architecturaux (à droite)

### 1.2.3. Extraction de routes 3D

#### *Partenariat et chercheurs*

**Responsable** : Nicolas Paparoditis (IGN-MATIS)

Pour réaliser cette tâche un post-doctorant spécialiste en photogrammétrie (Bahman Soheilian) a été embauché au laboratoire MATIS d'IGN pendant 12 mois (il est aujourd'hui en CDI à l'IGN). L'élaboration de cahier de charge pour le modèle de données nécessaire a été réalisée en collaboration avec le laboratoire LICIT d'IFSTTAR. Dans ce cadre Bahman Soheilian a fait un séjour d'une semaine au laboratoire LICIT.

#### *Objectifs*

L'objectif de cette tâche était de produire des données 3D de route nécessaires en entrée des outils de modélisation de trafic à l'échelle microscopique. Des données de route classiques - souvent produites par des agences de cartographie - représentent la route souvent sous forme de graphes composés des tronçons et des nœuds à très grandes échelles. Cependant, les simulateurs microscopiques de trafic requièrent des représentations plus fines au niveau des voies de circulation (nombres et largeurs des voies, mouvements à l'intérieur des carrefours et des ronds-points etc.). Ainsi, l'objectif principal de cette tâche consiste d'une part à produire des données permettant d'enrichir des données existantes et d'autre part à intégrer des données enrichies dans un modèle compatible avec les exigences des simulateurs de trafic à l'échelle microscopique.

#### *Résultats*

Le problème d'extraction d'objets caractérisant la route à partir de données d'imagerie (laser et optique) a été abordé en premier lieu : dans ce cadre le travail a porté sur la pérennisation des outils existants au laboratoire mais également sur développement de nouvelles méthodes. Ainsi aujourd'hui des outils entièrement automatiques permettent l'extraction et la reconstruction 3D des marquages aux sols rectangulaires et des panneaux de signalisation à partir d'images géoréférencées acquises au niveau des rues. Ces deux outils ont été passé à l'échelle et permettent ainsi de traiter un grands nombre de données images pour produire des objets 3D de route sur des grands chantiers de manière automatique. Les méthodes développés ont fait l'objet de deux articles de journaux de rang A (cf. [Soheilian et al. 2010] et [Soheilian et al. 2013]).

Dans le cadre d'un stage de Master recherche un algorithme de génération des ortho-images de route avec une haute résolution spatiale a été mis en place (de l'ordre de quelques centimètres). Ce type d'ortho-image constitue la donnée de base pour l'extraction d'autres marquages spéciaux comme les flèches ([Do-Cao 2010]).

Pour obtenir un modèle de route directement utilisable par les simulateurs de trafic, deux difficultés sont apparues principalement :

- ⇒ Les méthodes développées pour extraire les marquages et les panneaux de signalisation permettent d'obtenir les informations nécessaires pour enrichir les modèles classiques de route (graphe de tronçons et de nœuds). Cependant la phase d'appariement de ces objets avec le graphe de route s'avère compliquée notamment à cause de l'imperfection des objets extraits, au point de vue de la complétude et du géoréférencement. Pour cela des algorithmes de type « map-matching » développés par la communauté de cartographie pourront être mobilisés.
- ⇒ Le deuxième problème consiste à adopter un modèle de donnée et un format d'échange standard permettant de représenter les données de façon générique et normalisé.

#### *Perspectives et Valorisation*

De la recherche est donc encore nécessaire pour résoudre les problèmes évoqués et développer un outil intégré et automatique pour la génération automatique d'un modèle de route. C'est pourquoi une partie du



projet ANR TrafiPollu (monté via des partenaires du projet Ville Numérique), piloté par le laboratoire LICIT d'IFSTTAR est consacré à ce problème. Ce projet, accepté en 2012 et a démarré officiellement le 1 Mars 2013.

### Livrables

- ⇒ [1.2.3-L1] Rapport technique intitulé « Etude sur les bases de données de route pour la création d'entrées pour les simulateurs de trafic » produit en mai 2011.
- ⇒ [1.2.3-L2] Une vidéo représentant un modèle 3D de route obtenu par la méthode présentée.

### Références

- ⇒ [Do-Cao 2010] T. Do Cao. Rapport de stage. Génération d'ortho-images de rues à partir d'images terrestres panoramiques. Université René Descartes - Paris V, 2010.
- ⇒ [Soheilian et al. 2013] B. Soheilian, N. Papanastasiou, B. Vallet. Detection and 3D reconstruction of traffic signs from multiple view color images. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 77, pp 1–20, March 2013.
- ⇒ [Soheilian et al. 2010] B. Soheilian, N. Papanastasiou, D. Boldo. 3D road marking reconstruction from street-level calibrated stereo pairs. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 65, Issue 4, pp 347-359, July 2010.

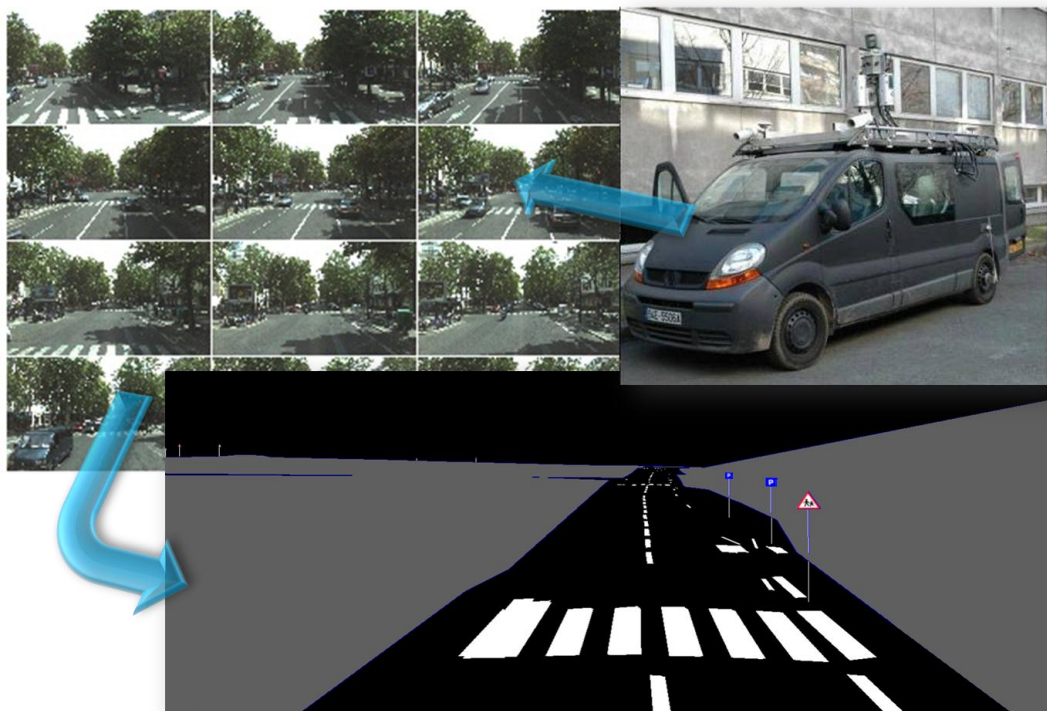


Figure 10: Illustration du processus du démonstrateur depuis l'acquisition jusqu'à la restitution pour générer automatiquement un modèle géométrique et sémantique de la route

## 1.2.4. Génération de maillages à partir de modèles 3D urbains

### Chercheurs

**Responsable** : Kamel Zibouche (CSTB-MODEVE)

### Contexte et objectifs

Le but principal de cette tâche est de réaliser, à partir de modèle 3D, des maillages 3D adaptés aux simulations environnementales en milieu urbain telles que : l'étude des ambiances urbaines, confort thermo-aéraulique, dispersion de la pollution, effet du vent sur les structures ....

Le domaine de calcul maillé représente souvent le compartiment atmosphérique d'une zone urbaine (volume d'air entourant les bâtiments). Ce dernier, suivant le type de modélisation physique et le type de résultat visé, peut être très différent en terme de détails retenus (prise en compte des toits, des éléments de façades, ...) et de hauteur (quelque mètres du sol, au-dessus des toits, quelques centaine de mètres ...).

Le type et le niveau de raffinement du maillage changent aussi suivant les phénomènes étudiés et la précision voulue. En général, le maillage doit être très fin proche des parois et du sol. Si on s'intéresse aux phénomènes de turbulences pour étudier le confort thermo-aéraulique à l'échelle d'une rue, il est nécessaire de mailler très fin en proche paroi (quelques centimètres) et garder un certain niveau de finesse même au milieu des rues. Si on s'intéresse à la dispersion de la pollution à l'échelle d'un fragment urbain (quelques hectares) on doit avoir une taille de maille de quelques dizaines de centimètre ou plus.

### Principaux résultats et valorisation

Ces travaux ont permis de faire plusieurs avancées :

#### Import et simplification de la géométrie des bâtiments et du terrain à partir de données au format CityGML

Pour l'implémentation on a fait le choix de générer des maillages à partir de modèle urbain décrit dans le formalisme CityGML. Ce choix a été motivé par le fait que ce format, très prometteur, est le nouveau standard de l'OGC et présente une description très complète du milieu urbain. Néanmoins, la méthodologie n'est pas liée à ce format et est facilement adaptable à d'autres formats.

#### Réalisation de maillages 3D adaptés aux calculs d'écoulements de fluide en milieux urbains

A partir du maillage de peau du domaine, on peut générer directement le maillage volumique 3D par une tétraèdrisation. Dans le cas on l'on souhaite mailler finement à proximité des parois pour simuler par exemple les échange thermique entre l'air et les façades des bâtiments, cette méthode génère un nombre de tétraèdres très important ce qui augmente fortement les couts de calcul. Pour éviter cela on a opté pour le mailleur OpenSource Engid, développe à l'ESA, qui génère un maillage hybride Pyramide/Tetra. En proche paroi, on extrude par couche successives les triangles du maillage de peau ce qui donne des pyramides. Les hauteurs des différentes couches peuvent être contrôlées et augmenter d'une manière linéaire ou exponentiel. Le reste du domaine et ensuite maillé en tétraèdres.

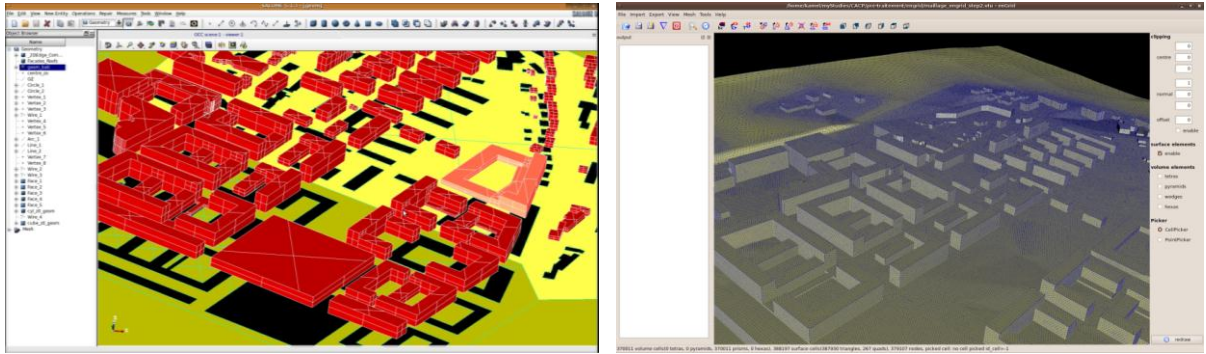


Figure 11: Densification d'un maillage simple (à gauche) à destination de simulation de mécanique des fluides

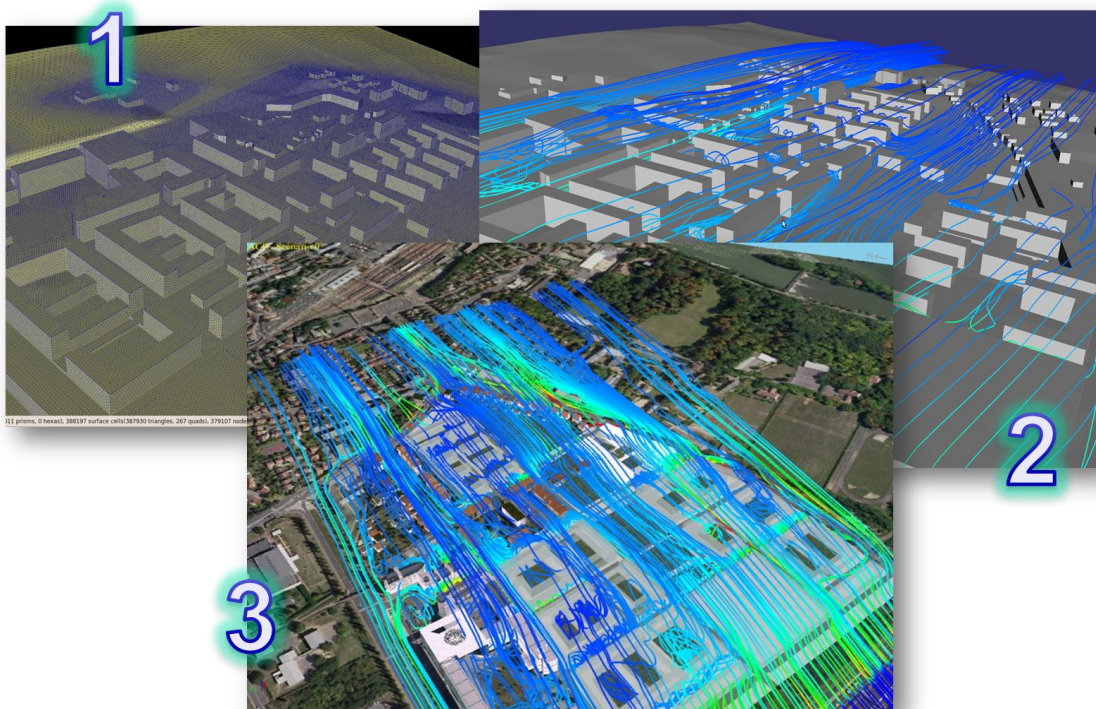


Figure 12: Réalisation d'une simulation de dispersion de polluants sur la base des maillages réalisés. Par la suite les résultats de la simulation sont intégrés à une maquette plus réaliste (phase 3)

## 2. Axe « Couplage des phénomènes physiques »

### 2.1. Couplage "Trafic / nuisances"

#### 2.1.1. Interfaçage des codes de simulation de trafic.

##### *Partenaires et chercheurs*

**Responsable** : Ludovic Leclercq (IFSTTAR-LICIT)

- ⇒ IFSTTAR-LICIT (C. Bécarie, L. Leclercq) : conception et mise en place des évolutions, tests
- ⇒ CSTB-MODEVE (J. Soula), CSTB-DAE (J. Maillard) : conception, logiciel intégrateur eveCity, adaptation et tests

##### *Contexte et objectifs*

L'objectif de « Ville Numérique » étant d'élaborer une plateforme permettant de réaliser de l'évaluation multicritère de projets d'environnement urbains notamment en simulant les phénomènes physiques de la ville, le volet 2.1 s'intéresse à la modélisation du trafic, élément prépondérant de la ville et source principale de nuisance environnementale. La tâche 2.1.1 « interfaçage des codes de simulation » doit permettre d'interfacer efficacement le simulateur de trafic SymuVia développé par le LICIT avec la plateforme intégratrice eveCity développée par le CSTB autour de la maquette numérique urbaine. Cette interopérabilité concerne la base de donnée initiale de la plateforme intégratrice, les sorties trafic de SymuVia et des mises à jour dynamiques des données initiales.

##### *Résultats*

Historiquement, la plateforme logicielle eveCity du CSTB et le simulateur de trafic SymuVia du LICIT ont été développés indépendamment. L'intégration efficace de SymuVia dans eveCity a donc impliqué une réflexion commune entre les équipes de développement : trois aspects ont ainsi été abordés puis intégrés :

1. **Utilisation commune de modules technologiques OpenSource** (exemple : bibliothèques Qt, parseur Xerces) afin de simplifier la gestion des versions et le déploiement. Ceci a demandé une modification du code de SymuVia afin d'intégrer ces modules ;
2. **Mise en place de classes et de fonctions exportées** pour optimiser les interfaces entre la plateforme eveCity et le simulateur SymuVia : les classes élaborées en commun permettent d'échanger efficacement les données descriptives de la simulation ainsi que les données dynamiques. Une attention particulière a été portée au problème de synchronisation des données dynamiques à partager. De nouvelles fonctions exportées ont été intégrées dans SymuVia afin de rendre plus efficace la communication entre les outils et également afin de pouvoir réaliser des modifications du réseau d'écoulement de trafic en ligne (dans le but de mesurer l'impact d'aménagement notamment) ;
3. **Outils collaboratifs**. Deux outils ont été mis en place : un gestionnaire de sources communes aux 2 plateformes (SVN) permet maintenant de partager efficacement les sources du package EveShared décrivant les classes exportées permettant l'interopérabilité. Un outil de reporting (Trac) mis en place par le CSTB permet également de tracer les actions réalisées et à effectuer provenant des intervenants (développeurs et utilisateurs) des plateformes eveCity et SymuVia.

##### *Valorisation*

- ⇒ Cas d'application pour le projet « Simuroutes » pour le compte du CG59: calcul de l'impact acoustique d'aménagements du réseau routier par la plateforme eveCity en utilisant le module SymuVia ;

- ⇒ Partenariats avec les CETE notamment comme testeurs/évaluateurs opérationnels des nouveaux outils. La prise en main de la plateforme a déjà été initiée avec le CETE de Lyon ;
- ⇒ A terme, cette collaboration doit permettre de réaliser des montages opérationnels et partenariaux pour répondre à différentes offres en proposant une plateforme logicielle évoluée avec des compétences métier pour chaque module intégré.

### Moyens

- ⇒ Sous-traitance informatique pilotée par le LICIT pour intégration des évolutions ;
- ⇒ Mise en place des outils collaboratifs entre le CTSB et le LICIT (SVN et TRAC) ;
- ⇒ Nouvelle version de la librairie Symuvia intégrant les évolutions concernant l'interfaçage ;

### Livrables

- ⇒ [2.1.1-L1] : document de conception sur l'interfaçage du code de simulation de trafic Symuvia

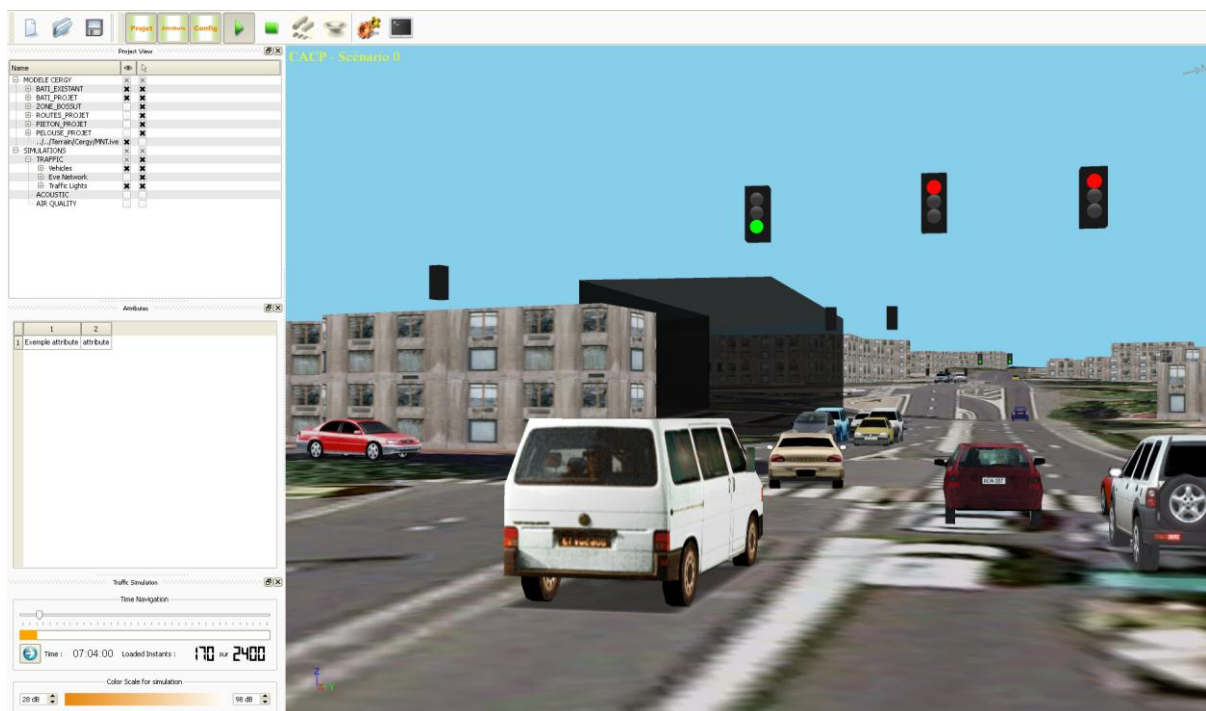


Figure 13: Vue 3D d'une simulation avec eveCity intégrant le module de trafic SymuVia

## 2.1.2. Modélisation de la pollution atmosphérique liée à la circulation automobile en zone urbaine

### Contexte et objectifs

Dans le cadre du volet 2.1 « couplage trafic/nuisance » de l'axe 2 « couplage des phénomènes physiques », la tâche 2.1.2 « Définition de chaînes de modélisation pertinentes pour l'estimation des émissions de polluants et de gaz à effet de serre aux différentes échelles urbaines. » s'intéresse à la faisabilité et pertinence des chaînes de modélisation associant les modèles de trafic, d'émission de polluants atmosphériques, de dispersion et transport de ces derniers dans l'atmosphère, et de leur éventuel transfert dans les bassins versants par dépôt et ruissellement. Les questions principales concernent la pertinence des modèles aux différentes échelles, la cohérence de leur couplage et interfaçage (données entrantes et sortantes), la réalisation opérationnelle des couplages, et la validation sur des terrains d'applications.

### Partenariat et chercheurs

**Responsable :** Michel André (IFSTTAR/LTE)

- ⇒ IFSTTAR-LTE/LICIT : outils de calcul de trafic et d'émission et intégration de l'ensemble des outils
- ⇒ ENPC-CEREA : modèle atmosphérique Polyphemus
- ⇒ ENPC-LEESU : modèles hydrauliques

### Résultats

Le projet a d'abord permis la réalisation d'un état de l'art très complet et détaillé des outils de modélisation des différents phénomènes (trafic, émissions, transferts atmosphériques et hydrauliques). Cet état de l'art s'est révélé particulièrement complexe car de nature pluridisciplinaire et portant sur des objets hétéroclites. Il a mis en exergue la difficulté de l'intégration cohérente des modèles, en raison :

- ⇒ **de problématiques spécifiques** : l'eau s'intéresse aux métaux, HAP, etc. qui sont les parents pauvres des modèles d'émissions, ou encore aux particules grossières négligées par les modèles atmosphériques en raison de leur faible impact sanitaire dans l'air,
- ⇒ **de difficultés liées aux échelles** : le trafic peut être modélisé finement tandis que les phénomènes atmosphériques et plus encore les phénomènes hydrauliques ne sont approchés qu'avec des échelles spatio-temporelles plus larges,
- ⇒ **de limites, lacunes et incertitudes** des différents modèles.

Cet état de l'art a permis, en connaissance de causes, de configurer deux chaînes de modélisation, la première considérant une approche statique et horaire du trafic et des phénomènes polluants, la seconde envisageant une approche dynamique (Symuvia / Phem + Copert / CFD Code Saturne / Multi-Hydro SWMM-TREX), complétée cependant par des calculs agrégés lorsque les modèles instantanés sont insuffisants.

En raison du caractère peu modulaire de ces outils, il n'est pas possible de réaliser leur intégration dans une chaîne séquentielle. Ce sont donc des outils automatisés d'interfaçage (créant les données nécessaires aux modèles suivants) qui ont été développés. Ces chaînes de modèles ont été testées pour validation sur des cas d'applications permettant des configurations partielles :

- ⇒ Validation des calculs de trafic / émissions et dépôts, d'après les données expérimentales obtenues en bordure de l'autoroute A31 (près de Metz). Cette phase a également permis le développement et ajustement d'un modèle de transfert des particules grossières et métaux,

- ⇒ Simulation par SWMM de la propagation des pollutions dans les sous-bassins versants (selon leur proximité de l'autoroute). Les trafics, émissions et dépôts ont été calculés d'après les volumes de trafic et la rose des vents sur une zone expérimentale de Grigny (comptant plusieurs axes routiers).
- ⇒ Simulation en zone urbaine utilisant le modèle dynamique Symuvia en lien avec un modèle instantané (Phem) et un modèle agrégé (CopCETE), sans validation atmosphérique ou hydraulique dans ce cas.
- ⇒ Une application en cours sur la rocade de Grenoble dans le cadre du projet de recherche Mocopo permettra une validation fine (observations / mesure des trafics et émissions quasi instantanée) de la partie émissions / air / dépôts.

Au global, ce projet aura permis une avancée significative dans la connaissance et l'intégration de l'ensemble des modèles permettant le calcul des nuisances atmosphériques et pollution de l'eau dues au trafic, mettant en avant de nombreuses limites et précautions nécessaires à la réalisation de cette chaîne, ainsi que la nécessité de données expérimentales robustes pour la validation de l'ensemble. Au travers des expérimentations envisagées, le projet TrafiPollu devra répondre à ces attentes.

### Valorisation

- ⇒ Cas d'application sur campagnes expérimentales (Grigny, Grenoble)
- ⇒ Prolongation des travaux dans le cadre du projet TrafiPollu
- ⇒ Développement d'un module de simulation des particules, intégré dans la plate-forme Polyphemus ;
- ⇒ A terme, ces travaux permettront une pratique rationnelle des outils de calculs d'émissions et de qualité de l'air, voire de pollution des eaux, dans le cadre des études d'impact des infrastructures effectuées par le Cerema.

### Moyens

- ⇒ Thèse de doctorat (Masoud Fallah Shorsani) cofinancée à 50% par Ville Numérique et l'IFSTTAR.
- ⇒ Logiciels PHEM, Polyphemus, Code Sature, SWMM, SYMUVIA, Copert4 v9, CopCETE (du RST / Cerema).

### Livrables

- ⇒ [2.1.2-L1] : Rapport de synthèse
- ⇒ [2.1.2-L2] : Thèse de Masoud Fallah (le manuscrit final sera disponible fin 2013)

### Références

- ⇒ Fallahshorshani M., André M., Bonhomme C., Seigneur C. (2012) Coupling traffic, pollutant emission, air and water quality models: Technical review and perspectives. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 48, 1794 – 1804.
- ⇒ Fallah Shorshani M., Bonhomme C., Petrucci G., André M. Seigneur C. (submitted, 2013) Road traffic impact on water quality in an urban catchment (Grigny, France): a step toward integrated traffic, air and stormwater modeling. *Environmental Science and Pollution Research*.

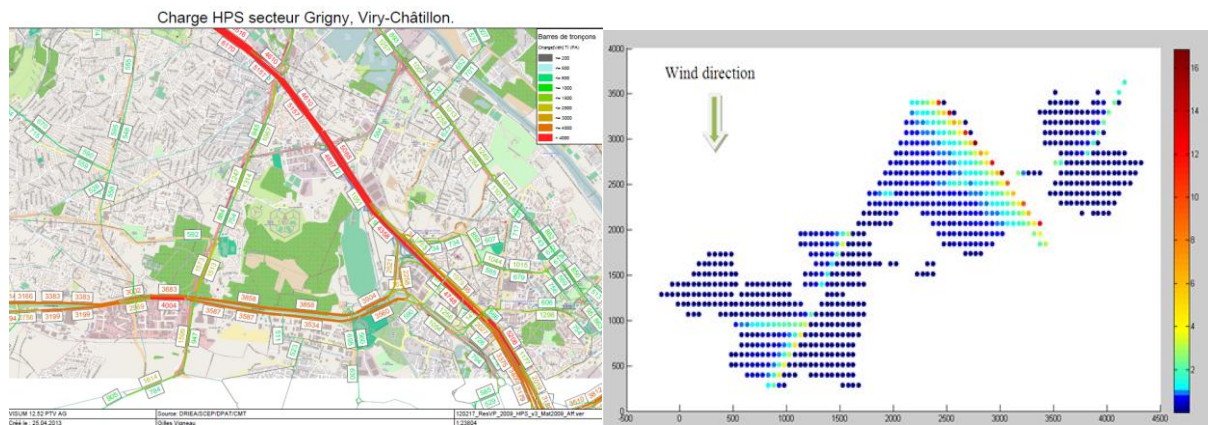


Figure 14: Configuration de simulation du trafic, et de la pollution atmosphérique (CopCete, Polyphemus) et des eaux (SWMMM) en métaux Cd, Zn, et Pb, sur la zone expérimentale de Grigny. A droite, concentrations de Zinc ( $\text{ng}/\text{m}^3$ ) dues au trafic.

### 2.1.3. Évaluation des nuisances sonores liées au trafic en milieu urbain

#### Partenariat et chercheurs

**Responsable** : Julien Soula (CSTB-MODEVE)

- ⇒ IFSTTAR-LICIT (L. Leclercq, C. Bécarie)
- ⇒ CSTB-MODEVE (J. Soula, F. Bonnefoi, K. Zibouche, O. Tournaire)
- ⇒ CSTB-DAE (J. Maillard)

#### Contexte et objectifs

Cette tâche s'intéresse à l'implémentation d'un couplage entre un modèle de trafic macroscopique à résolution microscopique développé par le LICIT (IFSTTAR), et un modèle de propagation sonore développé par le CSTB, au sein du logiciel eveCity du CSTB, permettant de fédérer les modèles autour d'une maquette numérique urbaine. L'objectif est de rendre possible une évaluation dynamique des nuisances sonores liées au trafic en milieu urbain, dont la compréhension est facilitée par l'utilisation de restitutions sonores directes ou de cartes de couleur.

#### Résultats

Les difficultés théoriques rencontrées étaient essentiellement d'ordre spatial : en effet, le modèle de propagation sonore nécessitait un découpage fin de chaque voie de trafic, chacune étant considérée comme un élément récepteur de la propagation. En effet, celle-ci est basée sur un lancer de rayons inverse partant de la zone de réception.

Le modèle de trafic Symuvia quant à lui, fonctionnait uniquement avec les axes des routes et des informations attributaires (nombre de voie, vitesse limite, etc...). Il a donc fallu notamment développer des interfaces permettant l'interfaçage des deux modèles, en lien étroit avec la tâche 2.1.1.

D'autres difficultés ont été rencontrées lors de l'implémentation informatique, car l'objectif était de gérer de nombreux éléments mobiles (plus de 400 véhicules) en temps réel, chacun étant une source de bruit autonome, tout en affichant une scène 3D complexe au sein du logiciel eveCity.



Les résultats sont néanmoins très positifs : un démonstrateur a été monté permettant de gérer l'ensemble de ces contraintes en temps réel et de faire varier des paramètres pour mesurer l'impact sur les nuisances sonores :

- ⇒ Variations sur le trafic (flux des entrées / sorties, proportion véhicules légers / poids lourds)
- ⇒ Sélection interactive des scénarios (voie en déblais/remblais, murs anti-bruit)
- ⇒ Choix de la restitution sonore (stéréo, ambisonique, holophonique)
- ⇒ Autres paramètres de simulation

Au global, ce projet aura permis une avancée significative dans l'intégration de plusieurs modèles permettant le calcul des nuisances sonores dues au trafic, mettant en avant de nombreuses limites et précautions nécessaires à la réalisation de cette chaîne, ainsi que la nécessité de données expérimentales robustes pour la validation de l'ensemble.

Cette tâche était l'une des plus opérationnelles de ce projet de recherche, et en ce sens a constitué une preuve de la faisabilité du concept de plateforme logicielle intégrée.

Le CSTB continue d'ailleurs avec ses partenaires à développer d'autres modules (dispersion de polluants liés au trafic, potentiels ENR, smart grids, monitoring...) pour la plateforme eveCity afin d'avancer dans le prototypage de ce type d'approche intégrée.

### Valorisation

- ⇒ Utilisation du démonstrateur (prototype eveCity) dans le cadre d'un projet de recherche à vocation opérationnelle avec le Conseil Général du Nord (CG59)
- ⇒ Démonstration lors de la visite de la ministre à l'occasion du Colloque "Faire la ville durable, inventer une nouvelle urbanité" (20 janvier 2011, ESIEE/ENPC)
- ⇒ Prolongation des travaux dans le cadre de nombreux projets CSTB, IFSTTAR et Européens.
- ⇒ Publications et posters au sein de conférences et colloques (GIS-MU, ICT for sustainable places...)
  - SOULA J., LECLERCQ L., MAILLARD J., VAN-MAERCKE 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. [PDF](#)
  - 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
- ⇒ Premiers exemples fonctionnels de couplages dynamiques entre modules « experts » via l'utilisation d'une maquette numérique urbaine centrale.

### Moyens

- ⇒ Financement propre du CSTB et de l'IFSTTAR
- ⇒ Exploitation de la tâche 2.1.1 interfaçage des codes de simulation du trafic.
- ⇒ Exploitation de la tâche 3.2.2 pour injecter l'échelle nanoscopique au niveau du trafic
- ⇒ Logiciels eveCity (CSTB), OASIS (CSTB), SYMU VIA (IFSTTAR).

### Livrables

- ⇒ [2.1.3-L1] : Vidéo de démonstration « Simuroutes 59 » montrant la comparaison de la restitution sonore par auralisation et carte de bruit dynamique sur 3 scénarios d'insertion d'une route départementale (RD700). Des démonstrations sont disponibles sur demande.

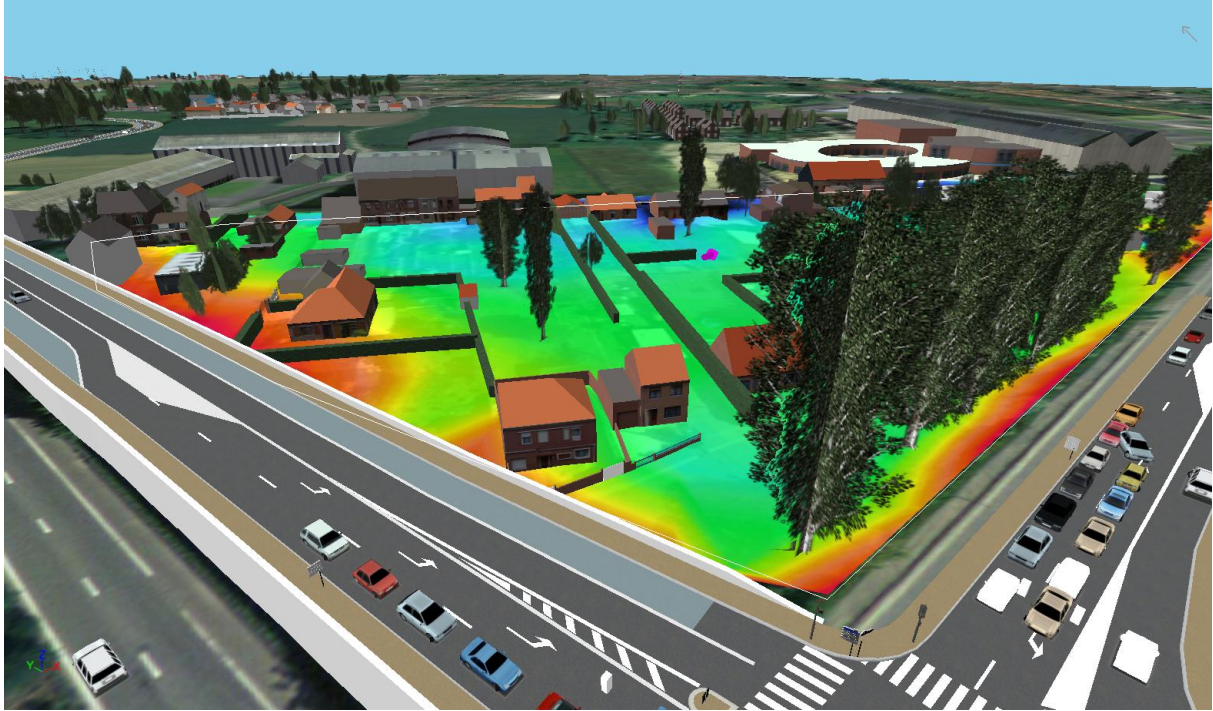


Figure 15: Exemple du couplage trafic / nuisances sonores sur le projet de déviation d'Aubry du Hainault (partenariat avec le Conseil Général du Nord). On distingue la carte de bruit dynamique, ainsi que la flèche rose représentant l'auditeur plongé dans une restitution sonore du trafic.

## 2.2. Couplage "hydrologie de surface / bilan énergétique urbain"

La tâche 2.2 rédigée initialement dans l'annexe scientifique ne correspondait pas suffisamment à la réalité scientifique des travaux des trois partenaires initiaux (ENPC/LEESU, IFSTTAR/GER, METEO/CNRM-GAME). En effet, les gammes d'échelles (spatio-temporelles) représentées dans les modèles hydrologiques (LEESU et GER) sont trop larges pour se réduire à une articulation pertinente avec le modèle de bilan TEB du CNRM.

Après de nombreux échanges, un consensus a été proposé sous la forme d'un nouveau texte, en adéquation avec la réalité des travaux actuels. Le volet 2.2 a donc été scindé en deux tâches et deux livrables pour illustrer chaque approche. Cette modification apparaît dans l'avenant signé en février 2013.

Cependant, et cela reste fondamental, les trois partenaires restent volontaires dans la mise en cohérence de leurs travaux et ont engagé des démarches pour avancer dans ce sens via notamment des réponses communes à des appels ANR. GER et le LEESU ont notamment convenu de fédérer à terme leurs approches dans le cadre du projet ANR **TrafiPollu** s'inscrivant dans la dynamique Ville Numérique, qui prévoit notamment :

- ⇒ que les modèles hydrologiques (Multi-Hydro et URBS) seront simultanément utilisés sur des aspects de pollution liée au trafic.
- ⇒ la thématique de la traversée d'échelle en hydrologie entre la rue, le quartier et l'agglomération.

### 2.2.1. Modélisation et paramétrisation hydrologique de la ville (long-terme et échelle de la ville)

#### *Contexte et objectifs*

Une modélisation cohérente et intégrée des processus hydrologiques et météorologiques pour représenter les flux d'eau et d'énergie est un préalable à l'étude des interactions entre la ville et son environnement atmosphérique. L'objectif de cette tâche était donc d'étudier l'impact climatique du végétal urbain : évaluer l'influence du développement urbain et de l'évolution climatique sur la micro-climatologie urbaine, sur les aménagements et les équipements urbains (gestion des eaux pluviales, la végétation, les eaux souterraines) ainsi que sur la qualité des milieux récepteurs (stress à la qualité, à la température ou au débit des rejets urbains). L'objectif scientifique a consisté à développer des outils de modélisation hydrométéorologiques nécessaires à cette étude d'impacts, en enrichissant le modèle de climat urbain TEB (Masson, 2000) utilisé par MÉTÉO France :

- ⇒ Amélioration de la représentation de la végétation urbaine : Introduction des toits et façades végétalisés et bilans thermiques et hydriques plus complets.
- ⇒ Amélioration de l'hydrologie urbaine.

#### *Partenariat et chercheurs principaux*

**Responsable** : Katia Chancibault

- ⇒ METEO-France / CNRM-GAME : Cécile de Munck, Aude Lemonsu
- ⇒ IFSTTAR/GER : Jean Marc Brun, Katia Chancibault, IFSTTAR.

L'amélioration du modèle TEB et La collaboration CNRM – IFSSTAR sur l'hydrologie et le modèle TEB a été initiée par un accord cadre LCPC-Météo France et s'est concrétisée dans les projets ANR **VegDUD** (Rôle du végétal dans le développement urbain durable) et **MUSCADE** (Modélisation Urbaine et Stratégie d'adaptation au Changement climatique pour Anticiper la Demande et la production Énergétique). Le travail de développement de modules pour un même modèle a demandé une forte interaction :

- ⇒ Le module « hydrologie » a été développé à l'IFSTTAR ;

- ⇒ Le module « Toits végétalisés » a été développé au CNRM ;
- ⇒ L'intégration des 2 modules dans une version provisoire de TEB a été réalisée par le CNRM, puis testée par le CNRM et l'IFSTTAR ;
- ⇒ L'intégration des modules dans une version officielle de TEB sera réalisée par le CNRM.

De nombreuses réunions de travail entre les 2 laboratoires, ainsi que des visites de plusieurs jours ont assuré une collaboration efficace. **Le projet Ville Numérique a ainsi permis de favoriser et consolider cette collaboration.**

### Principaux résultats

Le modèle urbain TEB (Masson 2000) a été initialement développé exclusivement pour les surfaces bâties. TEB était simplement couplé avec le modèle ISBA (Noilhan et Planton 1989) pour la modélisation de la végétation des zones résidentielles, mais sans interactions directes à micro-échelle. TEB a donc été amélioré (Lemonsu et al. 2012) afin d'intégrer explicitement la végétation basse (jardins) entre les bâtiments de sorte que les paramètres géométriques du canyon urbain sont plus réalistes (plus particulièrement, le canyon est plus large). Les calculs de rayonnement sont modifiés pour tenir compte des effets d'ombre des bâtiments sur la végétation, et des contributions de la végétation dans le bilan radiatif. Les flux turbulents sur la végétation sont toujours calculés avec ISBA mais à l'intérieur du code de TEB de façon à fournir à ISBA les conditions atmosphériques à l'intérieur du canyon et non pas au-dessus de la canopée. Enfin, les variables micro-climatiques dans la rue (température, humidité, vent) sont recalculées en incluant les contributions des jardins. La confrontation du modèle à des données expérimentales collectées dans deux cours semi-fermées aménagées selon des stratégies paysagères différentes (Lemonsu et al. 2012) montre de bonnes performances de TEB qui simule de meilleures températures de surfaces que dans sa version initiale, aussi bien pour les surfaces artificielles que pour la végétation, ainsi qu'un microclimat plus réaliste à l'intérieur du canyon.

D'autre part, une paramétrisation spécifique aux toitures végétalisées a été implantée dans TEB (de Munck et al. 2013). Ce travail a consisté à rajouter sur le toit structural, déjà existant dans TEB, un système caractéristique des toitures végétalisées extensives, constitué de deux compartiments de sols (une couche de drainage ou de rétention d'eau, surplombée d'une couche de substrat) et d'un compartiment de végétation (de type pelouse ou sédum). Les échanges surface/atmosphère ainsi que les processus énergétiques et hydriques sont modélisés grâce à ISBA (ISBA-DF, Boone *et al.*, 1999). Le couplage thermique est assuré entre les compartiments « naturels » (gérée par ISBA-DF) et artificiels (gérés par TEB) de la toiture au travers du flux de conduction de chaleur qui s'établit entre la couche de sol la plus profonde et la couche supérieure du toit structural avec laquelle elle est en contact. Grâce à des données expérimentales du CETE de l'Est (Nancy), certaines propriétés hydrologiques du modèle ont pu être calibrées. On constate en particulier que les meilleures performances sont obtenues grâce à des caractéristiques de matière organique pour la couche de drainage. L'évaluation du modèle montre qu'il est capable de simuler une évolution réaliste de l'humidité et de la température du sol au cours du temps. On relève malgré tout une tendance générale à la sous-estimation du contenu en eau de la couche de substrat associée à une surestimation du drainage à la base de la toiture.

La modélisation des échanges en eau dans TEB étaient initialement la moins avancée sachant que le modèle ne prenait en compte que les échanges en surface, en supposant l'absence de sol d'un point de vue hydrologique sous les routes et les bâtiments. Seuls les écoulements d'eau verticaux dans le sol pour le compartiment jardin étaient traités, et ce grâce à ISBA implanté dans la nouvelle version végétalisée de TEB. Ainsi, les développements pour l'amélioration du bilan hydrique en zone urbaine, dans le modèle TEB ont concerné principalement les processus liés aux écoulements verticaux de l'eau en surface ainsi que dans le sol. En surface, au niveau de la voirie, l'infiltration de l'eau à travers les surfaces imperméabilisées a été implémentée, modifiant l'équation d'évolution de stockage de l'eau de surface. Un paramètre a aussi été ajouté : il correspond au taux des surfaces imperméabilisées raccordées au réseau d'assainissement (pluvial ou unitaire)

afin de prendre en compte la notion de surfaces imperméabilisées effectives (toitures, voirie) (Sutherland, 1995). La version TEB-veg a introduit le sol sous la végétation (modules jardin) à l'aide du schéma ISBA pour la résolution des équations hydriques et thermiques. Dans TEB-Hydro, l'implémentation du sol sous la voirie et le bâti a aussi été faite à l'aide d'ISBA (ISBA-DF, Boone *et al.*, 1999), seules les conditions limites supérieures diffèrent du module jardin : sous la voirie, l'eau en entrée est l'eau infiltrée depuis la surface alors que sous le bâti, l'entrée est nulle. Les différents types de réseaux d'assainissement sont désormais documentés, afin de prendre en compte le drainage de l'eau du sol par ces réseaux. Enfin, un travail sur la discrétisation du sol permettant de prendre en compte les hétérogénéités hydriques des premières couches de sol sous la voirie, le bâti et les jardins a été fait.

### Valorisation

Ces différents développements permettant la représentation des toitures végétalisées ainsi qu'une meilleure résolution du bilan hydrique sont en cours d'évaluation dans le cadre du projet VegDUD. Ce projet vise à analyser l'impact de la végétation en milieu urbain dans différents domaines (hydrologie, micro-climat, thermique, ambiance).

Ce travail, autour d'un modèle couplé aux outils opérationnels ou de recherche de Météo-France, pourra à terme contribuer à la mise en place d'une future plateforme de modélisation à l'échelle urbaine, en couplant les aspects hydrologiques et météorologiques.

### Livrables

- ⇒ [2.2-L1] : Rapport technique « Enrichissement hydrologique du modèle TEB pour des applications à long-terme et à l'échelle de la ville » (incluant l'évaluation de politiques de végétalisation à grande échelle effectuée dans le projet ANR VegDUD)

### Références

- ⇒ Boone A., Masson V., Meyers T., and Noilhan J. 1999: The influence of the inclusion of soil freezing on simulations by a soil-vegetation-atmosphere transfer scheme. *Journal of Applied Meteorology*: 1544–1569.
- ⇒ de Munck C.S., Lemonsu A., Bouzouïdja R., Masson V., and Claverie R., 2013: Green roofs within TEB for modelling hydrological and energetic performances at building or city-scale. *Geoscientific Model Development*, en révision.
- ⇒ de Munck C., Brun J-M., Lemonsu A., and Chancibault K., 2013 : Un modèle hydro-climatique urbain pour l'évaluation de politiques de végétalisation à grande échelle. *Livrable 4.7- volet MODE, projet VegDUD*, ANR-09-VILL-0007.
- ⇒ Lemonsu A., Masson V., Shashua-Bar V., Erell E., and Pearlmutter D., 2012: Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance Model for modeling urban green areas. *Geoscientific Model Development*, 5, 1377-1393.
- ⇒ Masson V., 2000: A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models, *Boundary-Layer Meteorol*, 94, 357–397.
- ⇒ Noilhan J., and Planton S., 1989: A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Monthly Weather Review*, 117, 536-549.
- ⇒ Sutherland R.C., 1995: Methods for estimating the effective impervious area of urban watersheds. *Watershed Protection Techniques*, 2 (1), 282-284.

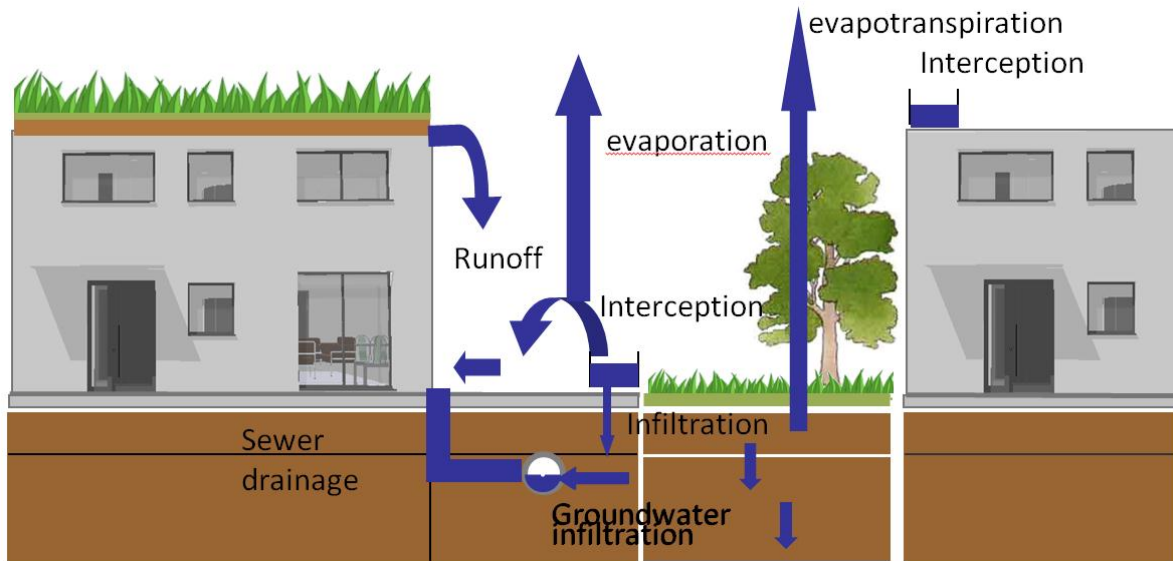


Figure 16: Enrichissement des processus hydrologiques du modèle TEP : ajout du sol sous les surfaces imperméabilisées (voierie, bâti). Prise en compte du réseau d'assainissement pour le transfert du ruissellement en surface et des infiltrations parasites.

## 2.2.2. Approche hydrologique de la ville multi-échelle (court-terme et échelles fines)

### Contexte et évolution des objectifs

Suite à la subdivision de la tâche 2.2, la tâche 2.2.2 est restée focalisée sur l'objectif initial d'une approche hydrologique multi-échelle pour mettre en valeur les effets de la variabilité des petites échelles sur les grandes, notamment pour les comportements extrêmes et les incertitudes résultantes pour les modèles grandes échelles. La plateforme Multi-Hydro a été largement développée et utilisée dans ce cadre.

### Partenariat et chercheurs principaux

**Responsable** : Daniel Schertzer (LEESU)

⇒ ENPC/LEESU et Chaire 'Hydrologie pour une Ville Résiliente : 3 doctorants (A. Giangola-Murzyn, J. Richard, A. Ichiba) et 3 encadrants (A. Gires, I. Tchiguirnskaia, D. Schertzer)

Cette tâche a fortement bénéficié des partenariats du projet EU-FP7 SMARTeST sur les outils et systèmes de résilience "smart" aux inondations (<http://www.floodresilience.eu>). Multi-Hydro est en effet devenu le modèle hydrologique distribué du projet pour estimer l'efficacité des systèmes de résilience. Plus récemment, il a bénéficié de partenariats similaires dans le cadre du projet EU-Interreg RainGain pour évaluer l'apport de l'accroissement de la mesure des précipitations (radars en bande X) pour la gestion des eaux urbaines (<http://www.raingain.eu/>) et du projet Blue Green Dream (dans le cadre de du programme Climate-KIC de l'EIT) sur la cogestion des infrastructures de l'eau et de l'environnement en vue de l'adaptation des villes au changement climatique (<http://bgd.org.uk>).

### Résultats principaux et moyens mis en œuvre

La plateforme Multi-Hydro avait été initialement conçue (El-Tabach et al. 2010) dans le cadre du projet EURANET CRUE Sucas mais a été fortement développée dans le cadre de Ville Numérique et SMARTeST. Elle est bâtie sur des principes simples (cf. Fig. 1):

- ⇒ **totale**ment distribuée pour pouvoir étudier les changements d'échelles
- ⇒ à **base physique**: évite tout calage (contrairement aux modèles dits conceptuels)
- ⇒ à **structure modulaire**, chacun des modules étant une adaptation d'un moteur OpenSource éprouvé et dont le développement est assuré par une communauté

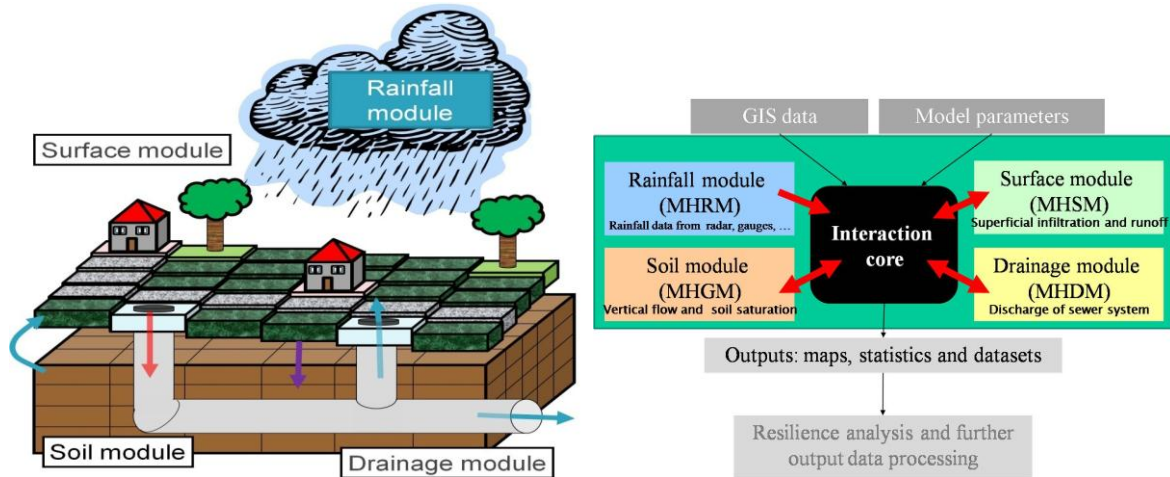


Figure 17: schémas de principe de la construction de la plateforme hydrologique Multi-Hydro

Ce dernier point a limité considérablement l'investissement dans le codage et de privilégier le travail sur:

- ⇒ le noyau d'interaction entre les différents modules, qui, par exemple, n'ont en général pas les mêmes pas de temps
- ⇒ les modules d'entrées et sorties, notamment pour les conversions vecteur/raster ce qui permet de travailler aisément avec des données et sorties GIS

Cette dernière caractéristique assure à la fois une très grande transportabilité, scalabilité et interopérabilité de Multi-Hydro. (cf. Fig. 2) Ainsi un des résultats opérationnels les plus importants qui a été acquis a été la mise au point du module MH-AssimTool, qui assure la conversion GIS/raster et permet ces fonctionnalités.

### Perspectives

Multi-Hydro est relativement assuré de poursuivre son développement dans le cadre de plusieurs projets. Il va d'une part avoir un développement vers le traitement de la qualité dans le cadre de l'ANR TrafiPollu, d'autre part dans le cadre de Blue Green Dream des modules de type météorologiques (ex. bilan radiatif et évapotranspiration) vont être testés et ajoutés. Enfin, le développement le plus important sera sans doute de systématiser l'utilisation de l'actuel module de désagrégation des précipitations pour toutes les données d'entrée dont la résolution spatiale est trop grossière. Cela a de plus l'intérêt de générer aisément des simulations d'ensemble permettant de quantifier les incertitudes résultantes, donc franchir un pas en direction de simulations stochastiques prenant pleinement en compte la variabilité sous-maille.

### Références et valorisation

Le développement de Multi-Hydro a fait l'objet de nombreuses présentations à des conférences internationales, qui ont conduit à un certain nombre de publications, dont:

- ⇒ Giangola-Murzyna, A., Gires, C.T. Hoang, I. Tchiguirinskaia, D. Schertzer (2012): Multi-Hydro physically based modelling to assess flood resilience across scales, case studies in Paris region. Proceedings of the 10th Urban Drainage Conference, Belgrade 3-7 Sept. 2012, Serbia.

- ⇒ Gires, A., A. Giangola-Murzyn, I. Tchiguirinskaia, D. Schertzer, S. Lovejoy (2013): Impacts of small scale rainfall variability in urban areas: a case study with 1D and 1D/2D hydrological models in a multifractal framework. *Urban Water Journal* (in press)
- ⇒ El Tabach, I., Tchiguirinskaia, O. Mahmood, D. Schertzer (2009): Multi-Hydro a spatially distributed numerical model to assess and manage runoff processes in peri-urban watersheds. *Proceedings Final Conference of the COST Action C22 Urban Flood Management, Paris 26-27 November, 2009, France*
- ⇒ Richard, J., Tchiguirinskaia, I., and Schertzer, D., 2012. GIS data Assimilation interface for distributed hydrological models. *Proceedings Hydro-Informatics Conference, Hamburg, 14-18 July 2012, Germany, 2012.*

L'approche multi-échelle a fait l'objet en particulier des publications suivantes:

- ⇒ Lovejoy, S. and D. Schertzer (2012). *The Weather and Climate: Emergent Laws and Multifractal Cascades*. Cambridge U.K., Cambridge University Press, 475 p.
- ⇒ Schertzer, D., I. Tchiguirinskaia, S. Lovejoy, P. Hubert. (2010). "No monsters, no miracles: in nonlinear sciences hydrology is not an outlier! ." *Hydrological Sciences Journal* 55(6): 965 - 979.
- ⇒ Tchiguirinskaia, I., D. Schertzer, C.T. Hoang, S. Lovejoy (2012). *Multifractal study of three storms with different dynamics over the Paris region Weather Radar and Hydrology*. R. Moore. Wallingford, IHAS Press: 421-426.

### Livrables

- ⇒ [2.2-L2] : Rapport technique et publication scientifique sur l'approche hydrologique de la ville sur processus court-termes et échelles fines

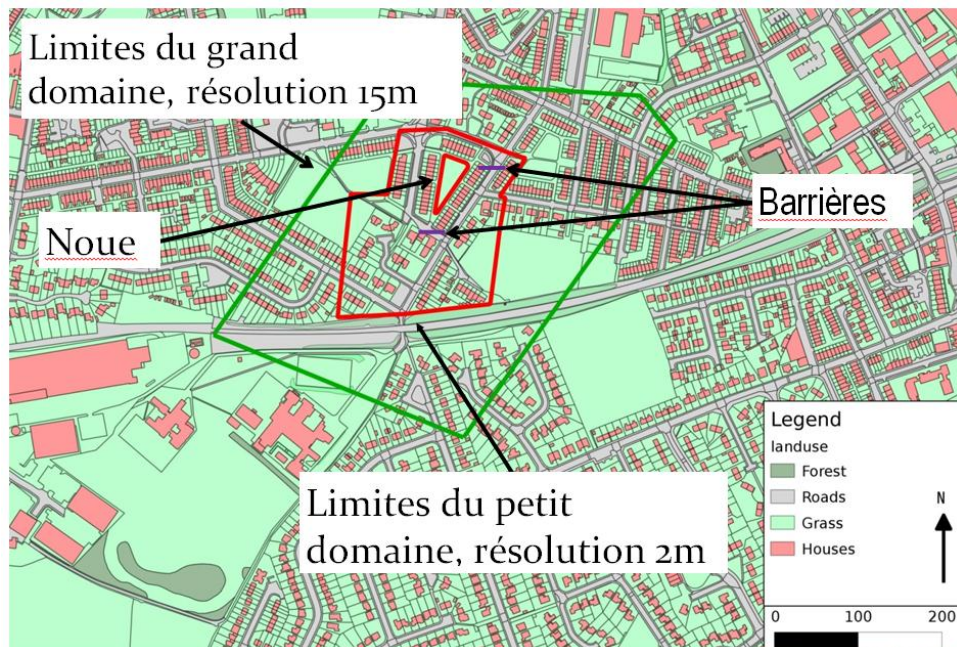


Figure 18: Exemple de zoom numérique (15m. à 2 m. de résolution) effectué par Multi-Hydro sur un système de résilience (cas d'étude à Manchester, UK).



## 2.3. Couplage « météorologie / climat / demande énergétique »

### 2.3.1. Amélioration du fonctionnement énergétique du modèle de climat urbain TEB

#### *Contexte et objectifs*

Le modèle Town Energy Balance (TEB, Masson 2000) est dédié au calcul des échanges d'énergie entre les surfaces urbaines à l'échelle d'un quartier ou d'une agglomération et les premières couches de l'atmosphère, ainsi qu'à la simulation du micro-climat à l'intérieur des rues et au voisinage des toits (Hamdi et Masson 2008). Grâce à une géométrie simplifiée mais encore assez réaliste (rue canyon), TEB permet de simuler les échanges entre la surface urbaine et l'atmosphère en fonction de paramètres morphologiques, thermiques et radiatifs de la ville. Les échanges thermiques entre les bâtiments et l'atmosphère impactent le climat urbain notamment par le biais des rejets des échangeurs de climatisation (De Munck et al., 2012).

L'objectif de cette tâche, tel que définit initialement, est d'intégrer un module de calcul des processus thermiques essentiels du bâtiment dans le modèle TEB pour être à même d'estimer la variation de la demande et de la production énergétique dans un climat changeant et les rétroactions entre le fonctionnement thermique du bâtiment et son environnement proche. Au cours des travaux, des étapes d'évaluation de la qualité du module ont été ajoutées.

#### *Partenariat*

**Responsable** : Grégoire Pigeon (ex METEO France / CNRM)

- ⇒ CNRM-GAME : Grégoire Pigeon.
- ⇒ CSTB : Kamel Zibouche, CSTB

Lors du projet ANR MUSCADE (2010-2013), le CNRM-GAME, le CSTB, et le MIT ont dans un premier temps développé un module de calcul des processus énergétiques du bâtiment directement intégré dans le modèle TEB. Pour ce travail, **Bruno Bueno (doctorant au MIT)** est venu travailler pendant 9 mois au CNRM-GAME (financement par le projet MUSCADE) avec Grégoire Pigeon. Une des premières étapes du travail a été de proposer puis vérifier un jeu d'hypothèse pour la représentation du bâtiment (toit plat, fenêtre unique par façade, une seule zone thermique etc...). La collaboration mise en place avec le CSTB a permis que Kamel Zibouche réalise ce travail avec le modèle d'énergétique du bâtiment EnergyPlus®. Puis l'implémentation de la représentation ainsi définie a été réalisée (B. Bueno et G. Pigeon) et une vérification sur des données de terrain (Toulouse et Athènes) a été réalisée.

Dans un deuxième temps, le groupe formé a repris et étoffé la méthodologie développée pour vérifier les hypothèses du module de calcul. Grégoire Pigeon et Kamel Zibouche l'ont alors appliqué sur un jeu de bâtiments plus larges et représentatifs de l'agglomération parisienne et pour deux climats différents (climat actuel et une représentation du climat du futur). Cette étape a permis d'évaluer la qualité du module de calcul de l'énergétique du bâtiment développé TEB sur un plus large ensemble.

Des moyens ont été mis en œuvre pour faciliter ce travail partenarial : réunions téléphoniques régulières ou visio-conférence (1 fois tous les 15 jours) avec partage de documents ; échanges de données par serveur ; plusieurs visites et séjours.

#### *Principaux résultats et valorisation*

Le principal résultat est le module de calcul énergétique du bâtiment intégré maintenant au sein du modèle TEB. Ce module peut ainsi être activé dans des simulations atmosphériques avec le modèle Méso-NH ou au sein de la plateforme ACCLIMAT.

Ce modèle est ainsi capable de calculer la consommation d'énergie de chauffage et de climatisation avec une précision de 5 kWh/m<sup>2</sup>/an and 3 kWh/m<sup>2</sup>/an respectivement. Ces niveaux représentent des écarts de moins de 15% pour ces deux consommations d'énergie.

Ce travail a aussi permis de démontrer la sensibilité de consommation aux échanges d'énergie sur la surface extérieure du bâtiment. En plus de la sensibilité aux échanges convectifs, nous avons démontré l'importance de bien représenter les températures de surface de l'environnement du bâtiment pour le calcul des échanges par rayonnement infrarouge. Dans le cas de bâtiments isolés des autres et peu isolé thermiquement, des simulations qui ne résolvent pas explicitement la température de surface de la route peuvent sous-estimer la demande de climatisation jusqu'à 18%.

Deux publications et un rapport ont permis de valoriser ce travail :

- ⇒ Bueno B, Pigeon G, Norford L, Zibouche K, Marchadier C. Development and evaluation of a building energy model integrated in the TEB scheme. *Geoscientific Model Development* 2012; 5: 433-448.
- ⇒ Pigeon G., K. Zibouche, B. Bueno, J. Le Bras, V. Masson. Evaluation of building energy simulations with the TEB model against EnergyPlus for a set of representative buildings in Paris. *Building and Energy. En révision*.
- ⇒ Bueno B. et Pigeon G. TEB BEM TECHNICAL REPORT<sup>1</sup>

### Quelques références

- ⇒ De Munck C, Pigeon G, Masson V, Meunier F, Bousquet P, Tréméac B, Merchat M, Poeuf P, Marchadier C. How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France? *Int. J. of Climatol.* 2012; doi: 10.1002/joc.3415.
- ⇒ Masson V. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorol.* 2000, 94: 357-397.
- ⇒ Hamdi, R. and V. Masson, 2008 : Inclusion of a drag approach in the town energy balance (TEB) scheme : offline 1-d validation in a street canyon. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **47**, 2627-2644.

### Livrables

- ⇒ [2.3-L1&L2] : Rapport technique "Development and evaluation of a Building Energy Model integrated into the TEB scheme" (livré le 29/04/2011)

---

<sup>1</sup> <http://www.cnr-meteo.fr/ville.climat/spip.php?article202>

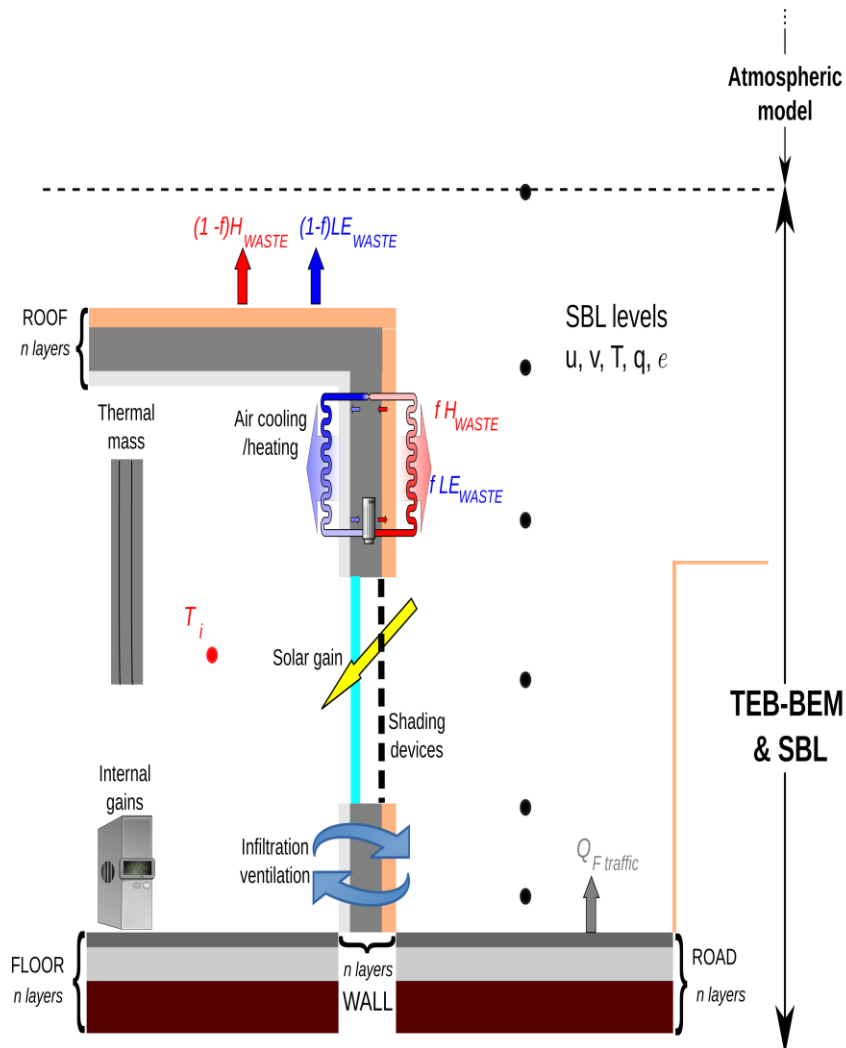


Figure 19: Schéma des échanges d'énergie entre le bâtiment (BEM) et le climat (TEB)

### 3. Axe « Interopérabilité »

#### 3.1. Echelles spatiales et temporelles

##### 3.1.1. Réflexion méthodologique

###### *Contexte et objectifs*

Dans le cadre de l'axe Interopérabilité du projet, il est rapidement apparu que la question des échelles était souvent critique lors du couplage de modèles traitant de différents compartiments urbains ou pour étudier un phénomène « traversant » différentes échelles urbaines. Dans le cadre du projet et en lien avec les réunions plénières du projet, il était donc prévu d'organiser des **séminaires scientifiques** à destination de l'ensemble des participants du projet et centrés sur cette question des échelles pour la modélisation en milieu urbain.

**Organisateur** : L. Leclercq (IFSTTAR / LICIT)

Tous les partenaires du projet ont participé aux séminaires, financés sur leurs frais de mission/déplacement du projet Ville Numérique.

###### *Résultats*

Il était prévu à l'origine d'organiser un à deux séminaires par an durant le projet. Du fait de la difficulté de trouver des intervenants pertinents et disponibles sur ces questions (notamment en externe) et des difficultés d'organisation en liaison avec les plénières, seuls deux séminaires ont finalement pu être organisés. Chaque séminaire sur une demi-journée était organisé autour de deux ou trois intervenants et d'un temps pour les discussions et les débats. Le premier séminaire a eu lieu le 16 novembre 2011 à Lyon avec deux experts extérieurs au projet mais travaillant spécifiquement sur le problème des échelles dans deux domaines en lien fort avec le projet : l'hydrologie et la dispersion atmosphérique. Le deuxième séminaire a eu le 25 septembre 2012 à Paris avec des intervenants faisant partie des partenaires de Ville Numérique et travaillant également spécifiquement sur les questions des échelles dans les domaines du trafic, les modèles de données urbains et l'hydrologie. Les programmes des deux séminaires sont mentionnés ci-dessous :

###### ⇒ Séminaire du 16 novembre 2011

- Problèmes des échelles pour la modélisation en hydrologie par **Isabelle Braud** (Cemagref)
- Problèmes des échelles pour la modélisation des écoulements d'air par **Richard Perkins** (Ecole Centrale de Lyon)

###### ⇒ Séminaire du 25 septembre 2012

- Problèmes de compatibilité entre les différentes formes de représentation du trafic aux différentes échelles urbaines par **Fabien Bonnefoi** (post-doctorant CSTB)
- Variabilité des champs environnementaux : observations et simulations par **Daniel Schertzer** (ENPC)
- Automatiser le changement d'échelle: recherches en généralisation automatique à l'IGN par **Cécile Duchêne** (IGN)

Il faut noter que les échanges scientifiques ont été très riches durant ces séminaires. Le point saillant reste que ce problème reste particulièrement complexe et pas forcément bien adressé. Cela reste un fort enjeu pour toute plateforme intégrée dédiée à la modélisation de l'environnement urbain, notamment pour assurer l'interopérabilité que ce soit d'un point de vue technique (plateforme) ou scientifique (compatibilité et cohérence lors de couplage de modèles).

## Valorisation

Ce séminaire n'avait pas vocation à avoir des résultats valorisables à court terme. Il s'agissait surtout de partager des connaissances et d'échanger dans un cadre pluridisciplinaire. Il faut cependant noter que la problématique des échelles a été reprise dans le cadre du projet ANR TRAFIPOLLU grâce aux premières discussions qui ont eu lieu dans le cadre de Ville Numérique. Ainsi, les travaux sur cette question vont pouvoir se poursuivre dans des recherches sur le couplage des modèles aux différentes échelles urbaines et sur la compatibilité entre les approches.

### 3.1.2. Étude des problèmes de compatibilité entre les différentes formes de représentation du trafic aux différentes échelles urbaines

#### Partenariat

**Responsable** : J. Soula (CSTB-MODEVE)

- ⇒ CSTB : Fabien Bonnefoi (post-doctorant), J. Soula (co-encadrant)
- ⇒ IFSTTAR/LICIT : Ludovic Leclercq, co-encadrant

#### Contexte et objectifs

Les modèles macroscopique et microscopique de trafic sont à juste titre utilisés dans de nombreux outils de simulation élaborés. Le CSTB, en collaboration avec l'IFSTTAR depuis 5 ans, cherche à intégrer ces modèles aux côtés de la maquette numérique et de moteurs de simulation environnementale afin de créer un outil innovant d'aide à la décision pour l'aménagement urbain. La combinaison de ces deux échelles dans un modèle dual améliore la qualité de la simulation, mais ces modélisations du trafic induisent des artefacts visuels à l'échelle des véhicules (véhicules qui se superposent, inter-distances non réalistes,...). Ces artefacts peuvent laisser penser à un défaut de réalisme des simulations malgré leur validité physique aux échelles supérieures. Pour régler ces problèmes, il est nécessaire d'étudier la compatibilité entre les échelles nanoscopiques (mécanique du véhicule et décision du conducteur) et microscopiques (déplacement des véhicules dans le flux). Plus précisément, il est important de comprendre quand et comment les indicateurs produits par les différentes échelles de simulations doivent être pris en compte afin de produire une simulation la plus crédible au regard de l'observateur et la plus juste d'un point de vue théorique.

Dans le cadre du projet Ville Numérique l'objectif de la tâche 3.2.2 était donc de proposer une méthode de modélisation du trafic à l'échelle nanoscopique qui soit valide aux échelles microscopique et macroscopique. Le moteur de simulation microscopique utilisé est le moteur **Symuvia** du LICIT qui implémente déjà un modèle dual micro-macro. L'intégration d'un troisième modèle de simulation à l'échelle nanoscopique avec le modèle Symuvia se fait aux travers de la plateforme logicielle (R&D) **eveCity** du CSTB. Celle-ci permet en effet, dans un contexte de réalité virtuelle, de coupler la maquette numérique urbaine, la simulation de trafic, et la simulation environnementale (bruit, pollution par exemple) pour une évaluation intégrée des nuisances urbaines.

#### Résultats

Après un état de l'art des méthodes permettant de changer d'échelle, l'une d'entre elles a été choisie puis modifiée pour viser les objectifs du projet. Celle-ci introduit la notion de « fenêtre macroscopique ». À l'intérieur de cette fenêtre, les véhicules sont contrôlés par le modèle nano, à l'extérieur, ils sont contrôlés par le modèle micro. Pour synchroniser les deux modèles, un concept de « zone intermédiaire » a été utilisé, permettant de prendre en compte les contraintes de la simulation dynamique. Les travaux réalisés présentent ainsi les bases d'un modèle de trafic compatible à trois échelles de simulation macro-micro-nano. Un premier démonstrateur a été intégré au sein du logiciel eveCity du CSTB intégrant la librairie Symuvia de l'IFSTTAR.

Les travaux ont également renforcé le partenariat entre l'IFSTTAR et le LICIT à travers un travail commun et à l'interface des deux plateformes.

### Valorisation et perspectives

Une publication cosignée IFSTTAR/CSTB accompagnant un poster a été acceptée et présentée au colloque du GIS MU 2012 (« La modélisation des flux au service de l'aménagement urbain ») à Lille, les 13 et 14 juin 2012.

- ⇒ BONNEFOI F., SOULA J., LECLERCQ L., BECARIE C. *Simulation multi-échelle du trafic routier et évaluation de l'aménagement urbain*. Colloque « La modélisation des flux au service de l'aménagement urbain ». 13-14 juin 2012.

Elle est disponible, ainsi que le poster, dans le dossier des livrables.

Les perspectives de valoriser ces travaux sont importantes, car outre une impression de réalisme supérieure pour un observateur du modèle micro, l'approche nano permet d'injecter un comportement (profils de conducteur) et des événements aléatoires, ajoutant une composante permettant de valider/évaluer des zones sensibles et stratégiques d'un réseau routier. La simulation de trafic peut donc à présent s'entendre sur 3 échelles et l'évaluation des impacts résultants en est encore enrichie.

### Références

- ⇒ [Olstam 2005] Janson Olstam, J. (2005). A model for simulation and generation of surrounding vehicles in driving simulators. Licentiate thesis at Institute of Technology, Linköpings Universitet, Norrköping. LiU-TEK-LIC 2005:58.
- ⇒ [Nguen That 2011] Thomas Nguen That, Jordi Casas, An integrated framework combining a traffic simulator and a driving simulator, The State of the Art in the European Quantitative Oriented Transportation and Logistics Research – 14th Euro Working Group on Transportation & 26th Mini Euro Conference & 1st European Scientific Conference on Air Transport, 2011.
- ⇒ [Soula 2010] Leclercq L, Becarie C, Soula J. Rapport final de recherche « Maquette Numérique Urbaine : modèles, réseaux et simulation de trafic » CSTB/TIDS, 2010.
- ⇒ [Wright 2002] Steve Wright, Nicholas J. Ward, Enhanced presence in driving simulators using autonomous traffic with virtual personalities. Presence, Teleoperators and virtual environments Vol. 11, No. 6, Pages 578-590 December 2002.
- ⇒ [Chevallier et Leclercq, 2008] Chevallier, E., Leclercq, L., 2008. Macroscopic investigation of microscopic merging models at unsignalized intersections. In Transportation Research Board, Washington DC.
- ⇒ [Michon 1985] J. A. Michon. A critical review of driver behavior models: what do we know, what should we do. In L.A. Evans & R. Schwing (eds). Proceedings of the International Symposium on Driver Behavior and Traffic Safety, General Motors Research Laboratories, New York, Plenum press, 1985.

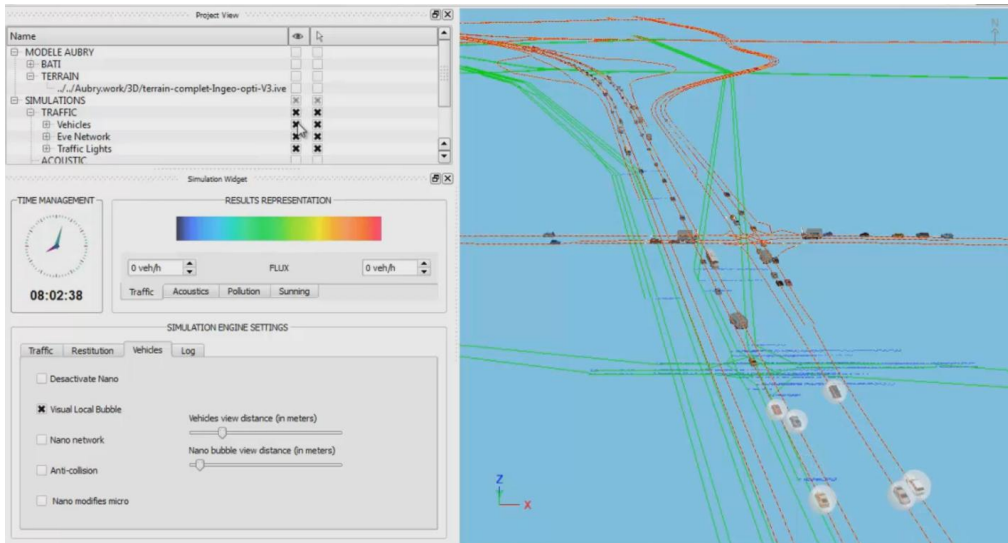


Figure 20: "Bulles nanos" dans lesquelles le véhicule est soumis à un comportement nanoscopique (logiciel eveCity + SYMUVIA). A droite, illustration



Figure 21: Interfaçage trafic / maquette numérique urbaine à différentes échelles de représentation (logiciel eveCity + SYMUVIA)

### 3.1.3. Interfaçage entre bases de données IGN et modèle météorologique

#### *Partenariat et chercheurs*

**Responsable** : Grégoire Pigeon (MÉTÉO France – CNRM/GAME)

- ⇒ IGN (MATIS) : Olivier Tournaire (post-doc ; 6 mois) et Nicolas Paparoditis (responsable)
- ⇒ MÉTÉO France (CNRM-GAME) : Grégoire Pigeon (encadrant) et Valéry Masson (responsable)

La majorité des travaux réalisés dans cette tâche se sont déroulés au sein du laboratoire MATIS de l'IGN (lieu d'accueil). Des échanges réguliers entre les différents intervenants sont cependant eu lieu. Par ailleurs, le début de la tâche a été marqué par une immersion d'une semaine du post-doctorant (basé au MATIS) dans l'équipe du laboratoire GAME à Toulouse. Cela a permis de travailler en lien étroit sur la définition des objectifs, et d'échanger sur les problématiques propres à chacune des disciplines.

#### *Objectifs de la tâche*

Le premier objectif de la tâche a consisté à automatiser la production de données d'entrée pour le modèle météorologique de méso-échelle SURFEX, à partir des bases de données disponibles à l'IGNF. L'analyse s'est concentrée sur les zones urbaines, avec des mailles d'analyse de l'ordre de quelques centaines de mètres. Un second objectif s'est intéressé à l'étude prospective des données nécessaires en entrée pour calculer des indicateurs intégrés dans les versions futures de SURFEX.

#### *Réalisations*

La tâche a été initiée par l'identification des paramètres en entrée des modèles météorologiques, et les liens les unissant aux bases de données géographiques. Cela a permis d'identifier les sources de données utiles : couches vectorielles d'hydrographie, de bâtiments, de routes et de végétation. Par ailleurs, à la date de réalisation de la tâche, le processus d'unification des bases de données topographiques de l'IGN n'était pas achevé. Il existait donc plusieurs sources possibles en fonctions des couches, notamment pour la couche de bâtiments (BD UNI / BD TOPO / BD PARCELLAIRE). Le choix s'est naturellement orienté vers la couche la plus riche géométriquement et qui contenait les attributs nécessaires aux calculs des indices.

Une fois les données identifiées, des prétraitements de ces dernières ont été nécessaires pour les rendre cohérentes et ne pas introduire d'artefacts dans le calcul des indices. En effet, par exemple, en fonction des sources de données, il pouvait exister un recouvrement non nul entre la couche de bâtiments et la couche de végétation. Il a donc été nécessaire de mettre en place des outils pour valider la cohérence des données en entrée, et les traiter si besoin.

Pour le calcul automatisé des indices, le choix a été fait d'intégrer le développement dans un logiciel OpenSource : le système d'information géographique QGIS. Un plugin a ainsi été développé en C++ permettant :

- ⇒ L'import des données
- ⇒ Leur nettoyage / mise en cohérence
- ⇒ La définition de la zone d'analyse et du pas de la grille pour l'agrégation des indices
- ⇒ Le calcul des indices

Le développement, outre son intégration dans QGIS a reposé uniquement sur des bibliothèques OpenSource : *boost* pour la généricité et la portabilité, *CGAL* pour l'algorithmie géométrique.



Enfin, nous avons mené une étude prospective sur les futurs indices nécessaires au modèle météorologique SURFEX, ce qui a permis de d'identifier les sources de données nécessaires, ainsi que les traitements à réaliser pour en extraire l'information nécessaire.

### Livrables

- ⇒ [3.2.3-L1] : Cahier des charges de l'interfaçage entre bases de données IGN et modèles Météo
- ⇒ [3.2.3-L2] : Rapport technique de la tâche
- ⇒ En outre, le code source et la documentation du plugin QGis développé est disponible sur simple demande à Olivier Tournaire ([olivier.tournaire@cstb.fr](mailto:olivier.tournaire@cstb.fr))

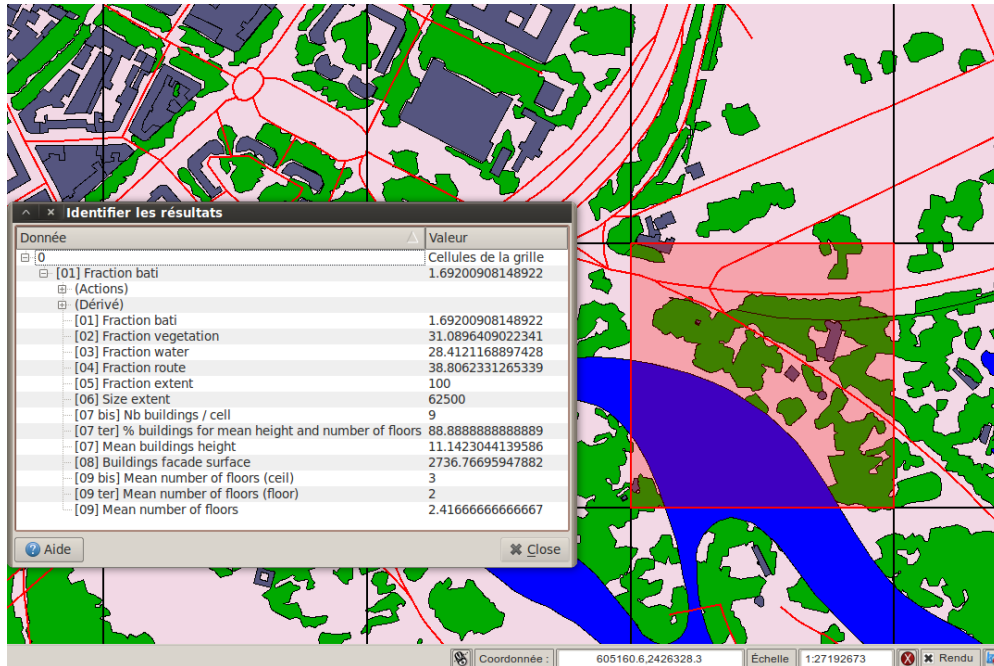


Figure 22: Exemple de lien entre bases de données topo IGN et maille du modèle METEO TEB

## 4. Valorisation

Outre les items évoqués pour chaque tâche scientifique, des montages originaux, destinés à la valorisation commune des résultats ont été lancés au cours du projet. Citons la plateforme UrbaConcept, qui n'a finalement pas abouti, ou plus récemment l'offre Decision3D, visant à proposer aux collectivités un processus intégré allant de l'acquisition 3D automatique à la simulation et l'aide à la décision, en passant par la sémantisation. Des services urbains innovants sont donc lancés ou en cours d'élaboration, sur la base de résultats du projet, à destination des acteurs de la ville, notamment les collectivités locales et les bureaux d'étude.

Pour la communauté scientifique, de nombreuses publications sont disponibles, ainsi que des jeux de données innovants pouvant donner lieu à des « benchmarkings » ou à des utilisations originales. En outre, de nombreuses conférences, séminaires, présentations, colloques, ont été organisés et ont accueilli des chercheurs du projet ou travaillant sur des thématiques proches, assurant une excellente dissémination scientifique des résultats des travaux.

### 4.1. Transfert technologique vers l'opérationnel

Côté transfert, on peut citer la spin-off Acute3D<sup>2</sup> créée en 2011 et issue des laboratoires du CSTB et de l'ENPC, qui aura bénéficié des travaux du volet 1.1 du projet. Une offre opérationnelle en partenariat avec Acute3D a d'ailleurs été lancée conjointement avec le CSTB en 2013, à destination des collectivités (Decision3D<sup>3</sup>).

Plusieurs projets pré-opérationnels ont été lancés suite à l'intérêt pour certains résultats du projet : c'est le cas notamment du projet « Simuroutes 59 » destiné à améliorer le processus de concertation et de décision à l'aide d'une plateforme intégrée trafic-nuisances (voir 2.1).

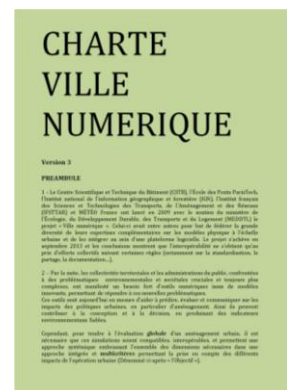
### 4.2. La charte Ville Numérique

Cette charte, dont le texte est en cours de finalisation, a le double objectif d'élargir le cadre de la collaboration initiale du projet et de décrire des principes qui sous-tendent l'interopérabilité des modèles numériques à l'échelle urbaine, dans une optique d'intégration et de valorisation commune dans une (ou plusieurs) future plateforme logicielle à l'échelle de la ville.

Initiative du consortium Ville Numérique, elle bénéficie du soutien du Commissariat Général au Développement Durable (MEDDE/CGDD). En ce sens, elle sera ouverte d'abord aux partenaires fondateurs, puis aura vocation à s'étendre à d'autres organismes publics (CEREMA, BRGM...), voire à d'autres acteurs publics ou privés de la sphère urbaine.

Elle vise un développement collectif plutôt qu'individuel à l'image d'une ville systémique, coordonnant des compétences variées et complémentaires autour d'une plateforme commune. Elle rejoint ainsi l'objectif initial de Ville Numérique en lui adossant des bases fortes et consensuelles sous la forme de 5 grands principes (interopérabilité, transparence, coopération, valorisation, sensibilisation) réunis dans un engagement de moyen. Un comité scientifique et technique est prévu pour appliquer ces principes, travailler à l'évolution de la charte et à l'élaboration d'une plateforme commune offrant des perspectives de valorisation attractives et facilitées aux signataires.

Sa version finale est prévue en fin d'année 2013, et la signature début 2014. Plutôt que de la décrire précisément, le texte (dans sa version de septembre validée globalement par l'ensemble des partenaires, à part quelques affinages juridiques) est disponible en annexe de ce rapport.



<sup>2</sup> <http://www.acute3d.com/>  
<sup>3</sup> [www.decision3d.fr](http://www.decision3d.fr)

### 4.3. Séminaire de restitution du 11/09/2013

Le CSTB, en tant que responsable scientifique du projet, a organisé avec le soutien du MEDDE une journée de clôture et de valorisation du projet en marge du colloque « ICT for sustainable places<sup>4</sup> » à Nice du 9 au 12 septembre 2013 (organisé par le projet européen **RESILIENT**, financé au FP7 et auquel le CSTB participe également). Les membres partenaires du projet Ville Numérique ont été invités gratuitement, ainsi que des personnalités du MEDDE et du METL, et les intervenants à la table ronde organisée l'après-midi. L'objectif de la journée, outre de clôturer officiellement le projet, était de susciter un dialogue entre les acteurs de la recherche ayant participé au projet ou intéressés, les acteurs publics (collectivités territoriales et Etat, élus et techniciens) et les acteurs économiques, sur les enjeux à venir.

Enfin, le ministère prépare un colloque « Ville numérique » au premier semestre 2014 à Paris et le séminaire de Nice a été l'occasion d'ouvrir certains sujets de réflexions préparatoires.

La matinée (séance privative Ville Numérique) était consacrée à la clôture du projet Ville Numérique et à la présentation des principaux résultats de recherche, notamment à destination du MEDDE. Les présentations des chercheurs sont disponibles dans les livrables du projet.

L'après-midi, la session ouverte à tous visait à mettre en perspective ces résultats :

- ⇒ **Synthèse des résultats et introduction à la charte Ville Numérique (J. Soula, L. Leclercq)**, puis a de mettre en perspective ces résultats, et de lancer une réflexion commune autour de la question centrale des données d'une table ronde intitulée
- ⇒ **Exposé sur le thème « Data/Open data pour la ville : état des lieux et économie du système » (Francois Bancilhon, CEO DATA PUBLICA)**
- ⇒ **Présentation d'un projet de Colloque « Ville numérique » à PARIS, 1<sup>er</sup> semestre 2014 (V. Wathier, MEDDE/CGDD/DRI)**
- ⇒ **TABLE RONDE « Les outils intégrateurs au service de la complexité : besoins, usages & limites » : J.-M. Tanguy (animateur, Direction de la recherche et de l'innovation, MEDDE), R. Lacombe (Responsable innovation, ETALAB), A. Labat (Directeur de l'incubateur PACA Est), E. Raoul (Secrétaire permanent du PUCA, MEDDE), J.C. Lardic (Directeur de la Stratégie et de la Prospective, Ville de Marseille)**
- ⇒ **Conclusions : l'avenir des pôles scientifiques et techniques, le CEREMA (P.F. Clerc, MEDDE/CGDD/DRI)**

---

<sup>4</sup> <http://www.resilient-project.eu/events>

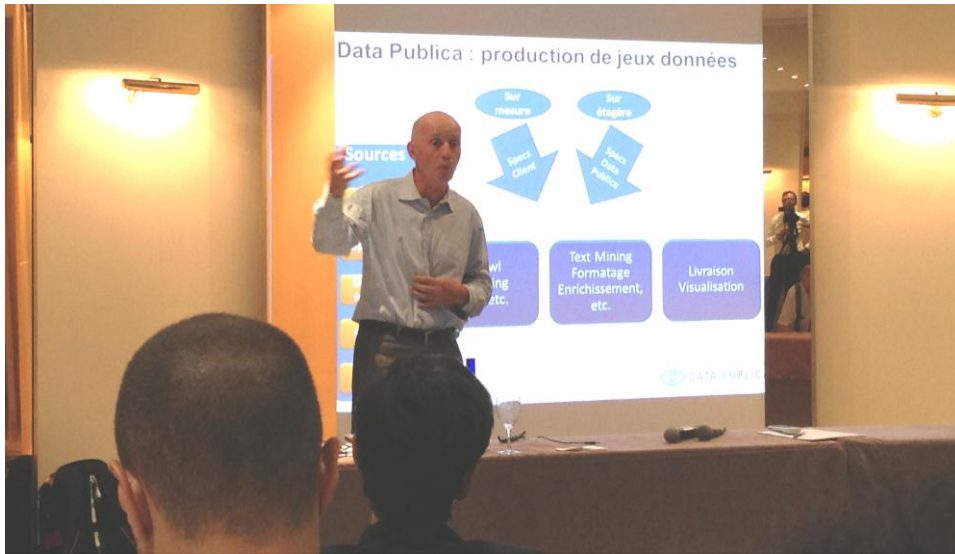


Figure 23: Francois Bancilhon (DATA PUBLICA)



Figure 24: V. Wathier, P.F. Clerc, J.-M. Tanguy (MEDDE/CGDD/DRI)



Figure 25: La table ronde avec de gauche à droite : A. Labat (Directeur de l'incubateur PACA Est), R. Lacombe (Responsable innovation, ETALAB), E. Raoul (Secrétaire permanent du PUCA, MEDDE), J.C. Lardic (Directeur de la Stratégie et de la Prospective, Ville de Marseille) et J.-M. Tanguy (animateur, Direction de la recherche et de l'innovation, MEDDE)

## 5. Bilan et perspectives

Le projet Ville Numérique porte une grande ambition dans son nom et ses objectifs. En effet, rappelons l'enjeu initial d'étudier et de développer différents éléments constitutifs d'une plateforme de simulation intégrée de la ville, destinée à devenir « un outil d'évaluation environnementale multicritères de projets d'aménagements urbains ». Quatre ans après, toutes les problématiques d'un tel exercice ont pu être pleinement appréciées par les chercheurs, et cela a permis de mettre en lumière les principaux enjeux du couplage de ces modèles entre eux, par exemple :

- ⇒ **Les modèles physiques manipulés durant le projet possèdent des degrés de maturité variés**, de l'approche théorique à l'implémentation dans un moteur de calcul. Ils ne sont donc pas tous prêts à une intégration logicielle, encore moins de façon interopérable
- ⇒ **Leurs échelles spatiales et temporelles sont différentes** selon l'approche :
  - Périmètre d'action (îlot, quartier, ville, territoire)
  - Granularité (prenons l'exemple de modèles de trafic qui se suffisent géométriquement de l'axe de la route contre des modèles d'impact qui nécessitent une information plus précise et élémentaires comme des voies subdivisées en multiple segments)
  - Temporalité dynamique, statique, statistique, moyennée...
  - Domaine de validité mathématique ou physique du modèle
- ⇒ **Leurs données d'entrée et de sortie sont extrêmement variées, ainsi que leurs formats supports**, souvent propriétaires, prototypes, mais rarement standardisés. Les incertitudes associées sont peu renseignées. Les échanges et partages de données sont peu ou pas prévus.

Ces contraintes ont tout d'abord réorienté certains volets du projet, comme le couplage « Hydrologie de surface / énergie / météo » (volet 2.2) qui a finalement opté pour une séparation en 2 tâches aux échelles spatio-temporelles différentes. Cependant elles ont surtout fortement remis en question l'idée de construire une plateforme logicielle durant le projet : les partenaires ont ainsi amorcé une réflexion transversale sur les caractéristiques que devraient réunir les modèles numériques afin de pouvoir s'interconnecter entre eux au sein d'une plateforme commune. C'est alors que l'idée de développer une série de recommandation a émergée : la réalisation d'une **charte « Ville Numérique »** est alors devenue un nouvel objectif à atteindre, s'enrichissant des discussions au fil des réunions de consortium. Le Commissariat Général au Développement Durable a soutenu cette initiative en 2011.

Par ailleurs, par-delà les avancées scientifiques importantes du projet, une **excellente dynamique** s'est créée au sein des réunions d'avancement « Ville Numérique », dégageant un noyau dur de chercheurs des différents établissements, échangeant sur l'état de l'art, les avancées de la recherche du secteur. Ces réunions furent fécondes de nombreuses initiatives telles que les **lancements des projets ANR TrafiPollu et Eurequa** en 2011, des réflexions sur les problèmes d'échelles avec de grands orateurs, des communications croisées avec les autres projets du PST Paris Est ou le GIS MU, des organisations d'évènement en commun, etc.

Ceci montre la réussite scientifique du projet, mais aussi et surtout la constitution d'un **collectif de personnalités impliquées et passionnées**, aux échanges souvent fertiles en idées et en projets, qui a réussi le pari initial du projet de rapprocher la recherche et les chercheurs sur un thème transversal et commun.

L'ensemble des partenaires s'accorde donc à dire qu'il serait judicieux de perpétuer la dynamique collective acquise, et de l'enrichir de nouveaux partenaires pour la développer et créer un véritable réseau transversal des TIC au service de la ville durable. Les perspectives suivantes sont évoquées :

- ⇒ **Elargissement aux autres organismes de recherche** (et au PST « Mobilité Durable »). La transformation du PST Paris-Est sur la Ville Durable (initialement géographiques) en Pôle « thématiques » facilitera d'ailleurs cet aspect.
- ⇒ **Elargissement du périmètre initial « environnemental »** de l'étude : vu la nature fondamentalement systémique de la ville, la notion de durabilité ne s'entendra que lorsque le bilan de **l'ensemble de ses systèmes** sera globalement positif (sociétaux, énergétiques, environnementaux...).
- ⇒ **Enrichissement de la réflexion autour des sciences humaines et sociales (SHS)**. Le projet mentionnait d'ailleurs un pilotage du projet « à la lumière des questions posées par les SHS ». Cela a peu été le cas, même si certains programmes de recherche des organismes prévoyaient souvent une interaction avec les SHS. Peut-être la distance entre les disciplines était-elle encore trop grande, et les vocabulaires trop différents. Aujourd'hui, la maquette numérique et ses possibilités de représentation contribuent à rapprocher de plus en plus ces domaines, qui se comprennent à travers le langage commun de la représentation urbaine.

La **charte Ville Numérique**, et son comité scientifique et technique, pourraient constituer le liant idéal à cet enrichissement. Ils serviraient la poursuite des objectifs ambitieux du projet, instaurant un cadre fait de principes forts et consensuels, permettant d'avancer plus vite, en confiance et ensemble vers l'interopérabilité et l'intégrabilité, avec à la clef des perspectives de valorisation attractives. Le groupe de travail associé serait ainsi dans une posture intéressante pour traiter de thématiques complexes comme l'Open et le Big Data, la transparence des résultats scientifiques et leur impact sur la société (économie, politique...).

Cette volonté commune de mettre en œuvre des « good practices » pourrait faire émerger à terme une notion de **label qualité des modèles numériques** (sans juger d'aucune manière de leur valeur scientifique). Le groupe de travail associé pourra ainsi traiter de sujets émergents et polémiques en lien fort avec la thématique de la ville numérique comme les sujets concernant le Big Data et l'Open Data, et plus généralement la transparence des résultats scientifiques et leur impact sur l'économie et la vie politique.

De **nouveaux financements** seront néanmoins à débloquer afin de donner la bonne impulsion à ces perspectives prometteuses. Outre des budgets ciblés « recherche » (ANR, FUI, Europe Horizon 2020...) prenant le relais sur les actions de recherche thématiques, il sera important de trouver de nouveaux supports pour l'animation et la pérennité du prochain collectif « Ville Numérique », dans une nouvelle posture destinée à apporter des éclairages sur l'utilisation du numérique comme support privilégié et innovant de la ville durable de demain. Certaines pistes ont déjà été évoquées avec les partenaires et le MEDDE et pourraient voir le jour d'ici 2014 – 2015 : WIKI Ville Numérique, atelier dédié au sein du GIS-MU, soutien du MEDDE à la constitution et l'animation du Comité scientifique et technique de la charte Ville Numérique, chaire éventuelle (ENPC) avec un industriel, colloque « Ville Numérique » organisé par le MEDDE (dernier trimestre 2014)...

*Je souhaite exprimer mes remerciements aux chercheurs du projet, malmenés jusqu'à la dernière seconde pour rendre en temps et en heure leurs contributions, avec qui l'ambiance de travail a toujours été très amicale et sympathique lors des réunions de projet. Des remerciements également pour le ministère (le CDGG et la DRI) qui m'a fait confiance en tant que coordinateur du projet, a soutenu et valorisé les travaux effectués, notamment l'initiative de charte Ville Numérique. Je remercie également Ludovic Leclercq pour ses conseils précieux tout au long du projet. Enfin, un remerciement particulier à Jean-Philippe Pons, premier coordinateur, pour sa contribution importante à l'amorçage et au lancement du projet. Julien Soula.*