



**HAL**  
open science

# La mutation des Systèmes d'Information Géographique 2000-2020

Erwan Bocher

► **To cite this version:**

Erwan Bocher. La mutation des Systèmes d'Information Géographique 2000-2020. Géographie. Université de la Rochelle, 2019. tel-02152396

**HAL Id: tel-02152396**

**<https://shs.hal.science/tel-02152396v1>**

Submitted on 13 Jun 2019

**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.

Université de La Rochelle

Habilitation à diriger des recherches

- discipline : Géographie -

- spécialité : Sciences de l'Information Géographique -

section CNU 23

# **La mutation des Systèmes d'Information Géographique 2000-2020**

Raisonner, représenter et partager les données  
géographiques au service de l'environnement

présentée par

Erwan BOCHER

**Composition du Jury :**

M. DEMORAES Florent  
M. DE VIRON Olivier  
M. GESQUIÈRE Gilles  
M. GIULIANI Gregory  
M. HÉGRON Gérard  
M. JOLIVEAU Thierry

Maître de conférences, HDR, Université Rennes II  
Professeur, LIENSs, La Rochelle  
Professeur, Université Lyon II  
Enseignant-Chercheur, Université de Genève, Suisse  
Directeur de Recherche, IFSTTAR, Nantes  
Professeur, Université Jean Monnet, Saint-Etienne

soutenue le 6 Juin 2019

Institut du Littoral et de l'Environnement  
Laboratoire LIENSs (UMR 7266)

Salle des Séminaires





*à Romain, Yuna et Elsa*

*à ma famille*

# REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier Florent Demoraes, Gilles Gesquière, Thierry Joliveau, Gérard Hégron, Gregory Giuliani et Olivier De Viron de m'avoir fait l'honneur de participer au jury. J'ai une pensée particulière pour ce dernier qui m'a fait confiance et accepté d'être mon garant.

Je suis reconnaissant à Gérard Hégron, directeur de l'Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville de 2000 à 2011 de m'y avoir accueilli. J'ai savouré nos nombreux débats sur les méthodes et outils de l'information géographique. Je le remercie de m'avoir permis de construire les bases d'une plate-forme SIG au service de la recherche.

J'ai une pensée profonde pour l'équipe du Bassin Versant du Jaudy-Guindy-Bizien (dans le Trégor bien entendu), particulièrement Koulman Mathieu et Maël Reboux. Ce fut un cadre idéal pour expérimenter, confronter la première ébauche d'un système d'information géographique ouvert, évolutif au service des acteurs de l'environnement.

Je n'oublie pas mes compagnons de route des communautés open source notamment OpenJump, gvSIG mais également l'association Projet-SIGLE (Système d'Information Géographique Libre Expérimental). J'ai une pensée pour mon fidèle collègue et ami Olivier Ertz, professeur à la HEIG-VD avec qui j'ai partagé de longues discussions sur les standards et apprécié cette volonté commune de mettre les méthodes et les outils de la recherche au service du plus grand nombre. Merci à Daniel Rappo, directeur de l'Institut d'Ingénierie des Médias, pour sa bienveillance, son écoute attentive et son sens de l'hospitalité inégalé qui nous ont permis de garder le cap dans les tempêtes de la standardisation. Le chalet au bord du lac d'Yverdon-les-Bains aura toujours été d'un grand réconfort.

Ce travail est le fruit d'une aventure scientifique pluridisciplinaire collective qui m'a amené à découvrir de nouvelles disciplines. Je pense à la micro-climatologie urbaine avec l'équipe de Valéry Masson du Centre National de Recherches Météorologiques ou encore l'Unité Mixte de Recherche en Acoustique Environnementale dirigée par Judicaël Picaut. Nos collaborations ont été le terreau indispensable pour développer mon projet scientifique et faire émerger de nouvelles questions de recherche. Je les remercie pour la confiance qu'ils m'ont toujours accordée. J'ai une pensée également pour ma collègue géographe Nathalie Long, chargée de recherche au CNRS en qui j'ai toujours trouvé le soutien pour défendre l'idée d'une science de l'information géographique.

Ces remerciements seraient incomplets si je n'avais pas une pensée pour l'équipe de collègues qui m'entoure : Sylvain Palominos, Elizabeth Le Saux, Jonathan Lao, Matthieu Gousseff, Jérémy Bernard et Gwendall Petit. Compagnon du premier jour, Gwendall a participé activement aux succès et aux échecs de la plate-forme *OrbisGIS* et de ses applications, résistant parfois à des idées un peu folles. Je le remercie pour sa patience et espère avec force que dans un avenir très proche, son travail sera récompensé par de réelles perspectives professionnelles.

J'ai enfin une pensée pour les ingénieurs, personnels techniques et administratifs permanents et contractuels sans lesquels la recherche serait bien en panne.

L'ultime remerciement va au Directeur de l'IUT de Vannes, Patrice Kermorvan ainsi qu'à l'Université de Bretagne Sud et aux collègues du LAB-STICC qui m'accueillent depuis juin 2015.



# TABLE DES MATIÈRES

|   |            |
|---|------------|
| <b>1.PRÉAMBULE.....</b>   | <b>11</b>  |
| <b>2.CURRICULUM VITAE.....</b>  | <b>13</b>  |
| 2.1 Etat civil.....   | 13         |
| 2.2 Parcours professionnel.....   | 13         |
| 2.3 Distinctions.....   | 14         |
| 2.4 Activités d'encadrement de la recherche.....                                    | 14         |
| 2.5 Activités d'enseignement et de formation pour et par la recherche.....          | 17         |
| 2.6 Administration et animation de la recherche.....                                | 19         |
| 2.7 Organisation de manifestations scientifiques.....                               | 32         |
| 2.8 Évaluation.....   | 33         |
| 2.9 Vulgarisation – Interventions publiques.....                                    | 35         |
| <b>3.PRODUCTION SCIENTIFIQUE.....</b>   | <b>36</b>  |
| 3.1 Articles dans des revues répertoriées avec comité de lecture.....               | 36         |
| 3.2 Directions d'ouvrages.....  | 37         |
| 3.3 Ouvrages scientifiques.....   | 37         |
| 3.4 Articles dans des revues non répertoriées avec comité de lecture.....           | 38         |
| 3.5 Communications avec actes dans un congrès international.....                    | 38         |
| 3.6 Communications sans actes.....  | 41         |
| 3.7 Conférences dans un congrès à l'invitation du comité d'organisation.....        | 42         |
| 3.8 Affiches / posters.....   | 42         |
| 3.9 Articles de vulgarisation.....  | 43         |
| 3.10 Outils de recherche.....   | 43         |
| 3.11 Autres publications.....   | 43         |
| <b>4.LA MUTATION DES SYSTÈMES D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE.....</b>                   | <b>45</b>  |
| 4.1 D'une organisation en silo aux systèmes intégrés, ouverts et collaboratifs..... | 46         |
| 4.2 De l'analyse spatiale au SIG <i>OrbisGIS</i> .....                              | 51         |
| 4.3 Vers un nouveau standard pour la cartographie.....                              | 83         |
| 4.4 Des écosystèmes ouverts pour et par la recherche.....                           | 102        |
| 4.5 Bilan et perspectives scientifiques.....  | 143        |
| <b>5.BIBLIOGRAPHIE.....</b>   | <b>151</b> |
| <b>6.ANNEXES.....</b>   | <b>165</b> |

# INDEX DES FIGURES

|   |    |
|---|----|
| Figure 1: Organisation scientifique du LAB-STICC.....   | 24 |
| Figure 2: Usage des indicateurs dans le contexte des ScIG.....  | 25 |
| Figure 3: Schématisation de l'approche data-driven.....   | 26 |
| Figure 4: Les activités de l'Atelier SIG.....   | 29 |
| Figure 5: Schéma du modèle de données pour les géométries.....  | 54 |
| Figure 6: Architecture de GDMS.....   | 55 |
| Figure 7: Le modèle de données Simple Feature de GDMS.....  | 56 |
| Figure 8: Le modèle de données Simple Feature de GDMS étendu avec l'objet Raster.....   | 57 |
| Figure 9: Analyse de l'évolution des surfaces urbanisées autour d'un réseau hydrographique théorique<br>.....   | 59 |
| Figure 10: La plate-forme OrbisGIS : visuel cartographique et console SQL.....  | 64 |
| Figure 11: Architecture et modules de l'IDS Cartopolis.....   | 66 |
| Figure 12: Affichage des fiches de métadonnées d'EvalPDU.....   | 67 |
| Figure 13: Principe d'exécution d'un WPS avec un retour par valeur.....   | 68 |
| Figure 14: Principe d'exécution d'un WPS avec un retour par référence.....  | 68 |
| Figure 15: Composants et fonctionnement du serveur de WPS d'OrbisGIS.....   | 70 |
| Figure 16: Synoptique d'utilisation du serveur WPS d'OrbisGIS.....  | 71 |
| Figure 17: Architecture de la plate-forme OrbisGIS.....   | 72 |
| Figure 18: Interface graphique par défaut d'OrbisGIS "Bureautique".....   | 73 |
| Figure 19: Interface d'OrbisGIS "Bureautique" adaptée pour l'analyse des données.....   | 73 |
| Figure 20: Architecture du serveur WPS d'OrbisGIS.....  | 74 |
| Figure 21: Fonctionnement du service WPS d'OrbisGIS.....  | 75 |
| Figure 22: Page d'accueil du service WPS en ligne.....  | 75 |
| Figure 23: Exemple de génération automatique d'une page de présentation des scripts WPS.....  | 75 |
| Figure 24: Les standards au sein de l'architecture de la plate-forme OrbisGIS.....  | 77 |
| Figure 25: Exemple de requêtes WMS : à gauche pour visualiser une carte avec un style par défaut à<br>droite pour visualiser cette même carte avec un style fourni par le client..... | 85 |
| Figure 26: Carte avec un symbole bivarié.....   | 87 |
| Figure 27: A gauche une carte avec des hachures à droite une carte par densité de motifs.....   | 88 |
| Figure 28: Exemple de symboles composites utilisés pour les cartes marines.....   | 88 |
| Figure 29: Les étapes de l'élaboration d'une carte inspiré de (Nicolas & Christine, 2013).....  | 91 |
| Figure 30: Principe d'organisation du modèle conceptuel de symbologie.....  | 93 |
| Figure 31: Diagramme UML du noyau du modèle conceptuel de symbologie (Core symbology).....  | 93 |
| Figure 32: Application du concept d'extension pour les modèles de données SimpleFeature et<br>GridCoverage.....   | 95 |
| Figure 33: Diagramme de séquence du moteur de rendu d'OrbisGIS.....   | 96 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure 34: (a) et (b) interfaces graphiques thématiques.....   | 97  |
| Figure 35: Carte par symboles proportionnels affrontés.....  | 98  |
| Figure 36: Carte par symbole bivarié.....  | 98  |
| Figure 37: Carte par densité de points.....  | 99  |
| Figure 38: Carte avec des hachures.....  | 99  |
| Figure 39: Carte par interpolation de couleurs.....  | 100 |
| Figure 40: Synoptique du projet MApUCE.....  | 104 |
| Figure 41: Etapes de création des unités spatiales de références.....  | 105 |
| Figure 42: Les échelles géographiques pour le calcul des indicateurs.....  | 106 |
| Figure 43: Liste des indicateurs sélectionnés pour les bâtiments.....  | 107 |
| Figure 44: Liste des indicateurs sélectionnés pour les blocs.....  | 108 |
| Figure 45: Liste des indicateurs sélectionnés pour les USR (RSU).....  | 108 |
| Figure 46: Schéma du modèle physique pour le stockage des indicateurs.....   | 109 |
| Figure 47: Exemple de calcul de l'indice de forme en SQL.....  | 109 |
| Figure 48: Synoptique de l'enchaînement des scripts SQL pour le calcul des indicateurs morphologiques.....   | 111 |
| Figure 49: Architecture de pilotage des scripts SQL.....   | 112 |
| Figure 50: L'interface graphique pour piloter la chaîne de traitements (à gauche en sélectionnant une liste de code INSEE à droite en sélectionnant le nom d'une unité urbaine).....   | 112 |
| Figure 51: Visualisation cartographique des indicateurs morphologiques stockés dans la base de référence.....  | 113 |
| Figure 52: Extraits cartographiques de deux indicateurs morphologiques.....  | 114 |
| Figure 53: Les 11 types d'organisation du tissu urbain.....  | 115 |
| Figure 54: Classification manuelle des bâtiments à partir d'une photographie aérienne.....   | 116 |
| Figure 55: Extrait de la classification du tissu urbain obtenu par apprentissage sur Toulouse.....   | 118 |
| Figure 56: Simulation de la consommation énergétique des bâtiments pour l'agglomération de Toulouse sur une grille de 250 m X 250 m : à gauche pour les mois de décembre, janvier et février ; à droite pour les mois de juin, juillet et août (Schoetter et al., 2017)..... | 119 |
| Figure 57: Architecture et composants de la plate-forme SIG MApUCE.....  | 120 |
| Figure 58: Copies d'écran du portail cartographique MapUCE à gauche une carte représentant l'indicateur de compacité moyenne sur l'unité urbaine de Vannes, à droite la classification du tissu urbain.....  | 121 |
| Figure 59 : Carte des niveaux sonores représentant l'indicateur de bruit Lden sur une journée complète.....  | 124 |
| Figure 60 : Carte des zones de dépassement de la valeur limite réglementaire de 68 dB(A) pour l'indicateur Lden.....   | 124 |
| Figure 61: Architecture de NoiseModelling.....   | 127 |
| Figure 62: Maillage de Delaunay contraint et adaptatif pour la détermination des récepteurs (à gauche le maillage, à droite les récepteurs).....   | 127 |
| Figure 63: Calcul de la propagation acoustique : à gauche en champ direct à droite en champ réfléchi d'ordre 1.....  | 128 |
| Figure 64: Carte des niveaux sonores représentant l'indicateur de bruit Lden.....  | 128 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure 65: Cartographie en pseudo 3D de la valeur maximale de bruit pour une journée calculée en façade d'un bâtiment.....   | 129 |
| Figure 66: Cartographies des pourcentages d'habitants exposés à un seuil de dépassement de 68 dB .....   | 131 |
| Figure 67: L'application NoiseCapture en cours d'enregistrement. De gauche à droite affichage en mode « Spectre » et « Spectrogramme » et suivi cartographique du trajet en cours de mesure..... | 134 |
| Figure 68: Affichage graphique et géographique des indicateurs calculés à l'issue de l'enregistrement .....  | 134 |
| Figure 69: Architecture d'OnoMap.....  | 136 |
| Figure 70: Modèle physique de la base de données OnoMap.....   | 137 |
| Figure 71: Cartographie par hexagones des indicateurs acoustiques et représentation des points de mesures.....   | 138 |
| Figure 72: Distribution du nombre de mesures à l'échelle du globe.....   | 138 |
| Figure 73: Distribution du nombre de mesures à l'échelle de l'Europe.....  | 139 |
| Figure 74: Extrait des statistiques générales disponibles dans le navigateur cartographique.....   | 139 |
| Figure 75: Bilan des contributions au projet NoiseCapture après 12 mois d'utilisation.....   | 140 |
| Figure 76: Mesure de bruit réalisée dans la cafétéria du nouveau bâtiment de l'université Polytechnique de Milan (emprise en rouge).....   | 141 |
| Figure 77: Organisation de l'infrastructure de recherche Noise-Planet.....   | 142 |



# INDEX DES TABLEAUX

|  |     |
|--|-----|
| Tableau 1: Exemple de fichier SLD avec sa représentation.....  | 84  |
| Tableau 2: Les types de cartes expérimentés avec les standards SE et SLD.....  | 86  |
| Tableau 3: Extraits d' interface graphique pour les 6 applications testées.....  | 87  |
| Tableau 4: Categorize (à gauche) vs Rule (à droite ) pour la construction d'une carte par aplats représentant le nombre d'habitants par km <sup>2</sup> par canton en 1968.....  | 90  |
| Tableau 5: Définition des éléments concrets du SCCM.....   | 94  |
| Tableau 6: Liste des informations contenues dans la table des USR (RSU en anglais).....  | 105 |
| Tableau 7: Statistiques sur la base de données à l'issue de l'exécution de la chaîne de traitements....  | 113 |
| Tableau 8: Valeurs utilisées pour classer les bâtiments en fonction de la typologie.....   | 115 |
| Tableau 9: Liste des variables prédictives retenues pour chaque bâtiment.....  | 117 |
| Tableau 10: Liste des scénarios testés.....  | 130 |
| Tableau 11: Liste des variables d'entrée obtenues avec le modèle de trafic et projetées sur les tronçons routiers de la BD Topo.....   | 130 |
| Tableau 12: Répartition de la population par classes de niveau sonore et scénarios.....  | 130 |
| Tableau 13: Description du fichier « meta.properties ».....  | 135 |
| Tableau 14: Description du fichier « track.geojson ». Les propriétés sont associées à chacun des points de mesure (à chaque seconde) dans un même enregistrement (i.e. un même trajet). En l'absence de localisation GPS, certaines données (marquées du symbole *) ne sont pas renseignées..... | 135 |

# 1 PRÉAMBULE

Depuis le début des années 2000, le paysage de l'information géographique (IG) a vécu des changements profonds. Portés par l'évolution des technologies de l'information et de la communication, et par une volonté de partager des connaissances, les Systèmes d'Information Géographiques (SIG) ont glissé de solutions monolithiques, installées localement, utilisant peu les bases de données, fonctionnant en silo, en services communicants, distribués, accessibles en tout lieu et en tout temps. Cette transformation a été impulsée et coordonnée par les instances de normalisation tels que le comité technique *TC211* de l'*International Standardisation Organisation* ou encore l'*Open Geospatial Consortium*. Ces deux organismes ont permis de faire converger des réflexions entre usagers et techniciens pour définir des modèles abstraits ainsi que des formats inhérents de description, de représentation et d'interrogation de l'information géographique. Les standards de l'information géographique ont constitué la clé de voûte d'un nouveau dispositif appelé Infrastructure de Données Spatiales (IDS): un ensemble organisé de services logiciels dialoguant à l'aide de standards et dont l'objectif est de faciliter la recherche et l'utilisation des données géographiques.

Menée tambour battant par les autorités publiques, la mise aux « normes » des SIG trouve ses premières applications dans les domaines de l'environnement. Ainsi dans la continuité de la convention d'Aarhus sur l'accès à l'information, la participation du public au processus décisionnel et l'accès à la justice en matière d'environnement, le Parlement européen se dote en 2007 de la Directive *Inspire* qui vise à appuyer la politique environnementale de l'Union européenne par l'établissement d'une infrastructure européenne de données géographiques. Faciliter la prise de décision dans un cadre démocratique, décloisonner les informations entre les acteurs publics et les citoyens en seront les fondements.

Pressée par l'appétence de notre société pour d'avantage de transparence et de justice, cette volonté de faciliter le partage des informations questionne également les sciences de l'information géographique. En effet, les problèmes environnementaux trouvent leur cause dans des phénomènes qui sont interdépendants, multi-scalaires. Leur compréhension nécessite d'interagir avec de multiples acteurs. Elle impose de mobiliser des sources de données variées qui doivent permettre de concevoir des analyses géographiques pour comprendre les phénomènes en jeu et les cartographier. Indiscutablement, elle requiert de nouvelles manières de travailler ; plus systémiques. Elle passe par une meilleure circulation de l'information géographique qui ne se réduit pas uniquement à articuler un ensemble d'outils entre eux. L'ensemble du cycle de vie de la donnée géographique doit être intégré depuis sa source (capteurs) jusqu'au processus de restitution (cartes).

Dans cet esprit, ce mémoire d'habilitation à diriger des recherches investit plusieurs champs de recherche à l'interface entre la géographie et l'informatique. Ils portent aussi bien sur des aspects de conceptualisation et de modélisation informatique que sur des applications dans le domaine de l'analyse spatiale, de la cartographie et de la modélisation de phénomènes physiques. Les travaux que nous présentons cherchent à faciliter la circulation et le traitement des informations géographiques pour répondre aux défis environnementaux : collecter, organiser, traiter et diffuser les données pour observer, restituer, favoriser le dialogue et la concertation. Pour cela, nous proposons une nouvelle plate-forme SIG, *OrbisGIS*, modulaire et interopérable. *OrbisGIS* est basée sur des composants

abstraites (spécifications), techniques (bibliothèques informatiques) qui s'assemblent, se spécialisent pour répondre à différents usages. *OrbisGIS* a servi de laboratoire pour mettre à l'épreuve les standards de l'information géographique et en proposer des adaptations notamment en ce qui concerne les langages pour l'analyse spatiale et la cartographie. Ces travaux sont concrétisés par la construction de deux systèmes d'information interopérables, l'un pour l'étude du climat urbain et le second pour l'évaluation du bruit dans l'environnement.

## 2 CURRICULUM VITAE

### 2.1 Etat civil

**Bocher Erwan**

**Date de naissance :** 15 / 08 / 1974

Marié, 2 enfants (11 ans et 9 ans)

**Adresse personnelle:**

5 place Eugène Renaudeau

56350 Saint-Jean-La-Poterie

**Messagerie électronique :** erwan.bocher dot univ-ubs.fr

**Titre :** Ingénieur de recherche en Sciences de l'Information Géographique

**Date d'entrée au CNRS :** Décembre 2010

**Laboratoire de rattachement :** LAB-STICC CNRS, UMR 6285

**Adresse professionnelle :**

Equipe DECIDE

Institut Universitaire de Technologie de Vannes

8, Rue Montaigne

BP 561 56017 Vannes Cedex

**Diplôme universitaire le plus élevé :**

2005 → Doctorat de Géographie

Impacts des activités humaines sur le parcours des écoulements de surface dans un bassin versant bocager : essai de modélisation spatiale. Application au Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien (22), Université de Rennes 2.

### 2.2 Parcours professionnel

**2015 – aujourd'hui** → Ingénieur de recherche en Sciences de l'Information Géographique au CNRS.

Unité d'affectation : Lab-STICC CNRS UMR 6285, Équipe DECIDE

**2010 – 2015** → Ingénieur de recherche en traitement, analyse et représentation de l'information spatiale au CNRS.

Unité d'affectation : IRSTV CNRS FR 2488.

**2008 – 2010** → Ingénieur de recherche en traitement, analyse et représentation de l'information spatiale au CNRS (CDD).

Unité d'affectation : IRSTV CNRS FR 2488.

**2006 – 2008** → Ingénieur de recherche en traitement, analyse et représentation de l'information spatiale à l'Ecole Centrale de Nantes (CDD sur le projet MeigeVILLE : Modélisation environnementale intégrée et gestion durable de la VILLE).

Unité d'affectation : IRSTV CNRS FR 2488.

**2004 – 2006** → Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche à temps complet (ATER), Université Rennes 2 Haute-Bretagne, département de géographie.

**2001 – 2004** → Chargé de mission scientifique en environnement au Syndicat Intercommunal d'Adduction d'eau du Trégor maître d'ouvrage de l'opération Dour Hon Douar, Bassin versant du Jaudy-Guindy-Bizien.

## **2.3 Distinctions**

### **2011**

- 1er prix de la commission européenne INSPIRE concours européen CEN/ TC 287 SPARX education award.

Travail présenté par Antoine Gourlay, élève ingénieur de l'Ecole Centrale de Nantes. [http://inspire.ec.europa.eu/events/conferences/inspire\\_2011/](http://inspire.ec.europa.eu/events/conferences/inspire_2011/)

- 1er prix du concours de géovisualisation et de cartographies dynamiques du Festival International de Géographie Saint-Dié des Vosges.

Travail présenté par Toinon Vigier, élève ingénieur de l'Ecole Centrale de Nantes.

### **2006**

3ème prix dans la catégorie « Structures Publiques et Collectivités » aux trophées du livre pour le logiciel OpenJUMP. [http://en.wikipedia.org/wiki/Les\\_Trophées\\_du\\_Livre#3rd\\_edition\\_-\\_2006](http://en.wikipedia.org/wiki/Les_Trophées_du_Livre#3rd_edition_-_2006)

## **2.4 Activités d'encadrement de la recherche**

### **2.4.1 Post-doctorat**

Bernard Jeremy, (12 mois) 2017 - 2018, Projet de recherche européen URban CLIMate services (URCLIM).

### **2.4.2 Thèses**

#### **2.4.2.1 Thèse soutenue**

Bernard Jeremy, 2014 - 2017, Signature géographique et météorologique des variations spatiales et temporelles de la température de l'air au sein d'une zone urbaine. Thèse en Génie civil. Ecole Centrale de Nantes, CNRS - FR 2488. Dir. M. Musy, Co-dir. I. Calmet, Co-dir. E. Bocher (30%).

### **2.4.2.2 Thèse(s) en cours**

Lao Jonathan, 2017 - 2020, Analyse de la qualité et enrichissement des données géographiques en Open Data. Thèse en informatique. Université de Bretagne Sud. CNRS - UMR 6285, Dir. E. Bocher (100%).

Buron Louis, 2017 - 2020, Optimiser le choix du mode ferroviaire par une modélisation multi-échelles de ses déterminants à l'aide d'un Système d'information géographique. Thèse en géographie. Université de Rennes 2, CNRS - UMR 6590. Dir. G. Baudelle, Co-dir. E. Bocher (50%).

### **2.4.3 ITA**

#### **2.4.3.1 Ingénieur(s) de recherche**

Gwenaël Guillaume (12 mois) 2014 - 2015, Ingénieur de recherche en acoustique environnementale, projet de recherche européen ENERGIC-OD (European Network for Redistributing Geospatial Information to user Communities - Open Data).

Adam Gouge, (24 mois) 2012 - 2014, Ingénieur de recherche, expert scientifique en ingénierie logicielle, projet de recherche du Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer, GEBD (Grand Equipement Bases de données).

#### **2.4.3.2 Ingénieur(s) d'étude**

Petit Gwendall depuis 2008 à aujourd'hui (10 ans), Ingénieur d'étude en sciences de l'information géographique, animation et coordination du support autour des outils d'*OrbisGIS*.

Palominos Sylvain, (12 mois) 2017 - 2018, Ingénieur d'étude en ingénierie logicielle, ANR CENSE (Caractérisation des environnements sonores urbains : vers une approche globale associant données libres, mesures et modélisations).

Palominos Sylvain, (24 mois) 2015 - 2017, Ingénieur d'étude en ingénierie logicielle, projet de recherche européen ENERGIC-OD (European Network for Redistributing Geospatial Information to user Communities - Open Data).

Gueganno Alexis, (22 mois) 2011 - 2013, Ingénieur d'étude en ingénierie logicielle, projet de recherche régional SOGVILLE (Système d'Observation Géographique de la Ville).

Gueganno Alexis, (15 mois) 2010 – 2011, Ingénieur d'étude en ingénierie logicielle ANR EvalPDU (Évaluation des impacts environnementaux d'un PDU et de leurs conséquences socio-économiques : développements méthodologiques et tests sur le PDU de Nantes Métropole).

Fadet Pierre-Yves, (9 mois) 2010 – 2011, Ingénieur d'étude en ingénierie logicielle, ANR EvalPDU (Évaluation des impacts environnementaux d'un PDU et de leurs conséquences socio-économiques : développements méthodologiques et tests sur le PDU de Nantes Métropole).

Claudeau Berengère, (1 mois) 2010, Ingénieure d'étude en ingénierie logicielle, ANR EvalPDU (Évaluation des impacts environnementaux d'un PDU et de leurs conséquences socio-économiques : développements méthodologiques et tests sur le PDU de Nantes Métropole).

Leveiller Thomas, (3 mois) 2010, Ingénieur d'étude en sciences de l'information géographique, projet de recherche régional MEIGEVILLE (Modélisation environnementale intégrée et gestion durable de la VILLE).

### **2.4.3.3 Assistant(s) ingénieur**

Fortin Nicolas, (4 mois) 2015, Assistant ingénieur en ingénierie logicielle, projet de recherche MATRIOCHKAS, Office national de l'eau et des milieux aquatiques.

Fortin Nicolas, (16 mois) 2014 – 2015, Assistant ingénieur en ingénierie logicielle, projet de recherche européen ENERGIC-OD (European Network for Redistributing Geospatial Information to user Communities - Open Data).

Lecoivre Mireille, (8 mois) 2014, Assistante ingénieure en sciences de l'information géographique, projet de recherche régional BDMOS (Base de données des modes d'occupation des sols).

Fortin Nicolas, (9 mois) 2013 - 2014, Assistant ingénieur en ingénierie logicielle, projet de recherche régional BDMOS (Base de données des modes d'occupation des sols).

Fortin Nicolas, (10 mois) 2012 – 2013, Assistant ingénieur en ingénierie logicielle, projet de recherche régional SOGVILLE (Système d'Observation Géographique de la Ville).

Gourlay Antoine, (5 mois) 2011 – 2012, Assistant ingénieur en ingénierie logicielle, projet de recherche régional SOGVILLE (Système d'Observation Géographique de la Ville).

Piau Adelin, (3 mois) 2010, Assistant ingénieur en ingénierie logicielle, ANR AVUPUR (Assessing the Vulnerability of Peri Urban Rivers).

### **2.4.4 Master / Ingénieur**

Perez Marion, 2018, Mise à l'épreuve du nouveau standard international de cartographie, mémoire de stage Master 1 SIGAT, Université de Rennes 2.

Guyon Sébastien, 2018, Cartographie du bruit à partir d'OpenStreetMap, mémoire de stage Master 2 SIGMA, Université de Toulouse.

Palominos Sylvain, 2014, Conception d'un outil de valorisation des résultats scientifiques, mémoire de stage d'élève ingénieur École Centrale de Nantes.

Maréchal Clément, 2013, Utilisation et évaluation d'une base de données spatio-temporelle. Application à l'évolution du maillage communal en France et l'occupation des sols en Région Pays de La Loire, mémoire de stage Master 2 SIGAT, Université Rennes 2.

Party Jules, 2013, Amélioration de la gestion des projections géographiques dans la plate-forme *OrbisGIS*, mémoire de stage d'élève ingénieur École Centrale de Nantes.

Jothy Mario, 2013, Formalisation et développement d'une plate-forme web pour le partage de cartes, mémoire de stage d'élève ingénieur École Centrale de Nantes.

Rannou Patrick, 2012, Versionnement de l'information géographique, mémoire de stage d'élève ingénieur École Centrale de Nantes.

Salliou Thomas, 2011, Implémentation d'un modèle d'expansion de la tâche urbaine, mémoire de stage d'élève ingénieur École Centrale de Nantes.

Vigier Toinon, 2011, Evaluation de publications cartographiques au format Geospatial PDF, mémoire de stage d'élève ingénieur École Centrale de Nantes.

Piasco A, 2011, Développement d'un driver GPX pour la plate-forme *OrbisGIS*, mémoire de stage d'élève ingénieur École Centrale de Nantes.

Gueganno A, 2010, Intégration d'outils de manipulation de Géoasters de grande taille dans la plate-forme *OrbisGIS*, mémoire de stage d'élève ingénieur École Centrale de Nantes.

Jestin-Leducq H, 2010, Méthodologie pour une production d'indicateurs géographiques dans le but d'évaluer l'impact des aménagements urbains sur le cheminement des écoulements de l'eau de surface, mémoire de Master Sciences et Techniques des Environnements Urbains, École Centrale de Nantes.

## 2.4.5 Licence

Piau A, 2010, Développement d'une librairie de triangulation de Delaunay en java pour la plate-forme *OrbisGIS*, stage Licence Professionnelle Systèmes informatiques et logiciels, IUT de Nantes.

## 2.5 Activités d'enseignement et de formation pour et par la recherche

Mon activité d'enseignement a consisté à développer et promouvoir, la théorie et la pratique des sciences de l'information géographique dans les cursus universitaire / ingénieur ainsi que lors de formations et ateliers.

### 2.5.1 Enseignement

| Période        | Description  |
|----------------|--|
| 2014 - 2015    | Cours de géomatique dans l'option disciplinaire Urbanistic du cycle ingénieur Ecole Centrale de Nantes (10 heures)   |
|                | Cours de géomatique appliqué à la modélisation du bruit en Ville, Master "Acoustique des Transports, de la Ville et de l'Environnement", Université du Maine. (3 heures) |
| De 2011 à 2013 | Cours de géomatique au semestre 8 du cycle ingénieur Ecole Centrale de Nantes (32 heures par année universitaire)  |
| De 2006 à 2009 | Vacataire Ecole Centrale de Nantes. Cours de géomatique en Master Science et Technique des Environnements Urbains (18 heures / année universitaire).                     |
|                | Cours de géographie, aménagement du territoire en Génie & Aménagement terrestre et côtier du cycle ingénieur Ecole Centrale de Nantes                                    |
| De 2002 à 2004 | Chargé de cours en géomatique en DESS, DEA et Licence 3, Université de Rennes 2. (54 heures par année universitaire)   |



## 2.5.2 Formations / Ateliers

Les outils des sciences de l'information géographique (systèmes de base de données, serveurs cartographiques, serveurs de traitements et interfaces cartographiques...) occupent une place prépondérante dans mon activité car ils servent à expérimenter, construire de nouvelles méthodes, approches, issues des travaux de recherche. Dans mon parcours, j'ai veillé avec mes collègues à transmettre les techniques et savoir acquis à travers l'organisation de formations / ateliers et ce pour différentes communautés scientifiques. Nous en dressons une liste non-exhaustive.

| Année | Description / Référence  | Audience | Catégorie | Public |
|-------|--|----------|-----------|--------|
| 2017  | 1 jour de formation prise en main de la plate-forme <i>OrbisGIS</i> et de la base de données H2GIS à Vannes (10 personnes)   | R        | F         | C      |
| 2016  | 1 jour de formation prise en main de la plate-forme <i>OrbisGIS</i> à Vannes (10 personnes)  | R        | F         | C      |
|       | Introduction to H2GIS, a robust and powerful spatial database, 4th Open Source Geospatial Research & Education Symposium OGRS 2016, Perugia, Italy, October 12-14, 2016. (7 personnes)   | In       | W         | C      |
| 2014  | Road network analysis with H2Network: Applications of the spatial database H2GIS, 3rd Open Source Geospatial Research & Education Symposium OGRS 2014, Espoo, Finland, 10-13 June 2014. (10 personnes)                         | In       | W         | C      |
|       | 2 jours analyses spatiales avancées avec <i>OrbisGIS</i> (18 personnes)  | N        | F         | C      |
| 2013  | SIG et cartographie sonore avec <i>OrbisGIS</i> , Ecole d'automne "Ville et Acoustique", 21 au 25 octobre 2013, Nantes (FR). (15 personnes)  | In       | W         | C      |
|       | Construction de distancier et analyses spatiales avec <i>OrbisGIS</i> , projet Belgrand-GEBD, 17 et 18 octobre 2013, IFSTTAR, Marne La Vallée. Formation sur les outils développés pour le projet de recherche. (20 personnes) | N        | F         | C      |
|       | 1 journée de formation sur <i>OrbisGIS</i> à Nantes (24 personnes)   | N        | F         | Ex     |
|       | 1 journée de formation sur CartoPOLIS à Nantes (18 personnes)  | R        | F         | C      |
| 2010  | 2 jours de formation prise en main de la plate-forme <i>OrbisGIS</i> à Nantes (15 personnes)   | R        | F         | Ex     |
|       | 2 jours de formation prise en main de la plate-forme <i>OrbisGIS</i> à Nantes (17 personnes)   | R        | F         | C      |
| 2009  | 2 jours de formation prise en main de la plate-forme <i>OrbisGIS</i> à Nantes (12 personnes)   | R        | F         | C      |
| 2008  | Practical Introduction to <i>OrbisGIS</i> , workshop, FOSS4G 2008, CAPE TOWN. (50 personnes)   | In       | W         | Ex     |
| 2006  | Building a SDI with OpenJUMP, workshop FOSS4G, Free and Open Source for Geoinformatics, Lausanne, 12 et 15 septembre 2006. (45 personnes)  | In       | W         | Ex     |

R = Régionale, N = Nationale, In = Internationale, W = Workshop, F = Formation, Ec = Ecole

C = Chercheur, Ex = Experts du domaine (collectivités, services de l'État, ONG, entreprises)

## 2.6 Administration et animation de la recherche

Le domaine des Systèmes d'Information Géographique a connu de profonds bouleversements ces 15 dernières années, plaçant les outils et les méthodes à l'interface de plusieurs disciplines. Elles sont nombreuses à utiliser les SIG pour organiser, questionner et représenter leurs données : santé, biologie, bio-génétique, climat, agriculture... Cette évolution a multiplié les problématiques de recherche. Elle a également favorisé (de raison) le développement conjoint de compétences et de connaissances de diverses disciplines sur des défis scientifiques communs. Dans ce sens la géographie et l'informatique ont posé les bases disciplinaires pour tendre et partager un même objet scientifique : la géomatique. Au niveau national, les communautés scientifiques ont œuvré à l'image du GDR MAGIS<sup>1</sup> pour que ces rapprochements permettent de développer, co-construire de nouvelles approches, de nouveaux outils d'appréhension de l'espace géographique et de ses dynamiques. Aux niveaux européen et international, on retrouve cette logique avec l'association AGILE<sup>2</sup> ou encore l'ICA<sup>3</sup>.

Les efforts autour de la standardisation de l'information géographique dans le cadre de l'Open Geospatial Consortium (OGC) ont permis de concrétiser ces rapprochements disciplinaires sur toute la chaîne de l'information : organisation, interrogation, représentation et partage. Les SIG sont passés d'une conception monolithique à une architecture en services où chacun réalise une tâche particulière (serveur WMS pour le rendu cartographique, catalogue CSW pour les métadonnées...). Ces services ont décloisonné l'usage de l'Information Géographique (IG). Ils ont permis de faire travailler de multiples disciplines, sur des territoires différents et pour des usagers variés : citoyens, tiers-scientifiques ou décideurs. Mis en œuvre principalement avec des logiciels ouverts<sup>4</sup>, ces nouveaux services de l'IG ont donné naissance à une multitude de plates-formes, des plus simples avec les applications de cartographies en ligne (livrées clé en main) aux plus intégrées avec les Infrastructures de Données Spatiales (IDS).

Les travaux que j'ai pu mener lors de contrats de recherche ainsi que les responsabilités que j'ai occupées sont à l'image de cette évolution du domaine des SIG. Ils m'ont permis de façonner des méthodes puis un écosystème d'outils pour capitaliser et partager des connaissances géographiques. Ces méthodes et outils ont été pensés dans une démarche de généricité et de reproductibilité. Pour cela, ils s'appuient sur la définition de concepts communs pour documenter, questionner et représenter les données géographiques. Ces concepts communs sont transposés dans des « langages » « géo -> informatiques de description, d'interrogation, de représentation. Ces langages sont mis en œuvre avec des solutions logicielles lorsqu'elles existent, mais servent également de support pour adapter les SIG, qu'il s'agisse d'applications bureautiques ou encore d'architectures en service. Pour servir cette démarche, de la documentation des données aux restitutions cartographiques avec des incursions dans le domaine de la modélisation spatiale, les standards de l'IG sont mis à l'épreuve, discutés et déconstruits. Tout au long de ma participation aux programmes de recherche, ils seront le fil conducteur pour mettre les SIG au cœur d'une approche systémique et intégrée.

In fine, toute cette démarche scientifique a pour objectif général la conception, la réalisation, la diffusion et l'exploitation par les utilisateurs finaux d'outils innovants d'archivage, de consultation,

---

1 <http://gdr-magis.imag.fr/> consulté en janvier 2018

2 Association of Geographic Information Laboratories in Europe, <https://agile-online.org/> consulté en janvier 2018

3 International Cartographic Association, <https://icaci.org/> consulté en janvier 2018

4 Au sens de la Free Software Foundation, <https://www.fsf.org/> consulté en juin 2018

de traitement et d'analyse spatiale de données géographiques au service d'un aménagement durable du territoire. Cette démarche ambitieuse de fournir des moyens cognitifs et techniques pour permettre à différentes disciplines de construire des compétences et des connaissances conjointes sur des défis scientifiques communs.

## 2.6.1 Programmes de recherche

L'infographie ci-dessous donne un rapide aperçu des contrats de recherche auxquels j'ai participé ou que j'ai coordonnés.



| Période     | Nom/Acronyme  | Programme/<br>Financement          | Sujet(s) traité(s)   | Position                             |
|-------------|---|------------------------------------|--|--------------------------------------|
| 2008-2010   | AVUPUR (Assessing the Vulnerability of Peri-Urban Rivers)   | ANR                                | Mettre en œuvre une documentation puis une modélisation spatiale des chemins de l'eau naturels et artificiels prenant en compte l'hétérogénéité des territoires (coexistence de zones rurales et urbanisées)   | Participant                          |
| 2009-2012   | Eval-PDU (Évaluation des impacts environnementaux d'un PDU et de leurs conséquences socio-économiques : développements méthodologiques et tests sur le PDU de Nantes Métropole) | ANR                                | Construction d'un système d'information géographique commun pour la gestion des flux de données, la production d'indicateurs géographiques et l'intégration d'un modèle de production de cartes de bruit.  | Coordinateur de tâche                |
| 2010-2014   | VegDUD (Rôle du végétal dans le développement urbain durable ; une approche par les enjeux liés à la climatologie, l'hydrologie, la maîtrise de l'énergie et les ambiances)     | ANR                                | Mise en place d'un SIG environnemental collectif pour définir, qualifier et représenter la physiographie urbaine de Nantes reposant sur :<br>- la formalisation d'une ontologie urbaine appliquée à l'étude de la végétation.<br>- la mise en cohérence des différentes sources de données sur la base de cette ontologie<br>- la définition d'un Langage d'Analyse Spatiale Multi-Sources (LASMS), sémantique commune indépendante de la nature des données mais intégrant leurs spécificités (résolution, représentation raster ou vecteur, temporalité).          | Participant                          |
| 2014-2019   | MAPUCE (Modélisation Appliquée et droit de l'Urbanisme : Climat urbain et Énergie)  | ANR                                | Mise en œuvre d'une architecture SIG pour produire des indicateurs urbains, de façon générique et automatique, à partir de la collecte de données réelles issues de bases de données et d'une analyse architecturale des bâtiments.<br>- exploration et préparation des bases de données urbaines<br>- méthode d'analyse automatique des îlots urbains de France<br>- développement d'une chaîne de traitements dans la plate-forme <i>OrbisGIS</i><br>- production des données d'entrée pour un panel de villes françaises et alimentation du modèle climatique TEB | Partenaire<br>Coordinateur de tâches |
| 2017 - 2020 | CENSE (Caractérisation des environnements sonores urbains : vers une approche globale associant données libres, mesures et modélisations)                                       | ANR                                | Contrôle de la qualité et enrichissement des données OpenStreetMap pour la construction de cartes de bruit réglementaires et la production d'indicateurs géographiques<br>Mise en œuvre d'une Infrastructure de Données Spatiales pour la collecte et la représentation de données de bruits à différentes échelles spatiales et temporelles.  | Partenaire<br>Coordinateur de tâche  |
| 2014-2017   | ENERGIC-OD (European Network for Redistributing Geospatial Information to user Communities - Open Data)   | Projet Européen FP7-PSP            | Développement d'une application afin d'exploiter les capacités des smartphones pour construire des cartes de bruit collaboratives  | Partenaire<br>Coordinateur de tâche  |
| 2017-2020   | URCLIM (URban CLIMate services)   | Projet Européen JIP Climate ERA4CS | Mise en œuvre d'une méthodologie pour la production d'indicateurs géographiques climatiques à l'échelle de l'Europe<br>- analyse, enrichissement et documentation des données OSM pour la construction d'indicateurs morphologiques,<br>- intégration de données multi-sources,<br>- mise en œuvre d'une plate-forme interopérable de services adaptés aux questions climatiques   | Partenaire<br>Coordinateur de tâche  |
| 2008-2014   | MEIGEVille (Modélisation environnementale intégrée et gestion durable de la ville)  | Région Pays de la Loire            | Construire les bases théoriques et instrumentales d'un outil de capitalisation des connaissances du milieu urbain ainsi que des méthodes d'analyse et des techniques de gestion  | Participant<br>Coordinateur de tâche |
| 2009-2012   | SCAPC2 (Standard-Centered Authoring and Publication Of Cartographic Content)  | Fond Suisse pour la recherche      | Méthode et outils pour la mise en œuvre d'une plate-forme de partage de contenu cartographique multi-acteurs   | Partenaire                           |

| Période   | Nom/Acronyme   | Programme/<br>Financement                          | Sujet(s) traité(s)  | Position                            |
|-----------|--|--|---|-------------------------------------|
| 2009-2015 | SOGVILLE 1 et 2 (Système d'Observation Géographique de la Ville)   | Région Pays de la Loire                            | Démontrer la faisabilité d'une plate-forme centrée sur les standards pour d'une part la production et la diffusion de contenus de cartographie thématique, en démontrant l'efficacité d'une indispensable extension du standard de description OGC Symbology Encoding   | Coordinateur                        |
| 2013-2015 | BDMOS (Construction d'une base de donnée de l'occupation des sols sur le long terme sur le territoire de Nantes Métropole) | Région Pays de la Loire                            | Réflexion sur la structuration d'une base de données à partir d'une approche informationnelle<br>Définition d'une typologie et préparation d'une base de données de référence<br>Harmonisation des bases de données à l'aide de médiateurs sémantiques<br>Exploitation des bases de données pour la production d'indicateurs et d'analyses spatiales de l'évolution des modes d'occupation des sols | Participant                         |
| 2012-2014 | GEBD – BELGRAND (Grand Equipement Bases de Données)  | Ministère de l'environnement                       | Construction d'un outil générique pour modéliser les accessibilités dans un SIG<br>- Identification des métriques et des algorithmes d'analyses de graphes ,<br>- Intégration dans un SIG et pilotage à l'aide d'un langage structuré<br>- Définition de patrons de modélisation  | Partenaire<br>Coordinateur de tâche |
| 2015-2016 | MATRIOCHKAS  | Office national de l'eau et des milieux aquatiques | Mise en œuvre d'une méthode de délimitation de la zone contributive d'un ouvrage avec prise en compte des facteurs anthropiques   | Partenaire                          |
| 2017-2020 | PAENDORA (Planification, Adaptation et Énergie : Données territoriales et accompagnement)                                  | ADEME  | Généraliser une base de données urbaines libre pour les études climat-énergie à l'échelle des îlots urbains à l'ensemble de la France<br>Développer des outils de visualisation cartographique, extraction et exploitation opérationnels et libres pour les acteurs urbains.  | Partenaire<br>Coordinateur de tâche |
| 2016-2017 | Num' AIR   | Association Air Pays de la Loire                   | Réflexion pour la mise en œuvre d'une Infrastructure de Données Spatiales dédiée à l'organisation, l'analyse et la restitution de données de qualité de l'Air pour la Région Pays de la Loire.  | Coordinateur                        |

## 2.6.2 Responsabilités

Mon parcours d'Ingénieur de recherche en Sciences de l'Information Géographique au CNRS m'a amené à occuper différentes responsabilités collectives et administratives. Ces responsabilités m'ont conduit à définir et à mettre en œuvre des axes de recherche au sein d'équipes dédiées ou transversales dans mes unités d'affectation : FR 2488 et UMR 6285. Ces axes de recherche sont centrés principalement autour de l'adaptation des méthodes et des outils SIG au service de problématiques environnementales : impact des activités humaines sur le bruit et la qualité de l'air, sur la circulation des eaux de surfaces et les transports de polluants, impacts des pratiques énergétiques et de l'aménagement des territoires sur le climat...

Dans ce parcours, très tôt, j'ai ressenti la nécessité de décloisonner le domaine des SIG afin de les mettre à disposition du plus grand nombre. Ce décloisonnement s'est fait progressivement en développant une approche systémique où les outils habituels, monolithiques, sont déconstruits pour être organisés sous la forme de services spécialisés, ce que certains ont appelé l'urbanisation des SIG et qui s'est traduit par le développement du concept d'Infrastructure de Données Spatiales.

Pour mener cette transformation, j'ai imaginé et inventé de nouvelles solutions techniques comme la plate-forme *OrbisGIS*<sup>5</sup> dont j'anime et coordonne les évolutions depuis maintenant 10 ans. Je me suis également entouré de collègues à l'international qui m'ont permis de construire une communauté scientifique autour de l'apport des standards ouverts, de l'open data et des logiciels open source pour la recherche. Ce qui donnera naissance à la communauté OGRS : Open Source Geospatial Research & Education Symposium. En effet, si la question de l'open science est aujourd'hui d'actualité, elle ne constituait pas à mes débuts une préoccupation des instances de la recherche. Or les problématiques environnementales ouvrent aux chercheurs des défis importants et complexes qui imposent de faire évoluer les systèmes d'information existants. Elles demandent de nouvelles manières de produire, d'analyser et de partager l'information pour un contexte interdisciplinaire et multi-sectoriel. Cette évolution a été fondamentale dans le domaine des SIG. Aussi, comme il est rappelé dans le Livre blanc « Une Science ouverte dans une République numérique » de la Direction de l'Information Scientifique et Technique du CNRS, mais également dans le rapport annuel de 2016, ce changement de modèle de travail et de pensée constitue un atout et un enjeu majeurs pour placer la recherche au cœur de la transition numérique.

### **2.6.2.1 Le projet scientifique SIG-DECIDE – CNRS, UMR 6285 (2015 - aujourd'hui)**

#### **Éléments de cadrage**

La thématique centrale du projet scientifique que j'anime et que j'ai structurée pour le groupe SIG à Vannes concerne l'ensemble de la filière de l'élaboration et de l'exploitation de l'information géographique. Nous nous intéressons à la donnée géographique dans toutes ses dimensions : qualité, analyse, modélisation, traitement et représentation. De par les compétences des membres du groupe (géographe, informaticien et environnementaliste), un centrage est réalisé sur la donnée géographique, sur les méthodes et les outils qui permettent de la manipuler au service d'un développement

---

<sup>5</sup> <http://orbisgis.org/> consulté en janvier 2018

soutenable des territoires. Le terme de territoire doit être compris dans sa dimension la plus large. Il qualifie à la fois la ville, l'espace urbain, la campagne, l'espace rural, les zones littorales, les espaces de transition mer-continent, les espaces periurbains mais également l'espace maritime... Les enjeux environnementaux (nuisances, risques naturels, pollution, changement climatique) en sont les principales thématiques d'application.

Ce projet s'inscrit dans le pôle CID (Connaissance Information et Décision) et plus particulièrement l'équipe DECIDE du laboratoire LAB-STICC CNRS UMR 6285 (Figure 1).

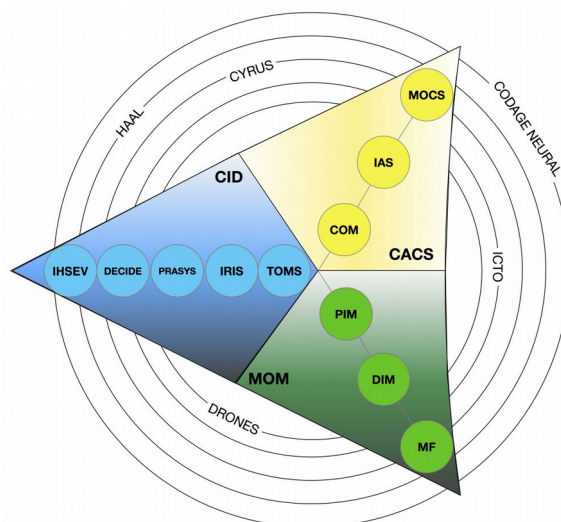


Figure 1: Organisation scientifique du LAB-STICC

Source : <https://www.labsticc.fr>, janvier 2018

## Contexte

La maîtrise du développement des territoires est un enjeu majeur alors que l'anthropogénéisation se poursuit inexorablement. Les territoires doivent répondre à des enjeux globaux (climat, énergie, biodiversité) et locaux (foncier, qualité de vie, mobilité, mixité sociale, gestion de l'eau, pollution et nuisances...) qui impliquent la mobilisation de données de plus en plus **hétérogènes, complexes et volumineuses**.

Dans le domaine des Sciences de l'Information Géographique (SciG), la démarche consiste à étudier l'état et l'évolution des objets d'un territoire en manipulant des données géographiques qui représentent la structure d'un espace, souvent selon une organisation thématique (bâtiments, espaces verts, routes) et par unités administratives ou d'intervention (limites de communes, aires d'influence, zones à risques). Pour cela, le géographe mobilise les méthodes et outils de l'analyse spatiale (géométrie de l'espace).

De nombreuses théories de l'espace ont émergé. Elles se sont appuyées sur l'analyse des structures spatiales, la connaissance de l'évolution des systèmes et des comportements. Ces théories ont donné naissance à des modèles d'organisation (modèle centre-périphérie, modèle hiérarchique, modèle fractal...) qui ont structuré la pensée de l'étude géographique.

Depuis quelques années, les recherches traditionnelles l'organisation et l'analyse des structures spatiales ont été délaissées au profit de questions guidées par la demande des gestionnaires des territoires qui, dans une **logique décisionnelle**, souhaitent avant tout disposer d'**indicateurs**. La communauté a donc mis au point une multitude d'indicateurs principalement basés sur des métriques

géométriques simples (forme, superficie, volume). Ces indicateurs pour l'essentiel visent à alimenter les **tableaux de bord** imposés par différents **documents juridiques, normes nationales ou européennes** (Agenda 21, Plan Climat, Indicateur d'exposition au bruit)... Nous avons aujourd'hui une recherche principalement conduite à la demande de l'**ACTEUR** (Figure 2), mais qui donne lieu, par manque de formalisation de ses attentes, à la mise à disposition d'une **pléthore** d'indicateurs souvent difficilement exploitables.

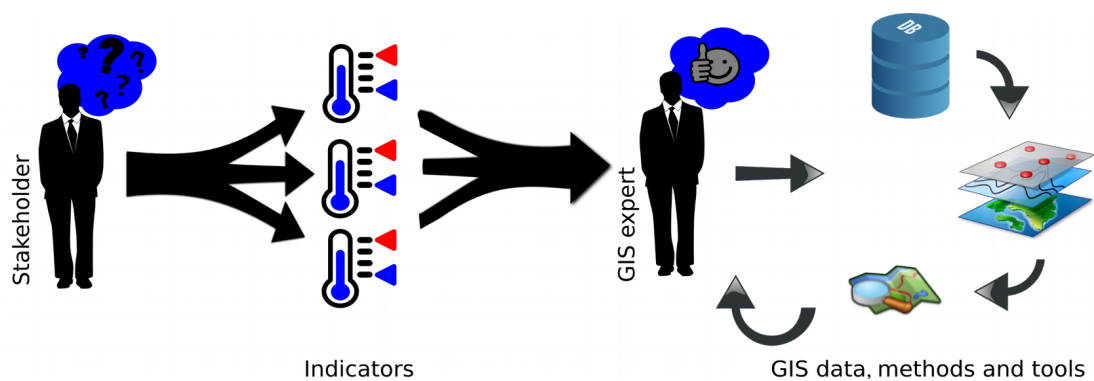


Figure 2: Usage des indicateurs dans le contexte des SIG

Notre réflexion s'est donc engagée dans deux directions :

- la prise en compte initiale des attentes spécifiées de l'acteur conduisant à l'élaboration d'indicateurs moins nombreux et pertinents, (**approche acteur-driven**),
- l'extraction (quasi-)exhaustive de modèles de données génériques et non-redondants susceptibles d'étayer et d'accompagner la décision de l'acteur, (**approche data-driven**).

Le projet de recherche de l'équipe SIG que j'anime s'inscrit dans la deuxième logique et vise à donner une place **plus importante à l'analyse, à la fouille et au traitement des données géographiques** : analyse fine des constituantes, des particularités, des relations entre les données. Ce projet a pour objectif de détacher les questions posées sur la donnée d'une demande trop dirigée (par les acteurs) afin de pouvoir faire ressortir de nouvelles méthodes d'analyses, de classement de l'espace à travers des modèles de données plus ou moins élaborés. Pour répondre à cette problématique, il est organisé autour de **3 thèmes de recherche**. Précisons que les réflexions et les recherches qui découleront de ces axes s'appuieront néanmoins et également sur la base d'une connaissance fine des besoins des acteurs et des indicateurs qui sont actuellement mobilisés. En effet, pour améliorer les informations fournies aux acteurs, il est indispensable de les déconstruire, d'étudier leurs faiblesses, leurs atouts, de comprendre la chaîne d'élaboration.

La Figure 3 résume cette approche. Elle représente un système organisé autour d'une boucle de rétroaction entre l'acteur et le scientifique. Les demandes de l'acteur sont analysées, évaluées par le scientifique puis traduites dans un écosystème d'outils et de méthodes (Geodata sciences). Lors de ce processus de traduction, les données utilisées pour répondre à la demande de l'acteur sont étudiées, fouillées, représentées. Cette étape peut ou non donner lieu à l'élaboration de « nouveaux indicateurs », fournir des éléments pour apprécier la pertinence de la demande. Le scientifique peut décider d'invalider la demande et proposer de nouvelles méthodes au regard des hypothèses et des conclusions qu'il tire des données.



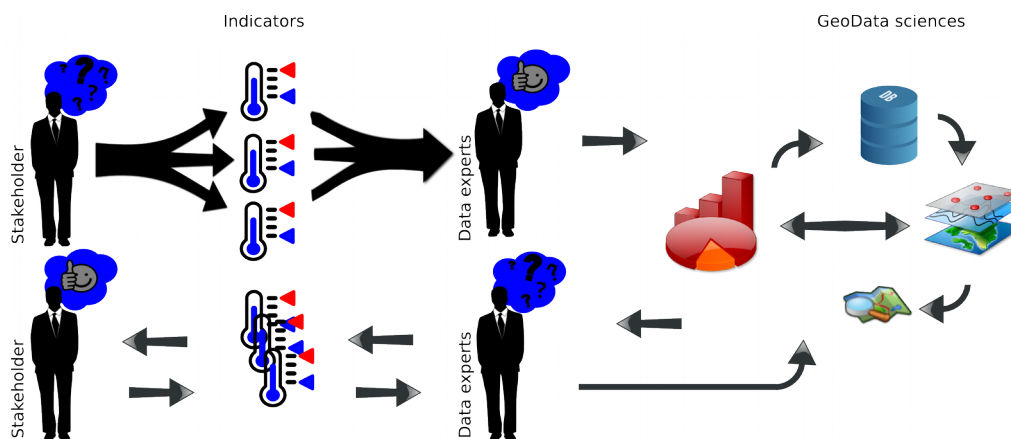


Figure 3: Schématisation de l'approche data-driven

## Thèmes scientifiques

Le programme de recherche de l'équipe s'organise autour de 3 thèmes scientifiques complémentaires.

Un thème initial **qualité des données** où nous nous intéressons à la mise en œuvre de méthodes spatiales et dans une moindre mesure statistiques pour étudier la qualité des données et des variables que nous manipulons : échelles, temporalités, sémantiques, absences de données, séries incomplètes, imprécisions géographiques, complétudes entre les données... Ce thème s'inscrit dans l'axe intégration de l'information et qualité de l'équipe DECIDE mais est également développé dans le cadre de projets de recherche au sein du Lab-STICC nécessitant l'utilisation de données à plusieurs échelles géographiques. Je dirige sur ce thème un doctorat portant sur la mise en œuvre de métriques pour contrôler la qualité des données géographiques en open data.

Un thème **traitement des données et production de connaissances** dont l'objectif est de solliciter les techniques et méthodes de l'analyse spatiale et ponctuellement de la statistique pour proposer des méthodes originales de partitionnement, de classement des territoires... Il s'agit de mettre en œuvre des méthodes de croisement, d'agrégation, de segmentation des données géographiques à différentes échelles pour par exemple définir de nouvelles unités spatiales utiles à l'étude d'un phénomène : classification d'un territoire pour un risque climatique, identification de zones à risque de submersion marine, extraction de périmètres d'exposition à un risque pour une population d'individus... Ce thème est développé dans le cadre des projets de recherche MAPUCE (ANR), PAENDORA (ADEME) et URCLIM (Europe) au sein desquels nous modélisons puis nous appliquons des chaînes d'analyses spatiales pour produire des indicateurs géographiques qui alimentent le modèle de micro-climat *TEB (Town Energy Balance)*<sup>6</sup> de MétéoFrance. Ces indicateurs sont exploités pour proposer de nouvelles unités spatiales dans l'idée d'affiner les échelles spatiales d'analyse de l'impact des activités humaines sur le micro-climat.

Un thème **représentation des données** ayant pour dessein de travailler sur les questions de visualisation des données (aspect sémiotique, standards). Les travaux de recherche engagés dans ce thème alimentent notre contribution à l'OGC concernant la définition d'un nouveau modèle conceptuel pour décrire et partager les cartographies au sein d'architectures de services interopérables : l'objectif étant de faciliter à l'image des données brutes, la circulation des représentations cartographiques. Les réflexions engagées dans le groupe de travail international

<sup>6</sup> <http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article199&lang=fr> consulté en avril 2018

*Standard Working Group*<sup>7</sup> sont aujourd'hui en phase d'expérimentation dans le cadre du programme testbed14 (<http://www.opengeospatial.org/projects/initiatives/testbed14>).

## Verrous techniques

Pour mettre en œuvre les thèmes scientifiques, j'ai concentré mon action sur deux verrous techniques. Le premier réside dans l'intégration et la mise en cohérence d'outils aux objectifs et domaines d'application différents, par exemple *OrbisGIS* pour les SIG, *R*<sup>8</sup> pour la statistique, *diviz*<sup>9</sup> pour l'aide à la décision. Le second concerne la mise en place et le pilotage de ces outils dans une démarche collaborative où chaque acteur (scientifique, décideur, gestionnaire...) doit pouvoir, selon son profil, manipuler et interroger les outils et les contenus. Ceci implique d'une part un effort important sur la **standardisation** et la **normalisation** des données, des formats et la mise en place de « passerelles » pour naviguer d'un outil à l'autre, et d'autre part une attention particulière pour développer des **interfaces** entre **l'homme** et la **donnée** : qu'il s'agisse de représentations intelligibles (cartographie, tableau de bord), d'interfaces homme/machine intuitives et accessibles mais également de langages pour appréhender les contenus ou faire communiquer les outils.

Pour cela, nous adaptons continuellement la plate-forme SIG *OrbisGIS* pour la positionner comme un démonstrateur scientifique : intégration d'algorithmes de fouilles de données, mise en place de modèles de transformation de données, nouvelles méthodes de cartographie, construction de système d'organisation et de partage des algorithmes d'analyses géographiques, services spécialisés en ligne...

### 2.6.2.2 L'Atelier SIG - FR 2488 (2006 - 2015)

L'Atelier SIG est le fruit d'une réflexion scientifique qui a émergé dans le cadre du programme de recherche régional MeigeVille (Modélisation environnementale intégrée et gestion durable de la ville) coordonné par Gérard Hégron alors directeur de l'Institut de recherche sur les Sciences et Techniques de la Ville<sup>10</sup> (IRSTV FR CNRS 2488). L'ambition de ce programme était de développer une vision intégrée de l'ensemble des phénomènes physiques urbains, des méthodes, des outils et des systèmes d'acteurs qui contribuent à la gestion durable de la ville.

L'Atelier SIG (Système d'Information Géographique) que j'ai créé, a été organisé comme équipe méthodologique et technique transversale dont l'objectif était de favoriser l'accès aux données et aux outils nécessaires pour appréhender les enjeux urbains dans leur dimension géographique. S'il s'agissait de proposer aux chercheurs les outils pour interroger des données spatialement référencées, l'Atelier a été aussi un espace structurant pour accompagner les chercheurs dans la mise en œuvre d'approches plus innovantes. En ce sens, il a constitué pendant 9 ans un lieu unique pour organiser une réflexion stratégique et prospective sur les évolutions nécessaires tant dans le domaine des représentations, de la modélisation, que du traitement des données géographiques.

7 <http://www.opengeospatial.org/projects/groups/sldse1.2swg> consulté en avril 2018

8 <https://www.r-project.org/> consulté en février 2018

9 <http://www.decision-deck.org/diviz/download.html> consulté en février 2018

10 L'Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville) est une fédération de recherche CNRS (FR 2488) rattachée à l'INSIS (Institut National de l'Ingénierie et des Systèmes) en principal. L'IRSTV a été créé le 1 janvier 2006 sur les bases de la FR "Physique et images de la ville" (FR 73), par G. Hégron qui en a assuré la direction jusqu'en décembre 2011.

L'Atelier SIG s'est positionné à l'interface des Projets de Recherche Fédératifs (voir section 2.6.2.3 ) de l'IRSTV. S'appuyant sur une équipe de Post-Doctorants, d'Ingénieurs de Recherche, d'Etude et de Techniciens, l'Atelier SIG a joué un rôle transversal de support et d'expérimentations scientifiques dans le domaine de l'information géographique, de la capitalisation des connaissances et du développement d'outils géomatiques pour la gestion de la ville et la recherche. Ces missions se sont structurées autour de 4 axes.

- (1) Assurer un support sur son SIG fédérateur *OrbisGIS* (<http://www.orbisgis.org>), dans les domaines de la conception cartographique, l'analyse spatiale ainsi que de l'organisation et de la gestion de l'information géographique (base de données spatiales, bonnes pratiques d'interopérabilité...). Ce support avait pour cible des utilisateurs « classiques » comme des utilisateurs plus avancés qui souhaitaient développer des outils spécifiques.
- (2) Accompagner les actions de recherche dans lesquelles l'information géographique occupe un rôle important. L'atelier a offert une expertise scientifique et technique pour initier et suivre les projets qui impliquent des SIG. Il a participé également activement avec les chercheurs des PRFs pour dégager des axes de recherche qui permettraient de faire évoluer l'outil *OrbisGIS* ou, de manière plus générale les méthodes et algorithmes utilisés dans les SIG.
- (3) Etre une interface entre producteurs et dépositaires afin de faciliter l'utilisation des données géographiques et géostatistiques dans les programmes de recherche. L'Atelier SIG a assuré, par exemple, le conventionnement avec les collectivités, les services de l'État, les établissements d'enseignement supérieur et de recherche et les sociétés afin de proposer un guichet unique pour obtenir mais aussi partager des données géographiques. Ce guichet a été concrétisé par la mise en place d'une Infrastructure de Données Spatiales (IDS), appelée *CartoPOLIS* (<http://www.cartopolis.org>).
- (4) Conduire une veille scientifique et technologique pour concevoir une base de connaissances sur les méthodes inhérentes aux outils SIG et les nouvelles techniques et normes dans le domaine de l'information géographique.

La Figure 4 résume la forte transversalité de l'activité SIG. Cette activité intègre l'ensemble des données observées (mesure sur site, télédétection) et simulées (micro-climat, bruit dans l'environnement). Ces données sont organisées, structurées (Base de Données) pour produire des connaissances spatialisées à l'aide de méthodologies dédiées et construites en interdisciplinarité. Ce dispositif a été mis à profit pour le développement de méthodologies dédiées à la gestion participative de la ville (évaluation, anticipation, conception). Ces méthodologies permettent de croiser instrumentation des phénomènes environnementaux et problématiques d'aménagement du territoire. Par exemple, la cartographie des niveaux sonores peut être mise en relation avec des préoccupations sanitaires par l'intermédiaire d'indicateurs géographiques d'exposition des populations.

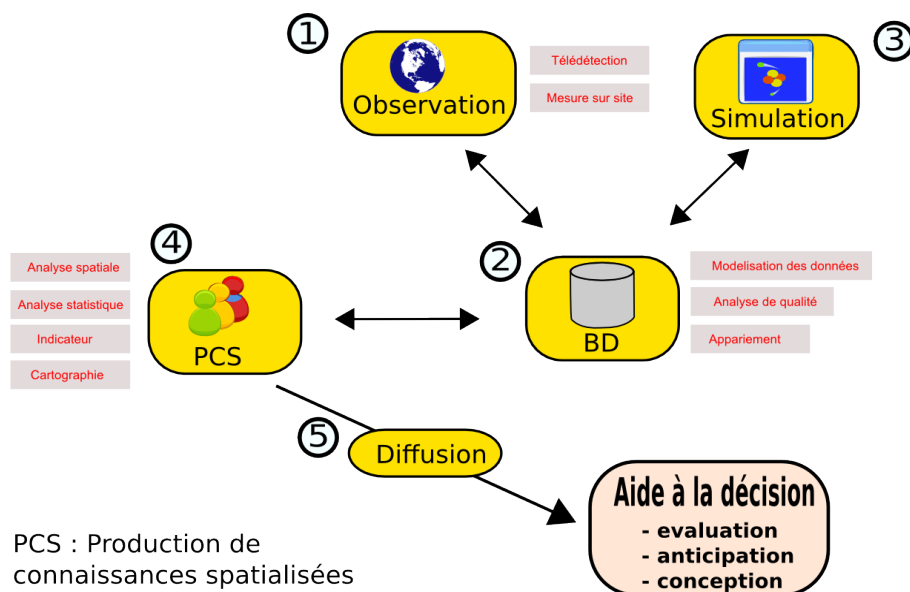


Figure 4: Les activités de l'Atelier SIG

L'une des plus-values de cette organisation catalytique dont j'ai assuré la planification et le fonctionnement (personnels, budgets, axes de travail) réside sans doute dans la création de la plateforme SIG open source *OrbisGIS*, outil commun, partagé par l'ensemble des PRFs et qui a évolué au gré des questions de recherche.

### 2.6.2.3 Les projets de recherche fédératifs de l'IRSTV (2006 - 2015)

Si l'Atelier SIG a constitué un outil pour catalyser mes recherches en sciences de l'information géographique à travers la mise en œuvre et le développement de plates-formes et de bases de données communes, en revanche les PRFs m'ont permis de formaliser une réflexion scientifique sur des thèmes de recherche multiples comme l'observation, la description et la représentation de la ville et des milieux urbains ou encore la connaissance, la compréhension de la ville et des environnements urbains pour leur gestion durable. A cet égard, je me suis particulièrement investi dans deux PRFs :

- le PRF Données Urbaines (2006-2011),
- le PRF Géoconnaissance Urbaine (2011 – 2015).

#### PRF Données Urbaines (2006-2011)

Sous la responsabilité de Guillaume Moreau de l'UMR 1563 Ambiances Architectures Urbanités, le PRF Données Urbaines m'a permis de renforcer mon champ de compétences en sciences de l'information géographique en confrontant les méthodes et techniques de la géographie (ma

formation initiale) avec celles notamment de l'informatique : image, traitement du signal, algorithmie, langage, programmation. Composé de membres du CERMA, de l'IRCCyN, du L2G, du L3i et du Lienss, l'objectif scientifique du PRF était de construire les bases théoriques et instrumentales d'un outil de capitalisation des connaissances du milieu urbain ainsi que des méthodes d'analyse et des techniques de gestion. En participant aux séminaires d'équipe, aux contrats de recherche, j'y ai acquis la conviction de la nécessité de faciliter la circulation des informations à travers l'utilisation des standards (interopérabilité) mais également le décloisonnement des outils SIG. Ce décloisonnement s'est traduit par une spécialisation des fonctionnalités d'archivage, d'affichage, d'analyse, d'acquisition et d'abstraction. J'ai ainsi participé à des recherches originales sur :

- l'utilisation des informations disponibles dans des images géolocalisées comme une photo de bâtiments prise à l'aide d'un téléphone pour enrichir un SIG,
- la caractérisation des tissus urbains à partir des réseaux afin d'essayer de prévoir l'évolution de la morphologie d'une ville,
- le développement d'un outil SIG centré autour d'un langage de manipulation de données géographiques multi-sources : vecteur et raster.
- la définition d'un nouveau langage, interopérable pour la cartographie.

Ces travaux ont constitué le ciment de l'Atelier SIG et le support du développement de la plate-forme *OrbisGIS*.

### **PRF Géoconnaissance Urbaine (2011 – 2015)**

Le PRF Géoconnaissance Urbaine, animé par Nathalie Long de l'UMR Lienss, est le résultat de l'évolution thématique des PRF TU Télédétection Urbaine et DU Données Urbaines. J'ai contribué à la rédaction scientifique du projet dont l'objectif était de construire un espace commun de définition et de partage des connaissances géographiques sur la ville en alliant les outils de la géomatique et de la télédétection : de l'acquisition des données jusqu'à la production d'analyses spatiales.

Mes collaborations au sein du PRF Géoconnaissance Urbaine ont abouti à plusieurs réalisations.

- La mise en œuvre d'une méthodologie pour unifier la description de l'usage et de l'occupation des sols à partir de données multi-sources. Un corpus de connaissances, basé sur le thésaurus GEMET a été élaboré et intégré au sein d'une base de données géographiques. Des médiateurs sémantiques ont été développés pour établir des correspondances entre le corpus de connaissances et les principales bases de données et termes utilisés (BD Topo, Urban Atlas, Corine Landcover...). Ces médiateurs sont manipulés à l'aide d'un meta-langage.
- La définition puis la mise en œuvre de métriques pour contrôler la qualité des données géographiques. Ces métriques ont été intégrées dans la plate-forme *OrbisGIS*.
- La formalisation puis l'intégration d'un nouveau langage permettant de manipuler les données géographiques multi-sources et d'emboîter des fonctions d'analyses spatiales pour construire des chaînes de traitement. De nouveaux algorithmes ont été introduits dans la plate-forme *OrbisGIS* pour produire des indicateurs urbains nécessaires aux modèles de simulation climatique.

### **2.6.2.4 Réseaux et communautés scientifiques (2006 - aujourd'hui)**

Au-delà de mes activités au sein des équipes de recherche, je me suis entouré de nouveaux partenaires scientifiques mais également opérationnels tant au niveau régional, national qu'international.

#### **Au niveau régional**

De 2006 à 2015 → Participation aux comités technique et aux groupes thématiques du programme GEOPAL<sup>11</sup>. GEOPAL est un programme commun de l'information géographique pour les acteurs publics des Pays de la Loire. Ce programme a pour but de fédérer leurs actions dans le champ de l'information géographique dans le respect des initiatives de chacun et en cohérence avec les projets nationaux. Il est co-piloté et financé à parité par l'État et la Région des Pays de la Loire avec le soutien du FEDER.

#### **Au niveau national**

De 2012 à 2015 → Participation au Groupement d'Intérêt Scientifique Modélisation Urbaine (GIS-MU) et notamment au groupe « plate-forme ».

De 2009 à 2014 → Participation à la rédaction du groupe projet « Les systèmes d'information de la ville durable » du Groupement De Recherche MAGIS<sup>12</sup>.

De 2006 à 2009 → Participation au groupe de travail « Echange-Construction-Mutualisation » du Groupement De Recherche SIGMA /CASSINI.

#### **Au niveau international**

De 2009 à aujourd'hui → Animation et coordination de la communauté scientifique OGRS<sup>13</sup> (Open Source Geospatial Research & Education Symposium). La communauté OGRS a été créée suite au premier symposium que j'ai organisé en 2009 à l'Ecole Centrale avec l'équipe du Media Engineering Institute<sup>14</sup>. OGRS a pour objectifs :

- de dresser un panel des travaux scientifiques, notamment les innovations, réalisés dans le domaine des sciences de l'information géographique, utilisant ou se basant sur des outils libres, des standards ouverts et de l'open data,
- de développer un cadre scientifique critique et constructif sur les apports scientifiques,
- de fournir une plate-forme d'échanges pour développer et stimuler des travaux de collaboration entre les laboratoires de recherche et les universités.

La communauté OGRS est aujourd'hui constituée par des membres du Lab-STICC (France), du Media Engineering Institute (Suisse), du LASIG de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse), de l'université de Pérouse (Italie), du National Research Council, Research Institute for Geohydrological Protection IRPI (Italie) et du Territorial Engineering Institute insit de la HEIG-VD (Suisse).

---

11 <http://www.geopal.org> consulté en janvier 2018

12 <http://gdr-magis.imag.fr/> consulté en février 2018

13 <http://www.ogrs-community.org/> consulté en février 2018

14 <https://heig-vd.ch/rad/instituts/mei> consulté en février 2018

De 2010 à aujourd'hui → Co-président du groupe de travail sur le standard de cartographie Symbology Encoding<sup>15</sup> à l'Open Geospatial Consortium. Avec Olivier Ertz, professeur à la Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud<sup>16</sup> et chercheur au Media Engineering Institute, nous pilotons la refonte de la spécification internationale de cartographie. Ce travail m'amène à animer, organiser et participer à des réunions internationales dans lesquelles se trouvent les grands acteurs de l'information géographique.

De 2010 à 2013 → Membre de la commission « Open Source Geospatial Technologies » de l'association internationale de cartographie<sup>17</sup>.

## 2.7 Organisation de manifestations scientifiques

Mon activité m'a amené à organiser de nombreux séminaires nécessaires pour stimuler le débat scientifique mais également pour restituer les travaux. Par ailleurs, j'ai organisé deux manifestations marquantes.

### Co-organisation de l'école d'été : GIS OpenSource Summer School<sup>18</sup>

Dans le cadre d'une coopération avec l'Université de Girona en Espagne, j'ai co-organisé et participé à une école d'été ERAMUS sur les SIG open source.

L'école d'été, intitulée « Open Source opportunities in GIS », s'est déroulée à Girona du 28 juin au 9 juillet 2010. Elle a été créée à l'initiative de l'équipe SIGTE<sup>19</sup> (Servei de Sistemes d'Informació Geogràfica i Teledetecció). Plusieurs partenaires étaient associés : l'École de science et technologie de l'université d'Aalto<sup>20</sup>, l'Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, le Nottingham Geospatial Institute<sup>21</sup>.

Elle a réuni 25 étudiants européens dont 5 étudiants du Master STEU (Sciences et Techniques des Environnements Urbains) de l'IRSTV. J'y ai donné deux cours magistraux ainsi que deux ateliers pratiques.

#### Intitulés des cours magistraux

Lecture note : Spatial hydrology

Lecture note : Spatial language

#### Intitulés des ateliers

Exercices : Practical introduction to *OrbisGIS* 3.0

Exercices : Advanced SQL spatial analysis with *OrbisGIS*

---

15 <http://www.opengeospatial.org/projects/groups/sldse1.2swg> consulté en février 2018

16 <http://www.heig-vd.ch/> consulté en février 2018

17 <https://opensourcegeospatial.icaci.org/> consulté en janvier 2018

18 <http://www.sigte.udg.edu/summerschool2010/> consulté en janvier 2018

19 <http://www.sigte.udg.edu/> consulté en janvier 2018

20 <http://www.aalto.fi/en/> consulté en janvier 2018

21 <https://www.nottingham.ac.uk/ngi/index.aspx> consulté en janvier 2018

## Co-organisation des symposiums OGRS

Depuis 2009, date de l'organisation du premier symposium OGRS qui a eu lieu à l'Ecole Centrale de Nantes et qui a réuni 300 personnes sur 3 jours, j'ai participé activement à structurer la communauté OGRS. Depuis 2009, trois nouveaux événements OGRS ont été organisés.

(1) En 2012 en Suisse à Yverdon-Les-Bains, par la Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD), en partenariat avec l'EPFL, l'Université de Lausanne et l'Université de Genève.

(2) En 2014, en Finlande à Helsinki par l'Université d'Aalto.

(3) En 2016, en Italie à Pérouse par l'Institute for Geo-hydrological Protection (IRPI<sup>22</sup>) du Centre National de la Recherche (CNR).

Pour chacun de ces événements, j'ai pris part au comité scientifique.

OGRS a permis de tisser à l'international un réseau de scientifiques et d'enseignants qui œuvrent autour du partage, de la co-construction de méthodes et d'outils en sciences de l'information géographique sur des thématiques multiples dans l'esprit d'une science ouverte.

Le dernier symposium a eu lieu en octobre 2018 en Suisse-Italienne à Lugano<sup>23</sup>.

## 2.8 Évaluation

### 2.8.1 Jury de thèse

**2017** → Jeremy Bernard, *Signature géographique et météorologique des variations spatiales et temporelles de la température de l'air au sein d'une zone urbaine*. Génie civil. Ecole Centrale de Nantes (ECN).

### 2.8.2 Evaluation d'articles scientifiques

**2009 – 2018** → Relecteur pour les symposiums OGRS (2009, 2012, 2014, 2016, 2018)

**2016** → Relecteur d'un papier pour « the 10th IEEE International Conference on Big Data Science and Engineering (IEEE BigDataSE-16) »

**2011 – 2012** → Relecteur pour la revue *International Journal on Software Tools for Technology Transfer*, Springer.

**2012** → Relecteur pour *European Transport Research Review*, Springer

**2010** → Participation au comité scientifique FOSS4G 2010<sup>24</sup> et à la sélection des papiers académiques.

---

22 <http://www.irpi.cnr.it/> consulté en février 2018

23 <http://2018.ogrs-community.org/> consulté en juillet 2018

24 <http://2010.foss4g.org/scientific.php.html> consulté en février 2018



### 2.8.3 Instances du CNRS

**2013 - aujourd'hui** → Relecteur tous les ans des profils de postes IT affichés aux concours externes pour la BAP D Famille B.

**2016** → Participation à l'étude sur l'interdisciplinarité des ingénieur-e-s et technicien-ne-s<sup>25</sup> au CNRS pilotée par l'Observatoire des métiers et de l'emploi scientifique.

**2013** → Animation du groupe de travail de la BAP D - famille B dans le cadre de la mise à jour du référentiel de l'emploi IT – REFERENS<sup>26</sup>, initiée par la Direction générale des ressources humaines du Ministère de l'Education nationale, de l'enseignement supérieur et de la recherche, l'Observatoire des métiers et de l'emploi scientifique du CNRS. Réactualisation de la cartographie de la branche d'activité et de la famille professionnelle ainsi que des emplois-types afférents.

**2011** → Participation à la CAP AI pour la BAP D - famille B.

### 2.8.4 Instance de normalisation

**2015 - aujourd'hui** → Représentation du Lab-STICC et du CNRS à l'Open Geospatial Consortium.

**2010 - 2015** → Représentation de l'IRSTV et du CNRS à l'Open Geospatial Consortium.

### 2.8.5 Expertises scientifiques

**2009 - 2015** → Participation régulière aux réunions techniques du programme GeoPAL.

**2012** → Expertise et conseil scientifiques pour la mise en place d'une méthodologie d'enrichissement du cadastre parcellaire pour le Pays de Guingamp.

→ Expertise scientifique sur les outils SIG nécessaire pour mutualiser l'information sur la nature en ville dans le cadre du groupe de travail GéoInformation et Nature en Ville du Ministère de l'Environnement du Développement Durable et de l'Energie.

---

25 [https://www.dgdr.cnrs.fr/drh/omes/documents/pdf/Etude\\_interdisciplinarit%C3%A9%20IT.pdf](https://www.dgdr.cnrs.fr/drh/omes/documents/pdf/Etude_interdisciplinarit%C3%A9%20IT.pdf) consulté en février 2018

26 [https://data.enseignementsup-recherche.gouv.fr/pages/les\\_bap/](https://data.enseignementsup-recherche.gouv.fr/pages/les_bap/) consulté en février 2018

## 2.9 Vulgarisation – Interventions publiques

**2018** → Participation à l'opération Immersion Sciences organisée par la Délégation Régionale Bretagne Pays de la Loire du CNRS<sup>27</sup>

**2016** → Organisation d'une démonstration de *NoiseCapture* lors de la Nuit de la Science à Lorient.

**2008** → Organisation d'un atelier lors de la Fête de la science à l'Ecole Centrale de Nantes sur le thème : Cartographier et analyser l'évolution de l'occupation des sols de trois grandes villes d'Europe.

Le tableau ci-dessous est une synthèse spécifique pour l'application *NoiseCapture*. En effet, de nombreuses activités de vulgarisation ont été réalisées depuis le Communiqué de Presse officiel du CNRS, en date du 31 août 2017 qui a annoncé la sortie de l'application.

| Date       | Média                           | Type média    | Titre   |
|------------|---------------------------------|---------------|---|
| 31/08/2017 | Up Magazine                     | Web           | Vous souffrez du bruit ? Consultez et participez à la carte de l'environnement sonore du CNRS ( <a href="#">lien</a> )                                  |
| 31/08/2017 | MyScience                       | Web           | A new mobile application helps scientists map the sound environment ( <a href="#">lien</a> )  |
| 01/09/2017 | France Inter – La tête au carré | Radio         | NoiseCapture, contre la pollution sonore ( <a href="#">lien</a> )   |
| 01/09/2017 | Le Journal de l'environnement   | Web           | Cartographier le bruit urbain avec son smartphone ( <a href="#">lien</a> )  |
| 01/09/2017 | PhysOrg                         | Web           | A new mobile application helps scientists map the sound environment ( <a href="#">lien</a> )  |
| 03/09/2017 | techno-science.net              | Web           | Aider les scientifiques à cartographier l'environnement sonore grâce à une nouvelle application mobile ( <a href="#">lien</a> )                         |
| 04/09/2017 | Industrie & Technologies        | Web           | NoiseCapture : une appli pour trouver un coin tranquille, loin du bruit ( <a href="#">lien</a> )  |
| 04/09/2017 | Industrie & Technologies        | Web           | Rentrée connectée, batteries recyclées, appli anti-bruit... les innovations qui (re)donnent le sourire ( <a href="#">lien</a> )                         |
| 04/09/2017 | La Gazette des communes         | Web           | Budget en hausse – REP – pollution des eaux – IA... l'actu de la semaine ( <a href="#">lien</a> )   |
| 04/09/2017 | Engineering and technology      | Web           | Noise pollution mapped worldwide with "citizen science" NoiseCapture app ( <a href="#">lien</a> )   |
| 4/09/2017  | Computerwelt                    | Web           | NoiseCapture: App misst globale Lärmbelästigung ( <a href="#">lien</a> )  |
| 04/09/2017 | Wallstreet online               | Web           | App misst globale Lärmbelästigung ( <a href="#">lien</a> )  |
| 05/09/2017 | Ouest France                    | Presse écrite | Une application du CNRS   |
| 06/09/2017 | Le Monde                        | Presse écrite | Une application pour cartographier le bruit   |
| 06/09/2017 | actu-environnement.com          | Web           | NoiseCapture, quand le smartphone devient "oreilles" des scientifiques pour cartographier le son ( <a href="#">lien</a> )                               |
| 06/09/2017 | elektormagazine.fr              | Web           | Aidez les scientifiques à cartographier l'environnement sonore ! ( <a href="#">lien</a> )   |
| 07/09/2017 | newspress.fr                    | Web           | Cartographier l'environnement sonore grâce à une application mobile ( <a href="#">lien</a> )  |
| 08/09/2017 | Communications of the ACM       | Web           | A New Mobile Application Helps Scientists Map the Sound Environment ( <a href="#">lien</a> )  |
| 10/09/2017 | Numerama                        | Web           | Le CNRS a besoin de vous pour cartographier l'environnement sonore ( <a href="#">lien</a> )   |
| 11/09/2017 | Les Echos                       | Presse écrite | NoiseCapture, l'application qui mesure le bruit en ville ( <a href="#">lien</a> )   |
| 11/09/2017 | La Croix.com                    | Web           | Mesurer le bruit avec un smartphone, c'est possible ! ( <a href="#">lien</a> )  |
| 11/09/2017 | industrie-techno.com            | Web           | Nouvel Iphone, appli anti-bruit, véhicules électriques : les innovations qui mettent de bonne humeur ( <a href="#">lien</a> )                           |
| 11/09/2017 | M6                              | TV            | La minute web ( <a href="#">lien</a> )  |
| 12/09/2017 | RSE magazine                    | Web           | Une nouvelle application permet de "cartographier l'environnement sonore" ( <a href="#">lien</a> )  |
| 12/09/2017 | Cnews                           | Presse écrite | Le bruit ambiant mesuré   |
| 15/09/2017 | 01net.com                       | Web           | Téléchargement : les dix meilleurs logiciels et applications de la semaine ( <a href="#">lien</a> )   |
| 19/09/2017 | puissance2d.fr                  | Web           | Lutte contre le bruit : aidez les scientifiques à cartographier l'environnement sonore grâce à une nouvelle application mobile ( <a href="#">lien</a> ) |
| 29/09/2017 | Deutschlanfunk Nova             | Radio         | App für lärmforschung ( <a href="#">lien</a> )  |
| 17/10/2017 | Industrie et technologies       | Presse écrite | Numerique - Le bruit sous surveillance  |
| 17/10/2017 | France Inter- C'est déjà demain | Radio         | Cartographier le bruit ( <a href="#">lien</a> )   |
| 06/11/2017 | environnement-magazine.fr       | Web           | Une application mobile pour cartographier l'environnement sonore ( <a href="#">lien</a> )   |
| 29/12/17   | Industrie & Technologies        | Web           | NoiseCapture dans les 10 meilleurs innovations de l'année 2017 ( <a href="#">lien</a> )   |

27 <http://www.ac-rennes.fr/cid114262/immersion-sciences-2017.html> consulté en février 2018

## 3 PRODUCTION SCIENTIFIQUE

### 3.1 Articles dans des revues répertoriées avec comité de lecture

- [1] **Bocher E**, Guillaume G, Picaut J, Petit G, Fortin N. (2019) NoiseModelling: An open source GIS based tool to produce environmental noise maps, ISPRS International Journal of Geo-Information, In press
- [2] Picaut J, Fortin N, **Bocher E**, Petit G, Aumont P, Guillaume G. (2018) An open-science crowdsourcing approach for producing community noise maps using smartphones, Building and Environment.
- [3] Hidalgo J, Dumas G, Masson V, Petit G, Betchel B, **Bocher E**, Foley M, Schoetter R, Mills G. (2018) Comparison between Local Climate Zones maps derived from administrative datasets and satellite observations, Urban Climate. In press
- [4] Bernard J, **Bocher E**, Petit G, Palominos S. (2018) Sky View Factor Calculation in Urban Context: Computational Performance and Accuracy Analysis of Two Open and Free GIS Tools, Climate 2018, 6(3), 60, <https://doi.org/10.3390/cli6030060>
- [5] **Bocher E**, Petit G, Benard J, Palominos S. (2018) A geoprocessing framework to compute urban indicators: The MApUCE tools chain, Urban Climate 24C (2018) pp. 153-174
- [6] **Bocher E**, Ertz O. (2018) A redesign of OGC Symbology Encoding standard for sharing cartography. PeerJ Computer Science 4:e143 <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.143>
- [7] **Bocher E**, Petit G, Picaut J, Fortin N, Guillaume G. Collaborative noise data collected from smartphones, Data in Brief, Volume 14, 2017, Pages 498-503, ISSN 2352-3409, <https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.07.039>.
- [8] Bernard J, Musy M, Calmet I, **Bocher E**, Kéravec P. Urban heat island temporal and spatial variations: Empirical modeling from geographical and meteorological data. Building and Environment, Elsevier, 2017, 125, pp.423-438.
- [9] Guillaume G, Can A, Petit G, Palominos S, Fortin N, Gauvreau B, **Bocher E**, Picaut J. Noise mapping based on participative measurements. Noise Mapping, 2016, 3 (1), pp.140-156.
- [10] Bernabé A, Bernard J, Musy M, Andrieu H, **Bocher E**, Calmet I, Kéravec P, Rosant J-M. Radiative and heat storage properties of the urban fabric derived from analysis of surface forms. Urban Climate, Elsevier, 2015, 12, pp.205-218.
- [11] Mestayer P, Bourges B, Fouillé L, **Bocher E**, Schmidt T. (2015). Évaluation environnementale du PDU nantais 2000-2010 à partir des simulations numériques des scénarios alternatifs du programme Eval-PDU. Recherche Transports Sécurité, NecPlus, 2015 (2), pp.97-120.

[12] Rodriguez F, **Bocher E**, Chancibault K, 2013. Terrain representation impact on periurban catchment morphological properties. *Journal of Hydrology*.

[13] Mestayer P, Abidi A, André M, **Bocher E**, Bougnol J, Bourges B, Brécard D, Broc J.-S, Bulteau J, Chiron M, Fadet P.-Y, Faburel G, Fialaire J, Fortin N, Freneau A, Fritsch B, Herbez P, Joumard R, Leduc T, Pen Y. L, Lépicié V, Leveaux S, Orfeuill J.-P, Penven F, Petit G, Picaut J, and Rebours A. Environmental impacts assessment of urban mobility plan: a methodology including socio-economic consequences. In S. Rauch and G. Morrison, editors, *Urban Environment: proceedings of the 10th Urban Environment Symposium, Alliance for Global Sustainability Bookseries*, chapter 2, pages 15-26. Springer Netherlands, 2012.

[14] Steiniger S, **Bocher E**. An Overview on Current Free and Open Source Desktop GIS Developments, *International Journal of Geographical Information Science*, 2008.

[15] **Bocher E**, Le Vaillant R, Bedel O, 2005, « SIG « paysages bocagers » : un outil pour l'étude des paysages bocagers », *Revue internationale de géomatique*, vol. 15, n° 3, 2005, pp. 357-382.

## 3.2 Directions d'ouvrages

[1] Bocher E, Neteler M. Geospatial Free and Open Source Software in the 21st Century. *Open Source Geospatial Research Symposium*, Jul 2009, Nantes, France. XIV, 2012, *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, 978-3-642-10595-1.

[2] Bocher E, Ertz O. OGRS'09 Abstract proceeding. Bernard A, Chinesta P. *Open Source Geospatial Research Symposium*, Jul 2009, Nantes, France. 2009.

## 3.3 Ouvrages scientifiques

[1] Faraut S, Bonhomme M, Tornay N, Amosse A, Masson V, **Bocher E**, Petit G, Plumejeaud C, Long N, Bretagne G, Schoetter R. Des bases de données urbaines aux simulations énergétiques – Le projet MApUCE. Editions Universitaires de Lorraine. SCAN'16 - Séminaire de Conception Architecturale Numérique - Mètre et paramètre, mesure et démesure du projet, Sep 2016, Toulouse, France. PUN - Presses Universitaires de Nancy; ISBN 978-2-8143-0289-1, SCAN - Séminaire de conception architecturale numérique, pp.175-184 2016, SCAN'16 - Séminaire de Conception Architecturale Numérique.

[2] **Bocher E**, Petit G. *OrbisGIS: Geographical Information System Designed by and for Research*. Wiley. *Innovative Software Development in GIS*, 2013

[3] **Bocher E**, Petit G. *OrbisGIS : Un Système d'Information Géographique construit par et pour la recherche*. Développement logiciels en géomatique : innovations et mutualisation, Hermes Science Publications, 2012, *Information Géographique et Aménagement du Territoire - Traité IGAT*.

[4] Mestayer P, Abidi A, André M, **Bocher E**, Bougnol J, et al.. Environmental impact assessment of urban mobility plan: a methodology including socio-economic consequences. Sébastien Rauch;

Gregory M. Morrison. Urban Environment - Proceedings of the 10th Urban Environment Symposium, 19, Springer Netherlands, pp.15-26, 2011, Alliance for Global Sustainability Bookseries.

[5] **Bocher E**, Martin J-Y . TAnaTo2: A Tool to Evaluate the Impact of Natural and Anthropogenic Artefacts with a TIN-Based Model. Geospatial Free and Open Source Software in the 21st Century, XIV, Springer Berlin Heidelberg, pp.63-85, 2011, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography.

[6] Leduc T, **Bocher E**, Moreau G. GDMS-R: A mixed SQL to manage raster and vector data. J. Horák; L. Halounová; D. Kusendová; P. Rapant; Vít. Vozenilek. Advances in Geoinformation Technologies, VŠB - Technical University of Ostrava, pp.43--56, 2009.

[7] Lang C, Gille E, Fister V, **Bocher E**. L'hydrologie en géographie, in , dynamique et gestion de l'hydrosystème, L'Harmattan.. Gilles Arnaud-Fassetta; Richard Laganier. Les Géographies de l'eau Processus, dynamique et gestion de l'hydrosystème, L'Harmattan, 2009, Itinéraires géographiques.

[8] Le Vaillant R, **Bocher E**, Le Squère R. Regards sur l'évolution du bocage et les difficultés d'un aménagement foncier: L'exemple de la commune de Quemper-Guézennec (22). Annie Antoine et Dominique Marguerie. Bocages et Sociétés, PUR, pp.419-428, 2008.

[9] **Bocher E**, Penven M-J, Bedel O. Organisation spatiale des systèmes bocagers et parcours des écoulements de surface. Annie Antoine et Dominique Marguerie. Bocages et Sociétés, PUR, pp.245-260, 2007.

### 3.4 Articles dans des revues non répertoriées avec comité de lecture

[1] Picaut J, Fortin N, Aumond P, **Bocher E**, Petit G and Guillaume G. (2017) NoiseCapture : une démarche Open Science pour la production collaborative de cartes de bruit à l'aide de smartphones. Acoustique & Techniques, (86–87), 37–46.

[2] Picaut J, Aumond P, Can A, **Bocher E**, Petit G and Guillaume G. (2017) Les outils connectés de l'environnement sonore : état de l'art et prospective. Acoustique & Techniques, (86–87), 11–17.

[3] Leduc T, **Bocher E** and González Cortés F. (2009). Efficient Constrained Delaunay Triangulation implementation. PositionIT (EE Publishers (Pty) Ltd, South Africa), 37-40.

### 3.5 Communications avec actes dans un congrès international

[1] Masson V, Hamdi R, Fortelius C, Wichers schreur B, Tascu S, Bucher B, **Bocher E**, Perrels A, Van Schaeysbroeck B, Calvet J-C, Lemonsu A, Votsis A, Hoarau C, Petit G, Van Velthoven P and Cica R. (2018). URCLIM project: development of the Urban Climate Services, European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, 8–13 April 2018, <https://egu2018.eu/>

[2] Masson V, Schoetter R, **Bocher E**, Hidalgo J, Amossé A, Bonhomme M, Bourgeois A, Bretagne G, Caillerez S, Cordeau E, Demazeux C, Faraut S, Gallato C, Haoues-Jouve S, Jouglar R, Lambert M.-L, Lemonsu A, Lévy J.-P, Long N, Lopez C.-X, Petit G, Pellegrino M, Pignon C, Plumejeaud C, Ruff

- V, Tornay N, Vye D. (2018). How to model people behaviors in TEB? From urban data to energy consumption simulations. (overview of the MApUCE project results), <http://www.icuc10.org/>
- [3] Picaut J, Aumond P, Can A, Fortin N, Gauvreau B, **Bocher E**, Petit G, Guillaume G. (2017). Noise mapping based on participative measurements with a smartphone. In *The Journal of the Acoustical Society of America* (Vol. 141, pp. 3808–3808). Boston, USA: Acoustical Society of America.
- [4] **Bocher E**, Petit G, Fortin N, Picaut J, Guillaume G, & Palominos S. (2016). OnoM@p : a Spatial Data Infrastructure dedicated to noise monitoring based on volunteers measurements. In *OGRS 2016* (p. 11). Perugia, Italie:
- [5] Delamain, M., Rodriguez, F., **Bocher E**, Puizillout-Lieppe, C., Petit, G., Fortin, N., & Rouaud, J.-M. (2016). Evaluation des sources de polluants susceptibles d’impacter les ouvrages de gestion des eaux pluviales - Diagnostic exhaustif à l’échelle du territoire nantais. Assessment of pollutant sources that could impact stormwater management facilities - Exhaustive diagnosis of the Nantes metropole territory (p. 6). Presented at the Novatech 2016, Lyon, France.<http://hdl.handle.net/2042/60443>.
- [6] Masson V, Julia Hidalgo, Alexandre Amossé, **Erwan Bocher**, Marion Bonhomme, et al.. Urban Climate, Human behavior & Energy consumption : from LCZ mapping to simulation and urban planning(the MApUCE project). Benoit Beckers; Msc. Arch. Tannya Pico; S. Jimenez. First International Conference on Urban Physics, Sep 2016, Quito, Ecuador. UNDP Ecuador, FICUP 2016 First International Conference on Urban Physics, 1 (1), pp.155-167, 2017, FICUP 2016 First International Conference on Urban Physics.
- [7] Jérémy Bernard, M. Musy, I. Calmet, **Bocher E**, P. Keravec. Urban heat island and inertial effects : analyse from field data to spatial analysis. 9th International Conference on Urban Climate (ICUC9), Jul 2015, Toulouse, France. ICUC9 - 9 th International Conference on Urban Climate, 6 p.
- [8] Bernabé A, Musy M, Calmet I, **Bocher E**, Andrieu H. Evaluating the urban climate using geo-database – GEOCLIM TOOL. 9th International Conference on Urban Climate (ICUC9), Jul 2015, Toulouse, France. 2015.
- [9] **Bocher E**, Ertz O. Towards Cartographic Portrayal Interoperability – the Revision of OGC Symbology Encoding Standard. Georg Gartner; Haosheng Huang. 1st ICA European Symposium on Cartography, Nov 2015, Vienne, Austria. 1 (1), pp.116-119, 2015, Proceedings of the 1st ICA European Symposium on Cartography.
- [10] **Bocher E**, Petit G, Fortin N, Palominos S. H2GIS a spatial database to feed urban climate issues. 9th International Conference on Urban Climate (ICUC9), Jul 2015, Toulouse, France. 2015.
- [11] Valery Masson, Julia Hidalgo, Alexandre Amossé, Fateh Belaid, Erwan Bocher, et al.. Urban Climate, Human behavior & Energy consumption: from LCZ mapping to simulation and urban planning (the MApUCE project). 9th International Conference on Urban Climate, Jul 2015, Toulouse, France. Proceeding of the ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate, 2015.
- [12] Nathalie Long, Arnaud Bellec, Erwan Bocher, Gwendall Petit. Influence of the methodology (pixel-based vs object-based) to extract urban vegetation from VHR images in different urban zones. 5th Geobia Conference, May 2014, Thessaloniki, Greece. 5 p.
- [13] Gouge A, **Bocher E**, Fortin N, Petit G. H2Network: A tool for understanding the influence of urban mobility plans (UMP) on spatial accessibility. Open Source Geospatial Research and Education Symposium 2014, Jun 2014, Espoo, Finland. ISBN: 978-952-60-5706-4 (electronic) / 978-952-60-

5707-1 (printed), 2014, Proceedings of the 3rd Open Source Geospatial Research & Education Symposium OGRS 2014.

[14] Rousseaux F, **Bocher E**, Gourlay A, Petit G. Toward a coupling between GIS and agent simulation: USM, an OrbisGIS extension to model urban evolution at a large scale. OGRS 2012, Oct 2012, Yverdon les bains, Switzerland. pp.206, 214, 2012.

[15] Gourlay A, Gueganno A, Petit G, **Bocher E**, Fortin N, Ertz O, Le Glaunec J. OrbisGIS : From GIS to connected geoservices. Olivier Ertz, Stéphane Joost, Marj Tonini. Open Source Geospatial Research Symposium, Oct 2012, Yverdon-les-Bains, Switzerland. lulu.com, pp.324-326, 2012, OGRS2012 Symposium Proceedings.

[16] Fortin N, **Bocher E**, Picaut J, Petit G, Dutilleux G. An opensource tool to build urban noise maps in a GIS. Open Source Geospatial Research and Education Symposium (OGRS), Oct 2012, YVERDON-LES-BAINS, Switzerland. 9p, cartes, 2012.

[17] Gourlay A, **Bocher E**, Petit G. Towards a WPS platform dedicated to an urban knowledge infrastructure. Inspire Conference 2001, Jun 2011, Edinburgh, United Kingdom. 26 p.

[18] **Bocher E**, Petit G, Ertz O, Laurent M. Cartographie et standard : du modèle à l'utilisateur. 25th International Cartographic Conference, Jul 2011, Paris, France. 2011. 8 p. [https://icaci.org/files/documents/ICC\\_proceedings/ICC2011/](https://icaci.org/files/documents/ICC_proceedings/ICC2011/)

[19] **Bocher E**, Leduc T, Moreau G, González Cortés F. GDMS: An abstraction layer to enhance Spatial Data Infrastructures usability. 11th AGILE International Conference on Geographic Information Science - AGILE'2008, May 2008, Girona, Spain. 15 p.

[20] Long N, Simonetto E, **Bocher E**. A combined approach to detect urban features from multi-spectral and radar data. Conference: IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium, Jul 2010, Honolulu, United States. IEEE, pp.1469-1472.

[21] Braud I, Chancibault K, Debionne S, Lipeme Kouyi G, Sarrazin B, Jacqueminet C., Andrieu H, Béal D, **Bocher E**, Boutaghane H, Branger F, Breil P, Chocat B, Comby J, Dehotin J, Dramais G, Furusho C, Gagnage M, Gonzalez- Sosa E, Grosprêtre L, Honegger A, Jankowfsky S, Joliveau T, Kermadi S, Lagouy M, Leblois E, Martin J.Y, Mazagol P.O, Michell K, Molines N, Mosini M.L, Puech C, Renard F, Rodriguez F, Schmitt L, Thollet F, Viallet P. The AVuPUR project (Assessing the Vulnerability of Peri-Urbans Rivers): experimental set up, modelling strategy and first results. 7th Novatech 2010 Conference, Jun 2010, Lyon, France. 10 p., 2010.

[22] Patrice Mestayer, Judicaël Picaut, Abdelhamid Abidi, Michel Andre, **Erwan Bocher**, et al. Environmental impact assessment of urban mobility plan : a methodology including socio-economic consequences. 10th Urban Environnement Symposium Urban Futures for a Sustainable World, Jun 2010, France. 11p, 2010.

[23] Ertz O, **Bocher E**, Laurent M, Petit G, Rappo D. Standard-centric authoring and publication for cartographic content. M.A. Brovelli; S. Dragicevic; S. Li; B. Veenendaal. WebMGS 2010 1st International Workshop on Pervasive Web Mapping, Geoprocessing and Services, Aug 2010, Como, Italy. 6 p. <http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/4-W13/info.aspx>

[24] Long N, **Bocher E**, Leduc T, Moreau G. Sensitivity of spatial indicators for urban terrain characterization. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS-2008, Jul 2008, Boston, United States. 4 p. <http://ieeexplore.ieee.org/document/4779584/>

[25] Bedel O, **Bocher E**, Quénoil H, Beltrando G. Modélisation par maillage triangulaire adaptatif de l'impact d'un futur remblai sur la répartition des écoulements d'air froid dans le vignoble de Châtenois (Alsace). XXI<sup>e</sup> colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Sep 2006, France. pp.101-106, 2006.

### 3.6 Communications sans actes

[1] Petit G, **Bocher E**, Picaut J, Fortin N. "OnoM@p and NoiseCapture european applications": Open Data Access and Harmonisation by Virtual Hub – ENERGIC OD solutions. INSPIRE Conference 2017, Sep 2017, Kehl, Germany. 2017, <http://inspire.ec.europa.eu/conference2017>.

[2] Bernard J, **Bocher E**, Kéravec P, Musy M, Calmet I. Towards processing chains to estimate the urban heat island intensity using FOSS tools. European Conference for Applied Meteorology and Climatology 2017, Sep 2017, Dublin, Ireland. 2017.

[3] Schoetter R, Amossé A, **Bocher E**, Bonhomme M, Bourgeois A, Faraut S, Hidalgo J, Lemonsu A, Lévy J-P, Masson V, Petit G, Tornay N. Evaluation of the Simulated Spatio-Temporal Variability of the Anthropogenic Heat Flux in the Agglomeration of Toulouse, France . 13th Symposium of the Urban Environment , Jan 2017, Seattle, United States.

[4] Hidalgo J, **Masson V**, Schoetter R, Petit G, Bocher E, Dumas G. Comparing WUDAPT Level 0 Cartography with a More Detailed Urban Database. Some Examples for French Cities Using the MApUCE Database. 13th Symposium of the Urban Environment , Jan 2017, Seattle, United States.

[5] Schoetter R, Amossé A, **Bocher E**, Bonhomme M, Bourgeois A, Faraut S, Hidalgo J, Lemonsu A, Lévy J-P, Masson V, Petit G, Tornay N. Evaluation of the simulated spatio-temporal variability of the anthropogenic heat flux in the agglomeration of Toulouse, France. 16th EMS Annual Meeting & 11th European Conference on Applied Climatology (ECAC), Sep 2016, Trieste, Italy. 2016, <http://www.ems2016.eu/> .

[6] Long N, Petit G, **Bocher E**. Urban vegetation: data acquisition and management in OrbisGIS. World Green Infrastructure Congress, Sep 2013, Nantes, France.

[7] Fortin N, Picaut J, **Bocher E**, Petit G, Guéganno A, Dutilleux G. A simple approach for making noise maps within a GIS software. Société Française d'Acoustique. Acoustics 2012, Apr 2012, Nantes, France. 2012.

[8] Leduc T, **Bocher E**, González Cortés F, Moreau G. GDMS-R: A mixed SQL to manage raster and vector data. GIS 2009, Jan 2009, Ostrava, Czech Republic.

[9] González F, **Bocher E**, Leduc T. Geoprosesamiento con SQL en OrbisGIS. III Jornadas de SIG libre, Mar 2009, Girona, España. 2009.

[10] Leduc T, **Bocher E**, González Cortés F. Efficient Constrained Delaunay Triangulation implementation in Java for spatial hydrological analysis. Free and Open Source Software for Geospatial Conference - FOSS4G'2008, Sep 2008, Cape Town, South Africa.



[11] **Bocher E**, Leduc T, Long N, González Cortés F, Moreau G. urbSAT: from spatial SQL to urban indicators. Free and Open Source Software for Geospatial Conference - FOSS4G'2008, Sep 2008, Cape Town, South Africa.

[12] Gonzales-Cortès F, **Bocher E**, Leduc T. OrbisGIS, un sistema de información geográfica orientado a la investigación científica. Open Source World Conference, OSWC 2008, Oct 2008, Málaga, Andalusia, España. Open Source World Conference, OSWC, 2008.

[13] **Bocher E**, Reboux M, Apport des SIG pour la gestion et la protection des ressources en eau, communication Géoévénement 2003, Palais des congrès, Paris, 4, 5 et 6 mars 2003.

### 3.7 Conférences dans un congrès à l'invitation du comité d'organisation

[1] **Bocher E**, Picaut J. Le bruit dans ma ville. La géomatique au service de l'intelligence territoriale, Nov 2016, La Baule, France. 2016, [http://www.geopal.org/accueil/reseaux/rencontres\\_afigeo\\_2016](http://www.geopal.org/accueil/reseaux/rencontres_afigeo_2016).

[2] **Bocher E**, Enjeux de la structuration des connaissances géographiques au service du développement durable des territoires. conférence invité, Geosummit 2014, 3 au 5 juin 2014, Bern.

[3] **Bocher E** and Petit G. "Mutation des territoires. Application à l'étude des limites communales", Les journées de la géomatique des Pays de la Loire - GeoPAL, 17 et 18 décembre 2013, Nantes (FR).

[4] Schmidt T, **Bocher E**, Petit G, "SIG et exposition de la population", Journées Techniques des AASQA (Associations agréées de Surveillance de la qualité De l'Air) , Nantes, France, 16 et 17 octobre 2012.

[5] Hégron G, **Bocher E**, Petit G. The open source GIS, an ideal framework for the development of an integrated modelling platform devoted to sustainable urban planning: First steps with OrbisGIS and CartoPolis. Open Source Geospatial Research & Education Symposium, Oct 2012, Yverdon Les Bains, Switzerland. 2014.

[6] Gourlay A, **Bocher E**. Utilisation du WPS pour la construction d'une base de connaissances sur la ville. 5ème Journée française de l'interopérabilité géospatiale, Nov 2011, Paris, France. 2011.

[7] **Bocher E**, Ertz O, Ribot N et Jacolin Y, « Éléments de comparaison de logiciels SIG open source », conférence Géoévénement 2007, Paris Expo, Porte de Versailles, Paris, 3, 4 et 5 avril 2007.

[8] **Bocher E**, «gvSIG : un SIG libre au cœur d'une infrastructure de données spatiales », colloque SIG libres : logiciels et données, Toulouse, 30 juin 2006.

[9] **Bocher E**, Lepetit A, «Infraestructura de Datos Espaciales movil con gvSIG», 2nd jornadas gvSIG, Construint realitats, 23 y 24 novembre 2006, Valence, Espagne.

[10] **Bocher E**, Contribution de la modélisation spatiale au programme de restauration du bocage , conférence au 6 ème carrefour des gestions locales de l'eau, Rennes, 2 février 2005.

### 3.8 Affiches / posters

[1] Chancibault K. , F. Rodriguez, M-L. Mosini, C. Furusho, **E. Bocher**, M. Palaccio, S. Palma-Lopes, L. Letellier, R. Benot, and H. Andrieu, 2009. An experimental peri-urban basin in North-western

France, EGU General Assembly, 19-24 April 2009, Vienna, Austria, Geophysical Research Abstracts, Vol 11, EGU2009-7219.

[2] Le Vaillant R, **Bocher E**, Le Squere R, Regards croisés sur l'évolution du bocage : de la mémoire des lieux à l'aménagement foncier, L'exemple de la commune de Quemper-Guézennec (22). Communication colloque Bocage et société, Rennes, 29, 30 septembre et 1er octobre 2004.

[3] **Bocher E**, Méthodes pour la modélisation du ruissellement en système bocager, Festival International de Géographie (FIG), Saint-Dié des Vosges, 2 au 5 octobre 2003.

[4] **Bocher E**, Le SIG, un outil au cœur de la politique locale de l'eau, Festival International de Géographie (FIG), Saint-Dié des Vosges, 2 au 5 octobre 2003.

[5] **Bocher E**, Modélisation spatiale des écoulements de surface en système bocager, journée nationale des jeunes géomorphologues, Rennes, 27-29 mars 2003.

### 3.9 Articles de vulgarisation

[1] **Bocher E**, Picaut J (2017). Aider les scientifiques à cartographier l'environnement sonore grâce à une nouvelle application mobile. Communiqué de Presse du CNRS.

[2] Picaut J, **Bocher E**. (2017). NoiseCapture : devenez chasseur de bruits urbains ! Communiqué de Presse de l'IFSTTAR.

[3] Picaut J, **Bocher E**. (2012). La cartographie sonore d'une ville simplifiée grâce à l'utilisation d'un logiciel SIG. Rapport Annuel 2010 LCPC INRETS, p. 39.

### 3.10 Outils de recherche

[1] **2007 – aujourd'hui** → Créateur et coordinateur de la plate-forme SIG Open source *OrbisGIS*<sup>28</sup>

[2] **2006 – aujourd'hui** → Créateur et coordinateur de la base de données spatiales H2GIS<sup>29</sup>

[3] **2014 – aujourd'hui** → Co-créateur avec l'Unité Mixte de Recherche en Acoustique Environnementale (<http://www.umrae.fr/>) de l'application NoiseCapture<sup>30</sup>

### 3.11 Autres publications

[1] **Bocher E**, Petit G, Picaut J, Fortin N, Guillaume G. Noise mapping based on participative measurements. Immersion Sciences, Île Tudy, France. 2017.

[2] **Bocher E**, Petit G. Méthodes et outils pour la construction de la base de données MApUCE. Réunion du Club Environnement FNAU, May 2017, Paris, France. 2017.

---

28 <http://orbisgis.org/> consulté en février 2018

29 <http://www.h2gis.org/> consulté en février 2018

30 <http://noise-planet.org> consulté en février 2018

- [3] Bernard J, Musy M, Isabelle Calmet, **Bocher E**. Méthodologie de reconstitution de la température d'air d'un site urbain à partir de données météorologiques de site rural et de données géographiques. Journées Solene, Novembre 2016, Nantes, France. Journées Solene 2016.
- [4] **Bocher E**, Ertz O. Enjeux de la standardisation des représentations cartographiques : Vers une révision de Symbology Encoding. Analyse et représentation géographique des données environnementales, Sep 2016, Bouguenais, France. 2016.
- [5] **Bocher E**, Ertz O. SLD/SE SWG meeting SLD/SE SWG meeting: 94th OGC Technical Committee. 94th OGC Technical Committee, Mars 2015, Barcelona, Spain. 2015.
- [6] Mestayer P, Petit G, **Bocher E**. Simulation intégrée de modélisations hétérogènes à l'aide d'une infrastructure de données spatiales (exemple du projet Eval-PDU). Modélisation et Évaluation pour la planification urbaine, Sep 2014, Marne-la-Vallée, France. 2014, <https://www.weezevent.com/ecole-ete-2014-gis-mu>.
- [7] Picaut J, Fortin N, Dutilleux G, **Bocher E**, Petit G, Guéganno A. Une méthode simplifiée pour la réalisation de cartes de bruit avec un logiciel SIG. Évaluation environnementale des plans de déplacements urbains. Séminaire final de restitution du programme Eval-PDU, Jun 2012, Nantes, France.
- [8] **Bocher E**, Petit G. Production d'indicateurs à l'aide de la plate-forme OrbiGIS. Spatial Analysis and GEomatics (SAGEO) 2009, Nov 2009, Paris, France. 2009, <http://sageo09.univ-pau.fr/>.
- [9] **Bocher E**, Lepetit A. Infraestructura de Datos Espaciales Móvil con gvSIG. Jornadas Internacionales gvSIG, Nov 2006, Valencia, España. [http://docs.gvsig.org/plone/community/events/jornadas-gvsig/2as\\_jornadas](http://docs.gvsig.org/plone/community/events/jornadas-gvsig/2as_jornadas).
- [10] **Bocher E**, Leduc T. Sharing geospatial knowledge : "The geocognition project". 1st ECN and Keio Univ. Global COE joint workshop, Oct 2008, Nantes, France. 2008.
- [11] **Bocher E**, Mathieu K, Bedel O. Contribution d'une modélisation spatiale au programme de restauration du bocage : Impact des éléments linéaires sur le cheminement des écoulements de surface dans un bassin versant agricole. Carrefour des gestions locales de l'eau, Feb 2005, Rennes, France. 2005.

## 4 LA MUTATION DES SYSTÈMES D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE : 2000 - 2020

Cette synthèse est une réflexion et contribution sur l'apport des Systèmes d'Information Géographique (SIG) au service des problématiques environnementales. La prise en compte de l'espace dans le développement durable est fondamentale et centrale. La lutte contre l'étalement urbain, la maîtrise territoriale de l'énergie, la réalisation de plans-climat, la prise en compte des problèmes de qualité de l'air, de nuisances sonores, d'inégalités écologiques, sont autant de sujets qu'il est impossible de comprendre si l'on oublie leur dimension spatiale. Leur appréhension nécessite d'utiliser des outils adaptés qui permettent de questionner le territoire, de traduire ces changements dans toutes leurs dimensions : « think global, act local ». Ce *patenôtre* impose de faciliter la circulation des informations géographiques afin de favoriser le dialogue, la concertation et la prise de décision.

Les travaux que nous présentons s'inscrivent dans une mutation profonde des méthodes et des techniques pour organiser, questionner et représenter l'information géographique. Les années 2000 marquent l'émergence de nouvelles formes de circulation de l'information, facilitées par les progrès des technologies de l'information et de la communication. Une multitude de systèmes ouverts voient le jour. Ils promettent un meilleur accès aux données, plus de « portabilité », de communication entre les outils en s'appuyant sur des standards. Dans les Sciences de l'Information Géographique (SciG) c'est un domaine en pleine ébullition et une rupture majeure qui va évoluer par le biais de recherches théoriques (concepts, formalismes, langages, usages) et appliquées (services de description, de représentation, de traitements des données, plus globalement infrastructures de données spatiales).

A l'interface de différentes disciplines, nous nous intéressons aux concepts et méthodes qu'il faut mettre en œuvre, voire inventer pour adapter les SIG aux exigences d'une approche systémique. Leur utilisation comme dispositif central de capitalisation et de partage des connaissances est discutée et des propositions sont émises pour faire évoluer les différentes fonctionnalités : abstraction, acquisition, archivage, analyse, affichage.

En développant une recherche bi-dimensionnelle **SUR** et **AVEC** les SIG, nous abordons dans un premier temps :

- la question des langages pour manipuler, raisonner sur les données géographiques mais aussi les représenter.
- les apports et les limites des SIG pour documenter et partager les connaissances : standards, architectures de partage, d'organisation des connaissances.

Dans un deuxième temps, les méthodes et les outils sont éprouvés dans deux contextes d'applications : l'impact des activités anthropiques sur le micro-climat urbain et l'étude du bruit dans l'environnement. Ces applications permettent de s'intéresser à l'ensemble de la filière de l'information : de l'élaboration à l'exploitation et à la restitution des informations géographiques dans une logique de systèmes ouverts et interopérables.

Pour terminer, après avoir dressé un bilan de notre contribution aux Sciences de l'Information Géographique, nous discutons de perspectives de recherche. La diversité des contextes d'applications, l'omniprésence de l'information géographique, les fortes sollicitations sociétales pour plus de

transparence et d'accès aux données et les progrès dans les capacités matérielles et dans les algorithmes amènent à s'interroger sur de nouveaux horizons à explorer comme :

- la multiplicité des standards de l'information géographique et le risque d'éparpillement technologique;
- l'apport de l'open data, de l'information géographique volontaire pour les problématiques environnementales.

## **4.1 D'une organisation en silo aux systèmes intégrés, ouverts et collaboratifs**

La géographie, dans la deuxième moitié du XXème siècle, a produit un important corpus de connaissances pour fournir une lecture quantitative et qualitative des territoires (urbains, ruraux) et des interfaces (périurbain, sol-atmosphère, mer-continent). L'étude des dynamiques et des interactions spatiales en lien avec les logiques d'organisation des sociétés en sont des exemples. Dotés de fonctions de saisie, de stockage, de traitement et d'analyse ainsi que de représentation, les Systèmes d'Information Géographique (SIG) ont fait émerger de nouvelles capacités analytiques. Les SIG ont ouvert la voie à l'analyse spatiale numérique grâce à laquelle il est devenu plus aisé de croiser des informations (Caloz & Collet, 2011). La littérature scientifique regorge de références où les SIG sont mis à profit. (Egenhofer et al., 2016) indiquent ainsi que le nombre de publications qui mentionnent depuis 2010 les termes GIS ou GIScience représente plus de 6 000 occurrences par an ; cinq fois, plus que dans les années 2000.

Jusque dans les années 2000, les SIG sont organisés de façon sectorielle pour des démarches de gestion et de planification (Joliveau, 2004). Ils répondent à des usages spécifiques : agriculture, transports, équipements. Ils sont principalement utilisés à des fins purement techniques et jouent avant tout un rôle de mémoire. Cette organisation en silo trouve néanmoins des limites face aux nouvelles préoccupations sociétales qui émergent, comme la prise en compte de l'environnement dans l'élaboration de projets d'aménagement. La nécessité d'intégrer une évaluation environnementale se traduit par la mise en place de nombreux systèmes d'information métiers exploitant plus ou moins la dimension spatiale du territoire. Une multitude de plates-formes voit le jour. Construites dans des logiques de filières, beaucoup d'entre elles se sont superposées aux outils courants de gestion du territoire (gestion des réseaux, plan d'occupation des sols...). Or un développement durable du territoire exige une approche intégrée de l'environnement. En effet, les problèmes environnementaux trouvent leur cause dans des phénomènes qui sont interdépendants et multi-scalaires. Ainsi, un urbanisme qui encourage la construction de parcs de stationnement peut compromettre l'efficacité d'une politique d'amélioration de la qualité de l'air fondée sur l'achat de véhicules publics moins polluants.

La prise en compte de l'espace dans le développement durable est fondamentale et centrale. La lutte contre l'étalement urbain, la maîtrise territoriale de l'énergie, la réalisation de plans-climat, la prise en compte des problèmes de qualité de l'air, les nuisances sonores, les inégalités écologiques, sont autant de sujets qu'il est impossible de comprendre si l'on oublie leur dimension spatiale. Leur appréhension nécessite d'utiliser des outils adaptés qui permettent de questionner le territoire, de traduire ces changements dans toutes ces dimensions : « think global, act local ». La réponse

scientifique est complexe car elle ne se réduit pas uniquement à articuler un ensemble d'outils entre eux. En effet, une vision synthétique, intégrée, impose de définir des concepts communs, des manières communes de décrire, de raisonner sur un objet d'étude. Or lorsque l'on s'intéresse à un sujet systémique comme le développement durable, différents points de vue pour une même réalité s'expriment.

Faire converger plusieurs disciplines autour d'un sujet commun pour avoir une réponse globale, co-construite est un challenge que les recherches en SICG ont su relever et qui a induit de profonds bouleversements dans cette discipline.

Depuis les années 1990, les champs d'applications n'ont cessé de se diversifier, couvrant des thèmes comme la formalisation de langages pour l'analyse spatiale (Talmy, 1983; Frank & Mark, 1991; Herring, 1991; Egenhofer & Franzosa, 1991), l'acquisition et l'intégration de données géographiques (S. Lunetta et al., 1991; Devogele, Parent & Spaccapietra, 1998; Walter & Fritsch, 1999; Brimicombe, 2009), les bases de données spatiales (Güting, 1994; Shekhar et al., 1999; Rigaux, Scholl & Voisard, 2002), l'interopérabilité (Bishr, 1998; Visser et al., 2000), la cartographie (McMaster & McMaster, 2002; MacEachren, 2004; Peterson, 2009; Andrae et al., 2011)... Ces priorités ont fait l'objet d'agendas scientifiques (McMaster & Usery, 2004; Goodchild, 2009) et ont été relayées par de nombreux événements et réseaux scientifiques comme l'*International Conference on Geographic Information Science*<sup>31</sup>, la *Conference on Spatial Information Theory*<sup>32</sup>, l'Association *AGILE*<sup>33</sup> (*Association of Geographic Information Laboratories in Europe*) ou encore l'*ICA*<sup>34</sup> (*International Cartographic Association*).

Le domaine des sciences de l'information géographique couvre un large spectre qui ne cesse de se renouveler (Miller & Goodchild, 2015). Ce spectre est à l'image des enjeux scientifiques auxquels sont confrontés les acteurs du domaine. Ils sont poussés par les grands défis de notre société qui nécessitent de nouvelles manières de produire, d'analyser et de partager l'information notamment pour rendre la quantité des données disponibles et intelligibles. En effet les données acquises, les analyses réalisées par thèmes (agriculture, gestion des ressources en eau, gestion des infrastructures) doivent pouvoir être croisées pour répondre à des questions plus globales. L'étude par exemple de la tache urbaine doit pouvoir s'appuyer sur les cartes d'occupation du sol mais aussi sur des informations concernant les flux d'hommes et de marchandises. Elle doit également être reliée à d'autres sujets tels que son impact sur la biodiversité, le déplacement des espèces et par conséquent l'empreinte de l'homme sur son territoire. Le gestionnaire doit avoir une vision systémique, globale.

Pour répondre à ces nouvelles exigences, les outils SIG se sont transformés. De solutions monolithiques, installées localement, utilisant peu les bases de données, fonctionnant en silo, ils se sont organisés en services communicants, fédérés. Au milieu des années 2000, le monde des SIG est passé alors de préoccupations techniques liées aux outils à des préoccupations d'ordre collaboratif, plus centrées sur le partage (Pornon & Noucher, 2007). Cette transformation a été largement impulsée par les propositions du comité technique TC211<sup>35</sup> de l'organisme International Standardisation Organisation (ISO) et de celles de l'Open Geospatial Consortium (OGC). L'OGC est à l'instar du World Wide Web Consortium<sup>36</sup> un regroupement volontaire d'organisations (entreprises, associations, universités, services gouvernementaux) œuvrant à la définition de spécifications. Ces deux organismes ont permis de faire converger des réflexions entre thématiciens et techniciens pour définir des modèles

---

31 <http://www.giscience.org/> consulté en mars 2018

32 <http://www.cosit.info/> consulté en mars 2018

33 <https://agile-online.org/> consulté en janvier 2018

34 <https://icaci.org/> consulté en janvier 2018

35 <https://committee.iso.org/home/tc211> consulté en mars 2018

36 <https://www.w3.org/> consulté en mars 2018

abstrait ainsi que les formats inhérents de description, de représentation et d'interrogation de l'information géographique. Ces travaux de standardisation ont constitué le socle pour le développement d'Infrastructures de Données Spatiales (IDS) : un ensemble organisé de services logiciels dialoguant à l'aide de standards et dont l'objectif est de faciliter la recherche et l'utilisation des données géographiques par les utilisateurs (Crompvoets et al., 2004; GSDI, 2009).

Ces dix dernières années, les travaux autour des standards et de leur mise en œuvre dans le cadre d'IDS ont constitué l'une des ruptures majeures pour le monde de la recherche en SIG mais également pour le monde opérationnel. Une multitude de plates-formes ont vu le jour, pilotées par des organisations publiques (échelle locale, régionale, nationale), des organisations associatives, consulaires, de grandes entreprises (Crompvoets et al., 2004; Steiniger & Hunter, 2012). Qualifiées par le terme de « Géoportail », elles servent un but commun : faciliter l'accès, l'échange et le partage des informations géographiques détenues par de nombreux producteurs afin d'en maximiser l'utilisation et la gestion (GSDI, 2009). L'adoption de la Directive Européenne INSPIRE (Directive 2007/2/EC, 2007) élaborée par la Direction générale de l'environnement de la Commission européenne dont l'objectif est de fournir un cadrage pour établir en Europe une infrastructure de données géographiques, a très largement structuré et servi le développement de ces plates-formes (Masser, 2008). Masser, 2005 estime qu'en 2005 onze pays ont adopté une IDS. En 2010 selon Nedovic-Budic, Crompvoets & Georgiadou (2011) 105 pays ont mis en œuvre une infrastructure nationale dédiée aux données géographiques. En France, le projet de recherche GEOBS<sup>37</sup> qui s'intéresse aux contenus et aux usages des Infrastructures de Données Géographiques révèle qu'en 2013 la majeure partie du territoire français est couverte par une IDS (Noucher et al., 2017). En 2012, l'Association Française pour l'information Géographique<sup>38</sup> en recense 65 (Noucher, Georis-Creuseveau et Gourmelon, 2015).

Le fonctionnement d'une IDS repose sur des services *WEB* qui offrent des points d'accès pour interroger et fournir des données géographiques provenant d'un ou plusieurs entrepôts de données. L'interrogation des données et leur affichage sont délégués à des applications clientes qui sont accessibles dans un navigateur internet (application par exemple de cartographie en ligne) ou via un logiciel SIG. Ces applications interrogent alors via le protocole *HTTP* des services installés sur des serveurs. Les protocoles de communication entre les entrepôts, les clients, voire entre les services eux mêmes, reposent sur 4 catégories de standards : pour les flux de données (*WMS*, *WFS*), pour les formats d'échanges (*GML*, *KML*, *OWS-C*, *SE*), pour les catalogues (*CSW*), pour les transformations de données (*WPS*, *CTS*, *WCPS*).

Si le domaine de l'information géographique peut s'enorgueillir d'avoir su se structurer pour faire évoluer ses outils et apporter ainsi des réponses concrètes pour faciliter la circulation des données, on peut néanmoins regretter comme le souligne (Nedovic-Budic, Crompvoets & Georgiadou, 2011) que les recherches sur les IDS ne se soient pas assez développées sur des fondements théoriques, conceptuels au profit d'approches techno-scientifiques et mono-disciplinaires. Compte-tenu de la diversité des domaines de compétences nécessaire pour construire une IDS (analyse spatiale, base de données, cartographie, programmation, interface homme-machine) et des multiples thématiques d'application, on peut s'attendre à des recherches plus transversales et co-construites. Ce type d'approche est indispensable et doit être un garde-fou pour éviter la prolifération des standards qui sont majoritairement guidés par des considérations informatiques (Bocher & Ertz, 2018). Les standards actuels manquent cruellement de couches d'abstraction, d'un effort de conceptualisation qui

---

37 <http://geobs.cnrs.fr> consulté en août 2018

38 <http://www.afigeo.asso.fr/> consulté en août 2018

leur permettrait d'être extensibles, adaptables et interdépendants. Dans leur définition actuelle les standards sont redondants et la plupart liés à un format (encoding) comme le *XML*. Comment s'étonner alors que certains standards comme la cartographie avec le *Style Layer Descriptor*<sup>39</sup> soient adaptés par les éditeurs de logiciels qui y ajoutent des éléments non-standardisés pour répondre à leurs besoins (Bocher et al., 2011). Cet exemple donne à réfléchir sur l'avenir d'une spécification qui ne peut dans ce cas s'utiliser que dans des contextes techniques spécifiques dont l'exploitation est réduite à la solution logicielle qui a permis de la produire.

La percée des standards et en conséquence l'amélioration de l'interopérabilité au sein et entre les plates-formes SIG doit beaucoup aux communautés open source (Steiniger & Bocher, 2009). L'histoire retiendra comme précurseur le logiciel *GRASS*<sup>40</sup> et ses nombreuses applications scientifiques : écologie du paysage, épidémiologie, traitement d'images, hydrologie, géologie... (Neteler & Mitasova, 2008). Mais ce sont les travaux de l'Université du Minnesota aux États-Unis avec le soutien de la NASA, en donnant naissance au premier serveur cartographique *MapServer*<sup>41</sup>, qui donneront le « La » d'une révolution technologique (Vatsavai et al., 2000). En offrant la possibilité de diffuser des données géographiques via le *WEB* et sur la base de standards (d'abord avec le flux *WMS*, plus tard avec *WFS*), *MapServer* transforme les conditions d'accès et facilite le partage de ressources entre les communautés (Zhang et al., 2000). De nombreuses applications de cartographie internet exploitent ces flux de données (Coutard, Klipfel & Blanc, 2005; Steiniger & Hunter, 2012). Dans ce sillage, de très nombreux projets open source émergent (Steiniger & Bocher, 2009) fournissant l'ensemble des composants nécessaires à la mise en œuvre, pour un moindre coût, d'une IDS. On y retrouve les SIG bureautique, les catalogues de données, les interfaces cartographiques en ligne, les serveurs cartographiques, les bases de données, les services de traitements... (Steiniger & Bocher, 2009; Steiniger & Hunter, 2012).

Ces nouvelles applications représentent un changement de cap dans l'évolution du domaine des applications géographiques. Elles deviennent plus interopérables, plus collaboratives. Fonctionnant et interagissant avec des technologies et des supports modernes, elles pénètrent tous les pans de la société et sont utilisées par de nombreuses disciplines. Une évolution qualifiée par les termes de *Web Mapping*, *GeoWeb* ou encore *NeoGeography* (Haklay Muki, Singleton Alex & Parker Chris, 2008). Conjointement, de nouveaux axes de recherche sont apparus, principalement guidés par des besoins techniques et axés sur le développement d'outils comme le calcul distribué, les structures de stockage et de partage de données adaptées aux applications *WEB*, les ontologies, le *Big Data* et l'indexation des données (Egenhofer et al., 2016).

Depuis quelques années, on assiste à un emballement technologique, une profusion de plates-formes en ligne dont le rôle est souvent cantonné à la redistribution et à la documentation de données mutualisées (Noucher, 2013; Noucher et al., 2017). Trop peu de plates-formes offrent ainsi des services pour valoriser les données et servir dans les mécanismes de prises de décision. Néanmoins, la transition numérique est en marche et le mouvement open data ainsi que les actions de sciences participatives ne font que la renforcer. Le projet *OpenStreetMap*<sup>42</sup> est sans nul doute le bateau amiral de l'open data géographique. C'est l'idée folle d'un étudiant voulant «cartographier le Monde rue par rue...», pour réaliser une carte du monde précise et librement modifiable par tous (Coast, 2015). Lancé en 2005, le projet n'a cessé de se renforcer pour atteindre en Mars 2018 près de 5 millions

39 <http://www.opengeospatial.org/standards/sld> consulté en mars 2018

40 <https://grass.osgeo.org/> consulté en mars 2018

41 <http://mapserver.org> consulté en mars 2018

42 <https://www.openstreetmap.org> consulté en juin 2018



d'utilisateurs<sup>43</sup>. Calquée sur une architecture de services, *OSM* a tiré profit des évolutions majeures en sciences de l'information et de la communication pour construire un système d'information géographique basé sur le volontariat et le bénévolat (Goodchild, 2007; Haklay et al., 2010).

A l'heure des réseaux, des impératifs développés par le New Public Management dans lequel se cachent des objectifs de performance et d'efficacité de l'action publique, dans une société qui réclame plus de transparence et d'équité, ces nouveaux SIG co-construits, ouverts, interopérables, inter-connectés sont plus que jamais des éléments indispensables pour mettre en œuvre et évaluer des actions territoriales dans une démarche participative. C'est une tendance observée dans tous les pays et dans de nombreux domaines d'application. Elle marque une nouvelle transformation, celle de la « Science en transition » : une science ouverte qui s'affranchit des barrières autour des données (*Open Data*), des outils (*Open Source*), des formats (*Open Standard*) et des publications (*Open Access*) afin d'œuvrer pour une connaissance partagée et collective (CNRS, 2016; European Commission, 2017).

Les travaux que nous présentons cherchent à faciliter la circulation et le traitement des informations géographiques pour répondre aux défis environnementaux : collecter, organiser, traiter et diffuser les données pour observer, restituer, favoriser le dialogue et la concertation. Ces travaux se positionnent dans un contexte interdisciplinaire (géographie, informatique et environnement) et tirent profit des méthodes et des savoirs de ces disciplines pour faire évoluer les SIG. Notre contribution scientifique s'intègre dans un processus de mutation des SIG engagé depuis les années 2000 et résumé ci-dessus. Cette mutation est liée à la multiplication des acteurs impliqués dans les questions environnementales. Elle nécessite l'intégration de nouvelles formes de production de connaissances face aux enjeux grandissants (**Analyse**), la recherche de représentation des connaissances assimilables et partageables par tous (**Représentation**), un meilleur partage des informations entre acteurs (**Standard**). Dans ce contexte, à la frontière entre la géographie et l'informatique le SIG est appréhendé comme un système polymorphe dont les fondations sont la modularité et l'interopérabilité. Le SIG devient un ensemble de composants abstraits (spécifications), techniques (bibliothèques informatiques) qui s'assemblent, se spécialisent pour répondre à différents usages (SIG bureautique, Géoportail, Observatoire du bruit, ...). Cette approche impose d'établir des mécanismes pour formuler et matérialiser des passerelles entre les composants à l'image des *LEGO*© programmables et laisser ainsi toute sa place à la créativité. Les sections 4.2 et 4.3 abordent ces questions.

La section 4.2 suggère de nouvelles capacités expressives pour réaliser et échanger des analyses sur des données géographiques multi-sources et multi-formes. Pour cela, les limites des langages et des outils pour raisonner sur les données géographiques sont discutées puis des solutions d'amélioration sont exposées. Pour l'illustrer nous présentons le SIG open source *OrbisGIS*, outil créé autour d'un langage de manipulation et d'interrogation de données géographiques : le SQL spatial. Ce langage est utilisé pour construire des analyses spatiales indépendantes du logiciel. *OrbisGIS* permet de produire des indicateurs géographiques qui alimentent des modèles de segmentation (pour partitionner les territoires) et / ou des modèles de simulation (hydrologie spatialisée, micro-climat).

La section 4.3 est consacrée à la problématique de la définition et du partage des représentations cartographiques. En effet, si au cours des années 2000, de nombreux travaux ont été réalisés sur le stockage et le partage des données, l'expressivité des cartes est restée sous exploitée. Cette situation peut s'expliquer d'une part par l'inadéquation des standards de l'OGC (*Style Layer Descriptor* et *Symbology Encoding*) qui ne sont pas assez riches pour construire des représentations travaillées comme des cartes avec des symboles affrontés et d'autre part par leur manque

---

43 [https://www.openstreetmap.org/stats/data\\_stats.html](https://www.openstreetmap.org/stats/data_stats.html) consulté en mars 2018

d'extensibilité. Ces standards sont figés pour une version donnée. Pour améliorer la situation, notre contribution consiste à proposer une refonte de ces standards dont le socle repose :

- sur un état de l'art de l'usage des symboles et des variables visuelles en cartographie,
- la définition d'un modèle conceptuel indépendant du format d'échange,
- la modélisation d'un standard extensible et donc évolutif.

Ce standard est implémenté et mis à l'épreuve dans la plate-forme *OrbisGIS*.

Dans une pénultième section (4.4), les concepts, méthodes et outils des IDS ainsi que les travaux développés dans les sections précédentes sont éprouvés pour deux cas d'application : l'impact des activités anthropiques sur le micro-climat urbain et l'étude du bruit dans l'environnement. Nous présentons la mise en œuvre de deux IDS. Ces IDS permettent de traiter l'ensemble de la filière : de l'élaboration à l'exploitation et à la restitution de l'information géographique dans une logique d'architecture de services géographiques ouverts et interopérables.

In fine, nous abordons les défis scientifiques qui s'ouvrent face à la prolifération des standards et des plates-formes, la progression des données en open data vs les données souveraines et l'accélération du mouvement *Open Science*.

## 4.2 De l'analyse spatiale au SIG *OrbisGIS*

Dotés de fonctionnalités pour décrire et exécuter des tâches complexes et répétitives, les SIG ont ouvert la voie à l'analyse spatiale numérique grâce à laquelle il est devenu plus facile de croiser des informations (Caloz & Collet, 2011). En 30 ans, pléthore d'outils ont été mis à disposition pour questionner les données géographiques : des bibliothèques accessibles via des interfaces de programmation ou des interfaces Homme-Machine, des outils d'intégration tels que les *ETL* (Extract-transform-load) ou encore des langages de requêtes, de scripts (Frank & Mark, 1991; MAINGUENAUD, 2001; Bocher et al., 2008b; Pourabbas, 2014; Hu, Tang & Lu, 2014). Il aura fallu attendre le début des années 2000 et la publication de la spécification *Simple Feature for SQL* (OGC, 1999) pour que les utilisateurs puissent disposer d'une syntaxe commune pour formaliser, exécuter et partager des analyses spatiales, néanmoins pour un modèle de données et un cadre d'utilisation spécifique, celui des bases de données relationnelle. En 2005, la publication de la spécification *Web Processing Service* (Schut, 2005) marque une nouvelle étape dans la possibilité de partager des chaînes de traitements géographiques en proposant une interface générique pour paramétrer et exécuter un géo-traitement sous la forme d'un service web. Cette spécification va dans le sens de la mutualisation et de la constitution de bases de connaissances. Un service *WPS* peut fournir des calculs simples (par exemple, le calcul d'une zone tampon autour d'une rivière) comme des calculs plus complexes (par exemple, l'exécution d'un modèle de calcul de carte de bruit). Les utilisateurs sont à même ensuite de « piocher » dans le service pour assembler et composer leur propre chaîne de traitements.

Les travaux que nous présentons dans cette partie résument notre contribution pour équiper les SIG de capacités expressives et techniques pour réaliser et partager des analyses sur des données géographiques multi-sources et multi-formes. Ils ont conduit au développement du SIG *open source OrbisGIS* (Bocher & Petit, 2013). Construit dans une logique de modularité et d'interopérabilité, *OrbisGIS* a également servi de laboratoire pour mettre à l'épreuve les standards de l'information géographique et en proposer des adaptations.

## 4.2.1 Langage pour l'analyse spatiale

### 4.2.1.1 Contexte

Bénéficiant des développements en informatique, l'analyse spatiale a connu de nombreux bouleversements notamment avec l'apparition de langages d'interrogation, de manipulation, de création de données géographiques. Disponibles dans les logiciels SIG, dans les systèmes de gestion de bases de données ou encore à partir de bibliothèques informatiques, ces langages aux multiples objectifs ont permis aux utilisateurs de mettre en œuvre les fondements théoriques de l'analyse de l'espace en construisant des chaînes analytiques automatisables et reproductibles. Une myriade d'outils a vu le jour. Disposant de leurs propres capacités expressives, inhérentes aux modèles de données qu'ils supportent (raster, vecteur, topologique), contraintes par des algorithmes accessibles avec une sémantique spécifique, ces outils, s'ils ont dynamisé les études géographiques, ont, en revanche, également réduit les possibilités de dialogues entre les communautés. En effet, l'absence de standard pour décrire et manipuler les données géographiques, l'absence d'utilisation de modèle partagé pour structurer et accéder aux données, le manque d'opérateurs en commun, ont pendant longtemps cloisonné les utilisateurs au sein d'outils spécifiques. Le *MapBasic*© pour les utilisateurs de *MapInfo*©, le langage de commandes de *Spatial Analyst*© pour les utilisateurs d'*ArcGIS* © en sont des exemples. Chaque outil ayant son propre langage, ses propres concepts et termes pour décrire un traitement géographique, il est dès lors difficile d'échanger les méthodes à moins de développer des passerelles pour interfacier les outils entre eux, ce qui est rarement le cas ; les éditeurs préférant préserver leurs spécificités technologiques et ainsi capter une communauté d'utilisateurs.

Cependant l'étude de l'environnement requiert un dialogue nourri, structuré et perméable entre différents acteurs scientifiques et institutionnels, nécessitant le recours à la pluridisciplinarité. Pour aménager le territoire de façon durable, les collectivités, les concepteurs et les gestionnaires disposent d'instruments divers de planification (schéma de cohérence territoriale, plan local d'urbanisme, plan de déplacement urbain, plan climat air énergie,...) et d'actions publiques (zones d'aménagement concerté, opération programmée d'amélioration de l'habitat, éco-quartiers, ...) qui doivent être mis en cohérence.

Pour gérer la complexité de ce contexte où tout est en interaction et où tout fait système, nous avons besoin de méthodologies, d'outils de représentation et d'évaluation pour comprendre les phénomènes qui sont à l'œuvre, pour comparer différents scénarios possibles ou probables (analyse des dynamiques urbaines et territoriales sur le court et long terme, analyse comparative de scénarios d'aménagement), pour faire des choix et agir. L'information géographique tient ici une place toute particulière. Elle facilite grandement la compréhension de l'état d'un territoire et de son évolution dans le temps grâce à une représentation visuelle et spatialisée des informations à la fois observées (diagnostics) et traitées (évaluation d'impacts, production d'indicateurs, etc.). Elle est devenue un support indispensable qui accompagne le processus d'aménagement du territoire dans toutes ses étapes : du diagnostic à la décision, de la consultation des experts et des citoyens jusqu'à la communication des résultats.

La donnée géographique représente le maillon essentiel dans toute analyse territoriale. Il existe de nombreux jeux de données décrivant les aspects socio-économiques (population, activités, ...), physiques (occupation des sols, morphologie, énergie, ...) ou environnementaux (micro-climatologie, pollutions, ...). Depuis les années 2000, le développement des standards de l'information géographique et des Infrastructures de Données Spatiales (cf supra) ont facilité la mise à disposition et

les échanges de données. Les travaux sur la standardisation sont néanmoins restés cantonnés aux problèmes de description (Metadonnées) et de structuration des flux de données (WMS, WFS, WCS...), faisant des IDS avant tout des outils de mémoire. L'interopérabilité est vue principalement à travers les données (flux et metadonnées).

En considérant qu'une meilleure circulation de l'information géographique passe aussi par une amélioration des conditions de partage des méthodes de traitements et par conséquent des connaissances, nous avons exploré les limites des langages informatiques pour raisonner avec des données géographiques. L'un des défis était de proposer un système capable d'interroger des sources de données hétérogènes à partir d'un langage unique fournissant une sémantique et des opérateurs communs pour construire des analyses spatiales.

#### **4.2.1.2 L'outil Generic Datasource Management System (GDMS)**

La problématique d'un langage unique pour manipuler des données géographiques et réaliser des analyses spatiales n'est pas une question nouvelle. (Tomlin & Berry, 1979) proposaient dès la fin des années 70 un ensemble de conventions et d'opérateurs pour manipuler des géorasters<sup>44</sup>. Appelé *Map Algebra* ce formalisme a été utilisé dans de nombreux SIG tels que l'extension *Spatial Analyst*<sup>45</sup> pour la suite ArcGIS © ESRI ou le module d'analyse raster de GRASS<sup>46</sup>. La nécessité de disposer d'un formalisme pour l'analyse spatiale a clairement été identifiée comme un enjeu de recherche par la communauté scientifique (Egenhofer & Frank, 1988a,b; Güting, 1988; Goh, 1989; Egenhofer, 1990) et de nombreux langages avec leur implémentation ont été proposés : *GEOQL* (Ooi, 1990), *DML* (Calcinelli & Mainguenaud, 1991), *GEO-SAL* (Svensson & Huang, 1991), *Spatial SQL* (Egenhofer, 1994), *geOPOM* (Nittel, Muntz & Mesrobian, 1997), *GeoSQL* (Wang et al., 2000)...

Au début de l'année 2000, l'OGC, avec la spécification *Simple Feature SQL* (SFS), définit un ensemble d'opérateurs et de prédicats spatiaux ainsi qu'une syntaxe pour manipuler en SQL des géométries de types *POINT*, *LINestring*, *POLYGON* (Figure 5)... (Herring & Johnson, 1999c; Herring, 2006a,b). Ce document formalise les nombreux essais présentés par la communauté scientifique et valide pour la première fois un langage dédié pour les données géographiques vectorielles. Cette spécification trouve un large consensus notamment auprès des entreprises qui ne tarderont pas à l'adopter. La cartouche spatiale *PostGIS*<sup>47</sup> pour la base de données relationnelle *PostgreSQL*<sup>48</sup> l'illustre parfaitement. En 2010, une moyenne de 810 téléchargements du source code est comptabilisée par mois (Bocher & Petit, 2013).

---

44 Nous définissons le terme géoraster comme une image contenant des métadonnées permettant de la positionner dans un espace géographique. Le géoraster est constitué d'une ou plusieurs bandes. Chaque bande contient un ensemble de pixels. L'ensemble des bandes partage le même domaine d'extension temporel et géographique. Le géoraster correspond donc ici au modèle de General Grid Coverage de l'OGC (Baumann, Hirschorn & Masó, 2017).

45 <http://www.esri.com/software/arcgis/extensions/spatialanalyst> consulté en avril 2018

46 <https://grass.osgeo.org/gdp/raster/mapcalc-algebra.pdf> consulté en avril 2018

47 <https://postgis.net/> consulté en septembre 2018

48 <https://www.postgresql.org/> consulté en septembre 2018

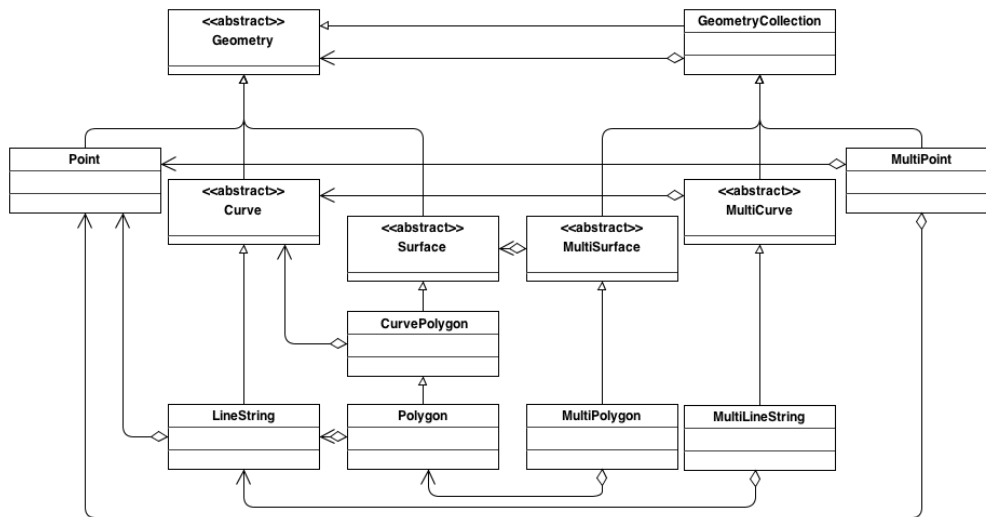


Figure 5: Schéma du modèle de données pour les géométries

Le langage SQL étendu de fonctions géométriques offre à la base de données relationnelle PostgreSQL de nombreuses possibilités pour construire des analyses spatiales et automatiser des chaînes de traitements. Il dispose en effet de prédicats géométriques (*intersects*, *contains*, *within...*), d'opérateurs (*intersection*, *difference...*). La requête SQL ci-dessous donne un exemple. Elle permet de calculer la superficie totale des bâtiments qui sont à moins de 100 mètres d'un objet rivière.

```

SELECT Sum(ST_AREA(a.the_geom)) FROM batiments AS a, rivières AS b WHERE ST_Dwithin
(a.the_geom, b.the_geom, 100);
  
```

Cependant l'utilisation du langage SQL de PostGIS restait contraignante pour les utilisateurs notamment géographes ou géomaticiens :

- il nécessitait des compétences techniques particulières pour installer et paramétrer un serveur de base de données (compilation de l'extension pour le système d'exploitation, gestion des droits d'accès à la base, gestion des utilisateurs...).
- il imposait d'adapter les modèles de données pour qu'ils s'intègrent dans un modèle relationnel. Les fichiers plats comme les *shapefile* ou les *csv* devant alors être migrés vers la base de données pour être exploités par le SQL.

De plus l'utilisation d'une base de données relationnelle impose à l'utilisateur de changer de paradigme et de « penser » relationnel lorsqu'il organise, manipule ses données (contraintes d'intégrité entre les objets entre autre).

Pour s'affranchir de ces barrières, nous avons développé l'outil GDMS pour *Generic Datasource Management System* (Bocher et al., 2008b; Leduc et al., 2009). GDMS intègre un modèle abstrait de données qui permet d'accéder à des données géographiques provenant de fichiers plats ou de bases de données. Les données sont organisées selon le modèle *Simple Feature Access – Common Architecture* (Herring, 2006a). Les données structurées dans ce modèle sont interrogées à l'aide du langage de requête SQL, étendu des fonctions spatiales définies par la spécification *Simple Feature Access - SQL* (Herring, 2006b). Développé en Java, le code informatique de GDMS est multi-

plateforme afin de simplifier son installation et son utilisation dans différents environnements logiciels.

La Figure 6 schématise l'architecture de *GDMS*. Elle repose sur l'objet *DataSource* qui interagit avec deux composants

- les drivers (*I/O API*) pour lire et écrire dans des fichiers plats, des bases de données ou des services en ligne (tel que le *WMS*),
- le moteur de requête *SQL* (*SQL Engine*) qui permet d'exécuter des requêtes *SQL*.

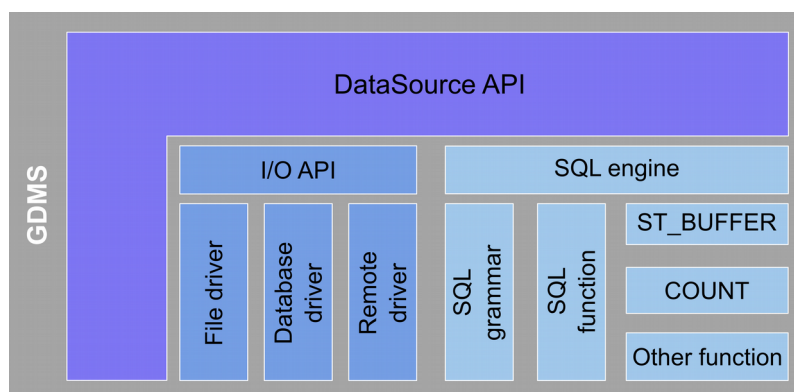


Figure 6: Architecture de GDMS

L'objet *DataSource* est une interface sur la couche des drivers de *GDMS* (*File/Database/Remote*). Les données sont montées dans un modèle tabulaire lignes colonnes équivalent à celui d'un Système de Gestion de Bases de Données Relationnelles (SGBDR), en l'occurrence une table (Figure 7). Une *DataSource* contient une collection de valeurs ainsi qu'un schéma de métadonnées. Une valeur correspond à un attribut d'une cellule de la *DataSource* qui peut être de plusieurs types : *String* pour texte, *Integer* pour entier, *Geometry* pour géométrie... L'objet *Metadata* contient quant à lui la liste des champs avec leurs contraintes. Un champ de type *Geometry* peut par exemple être limité à un type *Point*.

Le moteur *SQL* contient toute l'intelligence nécessaire à l'exécution d'une requête. Il comprend un parseur qui analyse la syntaxe et organise un plan d'exécution pour optimiser la requête. Cet analyseur a été développé en utilisant le générateur *ANTLR*<sup>49</sup> (*Another Tool for Language Recognition*) et respecte la spécification *SQL92*. La grammaire *SQL* intègre un mécanisme de gestion de fonctions qui peut être étendu à la demande. Elle comprend entre autres la totalité des opérateurs et des prédicats géométriques de la spécification *Simple Feature Access* ainsi que des fonctions spécifiques pour lire un fichier plat ou se connecter à une base de données.

Le principe d'utilisation de *GDMS* est le suivant.

```
//Permet de déclarer un fichier shp comme une table avec le nom routes
SELECT Register('/tmp/routes.shp','routes');
//Permet de déclarer un fichier shp comme une table avec le nom batiments
SELECT Register('/tmp/batiment.shp','batiments');
//Calcul la superficie totale des bâtiments à moins d'une distance de 100 unités d'une route
SELECT Sum(ST_AREA(a.the_geom)) FROM batiments AS a, routes AS b where
ST_DWithin(a.the_geom, b.the_geom, 100);
```

49 <http://www.antlr.org/> consulté en septembre 2018

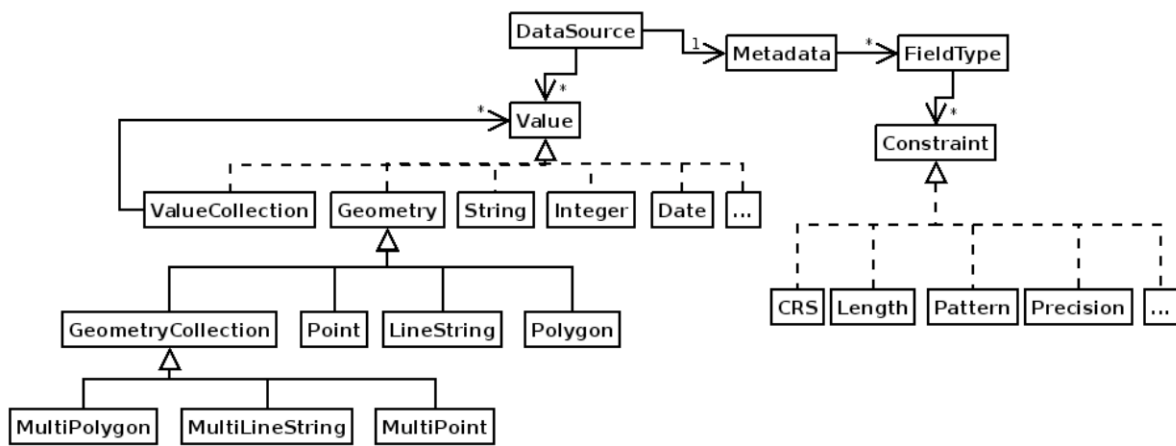


Figure 7: Le modèle de données Simple Feature de GDMS

GDMS a été exploité dans plusieurs projets scientifiques afin de construire des chaînes d'analyses spatiales reproductibles et automatisables. Dans Long et al., 2008 ; Bocher et al., 2008a nous l'utilisons pour étudier l'impact de différentes résolutions de grilles régulières pour analyser la structure du territoire urbain. Dans Bocher & Martin, 2012, nous proposons une extension du modèle de données de GDMS ainsi que de nouvelles fonctions d'analyses pour modéliser spatialement l'impact des éléments urbains sur le parcours des eaux de surfaces. Cette extension nous amène à manipuler des modèles de données topologiques qui permettent de stocker des triangulations de Delaunay ou contraintes. En offrant la possibilité de manipuler des maillages via le langage SQL, l'utilisateur dispose avec les opérateurs et prédicats spatiaux de puissantes capacités analytiques lui permettant de produire des chaînes de traitements complexes. Ces capacités analytiques sont néanmoins contraintes en terme d'interopérabilité. En effet, les spécifications *Simple Features for SQL* et *SQL/MM* (Stolze, 2003) n'apportent qu'une réponse partielle pour manipuler des données géographiques. Les opérateurs et prédicats sont définis uniquement pour des géométries simples, sans relation topologique. Les traitements sur les données raster (image), le raisonnement topologique (parcours de graphes, arithmétique sur des rasters ou convolution...) en sont absents. Or la géographie s'observe à différentes échelles, avec différentes représentations, ses objets d'étude sont variés (tache urbaine, pollution de l'air, hydrologie, nuisances sonores). En conséquence, elle sollicite des sources de données ainsi que des modèles et structures variés.

Pour s'affranchir d'une spécification partielle dont le risque est de voir se développer des implémentations propres avec des syntaxes incompatibles, nous avons proposé une extension du modèle *Simple Feature SQL* pour stocker et manipuler des objets rasters (Leduc et al., 2009; Bocher & Petit, 2013; Rodriguez, Bocher & Chancibault, 2013). L'objet raster représente un élément *GridCoverage* tel que défini dans la spécification *GML Application Schema - Coverages*, section 6.6.7 (Portele, 2007). Il s'agit d'une matrice de cellules organisées en lignes et en colonnes dans laquelle chaque cellule contient une valeur. La surface représentée par chaque cellule possède une largeur et une hauteur identiques. Un raster peut contenir une ou plusieurs matrices, appelées aussi bandes. Au sein du modèle GDMS, l'objet Raster est une classe abstraite qui est implémentée par l'objet *GeoRaster* (Figure 8).

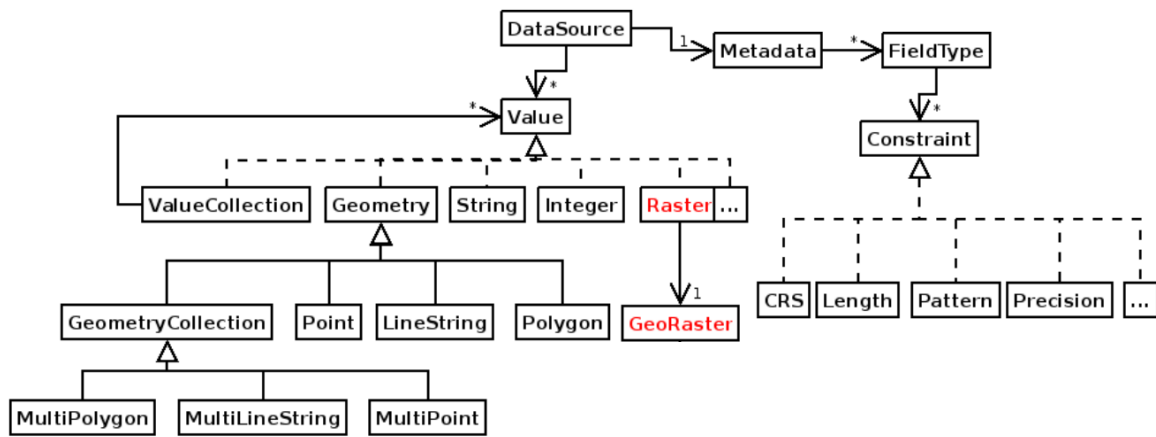


Figure 8: Le modèle de données Simple Feature de GDMS étendu avec l'objet Raster

L'objet *Raster* est manipulé par le *SQL Engine* au même titre qu'une géométrie. L'exemple ci-dessous permet de récupérer le raster contenu dans la colonne *the\_raster* pour la première ligne de la table *rasterTable*.

**SELECT** the\_raster **FROM** rasterTable **LIMIT** 1;

L'extension *Raster* de *GDMS* introduit sur la base de la classification de (Tomlin, 1994), quatre catégories de fonctions :

- celles qui s'appliquent à une cellule (opérations locales),
- celles qui s'appliquent à une cellule mais en prenant en compte un voisinage (opérations par voisinage),
- celles qui s'appliquent à une ou plusieurs cellules pour une ou plusieurs zones données (opérations par zone),
- celles qui s'appliquent à toutes les cellules (opérations globales)

Auxquelles nous ajoutons les fonctions spécifiques.

La lecture des images (*raster*) suit la même syntaxe que celle des données vectorielles.

**SELECT** Register('/tmp/monFichierRaster.tif','monFichierRaster');

Cette évolution de *GDMS* a permis de mettre en œuvre des analyses spatiales mixant des données vectorielles (*Geometry*) et des données images (*Raster*). L'exemple ci-dessous montre l'intégration et l'utilisation de fonctions rasters au sein de la grammaire *SQL*. L'enchaînement d'instructions *SQL* permet à partir d'un fichier *ASC* contenant un modèle numérique de terrain et d'un fichier *SHP* contenant des parcelles sous la forme de polygones de calculer pour chaque parcelle la pente maximale.



```

//Déclaration du fichier MNT
SELECT Register('/tmp/mnt.asc','mnt') ;
//Lissage du MNT avec un filtre moyen de 3 X 3
CREATE TABLE lissageMNT AS SELECT ST_FocalMean(the_raster, 'rectangle', 3, 3) AS
the_raster FROM mnt;
//Calcul des pentes des pixels du MNT lissé
CREATE TABLE pentes AS SELECT ST_Slope(the_raster) AS the_raster FROM
lissageMNT;
//Déclaration d'un fichier contenant des parcelles sous la forme de polygones
SELECT Register('/tmp/parcelles.shp','parcelles') ;
//Transformation des polygones en raster en se calant sur les propriétés du MNT. Les valeurs
de la colonne id sont affectées aux pixels
CREATE TABLE parcelles_raster AS SELECT ST_Rasterize(a.the_geom, a.id, b.the_raster)
AS the_raster FROM parcelles AS a, mnt AS b ;
//Calcul de la pente maximale par parcelles
CREATE TABLE parcelles_stats AS SELECT ST_ZonalMax(a.raster, b.raster) AS
the_raster FROM parcelles_raster AS a, pentes AS b;

```

Le second exemple mixe également des données raster et des données vectorielles. Il vise à analyser l'évolution des surfaces urbanisées à proximité d'un réseau hydrographique potentiel et pour un territoire hydrographique : le bassin versant. La Figure 9 décrit le synoptique de traitement.

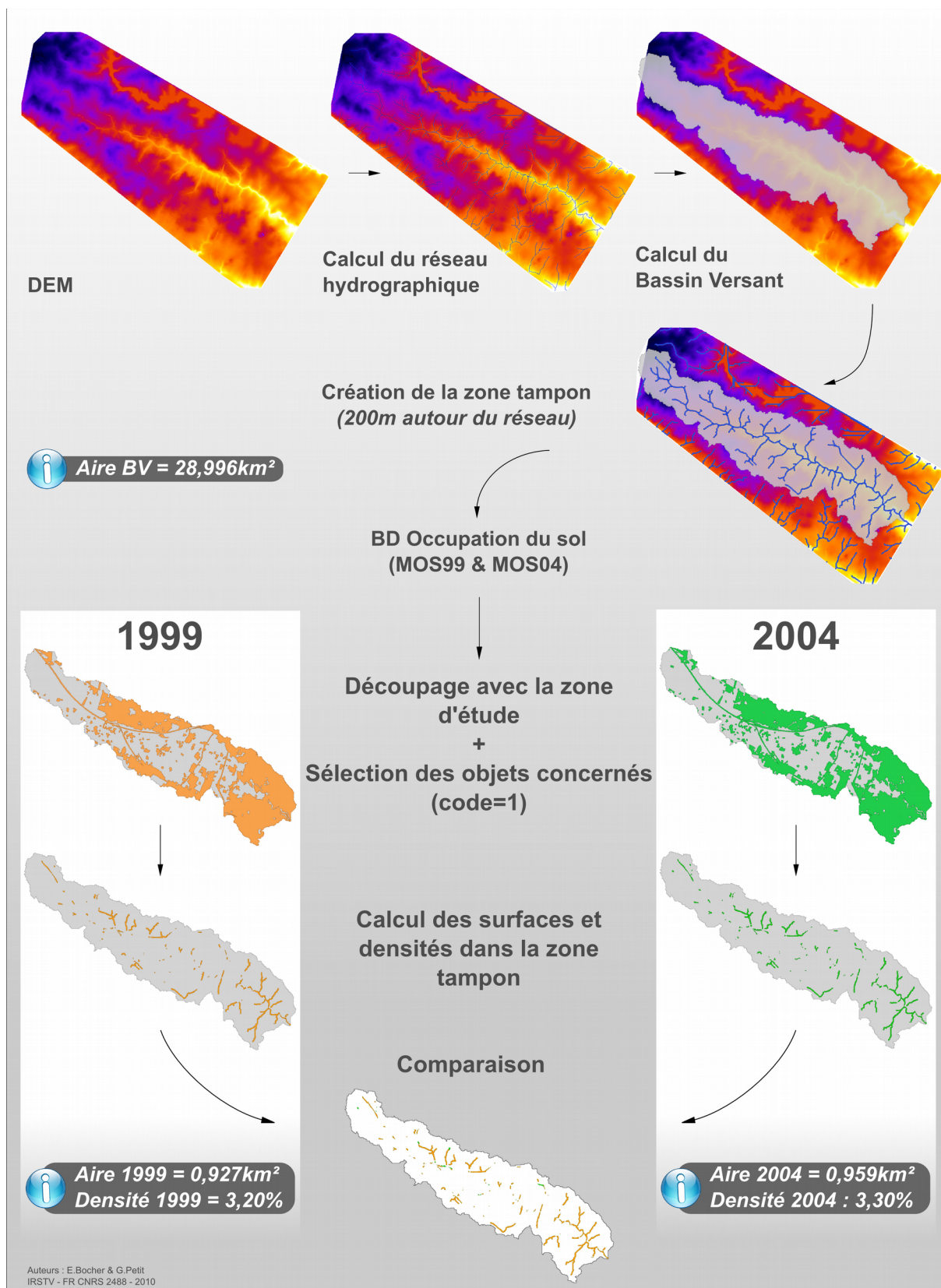


Figure 9: Analyse de l'évolution des surfaces urbanisées autour d'un réseau hydrographique théorique

La première séquence de traitements consiste à produire une grille d'orientation topographique des pixels selon la méthode de plus forte pente D8 puis une grille d'accumulation (O'Callaghan & Mark, 1984). Au préalable pour garantir la continuité hydrologique des écoulements de surface le MNT est filtré en utilisant l'algorithme proposé par (Planchon & Darboux, 2002). La séquence est exposée ci-dessous.

```
-- Filtrage du MNT pour combler les dépressions
CREATE TABLE filled AS SELECT ST_FillSinks(raster, 0.1) AS raster FROM DEM;
-- Création d'une grille d'orientation des pixels
CREATE TABLE dir AS SELECT ST_D8Direction(raster) AS raster FROM filled;
-- Création d'une grille d'accumulation basée sur la grille d'orientation des pixels
CREATE TABLE acc AS SELECT ST_D8Accumulation(raster) AS raster FROM dir;
```

Par la suite, un réseau hydrographique théorique est calculé en reliant les pixels dont la valeur d'accumulation est supérieure à 1 500. Les pixels obtenus sont hiérarchisés selon l'ordination de *Strahler*. Après leur vectorisation, seules les géométries dont l'ordre est inférieur à 6 sont conservées.

```
-- Extraction et ordination des pixels dont la valeur d'accumulation est supérieure à 1500
CREATE TABLE strahler AS SELECT ST_D8StrahlerStreamOrder(d.raster, a.raster, 1500)
AS raster FROM dir AS d, acc AS a;
-- Vectorisation des pixels
CREATE TABLE allrivers AS SELECT ST_VectorizeLine(raster) FROM strahler ;
-- Filtrage des géométries dont l'ordre de Strahler inférieur à 6
CREATE TABLE rivers_low_6 AS SELECT * FROM allrivers WHERE gid < 6;
```

Une zone tampon de 200 mètres est ensuite créée.

```
CREATE TABLE buffer200 AS SELECT ST_BUFFER(the_geom, 200) AS the_geom
FROM rivers_low_6;
```

Parallèlement après identification des coordonnées géographiques de son exutoire, le bassin versant est extrait.

```
CREATE TABLE bassin AS SELECT ST_D8Watershed(raster,
GeomFromText('POINT(304018,2254506)')) AS the_geom FROM dir;
```

L'antépénultième étape consiste à découper les modes d'occupation du sol pour les années 1999 et 2004 avec la limite du bassin versant. Seules les géométries dont la valeur du champs C\_Niveau est égale à 1 sont conservées. Cette valeur correspond aux espaces urbanisés.

```
-- Pour 1999
CREATE TABLE mos99_urb_bv AS SELECT ST_INTERSECTION(a.the_geom,
b.the_geom) AS the_geom, a.*{EXCEPT the_geom FROM mos99 AS a, bassin AS b
WHERE ST_INTERSECTS(a.the_geom, b.the_geom) AND a.C_NIVEAU=1;
```

-- Pour 2004

```
CREATE TABLE mos04_urb_bv AS SELECT ST_INTERSECTION(a.the_geom,  
b.the_geom) AS the_geom, a.*{EXCEPT the_geom} FROM mos04 AS a, bassin AS b  
WHERE ST_INTERSECTS(a.the_geom, b.the_geom) AND a.C_NIVEAU=1;
```

Le lecteur notera dans les instructions la présence du mot clé *EXCEPT*. Ce mot clé a été introduit dans le langage *SQL* pour faciliter le filtrage des colonnes. Ainsi si l'utilisateur souhaite sélectionner les champs a, b, c, d, ..., h, i, j d'une table sans les champs « i » et « j », il écrira :

```
soit SELECT a, b, c, d, e, f, g, h FROM myTable;  
soit SELECT *{EXCEPT i, j} FROM myTable;
```

Avec ce mot clé *EXCEPT*, le filtrage des colonnes est simplifié. On évite de réécrire une liste de champs, qui peut être parfois très longue, mais surtout on s'affranchit d'éventuelles erreurs de frappe.

Pour l'avant dernière séquence de traitements, les modes d'occupation du sol par bassin versant sont découpés par la zone tampon de 200 mètres autour du réseau hydrographique théorique.

-- Pour 1999

```
CREATE TABLE mos99_urb_buff AS SELECT ST_INTERSECTION(a.the_geom,  
b.the_geom) AS the_geom, a.*{EXCEPT the_geom} FROM mos99_urb_bv AS a, buffer200  
AS b WHERE ST_INTERSECTS(a.the_geom, b.the_geom);
```

-- Pour 2004

```
CREATE TABLE mos04_urb_buff AS SELECT ST_INTERSECTION(a.the_geom,  
b.the_geom) AS the_geom, a.*{EXCEPT the_geom} FROM mos04_urb_bv AS a, buffer200  
AS b WHERE ST_INTERSECTS(a.the_geom, b.the_geom) ;
```

Pour terminer, le script ci-dessous permet de calculer les surfaces urbanisées ainsi que leur densité rapportée à l'aire du bassin versant. Nous noterons que les surfaces urbanisées à moins de 200 mètres du réseau hydrographique théorique ont progressé entre 1999 et 2004 en quantité négligeable (Figure 9).

-- Pour 1999

```
CREATE TABLE mos99_hydro_surf AS SELECT ST_UNION(a.the_geom) AS the_geom,  
SUM(ST_AREA(a.the_geom)) AS surf_urb99, ((SUM(ST_AREA(a.the_geom))  
/SUM(ST_AREA(b.the_geom)))*100) AS density_urb99  
FROM mos99_urb_buff AS a, bassin AS b;
```

-- Pour 2004

```
CREATE TABLE mos04_hydro_surf AS SELECT ST_UNION(a.the_geom) as the_geom,  
SUM(ST_AREA(a.the_geom)) AS surf_urb04, ((SUM(ST_AREA(a.the_geom))  
/SUM(ST_AREA(b.the_geom)))*100) AS density_urb04 FROM mos04_urb_buff AS a,  
lim_bv_region AS b;
```

Avec *GDMS* nous avons fait évoluer la spécification *Simple Feature for SQL* en intégrant des opérateurs *Raster* afin de disposer d'un seul langage pour exprimer et modéliser des phénomènes spatiaux. Notre approche consiste à étendre la grammaire *SQL* en y injectant des fonctions équivalentes aux opérateurs géométriques (*ST\_Intersects*, *ST\_Area*...). L'extension *Raster* ajoutée à *PostGIS* par (Racine & Cumming, 2011) repose sur le même principe et se heurte comme *GDMS* à un manque de spécifications.

- l'absence d'un *encoding* qui spécifie les conditions de stockage d'un type de données *Raster*. Or dans un système de gestion de données comme un SGBDR, le type de données identifie les valeurs possibles et les opérations réalisables sur les types. La définition d'un type *Raster* permettrait par exemple d'améliorer la prise en compte des opérations arithmétiques dans la syntaxe *SQL*. Elle offrirait en outre la possibilité à l'utilisateur de formaliser des opérations avec une syntaxe plus logique, intégrée et plus expressive. La soustraction de deux *Rasters* s'écrirait de la façon suivante :

```
SELECT t1.the_raster - t2.the_raster AS the_raster FROM table1 AS t1, table2 AS t2;
```

plutôt que par l'utilisation d'une fonction spécifique qui nécessite de recourir à une autre syntaxe comme c'est le cas avec *PostGIS* :

```
SELECT ST_MapAlgebra(t1.the_raster,t2.the_raster, '([rast1]-[rast2])') AS the_raster INTO  
difference FROM table1 AS t1, table2 AS t2;
```

- l'absence d'une spécification abstraite à l'instar du *SQL spatial* ou de *Filter Encoding* (Vretanos, 2010) qui fournirait indépendamment du logiciel : une liste d'opérateurs, pour chaque opérateur sa syntaxe, le ou les types d'entrée et de sortie ainsi que le résultat attendu. Cette spécification est nécessaire pour rendre interopérable les instructions et éviter de les remettre en cause lorsque l'on passe d'un système à un autre.

La communauté géomatique gagnerait beaucoup si ces verrous étaient levés. Mais pour cela un réel effort de la communauté scientifique est nécessaire auprès des organismes de normalisation. Notons que la spécification *Simple Features for SQL* n'a pas évolué depuis 15 ans... alors que les bases de données relationnelles ont intégrées de nouveaux formats structurés comme le *JSON*, dont l'extension spatiale le *GEOJSON* est massivement utilisée par les applications *WEB* et mobiles.

## 4.2.2 La plate-forme *OrbisGIS*

L'utilisation du langage *SQL spatial* dans les programmes de recherche où se côtoient différents profils d'utilisateurs a très vite montré la nécessité de disposer d'interfaces graphiques pour permettre d'interagir avec les données. En 2007, l'idée a donc émergé de développer un Système d'Information Géographique libre dont le socle principal serait un langage dédié à l'analyse spatiale. Si la plate-forme *OrbisGIS* est née de ce besoin, sa construction s'appuie également sur la volonté d'offrir à la communauté scientifique un outil qui servirait de laboratoire pour expérimenter de nouvelles formes d'interrogation, de représentation, de partage des données et par extension des connaissances. Bien avant l'emballement autour du mouvement Science Ouverte, *OrbisGIS* posait les

bases d'un système modulaire, interopérable, libre de droit et d'usage, co-construit par et pour la communauté. Pour cela *OrbisGIS* a fortement bénéficié et contribué à l'essor des outils libres dans le domaine des sciences de l'information géographique (Steiniger & Bocher, 2009).

#### **4.2.2.1 Un Système d'Information Géographique construit autour d'un langage**

Le développement de *GDMS* a permis de poser les bases d'un outil générique pour élaborer des chaînes d'analyses spatiales sur des données géographiques provenant de différents formats de stockage et de représentation. La première utilisation de *GDMS* a été réalisée dans le cadre de l'adaptation du logiciel *DFMap* (Long, 2003). *DFMap* est un logiciel qui a été développé dans l'objectif d'identifier la morphologie des bâtiments et de calculer des paramètres aérodynamiques sur une ville. Ces paramètres ont alimenté les modèles de micro-climatologie urbaine comme *SM2U* (Dupont & Mestayer, 2006). *DFMap* calcule ces informations à partir des données de la BDTopo de l'IGN et restitue les résultats sur une grille régulière. *DFMap* souffrait néanmoins de contraintes techniques et méthodologiques qui limitaient son utilisation dans le cadre de programmes de recherche sur la ville :

- il ne supporte qu'une version ancienne de la BD Topo et ne peut donc pas tirer profit des mises à jour de cette base ;
- les données d'entrée doivent être disponibles dans le format *DXF* ;
- les algorithmes sont codés en dur et il n'existe pas de possibilité pour les étendre ou ajouter de nouveaux traitements,
- il n'existe pas de structure interne qui permettrait d'optimiser les analyses comme des index spatiaux. Par conséquent *DFMap* ne peut être utilisé sur de grands jeux de données.

Pour s'affranchir de ces contraintes, nous avons procédé à une rétro-conception de *DFMAP* afin de décomposer les algorithmes qui interviennent dans la chaîne de traitements. Ces algorithmes ont été qualifiés (entrée, sortie, références bibliographiques) puis transposés dans la sémantique du *SQL spatial* en utilisant autant que faire ce peu les opérateurs et prédicats du standard pour favoriser la portabilité et l'interopérabilité de la chaîne d'analyses. Parallèlement, nous avons amorcé le développement d'un SIG qui portera le nom d'*OrbisGIS*. Son dessein était de fournir des interfaces visuelles pour faciliter les interactions avec les données à travers l'écriture d'instructions *SQL*. En proposant une console *SQL* interactive, il est le premier outil à placer une syntaxe spatiale interopérable au cœur d'un SIG (Figure 10).



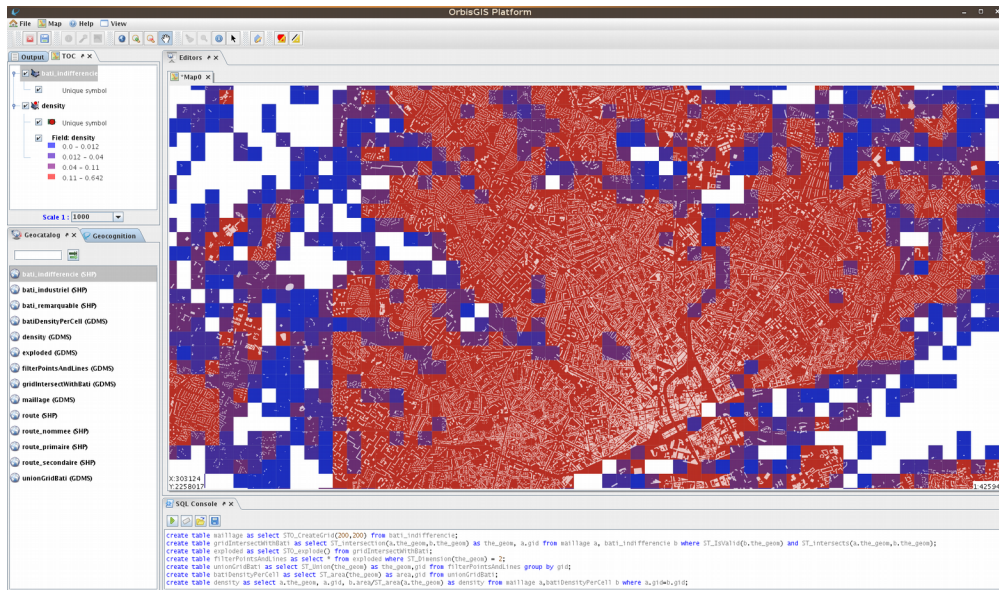


Figure 10: La plate-forme OrbisGIS : visuel cartographique et console SQL

La construction d'*OrbisGIS* s'est accompagnée d'une réflexion globale sur la possibilité de faire du SIG un outil de capitalisation des connaissances. L'idée qui a émergé alors était d'identifier les limites conceptuelles, méthodologiques et techniques pour faire du SIG un outil de mutualisation, de partage, facilitant la circulation de l'information entre plusieurs disciplines travaillant sur un territoire.

L'Institut de Recherche sur les Sciences et Techniques de la Ville qui conduit une recherche interdisciplinaire dans le domaine de la modélisation et de la gestion durable de la ville a été le terreau de cette réflexion. En 2010, l'IRSTV regroupe une quinzaine de laboratoires et les travaux de recherche sont organisés autour de trois grands thèmes :

- système d'observation urbain interdisciplinaire (Télé-détection urbaine, SAP - Site Atelier Pluridisciplinaire) ;
- modélisation environnementale intégrée de la ville (Micro-climatologie urbaine intégrée, ambiances sonores, modélisation des données urbaines et SIG) ;
- gouvernance, conception et gestion de la ville durable.

Cette pluridisciplinarité se traduit par une grande disparité dans les usages de l'information géographique qu'il s'agisse des données (stockage, modélisation), des outils utilisés pour leur exploitation ou encore des chaînes de traitements mises en œuvre (Bocher, 2007, 2008; Bocher et al., 2007; Leduc, González Cortés & Bocher, 2007). Diversité de logiciels SIG, diversité de supports de stockage et de formalisme pour décrire les données, conduisaient à un cloisonnement des connaissances géographiques sur la ville; ce qui dans un sens était contraire aux ambitions scientifiques de l'IRSTV : développer une vision intégrée de l'ensemble des phénomènes physiques urbains, des méthodes, des outils et des systèmes d'acteurs qui contribuent à la gestion durable de la ville.

Pour pallier ces difficultés, la plate-forme *OrbisGIS* a été conçue comme un ensemble de services (modules). Ces modules communiquent à l'aide de standards du domaine (*OGC*, *ISO*). Assemblés, ils permettent de construire des outils adaptés aux différents besoins des utilisateurs ou des organisations : de l'outil pour réaliser des traitements en ligne de commande à l'Infrastructure de Données Spatiales et ses applications *WEB* en passant par le SIG bureautique.

### 4.2.2.2 Du SIG aux services géographiques

En 2006, les SIG sont principalement des outils de bureautique à usage monolithique. Les éditeurs de licence commerciale dominent le domaine et contraignent la circulation de l'information en n'offrant la possibilité que d'utiliser des formats de stockage, de description fermés. Les échanges de données sont difficiles, cloisonnés par un manque d'interopérabilité. Paradoxe de la situation, ces mêmes éditeurs œuvrent au sein de l'OGC dans des groupes de travail sur la standardisation de l'information géographique !. Pourtant, les concepts, les premières spécifications visant à améliorer le partage et l'échange des données géographiques sont là ! : *Web Map Service* pour les flux de données, *Catalog Service for the Web* pour les métadonnées, *Simple Feature* pour la modélisation et la manipulation de géométries. Mais les éditeurs peinent à les mettre en œuvre pour des considérations économiques (coût d'adaptation des logiciels) mais également techniques (capacité des architectures logiciels à intégrer ces nouveaux usages et modèles).

La communauté des logiciels libres connue avec l'acronyme des FOSS (*Free and Open Source Software*) suffixée du 4G pour (*Free and Open Source Software for Geospatial*) se saisit très tôt de l'opportunité des standards et de nombreux outils vont voir le jour (Steiniger & Bocher, 2009). Le logiciel *JUMP* (*Java Unified Mapping Platform*), devenu *OpenJUMP*<sup>50</sup> est le premier outil à mettre en œuvre les spécifications *Simple Feature* offrant à la communauté des géomaticiens et des géoinformaticiens une bibliothèque standardisée pour développer des analyses spatiales (Bocher, Lepetit & Taddei, 2006; Steiniger & Michaud, 2009). Cette bibliothèque, *Java Topology Suite* (*JTS*)<sup>51</sup> devient une référence d'implémentation et sera le cœur de très nombreux outils de l'information géographique comme la bibliothèque *Geotools*<sup>52</sup>, le serveur cartographique *GeoServer*<sup>53</sup> ou encore l'extension *PostGIS* basée sur *GEOS*<sup>54</sup>, un portage de *JTS* en C++.

La construction d'*OrbisGIS* tire profit de cette dynamique engagée autour des logiciels libres. Elle permet d'exploiter les standards existants mais aussi de les critiquer pour en proposer des adaptations (voir 4.3).

Le programme de recherche Eval-PDU (Évaluation des impacts environnementaux d'un PDU et de leurs conséquences socio-économiques : développements méthodologiques et tests sur le PDU de Nantes Métropole) pose alors les bases de la plateforme *OrbisGIS*. La genèse d'Eval-PDU réside dans une proposition de Nantes Métropole de mener une recherche méthodologique sur l'évaluation des impacts environnementaux, pluri-factoriels, du PDU nantais. Sur la base des compétences des équipes de l'IRSTV, une étude pluridisciplinaire en vue de la construction d'une méthodologie centrée sur la modélisation de la qualité de l'air et du bruit et associant leurs conséquences socio-économiques est proposée. Le concept initial était celui d'une chaîne de modèles à bases physiques permettant de mettre en relation, selon différents scénarios, les déplacements dans l'aire urbaine de la Métropole, la qualité de l'air et les nuisances sonores, et leurs conséquences socio-économiques. Au cœur du dispositif se situent les modèles de calcul des concentrations de polluants dispersés dans l'atmosphère d'une part, des cartes de nuisance sonore au sol et au niveau des bâtiments d'autre part. Les principales données d'entrée de ces modèles sont des cadastres d'émissions, cartes spatio-temporelles des sources de polluants et de bruit, qui nécessitent elles-mêmes en amont une modélisation des flux de trafic à l'aide d'un modèle multi-modal des déplacements, dont les principales données d'entrée sont des enquêtes ménages-déplacements, des comptages routiers, la distribution des populations et des éléments structurants du territoire (bâtiments, routes, occupation du sol).

50 <http://openjump.org/> consulté en septembre 2018

51 <https://projects.eclipse.org/projects/locationtech.jts> consulté en septembre 2018

52 <http://geotools.org/> consulté en septembre 2018

53 <http://geoserver.org/> consulté en septembre 2018

54 <https://trac.osgeo.org/geos/> consulté en septembre 2018



Une Infrastructure de Données Spatiales a été mise en œuvre avec comme objectif d'assurer l'acquisition, le stockage, la gestion, le traitement et le partage des données échangées entre les modèles, depuis l'élaboration des scénarios d'actions PDU jusqu'aux modèles de simulation "air", "bruit" "socio-économie" et "indicateurs santé". Développée en interaction avec l'ensemble des disciplines, c'est une chaîne complète et interopérable pour la circulation et le pilotage des informations géographiques nécessaires au projet de recherche qui a été élaborée. La Figure 11 présente l'architecture et les modules de cette IDS nommée *CartoPOLIS*.

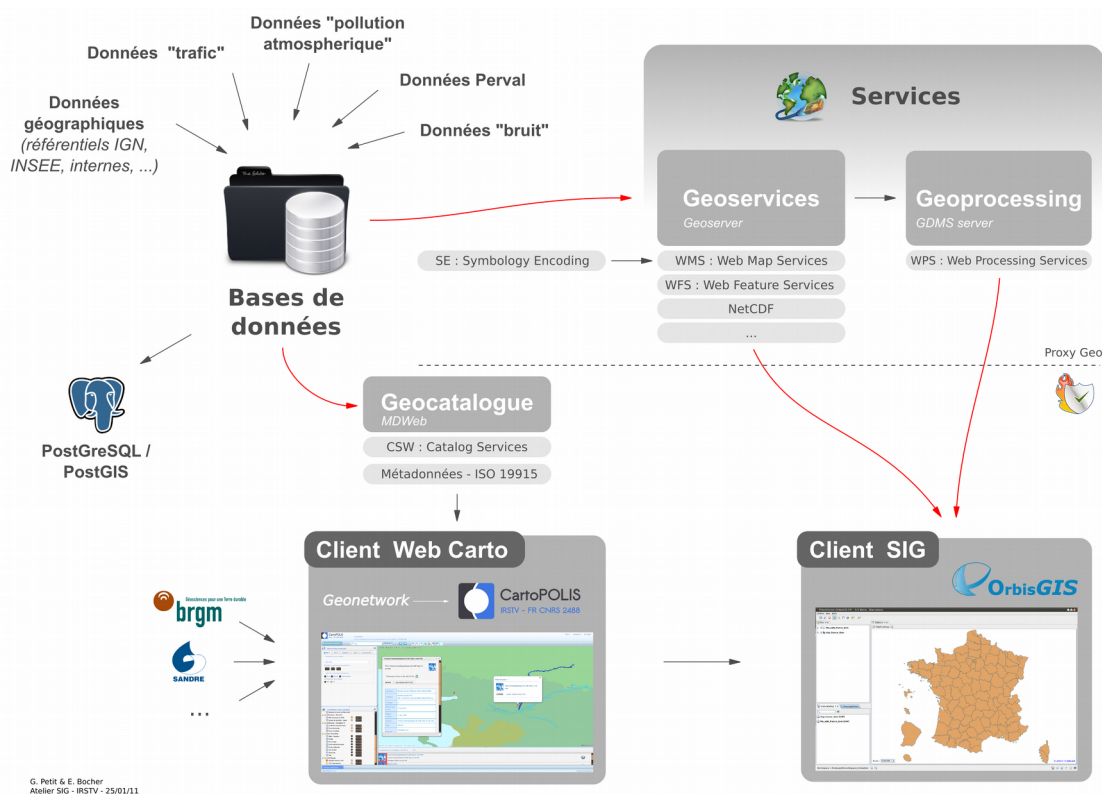


Figure 11: Architecture et modules de l'IDS Cartopolis

Le fonctionnement de CartoPOLIS repose sur 4 modules principaux.

## Géocatalogue

Le service Geocatalogue fournit une description complète et normalisée des données disponibles dans la base de données de l'IDS. Les descriptions sont accessibles via des fiches de métadonnées formatées avec la norme (ISO19115). Une métadonnée est une donnée sur la donnée contenant des informations telles que l'étendue temporelle du jeu de données, son emprise spatiale, son origine, sa qualité sémantique et spatiale. L'ensemble des ressources que le gestionnaire du catalogue souhaite référencer sont interrogeables à distance par internet en utilisant le standard CSW.

Le géocatalogue de CartoPOLIS utilise une version personnalisée du logiciel open-source Géonetwork<sup>55</sup>. Ce logiciel est également le noyau de l'application du géocatalogue national<sup>56</sup>. Avec *Geonetwork* l'utilisateur dispose d'une application internet pour interroger le catalogue de métadonnées, les visualiser ou encore représenter les flux de données lorsque ceux-ci sont mis à disposition avec la fiche (Figure 67).

55 <https://www.geonetwork-opensource.org/> consulté en septembre 2018

56 <http://www.geocatalogue.fr/> consulté en septembre 2018

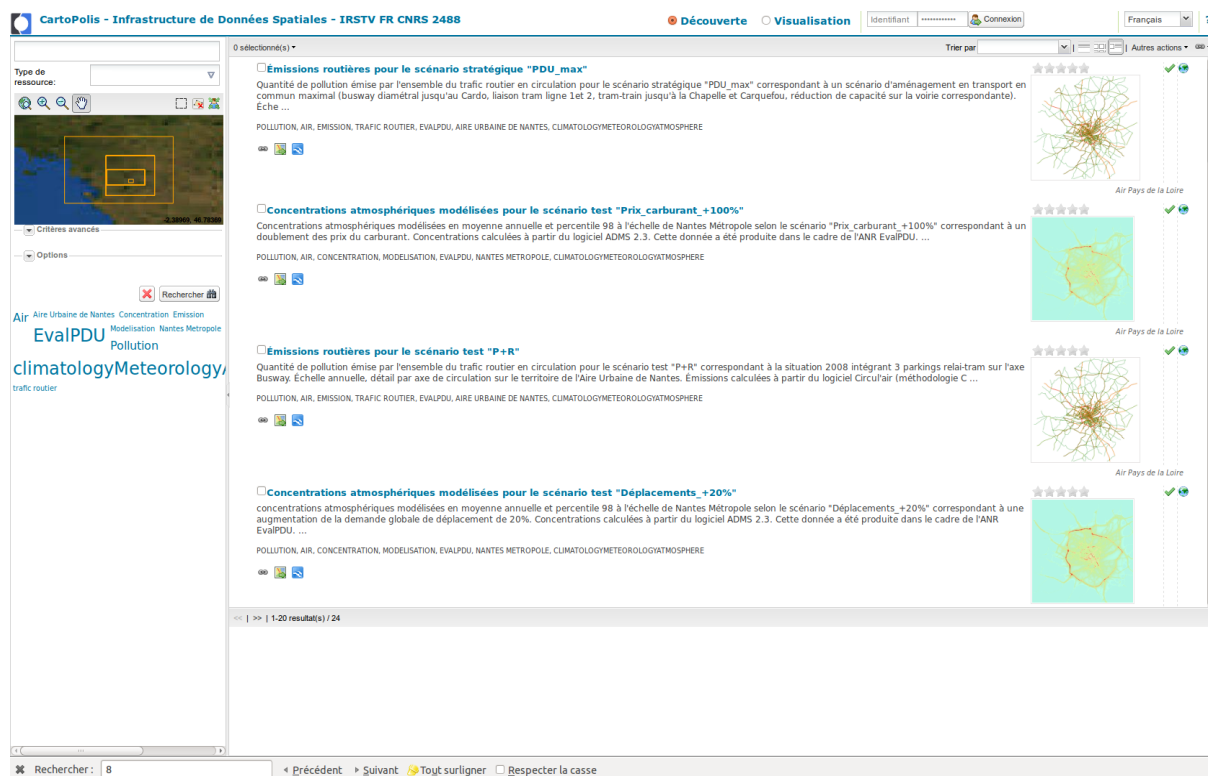


Figure 12: Affichage des fiches de métadonnées d'EvalPDU

## Geoservices

Il s'agit d'un service de flux de données standardisés qui met à disposition des données géographiques qui peuvent ensuite être affichées dans un SIG bureautique ou une application Internet. Dans le cadre du projet, les données sont stockées dans une base de données relationnelle. Nous utilisons le SGBD *PostgreSQL* étendu de son cartouche spatial *PostGIS*. Deux flux *WMS* et *WFS* sont délivrés par le geoservice afin de rendre accessibles les données. Le module de Geoservices utilise deux logiciels : *GeoServer* et *OrbisServer*.

*OrbisServer* a été développé pour pallier les manques du standard de cartographie existant. En effet, une étude des capacités du standard *Style Layer Descriptor*, utilisé pour définir des styles sur des objets géographiques a montré que la spécification n'était pas assez riche pour construire des représentations travaillées comme des cartes avec des symboles proportionnels affrontés, avec des diagrammes ou des cartes de flux (Ertz & Bocher, 2010; Bocher et al., 2011). Or la mise en valeur des données géographiques acquises dans le projet EvalPDU ne pouvait se satisfaire de ces limitations qui in-fine annihilent toute la puissance de la symbolique cartographique. Car si la carte est un objet de communication, elle est aussi destinée à soutenir un raisonnement et à faciliter la prise de décision. Pour ces raisons, en 2010, nous avons engagé un travail bibliographique et technique de fond pour proposer une évolution du standard de cartographie. Ce travail nous a conduit avec un collègue professeur à la HEIG-VD<sup>57</sup> à prendre en charge et à animer le *Standard Working Group* (SWG) *Symbology Encoding* à l'OGC. Ces travaux sont présentés dans la section 4.3 .

57 <http://www.heig-vd.ch/> consulté en février 2018

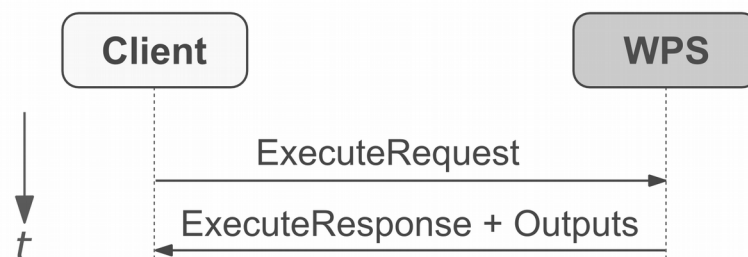
## Geoprocessing

En 2005, l'OGC publie le standard *Web Processing Service* (Schut, 2005) dont l'objectif est de piloter à distance l'exécution de traitements géographiques. Ce standard vient compléter le dernier maillon de la chaîne de vie de la donnée puisque l'on peut maintenant modéliser les données (*Simple Feature*), cataloguer (*CWS*), diffuser (*WMS*, *WFS*, *WCS*) et traiter (*WPS*).

Le *WPS* 1.0 fonctionne sur le même principe que les standards *WMS* ou *WFS*. Il s'agit d'un service *WEB* qui s'interroge avec le protocole *HTTP*. 3 opérations sont définies pour communiquer avec le service.

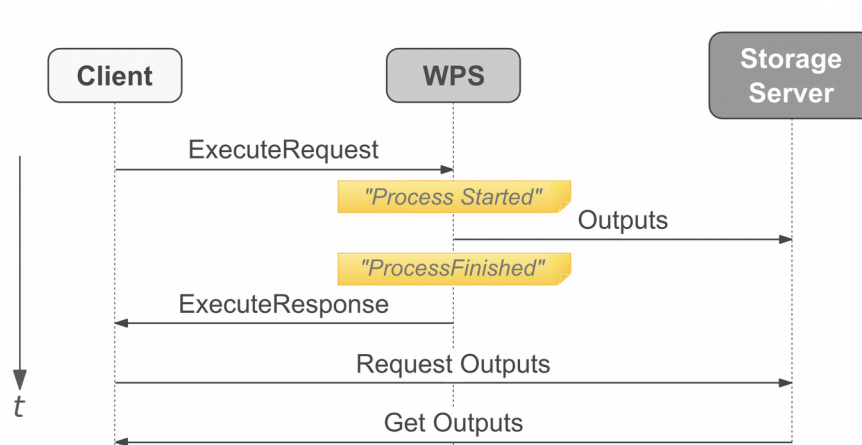
- *GetCapabilities* renvoie des informations sur le service *WPS* et les traitements disponibles,
- *DescribeProcess* renvoie une description complète d'un traitement, y compris les entrées et les sorties.
- *ExecuteProcess* invoque un traitement en fonction de son identifiant.

L'interrogation du service est réalisée par un client. Selon la nature de la réponse, le service *WPS* retourne le résultat dans la requête, par exemple un fichier txt (Figure 13) ou bien une référence vers le fichier hébergé sur un serveur, utile pour des données volumineuses (Figure 14).



Author : A. Gourlay \* - Illustration : G. Petit \* - 03-2011 \* Atelier SIG - IRSTV FR CNRS 2488

Figure 13: Principe d'exécution d'un WPS avec un retour par valeur



Author : A. Gourlay \* - Illustration : G. Petit \* - 03-2011 \* Atelier SIG - IRSTV FR CNRS 2488

Figure 14: Principe d'exécution d'un WPS avec un retour par référence

Sur le papier, cette spécification est séduisante car elle offre la possibilité de constituer des points uniques où l'ensemble des traitements sont décrits et accessibles à distance avec le même protocole (Michaelis, 2007). Dans le cadre du projet EvalPDU, nous avons expérimenté la mise en œuvre d'un service WPS pour centraliser l'ensemble des analyses spatiales et tirer profit des capacités informatiques de serveur(s) afin d'exécuter des calculs lourds comme la production d'une carte de bruit ou encore la modélisation du trafic (voir section 4.4.2).

Plusieurs logiciels existent pour mettre en place des services WPS comme *pyWPS*<sup>58</sup>, *52° North*<sup>59</sup> (Poorazizi & Hunter, 2015). Néanmoins la prise en main de tels outils reste limitée à un cercle d'initiés à la programmation informatique. Par exemple, pour créer un traitement avec l'outil *52° North*, il faut :

- écrire une *class JAVA* qui contient le traitement,
- compiler la *class* et l'exporter dans le format *JAR (Java ARchive)*,
- importer le fichier *JAR* avec les dépendances de bibliothèques (si nécessaire) dans l'application *52° North*.

Les traitements WPS sont programmés dans des langages natifs (*JAVA*, *C++*) grâce à des *API* qui fournissent des méthodes pour accéder aux données et à une liste d'algorithmes.

Ces architectures sont difficiles à prendre en main par les géographes, géomaticiens car elles nécessitent des compétences en informatique pour écrire les programmes et les rendre accessibles via les plates-formes de services.

En conséquence, pour faciliter le partage des traitements géographiques et offrir aux utilisateurs la possibilité de constituer pour un domaine une base de connaissances regroupant un ensemble de traitements, nous avons proposé d'utiliser le langage *SQL* pour décrire un traitement WPS (Gourlay, Bocher & Petit, 2011). Le langage *SQL* offre l'avantage d'avoir une syntaxe expressive, facile à comprendre et à mettre en œuvre, reposant sur un standard très documenté qui peut s'enrichir de fonctions (voir section 4.2).

Pour cela, une instruction *SQL* doit contenir des métadonnées stockées comme commentaires. Le stockage des éléments WPS comme commentaires permet au script de rester conforme à la syntaxe *SQL*. Les métadonnées reprennent les éléments requis dans la spécification WPS à savoir : un identifiant unique (*identifier*), un titre (*title*), un résumé (*abstract*), une ou plusieurs valeurs d'entrée (*input*) et au moins une valeur de sortie (*output*). L'exemple ci-dessous donne un aperçu d'une telle instruction *SQL*. Elle consiste à filtrer les données contenues dans une table pour ne conserver que celles qui sont géométriquement valides.

---

58 <http://pywps.org/> consulté en septembre 2018

59 <https://52north.org/software/software-projects/wps/> consulté en septembre 2018

```
/*@script
```

```
@identifiant FilterValidData
```

```
@title Keep valid geometry
```

```
@abstract Filters the content of a spatial table to keep only valid geometries
```

```
@input TABLE myTable
```

```
@output TABLE result
```

```
@/script
```

```
*/
```

```
CREATE TABLE result AS SELECT * FROM myTable WHERE ST_IsValid(the_geom) ;
```

Le serveur WPS a été développé sur la base de la bibliothèque *GDMS*. Le fonctionnement est le suivant (Figure 15) :

1. L'utilisateur dépose dans un répertoire de scripts un fichier *SQL* qui contient des métadonnées *WPS*.
2. Un analyseur contrôle et récupère les métadonnées *WPS* (*Metadata Parser*). Si le script est valide, celui-ci est ajouté dans l'application Internet qui l'expose via le *GetCapabilities* (*Custom Process Provider*).
3. *GDMS* est ensuite chargé d'exécuter le script demandé par le client.

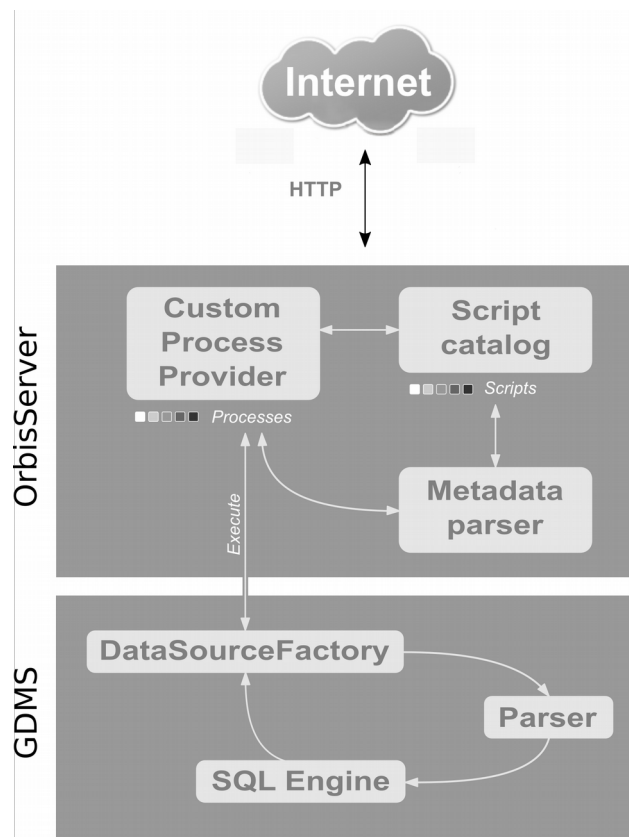


Figure 15: Composants et fonctionnement du serveur de WPS d'OrbisGIS

Avec *OrbisServer*, nous avons constitué un catalogue de traitements comprenant notamment (Mestayer et al., 2010, 2015):

- l'ensemble des opérateurs et prédicats du standard *SQL spatial*.
- une catégorie de traitements dédiés à classification morphologique du milieu urbain (voir section 4.4.1),
- une catégorie de traitements pour la préparation et le calcul des cartes de bruits (voir section 4.4.2).

La mise en œuvre du standard *WPS* a permis d'expérimenter le rapprochement entre un langage et une spécification élaborée pour un service Web afin de s'affranchir des barrières techniques que ces architectures imposent. Nous avons proposé d'étendre le *SQL* avec des métadonnées pour utiliser la puissance expressive de ce langage et décrire puis partager des traitements. En utilisant la syntaxe *SQL* et ses fonctions spatiales, notre objectif était d'amener l'utilisateur à l'abstraction et l'éloigner autant que possible des contraintes techniques pour le rapprocher des concepts et des objets concrets qu'il doit traiter. Nous avons souhaité mettre l'utilisateur dans une posture de travail collaboratif afin qu'il puisse partager, mutualiser et confronter ses méthodes avec d'autres utilisateurs. L'idée principale est d'impliquer le maximum d'acteurs autour des questions d'analyses spatiales et de mettre en évidence les potentialités des services géographiques distribués pour co-construire des outils d'exploration du territoire. La Figure 16 résume l'esprit de ce dispositif.

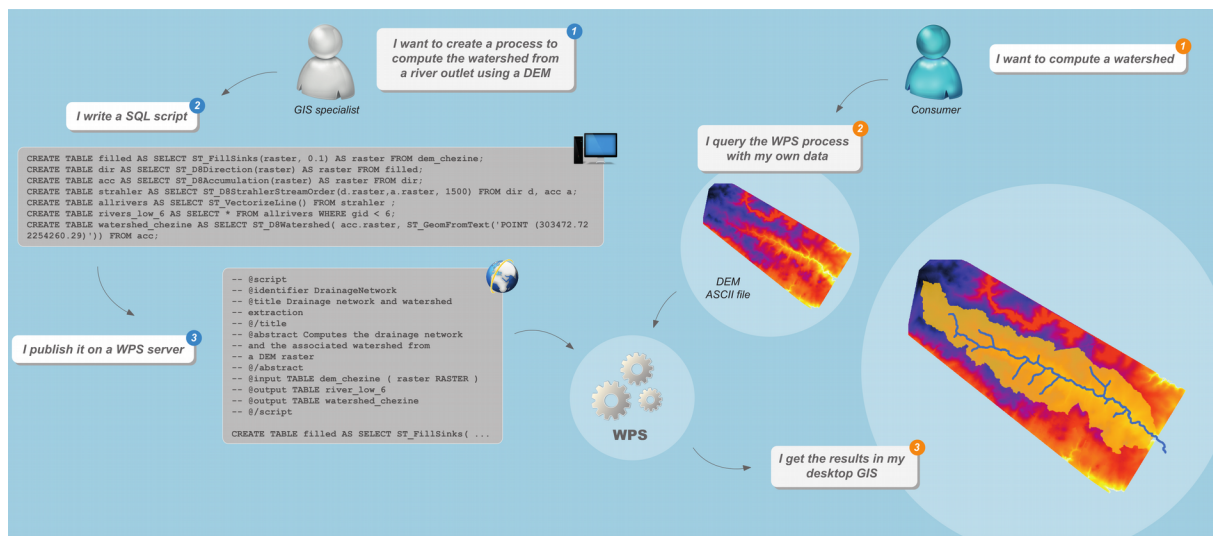


Figure 16: Synoptique d'utilisation du serveur WPS d'OrbisGIS

### 4.2.2.3 Une plate-forme pour et par la recherche

La plate-forme *OrbisGIS* a été construite pour faciliter la circulation des données géographiques mais également des méthodes qui permettent de les manipuler et de les représenter. Son architecture repose sur une suite de modules interchangeables qui s'assemblent pour faire du SIG un outil de travail collaboratif qui s'adapte au gré des usages attendus (SIG bureautique, bibliothèque pour exécuter des tâches de traitements, services distribués...) à l'image du concept de *mash-ups* (Chow, 2011).



L'évolution des moyens de communication et la progression de l'Internet ont induit un changement de paradigme. En quelques années, nous sommes passés des SIG bureautiques à des services d'information géographique en ligne utilisant des standards. La plate-forme *OrbisGIS*, ou ce que nous devrions plutôt appeler l'écosystème *OrbisGIS* a contribué à une nouvelle forme d'ingénierie et d'organisation des SIG dont les 3 principes fondamentaux s'appuient sur la modularité, l'interopérabilité et les logiciels libres.

## Modularité

*OrbisGIS* est organisé autour de deux catégories de modules : les bibliothèques et les interfaces hommes-machines. Un module pivot appelé « module principal » se charge de les assembler selon les usages demandés (Figure 17).

Le module principal (*Main Framework*) fonctionne sur le principe d'un système de registre. Ce registre permet de déclarer des services, ici les modules, qui sont chargés à la demande de l'utilisateur. Chaque service apparaît sous la forme d'interfaces (*API*) et d'une implémentation, séparées dans des modules distincts. Cette approche permet à un utilisateur de service d'installer une version spécifique de ce service (Version 1.0, Version 2.0) mais également aux concepteurs de pouvoir isoler certains développements. L'utilisateur peut par exemple décider de charger dans *OrbisGIS* une version du moteur de rendu cartographique qui fonctionne avec le standard international de cartographie en cours de définition (voir section 4.3) ou bien utiliser le moteur de rendu par défaut basé sur la dernière version officielle de la spécification *Symbology Encoding*. Le point commun entre ces deux modules est l'*API Map* qu'ils implémentent.

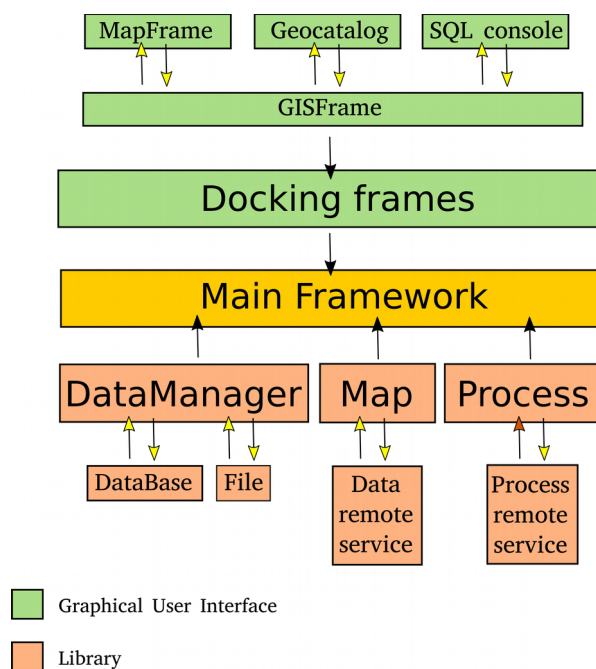


Figure 17: Architecture de la plate-forme *OrbisGIS*

Les modules d'*OrbisGIS* ont été assemblés, adaptés pour répondre aux besoins de recherche nécessitant de nouveaux modes de manipulation et de consommation de l'information géographique. Nous donnons deux exemples.

## OrbisGIS « bureautique »

OrbisGIS « bureautique » appelée aussi *OrbisGIS* est une interface graphique développée avec les composants *Swing* de *JAVA* et utilisant le système de fenêtrage de la bibliothèque *Docking-frames*<sup>60</sup>. Par défaut, *OrbisGIS* propose (Figure 18):

- un catalogue de données qui permet de gérer les sources de données supportées par l'implémentation du *DataManager* qui est chargée. Il peut s'agir de la bibliothèque *GDMS* ou encore d'une vue directe sur une base de données relationnelles comme *PostGIS*.
- une fenêtre de navigation cartographique (*Map Editor*) et son gestionnaire de couches (*TOC*) qui dispose des outils classiques d'interactions (zoom, déplacement).

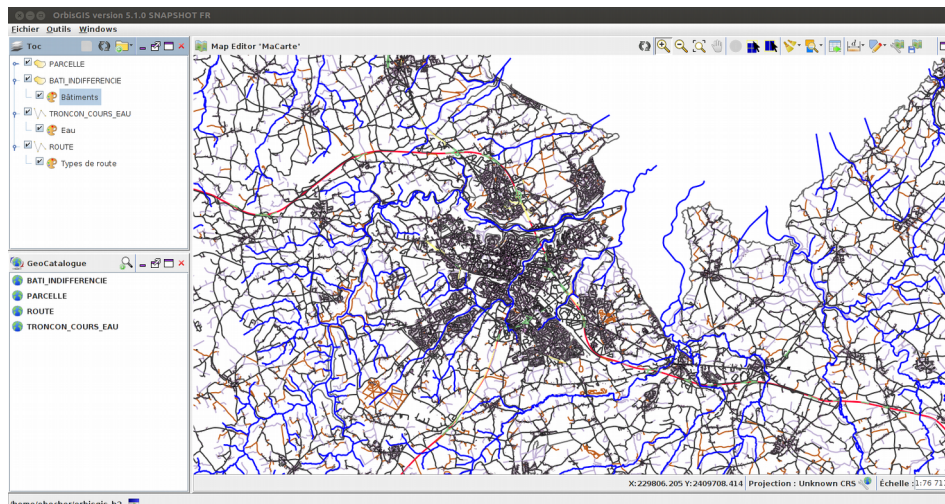


Figure 18: Interface graphique par défaut d'OrbisGIS "Bureautique"

Cette interface peut être personnalisée selon les besoins et les compétences de l'utilisateur en activant de nouveaux modules comme par exemple la *Console SQL* qui permet d'interagir avec les données du *GeoCatalogue* ou la *ToolBox* qui offre un ensemble de scripts *WPS* qui sont exécutables dans l'environnement bureautique ou sur un serveur (Figure 19).

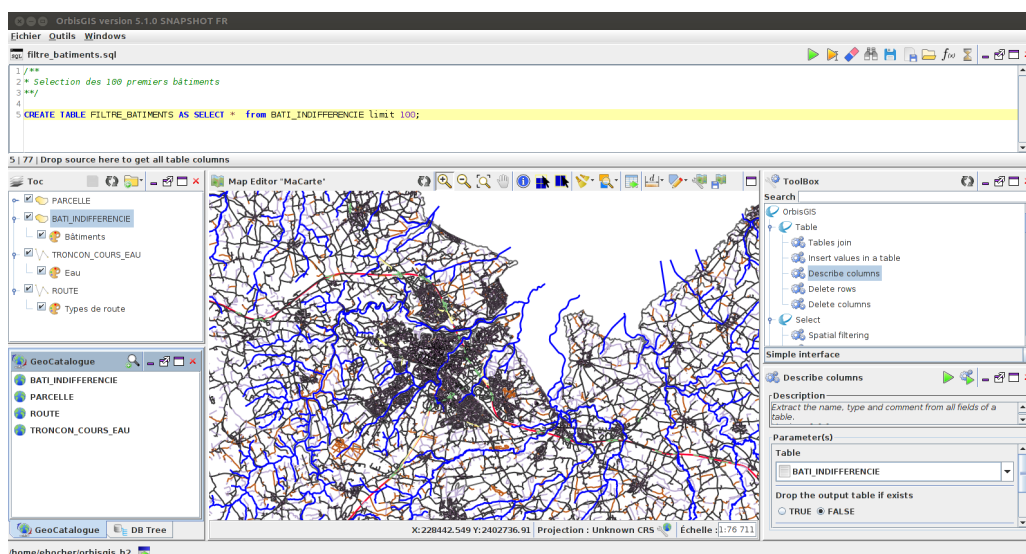


Figure 19: Interface d'OrbisGIS "Bureautique" adaptée pour l'analyse des données

60 <http://www.docking-frames.org/> consulté en septembre 2018



## OrbisGIS WPS

*OrbisGIS WPS* est un prototype de serveur *WPS* que nous avons implémenté sur la base des travaux réalisés dans l'ANR EvalPDU et qui se sont prolongés dans les ANR VegDUD, MApUCE et CENSE (voir section 4.2.2.2). Ce prototype comporte :

- un module pour cataloguer et exécuter des scripts *WPS* : *OrbisWPS*,
- un module pour gérer les utilisateurs : *OrbisServer*,
- un serveur d'application internet qui permet d'interagir avec *OrbisServer* en fournissant au client soit des interfaces graphiques en *HTML*, soit une *API REST*.

L'architecture est présentée sur la Figure 20.

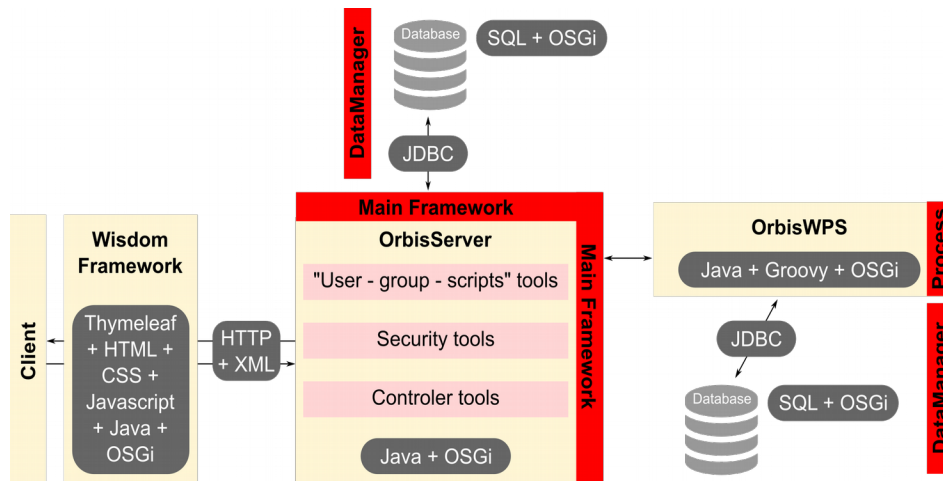


Figure 20: Architecture du serveur WPS d'OrbisGIS

Les ressources principales de ce service sont des scripts *WPS* qui sont partagés par les utilisateurs ou proposés par défaut notamment pour ce qui concerne l'ensemble des opérateurs et prédicats géométriques 2D (intersection, union, différence). Le fonctionnement du service est schématisé sur la Figure 21. Chaque utilisateur dispose d'un identifiant et d'un mot de passe pour se connecter au service. Un utilisateur est par défaut associé à un groupe. Chaque groupe est lié à une instance d'*OrbisWPS* et dispose de son propre espace de stockage et de ses propres scripts. Ce cloisonnement permet d'éviter d'éventuels conflits dans l'orchestration des traitements. Un utilisateur peut néanmoins participer à un autre groupe, dans ce cas les ressources du services *WPS* sont partagées. Cette configuration offre la possibilité d'échanger des traitements mais aussi les données. Elle a été mise en œuvre pour construire la chaîne de production des indicateurs morphologiques du projet MApUCE (voir section 4.4.1).

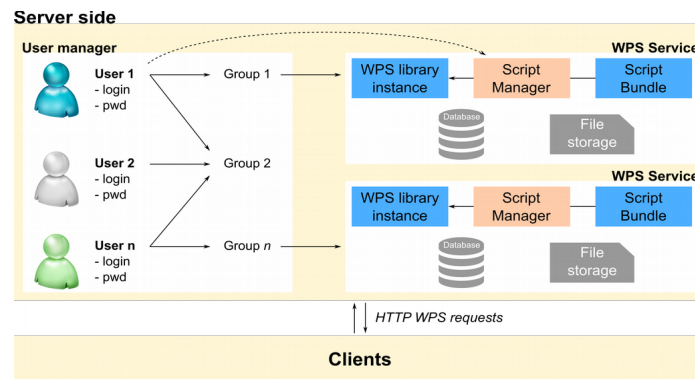


Figure 21: Fonctionnement du service WPS d'OrbisGIS

Dans la section 4.2.2.2, nous avons proposé d'utiliser le langage *SQL* et ses fonctions spatiales comme syntaxe pour décrire un traitement *WPS* afin notamment de faciliter le partage des méthodes d'analyses par des non-informaticiens. Nous avons continué d'exploiter cette approche pour générer automatiquement des interfaces graphiques à partir des métadonnées contenues dans les scripts *SQL*. Ce travail a donné lieu au développement d'un système de génération d'interfaces qui alimentent en scannant les répertoires *WPS*, soit la *ToolBox* d'OrbisGIS (voir précédemment) soit une application web. La Figure 22 représente une copie d'écran de la page d'accueil du service *WPS* en ligne. Cette page *HTML* liste 3 fonctions : ajout des données, gestion des données ou exécution des traitements. La Figure 23 présente le résultat de la génération automatique d'une page *HTML* présentant les scripts disponibles lorsque l'utilisateur clique sur l'icône d'exécution des traitements.



Figure 22: Page d'accueil du service WPS en ligne

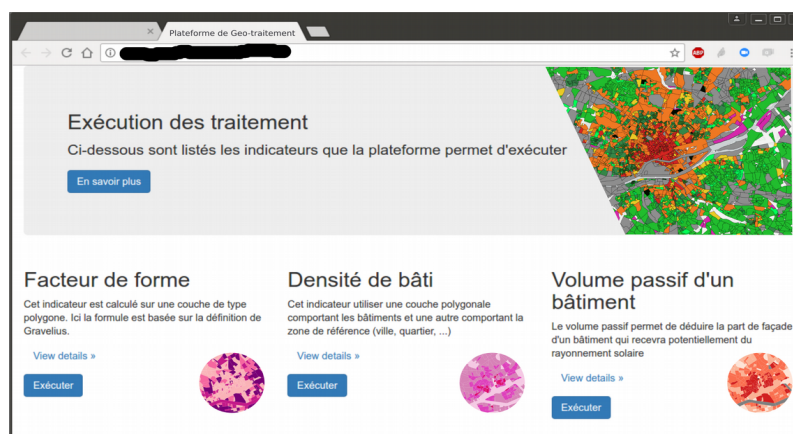


Figure 23: Exemple de génération automatique d'une page de présentation des scripts WPS

## Interopérabilité

L'écosystème d'*OrbisGIS* a pour caractéristique principale de reposer sur les standards ouverts de l'information géographique définis par l'*Open Geospatial Consortium*. Ces standards sont utilisés à différents niveaux. Ils ont pour objectifs d'assurer la portabilité et l'interopérabilité des données et des méthodes avec d'autres systèmes : bureautique ou distribué.

*OrbisGIS* utilise les spécifications suivantes (Figure 24):

- *GML Simple Features (SFO)* et *RegularGridCoverage (RGC)* pour les modèles de données géométriques en 2D et les images raster régulières (Van den Brink, Portele & Vretanos, 2012; Baumann, Hirschorn & Masó, 2017),
- *OGC Simple Features for SQL (SFS)* pour les opérations sur des données géométriques 2D (Herring, 2006b),
- *OWS Context (OWS-C)* pour décrire les éléments qui sont représentés dans un projet cartographique (Brackin & Gonçalves, 2014a,b)
- *OCC Symbology Encoding (SE)* pour la description des styles qui sont utilisés pour représenter des données géographiques (Müller, 2006),
- *OGC Web Processing Service (WPS)* pour le partage des traitements géographiques (Schut, 2005; Müller & Pross, 2015)
- OGC « Web Map Service » (WMS) pour accéder à des contenus de services géographiques (de la Beaujardiere, 2006).

Ces standards sont implémentés via des *API* internes à la plate-forme. Ces *API* ont pour objectif de faciliter l'ajout de nouveaux composants en fournissant un vocabulaire, des méthodes et des structures d'objets le plus abstraits possibles. Pour cela, *OrbisGIS* s'appuie d'une part sur les définitions de l'*OGC Reference Model*<sup>61</sup> et d'autre part sur le guide de bonnes pratiques *OGC® Open Geospatial APIs*<sup>62</sup>.

L'utilisation d'*API* permet aux programmes informatiques de discuter dans la même langue, d'échanger ainsi plus facilement des informations mais également de rendre interchangeable les composants. Cette organisation du code informatique est un atout pour le développement d'une plate-forme qui évolue au gré des questions de recherche. Le temps gagné à définir des *API* peut être ensuite redéployé sur ce qui constitue les fondements de la plate-forme : l'expérimentation et l'innovation.

---

61 <http://rap.opengeospatial.org/orm.php#maps-kml-and-pdfs> consulté en septembre 2018

62 <http://docs.opengeospatial.org/wp/16-019r4/16-019r4.html> consulté en septembre 2018

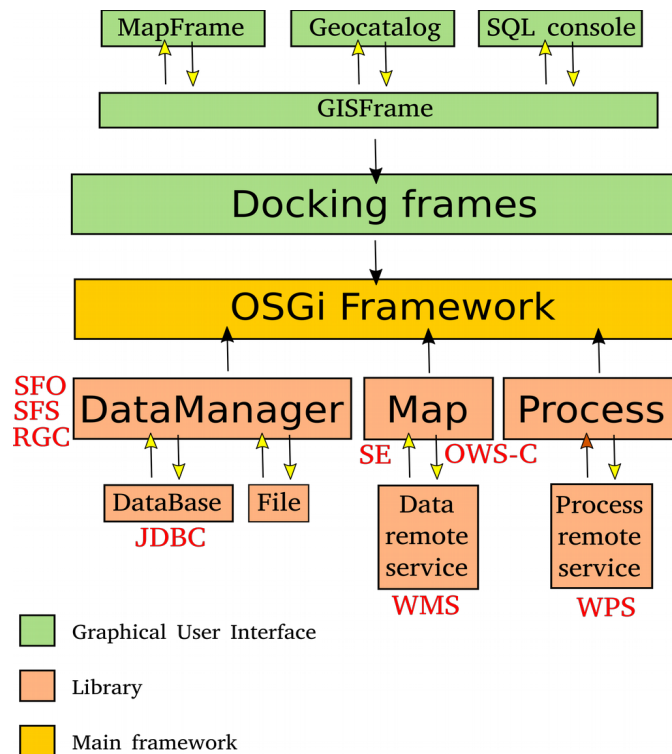


Figure 24: Les standards au sein de l'architecture de la plate-forme OrbisGIS

Nous avons mis à profit cette logique d'API dans le cadre de la refonte du gestionnaire de données d'OrbisGIS. La bibliothèque GDMS a montré ses limites dans le cadre d'une utilisation intensive du moteur de requête SQL et du système de gestion relationnelle des données sous-jacent. En effet GDMS ne disposait pas :

- d'un système d'indexation et de stockage des données performant permettant de manipuler de grandes quantités de données (plusieurs gigabytes).
- de mécanisme d'extension simple pour les types de données et les opérateurs. L'ajout d'un nouveau type de données nécessitait de recompiler la bibliothèque.
- d'une gestion fine des contraintes d'intégrité afin de définir des règles de cohérence pour une donnée ou un ensemble de données. Par exemple, un bâtiment doit être contenu dans une parcelle.
- de système de gestion d'événements (*trigger*). Il n'est ainsi pas possible de piloter une chaîne d'opérations entre données suite à une modification sur une autre donnée.

Dans ce contexte après une étude des bibliothèques et des gestionnaires de données existants, nous avons opté pour le développement d'une extension spatiale sur la base de données relationnelle *H2 database*<sup>63</sup>. Nous avons repris et amélioré les travaux engagés par (Bocher & Lepetit, 2006) en conservant les objectifs premiers de GDMS : disposer d'un gestionnaire de données simple d'installation, fonctionnant sur différents systèmes d'exploitation, capable de dialoguer avec différentes sources de données (base de données et fichiers plats) et compatible avec le langage SQL.

La base de données *H2* a été sélectionnée pour ces raisons. Développée en JAVA, elle dispose d'un système d'indexation robuste des données. Elle supporte la totalité de la spécification SQL 99 et

63 <http://h2database.com> consulté en septembre 2018

fournit un moteur d'exécution des requêtes optimisé. De plus, la base de données H2 fournit une implémentation de l'API *JDBC (Java Database Connectivity)*. Cette API propose une interface standardisée pour les bases de données relationnelles et peut être utilisée pour d'autres structures de données comme c'est le cas de la base de données orientée documents *MongoDB*<sup>64</sup>.

H2GIS est une extension spatiale qui supporte la totalité des opérations géométriques décrites dans la spécification *Simple Feature for SQL*. Son développement a nécessité l'ajout du type de données *Geometry* à la base de données H2 ainsi qu'un mécanisme d'indexation spatiale de type *RTree*. H2GIS propose près de 200 fonctions<sup>65</sup> dont plusieurs ont été programmées pour des questions spécifiques de recherche. La fonction *ST\_SVF* qui permet de calculer le facteur de vue du ciel (FVC) en un point est un exemple (Bernard et al., 2018). Dans le contexte des études de micro-climatologies urbaines, le FVC fournit une indication du potentiel de rayonnement direct et donc de réchauffement d'un espace.

H2GIS a également été utilisé pour construire des dispositifs plus complexes comme une base de données spatio-temporelles pour l'étude de l'évolution de l'occupation des sols sur le territoire nantais. La gestion conjointe d'informations géographiques et temporelles est une problématique récurrente, mais elle est souvent limitée dans les Systèmes d'Information Géographique (SIG). La grande majorité des SIG se contente de modéliser les données par couches thématiques sans liens spatiaux ou temporels. Pourtant la gestion et la manipulation des informations temporelles sont indispensables pour restituer les évolutions d'un territoire et comprendre l'impact des politiques d'aménagements. L'évolution de la tache urbaine est un bon exemple. Le modèle de données que nous avons mis en œuvre repose sur le stockage des événements (appelé aussi journal des modifications). L'idée était de stocker l'état actuel de la table source et de conserver un journal de toutes ses modifications. Cela permet alors de remonter à toutes les versions antérieures de la table. Le système de version a été programmé en *SQL* à partir de procédures stockées et du mécanisme de gestion des événements du système relationnel. Il a permis d'expérimenter une base de données de suivi de l'occupation des sols sur la commune de Nantes sur laquelle il est possible de réaliser des extractions à l'aide de filtre spatiaux et temporels (Rannou, 2012; Long, Petit & Bocher, 2013).

H2GIS a apporté de nouvelles capacités de modélisation, d'interactions et de traitements avec les données géographiques et temporelles en tentant de répondre aux questions : Comment peut-on structurer des données multi-sources, multidimensionnelles ? Quels outils peut-on utiliser pour les modéliser et les interroger ?

Son développement nous a amené à nous interroger sur la place d'un SGBD dans un SIG. Finalement, celui-ci est devenu le cœur de la plate-forme et nous avons glissé vers une architecture avec un SGBD intégré. Les informations spatiales et alphanumériques sont stockées dans le SGBD permettant aux applications SIG de s'enrichir de leurs caractéristiques principales : sécurité, concurrence d'accès, flexibilité et passage à l'échelle, langage unique...

L'intégration d'H2GIS s'est faite en utilisant l'API *JDBC* offrant la possibilité d'interchanger le type de SGBD utilisé. *OrbisGIS* peut ainsi fonctionner avec la base H2GIS tout comme *PostgreSQL* et son extension *PostGIS*. Ce choix d'architecture est lié à notre volonté d'urbaniser les outils SIG pour les mettre au cœur d'organisations collaboratives, distribuées, fonctionnant en services.

---

64 <https://www.progress.com/jdbc/mongodb> consulté en septembre 2018

65 <http://www.h2gis.org/docs/1.4.0/home/> consulté en septembre 2018

Pour ce dernier point, nous avons également pris une direction originale en utilisant les spécifications de l'*OSGi*<sup>66</sup> pour construire une plate-forme de services intelligents. Une plate-forme capable :

- de se mettre à jour sans nécessiter un redémarrage de l'application,
- de résoudre les conflits de dépendances entre les modules (gestion de bibliothèques tierces),
- de faire co-exister différentes versions de modules.

*OSGi* est un ensemble de spécifications pour le langage Java qui a pour but de définir une plate-forme pouvant être gérée dynamiquement avec un modèle orienté composants. Les composants appelés *Bundle* peuvent être installés, démarrés, arrêtés, mis à jour, et désinstallés dynamiquement sans aucun redémarrage. Les composants sont nécessairement gérés par un framework *OSGi* qui s'occupe de la gestion de leur cycle de vie. Les *bundles* peuvent être présents sur la machine (locaux) ou distants. *OSGi* est basé sur un système de registres qui détecte les nouveaux services offerts par les *bundles*, et gère leur cycle de vie en fonction de leur installation, leur arrêt et leur démarrage. *OSGi* offre une multitude de services : gestion de configuration, service *HTTP*, gestion de droits, observation... La plate-forme *OrbisGIS* utilise la spécification *OSGi* à tous les niveaux de son architecture. Par exemple pour ajouter une nouvelle fonction dans la syntaxe *SQL* d'*H2GIS*, ajouter un composant graphique dans sa version bureautique ou encore déployer de nouveaux scripts *WPS* dans le serveur *OrbisGIS*. Pour cela, *OrbisGIS* est organisé autour d'un nœud principal, le *Main Framework* qui est une application *OSGi* basée sur la bibliothèque *Apache Felix*<sup>67</sup> (Figure 24). Si cette organisation est plus contraignante en terme de développement car elle nécessite de respecter un cadre strict, elle se prête cependant parfaitement à la construction d'une plate-forme évolutive qui s'assemble et se désassemble à l'image d'un jeu de *LEGOS*®.

## Logiciel libre

Les outils ouverts au sens de la *Free Software Fondation*<sup>68</sup> ont connu un essor majeur ces dix dernières années. Depuis le SIG *GRASS* qui fait office de précurseur, de nombreux projets open source ont émergé, d'une part pour combler les manques des outils du marché et d'autre part par la volonté d'offrir de nouveaux outils aux communautés et partager leurs connaissances. Dans le domaine des sciences de l'information géographique et surtout en France, les logiciels libres ont tardé à être utilisés que ce soit pour l'enseignement ou comme support pour la recherche. Pourtant, comme le rappellent (Steiniger & Bocher, 2009) le logiciel libre a plusieurs avantages :

- Il évite aux chercheurs de réinventer la « roue ». Dans *OrbisGIS*, nous utilisons par exemple les opérations de géométrie 2D standardisées de la bibliothèque *JTS* pour mettre en œuvre des chaînes d'analyses spatiales ou développer de nouveaux algorithmes.
- Il est conforme au principe de transparence et de rigueur que nécessite la recherche. En effet, avec un logiciel libre, le chercheur a accès à la documentation mais également au code source ce qui lui permet de comprendre les méthodes mises en œuvre.
- Il peut être adapté, modifié, assemblé sans restrictions pour construire de nouvelles plates-formes, de nouveaux outils de modélisation, sous réserve de respecter la compatibilité des licences entre elles. C'est ce que nous avons réalisé avec le serveur *WPS* d'*OrbisGIS* ou

---

66 <https://www.osgi.org/> consulté en septembre 2018

67 <http://felix.apache.org/> consulté en septembre 2018

68 <https://www.fsf.org/> consulté en septembre 2018



encore (Gouge et al., 2014; Bocher, Petit & Lecoeuvre, 2014) lorsque nous avons réutilisé la bibliothèque *JGraphT*<sup>69</sup> pour intégrer dans *H2GIS* des fonctionnalités telles que le calcul d'itinéraires, le calcul de distances ou encore d'indices de centralité de proximité ou d'intermédiarité.

- Il est accessible le plus souvent via des plates-formes de gestion de code sources qui sont publiques. Ces plates-formes permettent au chercheur de récupérer les derniers développements sans attendre la mise à disposition d'une nouvelle version. Elles lui permettent aussi de contribuer directement au projet en soumettant des améliorations sur le code informatique, la documentation.
- Il permet de diffuser les travaux de recherches, de favoriser l'appropriation des technologies, le développement de nouveaux usages et méthodes organisationnelles. Le concept d'IDS et services géographiques s'est ainsi propagé grâce aux logiciels libres qui ont très tôt mis en œuvre les standards de l'information géographique, bouleversant les pratiques dans les organisations (Steiniger & Hunter, 2012). L'application *Geonetwork* dédiée au catalogage des données et que nous utilisons au sein de l'IDS Cartopolis en est une illustration. Elle est le cœur de plusieurs milliers de géoportails dans le monde. En France, elle équipe la majeure partie des IDS régionales.

Depuis sa création en 2006, *OrbisGIS* contribue au mouvement du logiciel libre. L'ensemble de ses modules est sous licence *GPL*<sup>70</sup> ou *LGPL*<sup>71</sup>. De prime abord, cette posture pouvait être perçue comme une opposition primaire aux logiciels commerciaux mais elle reflétait avant tout une volonté précoce de partager avec le plus grand nombre les travaux de recherche et de développement en SIG. Bien avant le mouvement science ouverte, avec la plate-forme *OrbisGIS*, nous nous sommes engagés dans une philosophie de partage et de libre réutilisation. C'est une nouvelle façon de **FAIRE** la science qui impose un mode de gouvernance adapté, de la pédagogie et de la régulation. En effet, construire une plate-forme open source oblige :

- de mettre à disposition des contributeurs des outils adaptés pour le travail collaboratif aussi bien pour les développeurs qui partagent leur code que pour les utilisateurs qui doivent pouvoir également interagir sur la documentation ou faire des retours sur son fonctionnement.
- d'avoir une politique rigoureuse de gestion des contributions pour éviter de mettre en péril la continuité des développements.
- une vue générale organisationnelle et technique afin de pourvoir, autant que faire ce peut, amener les contributeurs à mutualiser leurs travaux et s'autocontrôler mutuellement. On peut ici penser à des travaux réalisés par une équipe A et qui peuvent tirer profit des développements déjà réalisés par une équipe B. Cette régulation contraint les équipes à adopter des architectures logicielles modulaires.
- à accompagner car, autour de ce type de projet, se retrouvent des contributeurs avec des profils différents mais aussi car, pour le chercheur, l'ouverture de son code est une mise à nu de ses travaux.
- de la constance dans les moyens humains et logiciels (plates-formes de partage). L'animation d'une plate-forme open source nécessite un minimum de ressources humaines pour assurer les supports techniques, utilisateurs ainsi que la gouvernance générale.

---

69 <https://jgraph.org/> consulté en septembre 2018

70 <http://www.gnu.org/licenses/gpl> consulté en septembre 2018

71 <http://www.gnu.org/licenses/lgpl> consulté en septembre 2018

Pour toutes ces raisons, la plate-forme *OrbisGIS* est administrée à l'aide d'un ensemble d'applications web interconnectées que l'on retrouve dans les projets opérationnels :

- une plate-forme de versionnement de code hébergée en ligne par *GitHub* qui intègre également un wiki par projets et un espace pour déposer des tickets (<https://github.com/orbisgis>).
- un outil d'intégration en continu (<http://jenkins.orbisgis.org/>) qui permet de déployer chaque jour automatiquement une nouvelle version de la plate-forme, sous-condition, que celle-ci passe les tests de validation. Cet outil est synchronisé avec la plate-forme *GitHub*.
- une plate-forme de gestion des versions logicielles (<http://nexus.orbisgis.org>) qui stocke les versions compilées stables et en cours de développements de tous les modules d'*OrbisGIS*.

Ces applications sont accessibles via un site faîtier (<http://www.orbisgis.org>) qui fournit également des outils pour informer et communiquer avec la communauté (documentation en ligne, listes de diffusion...).

### 4.2.3 Bilan

Dans cette partie nous avons donné un aperçu de l'évolution des techniques et des méthodes relatives au SIG. Nous avons proposé d'utiliser le langage *SQL* étendu de fonctions spatiales pour décrire, exécuter et partager des chaînes d'analyses spatiales. Nous avons pu montrer les limites de la spécification et la nécessité de la faire évoluer pour permettre de manipuler des structures de données communément utilisées dans les SIG : raster, maillage.

Un prototype d'Infrastructure de Données Spatiales a été mis en œuvre dans le but de faciliter l'organisation, l'accès, la manipulation et la visualisation d'un patrimoine de données géographiques acquises dans le cadre d'un projet de recherche pluridisciplinaire. Ce prototype a permis de pointer certains manques liés soit aux faiblesses des standards (*SFS*, *SE*), soit à la maturité et à la disponibilité des technologies (*WPS*). Nous avons contourné ces difficultés en développant une plate-forme SIG, modulaire et interopérable, qui doit être considérée comme un « laboratoire » pour mettre à l'épreuve ces standards et en proposer des adaptations. Cette plate-forme nommée *OrbisGIS* a été conçue selon une architecture de services qui s'assemblent selon les besoins pour construire des géoservices en ligne comme c'est le cas avec le serveur *WPS* ou un client bureautique.

L'appropriation de ces standards par les utilisateurs est restée une préoccupation majeure dans la construction des outils SIG. L'objectif est que le standard soit au service de l'utilisateur, un atout pour coconstruire et partager de la connaissance et non simplement une contrainte technologique. Pour cela nous avons développé des interfaces homme-machine spécifiques comme la *Console SQL* d'*OrbisGIS* qui permet d'interagir dynamiquement dans le SIG avec les données en utilisant le *SQL* spatial. En plaçant ce standard au cœur du SIG nous avons offert aux utilisateurs la possibilité de décrire dans un cadre normalisé des analyses spatiales. En disposant d'une sémantique et d'opérateurs non ambigus les utilisateurs ont pu spécifier des tâches, des plus simples au plus complexes, par exemple pour l'étude de la sensibilité d'indicateurs morphologiques urbains en fonction d'un maillage (Long et al., 2008) ou encore l'alimentation de simulations numériques avec des données géographiques pour étudier les influences locales de la brise estivale (Calmet et al., 2018). L'utilisation d'un langage unique pour formaliser des analyses a ouvert la voie vers une capitalisation des méthodes, plus d'interopérabilité et



d'échanges. Cependant, si l'expressivité du SQL spatial est un atout pour les géomaticiens car proche de la manière dont on exprimerait naturellement une recherche, il reste néanmoins un langage pour les utilisateurs avertis. En effet pour bien l'utiliser et surtout comprendre la signification de ce que l'on exprime, il faut maîtriser les subtilités de formules logiques. Le SQL est un langage abstrait, déclaratif, qui masque l'ensemble des calculs réalisés par le système de gestion des données. Aussi comme le rappelle Rigaux<sup>72</sup> pour qu'une requête (ou une séquence de requêtes) soit accessible à un non-initié, il est nécessaire que celle-ci soit formulée de manière rigoureuse. Cependant les questions abordées étant souvent à la croisée de plusieurs disciplines, une grande diversité d'acteurs interviennent dans la chaîne de l'information. La multiplication des acteurs en capacité de produire, d'utiliser de l'information géographique nécessite d'adapter les supports pour accéder aux données, piloter leur exploitation. Pour cela, nous avons proposé une extension du SQL avec un méta-langage contenant des métadonnées qui permettent via une couche d'abstraction d'exposer un script SQL dans une plateforme de traitements en ligne répondant au standard WPS. Cette approche nous a permis de distribuer les compétences avec par exemple le géomaticien comme créateur des analyses spatiales en SQL-WPS et le gestionnaire d'une collectivité comme consommateur du service. Les architectures distribuées mises en œuvre dans le cadre des projets MApUCE et Noise-planet en sont une illustration concrète (section 4.4).

---

72 <http://sql.bdpedia.fr/index.html> consulté en décembre 2018

## 4.3 Vers un nouveau standard pour la cartographie

Les travaux présentés dans cette section sont le fruit de plusieurs années d'intenses et stimulantes discussions que j'ai co-animées avec Olivier Ertz, professeur à la HEIG-VD, au sein du groupe de travail *Symbology Encoding* à l'OGC<sup>73</sup>. Débutés en 2010, ces travaux avaient pour objectif d'améliorer les capacités expressives du standard de symbologie pour réaliser des cartographies plus complexes, en phase avec les besoins des utilisateurs. Finalement, ils ont pris une tout autre dimension puisqu'ils nous ont amenés à proposer un standard abstrait, neutre (indépendant de tout format de données) et modulaire offrant ainsi la capacité aux communautés de la télédétection, de la 3D, du spatio-temporel ou du *Map Art* de construire leur propre extension cartographique. Ce travail est référencé à l'OGC avec l'identifiant 18-067<sup>74</sup>.

### 4.3.1 Contexte et enjeux

Depuis les années 2000, l'information géographique a su tirer profit de l'évolution constante des technologies de l'information et des communications. Les systèmes d'information géographique ont évolué vers des systèmes distribués, accessibles en ligne et de nombreux développements méthodologiques et techniques ont émergé autour du domaine des Infrastructures de Données Spatiales (IDS) facilitant le recueil, le partage, la manipulation des données pour de multiples usages et entre plusieurs organisations (Craglia, 2010; Tóth et al., 2012). De nombreuses initiatives régionales, nationales et internationales ont vu le jour pour promouvoir l'organisation et la mise en œuvre d'IDS (voir section 4.2).

La visualisation des données géographiques est une fonction principale d'une IDS qui à partir d'un flux de données standardisé, le *WMS*, diffuse des représentations cartographiques. Ces représentations sont souvent de pauvre qualité expressive, réduites à l'utilisation d'aplats, de coloriage de formes. Pire encore, certaines cartes contemporaines provenant d'IDS présentent un sérieux manque de connaissances en cartographie, répétant quelques erreurs de base comme l'utilisation d'aplats pour des valeurs absolues. Au niveau Européen, la Directive INSPIRE ne propose que des règles générales pour représenter les données (INSPIRE Drafting Team, 2008, 2014). Par exemple, le document de recommandations pour le domaine de la géologie pour les services de visualisation *INSPIRE*, ne définit que des représentations cartographiques basiques composées de palettes de couleurs, de critères de largeur et d'espacement pour un trait et de quelques motifs graphiques à répéter sur une surface ou une ligne. Cette recommandation est bien loin de la complexité des représentations utilisées dans ce domaine (INSPIRE Thematic Working Group Geology, 2013). La simplification peut être intentionnelle, mais elle peut aussi révéler les limites sous-jacentes des normes de mise en œuvre dès que la carte nécessite une conception plus complexe. (Ertz, 2013) le démontre dans un rapport pour l'office topographique suisse où il étudie les capacités de la spécification *Symbology Encoding* 1.1 pour décrire des symboles géologiques. Sur 10 symboles testés, 6 sont impossibles à réaliser et les 3 autres nécessitent une clarification concernant l'usage de certains éléments de la spécification.

---

73 <http://www.opengeospatial.org/projects/groups/sldse1.2swg> consulté en septembre 2018

74 [https://portal.opengeospatial.org/files/?artifact\\_id=80686&version=1](https://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=80686&version=1) consulté en septembre 2018

Le premier effort de standardisation des représentations cartographiques apparaît en 2002 avec la spécification *Style Layer Descriptor* (Lalonde, 2002).

Le *SLD* est un langage de description basé sur le format *XML* (*Extensible Markup Language*) qui propose une syntaxe pour configurer la représentation d'entités géographiques. La spécification *SLD* supporte deux modèles de données : les données géométriques 2D et les images raster. Un fichier *SLD* contient des métadonnées comme un nom ou un titre. Un fichier *SLD* est structuré par une ou plusieurs règles (*Rule*). Une règle contient des sous-éléments (*PointSymbolizer*, *LineSymbolizer*, *PolygonSymbolizer*, *TextSymbolizer*, *RasterSymbolizer*) qui contiennent eux aussi des éléments pour définir la couleur de fond (*Fill*) ou l'épaisseur (*Width*) ou le style d'un contour (*Stroke*). Le Tableau 1 donne un exemple de fichier *SLD*. Il permet de dessiner chaque point d'une couche avec un cercle (`<WellKnownName>circle</WellKnownName>`) de taille 6 (`<Size>6</Size>`) rempli d'une couleur rouge (`<CssParameter name="fill">#FF0000</CssParameter>`).

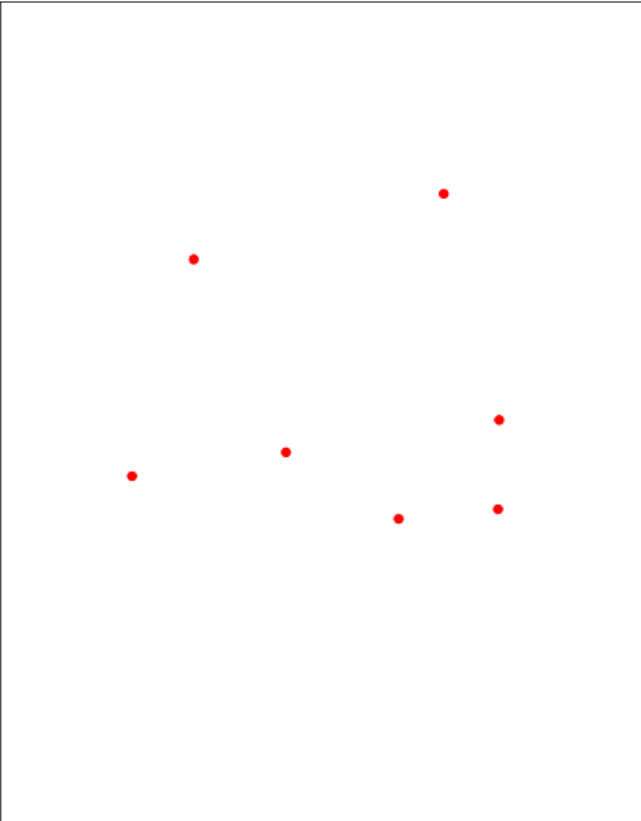
|   |   |
|---|---|
| <pre> &lt;?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?&gt; &lt;StyledLayerDescriptor version="1.0.0"   xsi:schemaLocation="http://www.opengis.net/sld   StyledLayerDescriptor.xsd"   xmlns="http://www.opengis.net/sld"   xmlns:ogc="http://www.opengis.net/ogc"   xmlns:xlink="http://www.w3.org/1999/xlink"   xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema- instance"&gt;   &lt;NamedLayer&gt;     &lt;Name&gt;Simple Point&lt;/Name&gt;     &lt;UserStyle&gt;       &lt;Title&gt;Simple Point with Stroke&lt;/Title&gt;       &lt;FeatureTypeStyle&gt;         &lt;Rule&gt;           &lt;PointSymbolizer&gt;             &lt;Graphic&gt;               &lt;Mark&gt;                 &lt;WellKnownName&gt;circle&lt;/WellKnownName&gt;                 &lt;Fill&gt;                   &lt;CssParameter name="fill"&gt;#FF0000&lt;/CssParameter&gt;                 &lt;/Fill&gt;               &lt;/Mark&gt;               &lt;Size&gt;6&lt;/Size&gt;             &lt;/Graphic&gt;           &lt;/PointSymbolizer&gt;         &lt;/Rule&gt;       &lt;/FeatureTypeStyle&gt;     &lt;/UserStyle&gt;   &lt;/NamedLayer&gt; &lt;/StyledLayerDescriptor&gt; </pre> |  |
|---|---|

Tableau 1: Exemple de fichier *SLD* avec sa représentation

La spécification *SLD* a été élaborée avant tout comme un profil du standard *WMS* afin de disposer d'une syntaxe commune pour décrire et diffuser des visualisations avec des rendus graphiques identiques sur des systèmes hétérogènes. Mis en œuvre dans des logiciels tels que *MapServer* ou *GeoServer* (voir section 4.2.2.2), le standard *WMS* fournit des mécanismes pour accéder à des couches cartographiques via des services *WEB* mais également pour modifier leur représentation (Figure 25).

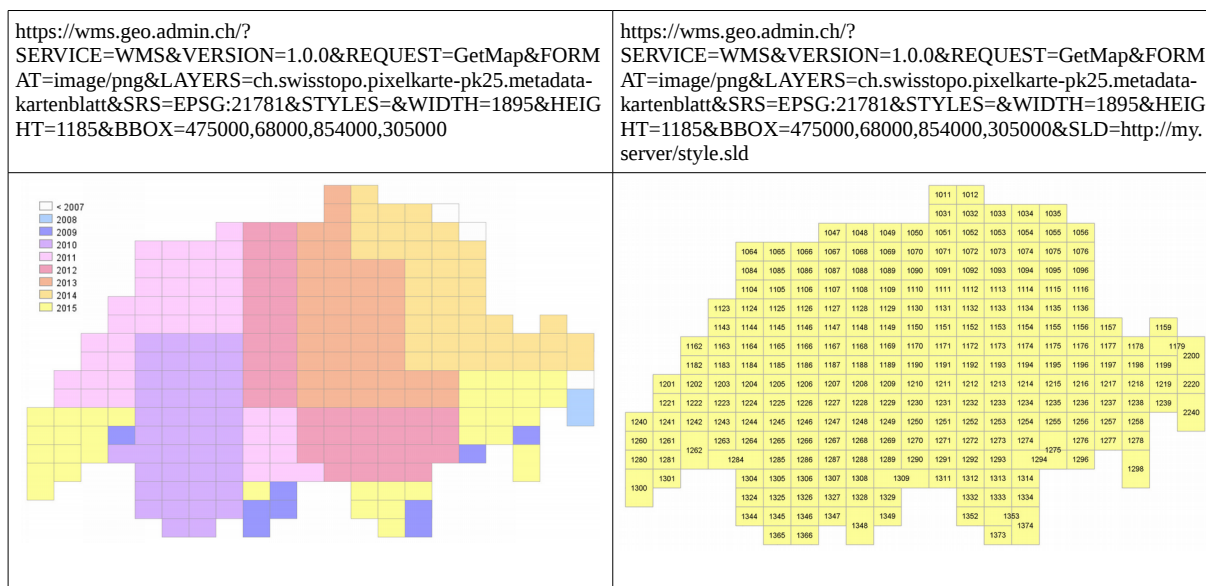


Figure 25: Exemple de requêtes WMS : à gauche pour visualiser une carte avec un style par défaut à droite pour visualiser cette même carte avec un style fournit par le client

En terme d'usage, on comprend ici tout l'intérêt de ce type de service géographique qui outre un accès unique, centralisé et indépendant des technologies, offre la possibilité à l'utilisateur d'interagir avec lui pour adapter la carte à ses besoins (Bocher & Ertz, 2018).

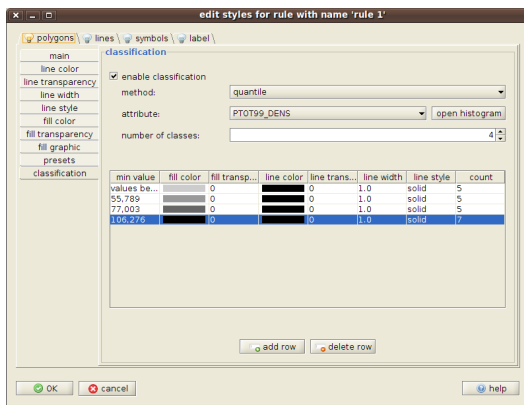
En 2005, le langage de description des styles est externalisé dans un standard à part entière intitulé *Symbology Encoding (SE)* pour s'affranchir de l'usage du *SLD*, réservé aux services *WEB* (Müller, 2006; Lupp, 2007). *SE* ouvre la porte à une plus grande interopérabilité entre les outils (services web, logiciels de bureautique). La communauté des cartographes peut alors espérer disposer d'un standard pour échanger, partager ses productions à l'instar des formats pour les données géographiques.

Dans le cadre du projet de recherche *SCAPC2* (Ertz, Julien & Bocher, 2012) puis de *SOGVILLE* (Bocher et al., 2012), nous avons étudié les limites des standards *SLD* et *SE* d'une part pour élaborer différents types de cartes (des plus simples aux plus complexes) et d'autre part en vue d'éprouver leurs capacités pour échanger. Une synthèse bibliographique des différents types de cartes a été réalisée et utilisée pour faire des cas de tests (Tableau 2). Six applications ont été exploitées pour mettre en œuvre ces cas tests (Tableau 3).

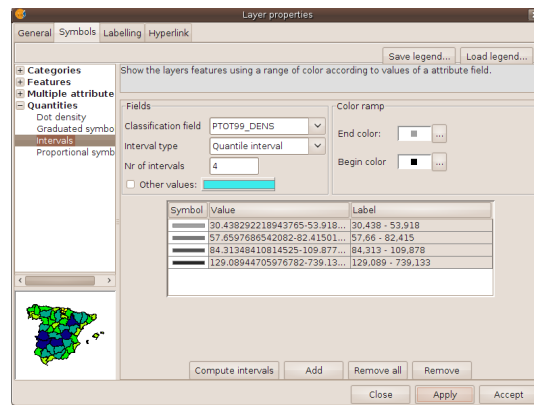
| Type de carte  | Implantation (géométrie supportée)                   | Type de champ sur lequel peut porter l'analyse    | Variable visuelle  | Symbologie   | Méthode  | Paramètre(s) demandé(s) par l'interface pour construire la carte  | Références bibliographiques   |
|--|--|---|--|--|--|---|---|
| Symbole unique   | Point<br>Ligne<br>Surface                            | géométrie   | Couleur / Forme<br>Grain / Orientation   | Symbole simple / Symbole composé                                       |  | Filter<br>Permet de filtrer les données sur lesquelles vont porter l'analyse thématique                                 |   |
| Classification de valeur<br><i>Représentation ponctuelle, linéaire ou surfacique avec des données nominales ou ordinales</i> | Point<br>Ligne<br>Surface                            | numérique ou texte<br><i>Qualitatif</i>           | Forme / Couleur / Grain* / Orientation*<br><i>* possible mais à éviter pour les points</i> | Symbole simple / Symbole composé                                       |  | Champ*<br>Filter<br><i>* Champ dans lequel les données nécessaires à l'analyse thématique sont stockées</i>             | Cartographie thématique vol. 2, Chapitre 2.1.1 (p101)<br>Cartographie thématique vol. 2, Chapitre 2.1.3 (p104)<br>Cartographie thématique vol. 2, Chapitre 2.2.2.1 (p121)<br>Cartographie thématique vol. 2, Chapitre 2.2.2.2 (p123)  |
| Classification d'intervalles<br><i>Carte choroplèthe (pour les surfaces)</i>   | Point<br>Ligne<br>Surface                            | numérique (valeur relative)<br><i>Quantitatif</i> | Valeur / Grain / Taille*<br><i>(* uniquement pour la ligne)</i>                            | Symbole simple / Symbole composé                                       | Equivalence / Moyenne / Ecart type / Jenks / Manuelle          | Champ / Méthode / Nombre de classe / Filtre   | Point : Cartographie thématique vol. 2, Chapitre 2.1.4.2.2 (p115)<br>Représentation ponctuelle de variable quantitative : figures disjointes<br>Ligne : Cartographie thématique vol. 2, Chapitre 2.2.2.3 (p123)<br>Représentation linéaire de variable quantitative<br>Surface : Cartographie thématique vol. 2, Chapitre 2.3.1.1.2 (p144)<br>Carte par report, sans traitement des attributs, avec limites "arbitraires" : cartes choroplèthes |
| Symboles proportionnels  | Point<br>Ligne                                       | numérique (valeur absolue)<br><i>Quantitatif</i>  | Taille   | Symbole simple (ex: cercles) / Symbole composé (ex: cercles affrontés) | Linéaire / Racine carrée / Logarithmique / Exponentielle / ... | Champ / Méthode / Min or Max size / UOM / Filtre  | Point : Cartographie thématique vol. 2, Chapitre 2.1.4.2.2 (p113)<br>Représentation ponctuelle de variable quantitative : figures proportionnelles<br>Ligne : Cartographie thématique vol. 2, Chapitre 2.2.2.3 (p123)<br>Représentation linéaire de variable quantitative   |
| Carte de densité de point ou en semis de points<br><i>Représentation ponctuelle par signes quantitatifs valusés</i>          | Surface  | numérique (valeur absolue)<br><i>Quantitatif</i>  | Grain  | Symbole simple (ex: point)   | Placement régulier / Concentrique / Aléatoire                  | Champ / Valeur* et taille d'1 point (ex : 1 pt = 100 hab -> 5px) / Méthode<br><i>* la valeur pourra être = au max</i>   | Cartographie thématique vol. 2, Chapitre 2.1.4.1 (p106)   |
| Carte en diagrammes à secteurs   | Point<br>Ligne*<br>Surface*<br><i>* centrée, ...</i> | numérique<br><i>Quantitatif</i>                   | Taille   | Diagramme (Pie Chart)  | Proportion   | Pour la taille : cf symbole proportionnel<br>Pour les parts du cercle : Nombre de variable / Champs / Méthode / Filtres | Cartographie thématique et Analyse des Données<br>Les DOCS de Grant n°1 - Philippe Waniez<br>Chapitre 1.6 : Les cartes en diagrammes à secteurs (p34)<br><a href="http://phicarto.free.fr/logiciels/DOCSdeGRANTn1.zip">http://phicarto.free.fr/logiciels/DOCSdeGRANTn1.zip</a> (consulté le 20/07/11)   |

| Autres cartes                              | Description  | Références bibliographiques  |
|--|--|--|
| Carte avec symboles proportionnels colorés | Carte avec symbole proportionnel + coloration du symbole en utilisant une classification de valeur ou bien une classification d'intervalle   | Cartographie thématique et Analyse des Données<br>Les DOCS de Grant n°1 - Philippe Waniez<br>Chapitre 1.3 : Les cartes en cercles proportionnels colorés (p28)<br><a href="http://phicarto.free.fr/logiciels/DOCSdeGRANTn1.zip">http://phicarto.free.fr/logiciels/DOCSdeGRANTn1.zip</a> (consulté le 20/07/11) |
| Carte en semis de points colorés           | Carte en semis de points + coloration du symbole en utilisant une classification de valeur ou bien une classification d'intervalle* ( <i>* non recommandée</i> )   | Cartographie thématique et Analyse des Données<br>Les DOCS de Grant n°1 - Philippe Waniez<br>Chapitre 1.10 : Les cartes en semis de points colorés (p45)<br><a href="http://phicarto.free.fr/logiciels/DOCSdeGRANTn1.zip">http://phicarto.free.fr/logiciels/DOCSdeGRANTn1.zip</a> (consulté le 20/07/11)       |
| Carte en demi-cercles affrontés            | Carte en symboles proportionnels, ou deux symboles (généralement des cercles) sont affrontés (l'un vers la gauche, l'autre vers la droite)   | Cartographie thématique et Analyse des Données<br>Les DOCS de Grant n°1 - Philippe Waniez<br>Chapitre 1.5 : Les cartes en demi-cercles affrontés (p32)<br><a href="http://phicarto.free.fr/logiciels/DOCSdeGRANTn1.zip">http://phicarto.free.fr/logiciels/DOCSdeGRANTn1.zip</a> (consulté le 20/07/11)         |
| Carte de flux                              | La carte de flux fait varier l'épaisseur d'un segment (symbole proportionnel), en se basant sur une matrice point de départ/ point d'arrivée.  | Cartographie thématique vol. 2, Chapitre 2.2.4 (p131)<br>Représentations linéaires à signification volumiques  |
| Carte de flux colorés                      | Carte de flux + coloration des flèches en utilisant une classification de valeur   | idem que pour "flux"   |
| Carte en oursins ou carte de liens         | La carte en oursins relie des points de départ avec des points d'arrivées (sur la base du matrice). Le segment reste généralement le même (symbole unique) mais peut éventuellement changer (classification de valeur) | Cartographie thématique vol. 2, Chapitre 2.2.3.4 (p130)<br>Représentations linéaires à signification surfaciques / Cas particulier : les cartes en oursins   |

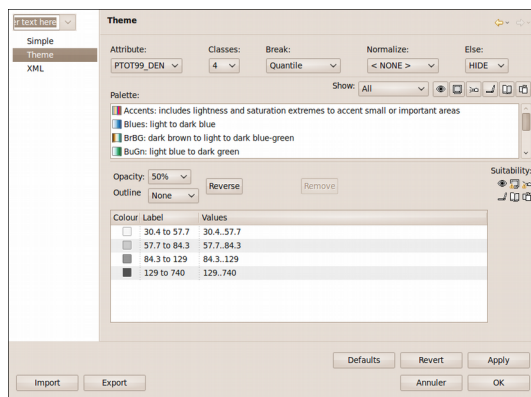
Tableau 2: Les types de cartes expérimentés avec les standards SE et SLD



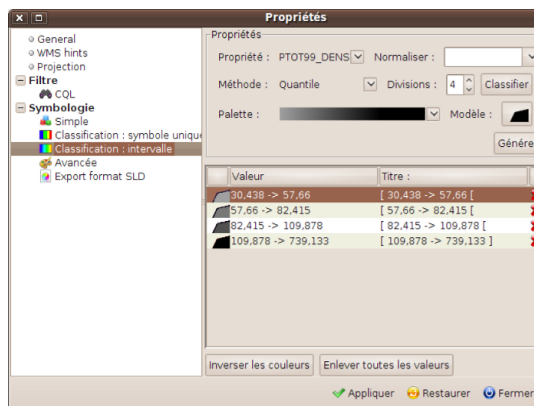
IgeoDesktop (Deegree)



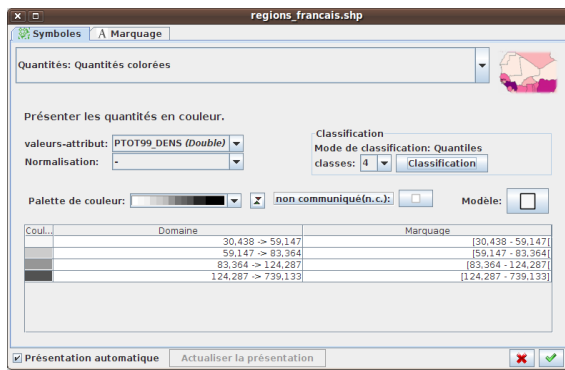
gvSIG



uDig



PuzzleGIS



AtlasStyler



GeoServer

Tableau 3: Extraits d'interface graphique pour les 6 applications testées

Le résultat de ces travaux accompagnés d'un décorticage des schémas des spécifications *SLD* et *SE* montre qu'elles sont inadaptées pour couvrir toute la richesse de la symbolique cartographique.

En effet, il n'est pas possible par exemple de construire un symbole bivarié comme un carré dont la hauteur et la largeur évoluerait en fonction de deux valeurs distinctes (Figure 26). La taille d'un *Graphic* est déterminée uniquement par une seule dimension (voir Tableau 1).

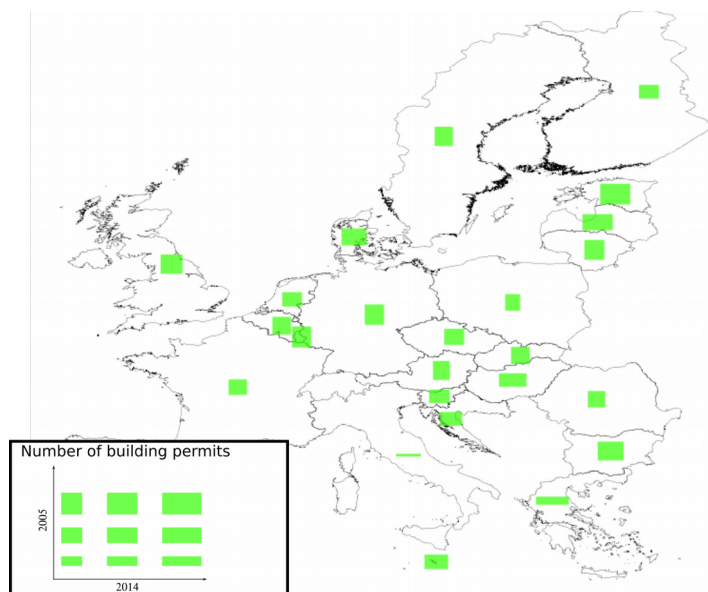


Figure 26: Carte avec un symbole bivarié

Le standard ne dispose d'aucun élément pour piloter des hachures ou des répétitions de motifs sur des surfaces, pour y distribuer des points afin de construire par exemple des cartes de densités.



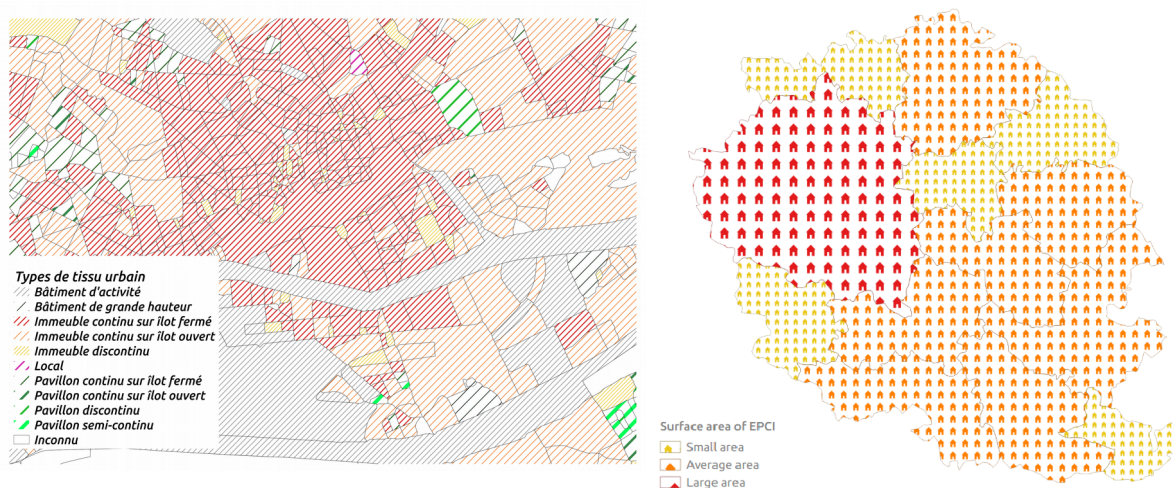


Figure 27: A gauche une carte avec des hachures à droite une carte par densité de motifs

Source : M. Perez, 2018

Il n'est pas non plus possible de construire des cartes avec des diagrammes à secteur ou des histogrammes tout comme des cartes de flux ou en oursins.

La gestion de symboles composés comme la représentation de la limite de restriction pour le mouillage sur les cartes marines qui alterne un trait en forme de T renversé puis une ancre est également impossible (Figure 28).

| Complex Line | Alpha Code   | Complex Line Name   | Method *                       |
|--------------|--------------|---|--------------------------------|
|              | LC(ACHRES51) | boundary of an area where anchoring is prohibited or restricted           | CSP RESARE03                   |
|              | LC(ENTRES51) | boundary of an area where entry is prohibited or restricted               | Earlier versions of CSP RESCSP |
|              | LC(FSHRES51) | boundary of an area where trawling or fishing is prohibited or restricted | CSP RESARE03                   |

Figure 28: Exemple de symboles composites utilisés pour les cartes marines

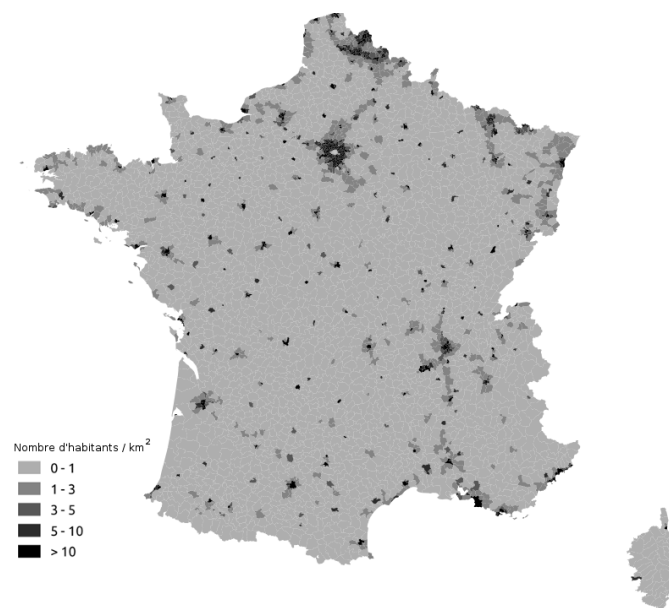
(extrait de DIPWG Chair, 2011)

L'externalisation des éléments de symbologie lors du passage de SLD à SE qui, rappelons-le, est la spécification qui doit être utilisée aujourd'hui par les éditeurs, amène également des interrogations. SE introduit par exemple un nouvel élément, *Categorize*, dont la fonction est de transformer des valeurs continues en valeur distinctes. Selon les auteurs du standard, il est utile à la construction de cartes par aplats. Néanmoins, nous avons critiqué l'ajout de cet élément car (Bocher et al., 2011, 2012; Bocher & Ertz, 2015) :

- il complexifie la modélisation et induit de la redondance puisque les cartes par aplats pouvaient déjà être réalisées par une succession de règles,

- il impose une continuité par juxtaposition des classes/catégories, or une carte par intervalles peut avoir des discontinuités.
- les valeurs des classes minimales et maximales sont toujours bornées aux valeurs minimales et maximales des données d'entrée.
- les intervalles ne peuvent pas être qualifiés par une valeur textuelle (un label) pour leur apporter des informations descriptives. Il s'agit pourtant d'une fonctionnalité indispensable en cartographie pour construire une légende.

In fine, cet élément n'enrichit pas le modèle de symbologie. Au contraire, il complexifie les usages car le client peut construire une carte par intervalles continus soit en utilisant des règles soit avec un *Categorize* augmentant ainsi les risques de non-interopérabilité entre les outils. En effet, l'élément *Categorize* étant défini à un autre niveau de profondeur dans le modèle de données *SE* que la règle, les outils doivent mettre en place des stratégies plus élaborées pour restituer à l'utilisateur des informations identiques (Tableau 4). Une carte par aplats construite à l'aide de l'interface homme-machine d'un outil A peut ainsi produire un fichier *SE* différent de celui produit par un outil B. Dans (Bocher et al., 2011), nous montrons ainsi que les principaux outils open source pour construire des fichiers de symbologies ne sont compatibles qu'avec eux-mêmes !



```
<Rule>
  <Name>Choropleth (PTOT99_DENS)</Name>
  <PolygonSymbolizer
    uom="http://www.opengeospatial.org/se/units/
    http://www.opengeospatial.org/se/units/metre>pixel">
    <Fill>
      <SvgParameter name="fill">
        <Categorize fallbackValue="#FFFF00">
          <LookupValue>
            <PropertyName>PTOT68_DENS</PropertyName>
            </LookupValue>
            <Value>#F7F7F7</Value>
            <Threshold>0</Threshold>
            <Value>#AA0000</Value>
            <Threshold>1</Threshold>
            <Value>#838383</Value>
            <Threshold>3</Threshold>
```

```
<Rule>
  <Name>First interval</Name>
  <Title>[0 - 1[</Title>
  <Filter>
    <And>
      <PropertyIsBetween>
        <PropertyName>PTOT68_DENS</PropertyName>
        <LowerBoundary>
          <Literal>0</Literal>
        </LowerBoundary>
        <UpperBoundary>
          <Literal>1</Literal>
        </UpperBoundary>
      </PropertyIsBetween>
    </And>
  </Filter>
  <PolygonSymbolizer>
```



|   |  |
|---|--|
| <pre> &lt;Value&gt;#575757&lt;/Value&gt; &lt;Threshold&gt;5&lt;/Threshold&gt; &lt;Value&gt;#2b2b2b&lt;/Value&gt; &lt;Threshold&gt;10&lt;/Threshold&gt; &lt;Value&gt;#000000&lt;/Value&gt; &lt;/Categorize&gt; &lt;/SvgParameter&gt; &lt;SvgParameter name="fill-opacity"&gt;1&lt;/SvgParameter&gt; &lt;/Fill&gt; &lt;Stroke&gt; &lt;SvgParameter name="stroke"&gt;#000000&lt;/SvgParameter&gt; &lt;SvgParameter name="stroke-width"&gt;1&lt;/SvgParameter&gt; &lt;/Stroke&gt; &lt;/PolygonSymbolizer&gt; &lt;/Rule&gt; </pre> | <pre> &lt;Fill&gt; &lt;CssParameter name="fill"&gt;#AA0000&lt;/CssParameter&gt; &lt;/Fill&gt; &lt;Stroke/&gt; &lt;/PolygonSymbolizer&gt; &lt;/Rule&gt; &lt;Rule&gt; &lt;Name&gt;Second interval&lt;/Name&gt; &lt;Title&gt;[1- 3]&lt;/Title&gt; &lt;Filter&gt; &lt;And&gt; &lt;PropertyIsBetween&gt; &lt;PropertyName&gt;PTOT68_DENS&lt;/PropertyName&gt; &lt;LowerBoundary&gt; &lt;Literal&gt;1&lt;/Literal&gt; &lt;/LowerBoundary&gt; &lt;UpperBoundary&gt; &lt;Literal&gt;3&lt;/Literal&gt; &lt;/UpperBoundary&gt; &lt;/PropertyIsBetween&gt; &lt;/And&gt; &lt;/Filter&gt; &lt;PolygonSymbolizer&gt; &lt;Fill&gt; &lt;CssParameter name="fill"&gt;#838383&lt;/CssParameter&gt; &lt;/Fill&gt; &lt;Stroke/&gt; &lt;/PolygonSymbolizer&gt; &lt;/Rule&gt; </pre> |
|---|--|

...

Tableau 4: Categorize (à gauche) vs Rule (à droite) pour la construction d'une carte par aplats représentant le nombre d'habitants par km<sup>2</sup> par canton en 1968

Pour combler les carences de la spécification, des améliorations ont été proposées par la communauté scientifique mais également les éditeurs de logiciels. Sae-Tang & Ertz, 2007 suggèrent l'ajout d'un type abstrait de *Symbolizer* qui serait dédié à la cartographie thématique. 4 types de cartes thématiques seraient introduits pour couvrir le domaine : *CategoryThematicSymbolizer*, *SimpleThematicSymbolizer*, *MultiThematicSymbolizer*, *ChartThematicSymbolizer*. Dietze & Zipf, 2007 mettent en avant une approche similaire avec leurs concepts de *DiagramSymbolizer* and *ChoroplethSymbolizer*. Iosifescu-Enescu, Hugentobler & Hurni, 2010 font de même pour permettre au standard de symbologie d'afficher des cartes avec des diagrammes.

Ces approches confortent les observations que nous avons faites sur les limitations du standard et confirment la nécessité de le faire évoluer mais dans un cadre plus général. En effet, ces travaux n'apportent que des réponses partielles pour des questions spécifiques de représentation ou d'usage. Pour Sae-Tang & Ertz, 2007, l'objectif est avant tout de pouvoir disposer d'un modèle de symbologie structuré qui permette de retrouver les grands types de cartes. Pour Iosifescu-Enescu, Hugentobler & Hurni, 2010 il s'agit d'adapter la symbologie pour visualiser des données environnementales. De plus, ces travaux introduisent des modifications sur le schéma de description du document XML du standard, limitant son interopérabilité. Le cas de la communauté qui développe le serveur cartographique *GeoServer* est symptomatique. Les développeurs du projet ont ajouté une balise *VendorOption* dans le fichier XML pour s'affranchir des limites de la spécification et activer à façon des options spécialisées (Aime, 2010). Ces options ne sont bien entendu pas standardisées, le standard n'étant pas adapté pour accueillir de nouvelles extensions.

En conséquence, nous avons proposé au sein de l'*Open Geospatial Consortium* une refonte du standard *Symbology Encoding*. Cette refonte s'appuie sur plusieurs principes fondateurs:

- assimiler le standard à un langage cartographique en abordant sa structuration par les variables visuelles,
- fournir un modèle de symbologie le plus abstrait possible, le plus épuré, indépendant de tout format de données,
- disposer d'un modèle de symbologie extensible pouvant s'adapter aux besoins des différentes communautés actuelles (cartographie en 2D) et à venir (cartographie en 3D, réalité augmentée).
- garantir l'interopérabilité du modèle de symbologie et des extensions en fournissant des définitions claires des éléments mis en œuvre dans le standard (modèles de données en entrée, symboles, unités de mesures utilisées...)

L'objectif final est de faire de la cartographie une priorité pour améliorer la circulation des informations géographiques et l'échange de connaissances au même titre que les standards de données. L'enjeu est que la cartographie ne soit pas considérée comme une préoccupation de seconde zone et que les représentations partagées par les systèmes dépassent les règles cartographiques définies à un niveau élémentaire.

### 4.3.2 Proposition pour une refonte du standard SE

Notre proposition pour une refonte du standard *SE* s'appuie tout d'abord sur une clarification du positionnement du standard dans la chaîne d'élaboration d'une carte. Comme le rappellent (Nicolas & Christine, 2013), l'élaboration d'une carte suit un processus déterminé que l'on peut segmenter en 4 étapes : l'accès au données, la préparation des données, le dessin et la mise en page cartographique (Figure 29).

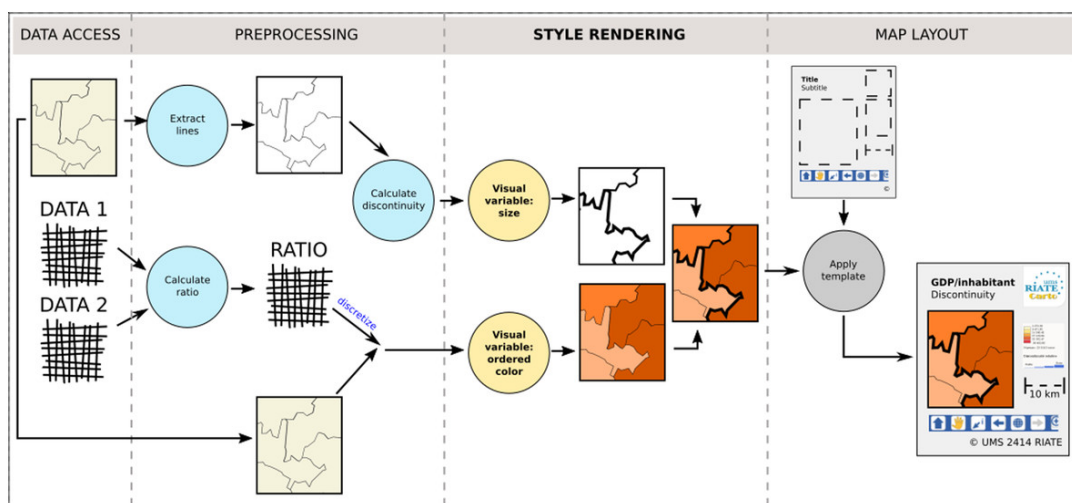


Figure 29: Les étapes de l'élaboration d'une carte inspiré de (Nicolas & Christine, 2013)

Nous situons le standard *SE* dans l'étape « dessin ». Assimilable à un langage, il fournit un ensemble d'éléments (termes) qui permettent de décrire les conditions de visualisation d'une donnée géographique. Ces « conditions » de visualisation sont transmises à un programme informatique pour être interprétées puis dessinées. Ce positionnement permet de préciser que le standard n'a pas pour objectifs de fournir des formalismes pour préparer, traiter les données ni pour construire des documents cartographiques. Ces tâches doivent être reliées à d'autres standards comme par exemple les spécifications *WFS* pour les données géométriques ou *WCPS* pour les données raster (Baumann, 2009; Vretanos, 2014).

La réflexion sur la refonte du standard *SE* a été portée au sein du groupe de travail *Symbology Encoding* que nous avons co-animée à partir de janvier 2010. La première étape du travail a consisté à réaliser une synthèse des limites du standard qui regroupait nos observations (voir ci-dessus), celles de la communauté scientifique ainsi que des propositions de modifications qui avaient été soumises jusqu'en 2011 à l'*OGC* (Cooper, Sykora & Hurni, 2005; Duarte Teixeira, De Melo Cuba & Mizuta Weiss, 2005; Dietze & Zipf, 2007; Sae-Tang & Ertz, 2007; Schnabel & Hurni, 2007; Sykora et al., 2007; Craig, 2009; Ertz & Bocher, 2010; Iosifescu-Enescu, Hugentobler & Hurni, 2010; Bocher et al., 2011; Mays, 2012). Ce document a été présenté aux membres du groupe de travail. Il nous a permis de définir une feuille de route avec une liste de sujets à traiter (Annexe 1). Parallèlement à l'animation du groupe (réunion en présentiel, visioconférence et conférence téléphonique), nous nous sommes réappropriés les travaux de Bertin sur les variables visuels (Bertin & Berg, 2010). L'idée était de repartir des bases théoriques de la graphique des données afin de partager un ensemble de concepts qui définissent la représentation de la carte. Ces concepts sont une sorte de schème d'un langage graphique qui doit éloigner la réflexion sur la refonte du standard de considérations techniques. Il s'agit de fournir un noyau de variables graphiques adaptables à un grand nombre de situations pour satisfaire une demande multi-forme de cartes. Cette approche est d'autant plus nécessaire que les groupes de travail sur les standards sont principalement composés de techniciens de l'informatique. La tentation est souvent forte de se laisser guider par des contraintes imposées par les encodages (format de données) ou les outils qui permettent de les piloter. L'introduction de la fonction *Categorize* dans la spécification *SE* est à ce sujet un exemple intéressant puisque le seul apport identifié est celui d'une contraction de la syntaxe du fichier *XML* qui est moins verbeux (Tableau 4).

Le nouveau standard de symbologie a été organisé selon 2 principes:

- une structure conceptuelle et modulaire avec un noyau principal et des extensions
- une structure indépendante de tout format d'encodage

La structure modulaire est une déconstruction complète de l'organisation du standard *SE* original. Elle repose sur un noyau principal (le *Symbology Conceptual Core Model*, abrégé *SCCM*) qui doit être étendu pour répondre aux différents besoins de visualisation des communautés (Figure 30). Il peut s'agir d'une extension pour définir les variables visuelles pour la représentation de données en 2D ou encore d'une extension pour le domaine de la Réalité Virtuelle.

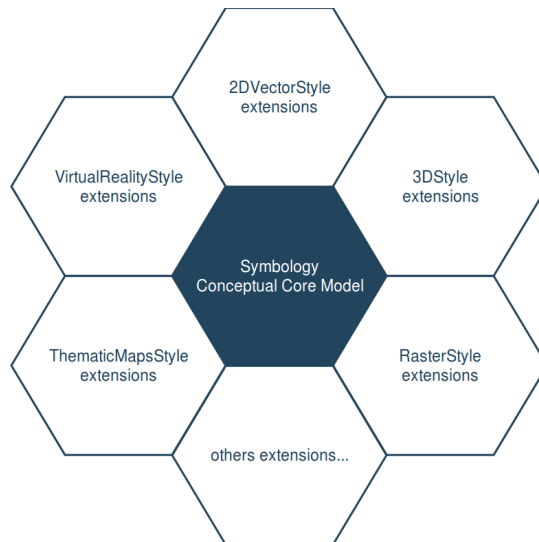


Figure 30: Principe d'organisation du modèle conceptuel de symbologie

Le SCCM est un modèle abstrait organisé autour d'un ensemble minimal d'éléments (Figure 31). Une extension concrétise une implémentation du modèle.

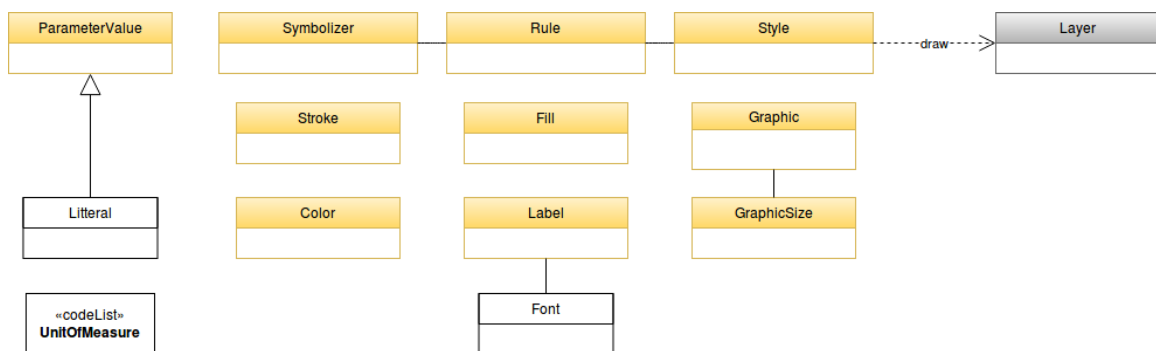


Figure 31: Diagramme UML du noyau du modèle conceptuel de symbologie (Core symbology)

L'élément *Style* est la racine du modèle conceptuel. Il détermine pour un type de modèle de données géographiques d'entrée, les conditions de dessins des règles (*Rule*). L'élément *Layer* encapsule le *Style* ainsi que le modèle de données d'entrée. Cet élément est utilisé par un moteur de rendu pour dessiner les objets. Il ne dépend pas du modèle conceptuel. Il est fourni par d'autres standards de l'OGC comme le WMS.

Le SCCM contient principalement des concepts abstraits (en jaune) qui sont considérés comme des points d'extension, c'est-à-dire que chacun de ces concepts doit fournir une extension concrète pour être utilisés. Trois implémentations concrètes d'éléments sont néanmoins fournies avec le modèle car jugées comme transversales à plusieurs usages. Nous donnons leur définition dans le tableau 5.

| Element       | Definition  |
|---------------|---|
| Litteral      | The Literal class is a concrete implementation of the ParameterValue class. LiteralClass represents a typed atomic literal value as a constant explicitly specified. It was originally defined in the OGC Filter Encoding 2.0 standard section 7.5.1.   |
| UnitOfMeasure | For styling parameters that define sizing and positioning of graphical objects (width, displacement, etc.) the unit of measure needs to be provided for the rendering engine. Therefore, for different levels of elements (eg. Symbolizer, Stroke, Fill, GraphicSize...) the model allows using different uom codes. Consequently, either the unit of measure is determined through the uom code directly associated to each element or it is determined by the innermost parent uom code (e.g., an uom code defined at the Symbolizer level implies that this unit is applied for all sizing and positioning values inside the Symbolizer).<br>Below is the list of allowed units of measure as per UCUM (except for pixel):<br>- portrayal units: pixel, millimeter, inch, percentage<br>- ground units: meter, foot<br>The portrayal unit "pixel" is the default unit of measure. If available, the pixel size depends on the viewer client resolution, otherwise it is equal to 0.28mm * 0.28mm (~ 90 DPI). |
| Font          | The FontClass describes the font properties to apply for the rendering of a text string. It refers to the W3C CSS Fonts chapter.  |

Tableau 5: Définition des éléments concrets du SCCM

Le lecteur pourra se référer au document *OGC Symbology Conceptual Model: Core part*<sup>75</sup> pour avoir une description détaillée des éléments du SCCM.

Pour donner corps au SCCM et valider sa robustesse, deux extensions ont été modélisées : l'une pour les données géométriques 2D et l'autre pour les images raster. Nous présentons la première car il s'agit du modèle de données le plus utilisé dans les SIG pour faire de la cartographie (aplats, symboles affrontés, topographie...). La figure 32 montre le diagramme UML de ces extensions.

L'extension pour la représentation des données géométriques 2D correspond essentiellement au modèle de données défini par (Herring, 2006a) . Il s'agit d'une structure où les données sont organisées en lignes et colonnes. Chaque ligne contient des valeurs alphanumériques ainsi que des géométries (voir section 4.2.1.2). Notons, que dans ce modèle de données contrairement à *GeoPackage* (Yutzler, 2017) il peut co-exister plusieurs colonnes avec des géométries.

Le nœud racine du modèle d'extension est *FeatureTypeStyle*. Il étend le concept *Style*. *FeatureTypeStyle* apporte 4 spécialisations de l'élément *Symbolizer* qui sont adaptées au type de géométrie représentée : *AreaSymbolizer* pour des surfaces, *LineSymbolizer* pour des lignes, *PointSymbolizer* pour des points et *TextSymbolizer* pour le cas particulier du placement des labels sur une carte. Les *Symbolizers* implémentent également des concepts spécifiques qui permettent de piloter les variables de visualisation. La classe *SolidFill* étend ainsi *Fill* avec l'opacité et la couleur. *Color* est lui implémenté via la classe concrète *RGBColor* qui permet de définir la couleur à partir des 3 paramètres R, G, B. La classe *SolidFill* est définie une seule fois dans le modèle et réutilisée pour colorier par exemple le contour d'une ligne (*PenStroke*) ou un objet graphique tel qu'un cercle (*MarkGraphic*).

Cette extension introduit également des mécanismes :

- pour référencer le nom de la colonne du modèle de données d'entrée au niveau de n'importe quel paramètre du *Symbolizer*. Il est possible par exemple de faire varier la taille d'un symbole selon les valeurs contenues dans une colonne. Cette extension *ValueReference* peut également être utile pour démixer un modèle de données comportant plusieurs colonnes géométries.

<sup>75</sup> [https://portal.opengeospatial.org/files/?artifact\\_id=80686&version=1](https://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=80686&version=1) consulté en octobre 2018

- pour définir des fonctions sur les données d'entrée. Il s'agit ici via l'élément *Function* d'intégrer dans la syntaxe une grammaire pour exprimer des opérations sur les données. Par exemple, ne sélectionner que le centre de gravité d'une géométrie surfacique pour y placer une étiquette. La description des fonctions réutilise la spécification *Filter Encoding 2.0* (Vretanos, 2010). Cette spécification est également utilisée pour ajouter des filtres temporels et spatiaux au niveau des règles. Il est par exemple possible de conditionner avec une règle l'affichage des géométries d'un jeu de données contenant des parcelles si celles-ci sont supérieures à une certaine superficie.

Il est important de préciser qu'à ce stade *FeatureTypeStyle* ne dépend d'aucun format de données. Cette approche a pour objectif de garantir la neutralité de l'extension et de ne pas la contraindre à une technologie spécifique, comme c'est le cas pour la grande majorité des standards à l'OGC qui sont liés au *XML*. Le standard doit en effet pouvoir s'adapter à l'évolution des supports de stockage et d'échange des données et ainsi, par exemple, être disponible en *JSON*, en *CSS* ou encore intégré dans le modèle de données *GeoPackage*.

Pour ce qui nous concerne nous avons opté pour une transposition en *XML*, mise en œuvre dans *OrbisGIS*.

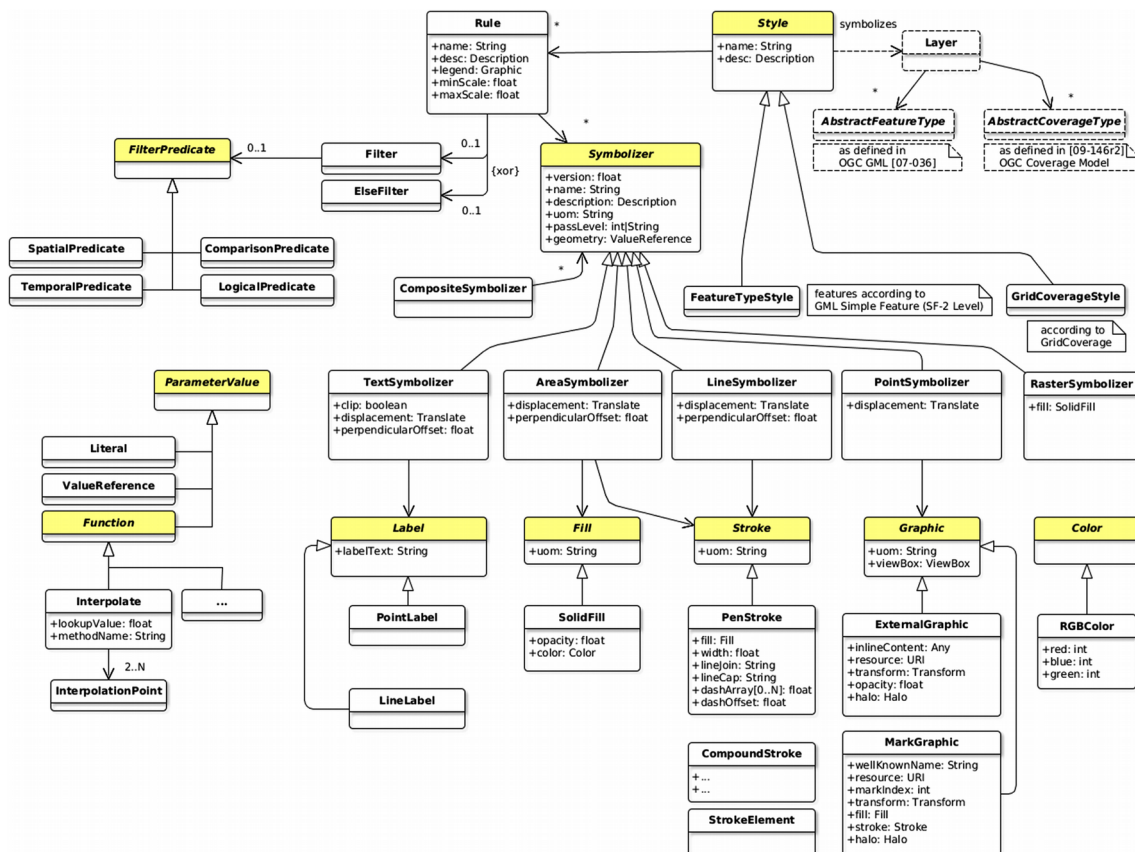


Figure 32: Application du concept d'extension pour les modèles de données SimpleFeature et GridCoverage

### 4.3.3 Expérimentation dans la plate-forme *OrbisGIS*

Nous avons utilisé la plate-forme *OrbisGIS* comme implémentation de référence de l'extension *FeatureTypeStyle*. L'implémentation a été découpée en 3 étapes.

- 1) Transposition du modèle *FeatureTypeStyle* dans le langage de description *XSD*<sup>76</sup> puis transformation du *XSD* en un modèle de données objets *JAVA*.
- 2) Développement d'un nouveau module de rendu pour *OrbisGIS*.
- 3) Développement d'interfaces graphiques pour créer, modifier un style.

Le moteur de rendu permet de visualiser des données contenues dans une base de données spatiales relationnelle en leur appliquant un style. Son fonctionnement est organisé en 5 séquences (Figure 33).

- 1) Le moteur est sollicité pour dessiner une carte qui contient au moins une *Layer* (*draw*)
- 2) Il récupère le style qui contient les instructions de symbologie (*get style*)
- 3) Le style, stocké dans un fichier *xml* est analysé et les informations présentes sont exploitées pour alimenter l'implémentation de l'API *Java* décrivant le style (*read encoding*, *create rule(s)*, *create symbol(s)*)
- 4) Le moteur de rendu déclenche le parcours du modèle d'objets *Java* contenant le style règle par règle. Pour chaque règle et selon les filtres et fonctions spécifiés, les données sont préparées puis envoyées au(x) *Symboliser(s)*. Les *Symboliser(s)* sont dessinés en fonction de leurs propriétés (*draw style*, *draw style*, *prepare filter*, *read features*, *draw symbol(s)*)
- 5) Le moteur de rendu assemble l'ensemble des éléments graphiques dessinés dans une image qui est visualisée dans la fenêtre de navigation cartographique d'*OrbisGIS* (*graphics elements*, *map image*)

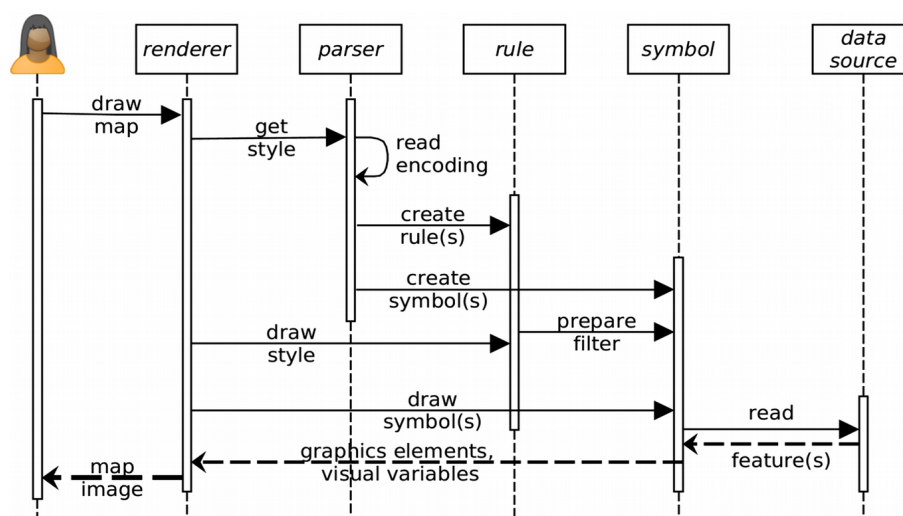


Figure 33: Diagramme de séquence du moteur de rendu d'OrbisGIS

<sup>76</sup> <https://github.com/orbisgis/ogc-custom-jaxb/tree/master/ogc-custom-model/src/main/resources/se/2.0> consulté en octobre 2018



Afin de faciliter la création des fichiers de style et de tester la complétude du standard pour la cartographie, deux interfaces graphiques ont été développées. L'une propose une liste de cartes thématiques prédéfinies, l'autre est un éditeur de style avancé qui permet de naviguer à tous les niveaux du modèle de données (Figure 34).

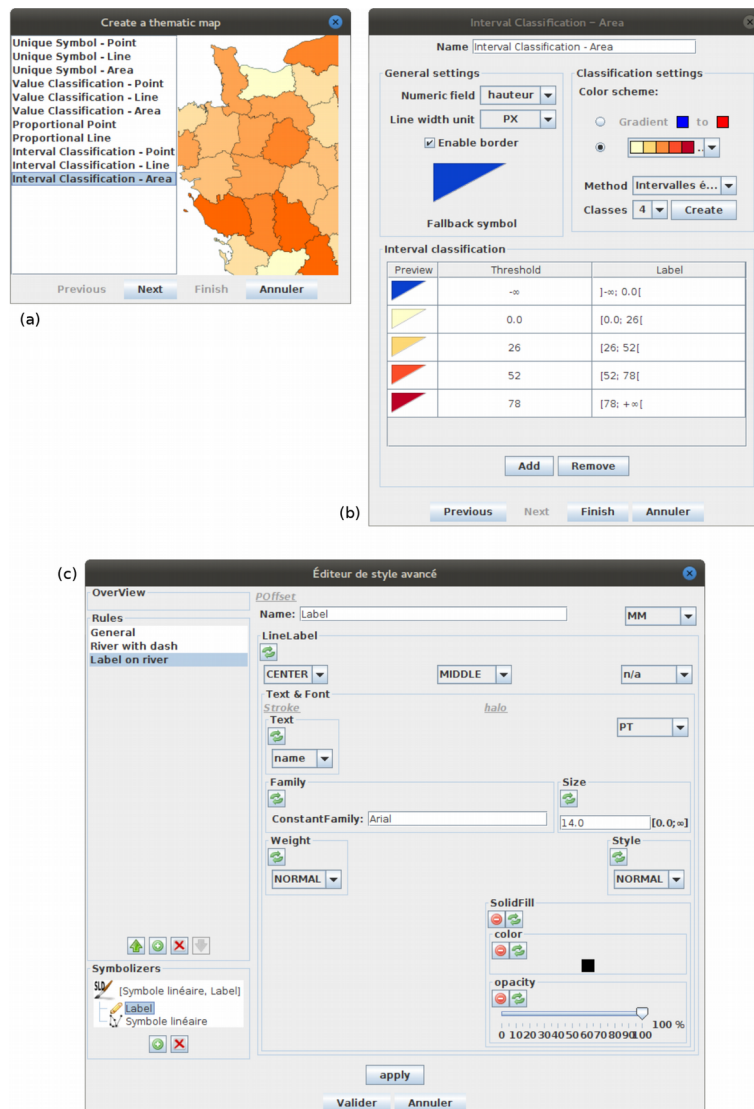


Figure 34: (a) et (b) interfaces graphiques thématiques, (c) éditeur de style avancé

La construction de différents styles dans *OrbisGIS* a montré que cette proposition de standard permettait de couvrir l'ensemble des limites qui avaient été identifiées et bien au-delà. Les figures qui suivent sont des exemples tirés de la batterie de tests que nous avons réalisés. Pour chaque exemple, un pseudo-modèle est fourni pour comprendre les éléments de style mobilisés.

La figure 35 représente une carte par symboles affrontés. Elle met en perspective des valeurs qui sont affichées avec des demi-cercles proportionnels. L'interpolation est spécifiée avec une fonction qui fait évoluer la hauteur du rectangle englobant le symbole. Une rotation est réalisée pour permettre de mettre en vis-à-vis les deux demi-cercles.



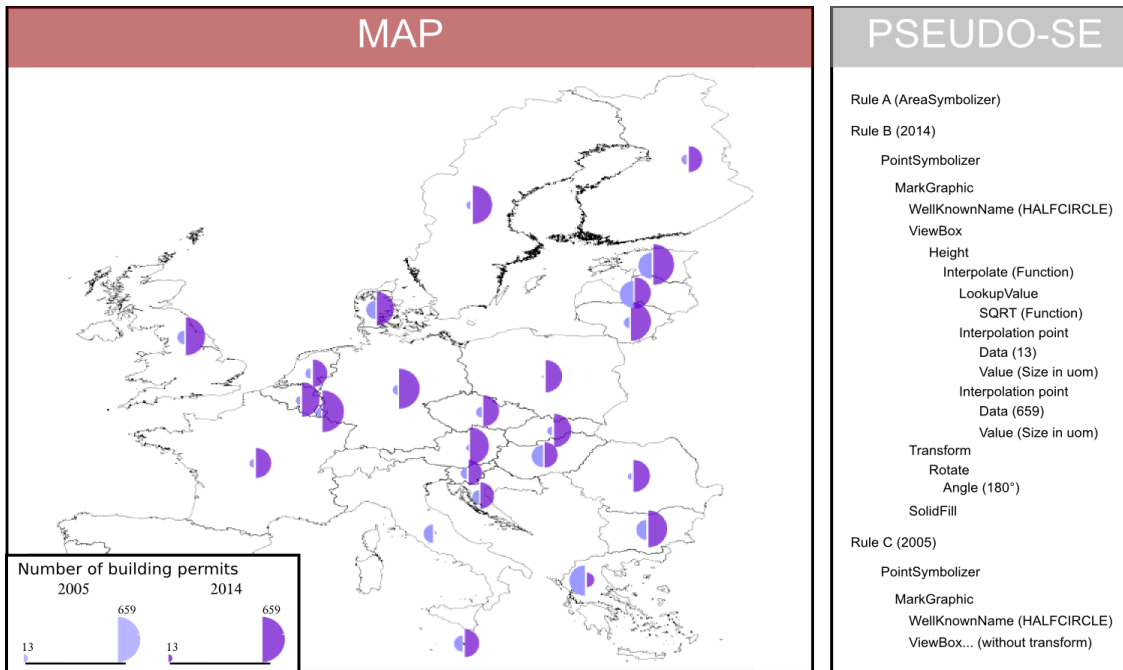


Figure 35: Carte par symboles proportionnels affrontés

La figure 36 est une carte par symbole bivarié. Elle consiste à faire évoluer les deux dimensions (hauteur et largeur) de l'élément graphique dessiné, un carré, en y appliquant une interpolation linéaire.

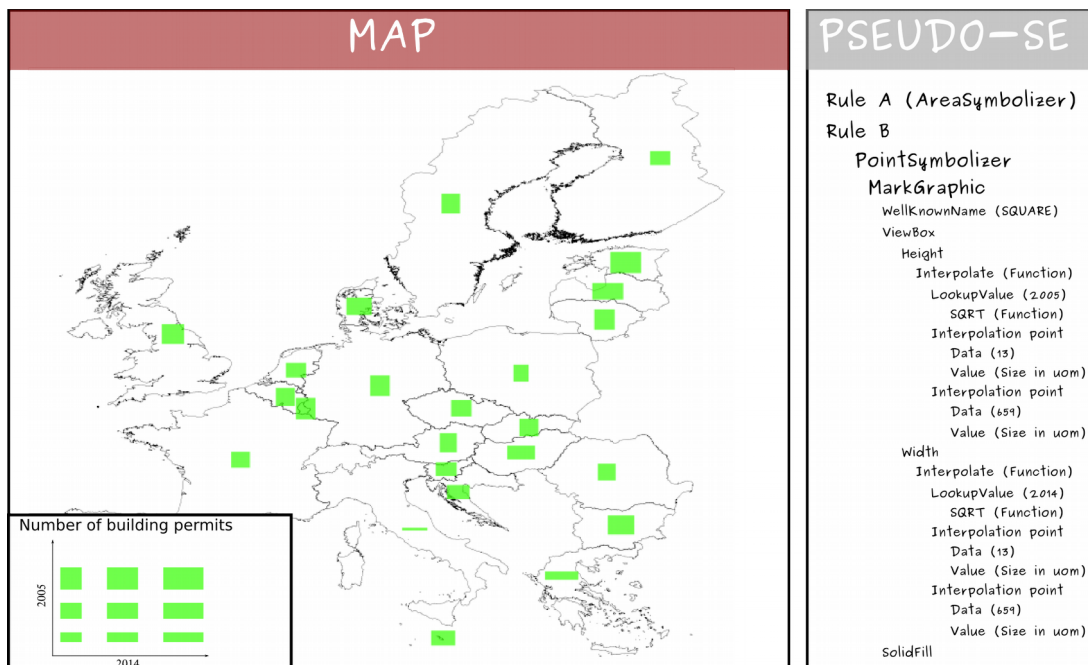


Figure 36: Carte par symbole bivarié

La figure 37 consiste à exploiter une extension de l'élément *Fill* introduit dans le modèle pour spécifier pour une surface un nombre d'éléments graphiques à dessiner. Cette extension permet de construire des cartes par densités de points mais peut aussi être utilisée pour construire des cartes plus complexes en exploitant les capacités de l'élément *MarkGraphic*. Il est possible par exemple de faire évoluer séparément la densité de points ainsi que leur taille.

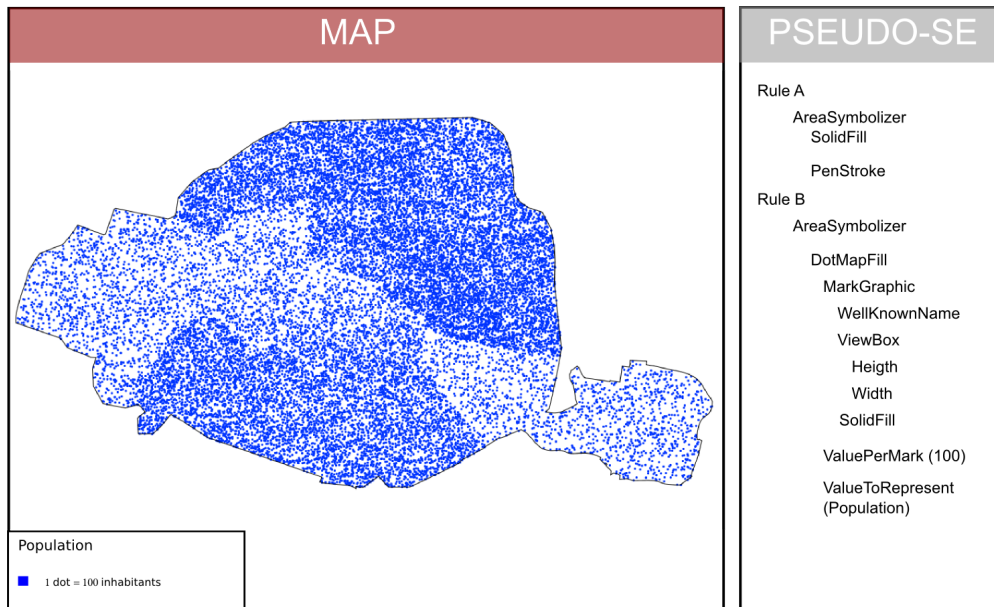


Figure 37: Carte par densité de points

La figure 38 repose sur la même logique que la carte précédente. Elle offre à travers deux nouvelles extensions la possibilité de contrôler le remplissage d'une surface avec des hachures (*HatchedFill*) ou des motifs (*GraphicFill*).

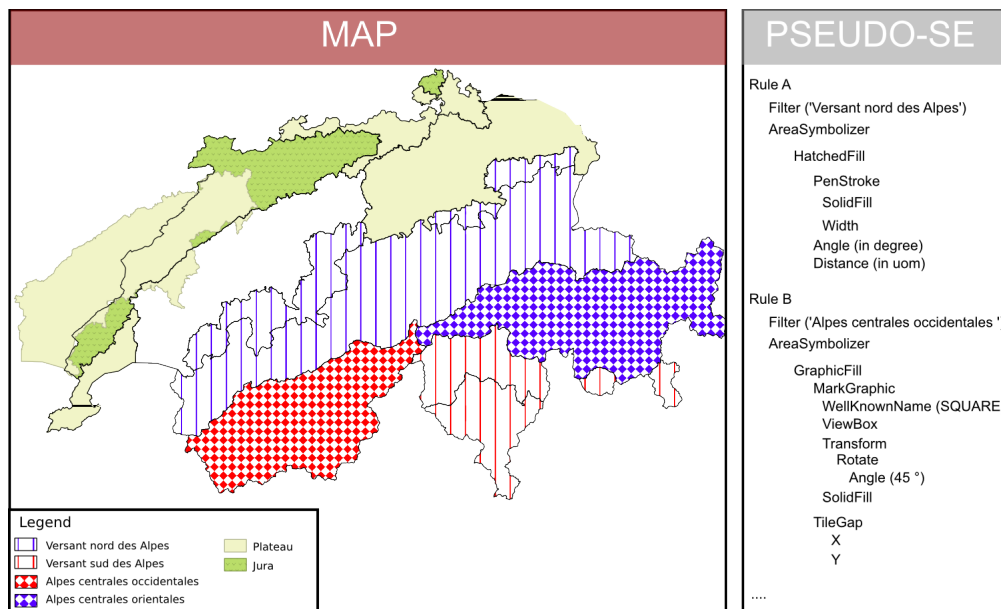


Figure 38: Carte avec des hachures

La dernière figure 39 illustre toute la puissance et la permissivité du nouveau modèle de symbologie qui permet de contrôler tous les éléments graphiques offrant ainsi des capacités de composition cartographique infinies. Elle représente une carte par interpolation de couleurs. Cette carte est construite en appliquant une fonction d'interpolation identique sur les 3 valeurs entières qui décrivent la couleur de remplissage d'une surface.

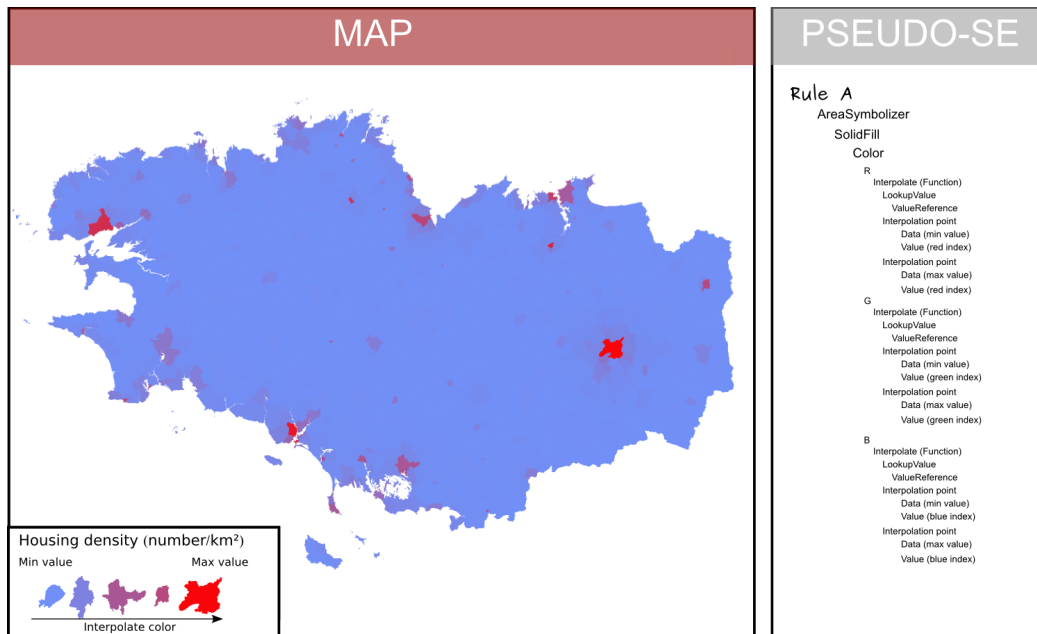


Figure 39: Carte par interpolation de couleurs

#### 4.3.4 Bilan

La carte est devenue un support incontournable dans notre société : Elle sert à représenter les prévisions météorologiques, les résultats des élections ou à se localiser sur un territoire... L'informatisation de la cartographie a grandement facilité cette prolifération. La mise à disposition croissante de données géographiques et le développement de nouveaux logiciels ergonomiques, faciles d'emploi, ont fourni le terreau d'une révolution de l'expression cartographique. Le territoire se représente aujourd'hui en 2 ou 3 dimensions. La carte peut être dynamique, accessible sur Internet, construite en quelques clics à l'aide de *Mashups*. La cartographie n'est plus seulement une affaire de spécialistes ! et, indéniablement, le potentiel d'utilisateurs de contenus cartographiques, tant producteurs que consommateurs, ne cesse de croître.

Depuis les années 2000, les systèmes d'information géographique, dispositif longtemps centraux pour faire des cartes, ont évolué vers des systèmes distribués, accessibles en ligne et de nombreux développements méthodologiques et techniques ont émergé autour du domaine des Infrastructures de Données Spatiales facilitant le recueil, le partage, la manipulation des données dans un contexte d'interopérabilité. La cartographie a cependant été peu considérée au cours de cette transformation. Les standards de symbologie qui ont émergé avec les flux de données comme le WMS ont été construits sur des bases théoriques minimalistes pour satisfaire un minimum de représentations. Ces standards ne permettent pas d'exploiter toute la richesse du langage graphique au grand dam de Bertin. En ce sens, ils limitent la portée du message cartographique. Ils sont également des freins à

l'échange de savoir puisque le concepteur ne peut mettre en scène graphiquement qu'un nombre restreint de concepts, ce qui conduit à biaiser sa vision, représentation.

Ces constats plaident pour une refonte du standard de cartographie. Un standard permissif, neutre, évolutif qui doit permettre à différentes communautés d'y puiser le matériau nécessaire à la satisfaction de leurs besoins. Ce travail impose de maîtriser l'ensemble des concepts du langage cartographique et de trouver les moyens pour l'exprimer indépendamment des technologies. La représentation cartographie ne doit pas être l'exclusivité d'un logiciel car le risque est grand sinon de cloisonner l'échange de connaissances. La carte sublime la donnée géographique. L'exercice cognitif qui a conduit le concepteur à assembler des variables visuelles doit pouvoir être échanger, partager, modifier et servir ainsi le débat.

C'est dans cet esprit que nous avons abordé la refonte du standard international *Symbology Encoding* (Bocher & Ertz, 2018), un standard de symbologie organisé autour de 2 principes:

- une structure conceptuelle et modulaire avec un noyau principal et des extensions.
- une structure indépendante de tous formats d'encodage.

Ce standard s'inscrit dans la lignée des recherches réalisées en infographie qui ont posé les bases des standards de visualisation par ordinateur, indépendants du matériel et du logiciel. Nous proposons un ensemble de concepts graphiques de haut niveau, abstraits, dont les implémentations s'adaptent aux modèles de données d'entrée qu'ils doivent représenter (2D ou 3D). Comme le rappellent Yutzler et Cass<sup>77</sup>, ce standard constitue le socle pour formaliser au sein de l'OGC des représentations interopérables en adéquation avec les besoins des utilisateurs (symboles simples et complexes) et capables de couvrir plusieurs domaines d'applications (défense, météorologie, gestion des risques, planification urbaine...).

---

<sup>77</sup> <http://docs.opengeospatial.org/per/17-094r1.html> consulté en décembre 2018

## 4.4 Des écosystèmes ouverts pour et par la recherche

Dans cette partie, nous présentons deux cas d'applications qui mettent en œuvre les concepts, les méthodes et les outils exposés précédemment dans une logique de système d'information interopérable et co-construit. Le premier traite de l'apport des SIG pour l'étude du climat urbain et le second de la problématique de l'évaluation du bruit dans l'environnement.

### 4.4.1 L'apport des SIG à l'étude du climat urbain

#### 4.4.1.1 Introduction

Avec les lois Grenelle 1 et 2, adoptées respectivement en 2009 et 2010, la France s'est engagée dans une politique volontariste et globale visant à réduire l'impact de ses activités anthropiques en posant une série de mesures touchant les secteurs de l'énergie et du bâtiment, des transports, de la biodiversité et des milieux naturels, de la gouvernance et enfin des risques pour l'environnement et la santé. Ces lois tracent les contours d'un nouveau modèle de croissance économe en énergie comme en rejets de CO<sub>2</sub> avec pour objectif une division par quatre de ses émissions de gaz à effet de serre (GES) en 2050 par rapport à ses émissions de 1990. Elles fournissent un cadre opportun pour l'intégration des problématiques énergétiques et climatiques dans les politiques publiques territoriales. Pour le gestionnaire et l'aménageur, elles nécessitent :

- de définir des orientations stratégiques en prenant en compte la transversalité entre les politiques d'urbanisme, d'habitat, de logement, de transport et d'environnement.
- de concevoir des documents de planification intégrant des actions concrètes en faveur de l'environnement.
- de mettre en œuvre des opérations d'aménagement.
- d'avoir un pilotage global et intégré qui associe l'ensemble des acteurs du territoire.

De nombreux projets de recherche se sont penchés sur le développement d'outils d'aide à la décision à destination des collectivités pour la prise en compte des thématiques énergie et climat dans les pratiques de l'urbanisme. Beaucoup de ces projets tirent profit des données géographiques et des outils SIG pour analyser les besoins et ressources énergétiques d'un territoire à différentes échelles : le quartier, la commune. On peut citer notamment le projet SUSTAINS<sup>78</sup> sur un quartier de Marne La Vallée, ou le projet PlanETer<sup>79</sup> sur des communes du Valais en Suisse. Outre un diagnostic énergétique très poussé et à très haute résolution sur les territoires d'étude, ces outils proposent des solutions d'aménagement comme par exemple : mettre en œuvre un réseau de chaleur avec l'installation d'une centrale à bois ou encore optimiser l'agencement des bâtiments afin d'améliorer la consommation ou la

---

78 <http://www.cma.mines-paristech.fr/fr/site-page/projet-sustains> consulté en octobre 2018

79 <https://www.crem.ch/planeter> consulté en octobre 2018

production d'énergie renouvelable dans un quartier. A l'échelle de la Communauté d'agglomération de Grenoble, le projet AETIC (Approche Economique Territoriale Intégrée pour le Climat) propose une méthodologie permettant d'identifier et de hiérarchiser les actions à mettre en œuvre dans un PCET (Plan Climat-Energie Territorial) en se basant sur des critères technico-économiques (Criqui et al., 2013). La méthodologie a abouti au développement d'outils pour évaluer l'impact économique des principales mesures à déployer dans un plan climat (approche en coût marginal par paquet de mesures). L'usage de ces outils reste cependant limité pour une collectivité car leur mise en œuvre nécessite de fortes compétences techniques et les études sont contraintes par les données d'entrée qui sont souvent acquises pour les besoins du projet. L'absence d'approche générique pour la spécification des données d'entrée et la documentation des calculs réalisés rend difficile la transposition sur d'autres territoires. A cela s'ajoute une grande disparité dans les logiciels qui ne communiquent avec aucun standard et imposent une « gymnastique » technique pour l'utilisateur qui doit convertir ses données dans les formats attendus par ces outils.

Face à ce constat, nous avons contribué dans le cadre du projet ANR MApUCE (Modélisation Appliquée et droit de l'Urbanisme : Climat urbain et Énergie) à la construction d'une plate-forme SIG générique, interopérable et accessible pour de multiples acteurs (Figure 40). Cette plate-forme a pour objectif de permettre le pilotage d'une chaîne complète de manipulation d'informations géographiques et socio-économiques pour évaluer la consommation d'énergie liée aux bâtiments résidentiels et tertiaires, afin de fournir des informations quantifiées aux acteurs urbains. Cette chaîne intègre :

- l'acquisition et la modélisation des données pour construire une base de données commune ;
- des analyses spatiales pour construire de nouvelles unités géographiques d'étude et des indicateurs géographiques ;
- de la cartographie afin de restituer les résultats et les discuter spatialement;
- des méthodes de partage des données en vue de leur réutilisation dans les modèles de micro-climatologie.

L'enjeu de ce travail est double :

- produire des indicateurs urbains, de façon générique et automatique, à partir de la collecte de données unifiées sur l'ensemble de la France. Ces indicateurs urbains, calculés à des échelles fines comme celles du bâtiment ou du bloc de bâtiments, doivent permettre d'alimenter le modèle de climat urbain *TEB* (Masson, 2000) et ainsi d'affiner les résultats de simulation énergétique : confort thermique, stress thermique, îlots de chaleur urbain...
- construire une «connaissance partagée» pour pouvoir rassembler les acteurs du changement climatique autour de diagnostics communs, préalable indispensable à la définition d'une stratégie et à la mise en œuvre d'actions par les acteurs locaux. En effet, les enjeux énergétiques paraissent encore trop souvent sous forme de chiffres abstraits. Il faut s'atteler à les faire «atterrir sur les territoires». Pour cela il faut pouvoir organiser et partager les données, les cartographier et les croiser avec d'autres problématiques sociales, environnementales ou urbaines.

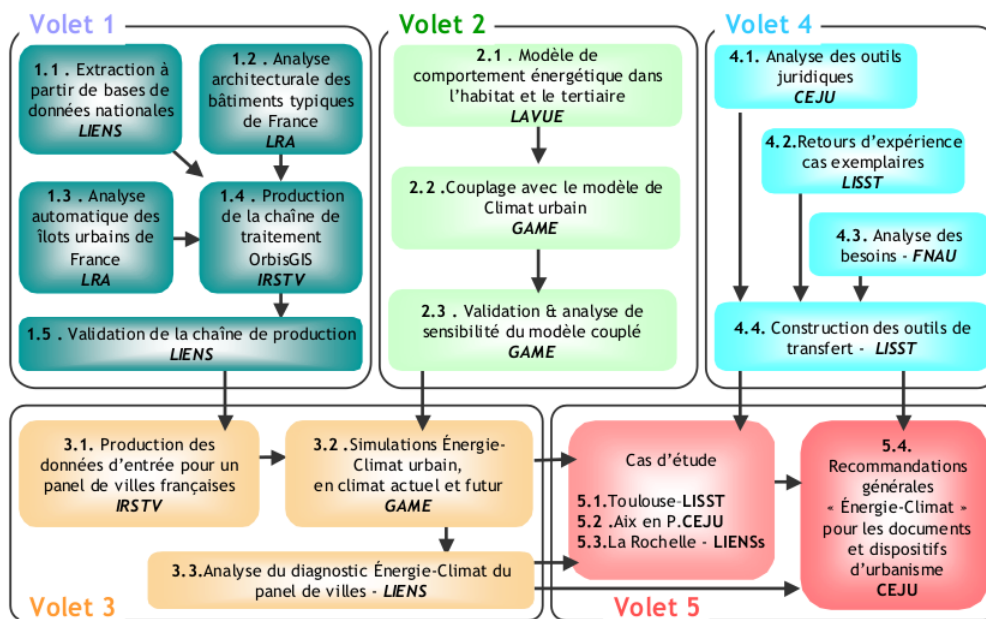


Figure 40: Synoptique du projet MApUCE

Parce que l'un des objectifs est que l'ensemble de la chaîne de traitements soit reproductible aisément avec un minimum d'exigence logicielle, nous avons développé une plate-forme SIG ouverte basée sur des logiciels libres, conforme aux normes de l'*Open Geospatial Consortium* et prête à accueillir des données ouvertes (Bocher et al., 2018).

#### 4.4.1.2 Données et échelles d'analyses

La donnée est le maillon essentiel de la chaîne de traitements de MApUCE. Pour des questions de continuité territoriale et de cohérence topologique, 4 référentiels institutionnels ont été retenus :

- la BD Topo de l'IGN ;
- la BD parcellaire de l'IGN ;
- les contours IRIS de l'IGN;
- les données carroyées de l'INSEE ;
- la base de données du recensement général de la population (RGP) au ménage de l'INSEE .

Ces référentiels ont été acquis sur l'ensemble de la France pour l'année 2014. Lorsque les données n'étaient pas disponibles nous avons utilisé l'année la plus proche. C'est le cas du RGP où nous disposons des données de 2011 et des données carroyées qui couvrent l'année 2010. L'ensemble des données ont été intégrées dans une base de données spatiale relationnelle. A l'aide de scripts SQL, leur qualité a été contrôlée pour éviter des redondances d'objets, des incohérences géométriques qui peuvent perturber les résultats des simulations.



Les données nettoyées ont été exploitées pour construire une nouvelle unité géographique que nous avons nommée USR pour Unité Spatiale de Référence. L'USR est une surface qui correspond à l'agrégation géométrique de parcelles qui se touchent plus les demi-portions de surfaces non cadastrées qui bordent cette nouvelle zone. La figure 41 illustre les étapes de génération des USR réalisée par Plumejeaud-Perreau et al., 2015. Elle repose sur une triangulation de Delaunay.

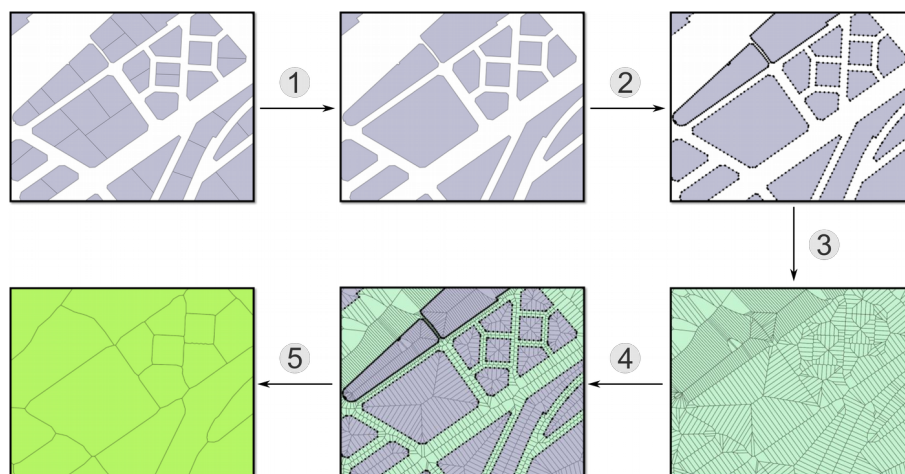


Figure 41: Etapes de création des unités spatiales de références

Les USR ont été calculées sur 81 unités urbaines (au sens de la définition de l'INSEE) réparties sur l'ensemble de l'hexagone. Ces unités urbaines ont été sélectionnées pour leurs caractéristiques géographiques, climatiques et socio-économiques (type de climat, superficie du territoire, formes urbaines, topographie...).

Ces USR ont ensuite été enrichies par des informations socio-économiques (nombre d'habitants, nombre de ménages, caractéristiques des ménages) et topographiques provenant des données IRIS INSEE et de la BD Topo (Plumejeaud-Perreau, 2016). Le tableau 6 liste ces nouvelles informations. Elles sont stockées dans une table unique.

| Variable        | Description   | Method  |
|-----------------|---|---|
| pk_rsu          | RSU unique identifier                                   | Incremental value (Primary Key)   |
| the_geom        | RSU's geometry  | Geometry of the RSU   |
| veget_surface   | Total vegetation surface                                | Area of vegetation intersecting the RSU   |
| road_surface    | Total road surface                                      | Area of roads intersecting the RSU. This area is determined thanks to a "width" attribute included in the "road" layer. Spatial processes, using buffer and intersection are done to compute this area. |
| road_length     | Total road length                                       | Length of roads intersecting the RSU  |
| sidewalk_length | Total length of sidewalk                                | Perimeter of the geometry resulting from the union of contiguous parcels  |
| hydro_surface   | Total hydrographic surface                              | Area of hydrological objects (based on <i>RESERVOIR_EAU</i> and <i>SURFACE_EAU</i> layers from BD Topo) intersecting the RSU  |
| hydro_length    | Total hydrographic length                               | Length of hydrological objects (based on <i>TRONCONCOURS_EAU</i> layer from BD Topo) intersecting the RSU   |
| insee_inhabit   | Number of inhabitants                                   | <sup>a</sup>  |
| insee_hh        | Number of household                                     | Number of households having a principal residence. <sup>a</sup>   |
| insee_hh_coll   | Number of households in collective dwellings            | Number of households living in collective housing. <sup>a</sup>   |
| insee_men_surf  | Cumulative Surfaces of Main Residences in square meters | Cumulated area of housings for households having a principal residence computed in square meter. <sup>a</sup>   |
| insee_surf_col  | Estimation of the area of collective housing            | Estimation of collective housing from INSEE indicators. <sup>a</sup>  |
| insee_code      | French municipality unique identifier                   | Transferring the municipality identifier from the municipality layer to the RSU geometry using a spatial join.  |

Tableau 6: Liste des informations contenues dans la table des USR (RSU en anglais)

Au total ce sont 454 309 USR qui sont contenues dans la base de données finale qui comprend également l'ensemble des référentiels institutionnels. Ces USR représentent 2 238 communes.



### 4.4.1.3 Définition des indicateurs morphologiques

Pour comprendre le climat urbain et évaluer les effets des aménagements humains, les modèles climatiques nécessitent des indicateurs pour décrire le tissu urbain. De nombreux travaux ont montré que les formes urbaines et leur organisation altèrent le micro-climat exacerbant, les phénomènes locaux de réchauffement comme la formation d'îlots de chaleur qui ont pour conséquence d'augmenter les consommations d'énergie via l'usage de climatisation (Oke, 1981, 1988; Givoni, 1989; Ratti, Baker & Steemers, 2005; Santamouris et al., 2017). Le projet de recherche MUSCADE (Modélisation Urbaine et Stratégie d'adaptation au Changement climatique pour Anticiper la Demande et la production Énergétique) conclut ainsi que l'îlot de chaleur est plus intense en hiver pour une ville étendue que pour une ville compacte, a contrario, en été, l'îlot de chaleur est accentué dans la ville compacte. Dans ces villes, les habitants étant plus concentrés, les conditions de stress thermique augmentent et donc les impacts potentiels sur la santé (CNRM, 2014).

Les études sur la morphologie de la ville sont nombreuses et ont conduit à la définition d'une multitude d'indicateurs. Ces indicateurs s'intéressent à la géométrie urbaine à différentes échelles (bâtiment, quartier, ville) et mettent en lumière les disparités existantes sur un territoire (espace bâti continu, fragmentation naturelle...). Ces indicateurs ne cessent de se multiplier et se superposent les uns aux autres d'une échelle à l'autre, sans forcément s'emboîter puisque leurs auteurs (et leurs priorités respectives) diffèrent. On voit ainsi apparaître parfois dans la littérature des indicateurs avec plusieurs définitions ! Ce tableau se complexifie lorsque l'on se préoccupe des outils car les algorithmes sont rarement disponibles et l'extrême variété des logiciels (langages, architectures) utilisés rend difficile une réutilisation. Ainsi comme le signale (Böhringer & Jochem, 2007), comparer la valeur ajoutée ou l'intérêt de tel ou tel indicateur peut s'avérer délicat.

En conséquence, en concertation avec les climatologues et les architectes du projet MapUCE, nous avons identifié une liste d'indicateurs pertinents pour lesquels nous avons réalisé une étude bibliographique détaillée. Cette étude avait pour objectif de fournir, pour chaque indicateur, une documentation rigoureuse des données d'entrée, des sorties attendues ainsi que de la méthode de calcul.

Trois échelles géographiques ont été retenues pour calculer ces indicateurs (Figure 42).

- le bâtiment
- le bloc de bâtiments (ensemble de bâtiments qui se touchent)
- l'unité spatiale de référence (RSU)

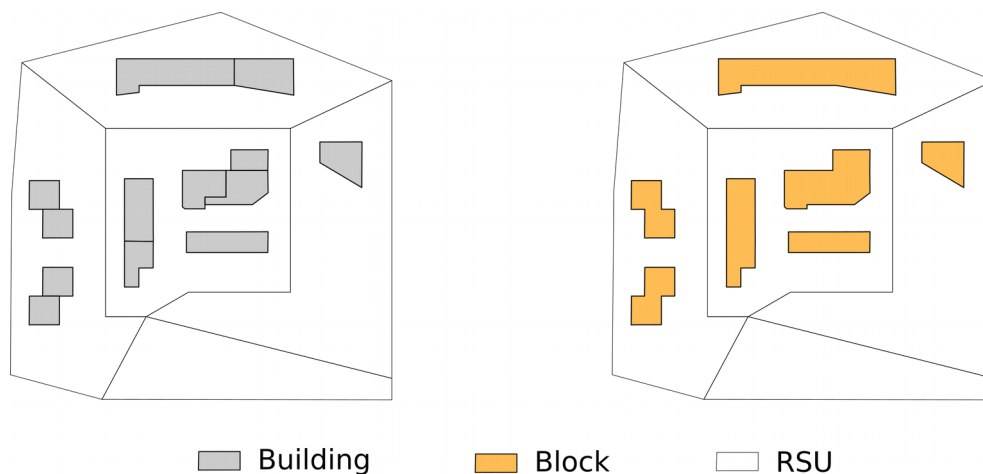


Figure 42: Les échelles géographiques pour le calcul des indicateurs

En tout nous avons documenté 27 indicateurs pour les bâtiments (Figure 43), 9 pour les blocs (Figure 44) et 26 pour les USR (Figure 45).

| Name          | Description  | Method  | Biblio  |
|---------------|--|---|---|
| area          | Building area  | Area of the building geometry (footprint)   | (Steiniger et al., 2008)                              |
| floor_area    | Building floor area  | $area \cdot nb\_level$  |   |
| vol           | Building volume  | $area \cdot h\_fixed$   |   |
| perimeter     | Building perimeter   | Perimeter of the building geometry  |   |
| perimeter_cvx | Building convexhull perimeter  | -   |   |
| form_factor   | Building form factor   | $\frac{area}{perimeter^2}$  | (Horton, 1932)  |
| nb_neighbor   | Building number of neighbor  | Number of buildings that are in contact (at least one point) with the building of interest  | (Steiniger et al., 2008)                              |
| b_wall_area   | Total area of building walls (including holes)   | Sum of the linear of facades multiplied by the building height  |   |
| p_wall_long   | Total length of common (party) walls   | Sum of the linear of facades that are in contact with other buildings   |   |
| p_wall_area   | Total area of common (party) walls   | When the building has a common linear of facade with another one, the common wall area is the linear of facades multiplied by the height of the smallest building. Then the sum of these areas is realized for each neighbors in contact with the building. |   |
| free_ext_area | Area of free external facades, that are in contact with the air  | $\sum b\_wall\_area - \sum p\_wall\_area + \sum area$   |   |
| concavity     | Building concavity   | Building area divided by its convex hull's area   | (Adolphe, 2001; d'URbanisme (APUR), 2007)             |
| contiguity    | Building contiguity  | $\frac{p\_wall\_area}{b\_wall\_area}$   | (Gauthier, 2014)                                      |
| compacity_r   | Building raw compacity   | $\frac{b\_wall\_area + area}{volume^{\frac{2}{3}}}$   | (Berghauser-Pont and Haupt, 2005)                     |
| compacity_n   | Building net compacity   | $\frac{free\_ext\_area}{volume^{\frac{2}{3}}}$  |   |
| compactness   | Building compactness   | Ratio between the building perimeter and the perimeter of a circle having the same area   | (Dramstad, 2009; Gravelius, 1914)                     |
| main_dir      | Building main direction (in degree)  | The main direction is defined as the direction given by the longest side of the building Smallest Minimum Bounding Rectangle (SMBR)   | (Duchène et al., 2003; Rainsford and Mackaness, 2002) |
| p_vol_ratio   | Building passive volume ratio. This ratio can be expressed as the building portion that can be naturally lit and ventilated. | Area taken up to 6 m from a free facade inside the building, then divided by the building area  | (Dramstad, 2009; Ratti et al., 2005; Salat, 2011)     |
| fractal_dim   | Building fractal dimension   | $2 \frac{\log(perimeter)}{\log(area)}$  | (Herold et al., 2002; McGarigal and Marks, 1995)      |
| min_dist      | Distance between the building of interest and the closest building which is in the same RSU                                  | Minimum distance between the building of interest and the other ones in the same RSU  |   |
| max_dist      | Distance between the building of interest and the furthest building which is in the same RSU                                 | Maximum distance between the building of interest and the other ones in the same RSU  |   |
| mean_dist     | Mean distance between the building of interest and the other buildings which are in the same RSU                             | -   | (Colaninno et al., 2011)                              |
| std_dist      | Population standard deviation distance between the building of interest and the other buildings which are in the same RSU    | -   |   |
| num_points    | Building number of points  | Count the building number of points after removing duplicate (e.g startpoint and endpoint are counted once)   | (Steiniger et al., 2008)                              |
| l_3m          | Linear of building walls next to road  | For each building, total length of walls that are less than 3 m far from the road   |   |
| l_ratio       | Part of building walls next to road  | $\frac{l\_3m}{perimeter}$   |   |
| l_ratio_cvx   | Ratio between linear of building walls next to road and the building convexhull perimeter                                    | $\frac{l\_3m}{perimeter\_cvx}$  |   |

Figure 43: Liste des indicateurs sélectionnés pour les bâtiments (Bocher et al., 2018).

| Name        | Description                                       | Method   | Biblio                   |
|-------------|---|--|--------------------------|
| area        | Building area composing the block                 | Footprint area   |                          |
| compacity   | Block net compacity                               | $\frac{\sum free\_ext\_area^2}{Sumvol}$  |                          |
| main_dir    | Block main direction                              | The main direction is defined as the direction given by the longest side of the block's Smallest Minimum Bounding Rectangle (SMBR) |                          |
| holes_area  | Area of holes in a block                          | -  | (Steiniger et al., 2008) |
| holes_ratio | Ratio between the holes area and the block's area | $\frac{holes\_area}{area + holes\_area}$   |                          |
| floor_area  | Block floor area                                  | $\sum floor\_area$   |                          |
| vol         | Block volume                                      | $\sum vol$   |                          |
| h_mean      | Block mean height                                 | $\frac{\sum area \cdot h\_fixed}{\sum area}$   | (Gauthier, 2014)         |
| h_std       | Block standard deviation height                   | Block population standard deviation building height  |                          |

Figure 44: Liste des indicateurs sélectionnés pour les blocs (Bocher et al., 2018).

| Name           | Description   | Aggregation method  | Biblio  |
|----------------|---|---|---|
| area           | Building area in the RSU  | $\sum area_{build}$   |   |
| floor_area     | Building floor area in the RSU  | $\sum floor\_area_{build}$  |   |
| floor_ratio    | Building floor area ratio   | $\frac{\sum floor\_area_{build}}{rsu\_area}$  | (Alexander, 1993; Berghauer-Pont and Haupt, 2005, 2009; Chan, 1999; Gauthier, 2014)                         |
| vol            | Building volume   | $\sum vol_{build}$  |   |
| vol_m          | Building mean volume  | $\frac{\sum vol_{build}}{build\_numb}$  |   |
| ext_env_area   | Building external area  | $\sum free\_ext\_area_{build}$  |   |
| compac_m_w     | Building weighted mean compacity  | $\frac{\sum compacity\_n_{build} \cdot area_{build}}{\sum area_{build}}$                      |   |
| compac_m       | Building non-weighted mean compacity  | $\frac{\sum compacity\_n_{build}}{build\_numb}$   |   |
| contig_m       | Building mean contiguity  | $\frac{\sum contiguity_{build}}{build\_numb}$   |   |
| contig_std     | Building standard deviation contiguity  | Population standard deviation contiguity of buildings   |   |
| main_dir_std   | Main direction of buildings standard deviation  | Population standard deviation main direction of buildings                                     |   |
| h_mean         | Building mean height  | $\frac{\sum area_{build} \cdot h\_fixed_{build}}{\sum area_{build}}$                          |   |
| h_std          | Building standard deviation height  | Population standard deviation height of buildings   |   |
| p_vol_ratio_m  | Building mean passive volume ratios   | $\frac{\sum floor\_area_{build} \cdot p\_vol\_ratio_{build}}{\sum floor\_area_{build}}$       |   |
| min_m_dist     | Mean of the minimum distance between buildings that are in the same RSU                         | $\frac{\sum min\_dist_{build}}{build\_numb}$  |   |
| mean_m_dist    | Mean of the mean distance between buildings that are in the same RSU                            | $\frac{\sum mean\_dist_{build}}{build\_numb}$   |   |
| mean_std_dist  | Standard deviation of the mean distance between buildings that are in the same RSU              | Population standard deviation of the mean distance between buildings that are in the same RSU |   |
| bl_hole_area_m | Mean courtyard ratio of blocks within an RSU  | $\frac{\sum holes\_ratio_{block} \cdot area_{block}}{\sum area_{block}}$                      |   |
| bl_std_h_mean  | Mean of the standard deviation height of buildings, computed at the block's scale within a RSU. | $\frac{\sum h\_std_{block} \cdot area_{block}}{\sum area_{block}}$                            |   |
| bl_m_nw_comp   | Block non weighted mean compacity   | $\frac{\sum compacity\_n_{block}}{block\_numb}$   |   |
| bl_m_w_comp    | Block weighted mean compacity   | $\frac{\sum compacity\_n_{block} \cdot area_{block}}{\sum area_{block}}$                      |   |
| bl_std_comp    | Blocks standard deviation compacity   | Population standard deviation of block compacities  |   |
| build_density  | Building density in the RSU (based on the RSU area called "rsu_area", computed on the fly)      | $\frac{\sum area_{build}}{rsu\_area}$   | (Alexander, 1993; Berghauer-Pont and Haupt, 2005, 2009; Chan, 1999; Gauthier, 2014; Steiniger et al., 2008) |
| hydro_density  | Hydrographic area's density in the RSU  | $\frac{hydro\_surface}{rsu\_area}$  | (Long and Kergomard, 2006; Schwarz, 2010; Tratalos et al., 2007)  |
| veget_density  | Vegetation area's density in the RSU  | $\frac{veget\_surface}{rsu\_area}$  | (Long and Kergomard, 2006; Schwarz, 2010; Tratalos et al., 2007)  |
| road_density   | Road area's density in the RSU  | $\frac{road\_surface}{rsu\_area}$   | (Long and Kergomard, 2006; Schwarz, 2010; Tratalos et al., 2007)  |

Figure 45: Liste des indicateurs sélectionnés pour les USR (RSU) (Bocher et al., 2018).

#### 4.4.1.4 Calcul des indicateurs morphologiques

La première phase de la mise en œuvre de la chaîne de traitements a consisté à modéliser une base de données afin d'accueillir les valeurs d'indicateurs qui seront calculées par échelles géographiques. 3 tables sont utilisées. Elles sont reliées par des clés étrangères afin d'assurer leur intégrité. Chaque bâtiment (*BUILDING\_INDICATORS\_METROPOLE*) est lié à une USR via un identifiant unique (*RSU\_INDICATORS\_METROPOLE.pk\_usr*). Un bâtiment est également relié à un identifiant de bloc (*BLOCK\_INDICATORS\_METROPOLE.pk\_block*). Un bloc est lié à une USR (*RSU\_INDICATORS\_METROPOLE.pk\_usr*). Une USR est liée à une et une seule commune via le code IRIS (*RSU\_INDICATORS\_METROPOLE.dcomiris*).

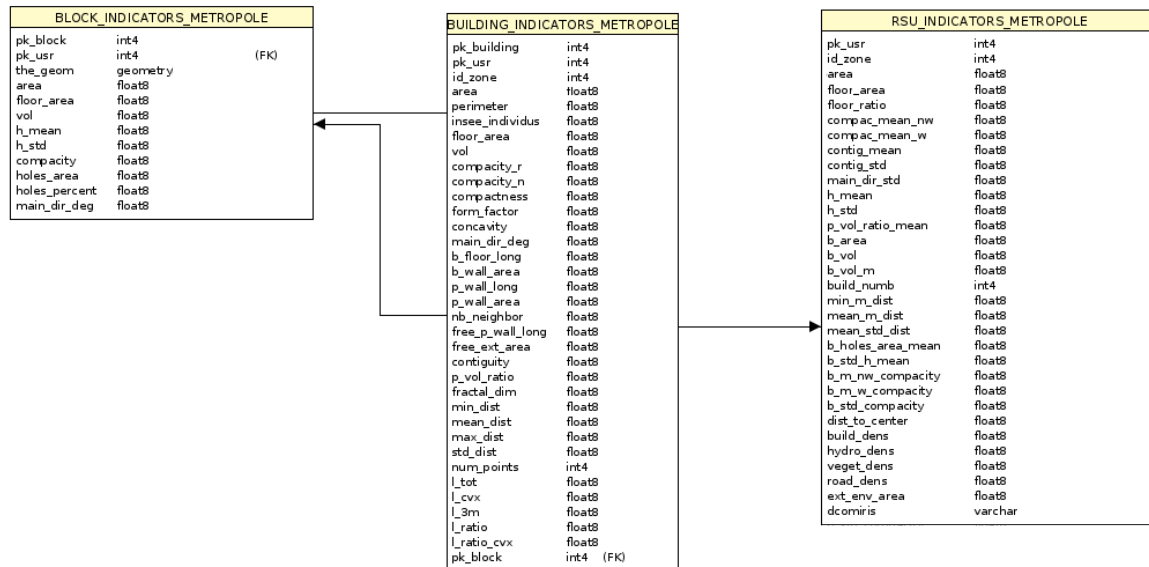


Figure 46: Schéma du modèle physique pour le stockage des indicateurs

La seconde phase concerne la transposition des définitions d'indicateurs dans le langage SQL. Cette transposition a donné lieu à l'écriture de scripts plus ou moins complexes qui exploitent les opérateurs et prédicats géométriques standardisés pour obtenir les propriétés des objets ou séquencer des analyses spatiales (voir section 4.2.1).

La figure 47 donne un exemple pour le calcul d'un indice de forme sur des bâtiments (*BUILDINGS*).

```

1  -- Drop the table if it already exists
2  DROP TABLE IF EXISTS BUILD_FORM_FACTOR;
3  -- Create the table and compute the form factor value
4  CREATE TABLE BUILD_FORM_FACTOR (PK integer primary key,
5  FORM_FACTOR double)
6  AS SELECT PK, ST_AREA(THE_GEOM) / POWER(ST_LENGTH(
7  THE_GEOM), 2) AS FORM_FACTOR
8  FROM BUILDINGS;

```

Figure 47: Exemple de calcul de l'indice de forme en SQL

L'exécution des scripts est orchestrée selon un ordre précis (Figure 48). Elle est pilotée commune par commune.

1. Une table de relation est produite afin de relier les bâtiments à une seule USR.
2. Les indicateurs morphologiques sont calculés individuellement à l'échelle des bâtiments puis intégrés dans une table unique.
3. A partir des bâtiments sélectionnés dans l'étape 2, les blocs de bâtiments sont produits par union géométrique. Une table de relation est également construite afin de lier un bâtiment à un bloc. Cette table sera utilisée pour agréger les variables déjà calculées au niveau des bâtiments, comme la hauteur.
4. Cette étape consiste principalement à réaliser des calculs statistiques à l'échelle de l'USR, les calculs les plus complexes étant déjà réalisés à l'échelle des bâtiments et des blocs de bâtiments.

Les scripts *SQL* ont été encapsulés dans un script *WPS*. Pour fonctionner, il reçoit en entrée une liste de codes INSEE correspondant aux communes à traiter. Le service *WPS* va ordonner 5 opérations (Figure 49).

1. Vérification des données d'entrée. Il s'agit de contrôler si les codes envoyés au service correspondent bien à des identifiants INSEE connus et pour lesquels les données de références et les USR sont disponibles.
2. Création d'une base de données spatiales locale *H2GIS* qui servira pour l'exécution des scripts *SQL*.
3. Alimentation de la base de données locale à partir des données de références stockées dans une base de données spatiales maître (voir section 4.4.1.2). Seules les données concernant la liste des communes spécifiées sont récupérées.
4. Exécution de la chaîne de scripts *SQL* pour la production des indicateurs morphologiques. L'exécution est réalisée commune par commune. En cas de rupture dans la chaîne de traitements un rapport est conservé. Il contient une description détaillée des causes de la rupture (problème d'accès à la base de données, erreur concernant les données d'entrée, erreur d'écriture d'une commande *SQL*...). Ce rapport nous permet d'identifier les cas particuliers et de rendre la chaîne de traitements plus robuste.
5. Stockage des résultats dans la base de données.

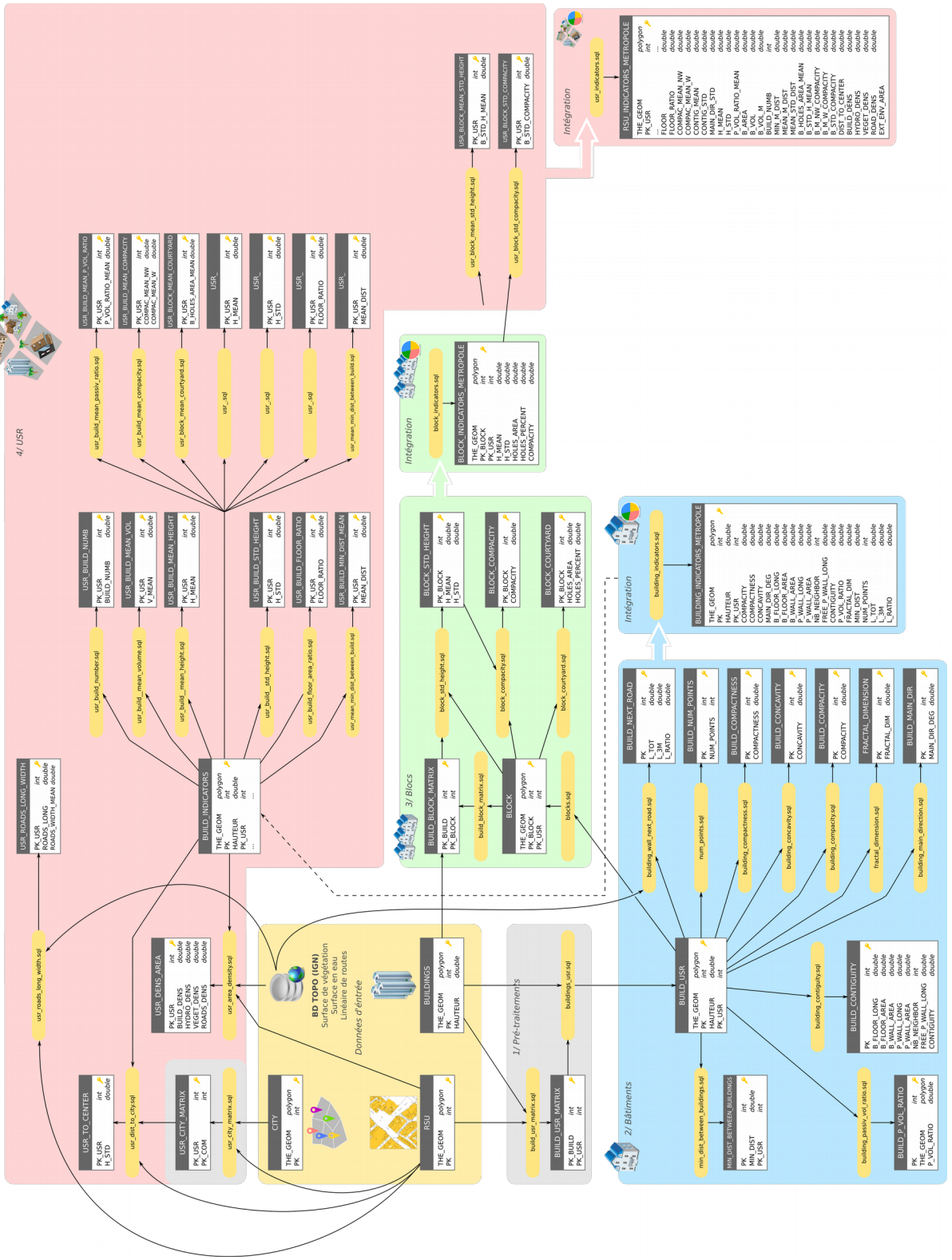


Figure 48: Synoptique de l'enchaînement des scripts SQL pour le calcul des indicateurs morphologiques

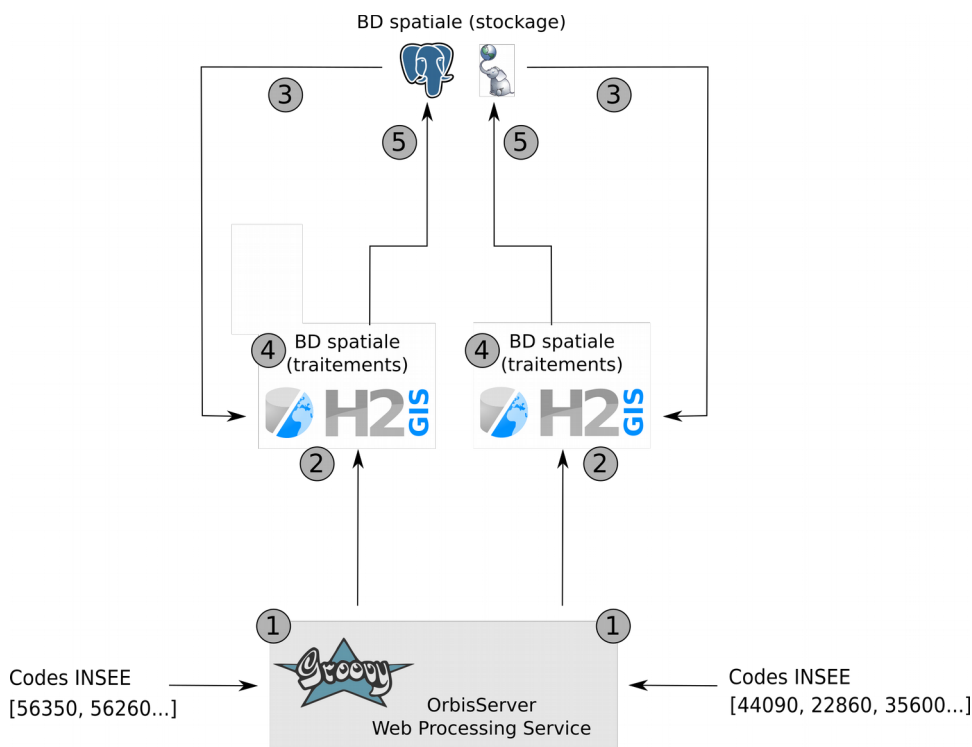


Figure 49: Architecture de pilotage des scripts SQL

Le service WPS a été installé sur un serveur disposant de plusieurs nœuds de calculs. Une interface graphique a été développée au sein d'OrbisGIS afin de faciliter le pilotage des traitements (Figure 50). Elle liste par exemple les codes INSEE des communes disponibles dans la base de référence ou encore le nom des unités urbaines pouvant être traitées. Cette interface vient enrichir la *ToolBox*. Elle est générée dynamiquement à partir des métadonnées contenues dans le script WPS (voir section 4.2.2.3). Elle sert de démonstrateur mais permet également d'interagir directement avec la base de données, de visualiser les résultats au fil de l'eau et de les contrôler spatialement. Pour cela nous utilisons des styles cartographiques contenant des plages d'intervalles définies pour chaque indicateur (Figure 51).

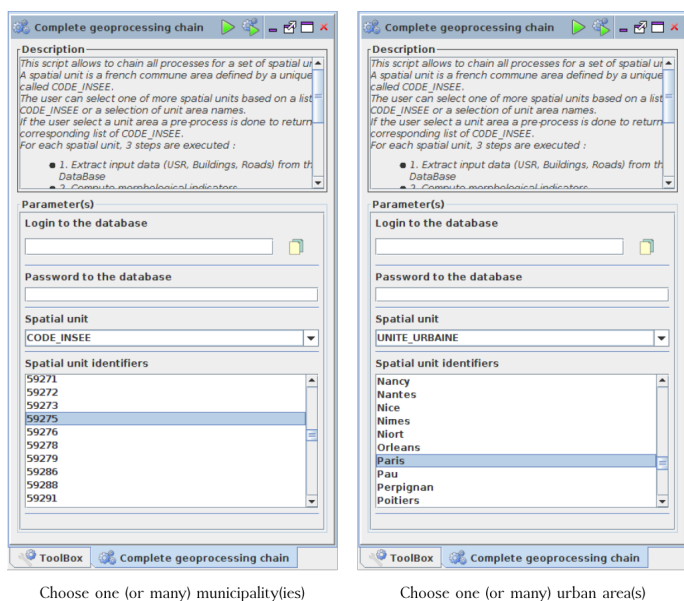


Figure 50: L'interface graphique pour piloter la chaîne de traitements (à gauche en sélectionnant une liste de code INSEE à droite en sélectionnant le nom d'une unité urbaine)

Choose one (or many) municipality(ies)

Choose one (or many) urban area(s)



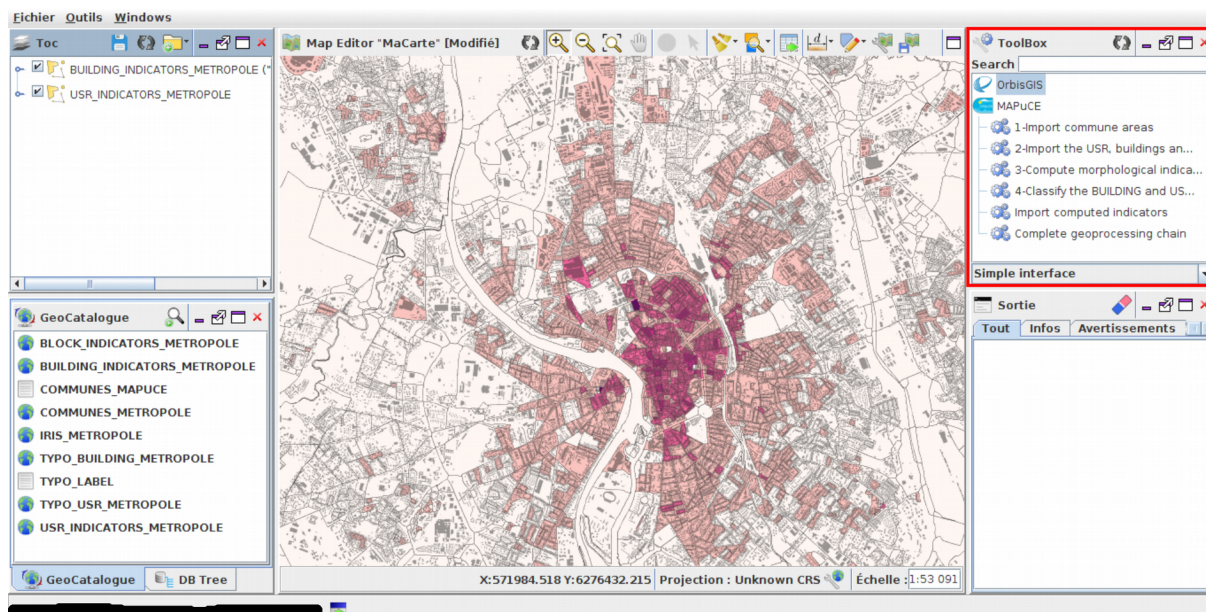


Figure 51: Visualisation cartographique des indicateurs morphologiques stockés dans la base de référence

La chaîne de traitements a été appliquée sur 2 238 communes représentant 454 309 USR, 9 096 780 bâtiments, 485 379 tronçons de routes. Pour accélérer les temps de traitements, nous avons décomposé l'échantillon de communes en 10 paquets de 200 communes et 1 paquet avec 238 communes. Deux appels séquentiels du service WPS ont été programmés. Le premier exécute en parallèle 5 scripts WPS et le second 6 scripts. Ce séquençage est possible car chaque script WPS dispose de sa propre instance de base de données spatiales (H2GIS) sur laquelle sont effectuées les analyses (Figure 49). En conséquence le calcul des indicateurs morphologiques aura nécessité 32 jours contre 187 théoriquement avec une architecture classique.

La figure 52 représente à titre d'exemple un extrait cartographique de deux indicateurs morphologiques pour les 3 échelles géographiques : bâtiment, bloc et USR. Le tableau 7 fournit des statistiques sur le nombre d'objets finalement analysés. Il montre que toutes les unités urbaines (81 au départ) n'ont pas été traitées.

| Nom de la table               | Nombre d'objets |
|-------------------------------|-----------------|
| URBAN_UNITS                   | 46              |
| CITY                          | 1 378           |
| RSU_INDICATORS_METROPOLE      | 264 238         |
| BUILDING_INDICATORS_METROPOLE | 5 203 450       |
| BLOCK_INDICATORS_METROPOLE    | 2 962 240       |

Tableau 7: Statistiques sur la base de données à l'issue de l'exécution de la chaîne de traitements

L'analyse du rapport des erreurs enregistrées pour chaque commune relève que cette différence entre le nombre de communes d'entrée (2 238) et celles qui sont finalement traitées (1 378)



pourrait s'expliquer par des incohérences sur les données d'entrée notamment les unités spatiales de référence (USR). Pour l'heure nous n'avons pas pu mettre en place de mécanismes pour expliquer la nature de ces erreurs (géométrie, absence de valeurs, problèmes de modélisation...), le jeu de données étant jugé satisfaisant pour la suite de la recherche. Un travail de thèse visant à mettre en œuvre un système générique et interopérable pour définir et contrôler la qualité des données géographiques est néanmoins en cours sur ce sujet.



Figure 52: Extraits cartographiques de deux indicateurs morphologiques (Bocher et al., 2018)

### 4.4.1.5 Exploitation des indicateurs morphologiques

L'une des premières exploitations des indicateurs morphologiques a été effectuée par (Faraut et al., 2016) afin de construire une méthode d'identification automatique des tissus urbains en France. En effet, l'organisation des tissus urbains (pavillonnaire, collectif, zone d'activités) est une donnée d'entrée du modèle TEB car elle permet de réaliser des hypothèses sur la consommation et le comportement énergétique sur un territoire.

L'approche de détermination des typologies est une méthode globale et automatisée, dérivée de *GENIUS* (Tornay, Bonhomme & Faraut, 2015). Elle utilise les indicateurs morphologiques et des données socio-démographiques et réalise une classification mettant en œuvre un apprentissage supervisé basé sur l'algorithme de *Random Forest*. 11 types d'organisation du tissu urbain sont recherchés (Figure 53).



Figure 53: Les 11 types d'organisation du tissu urbain (Bocher et al., 2018)

Un fichier d'apprentissage a été élaboré manuellement en attribuant aux 27 096 bâtiments une valeur de typologie (Figure 54, Tableau 8). Ces bâtiments proviennent de la base de données de référence et sont répartis sur 7 communes : Annecy, La Rochelle, Avignon, Toulouse, Nantes, Paris et Mulhouse.

| Valeur de typologie | Nom de la typologie  |
|---------------------|--|
| ba                  | Bâtiment d'activité (Industrial building)                                |
| bgh                 | Bâtiment de grande hauteur (High rise building)                          |
| icif                | Immeuble continu sur îlot fermé (Linear building on closed urban island) |
| icio                | immeuble continu sur îlot ouvert (Linear building on open urban island)  |
| id                  | Immeuble discontinu (Detached building)                                  |
| local               | Construction informelle (Informal building)                              |
| pcif                | Pavillon continu sur îlot fermé (Row house on closed island)             |
| pcio                | Pavillon continu sur îlot ouvert (Row house on open island)              |
| pd                  | Pavillon discontinu (Detached house)                                     |
| psc                 | Pavillon semi-continu (Semi-detached house)                              |

Tableau 8: Valeurs utilisées pour classer les bâtiments en fonction de la typologie

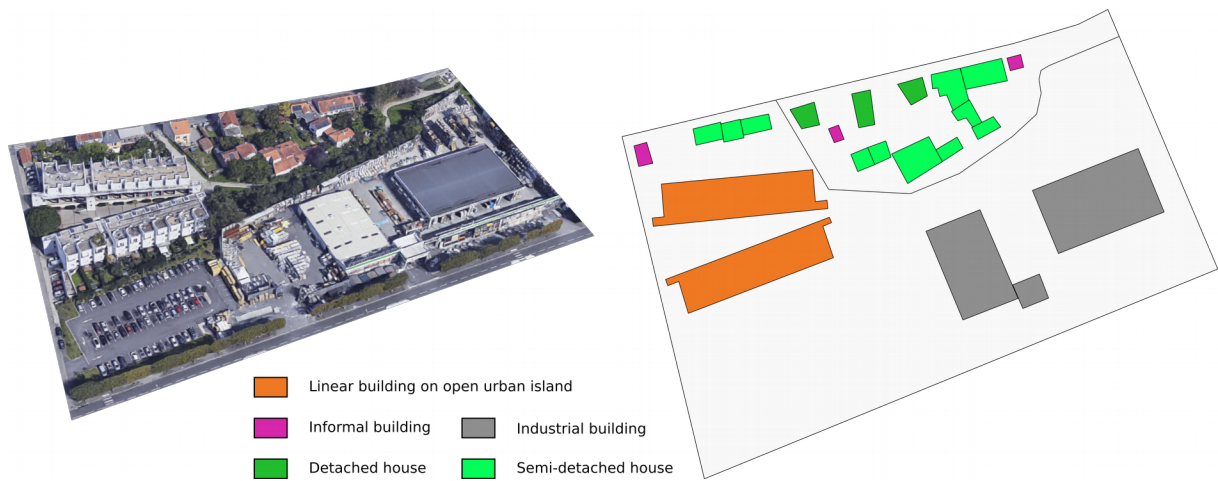


Figure 54: Classification manuelle des bâtiments à partir d'une photographie aérienne (Bocher et al., 2018)

Le fichier d'apprentissage a été enrichi de variables prédictives que nous avons extraites des tables d'indicateurs et de la table des USR (Tableau 9). Elles concernent le bâtiment lui-même mais aussi le bloc et l'USR auquel il est associé. L'utilisation d'indicateurs à ces 3 échelles permet de dimensionner la prédiction en ajoutant un critère d'échelle géographique et de placer ainsi le bâtiment dans son environnement proche.

| Echelle du bâtiment | Echelle du bloc | Echelle de l'USR |
|---------------------|-----------------|------------------|
| insee_inhab         | area            | vegetation_area  |
| heigth              | floor_area      | road_area        |
| area                | vol             | road_length      |
| floor_area          | h_mean          | sidewalk_length  |
| vol                 | h_std           | insee_inhab      |
| compacity_r         | compacity       | floor_area       |
| compacity_n         | holes_ratio     | compac_n_w       |
| compactness         | main_dir        | compac_m         |
| form_factor         |                 | contig_m         |
| concavity           |                 | contig_std       |
| main_dir            |                 | main_dir_std     |
| perimeter           |                 | h_mean           |
| b_wall_area         |                 | h_std            |
| p_wall_long         |                 | p_vol_ratio_m    |
| p_wall_area         |                 | area             |
| nb_neighbor         |                 | vol              |
| fwall_l             |                 | vol_m            |
| free_ext_area       |                 | nb_build         |
| contiguity          |                 | min_m_dist       |
| p_vol_ratio         |                 | mean_m_dist      |
| fractal_dim         |                 | mean_std_dist    |
| min_dist            |                 | bl_std_h_mean    |
| mean_dist           |                 | bl_m_w_comp      |
| max_dist            |                 | bl_std_comp      |
| std_dist            |                 | dist_center      |
| nb_points           |                 | build_dens       |
| perimeter_cvx       |                 | veget_density    |
| l_3m                |                 | road_density     |

Tableau 9: Liste des variables prédictives retenues pour chaque bâtiment

Un modèle de classification a ensuite été construit avec le logiciel de statistiques R en utilisant le package *RandomForest* (Liaw & Wiener, 2015). Nous avons inclus ce modèle dans l'architecture de pilotage des scripts *SQL* sous la forme d'un service *WPS*. Pour cela, nous avons intégré le compilateur *Renjin*<sup>80</sup>, un interpréteur de script R développé en *JAVA*. Outre la possibilité d'appliquer le modèle de classification des typologies, *Renjin* permet d'étendre le service *WPS* et l'écosystème d'*OrbisGIS* de puissantes capacités d'analyse de données. A l'image de la console *SQL*, une console R a été intégrée dans *OrbisGIS* pour faciliter l'interaction entre les données géographiques et le langage R, et permettre d'expérimenter au cœur du SIG les méthodes statistiques.

80 <http://www.renjin.org/> consulté en octobre 2018



Le modèle de classification a été appliqué sur 40 unités urbaines. Il aboutit à la réalisation d'une typologie des bâtiments et des USR uniforme et générique qui permet de décrire la structure des villes (Figure 55).



Figure 55: Extrait de la classification du tissu urbain obtenu par apprentissage sur Toulouse (Bocher et al., 2018)

En s'appuyant sur des données géographiques et sans connaissance préalable de l'histoire de la ville, nous avons élaboré une procédure automatique qui marie analyse spatiale et méthode statistique pour rechercher des organisations du tissu urbain. Elle aboutit à la construction d'un référentiel géographique qui ouvre des perspectives pour comparer les villes entre elles mais également leur évolution. D'un point de vue *Energie-Climat*, cette classification permet de déduire de nouvelles variables nécessaires au modèle *TEB*. (Schoetter et al., 2017) combinent la typologie des tissus urbains et les données sur la nature des bâtiments de la BD Topo pour réaliser des hypothèses sur les fractions de bâtiments à usage commercial et d'habitation. Couplé avec un modèle de prédiction de la consommation des ménages, ils simulent des cartes de distribution des consommations énergétiques sur Toulouse (Figure 56). Les auteurs concluent qu'une représentation plus détaillée de l'usage des bâtiments, mise en relation avec des profils de comportements énergétiques, améliore la variabilité spatio-temporelle de la consommation énergétique simulée.

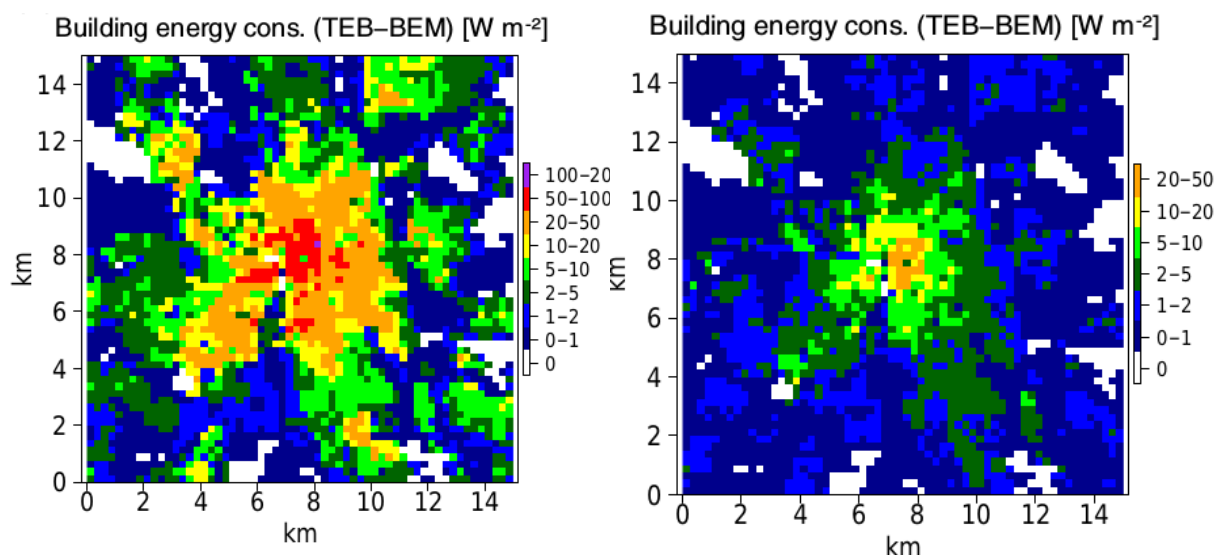


Figure 56: Simulation de la consommation énergétique des bâtiments pour l'agglomération de Toulouse sur une grille de 250 m X 250 m : à gauche pour les mois de décembre, janvier et février ; à droite pour les mois de juin, juillet et août (Schoetter et al., 2017)

#### 4.4.1.6 Bilan : une plate-forme SIG pour l'étude du climat urbain

La territorialisation des enjeux climatiques est une condition *sine qua non* pour permettre aux gestionnaires d'identifier les vulnérabilités mais également de se doter d'objectifs stratégiques et opérationnels dans le domaine de l'adaptation. Cette territorialisation passe indéniablement par une mise en carte, une spatialisation des fragilités et des leviers pour localiser les problèmes et trouver des solutions. Depuis les années 2010, de nombreuses collectivités se sont engagées dans des démarches visant à prendre en compte ces problématiques nouvelles dans leurs documents d'urbanisme. Mais, à l'heure où l'on assiste à une territorialisation progressive de la gestion des enjeux climatiques, force est de constater que l'on manque cruellement de données et de méthodes permettant la mise en œuvre concrète de cette territorialisation.

Notre contribution au projet MApUCE est multiple.

Tout d'abord, du point de vue de la recherche sur le climat-urbain, en produisant des indicateurs morphologiques sur des données géométriques fines (échelle du bâtiment de la BD Topo), nous avons permis au modèle *TEB* de changer d'échelle et d'affiner ses simulations. Ce changement d'échelle s'est accompagné d'une nouvelle segmentation de l'espace, l'*Unité Spatiale de Référence* (USR) qui apporte de nouvelles informations sur l'organisation des tissus urbains. Si ces données sont utiles au modèle climatique car elles permettent de faire des hypothèses sur les consommations énergétiques, elles ouvrent aussi des pistes pour comparer les structures des villes et peut être en déduire des profils climatiques.

En concentrant notre effort sur la mise en œuvre d'une chaîne de traitements générique et automatique, nous avons assis une méthodologie réutilisable et transposable sur l'ensemble du

territoire français. A notre connaissance Elle constitue aujourd’hui la première base de données à grande échelle disposant d’indicateurs pour décrire la morphologie et la structure des villes.

Enfin, pour encourager la réutilisation des analyses spatiales et faciliter la circulation des données entre les acteurs du projet MAPUCE, nous avons développé un Système d’Information Géographique distribué qui mobilise les standards de l’interopérabilité et les technologies du *Web*. Ce SIG est organisé autour de 5 composants (Figure 57) :

- Une base de données commune qui héberge, pour un millésime spécifique (2014), les données de références ainsi que les résultats (*Spatial DB (store)*).
- Un service de traitements qui permet d’exécuter la chaîne de production des indicateurs ainsi que la classification des tissus urbains (*OrbisServer*).
- Une interface graphique dans le SIG *OrbisGIS*, afin de piloter les traitements mais également de visualiser les données (*MAPUCE Toolbox*).
- Un serveur cartographique qui délivre des cartes en *WMS* (*GeoServer*).
- Un portail cartographique qui permet aux utilisateurs de visualiser les indicateurs morphologiques et les classifications des tissus urbains sur l’ensemble des unités urbaines traitées. Ce portail permet également de télécharger sous licence open data les données à l’échelle des USR (<http://mapuce.orbisgis.org>).

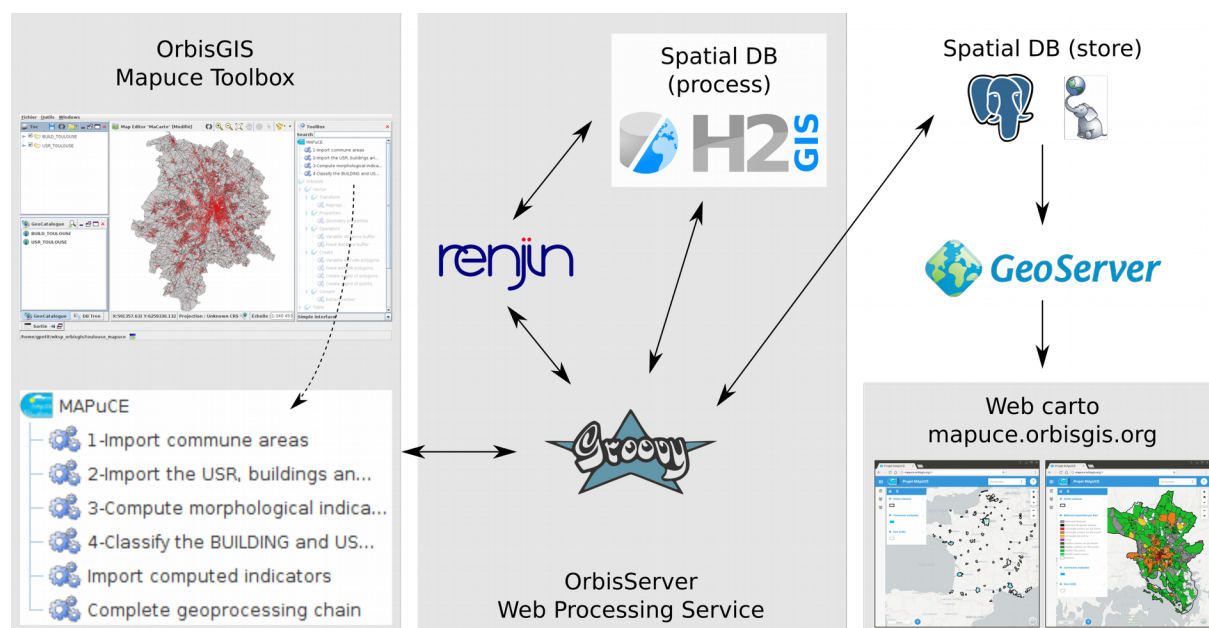


Figure 57: Architecture et composants de la plate-forme SIG MAPUCE

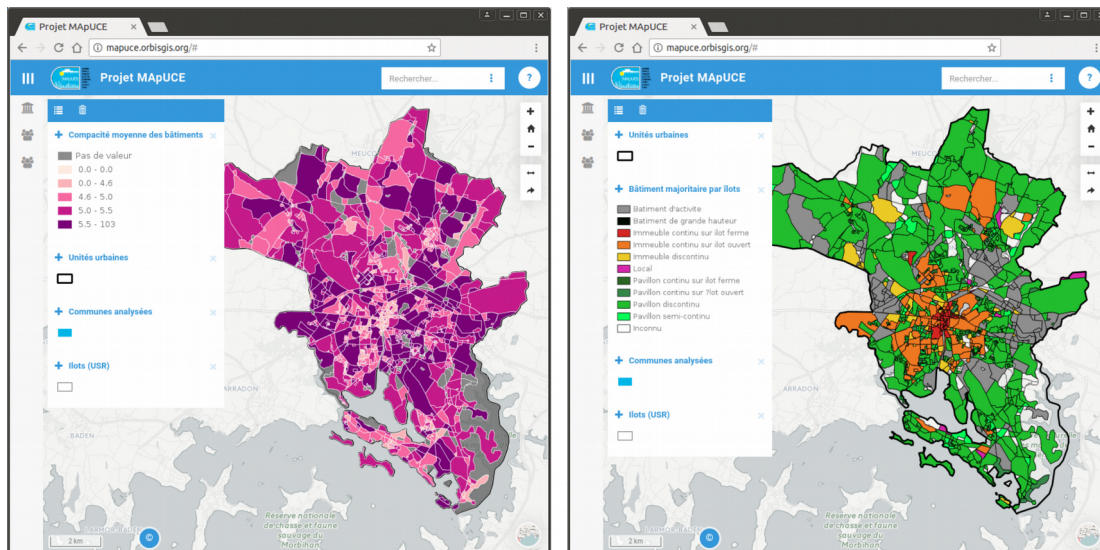


Figure 58: Copies d'écran du portail cartographique MapUCE à gauche une carte représentant l'indicateur de compacité moyenne sur l'unité urbaine de Vannes, à droite la classification du tissu urbain

Si une chaîne de traitements des données a pu être expérimentée avec succès pour une quarantaine d'unités urbaines, il reste néanmoins plusieurs verrous à soulever pour garantir sa robustesse, sa fiabilité et sa réutilisation par les acteurs du territoire.

- la segmentation des USR repose sur l'utilisation des limites parcellaires de l'IGN et mobilise une chaîne algorithmique complexe qui nécessite une expertise humaine conséquente (paramétrage) et des capacités de calcul importantes.
- les données de population distribuées sur les bâtiments et les USR exploitent le carroyage de l'INSEE, source de données qui n'est plus mise à jour,
- l'absence de mécanismes permettant de contrôler la qualité des données utilisées en entrée mais également celles des indicateurs produits.
- les traitements mis en œuvre sont déclenchés manuellement par un opérateur sur un serveur de calcul. Il serait intéressant de disposer d'un mécanisme de monitoring pour déclencher la production des indicateurs lorsqu'une nouvelle donnée est disponible dans la base.
- la chaîne de construction des indicateurs topographiques est calée sur un type de données, la BD Topo de l'IGN. Il serait opportun de réfléchir à la définition d'un modèle de données abstrait qui pourrait être alimenté par des données provenant de différents opérateurs et d'ouvrir ainsi la réutilisation des méthodes à d'autres territoires en Europe par exemple.

Enfin, ce travail doit également sortir de la problématique unique d'alimentation d'un modèle climatique. Un travail de mise en perspective via des analyses géographiques des résultats pourrait donner naissance à plusieurs pistes de recherche comme :

- un bilan à l'échelle nationale des populations soumises à un stress thermique via par exemple une cartographie des populations exposées en lien avec les hospitalisations,
- une recherche des déterminants géographiques défavorables et favorables en approfondissant l'exploitation des indicateurs morphologiques à l'exemple de (Bernabé et al., 2015; Bernard et al., 2017) qui mettent en relation organisation du territoire et impact sur le climat local.



## 4.4.2 Noise-Planet : Outils scientifiques pour l'évaluation du bruit dans l'environnement

### 4.4.2.1 La problématique du bruit dans l'environnement

Le bruit constitue une nuisance environnementale majeure, avec des effets sur la santé humaine qui sont reconnus depuis la fin des années 1990 (Berglund, Lindvall & Schwela, 1999; WHO, 2009). L'ampleur du problème a été quantifié et qualifié à l'échelle européenne (European Environment Agency, 2014). Les effets se matérialisent par les troubles de l'audition et les acouphènes, les troubles du sommeil, les problèmes cognitifs, les maladies cardiovasculaires, dans des proportions qui peuvent être parfois importantes (Muzet et al., 2013). En 2016, l'Agence européenne de l'environnement estime que les nuisances sonores sont responsables d'au moins 10 000 morts prématurées par an en Europe. Mais comme le rapporte (Dutilleux, 2017), l'être humain n'est pas la seule espèce impactée. Les conséquences se mesurent également sur la faune et la flore. En surface, la pollution sonore impacte la reproduction des oiseaux qui ne s'entendent plus chanter, elle perturbe la pollinisation et le transfert de graines entre biotopes en déplaçant les espèces (Shannon et al., 2014; Newport, Shorthouse & Manning, 2014). Les fonds sous-marins ne sont pas exempts puisque la circulation maritime, les techniques d'exploration (recherche de gisements de pétrole ou de gaz naturel) nuisent aux animaux qui utilisent leur « ouïe » pour pouvoir se mouvoir en groupe, communiquer et donc se reproduire (Weilgart, 2007). Le bruit est un perturbateur qui s'infiltré partout, il est multi-scalaire (temps, espaces), multi-cibles (concerne différentes populations) et multi-physiques (voix, véhicules, travaux...).

La lutte contre le bruit, parce qu'elle constitue un enjeu important, a fait l'objet de plusieurs réglementations. Au niveau français, la loi n° 92-1444 du 31 décembre 1992<sup>81</sup> relative à la lutte contre le bruit codifie à la fois la prévention, la réduction et la limitation des émissions et de la propagation du bruit susceptibles de nuire à la santé des résidents. Le décret du 30 juin 1999 relatif aux caractéristiques acoustiques des bâtiments résidentiels régit l'isolation acoustique de tous les nouveaux bâtiments<sup>82</sup>. En matière de bruit de voisinage, le décret n° 2006-1099 du 31 août 2006 fixe des critères acoustiques à la fois pour les activités sportives, culturelles et professionnelles<sup>83</sup>. En ce qui concerne les transports terrestres, tout nouveau projet ou plan de développement concernant les infrastructures routières ou ferroviaires doit tenir compte du bruit conformément à l'article L571-9 du Code de l'environnement<sup>84</sup>.

Au niveau européen, la directive sur le bruit dans l'environnement (END<sup>85</sup>) 2002/49/CE relative à l'évaluation et à la gestion du bruit dans l'environnement vise à définir une approche commune pour identifier, prévenir et réduire les effets nocifs, y compris les nuisances, dus à l'exposition au bruit dans l'environnement. Elle s'articule autour de quatre axes principaux :

---

81 Loi n° 92-1444 du 31 décembre 1992 relative à la lutte contre le bruit , vol. L 571-1 à L 571-26. 1992.

82 Arrêté du 30 juin 1999 relatif aux caractéristiques acoustiques des bâtiments d'habitation.

83 Décret n° 2006-1099 du 31 août 2006 relatif à la lutte contre les bruits de voisinage et modifiant le code de la santé publique. 2006, p. 13042.

84 Article L571-9 du code de l'environnement. 2010.

85 Directive 2002/49/CE du Parlement européen et du Conseil du 25 juin 2002.

- la surveillance du bruit dans l'environnement ;
- l'information et la consultation de la population ;
- le traitement des problèmes de bruit locaux ;
- l'élaboration d'une stratégie européenne à long terme.

L'approche est basée sur la cartographie de l'exposition au bruit. Les agglomérations de plus de 100 000 habitants doivent réaliser leurs cartes de bruit, de manière, notamment, à établir des plans d'actions en matière de lutte contre le bruit. En milieu urbain et périurbain, ces plans d'actions peuvent prendre différentes formes : changement de revêtements de chaussées, mise en place d'écrans acoustiques, réduction des vitesses de circulation, déviation du trafic, réalisation d'aménagements urbains, mise en place de nouvelles politiques de transport public (Plan de Déplacement Urbain)... Dans le cadre de la Directive « Bruit », les données produites par les agglomérations sont transmises à la Commission européenne au titre de l'évaluation (CERTU, 2006). Elles sont élaborées séparément pour les routes, les voies ferrées, les aéroports et les Installations Classées Pour l'Environnement (ICPE) soumises à autorisation, y compris les ports, sur :

- le nombre estimé de personnes (par centaine) vivant dans des habitations exposées dans les plages de valeurs 55-59, 60-64, 65-69, 70-74 et 75 dB(A)<sup>86</sup> pour l'indicateur Lden<sup>87</sup> évalué à une hauteur de 4 mètres sur la façade la plus exposée du bâtiment considéré dont la part due aux grandes infrastructures ;
- le nombre estimé de personnes (par centaine) vivant dans des habitations exposées dans les plages de valeurs 50-54, 55-59, 60-64, 65-69 et 70 dB(A) pour l'indicateur Ln<sup>88</sup> évalué à une hauteur de 4 mètres sur la façade la plus exposée du bâtiment considéré dont la part due aux grandes infrastructures ;
- les cartes des niveaux d'exposition au bruit (Figure 59) et les cartes de dépassement des valeurs limites (Figure 60).

---

86 Décibels pondérés A, soit dB(A), pour tenir compte de la sensibilité de l'oreille humaine en fonction de la fréquence du son.

87 Indicateur de niveau de bruit global pendant une journée (jour, soir et nuit). Il est calculé à partir des indicateurs "Lday", "Levening", "Lnight", niveaux sonores moyennés sur les périodes 6h-18h, 18h-22h et 22h-6h.

88 Indicateur de niveau de bruit global pendant la nuit. Il est calculé de 22h à 6h.

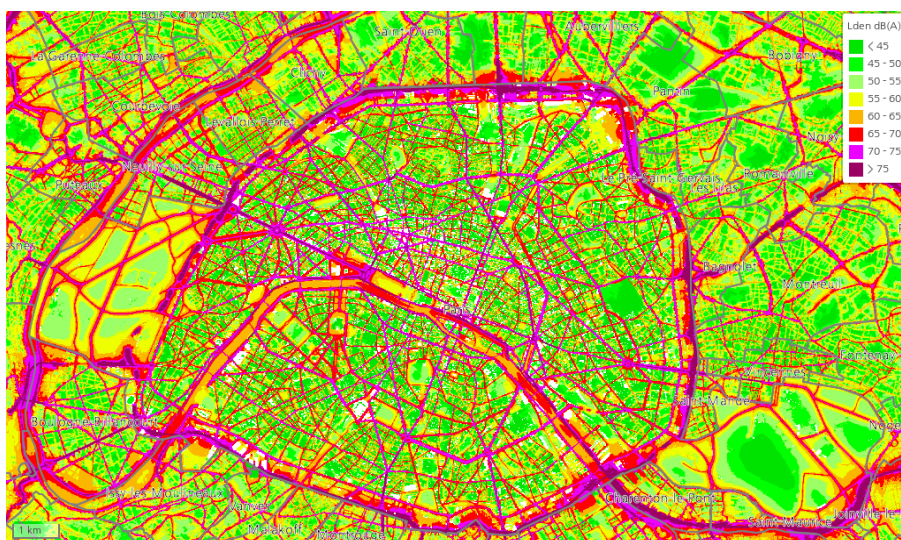


Figure 59. Carte des niveaux sonores représentant l'indicateur de bruit Lden sur une journée complète. Les niveaux sonores sont représentés en classes de 5 en 5 dB(A) et selon les couleurs réglementaires conformes à la norme NF S 31 130.

Source : <https://carto.bruitparif.fr/> consulté en mars 2018

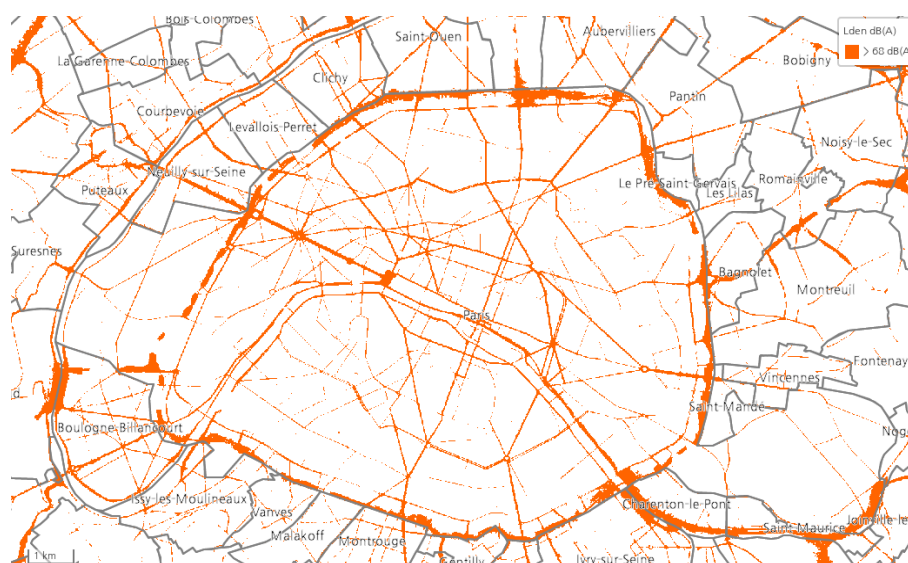


Figure 60. Carte des zones de dépassement de la valeur limite réglementaire de 68 dB(A) pour l'indicateur Lden. Cette carte présente les zones susceptibles de contenir des bâtiments dont les façades sont exposées à un niveau sonore moyen d'au moins 68 dB(A) sur 24h. Tous les habitants d'un immeuble au contact de cette zone sont comptabilisés dans les chiffres d'exposition de la population en dépassement de cette valeur limite.

Source : <https://carto.bruitparif.fr/> consulté en mars 2018

Généralement les cartes de bruit sont produites grâce à une modélisation basée sur des modèles de sources sonores et de propagation acoustique (Picaut, Guillaume & Dutilleux, 2012). C'est le cas de la méthode NMPB (Nouvelle Méthode de Prédiction du Bruit) en France (Dutilleux et al., 2008). Si l'utilisation des modèles est largement plébiscitée par les collectivités car ils permettent

d'obtenir un aperçu de l'environnement sonore, l'approche souffre néanmoins de quelques limites (Guillaume et al., 2016; PICAUT et al., 2017b):

- les simulations nécessitent des capacités de calcul importantes en raison de la quantité de données et d'opérations à réaliser.
- certaines données d'entrée sont difficiles à estimer. En particulier, la principale source de bruit urbain, à savoir le trafic routier, nécessite de nombreuses informations (par exemple, les flux de trafic, la proportion de véhicules légers/lourds, les vitesses respectives des véhicules sur les tronçons...).
- les modèles d'émission acoustique sont simplifiés (par exemple, le trafic urbain est considéré comme constant sur un tronçon).
- les données d'entrée des modèles sont souvent incomplètes (la nature des sols est fixée arbitrairement dans les modèles).
- les données sont souvent inconsistantes entre elles (le nombre d'habitants par bâtiments, utilisé pour estimer l'exposition est souvent issu d'une approximation statistique entre des données de population agrégées à l'échelle d'un quartier et des surfaces-plancher par bâtiments).

Aussi comme le rappellent (PICAUT et al., 2017b) ces limitations ont pour conséquence un manque de réalisme des cartes de bruits réglementaires, qui de plus n'intègrent pas le ressenti des populations.

En complément à la modélisation, des observatoires du bruit ont vu le jour au sein d'agglomérations françaises<sup>89</sup> et européennes<sup>90</sup>. Équipés de capteurs en réseau pour la mesure acoustique, ils constituent des ancrages territoriaux et temporels forts dont les objectifs sont (Vincent et al., 2011) :

- Compléter la démarche organisée autour des outils de cartographie du bruit afin de fournir des mesures plus distribuées spatialement et temporellement,
- Apporter une information publique, claire et indépendante, sur l'état actuel et sur les évolutions des différentes ambiances sonores rencontrées sur un territoire afin de mieux appréhender le ressenti des usagers,
- Anticiper, suivre et capitaliser les connaissances lors de la réalisation de projets d'aménagements.
- Favoriser le transfert des connaissances à destination des différents acteurs du territoire en utilisant les technologies du *WEB*.

Les observatoires du bruit ont une grande utilité pour l'évaluation de l'environnement sonore car le temps long sur lequel ils s'inscrivent, permet non seulement de capitaliser les informations mais aussi de les mettre en perspective et d'en saisir l'évolution. Cependant, leur application à l'échelle d'une agglomération est limitée. Le nombre de dispositifs de points d'observation est restreint : 90 par

---

89 Agglomérations de Dunkerque-Calais, Lille Métropole, Ile-de-France, Grand Lyon, Saint-Etienne Métropole, Grenoble, Nice Côte d'Azur, Aix-en-Provence.

90 Dublin (Irlande), Rotterdam (Pays-Bas), Oss (Pays-Bas), Gdansk (Pologne), Bruxelles (Bruxelles), Turin (Italie), Madrid (Espagne), Barcelone (Espagne).

exemple pour l'Île de France avec *Bruitparif*<sup>91</sup> et 25 environ pour la Métropole de Lyon avec *Acoucité*<sup>92</sup> (PICAUT et al., 2017a). En conséquence, il est impossible de produire des cartes de bruits continues et suffisamment détaillées pour l'ensemble du territoire.

Toutefois, avec l'amélioration des capacités de transfert des données et le nombre croissant d'utilisateurs de smartphones, il est devenu possible d'envisager la conception de réseaux d'observation du bruit pour la construction de cartes. Sur le principe de l'utilisateur contributeur, les capacités météorologiques des smartphones combinées avec le GPS peuvent être mises à profit pour réaliser des mesures plus denses spatialement et temporellement.

Le travail présenté dans cette partie est le fruit d'une collaboration avec l'*Unité Mixte de Recherche en Acoustique Environnementale*<sup>93</sup> dont la volonté a été de tirer profit des capacités méthodologiques et techniques des sciences de l'information géographique pour organiser la collecte, la modélisation, l'exploitation et la restitution des données de bruit dans l'environnement. Cette collaboration a été jalonnée par le développement de deux outils *NoiseModelling* et *NoiseCapture* qui ont abouti à construire vision commune et partagée en faveur d'une infrastructure de recherche pour l'évaluation du bruit dans l'environnement et la constitution d'un patrimoine commun d'outils et de méthodes.

#### **4.4.2.2 *NoiseModelling* : un outil pour cartographier le bruit dans l'environnement**

*NoiseModelling* est un logiciel de modélisation acoustique pour réaliser des cartographies sonores. *NoiseModelling* a été originalement développé dans le cadre du projet de recherche *EvalPDU* dans le but d'évaluer l'impact de différents scénarios d'adaptation d'un plan de déplacement urbain sur la métropole nantaise. Alors qu'il existe des méthodes réglementaires pour la production de cartes de bruit de grandes agglomérations, l'originalité du travail résidait dans la mise au point d'un modèle simplifié de calcul et dans l'intégration de ce modèle au sein d'un SIG (Fortin et al., 2012b).

La démarche proposée a consisté à simplifier la méthode réglementaire française (NMPB 2008), et en parallèle, à optimiser les algorithmes de calcul en utilisant les techniques d'indexation spatiale et les opérateurs géométriques disponibles dans les SIG, l'objectif global étant de réduire de manière significative les temps de calcul et les manipulations de données.

*NoiseModelling* est un module de la plate-forme *OrbisGIS* organisé en 2 parties (Fortin et al., 2012a): *Core* et *SQL functions* (Figure 61). Le noyau (*Core*) contient deux algorithmes l'un pour modéliser les émissions sonores et l'autre pour réaliser la propagation acoustique (Mestayer et al., 2013).

---

91 <https://www.bruitparif.fr/> consulté en mars 2018

92 <http://www.acoucite.org/> consulté en mars 2018

93 <http://www.umrae.fr/> consulté en octobre 2018

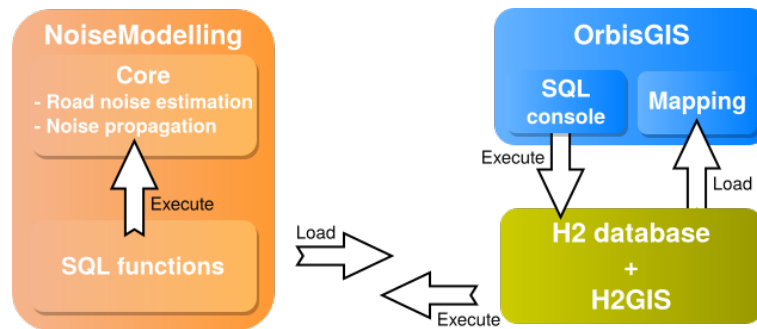


Figure 61: Architecture de NoiseModelling

La modélisation des émissions sonores consiste à décomposer des sources de bruit linéaires (ie tronçons d'un réseau routier) en un réseau de points appelés également sources ponctuelles qui caractérisent une puissance acoustique pour une bande de fréquence donnée. Cette puissance est déterminée selon la nature et l'âge des revêtements des chaussées, l'allure des véhicules... Contrairement à l'approche classique qui consiste à densifier systématiquement l'ensemble des sources de bruit linéaires, nous construisons le réseau de points sources à partir d'une distribution optimisée des récepteurs. La distribution des récepteurs (points pour lesquels les trajets acoustiques seront calculés) est réalisée en utilisant un maillage de Delaunay contraint par les obstacles à la propagation du bruit (ie les bâtiments). A proximité des sources linéaires de bruit un raffinement est appliqué (Figure 62). L'algorithme de maillage est basé sur les travaux de (Bocher & Martin, 2012). Cette technique permet de réduire le nombre de points sources à considérer et donc les temps de calculs.

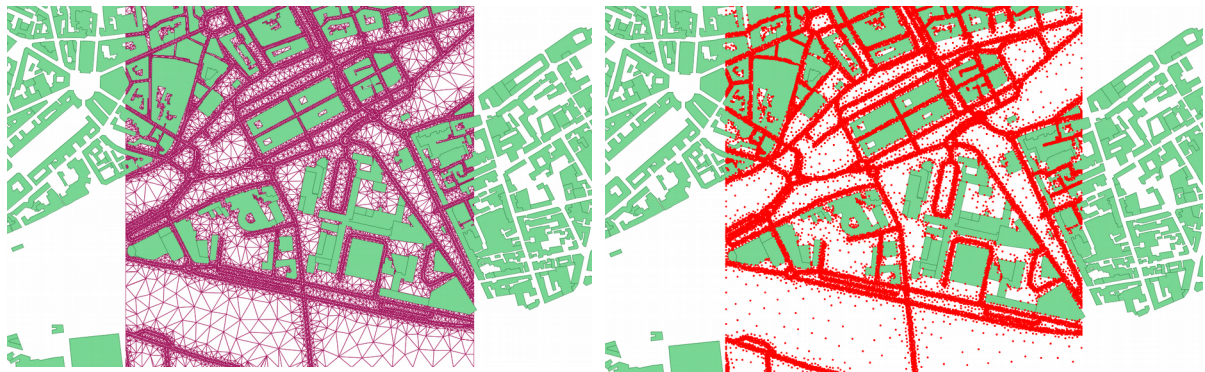


Figure 62: Maillage de Delaunay contraint et adaptatif pour la détermination des récepteurs (à gauche le maillage, à droite les récepteurs) (Fortin et al., 2012a)

L'étape suivante permet de calculer la propagation acoustique depuis un point source donné, vers un point récepteur. Le champ sonore total au point récepteur est obtenu en sommant les différentes contributions du champ sonore direct ou du champ réfléchi spéculairement sur les façades des obstacles et du champ diffracté (Figure 63). Cette complexité dépend de l'ordre de réflexion spécifié au modèle.





Figure 63: Calcul de la propagation acoustique : à gauche en champ direct à droite en champ réfléchi d'ordre 1 (Fortin et al., 2012a)

Précisons ici que la propagation est considérée en deux dimensions (2D). Les trajets réfléchis et diffractés sont dans un même plan horizontal parallèle au sol. En particulier, la diffraction horizontale (contournant les bâtiments par les arêtes verticales) est bien considérée, tandis que la diffraction verticale (contournant les bâtiments par les arêtes horizontales, i.e. par le dessus) est négligée. Dans un environnement multi-sources « dense » comme le milieu urbain, les trajets directs et réfléchis sont de toute façon plus énergétiques que les trajets diffractés. L'impact peut être considéré comme négligeable d'autant que *NoiseModelling* a été développé d'abord pour évaluer l'impact des scénarios de PDU. L'idée est de pouvoir obtenir dans un temps raisonnable des résultats de simulations afin de pouvoir ajuster les scénarios et faciliter les interactions avec les gestionnaires des plans de déplacement. Rappelons qu'une carte de bruit « légale » nécessite des heures de calculs.

Pour terminer, l'émission acoustique étant exprimée par bande de fréquence, un niveau sonore global est calculé pour chaque récepteur ainsi que les indicateurs acoustiques de référence à savoir les  $L_{den}$  (24h),  $L_{night}$  (22h-6h),  $L_{evening}$  (18h-22h) et  $L_{day}$  (6h-22h). Ces indicateurs sont ensuite interpolés pour produire des cartes par plage de niveaux sonores (Figure 64).

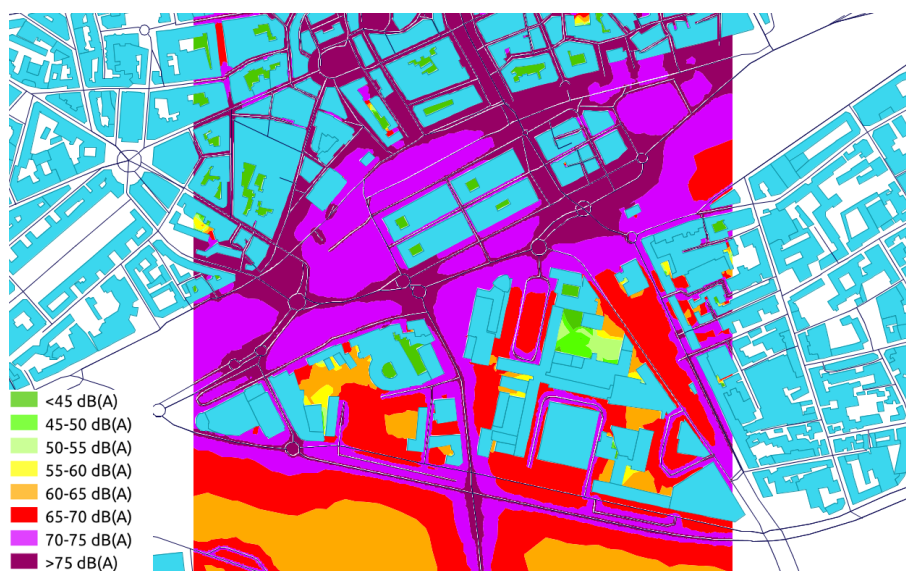


Figure 64: Carte des niveaux sonores représentant l'indicateur de bruit  $L_{den}$  (Fortin et al., 2012a)

La détermination des chemins de propagation constitue classiquement un challenge important dans les logiciels de cartographie sonore dans la mesure où les procédures utilisées concentrent en

général l'essentiel des ressources numériques et, par conséquent, les temps de calcul. Dans *NoiseModelling* les algorithmes développés utilisent les fonctions géométriques disponibles dans les bases de données spatiales, en l'occurrence ici *H2GIS* pour réaliser des calculs d'intersection, de distance... Ils mettent à profit les indexes spatiaux pour optimiser la recherche de données. Ces indexes permettent par exemple de localiser rapidement les bâtiments dans un périmètre donné pour restreindre le nombre de calculs (tests de collision) et le volume de données à utiliser. De cette manière, le code de calcul de *NoiseModelling* peut travailler sur de très grands domaines. Mais l'intégration dans *OrbisGIS* offre également d'autres avantages liés à ces capacités intrinsèques:

- des outils pour collecter et préparer les données nécessaires à la modélisation (connexion par exemple à des flux de données),
- un langage pour construire des analyses spatiales et mettre en perspective les résultats de simulation avec des données socio-démographiques, économiques. Il s'agit par exemple de superposer les distributions de population avec les niveaux de nuisances sonores pour calculer des seuils d'exposition.
- des techniques de cartographies pour représenter des résultats simples (cartographiques par aplats des niveaux sonores) ou plus élaborés. Par exemple, la Figure 65 représente la valeur maximale de bruit en façade d'un bâtiment avec un pseudo rendu 3D.



Figure 65: Cartographie en pseudo 3D de la valeur maximale de bruit pour une journée calculée en façade d'un bâtiment.

Cette cartographie met en œuvre les travaux sur le standard *Symbology Encoding* (voir section 4.3)

*NoiseModelling* a été mis en œuvre sur le territoire de la commune de Nantes pour tester 3 scénarios pouvant avoir un impact sur le PDU (Tableau 10). Une chaîne de traitements a été développée pour automatiser une cartographie de l'indicateur de niveau de bruit global pendant une journée complète (Lden) pour chaque scénario. Les cartes ont ensuite été croisées avec des données de population pour dénombrer le pourcentage de personnes par classes de niveau sonore. Les modélisations ont été effectuées avec les bâtiments et les routes de la BDTopo. Les données de trafic ont été projetées sur chaque tronçon routier à l'aide d'un modèle de trafic (Mestayer et al., 2015). Le tableau 11 fournit la liste des variables obtenues et utilisées.



| Non                  | Code | Description  |
|----------------------|------|--|
| Auto_-25%            | T1   | Baisse de la demande auto en supprimant 25% des déplacements auto qui traduisent un taux de remplissage des véhicules en hausse de 33% |
| Déplacements_+20%    | T2   | Augmentation de la demande globale de déplacement de 20% (hausse de la population ou de la mobilité de 20%)                            |
| Prix_carburant_+100% | T4   | Multiplication par deux des prix du carburant  |

Tableau 10: Liste des scénarios testés

| Description                                    | Type       | Utilisée |
|--|------------|----------|
| Représentation linéaire des tronçons           | LineString | oui      |
| Vitesse moyenne des véhicules                  | Double     | non      |
| Nombre moyen de véhicules légers par heure     | Entier     | oui      |
| Nombre moyen de véhicules lourds par heure     | Entier     | oui      |
| Vitesse des véhicules aux intersections        | Double     | non      |
| Vitesse maximum autorisée                      | Double     | non      |
| Feux de circulation en début et fin de tronçon | Booléen    | non      |
| Vitesse moyenne des véhicules légers           | Double     | oui      |
| Vitesse moyenne des véhicules lourds           | Double     | oui      |
| Altitude de départ du tronçon                  | Double     | non      |
| Altitude de fin du tronçon                     | Double     | non      |
| Longueur du tronçon                            | Double     | non      |

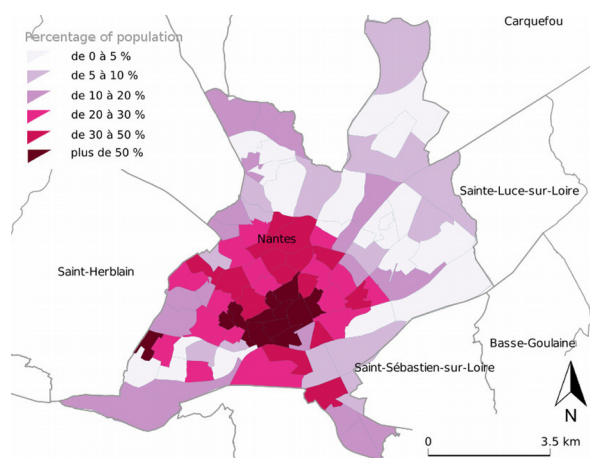
Tableau 11: Liste des variables d'entrée obtenues avec le modèle de trafic et projetées sur les tronçons routiers de la BD Topo

La quantification de la population par classes de niveaux sonores est comparée par rapport à une année de référence 2008. L'impact des scénarios de PDU est négligeable et il n'y a pour l'essentiel pas de report de population entre les classes de niveaux sonores (Tableau 12).

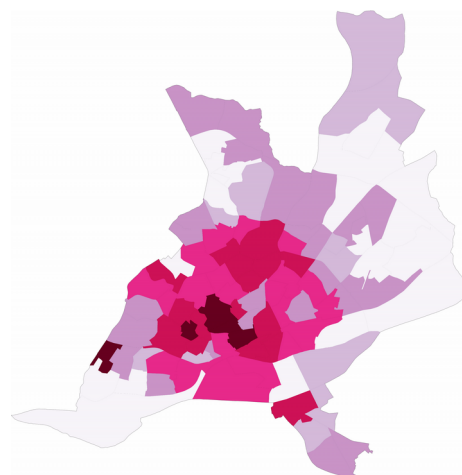
| LDEN     | 2008 base year |      | T 1    |      | T 2    |      | T 4    |      |
|----------|----------------|------|--------|------|--------|------|--------|------|
|          | Number         | %    | Number | %    | Number | %    | Number | %    |
| < 50 dB  | 67 180         | 23.9 | 69 628 | 24.8 | 66 929 | 23.8 | 68 996 | 24.6 |
| 50-55 dB | 29 071         | 10.3 | 28 764 | 10.2 | 27 986 | 10   | 27 458 | 9.8  |
| 55-60 dB | 33 347         | 11.9 | 34 636 | 12.3 | 33 070 | 11.8 | 33 329 | 11.9 |
| 60-65 dB | 54 093         | 19.3 | 57 052 | 20.3 | 51 512 | 18.3 | 54 405 | 19.4 |
| 65-70 dB | 53 505         | 19   | 50 807 | 18.1 | 55 640 | 19.8 | 53 280 | 19   |
| 65-75 dB | 36 243         | 12.9 | 33 254 | 11.8 | 38 092 | 13.5 | 36 017 | 12.9 |
| >75 dB   | 7 478          | 2.6  | 6 776  | 2.4  | 7 688  | 2.7  | 7 431  | 2.6  |

Tableau 12: Répartition de la population par classes de niveau sonore et scénarios

Une représentation cartographique des pourcentages d'habitants soumis à une valeur seuil de dépassement de 68 dB est alors élaborée pour vérifier si l'impact de ces scénarios se distribue différemment sur le territoire. 4 cartes sont produites à l'échelle des IRIS (Figure 66).



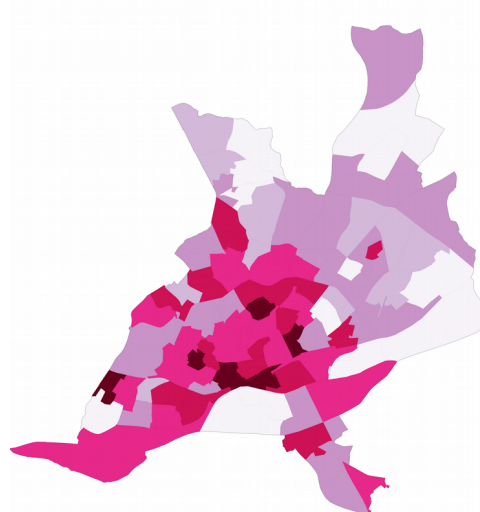
(a) 2008.  
Nombre total d'habitants au-dessus du seuil : 64 600 habitants



(b) T1  
Nombre total d'habitants au-dessus du seuil : 59 396 habitants



(c) T2  
Nombre total d'habitants au-dessus du seuil : 67 574 habitants



(d) T4  
Nombre total d'habitants au-dessus du seuil : 64 167 habitants

Figure 66: Cartographies des pourcentages d'habitants exposés à un seuil de dépassement de 68 dB

Les 3 scénarios montrent une diminution du pourcentage d'habitants exposés pour le centre de la commune avec des disparités géographiques pour le reste. La baisse de la demande auto (T1) amène logiquement à une réduction des pourcentages de population impactée notamment en périphérie, espaces d'échanges majeurs des flux domicile-travail. Ce constat est toutefois à nuancer puisque tout comme pour T2 et T4 on observe un étalement des nuisances sonores. Les pourcentages de population au-dessus des seuils augmentent sensiblement en périphérie. Ces remarques confortent l'intérêt de

placer l'outil SIG au cœur de l'étude du bruit dans l'environnement. En intégrant *NoiseModelling* dans *OrbisGIS*, nous tirons profit non seulement des capacités de ces outils pour gérer des volumes importants de données géographiques mais aussi des possibilités analytiques qui permettent des allers-retours entre la modélisation, la représentation des résultats et leur questionnement sur le territoire. L'idée est bien ici avec le SIG d'établir les conditions d'un dialogue entre le gestionnaire, l'aménageur qui observe les nuisances et le modèle qui permet de se projeter.

Dans cette perspective, l'amélioration de l'expérience utilisateur constitue un élément essentiel pour la prise en main et l'utilisation de *NoiseModelling* par des « utilisateurs finaux » (collectivités, bureaux d'étude...). Cette évolution est aujourd'hui envisagée à deux niveaux :

- L'intégration du modèle dans un service de traitement WPS

*NoiseModelling* est actuellement utilisé en mode « client » (*i.e.* un utilisateur installe les applications sur son propre ordinateur pour effectuer les calculs et les analyses spatiales). Il pourrait être envisagé d'exposer les algorithmes sous la forme de scripts WPS permettant ainsi à un utilisateur final de déporter complètement son étude. L'intérêt serait de pouvoir bénéficier de ressources numériques optimisées et adaptées et de bénéficier systématiquement des derniers développements sur *NoiseModelling* mais également les outils d'*OrbisGIS*. En termes d'application potentielle, cela permettrait par exemple à une collectivité de disposer de cartes de bruit mises à jour régulièrement (en fonction de l'évolution des données d'entrée ou de l'évolution des méthodes de calcul). Les résultats des calculs pour être publiés automatiquement en ligne via des flux de données.

- Le couplage avec des modèles de trafic

La donnée de trafic est essentielle pour la production de cartes de bruit. Les données de trafic sont en général issues de comptages (sur une période donnée) couplés ou non avec des modèles de trafic (logiciel tiers) pour la généralisation des informations de trafic sur l'ensemble des infrastructures linéaires. De fait, les cartes de bruit ainsi produites sont basées sur une donnée de trafic à un instant donné et peuvent aussi dépendre d'un logiciel de modélisation de trafic. L'évolution envisagée consisterait à proposer deux solutions complémentaires, l'une basée sur l'utilisation de données de trafic en Open Data (données de trafic disponibles en ligne gratuitement : transports en commun, informations de circulation mises en ligne par des communautés urbaines...), l'autre basée sur l'intégration d'un modèle de trafic à l'intérieur même de *OrbisGIS*. Là encore, les applications sont particulièrement intéressantes pour les collectivités, puisqu'il pourrait être ainsi possible de produire automatiquement et en « temps réel » des cartes de bruit.

Même si ces évolutions envisagées se tournent d'abord vers une exploitation opérationnelle, autour d'une problématique sociétale et économique, celle de la réduction des nuisances, ces avancées vont de paire avec une recherche en science de l'ingénierie et des systèmes de haut niveau, où convergent les méthodes de la géomatique et celles de l'acoustique environnementale, imposant de développer des savoirs et des techniques en communs.

### **4.4.2.3 NoiseCapture : vers une approche collaborative pour la production de cartes de bruit**

La réalisation de cartes de bruit par la mesure au lieu de la modélisation a longtemps été écartée en raison de la difficulté à réaliser des mesures acoustiques avec un maillage spatial et temporel suffisamment dense. S'il existe bien des observatoires du bruit (*Bruitparif* en Île-de-France ou *Acoucity* pour la Métropole de Lyon, pour les plus connus), le nombre de points de mesure reste très insuffisant pour fournir une représentativité spatiale pertinente.

Avec le déploiement considérable des smartphones et compte tenu de leur qualité technique croissante, une nouvelle voie s'ouvre pour une mesure acoustique fortement distribuée et participative. C'est sur la base de ce concept original que le projet *NoiseCapture* a vu le jour, fruit d'un développement conjoint entre le CNRS et l'Ifsttar. A travers la mise à disposition d'une application pour téléphone *Android*, *NoiseCapture* propose à tout un chacun de devenir un acteur dans l'évaluation du bruit dans l'environnement en contribuant à la production d'une carte collaborative mondiale (Guillaume et al., 2016).

#### **L'application *NoiseCapture***

L'approche repose sur l'utilisation d'un smartphone pour réaliser une mesure acoustique synchronisée avec un déplacement dans l'espace. En pratique, l'utilisateur que nous appelons ici le contributeur:

1. démarre une mesure sur son smartphone ;
2. se déplace le long d'un trajet libre ;
3. stoppe la mesure au bout d'un certain temps ;
4. puis complète, s'il le souhaite, la mesure par quelques informations complémentaires.

L'interface graphique de l'application *NoiseCapture* est scindée en deux parties. La première partie concerne l'enregistrement de la mesure et permet l'accès à des indicateurs acoustiques en temps réel soit graphiquement soit géographiquement : niveaux sonores équivalents pondérés A : « fast », minimal (Min), maximal (Max), moyen (Moy) (Figure 67).

La deuxième partie concerne la description de la mesure et la visualisation d'indicateurs agrégés. L'ajout d'une description peut être une information utile pour évaluer la perception du contributeur avec son environnement sonore et permettre par la suite de calculer un indicateur d'agrément sonore comme le propose (Aumond et al., 2017). Pour faciliter la qualification de la mesure une liste de tags est proposée correspondant aux sources de bruit et aux conditions de mesures. La vue « résultats » permet de synthétiser les indicateurs acoustiques usuels : niveaux sonores équivalents sur 1 seconde (LAeq,1s), distribution des LAeq,1s par plage de niveau sonore sur la durée de mesure (rapportée en pourcentage), valeurs minimale et maximale des LAeq,1s, indices statistiques percentiles LA10, LA50 et LA90, et spectre sonore moyen sur la durée. La vue carte offre un affichage cartographique des mesures réalisées par le contributeur (sous la forme d'une représentation de points) et de l'ensemble des mesures partagées par les utilisateurs de *NoiseCapture*.

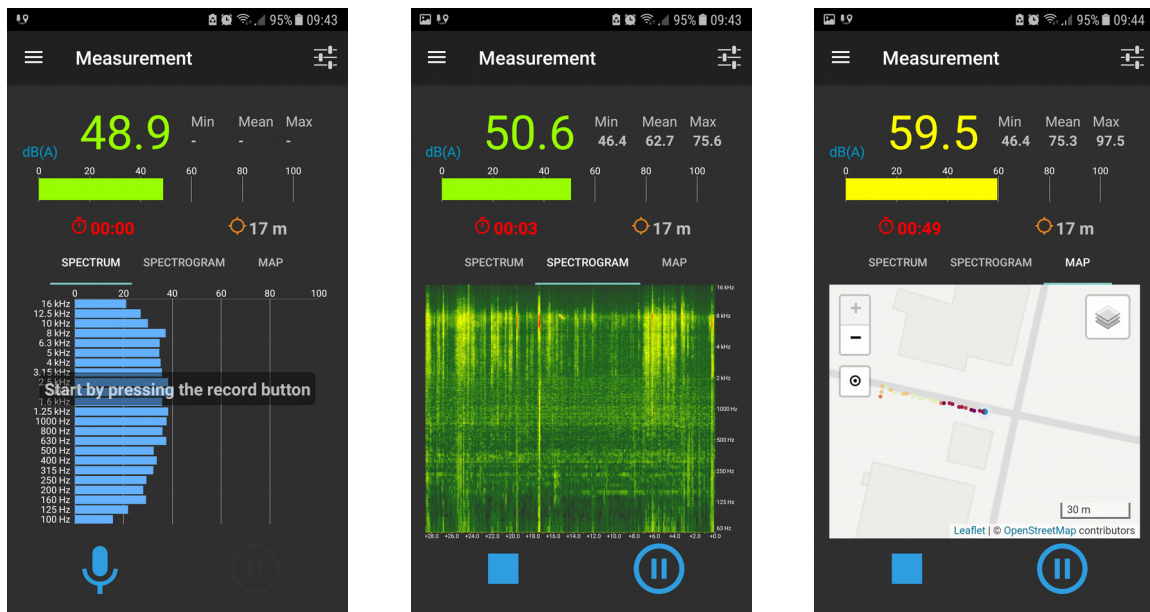


Figure 67: L'application NoiseCapture en cours d'enregistrement. De gauche à droite affichage en mode « Spectre » et « Spectrogramme » et suivi cartographique du trajet en cours de mesure

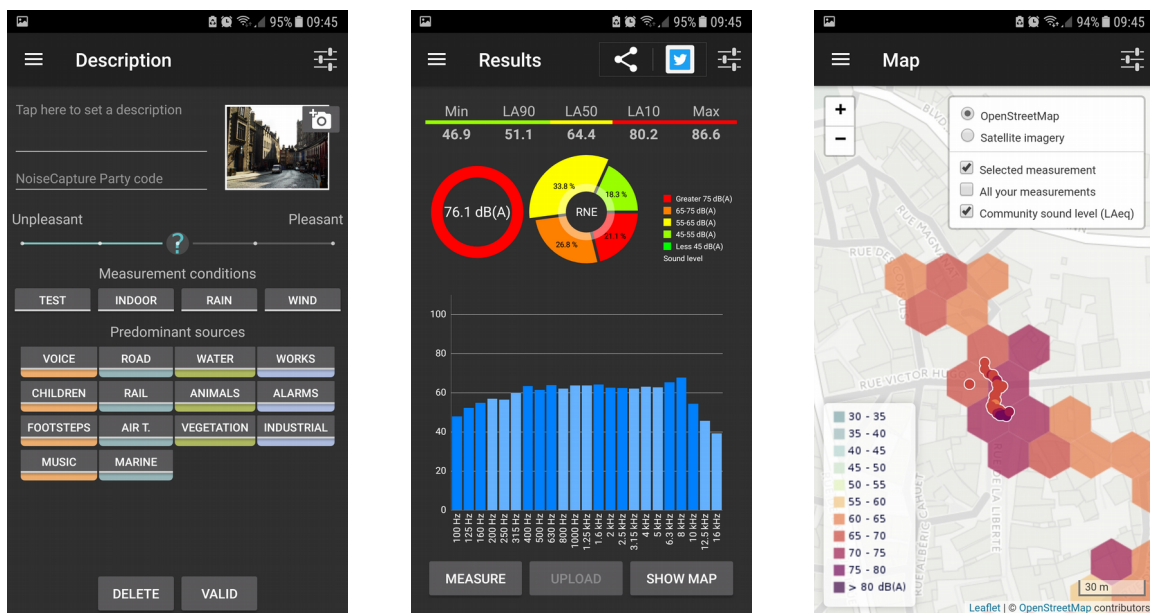


Figure 68: Affichage graphique et géographique des indicateurs calculés à l'issue de l'enregistrement

Au sein de *NoiseCapture* le calcul des indicateurs acoustiques repose sur des algorithmes qui ont été développés spécifiquement pour analyser le signal audio et le traiter en temps réel (Guillaume et al., 2016). Pendant le traitement acoustique, une localisation de la mesure est effectuée en utilisant de préférence le GPS. La date de localisation du GPS pouvant être légèrement désynchronisée avec celle de la mesure acoustique (liée au temps de calcul), une estimation de la précision de la localisation fournie par l'API Android est enregistrée. Cette information va notamment nous permettre de filtrer les mesures aberrantes comme par exemple une mesure acoustique avec une précision de localisation supérieure à 1 500 m.

Les données collectées lors d'une mesure sont stockées dans une base de données interne. Pour partager ses données et contribuer à une base de données géographique communautaire sur l'environnement sonore, l'utilisateur peut décider de les téléverser dans une infrastructure centralisée.

Les données transférées par l'utilisateur prennent la forme d'une archive *ZIP*, contenant 3 fichiers (Bocher et al., 2017) : un fichier *README.html* décrivant les deux fichiers de données *meta.properties* (Tableau 13) et *track.geojson* (Tableau 14). Le premier fichier de données, au format texte, contient des informations générales sur le smartphone et l'application, ainsi que la valeur du LAeq sur la durée de l'enregistrement. Le second fichier au format *GeoJSON*, contient les mesures avec leur géolocalisation.

| Propriétés          | Format/type/unité                  | Description   |
|---------------------|------------------------------------|---|
| version_name        | Chaîne de caractères               | Version de l'application NoiseCapture                         |
| version_number      | Entier                             | Numéro de version   |
| record_utc          | Date UTC (epoch <sup>94</sup> UTS) | Date de l'enregistrement en milliseconde                      |
| build_date          | Date UTC (epoch UTS)               | Date de compilation de l'APK Android                          |
| uuid                | Chaîne de caractères               | Identifiant aléatoire à l'installation de l'application       |
| device_product      | Chaîne de caractères               | Référence du smartphone                                       |
| device_model        | Chaîne de caractères               | Modèle du smartphone  |
| device_manufacturer | Chaîne de caractères               | Marque du smartphone  |
| time_length         | Entier (nombre de secondes)        | Durée de l'enregistrement                                     |
| gain_calibration    | Valeur réelle en dB                | Valeur du gain de calibration                                 |
| tags                | Chaîne de caractères               | Liste des tags séparés par une virgule                        |
| pleasantness        | Entier de 0 à 100                  | Valeur de l'agrément de l'environnement sonore                |
| leq_mean            | Valeur réelle en dB(A)             | LAeq sur la durée de l'enregistrement                         |
| user_profile        | Chaîne de caractères               | Profil <sup>95</sup> utilisateur : 'NONE', 'NOVICE', 'EXPERT' |

Tableau 13: Description du fichier « meta.properties »

| Propriétés   | Format/type/unité      | Description  |
|--------------|------------------------|--|
| geometry     | Point                  | Coordonnées (latitude, longitude, hauteur*)                              |
| leq_mean     | Valeur réelle en dB(A) | Niveau sonore équivalent sur la durée de la mesure                       |
| accuracy     | Valeur réelle en m     | Précision de la localisation GPS (fournie par le GPS, le WIFI ou le GSM) |
| location_utc | Date UTC (epoch UTS)   | Date UTC de la dernière localisation GPS                                 |
| leq_utc      | Date UTC (epoch UTS)   | Date <sup>96</sup> UTC de la mesure                                      |
| leq_id       | Entier                 | Identifiant unique de la mesure  |
| marker_color | Chaîne de caractères   | Couleur utilisée par 'geojson.io' pour une représentation cartographique |
| bearing      | Valeur réelle* en °    | Orientation horizontale du téléphone                                     |
| speed        | Valeur réelle* en m/s  | Estimation de la vitesse   |
| leq_100      | Valeur réelle en dB(A) | LAeq,1s à la fréquence 100 Hz  |
| leq_125      | Valeur réelle en dB(A) | LAeq,1s à la fréquence 125 Hz  |
| ...          | Valeur réelle en dB(A) | ...  |
| leq_12500    | Valeur réelle en dB(A) | LAeq,1s à la fréquence 12500 Hz  |
| leq_16000    | Valeur réelle en dB(A) | LAeq,1s à la fréquence 16000 Hz  |

Tableau 14: Description du fichier « track.geojson ». Les propriétés sont associées à chacun des points de mesure (à chaque seconde) dans un même enregistrement (i.e. un même trajet). En l'absence de localisation GPS, certaines données (marquées du symbole \*) ne sont pas renseignées.

94 Le format 'epoch' définit la date initiale à partir de laquelle est mesurée le temps (<https://fr.wikipedia.org/wiki/Epoch>).

95 Il s'agit de l'appréciation de l'utilisateur sur son niveau de compétence dans le domaine de la mesure acoustique.

96 La date (i.e. l'heure) de la mesure diffère en général de celle de la localisation GPS, en raison d'horloges différentes.

A ce stade, il est important de préciser que *NoiseCapture* ne collecte aucune donnée personnelle, ni d'enregistrement audio, seuls les indicateurs acoustiques calculés sur le smartphone sont conservés.

### L'Infrastructure de Données Spatiales OnoMap

L'IDS *OnoMap* (contraction de *Open noise Map*) est le système central du dispositif *NoiseCapture* (Bocher et al., 2016). Elle met en œuvre l'ensemble des recherches que nous avons menées sur les standards de l'OGC : collecte, partage de données, langage d'analyses spatiales, service de traitements... *OnoMap* repose sur 5 applications installées sur un serveur vers lequel convergent les données de *NoiseCapture* (Figure 69). Elle comprend :

- une base de données spatiales relationnelle.
- un serveur cartographique.
- une bibliothèque de web-carto.
- un service de traitements.
- un catalogue de métadonnées.

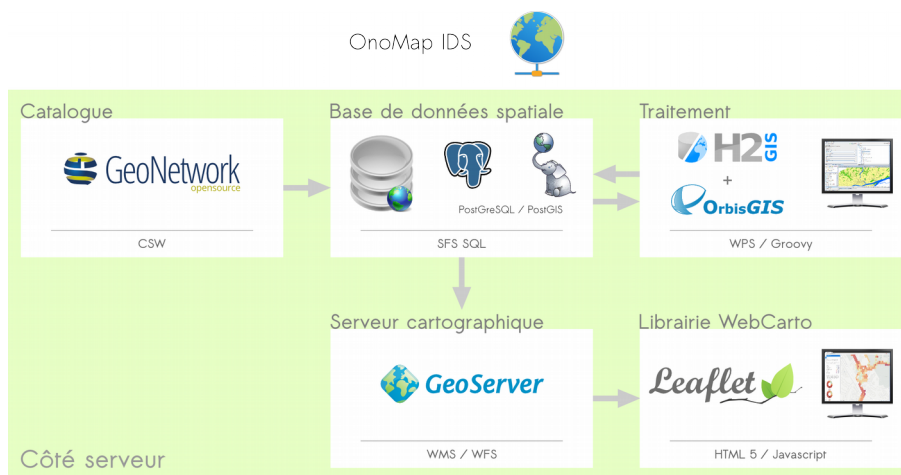


Figure 69: Architecture d'OnoMap

La base de données *OnoMap* est organisée autour de 16 tables dont voici les principales:

- la table *NOISECAPTURE\_USER* contient un minimum d'informations sur l'application installée.
- la table *NOISECAPTURE\_TRACK* stocke les mesures réalisées par les contributeurs par trace.
- la table *NOISECAPTURE\_POINT* stocke la localisation des points de mesures.
- la table *NOISECAPTURE\_FREQ* stocke le niveau sonore par bande de fréquences pour une localisation donnée,



- la table *NOISECAPTURE\_TRACK\_TAG* stocke un couple clé-valeur pour conserver le tag associé à la trace.
- la table *NOISECAPTURE\_TAG* permet de conserver les tags saisis par les contributeurs.

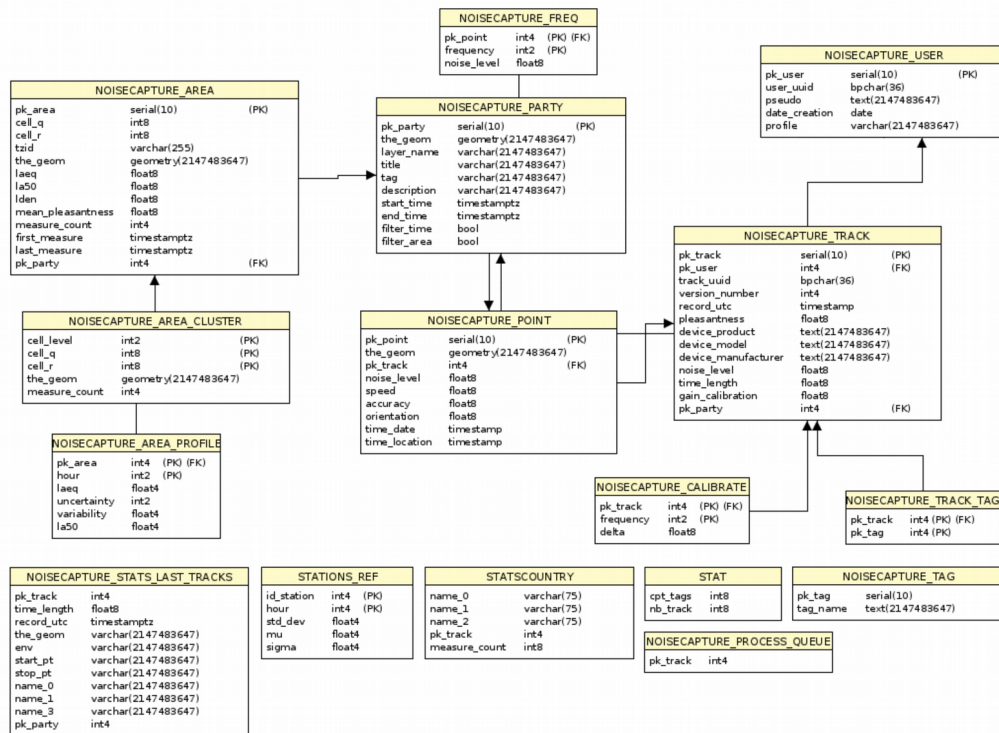


Figure 70: Modèle physique de la base de données OnoMap

Le service de traitements *WPS* est le composant majeur de l'IDS *OnoMap*. Il orchestre la remontée des données via les smartphones, leur mise en base et leurs traitements. Pour cela 3 scripts *WPS* sont appelés successivement.

1. Le premier script *WPS* est utilisé pour établir la communication entre le smartphone et l'IDS. Lorsque l'utilisateur décide de téléverser ses données, une tâche est exécutée sur le smartphone qui consiste dans un premier temps à créer une archive (voir ci-dessous), dans un deuxième temps cette archive est envoyée sur le serveur en utilisant le *WPS* (méthode *push*). L'archive est stockée dans un répertoire temporaire. Elle est analysée. Si son contenu est conforme, les données contenues dans ses fichiers sont extraits pour alimenter les tables de la base de données.
2. Le second script est exécuté pour enrichir une cartographie continue des indicateurs collectés à l'échelle du globe. Cette cartographie utilise une grille par hexagones afin notamment de réduire les déformations d'échantillonnage provoquées par les effets de rupture d'une grille carrée mais également de conserver une cohérence avec la mesure acoustique (voir ci-dessous). Au-delà d'une distance de 15 mètres du point de mesure, le niveau sonore est considéré comme négligeable par les acousticiens.
3. Le troisième script est utilisé pour mettre à disposition de la communauté des contributeurs et des scientifiques les mesures qui ont été collectées et traitées (indicateurs acoustiques en un

point, agrégés à l'hexagone). Elles sont groupées par pays dans une archive qui contient 3 fichiers *GeoJSON*.

Les données organisées dans la base *PostGIS* sont visualisées en temps réel grâce au serveur cartographique qui diffuse des cartes avec différents niveaux d'agrégation. Ces cartes sont intégrées dans un navigateur cartographique personnalisé<sup>97</sup>.

À grande échelle, il s'agit de la position des points de mesure, ainsi qu'une agrégation des données par hexagone. Pour chaque hexagone, l'utilisateur peut consulter le LA50, Laeq, le pourcentage d'agrément sonore et la durée de la mesure (Figure 71).

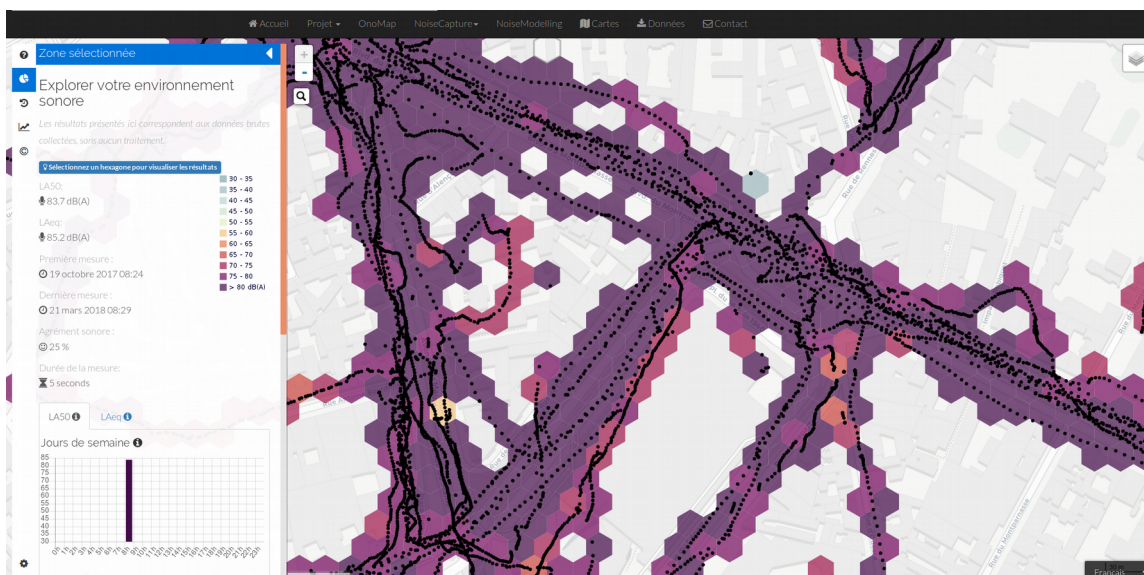


Figure 71: Cartographie par hexagones des indicateurs acoustiques et représentation des points de mesures

Pour les échelles plus petites, les hexagones sont généralisés afin d'afficher en fonction d'une échelle géographique le nombre de mesures réalisées et de visualiser ainsi les principales zones contributrices. La figure 72 donne un exemple à l'échelle du globe, la figure 73 à l'échelle de l'Europe.

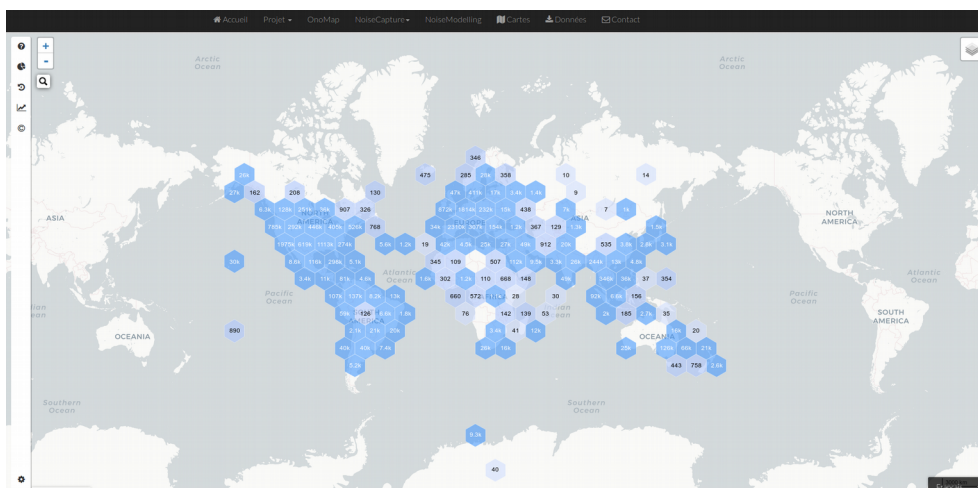


Figure 72: Distribution du nombre de mesures à l'échelle du globe

97 [http://noise-planet.org/map\\_noisecapture/index.html](http://noise-planet.org/map_noisecapture/index.html) consulté en octobre 2018

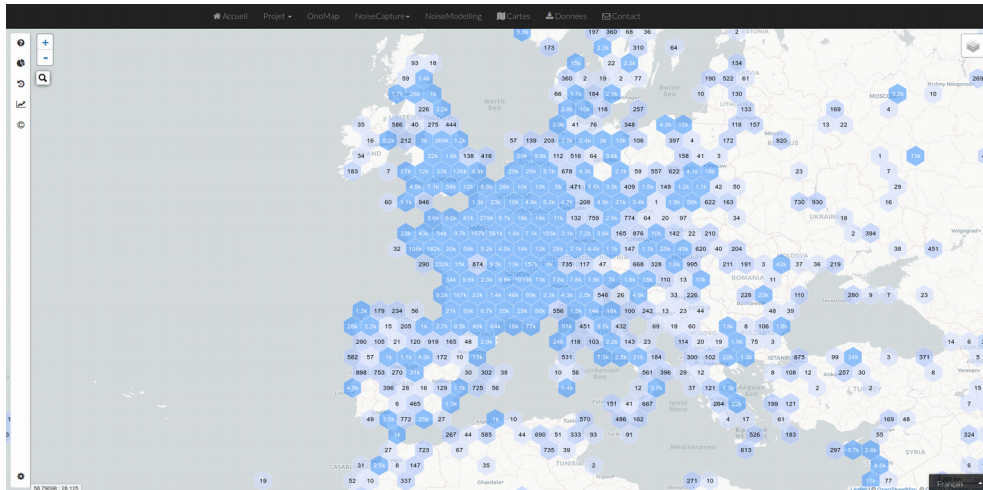


Figure 73: Distribution du nombre de mesures à l'échelle de l'Europe

Des statistiques générales (nombre de mesures, pays contributeurs, distribution des tags, dernière localisation de mesure) sont également disponibles (Figure 74).

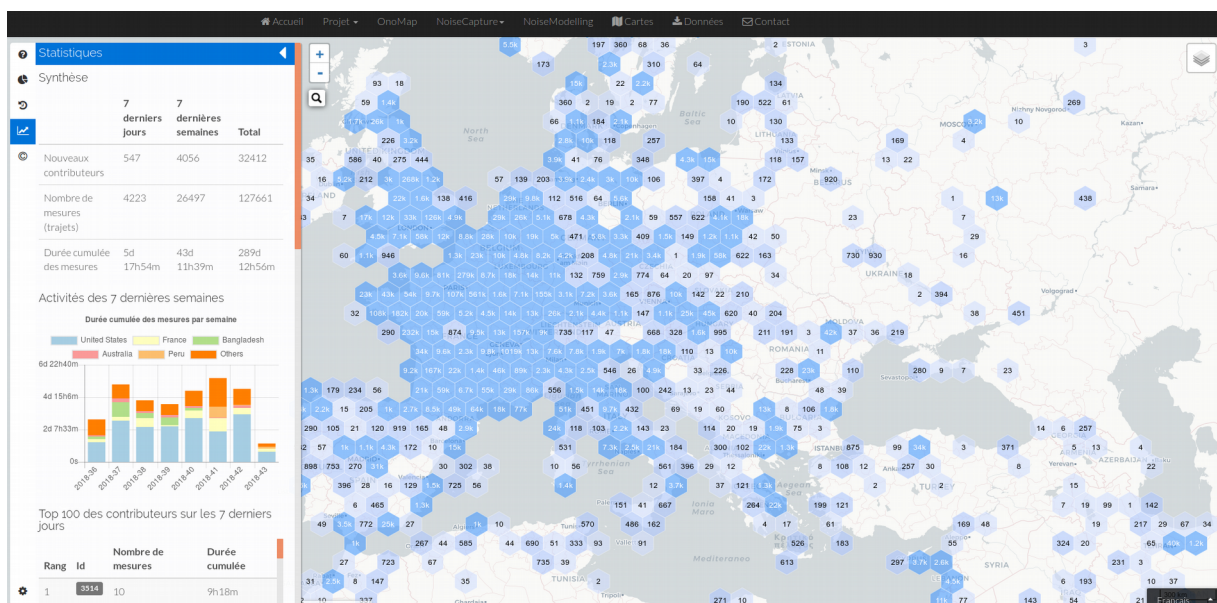


Figure 74: Extrait des statistiques générales disponibles dans le navigateur cartographique

Le projet *NoiseCapture* est une démonstration concrète des possibilités offertes par les nouveaux services géographiques pour élaborer un dispositif intégré, collaboratif et autonome de collecte de données environnementales. En septembre 2018, plus de 27 000 personnes contribuent au projet en réalisant des mesures dans 189 pays principalement aux États-Unis, en France, au Canada, au Royaume-Uni et en Thaïlande (Figure 75). Cette croissance est soutenue et plus de 200 contributeurs nouveaux et actifs s'y ajoutent par semaine.



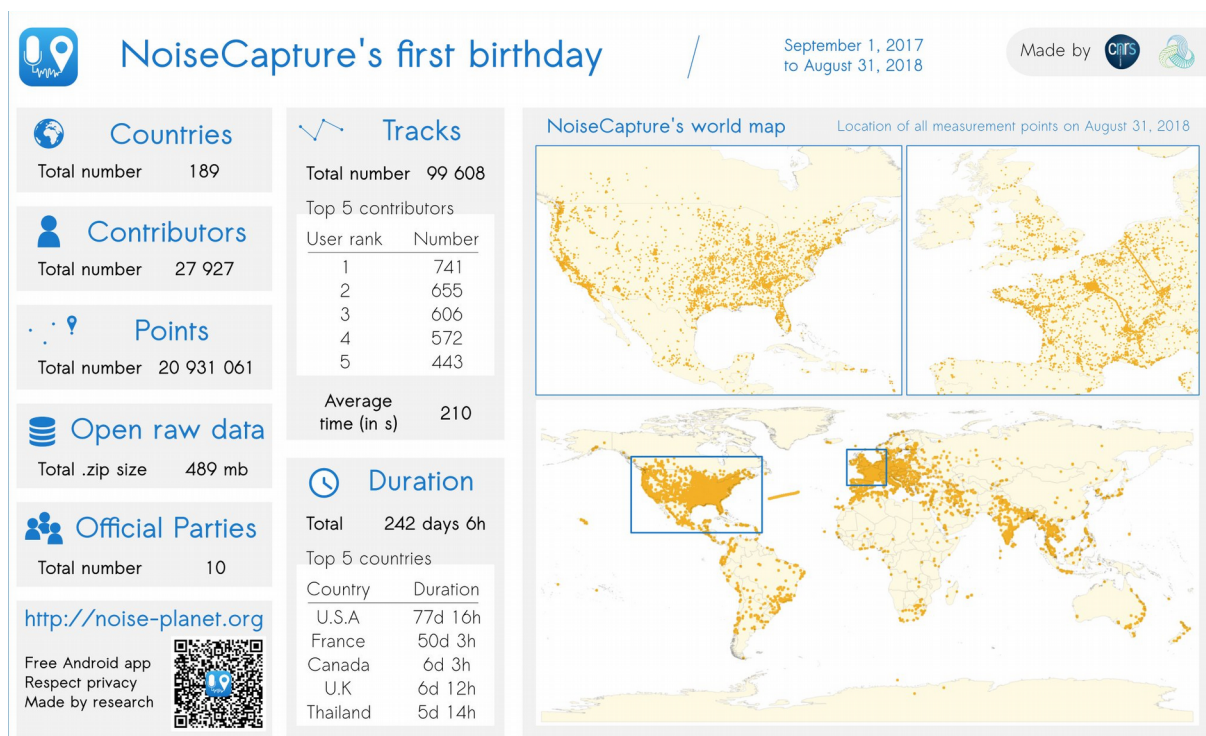


Figure 75: Bilan des contributions au projet NoiseCapture après 12 mois d'utilisation

Source : G. Petit

Avec ces données collectées à l'échelle du globe, le projet *NoiseCapture* offre un échantillon de données de taille inédite (spatialement et temporellement) pour étudier le bruit dans l'environnement. Il peut permettre par exemple de confronter un grand nombre de mesures calculées avec les perceptions des contributeurs et aboutir à la mise en œuvre de cartes de ressenti, comme c'est le cas pour les températures en météorologie.

L'application *NoiseCapture* est également un atout pour animer ou organiser des débats concernant l'impact des nuisances sonores sur les territoires. C'est dans cet esprit que nous avons inventé le concept de *NoiseCapture Party*. Il s'agit d'une campagne de mesures courte, organisée, pour un territoire et une population donnée<sup>98</sup>. Les *NoiseCapture Party* sont également une solution pour maintenir une communauté active.

Clairement, *NoiseCapture* témoigne de la maturité des concepts et des techniques aujourd'hui disponibles en SIG pour capitaliser et structurer des connaissances. *NoiseCapture* est une preuve également de la faisabilité d'un projet de science participative autour d'une question importante de société.

Ce projet fait émerger de nombreux sujets de recherche qui vont nécessiter des collaborations pluridisciplinaires entre géographes, informaticiens, statisticiens et acousticiens. La qualité de la donnée collectée en est un exemple, un sujet essentiel. En effet, celle-ci ne s'apprécie pas uniquement d'un point de vue acoustique.

Les données acquises avec *NoiseCapture* peuvent présenter des incohérences inhérentes au matériel (mesure de la position) ou à son utilisation (smartphone dans une poche). Si les premières peuvent être identifiées grâce à la précision du GPS, les secondes sont plus difficiles car les cas

98 [http://noise-planet.org/noisecapture\\_party.html](http://noise-planet.org/noisecapture_party.html) consulté en octobre 2018

d'usages sont multiples. Certains usages peuvent néanmoins être identifiés en mobilisant des méthodes de fouilles de données pour isoler une mesure réalisée pendant un déplacement rapide (voiture, vélo) ou encore une mesure réalisée à une certaine altitude (en haut d'un immeuble, dans un avion !). L'utilisation de données géographiques a aussi tout son sens dans la qualification de la donnée. En effet, une donnée tierce comme l'emprise des bâtiments peut être exploitée pour préciser la localisation de la mesure. Mais l'utilisation de données géographiques apporte son lot de questions et peut amener des incohérences dans l'exploitation des données. Cela peut être le cas, par exemple, lorsque la base de données géographiques n'est pas phasée avec le moment de la mesure. Ainsi, il est possible qu'une mesure soit réalisée dans un bâtiment sans que ce bâtiment ne soit connu dans la base. La figure donne un exemple d'une mesure réalisée dans le nouveau bâtiment de l'Université Polytechnique de Milan, actuellement inconnu sur la photographie aérienne.



Figure 76: Mesure de bruit réalisée dans la cafétéria du nouveau bâtiment de l'université Polytechnique de Milan (emprise en rouge)

#### **4.4.2.4 Bilan : NoisePlanet – vers une infrastructure de recherche pour l'étude du bruit dans l'environnement**

Le rapprochement de l'acoustique avec le domaine des Sciences de l'Information Géographique a amené de nouvelles manière de produire, d'analyser et de partager l'information. Ancré dans un fonctionnement monolithique (un modèle pour une tâche spécifique), souvent monodisciplinaire (un modèle fait pour l'acousticien et utilisé par l'acousticien), cloisonné (pas de communication entre les outils, des développements redondants qui fonctionnent avec des formats de données et des langages spécifiques), les recherches en acoustique ont glissé vers une approche plus systémique, plus intégrée. Une nouvelle chaîne de traitements pour l'étude du bruit dans l'environnement depuis les sources (smartphones, données de trafic) jusqu'aux cartographies et indicateurs d'exposition des populations a été développée. Cette chaîne a nécessité de repenser en profondeur les outils et les façons de travailler. Les recherches ont portée aussi bien sur des aspects conceptuels (modélisation des données, définition des indicateurs), qu'informatiques (structure de calcul optimisée, métalangage de description, ergonomie) et géographiques (analyses spatiales, cartographie, standards). Les recherches en acoustique se sont enrichies de nouvelles capacités

analytiques en s'organisant autour d'un ensemble de services interopérables. L'Infrastructure de données spatiales *OnoMap* est l'aboutissement de cette transformation. Développée d'abord pour collecter les données de *NoiseCapture*, *OnoMap* se veut maintenant un point unique pour capitaliser, mutualiser l'ensemble des connaissances sur les nuisances sonores. C'est en ce sens que le projet *Noise-Planet*<sup>99</sup> est né. Il vise à construire une infrastructure de recherche pérenne et évolutive pour observer et étudier le bruit dans l'environnement à travers différentes méthodes de mesure et de modélisation (Figure 77). Cette temporalité est essentielle pour la pratique de l'observation car la durée permet non seulement de capitaliser les informations mais aussi de les mettre en perspective et d'en saisir l'évolution.

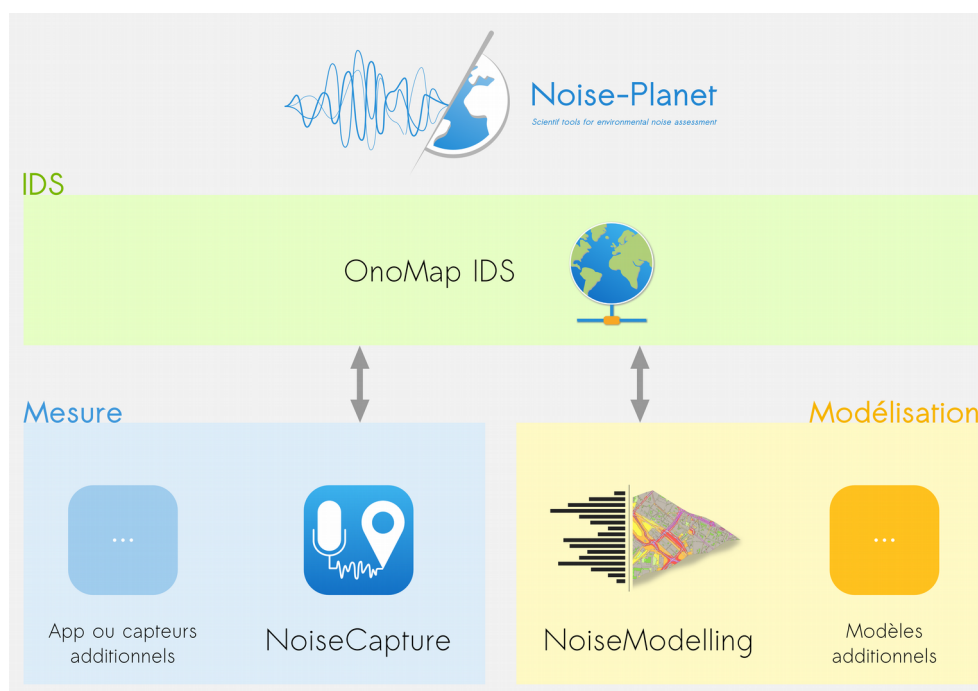


Figure 77: Organisation de l'infrastructure de recherche Noise-Planet

Conçu pour et par la recherche, *Noise-Planet* s'appuie sur les opportunités que représente la mutation numérique, pour ouvrir non seulement les données de la recherche mais également les codes informatiques de ses outils afin de constituer un bien commun réutilisable. *Noise-Planet* se veut un levier pour faire émerger de nouvelles questions de recherche et des nouveaux usages afin que tout un chacun puisse contribuer aux enjeux de la réduction des nuisances sonores.

99 <http://noise-planet.org/> consulté en octobre 2018

## 4.5 Bilan et perspectives scientifiques

### 4.5.1 Bilan

Les recherches présentées, menées **SUR** et **AVEC** les Systèmes d'Information Géographique, s'inscrivent dans une mutation profonde qui a émergé au début des années 2000. D'organisations en silo, cloisonnés, les SIG se sont transformés en architectures distribuées dans lesquelles des programmes sont accessibles en tout lieu et en tout temps. Spécialisés sous la forme de services géographiques, ces programmes assurent les différentes fonctionnalités : abstraction, acquisition, archivage, analyse, affichage. Ils se sont développés grâce aux nouvelles technologies de l'information et de la communication et aux efforts de standardisation suscitant beaucoup d'espoirs pour faciliter la circulation de l'information géographique. C'est une révolution dans les organisations, dans les manières de « faire » à laquelle nous avons contribué. En rupture avec les approches classiques, nous avons choisi de faire du SIG un outil polymorphe, un ensemble de composants qui s'assemblent, s'interchangent pour répondre à des besoins spécifiques. Le SIG n'est plus l'apanage d'un seul et même outil, « un couteau suisse de l'information géographique » mais une collection d'outils qui communiquent entre eux à l'aide de standards.

Dans une logique de systèmes d'information, nous avons expérimenté les nouvelles méthodes et outils qui s'offrent à la recherche pour répondre aux défis environnementaux. Ces défis nécessitent de revoir les manières de produire, d'analyser et de partager l'information géographique. Deux segments du cycle de vie de l'information géographique nous ont particulièrement questionné : celui du partage des analyses spatiales et celui de la cartographie.

Pour le premier, nos travaux montrent que si des efforts ont été réalisés pour permettre aux utilisateurs de disposer d'opérateurs communs pour décrire et accomplir des analyses spatiales avec le standard *Simple Feature For SQL*, il reste encore des verrous à lever. Les images raster, les structures topologiques, les graphes sont par exemple absents de ce standard. Or la mise en œuvre de chaînes d'analyses spatiales peut requérir des opérations protéiformes. C'est le cas en hydrologie spatialisée, où des données raster (Modèle Numérique de Terrain) sont transformées pour construire des objets hydrologiques, comme le bassin versant ou les axes de circulation de l'eau. L'intégration de ces structures de données soulève des enjeux de modélisation : comment stocker dans une base de données relationnelles des images raster ? Les interroger ? Quelle forme d'expressivité pour décrire des opérations sur des rasters ? Nous avons tenté d'y répondre avec la bibliothèque *GDMS*. La question d'un langage unique pour manipuler les données géographiques reste entière pour éviter un cloisonnement technologique. C'est pourtant la direction prise actuellement par tous les éditeurs de bases de données relationnelles (*PostGIS*, *Oracle*) qui proposent des extensions pour les données raster. Il y a une opportunité à saisir pour théoriser et conceptualiser une évolution du standard actuel à l'*OGC*.

Concernant le second, la cartographie, le constat est plus tranché. Notre travail plaide pour une refonte complète du standard actuel qui est :



- inadapté pour élaborer des représentations cartographiques en dehors d'une sémiologie graphique basique,
- contraint technologiquement puisque dépendant d'un format d'encodage des données, le XML,
- figé car il ne dispose d'aucun mécanisme d'extensions.

En retravaillant les bases théoriques de la graphique des données, nous avons isolé un ensemble de concepts qui constituent le socle d'un nouveau standard de cartographie. Ce standard est un modèle qui fournit un jeu de variables graphiques abstraites qui doivent être implémentées dans des extensions pour satisfaire les usages. Une démonstration de ce modèle a été réalisée en proposant un set de symboles pour le modèle de données géométrique 2D *Simple Feature*. Il a permis de montrer qu'il était possible de construire un standard plus expressif, plus riche et en mesure de satisfaire une demande multi-forme de cartes.

Ces travaux nous ont amené à développer la plate-forme *OrbisGIS*. *OrbisGIS* est un écosystème d'outils ouverts au service de la recherche en sciences de l'information géographique. Organisé autour d'une architecture de services, basée sur des standards, *OrbisGIS* a servi de laboratoire pour tester les standards existants et en proposer des adaptations, appréhender de nouvelles formes d'interactions avec les données via des interfaces graphiques comme la console *SQL* ou le générateur d'interfaces automatiques pour le *WPS*.

Les deux cas d'applications présentés, l'un concernant l'étude du climat urbain et le second la problématique de l'évaluation du bruit dans l'environnement, ont permis d'éprouver la mise en œuvre des standards dans une logique de gestion des flux de données. De la mesure à la restitution cartographique ou encore graphique, nous avons construit deux systèmes d'information qui offrent de nouvelles formes d'interaction avec les données géographiques. En climatologie urbaine, une chaîne de traitements générique, réutilisable et automatique sur l'ensemble du territoire français a été mise en œuvre, constituant à ce jour la première base de données à grande échelle disposant d'indicateurs fins (à l'échelle des bâtiments) pour décrire la morphologie et la structure des villes. En acoustique environnementale, c'est une infrastructure de données spatiales pour observer et étudier le bruit dans l'environnement, à travers différentes méthodes de mesure et de modélisation, qui a été mise en œuvre. En position d'interface, ces travaux ont changé le rapport de ces disciplines avec l'information géographique en offrant de nouvelles approches pour **RAISONNER**, **REPRESENTER** et **PARTAGER** les données environnementales. C'est une nouvelle façon de **FAIRE** la science, ouverte et co-construite, qui a été guidée par la **mutation des Systèmes d'Information Géographique entre 2000-2020**.

## 4.5.2 Perspectives scientifiques

Sans nul doute, la géographie est désormais engagée dans la transition numérique. Les travaux que j'ai présentés montrent ainsi à quel point cette transition a été rapide, modifiant les pratiques scientifiques, le fonctionnement des organismes. C'est une lame de fond qui ne cesse d'avancer et qui doit beaucoup à l'évolution des TIC et à une appropriation précoce de l'informatique par les géographes. Les données, les informations géographiques, circulent de manière consciente avec les

plates-formes institutionnelles et de manière inconsciente avec les outils du quotidien. La quantité de données produites disponible ne cesse de croître mettant sous tensions les systèmes informatiques, les hommes et les ressources environnementales. Les outils doivent s'adapter pour intégrer les nouvelles sources de données, accroître leur capacité de stockage, leur capacité analytique. Les interconnexions sont de plus en plus complexes et la multiplication des standards est un baromètre. Ce flux continu de données modifie notre rapport à l'espace, la façon d'appréhender le territoire. Les techniques de la géomatique ne sont plus réservées à un groupe d'initiés mais investissent la vie quotidienne à l'image des applications cartographiques en ligne. A cela s'ajoute la montée en puissance des bases de données collaboratives telle que OpenStreetMap, ou plus proche de nous, l'institutionnalisation de l'ouverture des données publiques. Ces changements soulèvent plusieurs pistes de recherche pour les sciences de l'information géographique. Nous en retenons trois.

### 4.5.3 Pour une harmonisation des standards ouverts de l'information géographique

Les standards ouverts sont le cœur des nouveaux outils de l'information géographique. Ils ont pour objectif de favoriser la circulation des informations en proposant des référentiels communs et documentés. Ils couvrent aujourd'hui tout le cycle de vie de la donnée, « des capteurs à la connaissance ». Cependant, depuis les dix dernières années, le nombre de standards ouverts ne cesse de croître. On y trouve par exemple ceux pour les capteurs (SWE<sup>100</sup>), pour la 3D (CityGML<sup>101</sup> et i3s<sup>102</sup>), pour le Web Sémantique (GeoSPARQL<sup>103</sup>), pour le stockage des données (GeoPackage<sup>104</sup>), pour décrire les données à l'intérieur d'un bâtiment (IndoorGML<sup>105</sup>) ou encore le traitement d'images (WCPS<sup>106</sup>). Cette prolifération des standards met les systèmes sous-tension car il devient difficile de tous les intégrer pour des raisons de coût mais également parce que les modèles qui les décrivent sont cloisonnés. Prenons l'exemple du standard Web Coverage Processing Service (WCPS). Comment expliquer que les acteurs de l'OGC aient soutenu la publication d'un nouveau standard dédié uniquement aux traitements d'images alors qu'il existe une spécification plus générale, Web Processing Service (WPS) pour normaliser les appels et réponses de services de traitements de données géographiques indépendamment du type de données (vectoriel ou image). Cette situation fragilise la qualité et la portée des standards en créant des ruptures technologiques entre les systèmes d'information et *in fine* entre les usagers. L'interopérabilité de l'information géographique doit être une réponse globale où les standards partagent des concepts et des théories communs. L'OGC en ce sens manque cruellement d'une coordination générale qui permettrait d'assurer une convergence des modèles de description, une culture commune de l'interopérabilité. Trop de standards sont guidés par des considérations techniques pour satisfaire des réponses à court de terme ou tout simplement imposer une technologie. L'adoption de KML à l'OGC en est un exemple. Il en va de même récemment avec l'adoption du standard pour les objets 3D, i3s, issus de la société ESRI. Ce standard comme beaucoup d'autres est un référentiel ex-nihilo. On peut s'étonner qu'aucune référence ne soit

100 <https://www.opengeospatial.org/standards/swes> consulté en novembre 2018

101 <https://www.opengeospatial.org/standards/citygml> consulté en novembre 2018

102 <https://www.opengeospatial.org/standards/i3s> consulté en novembre 2018

103 <https://www.opengeospatial.org/standards/geosparql> consulté en novembre 2018

104 <https://www.opengeospatial.org/standards/geopackage> consulté en novembre 2018

105 <http://www.opengeospatial.org/standards/indoorgml> consulté en novembre 2018

106 <http://www.opengeospatial.org/standards/wcps> consulté en novembre 2018

faite à CityGML concernant la description des objets 3D et leurs échanges ou encore à SLD et SE concernant leurs représentations (symbologie).

Pour éviter cet empilement qui dégrade la qualité des standards et la circulation des informations, il est urgent de développer une approche scientifique de l'interopérabilité. Les standards doivent s'appuyer sur des définitions, des énoncés, des caractéristiques, les plus abstraites possibles afin de permettre de construire des corpus partagés. L'enjeu est de les rendre intelligibles, cohérents avec eux-mêmes mais également entre eux en les rattachant à des concepts de haut niveau. À l'image de ce que nous avons proposé pour le standard de cartographie, une spécification doit être neutre tout en étant la plus précise et objective possible. Elle doit être également indépendante d'une technologie et évolutive. Enfin elle doit s'articuler autant que faire ce peu avec des référentiels existants. On comprendrait mal en effet qu'un standard qui décrit la manière de représenter une donnée géographique ne soit pas relié à un référentiel qui décrit le modèle de données d'entrée. C'est pourtant bien le cas avec *Symbology Encoding* qui ne propose par exemple qu'une définition imprécise de l'élément *Raster*.

C'est un processus long et laborieux qui nécessite de retravailler les fondements épistémologiques de l'information géographique et d'identifier sur quels segments du cycle de vie de la donnée les standards peuvent être utiles : acquisition, archivage, analyse et affichage ? On peut ainsi s'étonner qu'en dehors du SQL, il n'y ait pas eu de réflexion autour d'un langage dédié à l'analyse spatiale. Pourtant, de nombreuses recherches ont été réalisées autour des langages (voir section 4.2.1). Nous proposons d'étudier ces différentes contributions et, dans la continuité de la démarche que nous avons engagée pour le standard de cartographie, de formaliser un cadre général pour la définition d'une spécification dédiée à un langage pour l'analyse spatiale, un langage disposant d'une sémantique spécifique, d'opérateurs d'analyses capables d'être déclinées selon les modèles de données d'entrée (raster, géométrie, graphe...).

#### **4.5.4 La qualité des données géographiques en *Open Data***

Les SIG sont des outils incontournables pour la connaissance et la gestion des territoires. Ils ont fait l'objet de développements méthodologiques et techniques importants ces dernières années, notamment dans le domaine de l'Open Source et ont aujourd'hui atteint la maturité technologique. Les outils Open Source ont en effet été les premiers à mettre en œuvre des standards pour structurer, questionner et représenter les informations géographiques, facilitant leur diffusion.

Soutenus par un cadre européen favorable (Directive Inspire), les grands acteurs publics (Services de l'État, Collectivités régionales et départementales) s'en sont emparés pour mettre en œuvre des Infrastructures de Données Spatiales (IDS) et porter ainsi des informations géographiques à la connaissance des usagers en utilisant le *Web*.

Parallèlement à cette transformation, les technologies *Open Source* et les standards ouverts ont favorisé l'émergence de nouvelles sources de données libres à l'image du projet *OpenStreetMap*. Les acteurs de la géomatique après avoir longtemps ignoré ce mouvement, l'ont adopté pour exploiter de nouvelles sources de données mais aussi attirer des utilisateurs ; participant ainsi à l'organisation d'une dynamique « institutionnelle » autour des données ouvertes (*Open Data*). C'est le cas par

exemple de la mission d'Etalab<sup>107</sup>. La Loi pour une République Numérique<sup>108</sup> promulguée le 5 octobre 2016 aborde également la problématique de l'Open Data. Elle y fixe un cadre et des objectifs pour son déploiement.

Dans une société qui réclame plus de transparence et d'équité, l'*Open Data* est devenu l'un de ses faire-valoir. Les initiatives se sont multipliées conduisant à une volumétrie considérable de données ouvertes entamant parfois l'enthousiasme des utilisateurs ; particulièrement dans le domaine des données géographiques. En 2017, le groupe de travail *Open Data* de l'AFIGÉO note ainsi que près de la moitié des jeux de données ouverts en France sont des données géographiques (AFIGEO, 2017). De plus, une très forte proportion des données peut être liée directement ou indirectement à une localisation et rattachée à une géométrie.

Face à la prolifération des données, les utilisateurs sont souvent démunis pour identifier les données pertinentes et appropriées. En effet, l'augmentation du volume de données et du nombre de plates-formes de mise à disposition n'a pas été suivie d'efforts méthodologiques ou de développement d'outils pour contrôler leur qualité et par conséquent la pertinence de leurs usages. Bien au contraire cette masse de données a éloigné les utilisateurs des questions de qualité en concentrant leur attention d'abord sur le service et sa plus-value. Or certaines données peuvent être satisfaisantes pour un usage tandis qu'elles se révéleront parfaitement inexploitable pour d'autres.

Il s'ensuit que la réutilisation des données ouvertes devient aujourd'hui un des facteurs limitant de la chaîne d'analyse et ce d'autant que bien souvent ces données ne suivent pas des règles de description aussi strictes que dans les IDS (norme de métadonnées).

En outre, si les nouvelles bases de données collaboratives (telle que *OpenStreetMap*) ainsi que les bases Open Data spécifiques (collectivités territoriales, acteurs privés,...) pallient certains défauts des référentiels historiques, elles ne lèvent pas tous les problèmes de qualité (incohérences, hétérogénéité, couvertures spatiale et temporelle, description sémantique).

Dans ce contexte, il est fondamental de mettre en place des procédures de convergence et de consolidation de la qualité des données ouvertes utilisées dans les SIG. C'est l'objectif d'une thèse que je dirige aujourd'hui et qui porte sur l'«Analyse de la qualité des données géographiques en Open Data.» Il s'agira de fournir un dispositif méthodologique et technique qui doit permettre à un utilisateur d'exprimer ses attentes en terme de qualité des données et de les vérifier. La qualité s'exprime donc ici d'abord en fonction d'un usage souhaité de la donnée et non uniquement de la conformité à des métriques (par exemple superposition, redondance de géométries) comme cela est le cas dans la grande majorité des outils.

#### **4.5.5 Quelle géographie au service de l'environnement ?**

Le domaine des sciences de l'information géographique traverse une période de changements majeurs liés aux impératifs de la production de connaissances utiles et immédiatement transférables. Les enjeux actuels autour de l'environnement et du climat incitent les décideurs à concevoir et mettre

---

107 <https://www.etalab.gouv.fr> consulté en octobre 2018

108 <https://www.legifrance.gouv.fr/affichLoiPubliee.do?idDocument=JORFDOLE000031589829&type=general&legislature=14> consulté en octobre 2018

<https://www.legifrance.gouv.fr/affichLoiPubliee.do?idDocument=JORFDOLE000031589829&type=general&legislature=14> consulté en octobre 2018

en place des dispositifs techniques pour en mesurer les impacts sur les territoires et les populations. Les progrès dans les TIC, dans les interfaces hommes-machines, la multiplication des sources de données notamment en open data ou encore la disponibilité de solutions clés en main, libres d'accès ou à moindre frais, offrent, avec une facilité déconcertante la possibilité à tout un chacun d'être un acteur de la « datasphere ». Le navigateur cartographique en ligne, l'infrastructure de données spatiales sont à portée de clics. Quant aux capacités matérielles pour faire fonctionner ces outils, le sujet est anecdotique. Il suffit de déplacer un curseur sur le site internet de son fournisseur pour accroître les capacités d'une machine, augmenter la taille de son disque dur, la bande passante, ajouter de nouveaux processeurs... Il s'en suit une multitude d'applications dont l'efficacité dans la gestion du territoire et la prise de décision est bien discutable. Malgré les grands efforts de mutualisation engagés par les géo-plateformes régionales, il est courant sur un même territoire de disposer de plusieurs outils qui offrent des services identiques, redondants. Cette redondance est bien souvent justifiée par les particularités d'un service (champ d'actions) ou par la volonté d'affirmer politiquement son périmètre territorial. En dehors des référentiels géographiques, les mutualisations sont bien minces. On aurait pu penser pourtant que les réorganisations territoriales successives, notamment récemment en faveur des EPCI (Établissement Public de Coopération Intercommunale), fournissent les conditions pour rationaliser et rapprocher les services sur les territoires.

L'urgence environnementale est pourtant là et nul ne peut le contester. Cette urgence impose d'améliorer les coopérations entre les services, de converger vers une gestion plus systémique des territoires. Agir dans un syndicat de protection de la ressource en eau en dressant des barrières végétales pour limiter les phénomènes de ruissellement doit aussi permettre de réduire la fragmentation des habitats naturels dans le cadre de la politique « trame verte et bleue » d'une commune. À une autre échelle, les barrières végétales peuvent servir dans des programmes plus globaux de piégeage du carbone ou s'intégrer dans le développement d'une économie locale de production de bois de chauffage. Ces exemples d'actions vertueuses ne manquent pas. Leur mise en pratique nécessite néanmoins que la connaissance soit partagée, que l'information circule. Si, dans ce champ, les outils de l'information géographique ne font plus défaut, en revanche il devient urgent de revoir leur mode de gouvernance. Lorsque l'on met en perspective les impacts environnementaux du numérique (énergie, matières premières, terres rares...) on comprend vite que si l'amélioration de la gouvernance de l'information géographique doit permettre de rendre plus efficace l'intervention publique, elle répond aussi à une démarche plus globale, celle de la sobriété (ADEME, 2018). Malheureusement, avec le numérique, la tendance de fond dans les villes est d'accroître les dispositifs de collecte à travers notamment les projets de *Smart City* (Ait-Daoud et al., 2010; Flipo, Dobré & Michot, 2013; Gouze, 2017). Sur le papier, les arguments sont séduisants et affûtés. Les data, les capteurs, la technologie de manière générale vont améliorer le quotidien des usagers. Le traitement d'une multitude de données permettrait aux villes de mieux utiliser leurs ressources et, ainsi, d'améliorer leur efficacité environnementale (?). La concurrence entre les villes, particulièrement les métropoles, exacerbe cette tendance. Le concept de *Smart City* est aussi un outil de politique générale qui sert pour la communication, pour attirer les talents, dynamiser l'économie en créant de nouveaux axes de développement. Cette évolution doit interroger le géographe à plusieurs titres :

- La concentration des ressources, des savoirs ne conduit-elle pas à accentuer les fractures territoriales ? Ne conduit-elle pas à des ruptures d'égalité avec ces villes qui disposent des moyens d'agir, d'expérimenter ?
- Quelle est l'efficacité réelle de ces dispositifs dans les prises de décision, dans la mise en œuvre, dans l'évaluation des politiques d'aménagement ?

- Quel doit être le rôle des métropoles dans les grandes transformations environnementales ? Les technologies accélèrent l'épuisement des ressources. Elles sont consommatrices de métaux rares. Leur recyclage est une véritable difficulté car les quantités sont noyées dans une myriade d'équipements.

Cette hystérie technologique qui nous pousse dans des états d'ébriété face à des quantités colossales de données percute le domaine des sciences de l'information géographique. Elle nous mène dans des voies irrésistibles où la technique peut prendre le pas sur l'objet d'étude, la question posée. Il est tellement plus flatteur et plus « vendeur » d'avoir à son actif dans un projet de recherche la réalisation d'un navigateur cartographique 3.0 ! Les récents progrès dans le domaine de l'intelligence artificielle sont une autre raison de nous interroger. Les quantités de données géographiques vont-elles faire parler d'elles-mêmes les territoires ? L'idée de ne plus avoir besoin de théoriser l'espace, ses structures, ses relations fait son chemin. Nous n'aurons plus besoin à priori de modéliser. Les choses sont bien entendu plus complexes car la performance d'un algorithme en IA dépend très largement de la qualité de la donnée source (Carolin, 2017). Heureusement, la donnée géographique est souvent entachée d'incertitudes (spatiale et temporelle), le fruit d'une abstraction du territoire, le produit d'une multitude d'acteurs.

Notre propos ici n'est pas de congédier l'ensemble des progrès et des futures avancées dans le domaine des sciences de l'information géographique qui sont indispensables, mais de replacer certaines orientations de recherche et de les interroger au regard des urgences environnementales. Au centre de notre interrogation se trouve la donnée géographique et la juste place qu'elle doit occuper pour servir les problématiques environnementales. Il nous faut nous questionner sur l'utilité d'acquérir et de produire des données géographiques de plus en plus fines au regard par exemple de la manière dont elles sont réutilisées dans les prises de décision. En effet, les données sont bien souvent agrégées à des échelles géographiques utiles pour le décideur : la commune, le quartier. Il en va de même de l'alimentation des modèles comme par exemple ceux pour l'étude de la micro-climatologie urbaine où la tendance est au « downscaling » (descente d'échelle) afin d'améliorer la résolution spatiale des prévisions climatiques. Est-il pertinent d'injecter des données à une échelle métrique, celle des bâtiments, dans un modèle qui par la suite décompose le territoire et réalise des calculs physiques sur des mailles de 250 à 500 mètres carrés ? Cette question n'est pas nouvelle en soi. Néanmoins, si les volumes de données, leur granularité voire simplement leur existence doivent permettre de poser de nouvelles questions scientifiques, elles ne doivent pas non plus nous écarter des principes de rigueur et de distance scientifique. En effet, ce n'est pas parce que les données sont plus riches, plus nombreuses que le phénomène sera mieux restitué. Comme le rappelle (Ollion, 2015), « l'augmentation du nombre des données disponibles ne doit pas être confondue avec leur utilité pour la recherche ».

Pour tenter de répondre à ces questions, nous proposons de développer une recherche reposant sur le triptyque **Ge**ographie, hu**Ma**nité et **Num**érique, contracté par l'acronyme GeoMaNum. Il s'agit d'une recherche qui utiliserait à bon escient les outils de connaissance et d'évaluation dans une approche d'ingénierie des modèles (*Model-Driven*), guidés par l'humain, à contrario des approches dirigées par les données (*Data-Driven*). Le principe est de construire des méthodes qui posent comme règle de base que nos impacts sur l'environnement sont le fruit d'une organisation, d'une structuration et de pratiques que nous avons des territoires. Si cette approche est classique en géographie et notamment lorsque l'on construit des analyses spatiales, elle relève tout son intérêt lorsqu'elle est utilisée conjointement avec des outils de modélisation comme ceux de la cartographie du bruit ou encore de l'îlot de chaleur urbain. En effet, nous faisons l'hypothèse qu'il est possible, en confrontant des résultats provenant de simulation avec des référentiels géographiques et des avis d'experts, de déduire des modèles d'organisation. Nous pensons par exemple que les zones propices au phénomène

d'îlot de chaleur en ville peuvent être identifiées à partir d'un modèle d'analyses spatiales multi-critères combinant des indicateurs géométriques et des données socio-économiques. En d'autres mots, qu'il existerait des contextes favorables ou défavorables à tel phénomène environnemental qui sont théorisables par une lecture du territoire. On sait aujourd'hui par exemple que la typologie de l'habitat (dense, ouvert) influe sur la consommation énergétique des villes. Une maison de ville est environ trois fois moins énergivore en cas de mitoyenneté des deux cotés.

Le recours à des modèles d'organisation basés sur des données géographiques offre également comme avantage de limiter le recours à des simulations coûteuses en temps et en énergie. De plus, en nécessitant moins de capacité de calcul, il laisse une place à la construction de scénarios d'aménagements du territoire et à la prospective et favorise ainsi les interactions entre les différents acteurs. Même si les résultats d'une simulation d'un modèle physique n'ont pas la même signification qu'un modèle d'organisation, plus simplificateur, on peut aisément imaginer qu'en terme de décision, il soit plus acceptable pour un gestionnaire de mettre en œuvre une méthodologie dont le résultat sera connu au bout de quelques minutes versus un code de calcul qui va tourner pendant plusieurs jours. Dans un autre registre, l'utilisation de méthodes moins gourmandes algorithmiquement sont un atout pour diffuser les connaissances au plus grand nombre, notamment aux territoires disposant de moins de ressources technologiques.

Ce tableau ne pourra néanmoins fonctionner que si les données sont disponibles, accessibles et de qualité. Dans ce domaine, le collectif OpenStreetMap a bouleversé les pratiques en offrant à tout à chacun la possibilité de visualiser mais surtout de participer à la construction d'une carte mondiale. Les opérateurs publics sont restés pendant de nombreuses années bien en retrait de cette transformation. Il en va de même de la recherche, qui en dehors d'études sur la qualité de ces données, tarde encore à les mobiliser pour construire des analyses géographiques. Pourtant, OpenStreetMap offre des perspectives intéressantes. L'étendue de la couverture géographique de la base de données permet de tester la transportabilité d'un modèle, d'une méthode. L'aspect collaboratif du projet est un atout notamment lorsque l'on s'intéresse à un sujet de société tel que l'environnement car il peut mobiliser des contributeurs soucieux de ces questions. Ce type de projet ouvre la voie aux sciences participatives, associant les citoyens amateurs aux activités scientifiques pour la collecte des données et parfois la co-création ou l'interprétation des résultats. Outre un enrichissement de la production des connaissances, ce type d'approche sensibilise les citoyens aux méthodes et à l'esprit scientifiques comme l'a rappelé le Comité d'éthique du CNRS (COMETS), le 25 juin 2015<sup>109</sup>.

---

109 [http://www.cnrs.fr/comets/IMG/pdf/comets-avis-sciences\\_citoyennes-25\\_juin\\_2015.pdf](http://www.cnrs.fr/comets/IMG/pdf/comets-avis-sciences_citoyennes-25_juin_2015.pdf) consulté en décembre 2018



## 5 BIBLIOGRAPHIE

ADEME. 2018. La face cachée du numérique.

AFIGEO. 2017. *L'Information Géographique et l'Open Data*. Paris.

Aime A. 2010. GeoServer Cartographic Rendering. In: Barcelona, 58.

Ait-Daoud S, Laqueche J, Bourdon I, Rodhain F. 2010. Ecologie & Technologies de l'Information et de la Communication (TIC) : une étude exploratoire sur les éco-TIC. *Management Avenir* n° 39:307–325.

Andrae C, Graul C, Over M, Zipf A (eds.). 2011. *Web portrayal services: OpenGIS web map service, styled layer descriptor, symbology encoding und ISO 19117 portrayal vorgestellt und erläutert*. Berlin: Wichmann.

Aumond P, Can A, De Coensel B, Botteldooren D, Ribeiro C, Lavandier C. 2017. Modeling Soundscape Pleasantness Using perceptual Assessments and Acoustic Measurements Along Paths in Urban Context. *Acta Acustica united with Acustica* 103:430–443. DOI: 10.3813/AAA.919073.

Baumann P. 2009. *Web Coverage Processing Service (WCPS) Language Interface Standard*. Wayland, Massachusetts: Open Geospatial Consortium Inc.

de la Beaujardiere J. 2006. *OpenGIS® Web Map Server Implementation Specification*. Wayland, Massachusetts: Open Geospatial Consortium Inc.

Berglund B, Lindvall T, Schwela D. 1999. *Guidelines for Community Noise*. Genève: World Health Organization.

Bernabé A, Bernard J, Musy M, Andrieu H, Bocher E, Calmet I, Kéravec P, Rosant J-M. 2015. Radiative and heat storage properties of the urban fabric derived from analysis of surface forms. *Urban Climate* 12:205–218. DOI: 10.1016/j.uclim.2015.04.001.

Bernard J, Bocher E, Petit G, Palominos S. 2018. Sky View Factor Calculation in Urban Context: Computational Performance and Accuracy Analysis of Two Open and Free GIS Tools. *Climate* 6:60. DOI: 10.3390/cli6030060.

Bernard J, Musy M, Calmet I, Bocher E, Keravec P. 2017. Urban heat island temporal and spatial variations: Empirical modeling from geographical and meteorological data. *Building and Environment* 125:423–438. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.08.009.

- Bertin J, Berg WJ. 2010. *Semiology of graphics: diagrams, networks, maps*. Redlands, Calif: ESRI Press : Distributed by Ingram Publisher Services.
- Bishr Y. 1998. Overcoming the semantic and other barriers to GIS interoperability. *International Journal of Geographical Information Science* 12:299–314. DOI: 10.1080/136588198241806.
- Bocher E. 2007. *Projet d'infrastructure de données spatiales*.
- Bocher E. 2008. *Audit sur les données du Secteur Atelier Pluridisciplinaire*. Nantes, France: IRSTV.
- Bocher E, Ertz O. 2015. Towards Cartographic Portrayal Interoperability – the Revision of OGC Symbology Encoding Standard. In: *Proceedings of the 1st ICA European Symposium on Cartography*. Vienne, Austria, 116–119.
- Bocher E, Ertz O. 2018. A redesign of OGC Symbology Encoding standard for sharing cartography. *PeerJ Computer Science* 4:e143. DOI: 10.7717/peerj-cs.143.
- Bocher E, Ertz O, Laurent M, Hégron G, Petit G, Rappo D. 2011. Cartographie et standard : du modèle à l'utilisateur. In: *Proceedings of the 25th International Cartographic Conference Paris, 3-8 July 2011*. Paris: ICC.
- Bocher E, Leduc T, Long N, Gonzales Cortès F. 2007. UrbSAT: outil d'extraction d'informations géographiques et de production d'indicateurs. *Journées "Information géographique et observation de la terre" organisées conjointement par les GDR SIGMACassini et I 3*.
- Bocher E, Leduc T, Long N, González Cortés F, Moreau G. 2008a. urbSAT: from spatial SQL to urban indicators. In: *Free and Open Source Software for Geospatial Conference - FOSS4G'2008*. Cape Town, South Africa.
- Bocher E, Leduc T, Moreau G, Cortès FG. 2008b. GDMS: an abstraction layer to enhance Spatial Data Infrastructures usability. In: *11th AGILE International Conference on Geographic Information Science-AGILE'2008*.
- Bocher E, Lepetit A. 2006. Infraestructura de Datos Espaciales Móvil con gvSIG. In: *Jornadas Internacionales gvSIG*. Valencia, Spain: Conselleria d'Infraestructures I Transport – Generalitat Valenciana.
- Bocher E, Lepetit A, Taddei H. 2006. Building a SDI with OpenJUMP. In: Lausanne, 28.
- Bocher E, Martin J-Y. 2012. TAnaTo2: A Tool to Evaluate the Impact of Natural and Anthropogenic Artefacts with a TIN-Based Model. In: Bocher E, Neteler M eds. *Geospatial Free and Open Source Software in the 21st Century*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 63–85. DOI: 10.1007/978-3-642-10595-1\_5.

- Bocher E, Petit G. 2013. ORBISGIS: Geographical Information System Designed by and for Research. In: Bucher B, Le Ber F eds. *Innovative Software Development in GIS*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 23–66.
- Bocher E, Petit G, Bernard J, Palominos S. 2018. A geoprocessing framework to compute urban indicators: The MApUCE tools chain. *Urban Climate*.
- Bocher E, Petit G, Fortin N, Picaut J, Guillaume G, Palominos S. 2016. OnoM@ p: a Spatial Data Infrastructure dedicated to noise monitoring based on volunteers measurements. In: *OGRS2016, Open Source Geospatial Research & Education Symposium*. 11p.
- Bocher E, Petit G, Gueganno A, Fortin N, Gourlay A, Ertz O. 2012. *Séminaire de restitution du SOGVILLE (Système d’Observation Géographique de la Ville)*.
- Bocher E, Petit G, Lecoeuvre M. 2014. *H2Network : un outil pour la modélisation et l’analyse de graphes dans le Système d’Information Géographique OrbisGIS*. IRSTV FR CNRS 2488 ; IFSTTAR.
- Bocher E, Petit G, Picaut J, Fortin N, Guillaume G. 2017. Collaborative noise data collected from smartphones. *Data in Brief* 14:498–503. DOI: 10.1016/j.dib.2017.07.039.
- Böhringer C, Jochem PE. 2007. Measuring the immeasurable - A survey of sustainability indices. *Ecological Economics* 63:1–8.
- Brackin R, Gonçalves P. 2014a. *OGC OWS Context Conceptual Model*. Wayland, Massachusetts: Open Geospatial Consortium Inc.
- Brackin R, Gonçalves P. 2014b. *OGC OWS Context Atom Encoding Standard*. Wayland, Massachusetts: Open Geospatial Consortium Inc.
- Brimicombe A. 2009. *GIS, Environmental Modeling and Engineering*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Calcinelli D, Mainguenaud M. 1991. The management of the ambiguities in a graphical query language for geographical information systems. In: *Advances in Spatial Databases*. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Berlin, Heidelberg, 99–118. DOI: 10.1007/3-540-54414-3\_34.
- Calmet I, Mestayer PG, van Eijk AMJ, Herlédant O. 2018. A Coastal Bay Summer Breeze Study, Part 2: High-resolution Numerical Simulation of Sea-breeze Local Influences. *Boundary-Layer Meteorology* 167:27–51. DOI: 10.1007/s10546-017-0319-1.
- Caloz R, Collet C. 2011. *Analyse spatiale de l’information géographique*. Lausanne [Paris]: Presses polytechniques et universitaires romandes.

- Carolin C. 2017. SIG et intelligence artificielle : quels développements et quel futur ? *Géomatique Expert*:10.
- CERTU. 2006. Comment réaliser les cartes de bruit stratégiques en agglomération. Mettre en œuvre la directive 2002/49/CE (How to realize the strategic noise maps in agglomeration. Implementing the directive 2002/49/EC). CERTU.
- Chow TE. 2011. Geography 2.0: A mashup perspective. *Advances in web-based GIS, mapping services and applications*:15–36.
- CNRM. 2014. *MUSCADE (Modélisation Urbaine et Stratégie d'adaptation au Changement climatique pour Anticiper la Demande et la production Énergétique)*. Toulouse, France.
- CNRS. 2016. *Livre blanc : Une Science ouverte dans une République numérique*. CNRS.
- Coast S. 2015. *The Book of OSM*. CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Cooper M, Sykora P, Hurni L. 2005. The Role of Cartography within Distributed Software Systems: What can we Contribute? How can we Prosper? In: Lapaine M, Association IC eds. *22nd International Cartographic Conference and 13th General assembly of the ICA*. A Coruña, Spain: International Cartographic Society.
- Coutard M, Klipfel J-P, Blanc S. 2005. La cartographie SIG en ligne ou Web mapping: les outils «libres». Available at <https://mappemonde-archive.mgm.fr/num8/internet/int05401.html> (accessed March 21, 2018).
- Craglia M. 2010. Building INSPIRE: The Spatial Data Infrastructure for Europe. *ArcNews* 32:1–6.
- Craig B. 2009. *OGC ® OWS-6 Symbology Encoding (SE) Changes (OGC 09-016)*. Wayland, Massachusetts: Open Geospatial Consortium, Inc.
- Criqui P, Menanteau P, Bougnoux B, Fournier J, Saujot M, Joumni H. 2013. *Pour une approche économique dans l'élaboration des politiques climatiques locales*. LEPII – EDDEN (coordinateur).
- Crompvoets J, Bregt A, Rajabifard A, Williamson I. 2004. Assessing the worldwide developments of national spatial data clearinghouses. *International Journal of Geographical Information Science* 18:665–689. DOI: 10.1080/13658810410001702030.
- Devogele T, Parent C, Spaccapietra S. 1998. On spatial database integration. *International Journal of Geographical Information Science* 12:335–352. DOI: 10.1080/136588198241824.
- Dietze L, Zipf A. 2007. Extending OGC Styled Layer Descriptor (SLD) for Thematic Cartography - Towards the ubiquitous use of advanced mapping functions through standardized visualization rules. In: *4th Int. Symp. on LBS and Telecartography*. Hong Kong,.

DIPWG Chair. 2011. Considerations for the Elimination of Simplified Symbols For the Portrayal of S-57 and/or S-101 NC Data in ECDIS.

Directive 2007/2/EC. 2007. *Directive of the European Parliament and of the Council of 14 March 2007 establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE)*.

Duarte Teixeira M, De Melo Cuba R, Mizuta Weiss G. 2005. Creating Thematic Maps with OGC Standards Through the Web. GML And Geo-Spatial Web Services. In: Conference 2005 G& G-SWS ed. Vancouver, British Columbia.

Dupont S, Mestayer PG. 2006. Parameterization of the urban energy budget with the submesoscale soil model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 45:1744–1765.

Dutilleux G. 2017. Effects of anthropogenic sound on terrestrial ecosystems: a review of recent evidence. In: Zurich, 9.

Dutilleux G, Defrance J, Gauvreau B, Besnard F. 2008. The revision of the French method for road traffic noise prediction. *The Journal of the Acoustical Society of America* 123:3150–3150. DOI: 10.1121/1.2933163.

Egenhofer MJ. 1990. Interaction with geographic information systems via spatial queries. *Journal of Visual Languages & Computing* 1:389–413. DOI: 10.1016/S1045-926X(05)80022-9.

Egenhofer MJ. 1994. Spatial SQL: a query and presentation language. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* 6:86–95. DOI: 10.1109/69.273029.

Egenhofer M, Clarke K, Gao S, Quesnot T, Franklin R, Yuan M, Coleman D. 2016. Contributions of GIScience over the Past Twenty Years. In: 9–34.

Egenhofer MJ, Frank AU. 1988a. Towards a Spatial Query Language: User Interface Considerations. In: *VLDB*. 124–133.

Egenhofer M, Frank A. 1988b. Designing object-oriented query languages for GIS: Human interface aspects. In: *Third International Symposium on Spatial Data Handling*. 79–96.

Egenhofer MJ, Franzosa RD. 1991. Point-set topological spatial relations. *International journal of geographical information systems* 5:161–174. DOI: 10.1080/02693799108927841.

Ertz O. 2013. *Feasibility study about Swiss geological symbols using the system-independent OGC SLD/SE standards*.

Ertz O, Bocher E. 2010. *Styled Layer Descriptor and Symbolology Encoding 1.2 SWG*. Wayland, Massachusetts: Open Geospatial Consortium, Inc.

Ertz O, Julien LG, Bocher E. 2012. Collaborative authoring and polypublication of cartographic content. In: *OGRS2012 Symposium Proceedings*. Yverdon Les Bains: lulu.com.

European Commission. 2017. *European Open Science Cloud Declaration*. European Commission.

European Environment Agency. 2014. *Noise in Europe 2014*.

Faraut S, Bonhomme M, Tornay N, Amossé A, Masson V, Bocher E, Petit G, Plumejeaud C, Long N, Bretagne G, Schoetter R. 2016. Des bases de données urbaines aux simulations énergétiques – Le projet MAPUCE. In: *Séminaire de conception architecturale numérique : Mètre et paramètre, mesure et démesure du projet*. SCAN'16 Toulouse. Toulouse, France: Presses Universitaires de Nancy, Éditions Universitaires de Lorraine.

Flipo F, Dobré M, Michot M. 2013. *La face cachée du numérique. L'impact environnemental des nouvelles technologies*. Échappée (L').

Fortin N, Bocher E, Picaut J, Petit G, Dutilleux G. 2012a. An opensource tool to build urban noise maps in a GIS. In: *Open Source Geospatial Research and Education Symposium (OGRS)*. YVERDON-LES-BAINS, Switzerland, 9p, cartes.

Fortin N, Picaut J, Bocher E, Petit G, GUEGANNO A, Dutilleux G. 2012b. A simple approach for making noise maps within a GIS software. In: *Acoustics 2012*. France.

Frank AU, Mark DM. 1991. *Language Issues for Geographical Information Systems*.

Givoni B. 1989. Urban design in different climates.

Goh P-C. 1989. A graphic query language for cartographic and land information systems. *International journal of geographical information systems* 3:245–255. DOI: 10.1080/02693798908941511.

Goodchild MF. 2007. Citizens as sensors: the world of volunteered geography. *GeoJournal* 69:211–221. DOI: 10.1007/s10708-007-9111-y.

Goodchild MF. 2009. Geographic information systems and science: today and tomorrow. *Annals of GIS* 15:3–9. DOI: 10.1080/19475680903250715.

Gouge A, Bocher E, Fortin N, Petit G. 2014. H2Network: A tool for understanding the influence of urban mobility plans (UMP) on spatial accessibility. In: *Open Source Geospatial Research and Education Symposium 2014*. Proceedings of the 3rd Open Source Geospatial Research & Education Symposium OGRS 2014. Espoo, Finland: Aalto University, ISBN: 978-952-60-5706-4 (electronic) / 978-952-60-5707-1.

- Gourlay A, Bocher E, Petit G. 2011. *Towards a WPS platform dedicated to an urban knowledge infrastructure*. European Union.
- Gouze A. 2017. Les “smart cities” sauveront-elles la planète ? *Alternatives Economiques*.
- GSDI. 2009. *The Spatial Data Infrastructure Cookbook*. GSDI/Nebert.
- Guillaume G, Can A, Petit G, Fortin N, Palominos S, Gauvreau B, Bocher E, Picaut J. 2016. Noise mapping based on participative measurements. *Noise Mapping* 3. DOI: 10.1515/noise-2016-0011.
- Güting RH. 1988. Geo-relational algebra: A model and query language for geometric database systems. In: *Advances in Database Technology—EDBT '88*. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Berlin, Heidelberg, 506–527. DOI: 10.1007/3-540-19074-0\_70.
- Güting RH. 1994. An Introduction to Spatial Database Systems. *The VLDB Journal* 3:357–399.
- Haklay M (Muki), Basiouka S, Antoniou V, Ather A. 2010. How Many Volunteers Does it Take to Map an Area Well? The Validity of Linus’ Law to Volunteered Geographic Information. *The Cartographic Journal* 47:315–322. DOI: 10.1179/000870410X12911304958827.
- Haklay Muki, Singleton Alex, Parker Chris. 2008. Web Mapping 2.0: The Neogeography of the GeoWeb. *Geography Compass* 2:2011–2039. DOI: 10.1111/j.1749-8198.2008.00167.x.
- Herring JR. 1991. The Mathematical Modeling of Spatial and Non-Spatial Information in Geographic Information Systems. In: *Cognitive and Linguistic Aspects of Geographic Space*. NATO ASI Series. Springer, Dordrecht, 313–350. DOI: 10.1007/978-94-011-2606-9\_18.
- Herring JR. 2006a. OpenGIS implementation specification for geographic information-simple feature access-part 2: Sql option.
- Herring J. 2006b. Implementation Specification for Geographic information-Simple feature access-Part 1: Common architecture.
- Herring JR, Johnson S. 1999. OpenGIS Simple Features Specification For SQL - Revision 1.1.
- Hu Z, Tang G, Lu G. 2014. A new geographical language: A perspective of GIS. *Journal of Geographical Sciences* 24:560–576. DOI: 10.1007/s11442-014-1106-2.
- INSPIRE Drafting Team. 2008.D2.6: Methodology for the development of data specifications. Available at [http://inspire.ec.europa.eu/reports/ImplementingRules/DataSpecifications/D2.6\\_v3.0.pdf](http://inspire.ec.europa.eu/reports/ImplementingRules/DataSpecifications/D2.6_v3.0.pdf) (accessed September 27, 2017).
- INSPIRE Drafting Team. 2014.D2.5: Generic Conceptual Model. Available at [http://inspire.ec.europa.eu/documents/Data\\_Specifications/D2.5\\_v3.4.pdf](http://inspire.ec.europa.eu/documents/Data_Specifications/D2.5_v3.4.pdf) (accessed September 27, 2017).



INSPIRE Thematic Working Group Geology. 2013. *D2.8.II.4 INSPIRE Data Specification on Geology – Technical Guidelines*. European Commission Joint Research Centre.

Iosifescu-Enescu I, Hugentobler M, Hurni L. 2010. Web cartography with open standards – A solution to cartographic challenges of environmental management. *Environmental Modelling & Software* 25:988–999. DOI: 10.1016/j.envsoft.2009.10.017.

Joliveau T. 2004. Géomatique et gestion environnementale du territoire. Recherches sur un usage géographique des SIG.

Lalonde W. 2002. *Styled Layer Descriptor profile of the Web Map Service Implementation Specification (OGC 02-070)*. Wayland, Massachusetts: Open Geospatial Consortium Inc.

Leduc T, Bocher E, Cortés FG, Moreau G. 2009. GDMS-R: A mixed SQL to manage raster and vector data. In: Horák J, Halounová L, Kusendová D, Rapant P, Vozenílek V eds. *Advances in Geoinformation Technologies*. VŠB - Technical University of Ostrava, 43–56.

Leduc T, González Cortés F, Bocher E. 2007. OrbisGIS: a GIS for scientific simulation. In: *World Free Software Meeting (RMLL)*, Amiens, France.

Liaw A, Wiener M. 2015. *Breiman and Cutler's Random Forests for Classification and Regression*. University of California, Berkeley.

Long N. 2003. Analyses morphologiques et aérodynamiques du tissu urbain: application à la microclimatologie de Marseille pendant la campagne ESCOMPTE. PhD Thesis Thesis. Lille 1.

Long N, Bocher E, Leduc T, Moreau G. 2008. Sensitivity of spatial indicators for urban terrain characterization. In: *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS-2008*. Boston, United States.

Long N, Petit G, Bocher E. 2013. Urban vegetation: data acquisition and management in OrbisGIS. In: *World Green Infrastructure Congress*. Nantes, France.

Lupp M. 2007. *Styled Layer Descriptor profile of the Web Map Service Implementation Specification (OGC 05-078r4)*. Wayland, Massachusetts: Open Geospatial Consortium Inc.

MacEachren AM. 2004. *How Maps Work - Representation, Visualization, and Design*. New York: Guilford Press.

MAINGUENAUD M. 2001. *Langages pour les SIG : conception, développement et IHM*. Paris: Hermes Science Publications.

Masser I. 2005. *GIS Worlds: Creating Spatial Data Infrastructures*. Esri Press.

- Masser I. 2008. Coordinates : A resource on positioning, navigation and beyond » Blog Archive » Inspiring' INSPIRE. Available at <http://mycoordinates.org/inspiring%e2%80%99-inspire/> (accessed March 13, 2018).
- Masson V. 2000. A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models. *Boundary-Layer Meteorology* 94:357–397. DOI: 10.1023/A:1002463829265.
- Mays J. 2012. Using SLD definitions to display charts in a deegree WMS. In: Cape Town: FOSS4G 2008,.
- McMaster R, McMaster S. 2002. A History of Twentieth-Century American Academic Cartography. *Cartography and Geographic Information Science* 29:305–321. DOI: 10.1559/152304002782008486.
- McMaster R, Usery EL. 2004. *A Research Agenda for Geographic Information Science*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Mestayer P, Abidi A, André M, Bocher E, Bougnol J, Bourges B, Brécard D, Broc J-S, Bulteau J, Chiron M, Fadet P-Y, Faburel G, Fialaire J, Fortin N, Freneau A, Fritsch B, Gourlot N, Herbez P, Joumard R, Leduc T, Pen YL, Lépicié V, Leveaux S, Orfeuill J-P, Penven F, Petit G, Picaut J, Rebours A. 2010. Urban mobility plan environmental impacts assessment: a methodology including socio-economic consequences - The Eval-PDU project. In: *Proceedings of the 10th Urban Environment Symposium, Urban Futures for a Sustainable World*. Göteborg, Sweden, 11p.
- Mestayer P, Bourges B, Andre M, Bougnol J, BRECART D, Ducroz F, Joumard R, Schmidt T, PICAUT J, Bocher E. 2013. *Impacts environnementaux du PDU nantais 2000-2010 - synthèse des scénarios Eval-PDU*. IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux.
- Mestayer P, Bourges B, Fouillé L, Bougnol J, Bocher E, Schmidt T, Picaut J. 2015. Évaluation environnementale du PDU nantais 2000-2010 à partir des simulations numériques des scénarios alternatifs du programme Eval-PDU. *Rech. Transp. Secur.* 2015:97–120. DOI: 10.4074/S0761898015002046.
- Michaelis C. 2007. Application of Open Geospatial Consortium Specifications to Client-side Geographic Information Systems. PhD Thesis Thesis. Idaho State University.
- Miller HJ, Goodchild MF. 2015. Data-driven geography. *GeoJournal* 80:449–461. DOI: 10.1007/s10708-014-9602-6.
- Müller M. 2006. *OGC Symbology Encoding Implementation Specification*. Wayland, Massachusetts: Open Geospatial Consortium Inc.

- Müller M, Pross B. 2015. *OGC® WPS 2.0.2 Interface Standard Corrigendum 2*. Wayland, Massachusetts: Open Geospatial Consortium Inc.
- Muzet A, Tinguely G, Berengier M, Coignard F, Evrard as, Faburel G, Lelong J, Lepoutre P, Mietlicki F, Nolli M, Peretti Watel P. 2013. Évaluation des impacts sanitaires extra-auditifs du bruit environnemental : Saisine 2009-SA-0333 : avis de l'ANSES : Rapport d'expertise collective. In: *Évaluation des impacts sanitaires extra-auditifs du bruit environnemental : Saisine 2009-SA-0333 : avis de l'ANSES : Rapport d'expertise collective*. ANSES, 313 p.
- Nedovic-Budic Z, Cromptvoets J, Georgiadou Y. 2011. *Spatial data infrastructures in context: north and south*. Boca Raton: CRC Press.
- Neteler M, Mitasova H. 2008. *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach*. Springer US.
- Newport J, Shorthouse DJ, Manning AD. 2014. The effects of light and noise from urban development on biodiversity: Implications for protected areas in Australia. *Ecological Management & Restoration* 15:204–214. DOI: 10.1111/emr.12120.
- Nicolas L, Christine Z. 2013. *ESPON Cartographic Language - Mapping guide*. Université Paris Diderot, Paris: UMS RIATE.
- Nittel S, Muntz RR, Mesrobian E. 1997. geoPOM: a heterogeneous geoscientific persistent object system. In: *Proceedings. Ninth International Conference on Scientific and Statistical Database Management (Cat. No.97TB100150)*. 252–263. DOI: 10.1109/SSDM.1997.621194.
- Noucher M. 2013. Infrastructures de données géographiques et flux d'information environnementale: De l'outil à l'objet de recherche. *Netcom*:120–147. DOI: 10.4000/netcom.1404.
- Noucher M, Gourmelon F, Gautreau P, Georis-Creuseveau J, Maulpoix A, Pierson J, Pinède N, Pissoat O, Rouan M. 2017. Spatial Data Sharing: A Pilot Study of French SDIs. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 6:99. DOI: 10.3390/ijgi6040099.
- O'Callaghan JF, Mark DM. 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer vision, graphics, and image processing* 28:323–344.
- OGC. 1999. *OpenGIS Simple Features Specification for SQL*. Wayland, Massachusetts: Open Geospatial Consortium Inc.
- Oke TR. 1981. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. *Journal of climatology* 1:237–254.
- Oke TR. 1988. Street design and urban canopy layer climate. *Energy and buildings* 11:103–113.

- Ollion É. 2015. L'abondance et ses revers. Big data, open data et recherches sur les questions sociales. *Informations sociales* n° 191:70–79.
- Ooi BC. 1990. *Efficient Query Processing in Geographic Information Systems*. New York, NY, USA: Springer-Verlag New York, Inc.
- Peterson GN. 2009. *GIS Cartography: A Guide to Effective Map Design*. Boca Raton: CRC Press.
- Picaud J, Aumond P, Can A, Gauvreau B, Bocher E, Petit G, Guillaume G. 2017a. Les outils connectés de l'environnement sonore : état de l'art et prospective. *Acoustique & Techniques*:11–17.
- Picaud J, Fortin N, Aumond P, Bocher E, Petit G, Guillaume G. 2017b. NoiseCapture : une démarche Open Science pour la production collaborative de cartes de bruit à l'aide de smartphones. *Acoustique & Techniques*:37–46.
- Picaud J, Guillaume G, Dutilleul G. 2012. Ambiances sonores urbaines et interaction ville-bâtiment. *RéférenceS*:pp.34-50, schémas, graphiques, carte, ill. en coul.
- Planchon O, Darboux F. 2002. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models. *Catena* 46:159–176.
- Plumejeaud-Perreau C. 2016. Une Base de Données urbaine pour la simulation climatique et d'autres usages. In: Paris: OSGeo.
- Plumejeaud-Perreau C, Poitevin C, Pignon-Mussaud C, Long N. 2015. Building Local Climate Zones by using socio-economic and topographic vectorial databases. In: *9th International Conference on Urban Climate (ICUC9)*. Toulouse, France: Météo-France.
- Poorazizi E, Hunter AJ. 2015. Evaluation of web processing service frameworks. *OSGeo Journal* 14:29–42.
- Pornon H, Noucher M. 2007. Bilan et perspectives de 20 années de Géomatique :Vers des SIG plus collaboratifs Les Communautés de pratique. *Géomatique Expert* 59.
- Portele C. 2007. *OpenGIS® Geography Markup Language (GML) Encoding Standard, Version 3.2.1 (OGC 07-036)*. Wayland, Massachusetts: Open Geospatial Consortium Inc.
- Pourabbas E. 2014. *Geographical Information Systems: Trends and Technologies*. CRC Press.
- Racine P, Cumming S. 2011. Store, manipulate and analyze raster data within the PostgreSQL/PostGIS spatial database. *FOSS4G, Denver, September*.
- Rannou P. 2012. *Versionnement de l'information géographique dans une base de données relationnelles*. Nantes, France: Ecole Centrale de Nantes.

Ratti C, Baker N, Steemers K. 2005. Energy consumption and urban texture. *Energy and Buildings* 37:762–776. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.10.010>.

Rigaux P, Scholl M, Voisard A. 2002. *Spatial Databases with Application to GIS*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc.

Rodriguez F, Bocher E, Chancibault K. 2013. Terrain representation impact on periurban catchment morphological properties. *Journal of Hydrology* 485:54–67. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.11.023.

S. Lunetta R, Congalton R, Fenstermaker L, R. Jensen J, McGwire K, Tinney L. 1991. Remote sensing and geographic information system data integration: error sources and research issues. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 57.

Sae-Tang A, Ertz O. 2007. Towards Web Services Dedicated to Thematic Mapping. *OSGeo Journal*. *OSGeo Journal* 3:30–34.

Santamouris M, Ding L, Fiorito F, Oldfield P, Osmond P, Paolini R, Prasad D, Synnefa A. 2017. Passive and active cooling for the outdoor built environment - Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects. *Solar Energy* 154:14–33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.006>.

Schnabel O, Hurni L. 2007. Diagram markup language - a new model for symbolization in internet maps. In: *Proceedings of the 23th International Cartographic Conference*. Moscow, Russia: ICC,.

Schoetter R, Masson V, Bourgeois A, Pellegrino M, Lévy J-P. 2017. Parametrisation of the variety of human behaviour related to building energy consumption in the Town Energy Balance (SURFEX-TEB v. 8.2). *Geoscientific Model Development* 10:2801–2831.

Schut P. 2005. *Web Processing Service (WPS) Specification*.

Shannon G, Angeloni LM, Wittemyer G, Fristrup KM, Crooks KR. 2014. Road traffic noise modifies behaviour of a keystone species. *Animal Behaviour* 94:135–141. DOI: 10.1016/j.anbehav.2014.06.004.

Shekhar S, Chawla S, Ravada S, Fetterer A, Liu X, Lu C-T. 1999. Spatial databases-accomplishments and research needs. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* 11:45–55. DOI: 10.1109/69.755614.

Steiniger S, Bocher E. 2009. An overview on current free and open source desktop GIS developments. *International Journal of Geographical Information Science* 23:1345–1370. DOI: 10.1080/13658810802634956.

Steiniger S, Hunter AJS. 2012. Free and Open Source GIS Software for Building a Spatial Data Infrastructure. In: Bocher E, Neteler M eds. *Geospatial Free and Open Source Software in the 21st Century*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 247–261.

- Steiniger S, Michaud M. 2009. The Desktop GIS OpenJUMP: A hands-on introduction. In: *OGRS 2009 workshop*.
- Stolze K. 2003. SQL/MM Spatial-The Standard to Manage Spatial Data in a Relational Database System. In: *BTW*. 247–264.
- Svensson P, Huang Z. 1991. Geo-SAL: A query language for spatial data analysis. In: *Advances in Spatial Databases*. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Berlin, Heidelberg, 119–140. DOI: 10.1007/3-540-54414-3\_35.
- Sykora P, Schnabel O, Enescu II, Hurni L. 2007. Extended Cartographic Interfaces for Open Distributed Processing. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization* 42:209–218. DOI: 10.3138/cart0.42.3.209.
- Talmy L. 1983. How Language Structures Space. In: *Spatial Orientation*. Springer, Boston, MA, 225–282. DOI: 10.1007/978-1-4615-9325-6\_11.
- Tomlin CD. 1994. Map algebra: one perspective. *Landscape and Urban Planning* 30:3–12.
- Tomlin C., Berry JK. 1979. A mathematical structure for cartographic modeling in environmental analysis. In: *39th annual symposium*. Falls Church, Virginia, 269–283.
- Tornay Nathalie, Bonhomme M, Faraut S. 2015. GENIUS, a methodology to integer building scale data into urban microclimate and energy consumption modelling. In: *9th International Conference on Urban Climate (ICUC9)*. Toulouse, France: Météo-France,.
- Tóth K, Portele C, Illert A, Lutz M, Nunes de Lima M. 2012. *A Conceptual Model for Developing Interoperability Specifications in Spatial Data Infrastructures*. Luxembourg: Publications Office, 2012.
- Van den Brink L, Portele C, Vretanos A Panagiotis (Peter). 2012. *Geography Markup Language (GML) simple features profile - with Corrigendum (OGC 10-100r3)*. Wayland, Massachusetts: Open Geospatial Consortium Inc.
- Vatsavai RR, Burk TE, Wilson BT, Shekhar S. 2000. *A Web-based browsing and spatial analysis system for regional natural resource analysis and mapping*.
- Vincent B, Cristini A, Vallet J, Sales C, Poimboeuf H, Sorrentini C, Anselme C. 2011. Un observatoire du bruit des agglomérations : Enjeux scientifiques techniques, stratégiques et politiques ; Une approche systémique complémentaire aux nouvelles exigences des directives européennes. In: Osaka, Japan, 6.
- Visser U, Stuckenschmidt H, Wache H, Vögele T. 2000. Enabling Technologies for Interoperability. In: *TZI, University of Bremen*. Palma (Balearic Islands, Spain): TZI, 35–46.

- Vretanos P. 2010. *OpenGIS Filter Encoding 2.0 Encoding Standard (OGC 09-026r1 and ISO/DIS 19143)*. Wayland, Massachusetts: Open Geospatial Consortium Inc.
- Vretanos P. 2014. *OGC® Web Feature Service 2.0 Interface Standard – With Corrigendum*. Wayland, Massachusetts: Open Geospatial Consortium Inc.
- Walter V, Fritsch D. 1999. Matching spatial data sets: a statistical approach. *International Journal of Geographical Information Science* 13:445–473. DOI: 10.1080/136588199241157.
- Wang F, Sha J, Chen H, Yang S. 2000. Geosql: A spatial query language of object-oriented gis. In: *Proceedings of the 2nd International Workshop on Computer Science and Information Technologies*. 215–219.
- Weilgart L.S. 2007. The impacts of anthropogenic ocean noise on cetaceans and implications for management. *Canadian Journal of Zoology* 85:1091–1116. DOI: 10.1139/Z07-101.
- WHO. 2009. *Night noise guidelines for Europe*. World Health Organization Regional Office for Europe.
- Yutzler J. 2017. OGC® GeoPackage Encoding Standard.
- Zhang J, Javed M, Shaheen A, Gruenwald L. 2000. Prototype for wrapping and visualizing geo-referenced data in a distributed environment using xml technology. In: *Proceedings of the 8th ACM Symposium on Advances in Geographic Information Systems (ACMGIS), Washington DC*. 27–32.



## **6 ANNEXES**

*Annexe 1: Liste des sujets identifiés pour refonder le standard Symbology Encoding*

CR : Change Request (modification proposée à l'OGC par un individu, une organisation...), TC : Technical Committee (modification demandée par le groupe de travail), CH : Chair (modification proposée par les présidents du groupe de travail)

| <b>Topic</b>  | <b>Motivation</b> |
|---|-------------------|
| SE2 - DI - Reformulate specification of scale filtering to reflect externally given pixel size?                   | CR                |
| SE2 - DI - Remove or generalize the "shadow effect" from SE 1.1 Polygon->Displacement                             | TC                |
| SE2 - DI - No more mixed content  | TC                |
| SE2 - DI - Can Rule still be referenced by an OnlineResource?   | CR                |
| SE2 - DI - Treatment of properties with a cardinality greater than one (case of geometries)                       | CR                |
| SE2 - DI - Treatment of properties with a cardinality greater than one (case of ordinary properties)              | CR                |
| SE2 - DI - Shall the former mixed mode expression in ParameterValueType be replaced by the Concatenate function ? | CR                |
| SE2 - DI - which elements need uom?   | CH                |
| SE2 - DI - Move Transform at PointSymbolizer level  | CH                |
| SE2 - DI - Remove ExternalGraphic ColorReplacement  | CR                |
| SE2 - DI - Cardinality > 1 of properties  | CH                |
| SE2 - DI - move LegendGraphic from Rule to Symbolizer   | CH                |
| SE2 - DI - Remove GeneralizeLine from TextSymbolizer  | CH                |
| SE2 - DI - Replace IsRepeated, InitialGap, Gap, IsAligned from TextSymbolizer by TextStroke                       | CH                |
| SE2 - DI - Replace SE1.1 BaseSymbolizer by SymbolizerReference  | CR                |
| SE2 - DI - Incorporate DomainConstraints into Rule  | CR                |
| SE2 - DI - Disambiguate the drawing sequence  | TC                |
| SE2 - DI - CompositeGraphic is redundant  | CR                |
| SE2 - DI - VariableOnlineResource   | CR                |
| SE2 - DI - PropertyName -> ValueReference   | TC                |
| SE2 - DI - Remove categorize and recode   | TC                |
| SE2 - DI - Online Resource href   | CR                |
| SE2 - DI - MarkIndex definition (unicode)   | CH                |
| SE2 - DI - SolidFill SE color definition  | TC                |
| SE2 - DI - Size of a pixel  | CR                |
| SE2 - DI - Definition of absolute units of measure  | CR                |
| SE2 - DI - Change se:Data to xsd:string   | CR                |
| SE2 - DI - Typography terms   | CR                |
| SE2 - DI - Is LinearRapport just an aesthetic way ?   | CR                |
| SE2 - DI - does ParameterValueType need uom?  | CR                |
| SE2 - DI - definition of classification methods   | CR                |
| SE2 - DI - GraphicStroke lineUp – RelativePosition – Opacity definition   | CH                |
| SE2 - DI - LineLabel with RelativeOrientation   | CR                |
| SE2 - DI - StrokeAnnotationGraphic  | CR                |
| SE2 - DI - StrokeAnnotationGraphic  | CR                |
| SE2 - DI - LineLabel with RelativeOrientation   | CR                |
| SE2 - DI - PerpendicularOffset for Fill   | CR                |
| SE2 - DI - PerpendicularOffset on TextSymbolizer  | CR                |
| SE2 - DI - Double dashed lines  | CR                |
| SE2 - DI - Vendor-specific fonts  | CH                |

| <b>Topic</b>  | <b>Motivation</b> |
|---|-------------------|
| SE2 - DI - Halo with Stroke   | TC                |
| SE2 - DI - null stroke and fill   | TC                |
| SE2 - DI - Future of se:Function (fes:Function? optional fallback?)                       | CR                |
| SE2 - DI - Definition of operators  | CR                |
| SE2 - DI - Extend Formal Parameters   | CR                |
| SE2 - DI - Parametrized symbolizers   | CR                |
| SE2 - DI - AxisChart  | CR                |
| SE2 - DI - PieChart   | CR                |
| SE2 - DI - DotMapFill   | CR                |
| SE2 - DI - DensityFill definition   | CR                |
| SE2 - DI - FES dependency and modularization  | CH                |
| SE2 - DI - SemanticTypeIdentifier / FeatureTypeName                                       | CH                |
| SE2 - DI - Modularization & dependencies  | CH                |
| SE2 - DI - Move "As discussed in the previous subclause, ..." in 6.2.1                    | CH                |
| SE2 - DI - ElseFilter   | CH                |
| SE2 - DI - StrokeElement algorithm  | CH                |
| SE2 - DI - TextStroke LinearRapport   | CH                |
| SE2 - DI - CRS Graphic Coordinate System  | CH                |
| SE2 - DI - Improve Transform  | CH                |
| SE2 - DI - Matrix transforms  | CH                |
| SE2 - DI - Anchor point within the graphic ...  | CH                |
| SE - DI - Default value for element   | CH                |
| SE - DI - Table showing what line label does with a point (!), a line, a polygon (ALPEN). | CH                |
| SE2 - DI - More WKNNames  | CR                |
| SE2 - DI - VariableWellKnownName  | CR                |
| SE2 - DI - FeatureTypeStyle/CoverageStyle -> Style ?                                      | TC                |
| SE2 - DI - New definition of Categorize function  | CR                |
| SE2 - DI - Add categorizeMethod element to Categorize (for information purposes)          | CR                |
| SE2 - DI - Add Title element to label Categorize interval and Recode item                 | TC                |
| SE2 - DI - HatchedFill  | CR                |