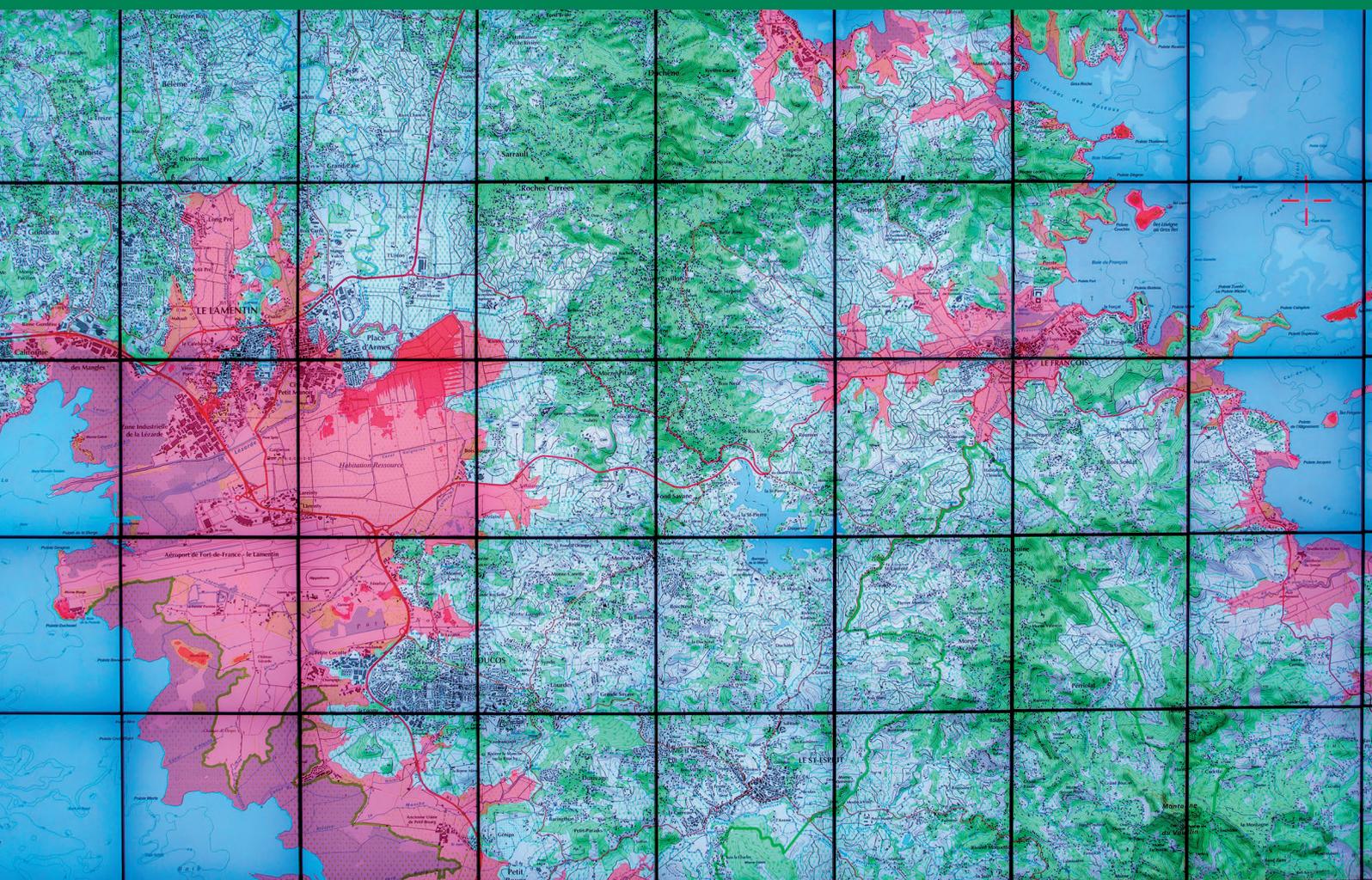


# RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

« Se défier du ton d'assurance qu'il est si facile de prendre et si dangereux d'écouter »  
Charles Coquebert, *Journal des mines* n°1, Vendémiaire An III (septembre 1794)



## Cartographie 4.0 : naviguer avec les cartes du XXI<sup>e</sup> siècle

UNE SÉRIE DES  
ANNALES  
DES MINES  
FONDÉES EN 1794

## Cartographie 4.0 : naviguer avec les cartes du XXI<sup>e</sup> siècle

04

### PRÉFACE

Daniel BURSAUX

06

### INTRODUCTION

Françoise ROURE et Didier PILLET

## Concevoir et fabriquer la cartographie 4.0

08

L'infrastructure de recherche « Pôle de données et services pour le système Terre », à la pointe des techniques d'imagerie et de cartographie numérique  
Frédéric HUYNH, Nicolas BAGHDADI, Michel DIAMENT, Nicole PAPINEAU, Gilbert MAUDIRE, Richard MORENO et Pierre MAUREL

14

iTowns, le nouveau moteur de visualisation 3D de données géospatiales du Géoportail  
Mirela KONINI, Alexandre DEVAUX et Mathieu BRÉDIF

19

L'apport des SIG 4D pour une cartographie du XXI<sup>e</sup> siècle empreinte de modernité  
Marie LACROIX

25

Why Standards Matter – The objectives and roadmap of the International Open Geospatial Consortium (OGC)  
Mark REICHARDT and François ROBIDA

30

La géostatistique au service de la modélisation géologique 3D  
Didier RENARD, Christian LAJAUNIE, Simon LOPEZ, Cécile ALLANIC, Gabriel COURRIOUX, Bernard BOURGINE et Philippe CALCAGNO

34

De l'usage des cartographies dynamiques par le cinéma immersif : l'exemple du partenariat entre l'ILOI et une société de production (XD Productions)  
Jacques PEYRACHE et Alain SÉRAPHINE

38

Cartographie et visualisation  
Éric GUICHARD

## Valoriser la cartographie 4.0

42

La démarche GéoBIM : de la gestion du territoire à celle d'un bâtiment  
Dimitri SARAFINOF, Arnaud MISTRE, Guillaume PICINBONO, Bruno VALLET et Laurent HEYDEL

47

Les cartes numériques terrestres pour la mobilité, quelles opportunités et quels enjeux ?  
Yoann NUSSBAUMER

50

Les cartes numériques HD, le futur de la mobilité : quelle valeur ajoutée aux systèmes de conduite automatisés ?  
Vincent MARTINIER

54

De multiples applications pour l'analyse des données AIS (Automatic Identification System) et la géovisualisation interactive de données  
Damien LE GUYADER et Matthieu LE TIXERANT

61

La cartographie des parcelles agricoles et les services associés à Farmstar  
Philippe GATE, Baptiste SOENEN, Mathilde CLOSSET, Norbert BENAMOU, Hervé POILVÉ et Michel FEUGA

66

L'utilisation des services cartographiques numériques d'urgence par satellite à des fins de sécurité intérieure  
Stéphanie BATTISTON, Stephen CLANDILLON, Robin FAIVRE, Claire TINEL et Annett WANIA

74

Observatoire de la Dynamique Côtière de Guyane : la carte interactive, un outil au service d'une gestion durable des littoraux guyanais  
Julie FURIGA

79

La cartographie numérique des bassins hydrologiques : retours d'expérience des agences de l'eau  
Sarah FEUILLETTE et Patricia BLANC

85

L'impact d'une plateforme régionale sur l'évolution des pratiques cartographiques des acteurs locaux  
Christine ARCHIAS

89

KaruGéo : le portail d'information géographique de la Guadeloupe, un projet de territoire  
Anouk ROBILLARD

93

La cartographie numérique, un instrument de progrès ou de fracture sociale ?  
Claire TUTENUIT

## Hors-Dossier

96

Comment mettre la *Blockchain* au service de la mise en œuvre de l'Accord de Paris sur le climat  
Patrice GEOFFRON et Stéphane VOISIN

101 Traductions des résumés

106 Biographies des auteurs

UNE SÉRIE DES  
**ANNALES  
DES MINES**

FONDÉES EN 1794

**RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT**

ISSN : 1268-4783

Série trimestrielle • n°94 - avril 2019

**Rédaction**

Conseil général de l'Économie (CGEJET), Ministère de l'Économie et des Finances

120, rue de Bercy - Télédéc 797 - 75572 Paris Cedex 12

Tél : 01 53 18 52 68

<http://www.annales.org>

**François Valérian**

Rédacteur en chef

**Gérard Comby**

Secrétaire général

**Delphine Mantienn**

Secrétaire générale adjointe

**Liliane Crapanzano**

Correctrice

**Myriam Michaux**

Webmestre

**Membres du Comité de Rédaction**

**Pierre Couveinhes**

Président du Comité de rédaction

Ingénieur général des Mines honoraire

**Pierre Amouyel**

Ingénieur général des Mines honoraire

**Paul-Henri Bourrelier**

Ingénieur général des Mines honoraire, Association française pour la prévention des catastrophes naturelles

**Mireille Campana**

Ingénieur général des Mines, Conseil général de l'Économie

**Dominique Dron**

Ingénieur général des Mines, Conseil général de l'Économie

**Pascal Dupuis**

Chef du service du climat et de l'efficacité énergétique, Direction générale de l'énergie et du climat, MTES

**Jérôme Goellner**

Chef du service des risques technologiques, Direction générale de la prévention des risques, MTES

**Jean-Luc Laurent**

**Richard Lavergne**

Conseil général de l'Économie  
Ministère de l'Économie et des Finances

**Philippe Saint Raymond**

Ingénieur général des Mines honoraire

**Bruno Sauvalle**

Ingénieur en chef des Mines, MINES ParisTech

**Jacques Serris**

Ingénieur général des Mines, Conseil général de l'Économie

**Claire Tutenuit**

Déléguée générale d'Entreprises pour l'Environnement (EPE)

**François Valérian**

Rédacteur en chef des Annales des Mines

**Photo de couverture :**

Vue globale du bassin caribéen, avec simulation de la zone de propagation d'un tsunami.

Projet Inria / CNRS / Université Paris Sud.

© Inria / Photo C. Morel

**Iconographie**

Christine de Coninck

**Abonnements et ventes**

COM & COM

Bâtiment Copernic - 20, avenue Édouard Herriot  
92350 LE PLESSIS-ROBINSON

Alain Bruel

Tél. : 01 40 94 22 22 - Fax : 01 40 94 22 32

[a.brue@cometcom.fr](mailto:a.brue@cometcom.fr)

**Mise en page :** Nadine Namer

**Impression :** Printcorp

**Editeur Délégué :**

FFE - 15, rue des Sablons 75116 PARIS - [www.ffe.fr](http://www.ffe.fr)

Fabrication : Aïda Pereira

[aïda.pereira@belvederecom.fr](mailto:aïda.pereira@belvederecom.fr) - 01 53 36 20 46

**Régie publicitaire :** Belvédère Com

**Directeur de la publicité :** Bruno Slama - 01 40 09 66 17

[bruno.slama@belvederecom.fr](mailto:bruno.slama@belvederecom.fr)

La mention au regard de certaines illustrations du sigle « D. R. » correspond à des documents ou photographies pour lesquels nos recherches d'ayants droit ou d'héritiers se sont avérées infructueuses.

# LE LEADER DU MARCHÉ DE LA PLAQUETTE FORESTIÈRE



**Christophe Chapoulet, Directeur Général Délégué  
d'ONF Energie**

ONF Energie, filiale de l'Office National des Forêts et de la Fédération Nationale des Communes Forestières, est le 1<sup>er</sup> producteur de combustible bois pour les chaufferies et les installations énergétiques fonctionnant à partir de biomasse. Entretien avec Christophe Chapoulet, Directeur Général Délégué d'ONF Energie.

**Pouvez-vous nous présenter vos activités ?**

En 2018, ONF Energie a commercialisé environ 600 000 tonnes de plaquettes forestières, produites à partir de bois récolté en majorité dans les forêts publiques (branches d'arbres adultes, arbres jeunes, taillis). Après leur exploitation et quelques mois de stockage en forêt qui lui permettent de sécher, le bois est broyé et transporté dans la foulée chez nos clients. Le bois que nous coupons est de faible qualité et son exploitation est nécessaire à la gestion forestière durable, les coupes permettant d'assurer le renouvellement de la forêt. Nous ne sommes pas en concurrence avec les filières du bois d'industrie et du bois d'œuvre. ONF Energie est labellisé PEFC, un label de gestion forestière durable qui garantit la traçabilité de la matière et la gestion durable des forêts.

**Avec quels acteurs travaillez-vous en partenariat ?**

Nous faisons travailler des exploitants forestiers, des broyeurs et des transporteurs et nos clients sont des collectivités pour leurs réseaux de chaleur urbains et des industriels. Afin de proposer une offre globale, nous nous associons aux coopératives forestières qui travaillent dans les forêts privées.

Nous sommes actifs auprès du gouvernement et du grand public afin de promouvoir le bois énergie, composante essentielle du mix énergies renouvelables. Nous nous impliquons dans l'interprofession Bois Energie, le Syndicat des Energies Renouvelables, l'Association Amorce (entreprises et collectivités engagées sur la transition énergétique) et nous sommes en lien avec l'Association Européenne de la Biomasse.

**La France est-elle en avance ou en retard pour sa transition énergétique ?**

La biomasse est la 1<sup>ère</sup> énergie renouvelable en France : elle représente 40 % du total des énergies renouvelables sur le territoire, soit 2 fois plus que l'hydraulique. Les ressources forestières françaises permettent de développer encore la filière bois énergie (en France, 54 % du volume de bois produit naturellement chaque année est récolté).

En 2015, les énergies renouvelables représentaient 15 % du mix énergétique français, l'objectif pour 2030 étant de 30 % ; la France prend du retard. Il est donc nécessaire de relancer les projets biomasse en les rendant économiquement plus attractifs pour les maîtres d'ouvrage que ceux utilisant les énergies fossiles.

Les outils sont notamment le Fonds chaleur géré par l'ADEME ainsi que la contribution climat énergie (taxe carbone).

**En quoi le bois énergie est-il une ressource renouvelable et vertueuse ?**

Le bois énergie présente de nombreuses vertus : il s'agit d'une ressource renouvelable avec un bilan carbone très favorable permettant d'éviter le recours aux énergies fossiles, adossée au reste de la filière bois qui permet de stocker du carbone (bois dans la construction, les meubles, etc). Le rayon d'approvisionnement moyen entre la forêt et les clients d'ONF Energie est de 60 km. Par ailleurs, quand on livre une tonne de plaquettes forestières en chaufferie, si son contenu énergétique est de 100, on a dépensé moins de 5 pour couper le bois, le transporter, le broyer et le livrer. Enfin, la filière bois énergie implique des emplois non délocalisables, en moyenne 4 fois plus que dans les filières énergies fossiles.

# De la carte de Cassini à la Géoplateforme de l'État

Par Daniel BURSAUX  
IGN

Quatre générations de Cassini se sont succédé à la tête de l'Observatoire de Paris et de l'Académie des Sciences, fondée en 1666 par Colbert, déclinant ainsi dans l'ordre chronologique les quatre grandes étapes de la fabrication de la première carte détaillée de tout un pays, qui porte le nom de leur dynastie : astronomie avec Giovanni-Domenico Cassini (1625-1712), géodésie avec Jacques Cassini (1677-1756), topographie avec César-François Cassini de Thury (1714-1784) et, enfin, cartographie *stricto sensu* avec Jean-Dominique (1747-1845). La Révolution française bouscule quelque peu cette remarquable continuité historique en emprisonnant le quatrième de la lignée au moment de la Terreur. Ce dernier échappe cependant à la guillotine, mais se voit dépossédé des 181 cuivres et des tirages afférents de la carte familiale à l'échelle de 1 ligne pour 100 toises (environ 1/86 400) qui devient propriété du Dépôt de la Guerre et passe donc du domaine civil au statut militaire.

Au siècle suivant, Napoléon crée une commission, en 1802, pour établir une nouvelle carte de France encore plus détaillée. Mais ses travaux n'aboutissent qu'en 1817, sous l'impulsion de Laplace, avec le lancement de la carte dite de l'état-major, dont les levés au 1/10 000 commencent en région parisienne, en 1818 (208 minutes de terrain des feuilles de Paris, Beauvais et Melun sont visibles sur : [geoportail.gouv.fr](http://geoportail.gouv.fr)). Bien vite on abandonne cette échelle trop chronophage et donc coûteuse pour adopter le 1/20 000 sur les frontières de l'Est (603 minutes), puis finalement le 1/40 000, dont les 978 minutes originales polychromes couvrent la France entière et sont aujourd'hui téléchargeables gratuitement sur le site [remonterletemps.ign.fr](http://remonterletemps.ign.fr). La gravure sur cuivre en réduction des 273 feuilles de l'authentique carte de l'état-major monochrome au 1/80 000 s'achève en 1881. Point de révolution technologique par rapport à la carte de Cassini, si ce n'est une amélioration de la précision, notamment pour la troisième dimension. On constate évidemment l'évolution du paysage cartographié à un siècle d'intervalle résultant de la révolution industrielle, de l'apparition du réseau ferré de France et de l'urbanisation associée.

Le Service géographique de l'Armée (SGA) remplace le Dépôt de la Guerre en 1887 et teste une troisième génération de carte, au 1/50 000, en plus de 1 000 coupures reproduites en couleur grâce à la lithographie, puis, plus tard, à l'impression offset. C'est le « type 1900 », dont les neuf premières feuilles autour de Paris ainsi qu'une cinquantaine d'autres sur les régions de l'Est, levées à la planchette au début du XX<sup>e</sup> siècle, paraissent juste avant la Première Guerre mondiale. Certes, Nicéphore Niépce a inventé la photographie et Nadar a réalisé la première photographie aérienne à bord de son ballon en 1858 survolant Paris, mais il faudra attendre Clément Ader, et l'aviation qui prend son envol au début du XX<sup>e</sup> siècle, pour assister à la véritable utilisation de la photographie aérienne au moment de la Grande Guerre. Et ce n'est qu'avec le deuxième conflit mondial qu'elle se généralise. L'IGN, l'Institut géographique national, succède en 1940 au SGA et commence à quadriller systématiquement le territoire national à partir de 1945 avec d'anciens bombardiers reconvertis. En 1941 est créée l'École nationale des sciences géographiques (ENSG), l'école de formation de l'IGN (ingénieurs polytechniciens ou non, géomètres, dessinatrices), qui accueillera également de nombreux étudiants étrangers. Établissement de production, l'IGN couvre toute la chaîne de fabrication cartographique depuis les avions de prises de vue jusqu'à l'imprimerie intégrée. La France compte alors 12 millions de km<sup>2</sup> à cartographier de Dunkerque à la terre Adélie, en passant par Madagascar, et de la Guyane à l'Indochine, sans oublier l'Afrique. Mais l'IGN est aussi déjà un institut de recherche et d'innovation. Il s'équipe d'un des premiers ordinateurs fabriqués en France pour réaliser des calculs géodésiques dans les années 1950, puis des premières tables traçantes dans les années 1970 qui voient les débuts de la cartographie numérique. L'IGN participe également au démarrage de la télédétection satellitaire à partir des images Landsat et s'associe au CNES pour créer la société Spot-Image qui sera chargée de la définition des capteurs de Spot 1 (lancé en 1986) ainsi que de la réalisation de mosaïques annuelles (en 2014, 2015, 2016, 2017 et 2018) assurant une couverture complète de la France grâce aux satellites Spot 6 et 7. Son service spécialisé dans le spatial civil et militaire, IGN-Espace, est installé à Toulouse depuis trente ans (1989) : il pilote chaque année des chantiers de production de données topographiques du monde entier (de l'ordre du million de km<sup>2</sup>) pour les besoins de la Défense et de l'exercice de la souveraineté nationale. En parallèle, le laboratoire d'opto-électronique de l'IGN a développé à partir de 1992 les premières caméras numériques de prises de vue aériennes qui ont équipé progressivement ses avions (passage en production en 2002 et fin de l'argentique en 2005). Cela fait également trente-cinq ans que le laboratoire de recherche en géodésie de l'IGN (LAREG) améliore en permanence la connaissance de la forme et de la dimension de la Terre en calculant l'ITRF (International terrestrial reference frame), ce cadre de référence terrestre international que l'IGN a la charge d'estimer au profit de toute

la communauté scientifique, une référence mondiale dont tout un chacun bénéficie, également *via* les applications de géolocalisation. Au niveau national, le réseau géodésique qui en est à sa quatrième génération en quatre siècles repose désormais sur une logique de partenariat : plus de 400 stations constituent en effet le réseau GNSS (Global Navigation Satellite System) permanent (RGP), et ce sont plus de 350 000 fiches de géodésie et de nivellement qui sont téléchargées chaque année *via* le Géoportail. La coproduction et le partage d'informations se généralisent aujourd'hui à l'ensemble des référentiels. Le Référentiel à grande échelle (RGE), dont la première version a été achevée en 2008, est actualisé en permanence, en particulier grâce aux mutualisations avec les collectivités territoriales pour la composante ortho-photographique dans des résolutions de plus en plus fines, avec la direction générale des finances publiques pour la composante parcellaire et la future RPCU (représentation parcellaire cadastrale unique), avec La Poste et les autres partenaires de la BAN (base adresse nationale) pour la composante adresse, ainsi qu'avec l'Agence française de la biodiversité (AFB), notamment pour la partie hydrographie de la base de données topographiques (BDTopage qui a succédé à la BDCarthage). Depuis 2006, ces bases de données s'affichent en 2D ou en 3D (2007) sur le Géoportail qui se classe avec 1,4 million de visiteurs uniques par mois dans le Top 10 des services gouvernementaux (160 couches d'information géographique, dont 80 issues d'autres producteurs). Le géoportail de l'urbanisme, co-construit avec la direction de l'habitat, de l'urbanisme et des paysages (DHUP), monte en puissance depuis 2013 ; tout comme l'implication de l'IGN dans le projet du Plan de corps de rue simplifié (PCRS), auquel participent les gestionnaires de réseaux enterrés, et au titre duquel l'IGN intervient en tant que coordinateur d'un programme national investi d'une triple mission : d'animation, de coordination de la production de données et de leur diffusion *via* un portail national. L'IGN est d'ailleurs soutenu financièrement par le Fonds pour la transformation de l'action publique (FTAP) à propos de son projet de création d'une Géoplateforme. Plus d'une vingtaine d'organisations sont déjà partantes pour devenir partenaires de ce futur espace public ouvert, collaboratif et mutualisé de l'information géographique.

De la carte de Cassini à la Géoplateforme de l'État, que de chemin parcouru !



Photo du Golfe du Morbihan prise par le satellite Pléiades, juin 2013.

« L'IGN s'est associé au CNES pour créer la société Spot-Image. »

# Introduction

Par Dr. Françoise ROURE  
et Didier PILLET  
Conseil général de l'Économie

La production des cartes a connu, avec la numérisation de la société, une révolution copernicienne, dont nous observons les effets dans notre vie quotidienne, personnelle et professionnelle. La possibilité d'intégrer dans les cartes de grandes quantités de données hétérogènes, réelles ou créées, pour offrir une représentation visuelle dédiée à un endroit et/ou à un usage précis<sup>(1)</sup>, représente un fort potentiel d'innovation quant aux applications et services induits, et, par conséquent, une gamme de services à valeur ajoutée en expansion rapide.

Les équipements et logiciels d'acquisition de données cartographiques utilisés par les pilotes de drones se multiplient, des données qui sont rapidement agrégées en trois dimensions, notamment en milieu urbain dense au bâti élevé que l'on rencontre dans les mégapoles asiatiques ou américaines, pour des usages ciblés sur des endroits d'intérêt.

C'est une cartographie, que l'on pourrait appeler 4.0 par référence à l'industrie 4.0, qui émerge, à la fois dynamique et multi-échelle. Elle forme un défi avant tout scientifique et technologique, mais aussi institutionnel, entrepreneurial, légal, éthique et sociétal. La puissance et le rôle des cartes « vivantes », interactives, dans l'amélioration de la prise de décision, justifient l'engouement général et massif dont elles bénéficient au vu de l'usage qui en est fait dans de nombreuses applications numériques.

De nombreux acteurs innovants de la cartographie émergent aux côtés d'établissements publics spécialisés en géodésie et en géosciences, tels que l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) ou le Bureau de Recherches géologiques et minières (BRGM). Cependant, la mise en relation des offres cartographiques avec les demandes des utilisateurs finaux reste à ce jour verrouillée par quelques grands agrégateurs mondiaux des données numériques qui circulent sur les réseaux sociaux (GAFA pour les États-Unis, BATX<sup>(2)</sup> pour la Chine). Il est estimé qu'un quart des cartes du monde réel en deux dimensions nécessitent une actualisation chaque année<sup>(3)</sup> pour rester pertinentes, ce qui accélère l'obsolescence de ces cartes et accroît donc la compétitivité des cartes numériques du XXI<sup>e</sup> siècle.

Les nouvelles applications de la cartographie se diffusent très rapidement ; elles représentent un marché mondial potentiel de l'ordre de 20 milliards d'euros à moyen terme (horizon 2023). Celles en cours de développement pour le véhicule autonome, un domaine hautement concurrentiel appuyé par les gouvernements de pays leaders en matière de technologies de l'information et de la communication et de construction automobile, dont celui du Japon, représenteraient à elles seules plus de la moitié de ce marché. Celui-ci est par ailleurs segmenté par finalités d'usage (telles que la traçabilité d'items, l'optimisation de routes aériennes, terrestres ou sous-marines, le management du risque ou de catastrophes) et par technologies (systèmes d'information géographique/SIG, télédétection par laser/LiDAR<sup>(4)</sup>, ortho-photographie aérienne ou satellitaire...).

Le monde industriel, civil et militaire, comme les pouvoirs publics, entrent aujourd'hui de plain-pied dans les techniques et les services cartographiques 4.0. Les grands groupes des domaines de l'énergie, de l'agriculture, de la logistique, du transport aérien et des voyages, de l'automobile, de la grande distribution et de l'immobilier, des médias et loisirs, des communications électroniques, des réseaux sociaux, s'attachent aujourd'hui les meilleurs talents cartographiques, directement ou dans le cadre de modèles d'innovation ouverte. L'État, pour toutes ses fonctions régaliennes, et les collectivités locales ainsi que les opérateurs de grandes infrastructures publiques trouvent dans les innovations en cartographie une voie de modernisation de leur action et de gain en termes d'efficience.

Ce numéro des *Annales des Mines* a pour ambition de faire connaître les enjeux à la fois technologiques et économiques de l'expansion du domaine des cartes au XXI<sup>e</sup> siècle. Il présente des frontières scientifiques et techniques, des jeux d'acteurs, la variété des applications cartographiques multi-échelle, les formations qui accompagneront les investissements dans ces différents domaines ainsi que des modèles économiques durables pour la cartographie 4.0, en croisant, comme notre revue en a l'habitude, le regard d'universitaires, de responsables publics et de dirigeants d'entreprise.

(1) Le domaine ainsi défini pourrait être traduit par "map mashup expanded cartography". Source : ESRI Press Team, Digital Map Mashups, December 19, 2017.

(2) Baidu, Alibaba, Tencent et Xiaomi, les géants du Web chinois apparus dans les années 2010.

(3) HERE, société allemande de données géospatiales cartographiques augmentées.

(4) Light Detection And Ranging (LiDAR).

Dans une première partie, sont abordés les aspects touchant à la création et à la fabrication de la cartographie « 4.0 ». On y découvre comment cette cartographie est en passe de bouleverser les pratiques en la matière dans nombre de secteurs d'activité et de corps de métiers. On peut citer notamment les applications adossées aux techniques de l'observation du système Terre, ou encore celles se rapportant au secteur du BTP, avec des concepts tels que la localisation *indoor*. Les perspectives en matière de technologie sont en particulier détaillées dans cette première partie, avec, par exemple, l'émergence de concepts innovants, tels que la photogrammétrie qui ouvre d'intéressantes possibilités dans le domaine de la cartographie reconstruite en 3D, tout en laissant entrevoir une baisse radicale des coûts de fabrication pour le cinéma et la télévision.

Par ailleurs, l'introduction de la dimension temporelle, alliée aux possibilités offertes par les techniques holographiques, est en passe de révolutionner la cartographie, en annonçant notamment l'irruption de la vidéo volumétrique dans le paysage cartographique, une révolution préfigurant une cartographie 4D d'ores et déjà en marche. Enfin, cette première partie est aussi l'occasion de faire un point sur la question importante des standards, ainsi que sur la formation aux nouveaux métiers de l'infographie. Elle n'oublie pas non plus d'apporter un regard sur la confrontation entre les sciences exactes et les sciences sociales, qui, s'agissant du champ de recherche attaché aux techniques de visualisation, induit un dialogue inattendu entre deux groupes d'experts : les informaticiens et les physiciens, d'une part, et les designers, d'autre part, ces derniers étant parfois assistés de psychologues.

Faisant suite à cette première partie, un second volet est consacré à la valorisation de la cartographie « 4.0 ». Cela couvre de nombreux domaines qui vont de la gestion des territoires, des parcelles agricoles et du bâti, à celle de la mobilité terrestre, en passant par une cartographie utilisée dans le cadre de la prévention et la gestion des crises résultant de catastrophes naturelles. Cela constitue autant d'exemples où est mis à profit l'atout principal de la cartographie « 4.0 », à savoir sa précision. Il en est ainsi de la gestion des territoires, laquelle nécessite une modélisation et une cartographie précises, et qui, par ailleurs, donne lieu à des actions de normalisation, au travers notamment du concept GeoBIM, lequel concrétise le mariage de la cartographie conventionnelle avec la modélisation numérique du bâti (BIM : *building information model*). La planification de l'espace maritime (PEM) est un autre exemple, où le bon déroulement spatio-temporel des usages maritimes est tributaire, là aussi, de données, à la fois pertinentes et précises, et où la cartographie « 4.0 » a dès lors toute sa place. Il en est de même avec les applications de la cartographie « 4.0 » dans la gestion des traits de côte, la cartographie numérique des bassins hydrologiques ainsi que dans le domaine agricole, où la description précise des parcelles assure une exploitation optimale des cultures, à travers, par exemple, l'utilisation différenciée des intrants que permet la finesse de cette description.

Il existe un autre aspect important attaché à la cartographie, plus exactement à la cartographie « 4.0 ». Cela concerne l'accès aux données cartographiques, ce qui renvoie notamment aux besoins existants en termes d'usage et de partage de ces données. Dans ce numéro sont décrits des exemples qui portent sur la réalisation de plateformes, dont les missions couvrent l'acquisition, la collecte, l'intégration, la diffusion et l'accompagnement à la valorisation de données géographiques de référence et de données métiers, ce qui contribue à la modernisation des métiers et pratiques de la cartographie.

Ce type de plateformes transactionnelles est également au cœur des applications de gestion de la mobilité terrestre, où la précision de la cartographie routière dépend très étroitement des remontées massives des données de terrain, ainsi que du traitement dont elles sont l'objet au niveau de ces plateformes. Deux exemples sont ainsi donnés qui portent, pour l'un, sur la navigation routière, et, pour l'autre, sur la localisation et l'état des bornes de recharge de véhicules électriques ou hybrides rechargeables. Au final, à la lecture des articles passés ici en revue, la cartographie numérique apparaît être un outil fantastique, où l'information cartographiée, géolocalisée et à jour serait à la portée d'un simple clic de souris.

Un article du présent numéro de *Responsabilité & Environnement* nous met pourtant en garde en soulignant que, dans les faits, l'usager est confronté à une mosaïque de cartographies et de systèmes non communicants et non compatibles entre eux, et qui, faute de mode d'emploi, le laissent dans l'incompréhension des interférences et autres incohérences observées en la matière.

# L'infrastructure de recherche « Pôle de données et services pour le système Terre », à la pointe des techniques d'imagerie et de cartographie numérique

Par Frédéric HUYNH

Directeur de l'IR système Terre

Nicolas BAGHDADI

IRSTEA, directeur du pôle Theia

Michel DIAMENT

IPGP, directeur du pôle ForM@Ter

Nicole PAPINEAU

CNES, directrice du pôle AERIS

Gilbert MAUDIRE

IFREMER, directeur du pôle ODATIS

Richard MORENO

CNES, directeur technique IR système Terre

et Pierre MAUREL

IRSTEA, responsable Dinamis

Observer, comprendre et prévoir de manière intégrée l'historique, le fonctionnement et l'évolution du système Terre soumis aux changements globaux est un enjeu fondamental de recherche et une nécessité pour la mise en œuvre des objectifs du développement durable. Cela nécessite des infrastructures interopérables permettant d'accélérer l'extraction, l'analyse, la diffusion et l'usage intelligent des données, des indicateurs et des modèles issus des systèmes nationaux et internationaux d'observation. Destinés aux scientifiques, aux acteurs publics et à ceux de l'innovation, ces produits et services sont accessibles *via* des portails dédiés, contribuant aux missions spatiales, à celles des réseaux d'observation et venant en appui des politiques de développement durable. Coordonner, fédérer et optimiser l'ensemble des institutions, dispositifs et moyens existants constitue une des ambitions importantes de l'IR système Terre, qui a aussi une vocation européenne et internationale dans ce domaine.

## Contexte

Depuis plus de vingt ans, la France a contribué à organiser et structurer une centaine (en 2018) d'infrastructures nationales et européennes qui ont transformé les pratiques de recherche et ont permis des avancées scientifiques majeures. Repousser les frontières de la connaissance passe notamment par de grands équipements de recherche permettant de mettre des évolutions technologiques

majeures au service de la science. C'est la vision énoncée par la DGRI <sup>(1)</sup> du MESRI <sup>(2)</sup> en introduction de la feuille de route <sup>(3)</sup> nationale des infrastructures de recherche (IR) <sup>(4)</sup>.

(1) DGRI : direction générale de la Recherche et de l'Innovation.

(2) MESRI : ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

(3) <http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid70554/la-feuille-de-route-nationale-des-infrastructures-de-recherche.html>

(4) IR : infrastructure de recherche.

Ces outils se singularisent par leur pérennité et l'ampleur de leurs ambitions, mais aussi par des moyens importants qu'il convient de mettre en perspective avec les stratégies nationales, européennes et internationales.

La loi pour une République numérique promulguée en 2016 incite les établissements publics à rendre leurs données ouvertes et réutilisables. Les IR y contribuent en participant 1) à la définition et à la construction de l'EOSC<sup>(5)</sup> ; 2) à l'initiative GO FAIR<sup>(6)</sup>, dont la France est l'un des membres fondateurs (création en 2017), et 3) à la mise en place d'un écosystème de science ouverte.

Dans le domaine de l'environnement, les données et produits de recherche délivrés par les IR permettent 1) de comprendre, modéliser, scénariser et prédire l'évolution de notre planète en matière de climat, de ressources et de biodiversité ; 2) de développer les recherches sur l'adaptation aux changements globaux ou leur atténuation ; 3) d'aider la prise de décision face aux risques (climatiques, telluriques, liés à l'activité anthropique...) et 4) évaluer les effets des politiques publiques.

Les IR et TGIR<sup>(7)</sup>, pensées à l'échelle européenne (ESFRI<sup>(8)</sup>) ou internationale, sont bâties à partir de dispositifs labellisés par les établissements de recherche et sont soutenues par le MESRI, leurs établissements supports ou des financements du programme des investissements d'avenir ; la cohérence de leurs actions est assurée dans le cadre de l'alliance AllEnvi. Ces instruments sont multi-tutelles et leur gouvernance adaptée à la diversité des établissements partenaires.

### L'IR « Pôles de données et services pour le système Terre »

La connaissance intégrée du système Terre repose sur des données acquises par des satellites, des navires, des avions ou des ballons sondes, ainsi que par des dispositifs de mesures *in situ*, mais également sur des données transformées. Ces informations numériques (données d'acquisition et transformées) constituent un patrimoine à préserver sur le long terme. Faciliter l'accès à des données et produits d'information de qualité sur l'ensemble des compartiments du système Terre, indépendamment de leur nature, de leur mode de collecte ou de leur localisation, est un défi capital. Y répondre nécessite des infrastructures interopérables permettant d'accélérer l'extraction, l'analyse, la diffusion et l'usage intelligent des données, indicateurs et modèles issus des systèmes nationaux et internationaux d'observation. Destinés à la communauté scientifique comme aux acteurs publics et socio-économiques, ces produits et services sont accessibles *via* des portails dédiés. Coordonner, fédérer et optimiser l'ensemble des institutions, dispositifs et moyens existants constitue une des ambitions importantes de l'IR système Terre, à l'échelle nationale comme aux échelles européenne et internationale.

Pour être en mesure de répondre aux questions que se posent nos sociétés sur leur environnement, la recherche doit appréhender le « système Terre » dans son ensemble, du noyau terrestre jusqu'aux limites de l'atmosphère. Elle

doit pour cela prendre en compte les interactions entre les différents compartiments du système en question et en considérer tous les aspects, du milieu physique au vivant.

Le pôle de données et services pour le système Terre est une IR depuis 2016. Il offre l'accès à un portail unifié et cohérent fondé sur quatre pôles de données – Aeris, Odatis, ForM@Ter et Theia – ainsi qu'à de nouveaux dispositifs, services et outils transversaux, dont l'ambition est de rendre interopérables l'ensemble des données et services.

### Le pôle de données THEIA (Surfaces continentales)

Créé en 2012, le pôle de données et de services Surfaces continentales Theia<sup>(9)</sup> est soutenu par douze institutions françaises impliquées dans l'observation de la Terre et les sciences de l'environnement (CEA, Cerema, Cirad, Cnes, IGN, Inra, CNRS, IRD, Irstea, Météo France, Onera et AgroParisTech). Son objectif est d'accroître l'utilisation par la communauté scientifique et, plus largement, par les acteurs publics et les collectivités territoriales, des données spatiales, aéroportées et *in situ*. Theia met à la disposition de tous ces acteurs publics des données et produits à valeur ajoutée issus de la télédétection par satellite, qui viennent en complément de l'offre européenne Copernicus (voir le Tableau 1 de la page 11 et la Figure 1 de la page suivante). Theia a aussi pour mission de coordonner la communauté scientifique nationale afin de mutualiser des ressources et faciliter l'accès aux données spatiales et leur traitement, et de rendre visibles les réalisations aux échelles nationale, européenne et internationale.

Theia structure la communauté scientifique qu'elle réunit en centres d'expertise scientifiques (CES), organisés autour de la conception et du développement de produits à valeur ajoutée (voir la Figure 2 de la page suivante). La vingtaine de CES existants encouragent le développement et le partage d'outils et de méthodes innovantes construits autour des données de télédétection pour traiter des problématiques liées aux surfaces continentales. Ils regroupent des équipes, réparties sur une ou plusieurs régions, dont les travaux de recherche visent à concevoir des produits à valeur ajoutée : réflectance de surface, occupation du sol, hauteur des niveaux des lacs et des rivières, surfaces enneigées, humidité du sol... Un dispositif d'animation régionale Theia (ART) permet par ailleurs de fédérer et d'animer les utilisateurs (scientifiques et acteurs publics et/ou privés) à l'échelle des différents territoires français et dans les pays du Sud (voir la Figure 1). Les ART participent aux efforts de formation de la communauté,

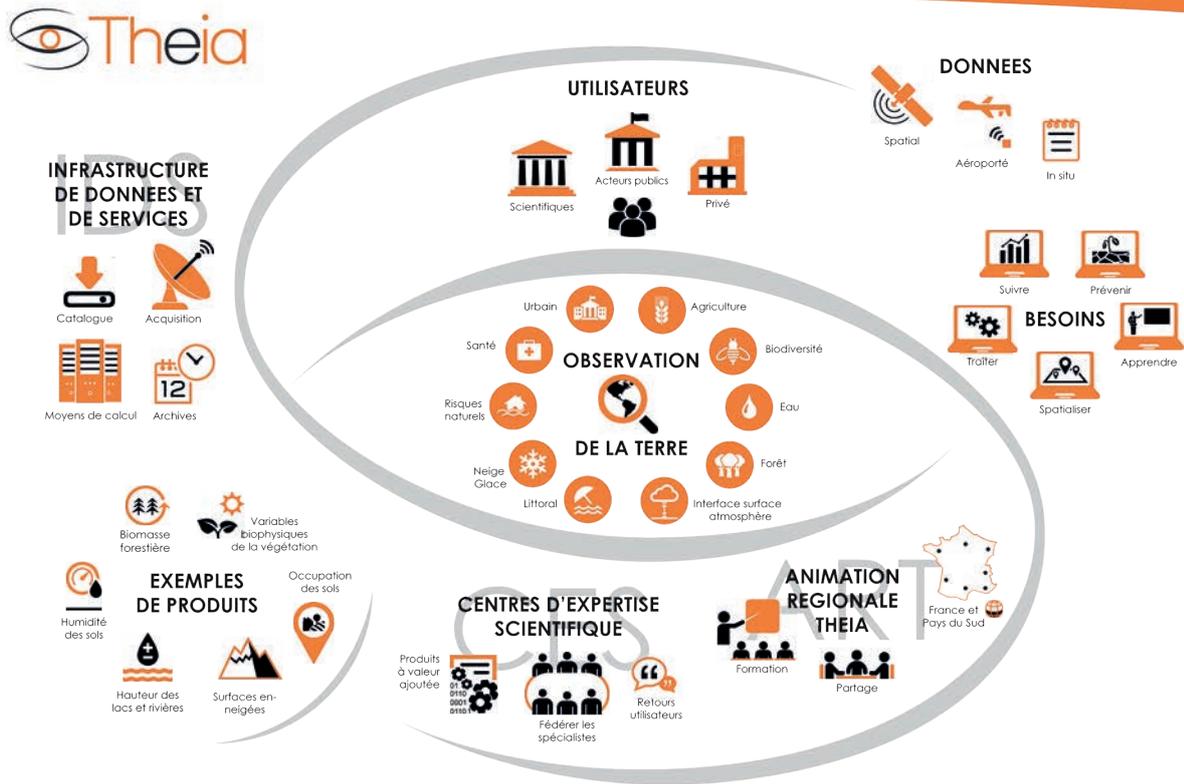
(5) EOSC : Open Science Cloud européen.

(6) GO FAIR est une initiative lancée en 2017 par les Pays-Bas, l'Allemagne et la France. Elle vise à ouvrir les données de la recherche et à préparer l'Internet des données et des services FAIR. Elle repose sur les principes suivants : faciles à trouver (Findable), accessibles (Accessible), interopérables (Interoperable) et réutilisables (Reusable) : <http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid124728/science-ouverte-la-france-rejoint-go-fair-en-tant-que-co-fondatrice.html>

(7) TGIR : très grande IR.

(8) ESFRI : European Strategy Forum on Research Infrastructures ; [www.esfri.eu](http://www.esfri.eu)

(9) [www.theia-land.fr/](http://www.theia-land.fr/)



[www.theia-land.fr](http://www.theia-land.fr)

Figure 1 : Structuration du pôle Theia.

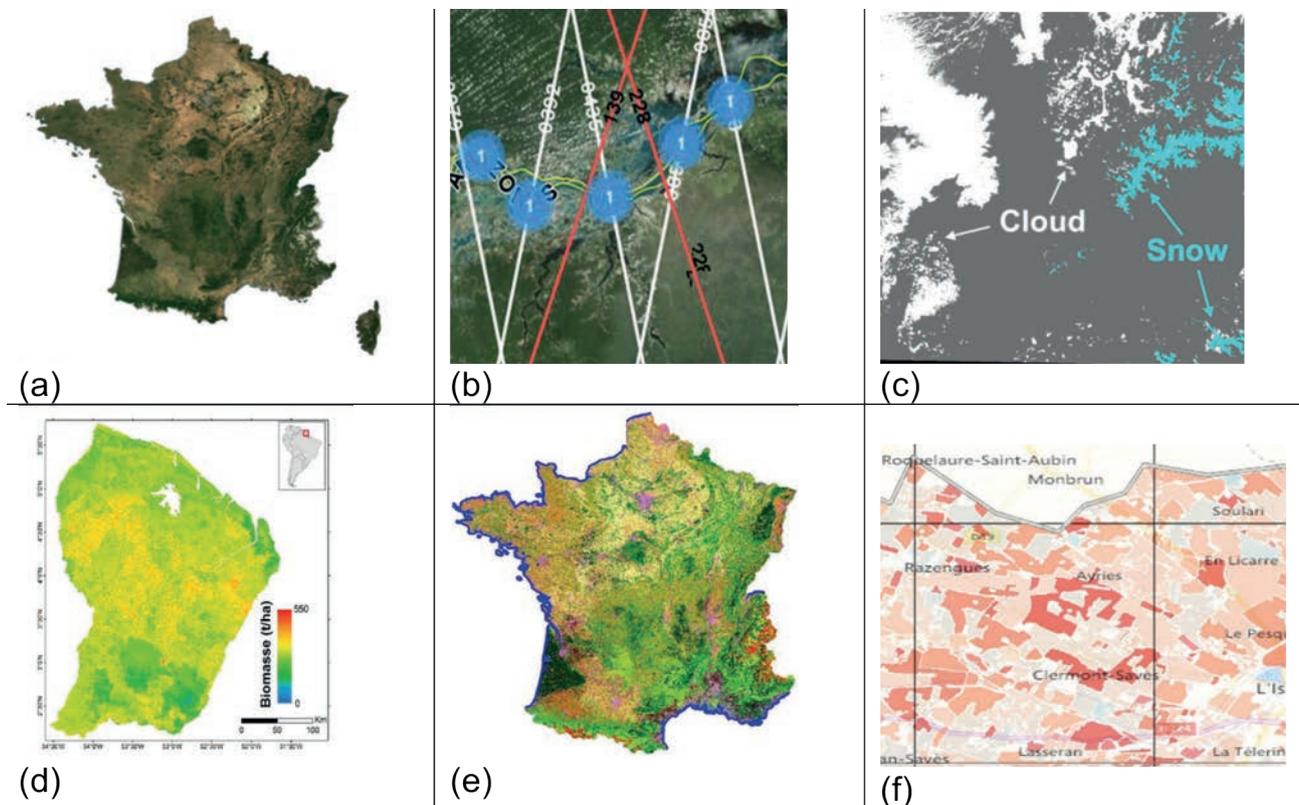


Figure 2 : Exemples de produits thématiques Theia : a) réflectance de surface Sentinel-2 ; b) hauteur des niveaux des lacs et des rivières ; c) surfaces enneigées ; d) biomasse forestière ; e) occupation des sols ; f) taux d'humidité des sols.

Classe	Produits	Zone	Période	Accès	Disponibilité
Produits à valeur ajoutée	Réflectance de surface Sentinelle 2	France et autres régions du monde	2016> présent	Tous utilisateurs	<a href="http://theia.cnes.fr">theia.cnes.fr</a>
	Réflectance de surface Landsat	France et Rom-Com	2005>2011 2013>présent	Tous utilisateurs	<a href="http://theia-landsat.cnes.fr">theia-landsat.cnes.fr</a>
	Réflectance de surface Venus	110 sites	2017>présent	Tous utilisateurs	<a href="http://theia.cnes.fr">theia.cnes.fr</a>
	Occupation des sols (CES OSO)	France	2009> présent	Tous utilisateurs	<a href="http://osr-cesbio.ups-tlse.fr">osr-cesbio.ups-tlse.fr</a>
	Neige	Pyrénées, Haut-Atlas, Alpes françaises	Juillet 2016> présent	Tous utilisateurs	<a href="http://theia.cnes.fr">theia.cnes.fr</a>
	Hauteur des lacs et rivières	Globale	1992>présent	Tous utilisateurs	<a href="http://hydroweb.theia-land.fr">hydroweb.theia-land.fr</a>
	Humidité des sols	Globale	2002>2010 présent	Tous utilisateurs	<a href="http://fto.ifremer.fr">fto.ifremer.fr</a>
		Régionale	Sept 2016>mai 2017 – Sept 17> mai 2018		<a href="http://ids.equipex-geosud.fr">ids.equipex-geosud.fr</a>
	Biomasse, hauteur de la canopée	Guyane, Madagascar, Afrique, Congo		Tous utilisateurs	<a href="http://ids.equipex-geosud.fr">ids.equipex-geosud.fr</a>
Carte des cultures irriguées	Sud-Ouest de la France Adour, Tarn	2015 2017	Tous utilisateurs	<a href="http://peps-vizo.cnes.fr">peps-vizo.cnes.fr</a>	
Imagerie optique	Spot 6 / 7	France et autres sites	2013 > présent	Acteurs publics nationaux	<a href="http://ids.equipex-geosud.fr">ids.equipex-geosud.fr</a> <a href="http://spatial.ign.fr">spatial.ign.fr</a>
	Pléiades	Petites zones en France et ailleurs	2012 > 2014	Acteurs publics nationaux	<a href="http://spatial.ign.fr">spatial.ign.fr</a> <a href="http://theia-landsat.cnes.fr">theia-landsat.cnes.fr</a>
	Spot World Heritage	Plus de 100 000 images dans le monde	1986 > 2008	Tous utilisateurs (usage non-commercial)	<a href="http://theia.cnes.fr">theia.cnes.fr</a>
	Spot 4 (Take 5)	45 sites dans le monde	Février > Juin 2013	Tous utilisateurs	<a href="http://spot-take5.org">spot-take5.org</a>
	Spot 5 (Take 5)	100 sites dans le monde	Avril – Août 2015	Tous utilisateurs	<a href="http://spot-take5.org">spot-take5.org</a>
	Rapid Eye, Spot 1-5	France	1995 > 2013	Acteurs publics nationaux	<a href="http://ids.equipex-geosud.fr">ids.equipex-geosud.fr</a>
Autres données	Lidar	France, Afrique, Amérique du Sud	2003 > 2009	Tous utilisateurs	<a href="http://ids.equipex-geosud.fr">ids.equipex-geosud.fr</a>
	Radar (CSM – TSX)	France, Afrique, Amérique du Sud, Asie	2013 > présent	Acteurs publics nationaux	<a href="http://ids.equipex-geosud.fr">ids.equipex-geosud.fr</a>

Tableau 1 : Un extrait du portefeuille de l'infrastructure de données Theia.

notamment sur des produits à valeur ajoutée développés dans les CES du pôle. Ils œuvrent au rapprochement entre acteurs publics et scientifiques, au recueil des besoins des acteurs régionaux et facilitent l'interfaçage entre le secteur privé et les pôles de compétitivité régionaux. À ce jour, huit ART ont été formalisés par des équipes régionales : Sud, Nouvelle-Aquitaine, Occitanie, Grand Est, Alpes, Île-de-France, Bretagne et Rom-Com/Pays du Sud.

Une infrastructure de données et de services (IDS), couvrant plusieurs sites, permet l'accès à une gamme diversifiée de produits et de services. Les infrastructures sont interopérables, disposent de métadonnées compatibles et mutualisent leurs composants : portail d'accès à l'information et aux produits, système d'authentification unique, métacatalogue. L'IDS propose des services d'archivage pérenne, d'acquisition, de traitement et de distribution des données, produits, outils et méthodes (voir la Figure 1 de la page précédente). Le pôle Theia, en interaction avec la sphère privée, contribue à l'émergence d'un écosystème d'innovation au service de la recherche, de l'action publique et du développement économique dans

les domaines de l'environnement, des agrosystèmes et de l'aménagement des territoires, aussi bien en France qu'en Europe et dans les pays du Sud.

### Le pôle de données AERIS<sup>(10)</sup> (Atmosphère)

Les recherches portant sur l'atmosphère concernent principalement les thématiques relatives aux études des dynamiques, aux études relevant de la physique et de la chimie atmosphérique. Elles incluent aussi des travaux orientés vers l'étude de l'évolution du climat. Pour effectuer ces recherches, la communauté scientifique utilise non seulement des modèles, mais aussi des données collectées au sol, obtenues au moyen de satellites ou de véhicules aéroportés. Pour qu'elles puissent être accessibles à une large communauté, que cela soit pour des activités de recherche ou des applications commerciales, ces données d'observations doivent être étalonnées, validées et homogénéisées. C'est dans ce contexte que se positionne le

(10) <http://www.aeris-data.fr>

pôle de données Aeris. Il est constitué autour de quatre centres de données (ESPRI, ICARE, SEDOO et SATMOS), qui disposent de moyens spécifiques et complémentaires pour permettre une gestion collective des données. Il s'appuie aussi sur des centres d'expertise et des réseaux de laboratoires, des éléments indispensables du pôle pour réaliser les développements algorithmiques et les prototypages nécessaires à la recherche. Aeris génère des produits à partir des observations faites, mais également de nombreux services d'aide à l'utilisation des données, d'aide à la réalisation de campagnes de collecte ou d'interfaces avec les modèles.

### Le pôle de données ODATIS (Océan)

Le pôle de données Odatis, dédié à l'océan, a été créé en 2016. Il s'appuie sur neuf centres de données et de services (trois centres satellites et six centres *in situ*). Sa mission principale est de mettre à disposition des données, produits, logiciels, outils et services destinés principalement à la communauté scientifique française travaillant dans le domaine de la recherche océanographique. Odatis contribue à décrire, quantifier et comprendre l'océan dans sa globalité au travers des thématiques suivantes : dynamique et thermodynamique de l'océan, évolution de ses propriétés physico-chimiques, cycles biogéochimiques, fonctionnement des écosystèmes marins, évolution de l'océan et du lien océan-climat dans le passé (paléo-océanographie). Le pôle Odatis gère également les informations portant sur des thèmes spécifiques au littoral, incluant les estuaires, lagunes et lagons, et plus particulièrement les sujets suivants : les évolutions morpho-dynamiques du littoral, le trait de côte/niveau de la mer, les pollutions et eutrophisations, les évolutions des écosystèmes littoraux.

Les données et produits issus des activités du pôle contribuent également à la constitution du support scientifique sur lequel s'appuient les politiques publiques (en particulier, la directive cadre stratégique sur le milieu marin (DCSMM)), ainsi qu'au développement socio-économique. Odatis s'attache à mettre à disposition et à produire, sous la responsabilité d'experts, des séries de données qualifiées et décrites, de façon à permettre leur utilisation en accord avec les plus hauts standards en vigueur. Les métadonnées sont disponibles dans un format conforme à la norme européenne INSPIRE et sont accessibles *via* les géocatalogues et géoportails nationaux ; elles sont en outre conformes aux formats recommandés par les bases de données mondiales.

### Le pôle de données ForM@Ter (Terre solide)

Le pôle Terre solide, ForM@Ter<sup>(11)</sup>, a pour objectifs de faciliter l'accès aux données concernant la Terre interne et de contribuer à la création de nouveaux produits et services en apportant de la valeur ajoutée aux données spatiales et *in situ* disponibles. Il s'inscrit dans les paysages national et européen en articulation étroite avec les infrastructures en place et en construction.

Dans le cadre de ces objectifs, ForM@Ter a pour mission

de fédérer les centres existants au service de la communauté Terre solide. Il s'appuie sur un portail ouvert en 2018 qui donne accès aux données spatiales, *in situ* et d'expérimentation relatives au domaine considéré. Il ambitionne d'apporter de la plus-value, notamment pour les données et services dans des champs où aucun centre de données n'existe ou dans lesquels de tels centres ont vocation à être développés en articulation avec les dispositifs européens et internationaux. Le pôle, en synergie avec les autres structures du domaine et au sein de l'infrastructure de recherche « Pôle de données système Terre », va renforcer la communauté Terre solide en donnant à celle-ci un accès aux données et aux produits dont elle a besoin pour ses recherches. En parallèle, l'équipe de ForM@Ter a continué à travailler au montage du « WP Satellite data » de l'infrastructure européenne Epos, s'est impliquée dans le projet de définition de l'un des services de Copernicus dénommé European Ground Motion Service (EU-GMS), ainsi que dans la réalisation et la finalisation de trois projets autour de la mesure de la déformation des sols. Le premier est dédié à l'estimation des mouvements des sols à partir d'images satellitaires radar et optiques dans le cadre de l'IR européenne Epos. Le deuxième, soutenu par la mission Etalab dans le cadre du Programme des investissements d'avenir, consiste en la réalisation d'un démonstrateur pour le calcul à la demande d'interférogrammes pouvant exploiter des données stockées au sein de plusieurs centres de données. Le troisième, conduit en collaboration étroite avec le CNES, vise à produire de manière systématique, sur de larges zones, des séries d'interférogrammes.

### DINAMIS, un dispositif national d'accès aux données spatiales

Différents dispositifs ont été mis en place en France pour développer l'utilisation de l'imagerie satellitaire depuis 2000 : le CNES à travers le programme ISIS pour les images SPOT 1-5, puis Pléiades en partenariat avec l'IGN ; en 2010, l'Equipex GEOSUD/Theia a travaillé sur un projet visant à mutualiser l'accès à l'imagerie à très haute résolution spatiale (RapidEye, SPOT 5, SPOT 6-7) ; et, plus récemment, le CNES sur les images Landsat et Sentinel. Ces efforts de mutualisation ont abouti à des avancées très significatives dans l'accès et les usages de ces données. En 2019, le dispositif GEOSUD/Theia comptait cinq cent trente structures adhérentes (laboratoires, services de l'État, collectivités territoriales, divers organismes associatifs et plateformes régionales). Ses archives regroupent aujourd'hui plus de 13 000 images à très haute résolution couvrant plus de 11 millions de km<sup>2</sup>. Depuis 2010, les téléchargements sous forme d'images représentent l'équivalent de plus de 60 millions de km<sup>2</sup>. Pour pérenniser et développer plus encore l'accès à l'imagerie satellitaire, il a été décidé de mettre en place un dispositif unifié transversal intitulé Dinamis (dispositif institutionnel national d'approvisionnement mutualisé en

(11) <https://www.poleterresolide.fr/>

imagerie satellitaire), lequel ne connaît pas actuellement d'équivalent. Centré sur les services d'accès à l'imagerie satellitaire, ce dispositif permettra d'accompagner les utilisateurs nationaux et, sous certaines conditions, des utilisateurs étrangers, dans le choix et l'accès à des images d'archives ou à des programmations et acquisitions. Il donnera un accès gratuit, ou à des tarifs préférentiels permis par la mutualisation, à un bouquet d'images aux résolutions complémentaires, combinant des images commerciales (SPOT 6-7, Pléiades, archives...) et « gratuites » (Sentinel 1 et 2, Landsat 8, SWH SPOT 1-5...). Enfin, Dinamis proposera à terme un accès à un métacatalogue des archives regroupant l'ensemble de ces images.

## Perspectives

Le développement de l'IR système Terre ouvre des perspectives nouvelles en termes de partage des données, d'outils et de services d'information validés scientifiquement, pour observer, comprendre et prévoir de manière intégrée et transdisciplinaire le fonctionnement et l'évolution de l'environnement et du système Terre.

## Bibliographie

- BAGHDADI N., LEROY M., MAUREL P., CHERCHALI S., STOLL M., FAURE J.-F., DESCONNETS J.-C., HAGOLLE O., GASPERI J. & PACHOLCZYK P. H. (2015), *The Theia Land Data Centre*, Geospatial Week, RSDI Workshop 01/10/2015-01/10/2015, La Grande Motte.
- EL HAJJ M., BAGHDADI N., ZRIBI M. & BAZZI H. (2017), "Synergic use of Sentinel-1 and Sentinel-2 images for operational soil moisture mapping at high spatial resolution over agricultural areas", *Remote Sensing* 9, 1292 (doi:10.3390/rs9121292).
- GASCOIN S., GRIZONNET M., BOUCHET M., SALGUES G. & HAGOLLE O. (2018), "Theia Snow collection: high resolution operational snow cover maps from Sentinel-2 and Landsat-8 data", *Earth Syst. Sci. Data Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/essd-2018-144>, in review.
- HAGOLLE O., HUC M., VILLA PASCUAL D. & DEDIEU G. (2015), "A Multi-Temporal and Multi-Spectral Method to Estimate Aerosol Optical Thickness over Land, for the Atmospheric Correction of FormoSat-2, LandSat, VENμS and Sentinel-2 Images", *Remote Sensing* 7 (3), pp. 2668-2691.
- INGLADA J., VINCENT A., ARIAS M., TARDY B., MORIN D. & RODES I. (2017), "Operational High Resolution Land Cover Map Production at the Country Scale Using Satellite Image Time Series", *Remote Sens* 9(1), 95 (<https://doi.org/10.3390/rs9010095>).
- IENCO D., GAETANO R., DUPAQUIER C. & MAUREL P. (2017), *Land Cover Classification via Multi-temporal Spatial Data by Recurrent Neural Networks*, arXiv – Computer Science – Computer Vision and Pattern Recognition.
- JABBOUR C., REY-VALETTE H., MAUREL P. & SALLES J.-M. (2019), "Spatial Data Infrastructure Management: A two-sided market approach for strategic reflections", *International Journal of Information Management*, vol. 45, April, pp. 69-82.
- MAUREL P., FAURE J.-F., CANTOU J.-P., DESCONNETS J.-C., TEISSEIRE M., MOUGENOT I., MARTIGNAC C. & BAPPEL E. (2015), "The GEOSUD remote sensing data infrastructure", RSDI seminar, Geospatial Week, 28 septembre - 2 octobre 2015, La Grande Motte.
- TONNEAU J.-P. & MAUREL P. (2016), "Satellite imagery, a tool for territorial Development", In *Land surface remote sensing in urban and coastal areas*, BAGHDADI N. (ed.), ZRIBI M. (ed.), Londres: ISTE-Elsevier, pp. 101-140 (ISBN 978-1-78548-160-4).

# iTowns, le nouveau moteur de visualisation 3D de données géospatiales du Géoportail

Par Mirela KONINI

IGN

Alexandre DEVAUX

et Mathieu BRÉDIF

Université Paris-Est, LASTIG GEOVIS, IGN, ENSG

La visualisation est un mode privilégié de l'interaction des utilisateurs avec l'information géographique, et sa représentation efficace est d'autant plus importante que les données sont massives et hétérogènes et que les utilisateurs et les usages sont variés. Au-delà de la visualisation de données 2D sur un écran ou une carte papier, la visualisation de données 3D pose de nouveaux défis et nécessite des outils appropriés : volume des données, multiplicité des formats, stylisation et gestion des parties visibles, modes d'interaction et de navigation...

iTowns est une plateforme technologique de l'IGN qui permet de visualiser des données géographiques 3D *via* le Web et propose des fonctions d'interaction avancées dans un environnement métrologique.

Initialement développé par les laboratoires de recherche de l'IGN comme un outil de visualisation de données images et LiDAR issues de la cartographie mobile (c'est-à-dire acquises au moyen d'un véhicule équipé de capteurs), iTowns a évolué et permet aujourd'hui de naviguer de façon immersive au sein d'un très grand volume de données 3D, et ce dans toute la gamme d'échelles, depuis l'espace jusqu'au sol. Des interfaces sont également disponibles pour la manipulation de ces données. Désormais moteur de visualisation 3D du Géoportail <sup>(1)</sup>, iTowns s'enrichit continuellement de nouvelles fonctionnalités : en sus de la visualisation en 3D du territoire pour le grand public, il permet de développer des applications Web à usage professionnel pour co-visualiser différents types de données, les annoter, procéder à des analyses, des mesures...

## Une plateforme innovante issue de la recherche de l'IGN

À l'origine, iTowns était un projet de recherche qui, lancé en 2008 et financé par l'ANR, visait à proposer un outil de navigation immersive *via* le Web au sein de données images et LiDAR issues de capteurs montés sur une plateforme mobile géoréférencée – le véhicule de cartographie mobile Stéréopolis de l'IGN permet en effet d'acquérir différents types de données géolocalisées au moyen des divers capteurs qu'il embarque (photographies numériques, laser, capteurs thermiques, etc.). Développé de 2008 à 2011 par le laboratoire de recherche Matis de l'IGN, le projet iTowns proposait une visualisation dans le navigateur des résultats des algorithmes automatiques d'extraction d'informations contenues dans des images (détection de marquages au sol, panneaux, textes, végétations).

Par la suite, le produit iTowns a été impliqué dans de multiples projets de recherche, notamment le projet FUI Terra Mobilita, dont le but était d'améliorer la génération de cartes de précision centimétrique au niveau de la rue dans le cadre d'études d'accessibilité pour les personnes à mobilité réduite (PMR). L'idée était d'utiliser iTowns pour visualiser la rue reconstituée à partir de données acquises de façon dématérialisée par un véhicule de cartographie mobile afin de réaliser, à moindre coût, des études de diagnostic d'accessibilité pour les PMR : possibilité grâce à cet outil de naviguer virtuellement, de réaliser des mesures et d'annoter les images directement à partir d'un navigateur Web (voir la Figure 1 de la page suivante). Cela

(1) L'infrastructure d'hébergement et de diffusion en ligne de données géographiques mise en œuvre par l'IGN pour le compte de l'État : <http://www.geoportail.gouv.fr>

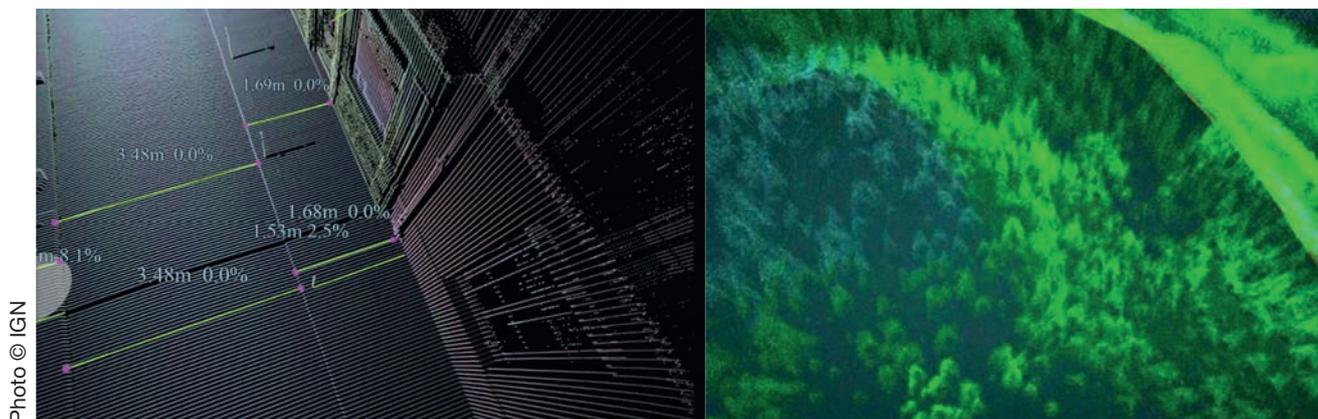


Figure 1 : Co-visualisation de données images et LiDAR et réalisation de mesures précises lors de l'étude de l'accessibilité de l'espace urbain pour les personnes à mobilité réduite (à gauche, le projet FUI Terra Mobilita). Visualisation du LiDAR aérien de masse dans le cadre de l'étude de l'évolution de la canopée forestière (à droite, le projet ANR Foresee).

permettait d'éviter une collecte fastidieuse d'informations directement sur le terrain.

En parallèle, l'IGN a participé au projet ANR Foresee : il a notamment développé un démonstrateur basé sur iTowns. Il s'agissait de co-visualiser des nuages de points LiDAR résultant d'une acquisition aérienne à l'échelle d'un département et des données orthophotographiques<sup>(2)</sup> et MNT<sup>(3)</sup> pour étudier l'évolution de la canopée et des espèces forestières. Le défi était d'explorer des milliards de points LiDAR via un navigateur Web sur un fond de carte 3D issu d'un terrain modélisé par un MNT et texturé par une orthophotographie (voir la Figure 1 ci-dessus). Cela a permis à l'IGN de créer par la suite de nouvelles bases de données LiDAR pour procéder à un affinage (jusqu'à 1 mètre de précision) du MNT français et de mettre en place de nouvelles collaborations pour réaliser d'autres applications, notamment en foresterie.

iTowns a su mettre à profit l'arrivée des technologies WebGL et être supporté par les navigateurs Internet (à partir des années 2010) permettant l'utilisation directe de la carte graphique à partir d'une application Web. Cette technologie WebGL permet à la plateforme iTowns d'afficher de grandes quantités d'informations 3D, comme les nuages de points LiDAR et les surfaces maillées en 3D, dans un navigateur Internet, avec des performances similaires à celles d'un jeu vidéo.

Une des forces de l'application est la liberté de navigation qu'elle offre, le point de vue n'est pas restreint aux positions des prises de vue initiales : en effet, grâce au rendu projectif, il est possible de naviguer librement et de manière continue en trois dimensions, de l'espace à la rue, et ce, en choisissant le point de vue que l'on souhaite tout en conservant la précision originale des acquisitions.

Les projets d'innovation dans lesquels iTowns a été impliqué ainsi que l'arrivée des nouvelles technologies ont façonné la plateforme et enrichi ses capacités. C'est l'ensemble de ces capacités – la co-visualisation de données massives et hétérogènes, l'interaction avec les données et la possibilité de faire diverses simulations – qui constitue aujourd'hui l'ADN d'iTowns et le distingue fortement d'une application de type *street view*.

## Une industrialisation réussie

Tirant parti de huit années de recherche ainsi que du développement de nombreux démonstrateurs basés sur la technologie iTowns, l'IGN a décidé, en 2016, d'industrialiser la plateforme par un transfert partiel des équipes de Recherche pour renforcer celles en charge des développements avec, comme premier objectif, de devenir le moteur de visualisation 3D du Géoportail. L'industrialisation a introduit de nouvelles fonctionnalités, notamment une vision depuis l'espace en 3D et la possibilité de co-visualiser tout type de données géospatiales, des images satellitaires couvrant le globe terrestre aux nuages de points de précision centimétrique au niveau de la rue, que ces données soient produites par l'IGN ou par des acteurs tiers. L'un des principaux verrous technologiques à lever était d'arriver à gérer un très grand volume de données tout en offrant une très grande amplitude de variation de l'échelle de visualisation, le tout en garantissant la stabilité du produit pour un usage ouvert au grand public.

Ce défi a été relevé en 2017, faisant d'iTowns le moteur permettant de naviguer en 3D à l'échelle de tout le territoire : il est capable de co-visualiser en 3D, sans qu'il y ait besoin de *plugin*, les données orthophotographiques, les données vecteurs, les modèles numériques de terrain et de surface (MNT et MNS<sup>(4)</sup>) de l'IGN, des modèles 3D à différents niveaux de détail (LoDs, pour Level of Details), servis par des flux standards (WMS<sup>(5)</sup>, WMTS<sup>(6)</sup>, WFS<sup>(7)</sup> et 3DTiles<sup>(8)</sup>), avec des mises à jour en continu.

(2) Orthophotographie : image couleur superposable à une carte, recomposée à partir d'images aériennes rectifiées géométriquement.

(3) Modèle numérique du terrain : carte d'altitude du sol, sans sursol (arbres, bâtiments...).

(4) Modèle numérique de surface.

(5) Web Map Service, service HTTP qui fournit des images géoréférencées.

(6) Web Map Tile Service, service HTTP qui fournit des images géoréférencées tuilées.

(7) Web Feature Service, protocole d'échange de données vecteurs qui permet de connaître les structures et les sources de la donnée spatiale.

(8) Structure d'organisation des données géospatiales 3D en arborescence tuilée pour être diffusées en flux.



Figure 3 : Le moteur de visualisation 3D du Géoportail : <https://www.geoportail.gouv.fr/>

Au-delà de l'utilisation d'iTowns comme solution de visualisation 3D pour le Géoportail, de multiples applications et services ont été développés pour répondre aux besoins nés de la conduite des projets de l'IGN ou de ceux de ses partenaires et clients.

### Applications industrielles réalisées avec iTowns

#### Visite virtuelle en milieux complexes

Au cours de leurs interventions, les égoutiers sont exposés à des risques liés à l'insalubrité. Ces visites doivent donc être réduites en durée, d'où l'intérêt de les préparer en amont. C'est dans cet objectif que l'IGN a participé à une expérimentation visant à la numérisation du réseau des égouts de la ville de Paris pour réaliser ultérieurement des visites virtuelles. Des données images ont été acquises grâce à un système composé de quatre caméras légères<sup>(9)</sup> prototypées au sein de l'IGN et montées sur un sac à dos. La reconstruction d'un modèle 3D a été faite automatiquement à partir des images orientées (en position et en rotation) produites dans la phase d'acquisition en utilisant la solution photogrammétrique MicMac<sup>(10)</sup>. Un nuage de points dense est généré à partir de ces images, puis un maillage. Les images orientées sont ensuite projetées à la volée sur le maillage généré. Il est ainsi possible de naviguer en immersif dans le modèle, de prendre des mesures et/ou de procéder à diverses simulations (aménagement de matériel, étude de la mobilité d'un avatar humain, etc.) depuis la rue ou directement dans les souterrains, en continu.

#### La simulation de phénomènes (la montée des eaux, par exemple)

La simulation est faite sur la base du modèle numérique altimétrique précis continu terre-mer, Litto3D®<sup>(11)</sup>, dont la précision altimétrique pour le littoral français est de 20 centimètres. Cela permet de faire une première analyse des zones à risque et de prendre les mesures adéquates en matière d'aménagement, de sécurisation des points sensibles et de protection des habitations.



Figure 5 : Simulation de la montée des eaux sur le littoral corse.

(9) La caméra légère est conçue par le laboratoire d'opto-électronique, de métrologie et d'instrumentation (LOEMI) de l'IGN.  
 (10) MicMac est un logiciel libre de photogrammétrie qui a été développé par l'IGN. Il permet de reconstruire des modélisations 3D à partir d'un ensemble d'images : <http://logiciels.ign.fr/?Micmac>  
 (11) Litto3D® est un modèle numérique altimétrique précis continu terre-mer réalisé en commun par le SHOM et l'IGN : <http://www.professionnels.ign.fr/litto3d>

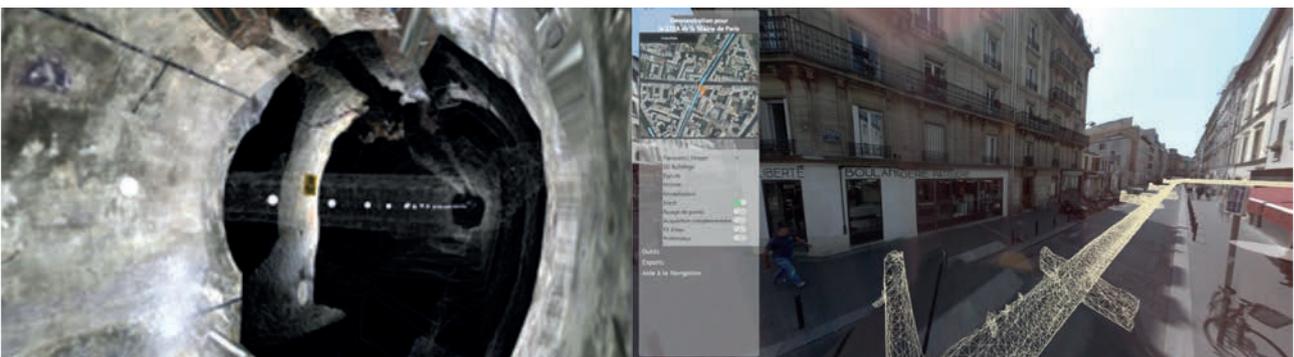


Figure 4 : Visite virtuelle dans les égouts de Paris.

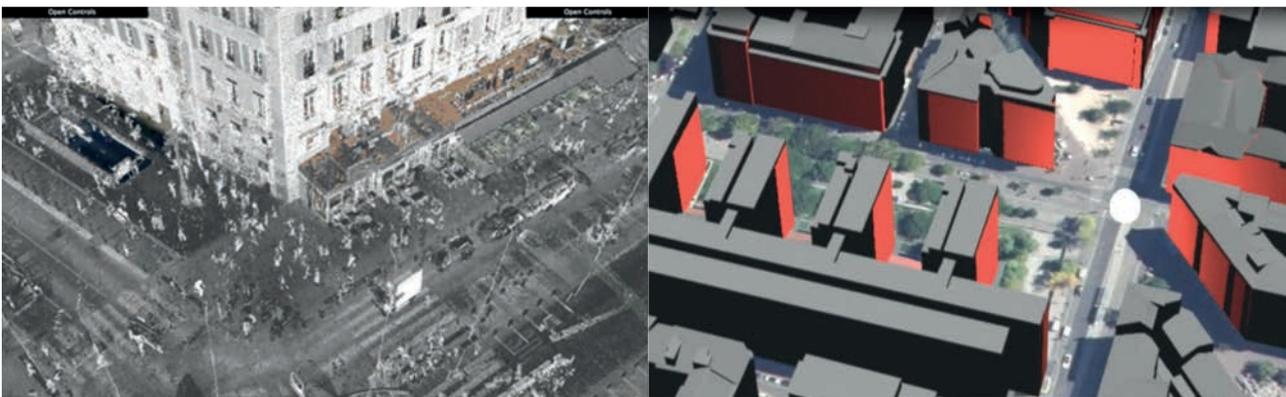


Photo © IGN

Figure 6 : Visualisation d'images LiDAR terrestres de la ville de Marseille (à gauche). Sécurisation d'un parcours basée sur le calcul des inter-visibilités. Les plans apparaissant en rouge représentent les zones visibles depuis la cible symbolisée par la sphère blanche lorsqu'elle se déplace, ou, inversement, les zones à partir desquelles il est possible de voir la cible.

### Sécuriser un site ou un parcours

La sécurisation des établissements recevant du public est un des enjeux majeurs pour pouvoir préserver l'intégrité physique de leurs occupants. Grâce à la co-visualisation des données images et LiDAR de l'intérieur comme de l'extérieur d'un bâtiment, il est possible de connaître avec précision ses différents points d'accès afin de le sécuriser, de préparer un plan d'intervention ou de gérer une crise à distance.

### Visualisation des modèles 3D des villes

Les villes intelligentes, dites *smart cities*, sont dotées de différents types de capteurs de données fournissant des informations permettant de gérer efficacement leurs actifs et leurs ressources. Le modèle 3D de la ville est le point pivot de la ville intelligente, car il contient des informations sur l'infrastructure de base qu'il est possible de compléter en ajoutant d'autres données comme les systèmes de transport, les réseaux de distribution d'eau et d'énergie, le bruit, la pollution, etc. iTowns aide à comprendre et à interpréter ces données ; il permet aussi de faire des simulations de l'aménagement de bâtiments ou de modèles urbains. Il est donc possible de construire des applications qui aident les décideurs lors de la mise en œuvre des plans d'aménagement urbain ou qui facilitent la concertation citoyenne lorsque ces plans sont soumis à consultation.

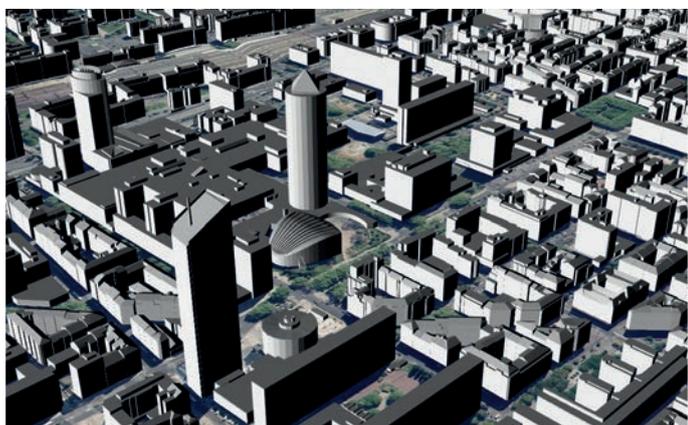


Photo © IGN

Figure 7 : Visualisation du modèle 3D de la ville de Lyon à partir de données ouvertes (*open data*) du Grand Lyon. Le survol avec la souris permet d'afficher les métadonnées des bâtiments.



Figure 8 : Simulation d'aménagement du mobilier urbain (le positionnement et l'échelle du modèle sont modifiables lors de la simulation).

### Un projet ouvert et collaboratif

iTowns est diffusé sous licence libre (Licences CeCILL-B & MIT), c'est le seul produit français de cette envergure à être diffusé en *open source* <sup>(12)</sup>. Cette décision prise en 2016 par l'IGN correspond à sa stratégie de faciliter l'utilisation de ses référentiels géographiques, de partager ses outils et son expertise et de créer une communauté de développeurs qui agissent en synergie pour concevoir de nouvelles applications et enrichir la plateforme. Cela permet d'enclencher une nouvelle dynamique pour le projet, car il est depuis lors ouvert aux contributions externes : tout contributeur qui le désire peut proposer des évolutions et/ou utiliser la plateforme pour réaliser ses propres applications, sans obligation d'apporter une quelconque contribution financière. La mise en *open source* de la plateforme iTowns permet à l'IGN de faciliter la coopération autour de cette plateforme dans le cadre de projets de recherche et d'innovation avec ses partenaires académiques ou industriels, mais aussi à des fins d'éducation.

### Un socle pour les travaux de recherche

iTowns ayant atteint un niveau de maturité technologique élevé, il est dorénavant possible de l'utiliser directement dans des projets de recherche et de créer des prototypes

(12) <http://www.itowns-project.org/>

rapidement. Basé sur la librairie *open source* Web3D ThreeJS, la plus développée au monde, iTowns permet le prototypage extrêmement rapide de projets R&D. Différents projets de recherche français et européens (Alegoria, URCLIM) s'appuient sur iTowns pour créer de nouveaux modes de navigation et d'interaction. Dans le projet ANR Alegoria (<http://alegoria.ign.fr>), iTowns permettra la navigation en 3D au sein de grands corpus de données iconographiques anciennes à partir de points de vue aériens et terrestres, de façon continue. Le projet ERA4CS URCLIM (<http://urclim.prod.lamp.cnrs.fr>), visant à la création de nouveaux services climatiques, utilisera iTowns pour permettre la dissémination de résultats de modèles climatiques. L'application doit jouer un rôle primordial afin d'adapter le rendu à chaque utilisateur, que ce soit un décideur public, un citoyen ou un scientifique. C'est aussi un excellent outil d'enseignement dans le monde géospatial.

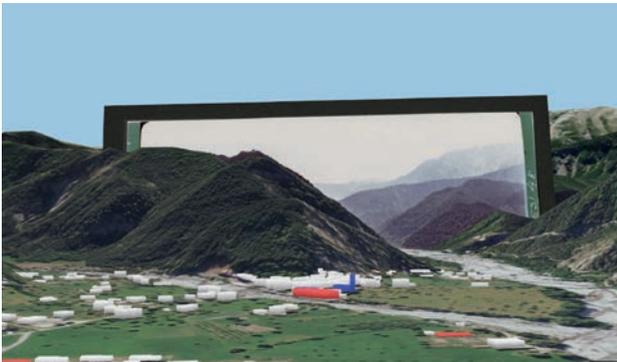


Figure 9 : Photographie ancienne retravaillée dans iTowns (projet ANR Alegoria). Archives nationales/Fonds LAPIE – © IGN 2019.

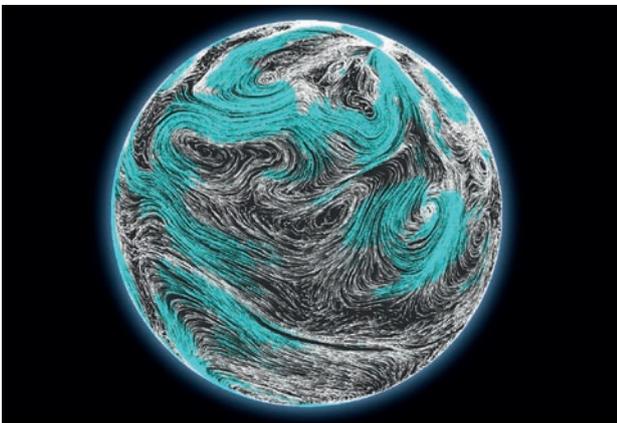


Figure 10 : Visualisation de flux d'air (travaux préliminaires au projet ERA4CS URCLIM).

## Une brique pour la future Géoplateforme

Les capacités de la plateforme iTowns et l'interopérabilité des données permettent de co-visualiser les référentiels de l'IGN et d'autres sources de données provenant de ses partenaires. Selon le contexte et le souhait de ces derniers, l'IGN pourra prendre en charge l'hébergement et la diffusion de leurs données. Les données au format standard (CityGML) sont intégrées dans la base, stockées dans les entrepôts de l'IGN et converties dans un format adéquat pour être diffusées en flux (3DTiles). Le partenaire

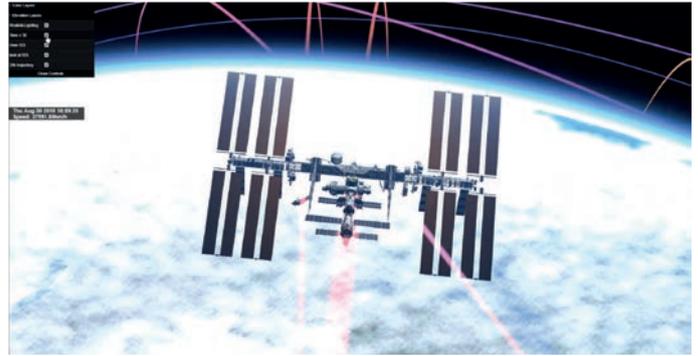


Photo © IGN

Figure 11 : Visualisation d'orbites de satellites.

pourra mettre à jour cette base de données directement de chez lui ou *via* l'infrastructure de l'IGN, favorisant ainsi la mutualisation de la collecte et de la mise à jour des données. C'est le principe retenu pour la Géoplateforme de l'IGN qui est actuellement en cours de construction, et dont iTowns constitue l'une des briques.

## Bibliographie

CARAFFA L., BRÉDIF M. & VALLET B. (2011), "3D oc-tree based watertight mesh generation from ubiquitous data", *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences (GeoBigData)*, volume XL-3/W5.

DEVAUX A., PAPANODITIS N. & BRÉDIF M. (2012), "A web-based 3d mapping application using WebGL allowing interaction with images, point clouds and models", *International Conference on Advances in Geographic Information Systems (20<sup>th</sup> ACM SIGSPATIAL GIS 2012)*, Redondo Beach, CA (USA).

VANDERGUCHT D., PAPANODITIS N., DEVAUX A., BÉNARD M. & MALLETT C. (2015), « ZForest : un prototype de plateforme Web de visualisation LiDAR, raster et vecteur de grande échelle », *Revue française de photogrammétrie et de télédétection*, n°211-212, pp. 129-141.

MASSE A. & CHRISTOPHE S. (2015), « Visualisation homogène du littoral à partir de données géographiques hétérogènes spatio-temporelles », *Actes du Colloque International de Géomatique et d'Analyse Spatiale (SAGEO 2015)*.

DEVAUX A. & BRÉDIF M. (2016), "Realtime projective multi-texturing of point clouds and meshes for a realistic street-view web navigation", *Web3D '16 Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Conference on Web3D Technology*, pp. 105-108.

PICAVET V., BRÉDIF M., KONINI M. & DEVAUX A. (2016), « iTowns, framework web pour la donnée géographique 3D », *XYZ*, n°147, 2<sup>ème</sup> trimestre, pp. 49-52.

CARAFFA L., BRÉDIF M. & VALLET B. (2017), "3D watertight mesh generation with uncertainties from ubiquitous data", *Asian Conference on Computer Vision (ACCV)*, novembre 2016, Taipei (Taiwan), pp. 377-391.

RUPNIK E., DAAKIR M. & PIERROT-DESELIGNY M. (2017), "MicMac – A free, open-source solution for photogrammetry", *Open Geospatial Data, Software and Standards*, pp. 2-14.

# L'apport des SIG 4D pour une cartographie du XXI<sup>e</sup> siècle empreinte de modernité

Par Marie LACROIX

Docteur ès Géosciences – Géomatique

Par son caractère universel, la carte représente un outil de communication et d'analyse pertinent. Visualiser et cartographier des données spatiales sont deux actions de plus en plus présentes dans la communication quotidienne. Dans cet article, nous proposons un descriptif de l'héritage de la cartographie et de son évolution actuelle, conséquence de l'apport des techniques, de l'informatique et des nouvelles technologies :

- la réalité virtuelle ;
- les méthodes de stéréographie et d'anaglyphie ;
- l'holographie ;
- la simulation 4D.

La carte se renouvelle sans cesse, et son développement facilite la visualisation de phénomènes jusqu'alors non représentés, comme les réseaux enterrés, les flux urbains...

Elle ouvre ainsi la voie à la conception de multiples outils d'aide à la décision et s'adresse à un très large éventail de métiers.

**P**our pouvoir restituer la diversité terrestre, de nombreux systèmes de projections ont été élaborés au cours des siècles. L'intégration de thématiques au travers des cartes a permis de préciser certains enseignements de la science géographique. Une même carte peut ainsi grouper de nombreuses données et l'essor de l'informatique permet le développement, à très grande échelle, de cet exceptionnel outil de réflexion.

Si la cartographie permet d'informer, d'expliquer, d'alerter et de prendre conscience des bouleversements qui affectent le monde et des réorganisations qui en découlent, s'intéresser à ce que fut l'évolution des représentations nous aide à mieux comprendre la cartographie contemporaine et à inventer son futur.

Actuellement, de nouvelles technologies permettent d'enrichir ces approches par le biais de nouveaux modes de représentation, qui peuvent désormais intégrer la dimension temporelle, les SIG 4D.

## L'évolution de la cartographie

Par son approche scientifique, la civilisation grecque a révolutionné la cartographie : Pythagore a étudié la sphéricité de la Terre, Ératosthène en a calculé la circonférence, Ptolémée a, quant à lui, répertorié les connaissances de

l'époque, tous seront des références pendant plus de quatorze siècles. Mais avec le déclin du commerce maritime, la cartographie disparaît presque totalement en Europe entre les IV<sup>e</sup> et XII<sup>e</sup> siècles, la Terre devient un support symbolique et religieux, centré sur Jérusalem, un diagramme T dans O.

Grâce à Al Idrisi qui répertorie et complète les cartes par un ouvrage décrivant la géographie des régions et les mœurs des populations, elle se développe à nouveau à partir du XII<sup>e</sup> siècle. C'est à cette époque que le *Traité de géographie* de Ptolémée est traduit en latin, à partir d'une version arabe. Puis, avec le renouveau du commerce maritime, de nouvelles cartes apparaissent, les portulans, qui regroupent les informations utiles à la navigation. Au XVI<sup>e</sup> siècle, les cartes sont enrichies à la suite de la découverte du Nouveau Monde, America. Et Gérard Mercator crée le premier atlas.

## Les systèmes de projection cartographique

Représenter la sphère terrestre sur un mode bidimensionnel entraîne des déformations ; et le choix de la projection varie en fonction de l'usage qu'il est prévu de faire du planisphère. Parmi les très nombreux modèles de projection, nous avons sélectionné les trois principaux que nous présentons dans le tableau de la page suivante.



Figure 1 : Évolution des cartographies à travers le temps (source : BnF).

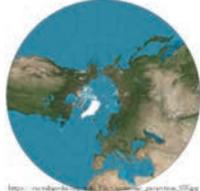
Projection	Déformations	Principe	Représentation schématique	Exemple
Cylindrique - Mercator	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Forme conservée,</li> <li>- Surface de plus en plus déformée à proximité des cercles polaires,</li> <li>- Ligne droite dessinée représentant un relevé au compas réel,</li> <li>- Les distances sont exactes le long de l'équateur ou le long des latitudes sécantes</li> </ul>	Projection de l'ellipsoïde sur un cylindre englobant		 <p><a href="http://www.sind.com/2013/07/projection-mercator/">http://www.sind.com/2013/07/projection-mercator/</a></p> <p>©STREBE/WIKI MEDIA COMMONS</p>
Conique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Forme conservée au niveau des parallèles de référence,</li> <li>- Distorsion constante au niveau de chaque parallèle,</li> <li>- Direction varie localement le long des parallèles,</li> <li>- Distances exactes pour les parallèles et méridiens de référence</li> </ul>	Projection de l'ellipsoïde sur un cône		 <p><a href="https://sketching.info/2012/07/05/les-projections-coniques/">https://sketching.info/2012/07/05/les-projections-coniques/</a></p> <p>©STREBE/WIKI MEDIA COMMONS</p>
Azimutale – Gnomonique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Distorsion accentuée depuis le centre,</li> <li>- Surfaces non conservées au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre,</li> <li>- Directions exactes à partir du centre.</li> <li>Aucune échelle.</li> </ul>	Les grands cercles deviennent des lignes droites		 <p><a href="https://sketching.info/2012/07/05/les-projections-azimutales/">https://sketching.info/2012/07/05/les-projections-azimutales/</a></p> <p>©STREBE/WIKI MEDIA COMMONS</p>

Tableau 1 : Modèles de projections cartographiques.

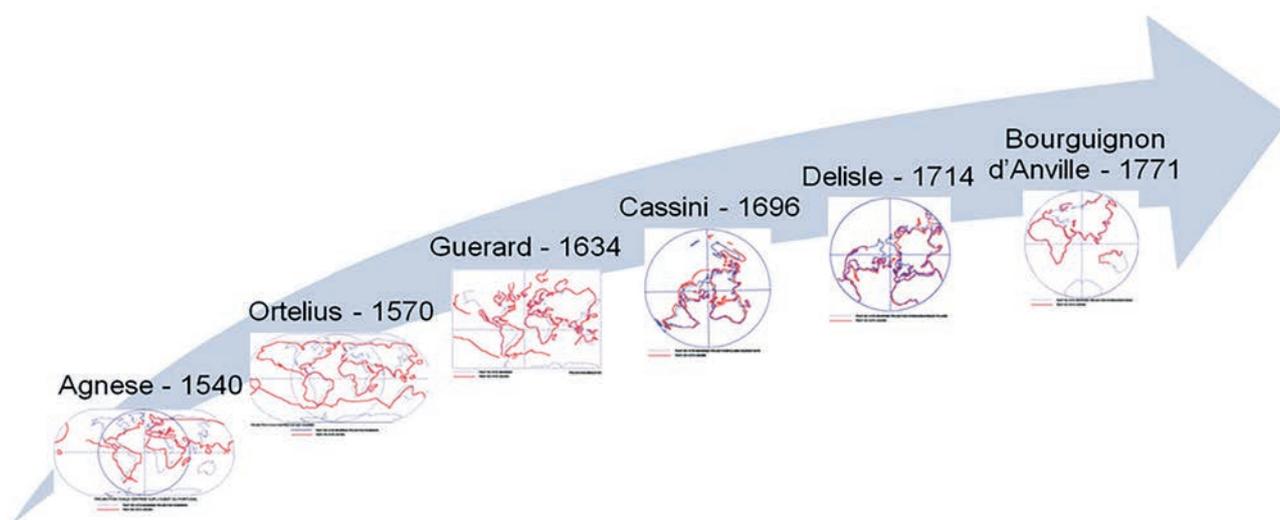


Figure 2 : Exemples d'évolution de la précision des cartographies (source : Lacroix, 2017, d'après Thierry Hatt, lycée Fustel de Coulanges).

### Les cartes thématiques

À partir du XVI<sup>e</sup> siècle, les types de planisphère se multiplient et les « atlas » apparaissent. Les cartes thématiques permettent alors l'étude spatiale d'un phénomène. Elles proposent certaines informations d'ordre qualitatif (phénomènes de natures différentes) ou quantitatif (contrastes et hiérarchies des données).

Tout en intégrant des informations techniques, la carte est d'abord une image destinée à être rapidement comprise. Ce support facilite la mise à disposition de l'information et permet de visualiser des solutions envisageables en réponse à des problèmes décisionnels à référence spatiale, comme le souligne le premier usage d'une carte à Saint-Malo en 1749 en tant que document de travail (Laboulais, 2008).

### L'apport de l'informatique : la géomatique et les SIG

À partir des années 2000, l'essor de techniques, comme la photogrammétrie aérienne ou les méthodes géophysiques, qui facilitent l'acquisition de grandes masses de données, et celui de l'informatique, qui favorise leur stockage et leur gestion, ouvrent la voie à des outils capables de fournir des informations calculées et/ou générées sous une forme facilement exploitable, combinant des données pluridisciplinaires.

Cette acquisition de données de plus en plus précises, sur des zones de plus en plus étendues et parfois inaccessibles, et le développement de la géomatique avec la création des systèmes d'information géographique (SIG) permettent de produire, à partir de jeux de données spatiales, des cartes variées (selon les thématiques souhaitées), à des échelles diverses (selon les phénomènes à visualiser), rapidement adaptables (modifications réalisables dès la mise à jour du ou des jeu(x) de données) et de façon automatique.

Ainsi, grâce au développement de l'informatique et des technologies, la cartographie vit une véritable révolution en contribuant à la multiplication de cartes thématiques s'appuyant sur des données fiables et rapidement actualisables.

### L'apport de la 3D à la cartographie actuelle

Les informations ainsi collectées permettent de construire de nouvelles cartes bidimensionnelles. Plus simples dans leur conception, ces cartes permettent de représenter la plupart des phénomènes, mais elles ne laissent pas la possibilité de visualiser des phénomènes tridimensionnels.

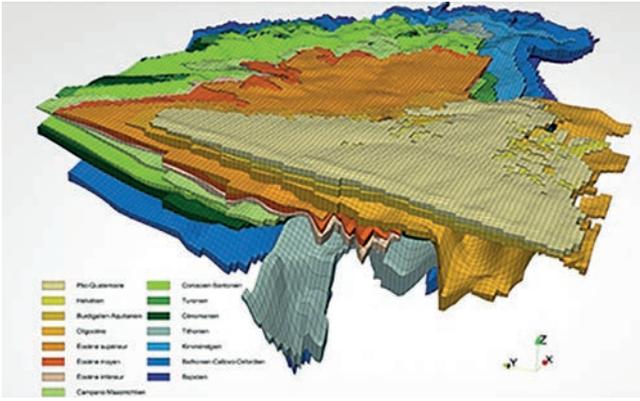
Ces données tridimensionnelles ouvrent de nouvelles thématiques de recherche et de représentations ainsi que de nouveaux moyens de communication. Elles nécessitent la gestion et la conception de cartographies mêlant à la fois des informations 2D (informations planes), 2,5D (informations géolocalisées en X et Y et disposant d'une indication altimétrique : hauteur des bâtiments, profondeur d'implantation des canalisations...) et 3D (X, Y et Z).

Cette évolution dans le domaine de la géomatique permet de nouvelles utilisations dans le cadre de l'aide à la décision ou de la communication sur un projet. La troisième dimension permet ainsi :

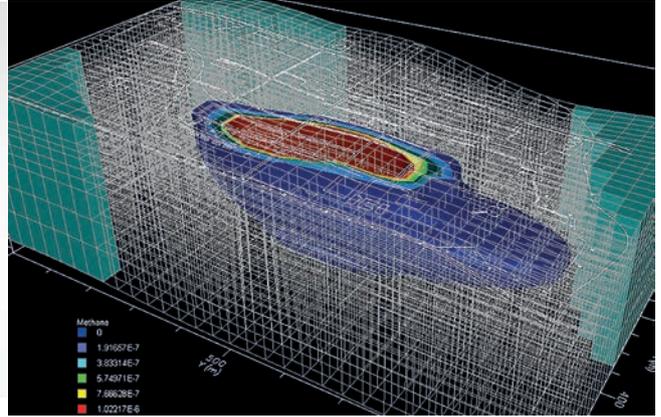
- la visualisation de sites remarquables et de zones protégées, l'identification des bâtiments classés, la confection de l'inventaire du patrimoine architectural ou artistique...
- la représentation des espaces à travers le temps : une simulation historique des bâtiments, par exemple ;



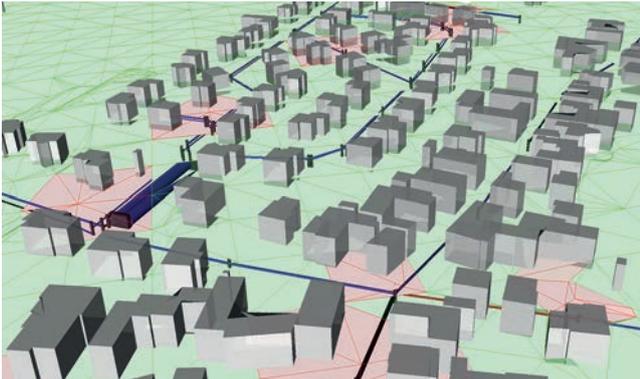
Figure 3 : Modélisation de la ville de Paris à différentes époques (source : Dassault Systèmes).



© BRGM



© USGS



© Creative Commons by-nc-nd



© Creative Commons by-nc-nd

Figure 4 : Exemples de restitutions tridimensionnelles obtenues grâce aux logiciels Marthe (BRGM), MODFLOW (USGS) et ELYX3D (Lacroix, 2016b et 2017).

- l'étude de problématiques environnementales, comme la cartographie du bruit, la simulation des courants aériens (Kiseleva *et al.*)...
- l'aménagement urbain avec l'intégration de projets architecturaux, la représentation de l'ensoleillement, des réceptions hertziennes ou téléphoniques ;
- la modélisation du trafic routier et de la mobilité douce ;
- la projection d'informations sur des zones dont l'accès est difficile, voire impossible : les forages, les gisements miniers, les constructions souterraines...

La 3D permet ainsi de communiquer sur de nouvelles thématiques et d'élargir le champ des possibles pour la cartographie. Elle sert alors de tremplin pour de nouveaux modes de représentations impliquant la dimension temporelle ou l'usage de nouveaux outils.

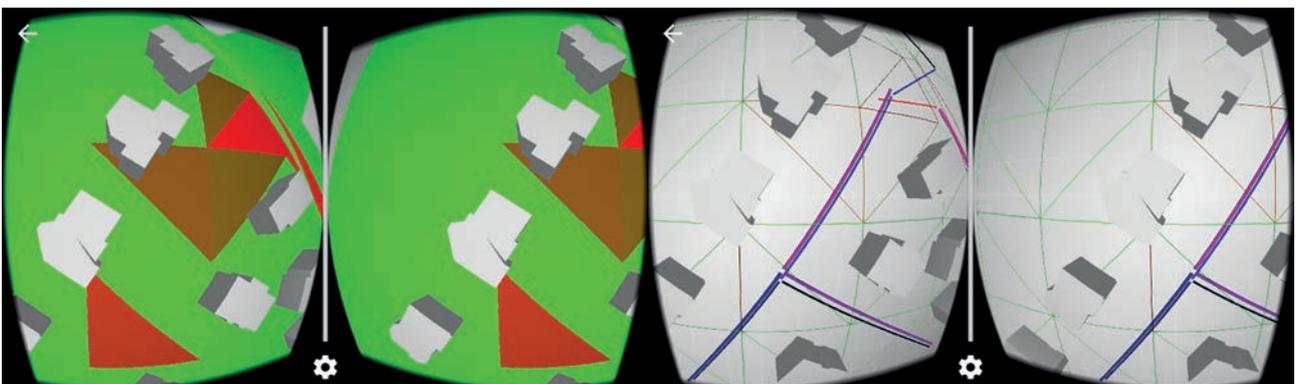
## Vers une nouvelle représentation des phénomènes

Certains phénomènes nécessitent de développer de nouveaux axes de recherche en matière de représentation, en intégrant soit les technologies de réalité virtuelle, soit la dimension temporelle.

### L'usage de technologies de réalité virtuelle

Ces modes de représentation en quatre dimensions permettent une meilleure estimation et une meilleure visualisation de phénomènes physiques. Ils peuvent être couplés à de nouvelles technologies : les casques de réalité virtuelle, les lunettes CardBoard, ou bien encore les anaglyphes.

Ces technologies, basées sur des techniques anciennes



© Creative Commons by-nc-nd

Figure 5 : Représentation, grâce à la technologie CardBoard, de zones et de canalisations à risque (source : Lacroix, 2016).

de stéréoscopie, donnent accès à une autre visualisation plus réaliste et/ou immersive de phénomènes et de segments de territoires et rendent possibles de nombreux usages qui favorisent une communication plus intuitive, comme :

- la visualisation d'éléments souterrains (en particulier, les risques liés aux réseaux enterrés ou des zones de carrières) ;
- la représentation immersive d'un espace étudié *via* les visualisations :
  - anaglyphique,

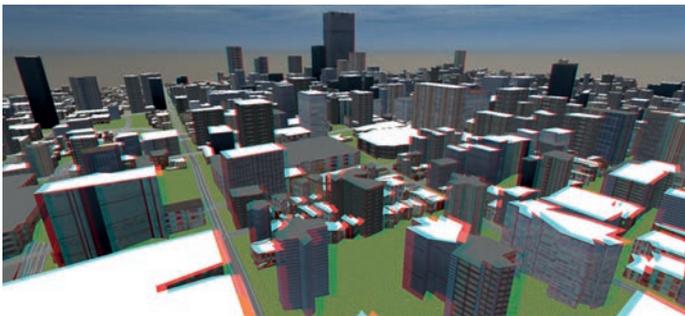


Figure 6 : Vue anaglyphique d'une ville (source : Richard, 2018).

- stéréoscopique,



Figure 7 : Vue stéréographique d'une ville (source : Richard, 2018).

- et holographique.

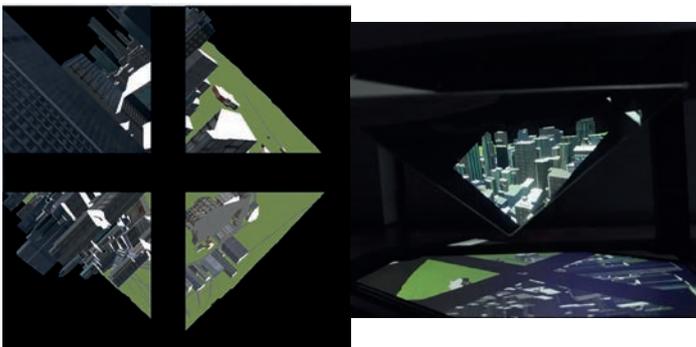


Figure 8 : Vue holographique d'une ville (source : Richard, 2018).

### La dimension temporelle

Gérer le temps en complément de la représentation 3D est également possible grâce :

- aux nouvelles technologies d'acquisition et de stockage des informations, ainsi qu'aux matériels informatiques actuellement disponibles (immersion/cartes graphiques) qui permettent le développement de logiciels informatiques plus performants et favorisent l'accès à ces nouvelles cartographies 4D pour le grand public, permettant ainsi une meilleure diffusion de l'information ;
- à l'instauration de « collaborations » entre différents domaines de l'informatique (en particulier, la géomatique et les jeux vidéo).

Intégrer le temps dans la représentation cartographique permet ainsi de modéliser :

- l'évolution temporelle d'un territoire ;
- un même phénomène à différentes échelles de temps selon les métiers intéressés par cette information : les agents de voirie pour l'étude de l'usage des routes à l'échelle de la journée ; les géotechniciens pour l'expertise technique et la prédictibilité de l'usure des routes au fil du temps ; les autorités communales pour la mise en place de stratégies de prévention et la détermination d'itinéraires bis à aménager lors de travaux...
- un territoire à différentes périodes de l'année (trafic variable selon les conditions météorologiques, les périodes de vacances...)
- la gestion des flux (comme la simulation du trafic routier).

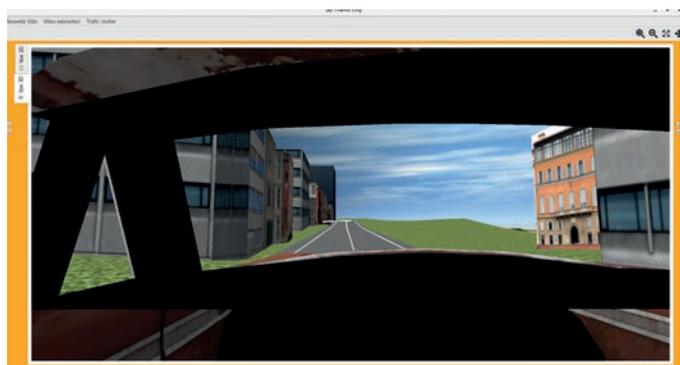


Figure 9 : Exemple de la simulation en 4D de la circulation routière (source : Richard, 2018).

## Conclusion

Histoire, géographie, économie, architecture, écologie, sécurité... tous ces domaines peuvent être rendus plus compréhensibles par la cartographie, car chaque carte, par son caractère universel, est construite dans l'intention d'apporter une démonstration et de présenter en simultané des informations.

Au cours des siècles, la cartographie a connu de grandes évolutions liées aux améliorations des données et au choix des représentations et des thématiques. Les réalités stratégiques contemporaines font appel aux modélisations 3D et 4D, qui ont connu un fort développement grâce à l'Internet et, plus généralement, à l'informatique.

Au cœur des préoccupations actuelles, de nouvelles applications doivent proposer, à divers corps de métiers, des instruments de travail qui portent à la réflexion et aident à

la prise de décision en prenant en compte l'acquisition de grandes masses de données, ces nouveaux outils restant toutefois dépendants de la précision des informations.

De plus, les technologies actuelles offrent de nouveaux modes de représentation. Ainsi la réalité virtuelle, la simulation 4D ou les hologrammes assurent-ils une lisibilité accrue d'un nombre toujours plus important de données, ce que ne permet plus la carte bidimensionnelle telle qu'on la connaît historiquement, ni même la cartographie 3D.

## Bibliographie

BOUILLÉ F., "Europe in transition", GIS International Conference, Brno: "Towards 2000: the actual main trends in future GIS", 1994c, Aug. 28-31, *Proceed.*, chap. K, pp. 13-27.

KISELEVA E. A., KISELEV E. N. & POGORELOV A. V., "Sustainable Development of Territories: Cartography and GI Support", International Conference InterCarto-InterGIS 21, Krasnodar et Sochi (Russie) : "Modeling of the wind velocity field – Renewable sources of energy in Krasnodar region", 2015, November 12-14, *Proceed*, pp. 266-273.

LABOULAIS I., *Les Usages des cartes (XVII<sup>e</sup>-XIX<sup>e</sup> siècles) : pour une approche pragmatique des productions cartographiques*, Presses universitaires de Strasbourg, 2008.

LACROIX M., "RISK Information Management, Risk models and Applications", International Conference, RIMMA 2016, Berlin (Allemagne) : "Dealing with the creation of an Artificial Intelligence tool taking the underground network uncertainties and regulations into account", 2016, June 27-29, *Proceed*.

LACROIX M., "GIS for Sustainable Development", International Conference, InterCarto-InterGIS 22, Protvino (Russie) : "Dealing with topological relations in underground networks", 2016, September 12-14, *Proceed*.

LACROIX M. (2017), « Méthodes pour la reconstruction, l'analyse et l'exploitation de réseaux tridimensionnels en milieu urbain », *Sciences de la Terre*, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI (NNT : 2017PA066001).

RICHARD J. (2018), « Apport des SIG et de la réalité virtuelle à la modélisation et à la simulation du trafic urbain », *Géographie*, Université Paris-Est (NNT : 2018PESC1058).

# Why Standards Matter – The objectives and roadmap of the International Open Geospatial Consortium (OGC)

By Mark REICHARDT  
Open Geospatial Consortium (OGC)  
and François ROBIDA  
BRGM

The vision and mission of the Open Geospatial Consortium is discussed, with emphasis on its role to bring the power of location to decision makers around the world. OGC standards have significantly improved location information sharing worldwide and enable rapid integration of location data and technologies used in traditional mapping. OGC's focus now is to improve decision making through the efficient application of location to a range of social, economic and environmental topics. OGC standards facilitate the rapid mobilization of new data sources (e.g. commercial imagery, LIDAR) and new and disruptive technologies (e.g. IoT, autonomous and unmanned systems) to address challenges related to climate change, water resource availability, urban planning and management, insurance risk assessment, public safety, alternative energy placement, and land administration to name a few.

Throughout history, maps not only shaped humanity's local and global exploration, they provided a powerful tool that informed important decisions about countless social, political, economic, and environmental topics – from knowing the location of wild herds 14.000 years ago <sup>(1)</sup> to John Snow's famed closure of a cholera-infested water source <sup>(2)</sup> in 1854.

Today's digital maps keep us abreast of severe weather, monitor and manage our natural resources, guide commercial and unmanned aircraft, affirm land ownership, improve traffic safety, understand climate change and mitigate its impacts, and keep us in touch with friends. Mapping today underpins massive business enterprises such as Google, Uber, Lyft, and the hospitality and insurance industries. Mapping is key to good governance from the local to international levels. The ability to know our location and to find our way in our communities and around the world is assumed and expected in our daily lives.

But the ubiquity and usefulness of location information arrived quite some time after the creation of Geographic Information Systems (GIS) in the 1960s – it took not only the creation of robust, reliable, and widespread communication networks, but also the creation and implementation

of standardized data formats and interfaces that allowed location information to travel upon them.

The Open Geospatial Consortium (OGC) was formed in the early 1990s as an international, not-for-profit industry consortium dedicated to uniting the rapidly growing geospatial information and technology industry. OGC's vision statement offers insight into the organization's global mandate.

## A world in which everyone benefits from the use of geospatial information and supporting technologies

Simply put, OGC's vision is to improve our understanding of, and decision making regarding, social, economic, and environmental topics by removing all barriers to the sharing and application of location information. OGC achieves this by facilitating an international forum and programs that bring together geospatial technology providers and

(1) <https://www.telegraph.co.uk/news/worldnews/europe/spain/5978900/Worlds-oldest-map-Spanish-cave-has-landscape-from-14000-years-ago.html>

(2) [https://en.wikipedia.org/wiki/John\\_Snow](https://en.wikipedia.org/wiki/John_Snow)



Figure 1: OneGeology portal giving access to national geological maps served by distributed OGC web services (source: [www.onegeology.org](http://www.onegeology.org)).

users to cooperatively develop freely available open standards that enable different sources of location information and different technologies to work together – or to “interoperate” – making it easier for everyone to access and use location information.

The challenge in the early 1990’s was the inability to easily share geospatial information among organizations using different vendor products. Agreed-upon open international standards became the approach to ensure that geospatial information sources (those with a location component) and technologies could quickly and cost effectively work together (interoperate) while simultaneously allowing a healthy, diverse, and non-monopolistic software marketplace to exist.

By the late 1990s, OGC standards had become a globally adopted open standards framework implemented by technology providers to easily enable a common way for location information to be discovered, shared, integrated, processed, and exploited by users across a range of different products, systems, organizations, and jurisdictions.

This shift to OGC standards:

- Freed geospatial technology users from being locked-in to a single vendor architecture;
- Increased users’ choice of interoperable IT solutions in the marketplace;
- Enabled technology providers to easily integrate their products into different customer environments and with different vendor products;
- Benefitted traditional mapping organizations by making it easier to accept new geospatial information sources in to their production processes and distribute products to customers;
- Reduced duplication of geospatial data by allowing authoritative geospatial data to be accessed directly over the web; and
- Reduced IT systems costs by eliminating the need for custom software interface development.

With this standardization work completed, what’s OGC doing now? Standards need to evolve in-step with technology, so 25 years since its inception, experts from over 520 OGC member organizations representing industry, academia, research, and government continue to participate in OGC’s international committees, working groups, and innovative rapid prototyping initiatives to advance new standards and interoperability best practices that address global needs in a shifting technology environment.

Indeed, France is no stranger to OGC, with membership from French organizations such as: Airbus Defence & Space, ATOS, BRGM, Capgemini, e-Science Data Factory, GEOMATYS, IGN, Lab-STICC CNRS UMR 6285, Laboratoire d’Informatique de Grenoble, LiRis, METEOFRANCE, METSAFE, MINES ParisTech, Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, THALES S.A., among others.

The continual innovation and evolution of OGC and complementary standards has resulted in their use across a broad range of useful location-based technologies and services, including:

- European INSPIRE Directive <sup>(3)</sup> – OGC and ISO geospatial standards form the basis of a key European Directive designed to ease important geospatial information sharing across the nations of the European Union. In France, public organizations such as BRGM, IGN and METEOFRANCE, as well as local authorities have implemented OGC standards to support this Directive.
- OneGeology <sup>(4)</sup> – Geological Surveys around the world use OGC standards to make their data shareable across national boundaries. This allows surveys to view geologic conditions on a much broader regional and international basis.

<sup>(3)</sup> <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/directive-europeenne-inspire>

<sup>(4)</sup> [www.onegeology.org](http://www.onegeology.org)

- Satellite Earth Observation (EO) Providers – Government and commercial imagery providers, such as the European Space Agency, Airbus and DigitalGlobe make imagery accessible to their customers and partners via OGC standards. For example, the European Union Copernicus Marine Environment Monitoring Service <sup>(5)</sup> provides a range of global ocean analysis and forecast digital map products via the OGC Web Mapping Service standard, which is implemented in hundreds of geospatial and location-enabled technologies in use today.
- New Zealand Government – numerous New Zealand government agencies use OGC’s Web Services, Sensor Web Enablement, and WaterML standards to rapidly and cost effectively integrate hundreds of water quality observation stations maintained on different systems by 16 regional and unitary water councils and 3 federal Crown Research Institutes. The result is a nationally integrated and publicly web-accessible resource for citizens to understand how suitable any rivers, lakes, and/or coastal water resources are for a range of uses – from recreation to resource management.

‘Living’ maps are growing more commonplace due to real-time data from location-aware fixed and mobile sensors and IoT devices being integrated into wider geographical 2D and 3D contexts. OGC’s Sensor Web Enablement and SensorThings API standards <sup>(6)</sup> make this integration easy. Further, OGC’s CityGML and complementary geospatial standards <sup>(7)</sup> also enable the integration of ‘as built’ engineered structures, such as Building Information Models, into geospatial contexts to construct detailed 3D models of urban environments. These models help government,

private sector representatives, and citizens to better plan and manage various city planning and services requirements. Examples of these standards in use include:

- Smart and Resilient Cities – Major urban centers around the world are constructing and maintaining 3D city models – digital twins of cities - that are enabling efficient urban development & planning, expedient delivery of city services, optimized placement of retail stores, improved safety and flow of pedestrian and vehicle traffic, and a better understanding of and protection against the impacts of extreme weather events. A dedicated partnership has been established between OGC and BuildingSMART International (bSI) to increase interoperability between the geospatial (i.e. geological, geotechnical, geographic) and built environment domains.
- Air Quality Monitoring – Over 90% of Earth’s population are living in areas exceeding the World Health Organization’s recommended limits on air pollution, and an estimated 3.7 million annual deaths are attributable to air pollution <sup>(8)</sup>. As part of a pilot project funded by Natural Resources Canada, citizens across 10 cities are actively monitoring air quality and associated health risks through a network of inexpensive citizen-built and -maintained air quality sensors linked together with OGC’s SensorThings API standard <sup>(9)</sup>.

(5) <http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/>  
 (6) [www.opengeospatial.org/projects/groups/sensorwebdwg](http://www.opengeospatial.org/projects/groups/sensorwebdwg)  
 (7) <https://www.opengeospatial.org/domain/built>  
 (8) <https://www.who.int/airpollution/en/>  
 (9) <https://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/canadas-spatial-data-infrastructure/funded-projects/21465#i3>

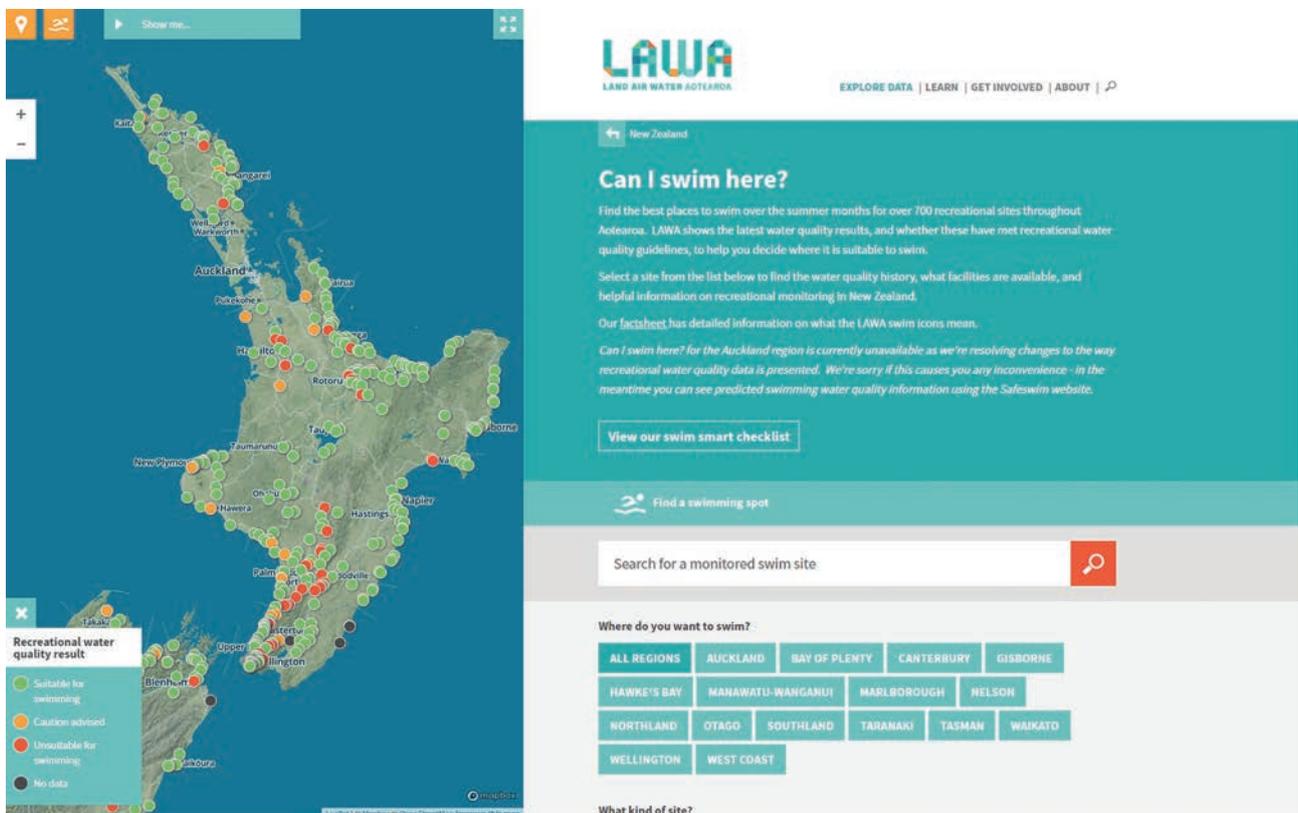


Figure 2: Land and Water Aotearoa (LAWAA) Can I Swim Here Website, leverages OGC standards to integrate water quality data from over 1400 point source water observations across New Zealand (source: <https://www.lawa.org.nz/>).

- Ocean monitoring – OGC Sensor Web Enablement standards help the US National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA) and European research programs such as SeaDataNet to connect hundreds of coastal and inland buoys and sensors that measure water quality, temperature, wave height, and other phenomena. These real-time observations provide important environmental information for researchers and inform decision makers and citizens affected by climate change and increasingly severe weather events.

OGC members, working collectively with experts in the community, are keeping an eye on key geospatial technology trends and working to identify and prioritize roadmaps to address emerging and disruptive technologies that would benefit from early attention in terms of interoperability arrangements. Through this process, led by OGC's Chief Technology Officer, trends are identified and prioritized for attention in OGC development programs. This allows standards and associated interoperability best practices to evolve quickly to support the rapid implementation of these capabilities into user environments. Examples of current trends include: geospatial big data processing; modeling, simulation, and prediction; immersive geospatial capabilities, such as augmented and virtual reality; indoor positioning, models, and navigation; and unmanned/autonomous systems. OGC maintains a public thematic map of these trends, as well as detailed roadmaps for each specific trend topic, to assist in the prioritization of topics for action by OGC members<sup>(10)</sup>.

OGC members have identified several of these trends as priorities for near-term action within OGC programs and in cooperation with OGC partner organizations such as the World Wide Web Consortium (W3C) and bSI.

- Indoor location, models, and navigation – these important initiatives are underway in OGC to address the major challenge of mapping, locating, and navigating in an indoor environment and to better understand and manage assets located underground. While the outdoor location challenge has been largely solved via GPS and other global navigation technologies, efficient indoor location and mapping continues to be a challenge. OGC has developed an IndoorGML standard to address indoor navigation and is advancing a Pilot Initiative to address indoor mapping based on LIDAR scanning of interior spaces.
- Underground Infrastructure Information Management – work is also underway by OGC members in cooperation with New York City, London, and Singapore to advance a common data model and standardized approach for managing underground infrastructure in urban areas. The urgency of having detailed and accurate underground infrastructure maps in 3D has been accentuated by recent disasters such as a construction-related rupture of a high-pressure gas pipeline in Belgium that caused multiple fatalities, injuries, and property damage<sup>(11)</sup>; and the

(10) <https://github.com/opengeospatial/OGC-Technology-Trend>

(11) [https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files\\_mf/FD\\_27681\\_Ghislengheinv\\_2004ang.pdf](https://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/wp-content/files_mf/FD_27681_Ghislengheinv_2004ang.pdf)

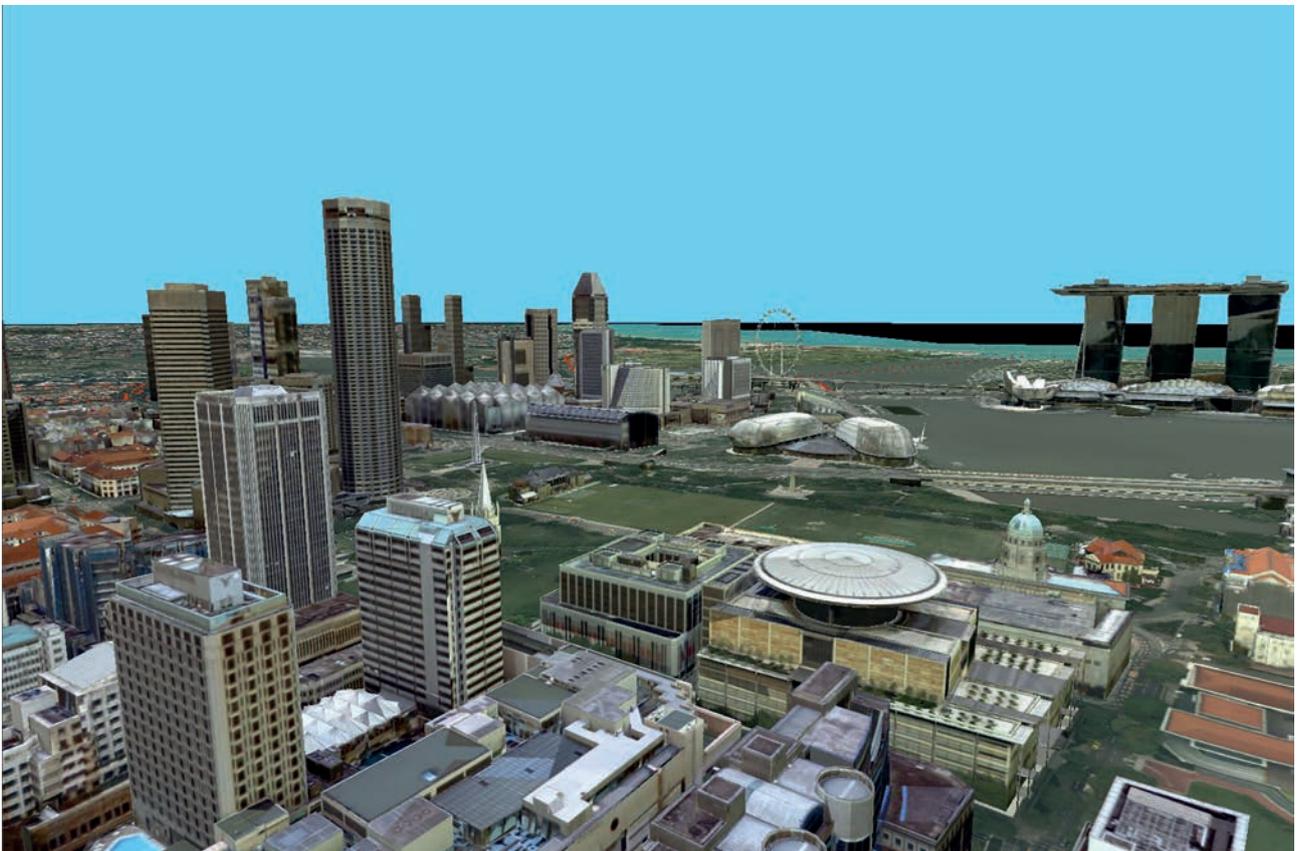


Figure 3: View of Singapore 3D City Model managed using the OGC CityGML standard (source: Singapore Land Authority).

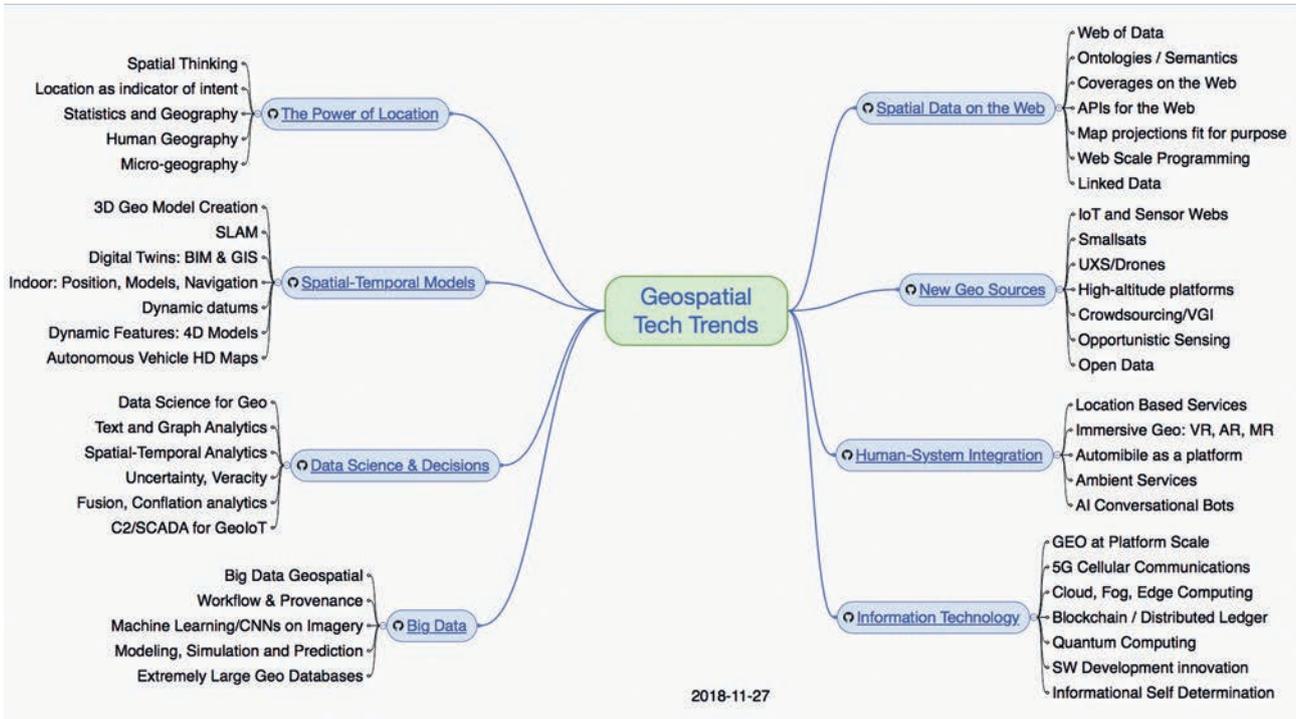


Figure 4: OGC Technology Trends MindMap.

2012 Hurricane Sandy storm surge that resulted in 3-day blackout of lower Manhattan in New York City<sup>(12)</sup>. A common data model will allow both geo (where) and semantic (what) interoperability of underground infrastructure datasets coming from multiple organizations.

- Web of Data<sup>(13)</sup>: Spatial Data on the Web – OGC has partnered with W3C to advance standards solutions that make it easier to work with location information on the web. Much of the location information available is maintained and published via portals or “silos” on the web, making discovery and access difficult. With a proliferation of new technologies producing and publishing more and more location-based data, identifying a common standardized framework to discover, access, and exploit any available location information on the web is an important objective.
- Modeling, Simulation, and Prediction<sup>(14)</sup> – establishing visual and/or predictive models of the real world on a range of computing platforms – including mobile devices – is becoming commonplace thanks to advances in Graphical Processing Units (GPU) and associated hardware. OGC has organized the defense, public safety, and earth & environmental science communities to explore standards and interoperability arrangements that will: accelerate the transition from 2D maps to 3D models of the earth; facilitate the federation of models to

render high fidelity environmental predictive models; and to streamline the ingesting of geospatial and associated information to a point that allows the production of new 3D models in near real-time. Predictive models add the temporal dimension, resulting in 4D models that are important in the training, preparation, and response to natural disasters.

Understanding, avoiding and mitigating the impacts of human activities on our planet is becoming increasingly important as a growing population realizes that our consumptive demands are not aligned with the hard limitations of earth’s resources. As shown here, the work of OGC and many other standards organizations is improving the discovery, integration, and application of local to global information that has the power to inform decisions concerning how to sustainably address a range of critical environmental, social, and economic issues.

(12) Bloomberg Businessweek, <https://www.bloomberg.com/news/features/2017-08-10/nobody-knows-what-lies-beneath-new-york-city>

(13) <https://github.com/opengeospatial/OGC-Technology-Trends/blob/master/Trends/WebofData.adoc>

(14) <https://github.com/opengeospatial/OGC-Technology-Trends/blob/master/Trends/ModSimPredict.adoc>

# La géostatistique au service de la modélisation géologique 3D

Par Didier RENARD

et Christian LAJAUNIE

Centre de Géosciences, MINES ParisTech – PSL University

Simon LOPEZ

Direction Géoressources/Unité GSO (BRGM)

Cécile ALLANIC

Direction Géoressources/Unité GBS (BRGM)

Gabriel COURRIOUX

et Bernard BOURGINE

Direction Géoressources/Unité GSO (BRGM)

et Philippe CALCAGNO

Direction Géoressources/Unité REG (BRGM)

Bureau de Recherches géologiques et minières (BRGM)

Version moderne de la cartographie géologique 2D, la modélisation géologique 3D est appelée à jouer un rôle fondamental dans l'exécution des missions relevant du Référentiel Géologique de la France. Elle intègre des données variées, relatives tant à la surface qu'à la profondeur, et permet une représentation cohérente, bien qu'imparfaite, du sous-sol. Elle permet aussi au (géo) modélisateur de tester et de visualiser des hypothèses de façon à éprouver la pertinence de ses interprétations. Les outils développés et mis en place au BRGM reposent sur des modèles géostatistiques sous-jacents. La méthode du champ de potentiel, simple et flexible, faite de relations géologiques et de champs stochastiques, assure l'intégration des données sous une forme cohérente et permet de chiffrer les incertitudes. Ainsi, loin de s'opposer, l'interprétation du géologue et la représentation stochastique peuvent se nourrir l'une de l'autre.

Les missions résultant du Référentiel Géologique de la France consistent à collecter des informations relatives à la surface et au sous-sol, à les combiner et à offrir une nouvelle représentation géologique du territoire français<sup>(1)</sup>. Le RGF est une réponse aux enjeux actuels et futurs des géosciences : « gestion des ressources en eau, approvisionnement en matières premières, recherche de nouvelles ressources énergétiques, stockage d'énergie, de CO<sub>2</sub> et de déchets, protection des populations et de l'environnement... ce qui nécessite de pouvoir fournir aux acteurs publics et privés une description aussi complète que possible de la structure du sol et du sous-sol ».

Alors que la Carte Géologique de la France visait une couverture en deux dimensions du territoire, le RGF s'intéresse à une représentation en trois dimensions de la géologie française. Dans ce contexte, la modélisation géologique est appelée à jouer un rôle central. La transition entre ces deux approches est décrite avec précision dans un article récent de Lopez *et al.* (2017), auquel

nous emprunterons plusieurs éléments<sup>(2)</sup>. À l'heure du numérique, de la donnée massive et de l'algorithmique, il nous est apparu intéressant de revenir, ici, sur l'élément moteur qui permet de tirer plus des données qu'elles n'en contiennent réellement, en formulant des hypothèses et en élaborant des modèles. Classiquement, il peut s'agir de l'interprétation qu'est amené à faire le géologue de ses données, pour aboutir à son *modèle géologique*. Dans le présent article, il sera plutôt question de la démarche géostatistique qui permet de représenter une réalité imparfaitement connue par un *modèle géostatistique* stochastique, mais par ailleurs assez simple, aboutissant à une modélisation 3D à travers laquelle l'interprétation du

(1) <http://rgf.brgm.fr/page/mission-referentiel-geologique-france> (consulté le 1<sup>er</sup> février 2019).

(2) LOPEZ S., ALLANIC C., COURRIOUX G., BOURGINE B., CALCAGNO P., CARITG S. & GABALDA S. (2017), « La Modélisation géologique 3D : un outil pour la cartographie », Revue officielle de la Société géologique de France, 193, pp. 48-53.

géologue et représentation stochastique sont en perpétuelle interaction.

La modélisation géologique est essentiellement une démarche d'intégration et de mise en cohérence de connaissances et d'interprétations. Elle est alimentée par des données diverses : il peut s'agir d'observations faites par le géologue directement sur le terrain (affleurements, contacts lithologiques, mesures structurales), de données de sondages, de géophysique, mais aussi de modèles numériques de terrain, de cartes, de coupes... La troisième dimension, souterraine, est souvent beaucoup plus incertaine, car elle est caractérisée de manière indirecte (méthodes géophysiques) ou de façon très ponctuelle et partielle (forages). Cependant, même pour le géologue cartographe du XIX<sup>e</sup> siècle qui n'avait accès qu'à des données de surface, la troisième dimension n'était jamais bien loin. C'est par le biais de coupes verticales judicieusement choisies que le géologue élaborait son interprétation de la réalité géologique et de l'histoire de celle-ci, et renforçait la cohérence de son modèle et de la cartographie 2D. Naturellement, l'enjeu ne sera pas le même dans un contexte géologique calme que dans un contexte chahuté par des déformations tectoniques.

La question des incertitudes pesant sur la géométrie ou sur les propriétés de milieux géologiques n'est pas nouvelle. C'est notamment cette question qui a donné naissance, à partir des années 1950, à la géostatistique. Née de l'activité minière, il s'agissait de tirer le meilleur parti possible des données disponibles (obtenues par sondages, échantillonnages) pour évaluer les ressources d'un gisement. Georges Matheron (1930-2000) en a théorisé les concepts majeurs au Centre de géostatistique de l'École des Mines de Paris, après son passage au BRGM (1954-1963). Le développement de la discipline s'est poursuivi depuis, au sein de ce qui est devenu le Centre de géosciences de MINES-ParisTech, en liaison avec ses partenaires. La géostatistique<sup>(3)</sup> est aujourd'hui une étape incontournable de l'évaluation des ressources minérales. Elle s'est aussi étendue à nombre de domaines dans lesquels une variable *spatialisée* (ou *régionalisée*) se déploie dans l'espace : ressources naturelles, ressource halieutique, environnement, pollution du sol, de l'eau, de l'air... Il peut être question de profondeur ou d'épaisseur de couche, de concentration en métal, en hydrocarbure, en polluants, en biomasse...

Une caractéristique fréquente de tels phénomènes (une minéralisation, par exemple) ou de telles variables (la teneur de cette minéralisation) est de présenter un aspect à la fois structuré et aléatoire : structuré, parce que les mesures opérées en deux points proches auront tendance à être plus approchantes que celles opérées en deux points distants (on parle de *variogramme* ou de *corrélacion spatiale*) ; aléatoire, parce que leur prévision échappe à tout modèle déterministe. Empiriquement, le calcul du *variogramme* ou de la *covariance* à partir des données collectées permet de faire la part entre le côté structuré et ce qui paraît aléatoire. Il est alors extrêmement commode de considérer la variable régionalisée comme une réalisation d'un modèle probabiliste de fonction aléatoire caractérisé

par sa structure géostatistique. Il n'est pas question ici de métaphysique. En particulier, il ne s'agit pas de considérer qu'un phénomène est « dû [ou non] au hasard »<sup>(4)</sup>, mais de proposer une représentation commode des configurations possibles, qui soient cohérentes avec les observations disponibles. On peut alors, notamment, procéder à des estimations *optimales* (*kriègeage*) pour répondre à des besoins d'interpolation ou de cartographie. De telles cartes ne permettent évidemment pas de reproduire des détails qui auraient échappé aux mesures disponibles, mais elles peuvent être assorties de *variances d'erreur* quantifiant leur incertitude. On peut également procéder à des simulations géostatistiques qui reproduiront la variabilité existante et qui sont censées ressembler à la réalité, tout en en étant différentes.

Au BRGM, la boîte à outils géostatistique développée au départ avec l'École des Mines de Paris est progressivement devenue le logiciel GDM (*Geological Data Management*).

Ce dernier s'intéresse aux thématiques des géosciences (mine, hydrogéologie, géotechnique, environnement...). Il permet d'interpoler différentes variables : propriétés, teneurs, ou encore épaisseur ou profondeur représentant des géométries peu tectonisées. En matière de géométrie, il intègre de nombreux tests automatiques visant à vérifier la cohérence des données, des tests indispensables pour combiner de façon efficace des milliers d'informations diverses (forages et cartes géologiques). Les surfaces interpolées peuvent être combinées entre elles en considérant certains événements géologiques, comme l'érosion ou le dépôt.

Du point de vue mathématique, cette approche est essentiellement bidimensionnelle : chaque surface ne peut être rencontrée plus d'une fois le long d'une verticale, elle ne peut donc pas présenter de replis. La cartographie de nombreuses données d'orientation (azimut, pendage, polarité des stratifications, schistosités...) en sus des points de passage des interfaces géologiques, ainsi que le besoin de modélisation de structures géologiques complexes, ont motivé dans les années 1990 de nouveaux travaux de recherche. Menés conjointement par le BRGM et l'École des Mines de Paris, ils ont débouché sur l'élaboration d'un nouvel outil géostatistique : la méthode du potentiel<sup>(5)</sup> qui, implémentée dans l'outil GeoModeller, permet de prendre en compte simultanément les données d'interfaces et d'orientation (voir la Figure 1 de la page suivante).

Dans ce modèle, les interfaces géologiques sont modélisées par des surfaces définies de manière implicite comme des lieux d'isovaleurs d'un champ scalaire 3D, dont les gradients sont contraints par les données d'orientation. Le champ est obtenu par une interpolation multivariable de ces données (*cokriègeage* universel). L'utilisation des

(3) CHILES J.-P. & DELFINER P. (1999), *Geostatistics: Modeling spatial uncertainty*, Wiley, New York, 695 p.

(4) MATHERON G. (1989), *Estimating and Choosing, an Essay on Probability in Practice*, Springer.

(5) LAJAUNIE C., COURRIOUX G. & MANUEL L. (1997), "Foliation Fields and 3D Cartography in Geology: Principles of a Method Based on Potential Interpolation", *Mathematical Geology* 29(4), pp. 571-584.

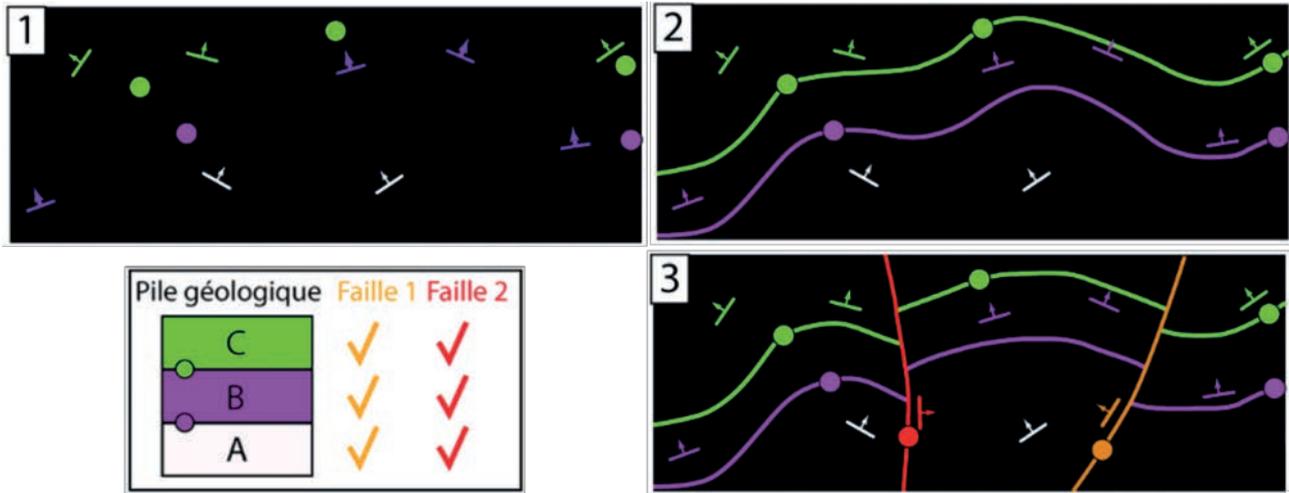


Figure 1 : Représentation 1 – Méthode de modélisation géologique par interpolation de champs de potentiels : points de passage et de données d'orientation éparses provenant de l'observation du terrain ; représentation 2 – Interfaces géologiques correspondant aux surfaces d'isovaleurs du potentiel ; représentation 3 – Intégration de fonctions de dérive discontinues pour la modélisation des failles.

gradients du champ scalaire interpolé a conduit à l'assimiler à un champ de potentiel ; de fait, la méthode a été qualifiée de méthode de *modélisation géologique par champ de potentiel*.

Un même champ de potentiel, connu dans tout l'espace, permet de modéliser des formations présentant des géométries assez proches ayant une histoire commune, et dont les interfaces correspondent à différentes valeurs, inconnues *a priori*, du potentiel. La terminologie de *série* a été retenue pour désigner cet ensemble de formations. Ainsi, on peut reconstruire, à partir de quelques données de surface, des structures ayant enregistré des déformations identiques (voir la Figure 2 de la page suivante). De même, la reconstruction d'architectures plus complexes est possible grâce à l'utilisation d'une pile géologique qui permet d'établir une chronologie à la fois des dépôts et des relations spatiales entre les différentes séries<sup>(6)</sup>, et de traduire des relations géologiques d'érosion ou de dépôt. À ce titre, cette pile constitue un élément à part entière de la construction et de l'interprétation du modèle géologique 3D et une synthèse de la connaissance associée, qui permet de combiner automatiquement des séries construites indépendamment les unes des autres.

Enfin, en introduisant des discontinuités dans la dérive du *krigeage* universel utilisé pour calculer le champ de potentiel, on peut reproduire l'effet de failles (voir la Figure 1 ci-dessus). Leur rejet est alors automatiquement déduit des points de passage utilisés pour définir les formations qu'elles affectent. La géométrie de ces failles est quelconque, finie ou infinie, et est également construite en utilisant un champ de potentiel spécifique. À l'instar de celles mises en évidence par la pile géologique dans le cas des formations, des relations permettent de définir simplement les interactions des failles et de modéliser de véritables réseaux structuraux (voir la Figure 3 de la page suivante).

L'outil de modélisation géologique ainsi obtenu est particulièrement bien adapté aux besoins et aux spécificités de la cartographie géologique. Il est générique et permet

de construire directement des objets géologiques tridimensionnels dans de nombreux contextes. Sa combinaison avec la topographie fait que les coupes réalisées dans le modèle et la carte sont forcément cohérentes. Cette cohérence est la plus-value fondamentale qu'apporte cette approche, mais c'est aussi une contrainte qui ne tolère aucune approximation : toutes les coupes étant possibles et cohérentes, on ne peut se contenter d'en choisir quelques-unes pour étayer un *a priori* conceptuel. Ainsi, la production d'un modèle géologique demande de réaliser un travail conséquent de réflexion afin de pouvoir intégrer, après les avoir synthétisées, le plus grand nombre de données disponibles.

De plus, le formalisme géostatistique sous-jacent à l'interpolation du champ de potentiel permet de quantifier l'incertitude associée à un tracé cartographique. En effet, la structure spatiale du potentiel peut être inférée à partir des données d'orientation. Il est alors possible, à l'aide des variances de *cokrigage*, de cartographier une variable mesurant la probabilité de l'appartenance d'un point à une interface, ce qui permet de localiser les zones d'incertitude élevée.

D'un point de vue épistémologique, il est intéressant de constater que l'outil permettant d'obtenir le *modèle géologique* à trois dimensions n'est au fond bâti que sur des champs stochastiques de potentiels, lesquels sont caractérisés par leur plus ou moins forte régularité (covariance spatiale), et sont reliés par un ensemble de règles d'assemblage (*la pile géologique*). Ainsi, sans nécessairement le savoir, le géologue modélisateur développe son interprétation grâce à une approche géostatistique. C'est la simplicité et la souplesse de ce modèle géostatistique

(6) CALCAGNO P., CHILES J.-P., COURRIOUX G. & GUILLEN A. (2008), "Geological modeling from field data and geological knowledge (Part I). Modeling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules", *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 171(1-4), pp. 147-157.

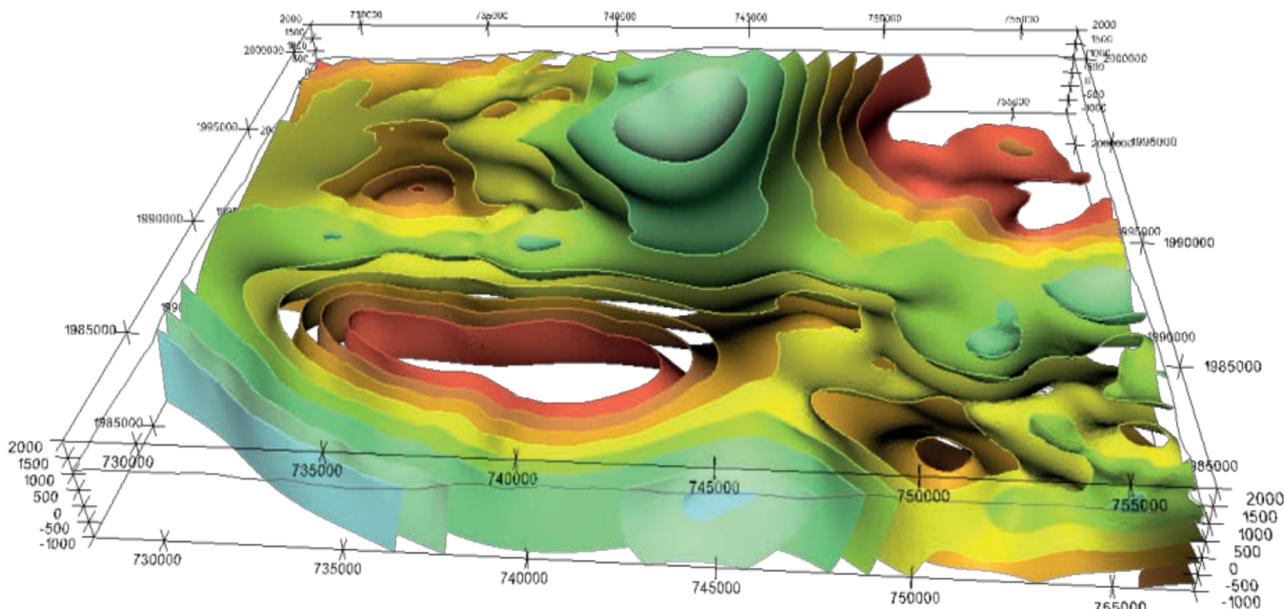


Figure 2 : Modèle géologique 3D de la région du Monastier-sur-Gazeille <sup>(7)</sup>, lequel a été produit à partir du relevé sur le terrain de données de passage et d'orientation (voir méthodologie – représentation 1, dans la Figure 1 de la page précédente).

sous-jacent qui permettent l'intégration de données variées dans un ensemble cohérent.

Par ailleurs, ce cadre se prête bien à la question de la multiplicité des représentations cohérentes avec les observations, liée à la caractérisation et à la quantification des incertitudes. Ainsi, loin de se substituer au travail du géologue, la modélisation vient l'appuyer. D'une part, en modifiant le modèle géostatistique sous-jacent, le géologue peut explorer rapidement et visuellement différentes hypothèses scientifiques compatibles avec ses connaissances en produisant pour chacune d'elles une cartographie 3D compatible avec les données disponibles. Il peut alors cibler les zones où la géométrie des formations reste problématique et organiser stratégiquement les nouvelles campagnes d'acquisition. D'autre part, pour un même modèle géostatistique, il devrait pouvoir à l'avenir générer différentes simulations (on parle aussi de *réalisations*) de ce modèle, dans l'optique de reproduire la variabilité spatiale présumée de la géologie.

La modélisation géologique permet ainsi de revenir aux fondamentaux que sont la donnée et la description des géométries. De plus, son aspect intégrateur permet de mutualiser des données et de confronter les points de vue. En ce sens, la production d'un modèle géologique est donc une démarche pluridisciplinaire qui doit aboutir à une vision partagée du sous-sol et de sa géologie. Par rapport à la carte, lorsqu'il est discrétisé de manière adéquate par un maillage, il peut également servir de support à la simulation de phénomènes physiques dynamiques : propagation des ondes sismiques, transferts souterrains de masses et/ou d'énergie... qui permettent d'étudier le fonctionnement des systèmes géologiques et les impacts anthropiques. C'est pour l'ensemble de ces raisons que

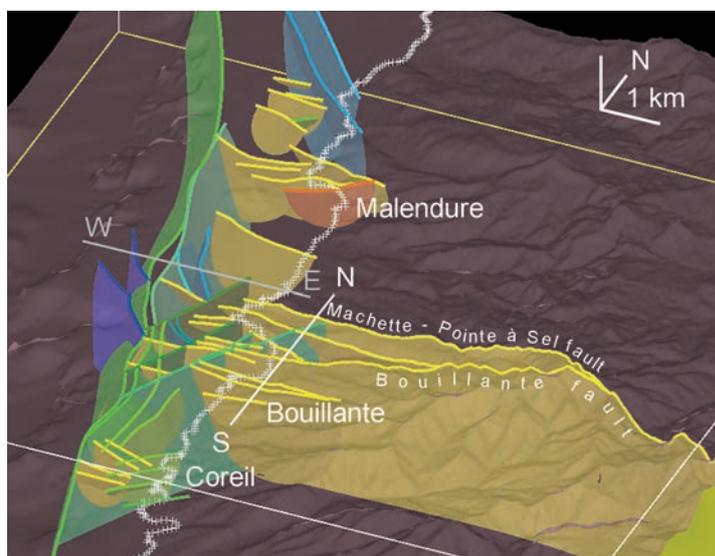


Figure 3 : Construction d'un réseau discret de failles identifiées dans la région de Bouillante <sup>(8)</sup> (Guadeloupe). Deux familles distinctes de failles sont mises en évidence et modélisées (en vert et en jaune). La structuration E-W de l'île de Basse-Terre dans le prolongement du graben de Marie-Galante est représentée en 3D.

la modélisation géologique 3D constitue un outil central pour le Référentiel Géologique de la France.

(7) DEFIVE E., COURRIOUX G. & LEDRU P. (2011), « Carte géologique de Le Monastier-sur-Gazeille (Haute-Loire) », Carte géologique de la France au 1:50 000, Orléans, BRGM, ISBN 978-2-7159-1816-0.  
 (8) CALCAGNO P., BOUCHOT V., THINON I. & BOURGINE B. (2012), "A new 3D fault model of the Bouillante geothermal province combining onshore and offshore structural knowledge (French West Indies)", *Tectonophysics* 526-529, pp.185-195.

# De l'usage des cartographies dynamiques par le cinéma immersif

## L'exemple du partenariat entre l'ILOI et une société de production (XD Productions)

Par Jacques PEYRACHE  
 PDG de la société XD Productions  
 et Alain SÉRAPHINE  
 Président de l'ILOI

La troisième dimension que la photogrammétrie apporte à la cartographie, a d'abord été utilisée par l'armée. Mais, dès les années 1990, cette technologie émergente intéresse le monde de la recherche privée. Les images, dites « de synthèse », affichant encore leurs limites en matière de crédibilité tant sur le plan artistique qu'économique, la photogrammétrie va alors s'imposer comme l'un des enjeux de la recherche à destination des usages des industries du cinéma, de l'animation, du jeu vidéo, de la VR... Dans ce contexte, XD Productions, déjà très présent sur les logiciels de capture de mouvements pour l'animation 3D, va orienter ses recherches sur la vidéo volumétrique et développer des algorithmes de photogrammétrie dynamique. XD Productions va mettre au point un studio capable de réaliser la modélisation 3D automatique d'acteurs réels en mouvement. Pour contribuer à la réalisation d'un premier long-métrage cinéma appelé à valider son innovation, XD Productions a fait appel à l'ILOI, l'un de ses partenaires historiques qui, dès 1995, a fait de la formation à la création numérique un enjeu de développement pour un territoire insulaire, La Réunion.

**D**epuis les années 1980, les équipes françaises de l'Inria ont contribué activement aux découvertes de la photogrammétrie, lesquelles ont permis à notre armée de se doter d'outils performants pour le guidage de ses missiles balistiques.

Dans les années 1990, le laboratoire Robotvis, dirigé par le professeur Olivier Faugeras, au centre Inria de Sophia Antipolis, a œuvré au transfert de ces technologies pour servir à des applications civiles, orientées vers l'industrie audiovisuelle.

Des chercheurs comme Pascal Fua, Renaud Keriven, Luc Robert ou Cedric Niquin ont donc permis aux principes de la photogrammétrie de sortir du giron de la cartographie militaire pour entrer dans les domaines, ô combien plus complexes, de la reconstruction dense de surfaces gauches et de la reconstruction en 3D d'objets captés

dans la réalité par un couple de caméras calibrées (voir les références bibliographiques en fin d'article). Les premiers algorithmes publiés ont permis l'automatisation partielle des reconstructions 3D (scanérisation) basées sur des outils statistiques de stéréo-corrélation. Ils ont permis l'édition de meshes utilisables dans les *softs* 3D du marché. Les premières applications de modélisation de décors 3D destinées aux jeux vidéo et aux effets spéciaux cinéma et télévision ont été produites dès 1995.

En France, les laboratoires de Pixibox, de Medialab et de XD Productions ont ensuite développé de nouveaux outils, aujourd'hui utilisés quotidiennement par le *workflow* du cinéma d'animation. C'est déjà au cours de cette même période qu'un premier partenariat établi avec l'Institut de l'image de l'océan Indien (ILOI) permettra, par la formation, de contribuer à la création d'une industrie du cinéma d'animation (Pipangaï) sur l'île de La Réunion.

## La vidéo volumétrique

La transcription tridimensionnelle de l'espace a donc représenté un progrès radical à la fin du XX<sup>e</sup> siècle. Dès les années 2000, les limites de l'exercice ont vite poussé les laboratoires à intégrer dans leurs recherches un élément essentiel : le facteur temps. En effet, une reconstruction 3D automatique réalisée sur la base de 25 images par seconde permet d'envisager la transcription de la dynamique d'une scène afin d'assurer une modélisation 3D de la cinématique.

On aborde ici un sujet essentiel qui hante l'imaginaire de générations entières de réalisateurs de films : La modélisation 3D automatique d'acteurs réels en mouvement. C'est la révolution de la « vidéo volumétrique ».

Quelques laboratoires américains (FreeD, Microsoft, Intel) se sont, eux aussi, lancés dans ce type de recherche, sans arrivés à pallier, jusqu'à ce jour, les artefacts et le bruit géométrique induits par les incertitudes statistiques de la corrélation dynamique.

En France, le laboratoire de XD Productions a choisi une voie originale, appelée « SBVH » (Stereo Based Visual Hull). XD Productions a mené, depuis 2005, trois programmes de recherche portant sur le même sujet : « MELIES » (IST-2000-28700), « CINECUBE » (ANVAR-BPI 2008) et « RECOVER 3D » (PIA n°O120 65-405923). En s'associant au Crestic (Laboratoire de l'Université de Reims dirigé par Laurent Lucas), XD Productions a pu fiabiliser, dès 2012, un système temps réel de vidéo volumétrique exempt d'artefact.

Suite à ce succès, XD Productions a construit en 2016 un scanner géant (le Cyberdome) dédié à la production cinématographique au sein de ses studios de Bry-sur-Marne (500 m<sup>2</sup>, 66 caméras 4K et 5 000 To de stockage). Par ailleurs, un studio (de 150 m<sup>2</sup>, 32 caméras, 500 To de stockage) dédié à la formation a été construit au sein de l'Institut de l'image de l'océan Indien (ILOI), partenaire de XD Productions dans le cadre du programme de recherche PIA. C'est dans ces studios pilotes que des actions de formations spécifiques d'infographistes sont conduites afin d'apprendre à réaliser le Cinéma 3D du réel, des formations nécessaires à la validation des objectifs de la recherche. Depuis le 14 janvier 2019, afin de répondre aux attentes de XD Productions, et avec le concours de l'Afdas et de Pôle Emploi Île-de-France, l'ILOI a mis en place une action de formation « Préparation opérationnelle à l'emploi collectif (POIC) » à destination de vingt-cinq infographistes. Il s'agit de préparer une équipe de production qui, à partir des performances du studio de scan 3D d'acteurs en mouvement, devra être capable de contribuer à la réalisation d'un premier long-métrage cinéma (Amak-i Hayal).

Nous assistons là aussi à des mutations professionnelles qu'il s'agira d'accompagner et de préciser. Les conséquences esthétiques et économiques de ces nouvelles méthodes permettent d'envisager une baisse radicale des coûts de fabrication pour le cinéma et la télévision, ainsi que des perspectives de diffusion par Internet de

cinématiques immersives et interactives en complément des exploitations classiques de tout produit audiovisuel.

La troisième dimension ainsi apportée par la cartographie numérique est donc en train de transformer l'ensemble des méthodes de production d'images permettant par là même aux futurs artistes et industriels de l'audiovisuel d'afficher une productivité et une ubiquité commerciale dont les conséquences sont aujourd'hui incommensurables.

## La formation au service de la recherche-crédation numérique : le « défi permanent » d'un territoire isolé, La Réunion

« Aucune carte du monde n'est digne d'un regard, si le pays de l'utopie n'y figure pas » (Oscar Wilde).

De tous temps, dans l'histoire de l'humanité, il a été difficile pour de tout petits territoires insulaires situés en marge des routes maritimes d'exister économiquement, voire culturellement sur la carte du monde.

L'émergence de la révolution numérique à la fin du XX<sup>e</sup> siècle, qui très vite va permettre la communication en temps réel, ainsi qu'un nivellement entre les peuples en matière d'accès au savoir, s'imposera de fait comme une chance inespérée pour tout territoire jusque-là isolé et, par voie de conséquence, exclu de tout débat et de la compétition internationale.

C'est donc dans ce contexte que l'île de La Réunion, l'un des territoires insulaires français et européens les plus sinistrés sur le plan de l'emploi, s'est saisie de cette opportunité qui s'offrait à elle en faisant le pari de la formation de ses jeunes talents. L'ILOI voit ainsi le jour et commence à engager, dès 1994, ses premières actions de formation à la création numérique dans le but de faire naître des activités nouvelles sur une terre perdue au beau milieu de l'océan Indien, dont la population se situe au carrefour de différentes cultures par le jeu de migrations successives venant d'Europe, d'Afrique et d'Asie.

Les initiatives conjuguant les premiers résultats de la recherche menée par les laboratoires Pixibox, voire XD Productions, avec les stratégies de formation indispensables à l'adaptation aux mutations professionnelles qui s'annonçaient, permettront la naissance d'une industrie du cinéma d'animation (Pipangaï) à La Réunion. Ce seront plus de deux cents personnes formées par l'ILOI qui accéderont à l'emploi par le biais de cette société de production, et ce, pendant plus d'une quinzaine d'années. L'ILOI est aujourd'hui un établissement d'enseignement supérieur de formation professionnelle qui dispose d'un cursus complet dans les domaines du cinéma-audiovisuel, du cinéma d'animation 2D-3D, du jeu vidéo et de la création numérique interactive (en et hors ligne), validé par des diplômes d'État (licences et Masters) et porté par de solides partenariats entretenus depuis 2005 avec le monde universitaire, notamment l'EJCAM (École de journalisme et de communication d'Aix-Marseille) ainsi qu'avec le département Hyper-Média de l'Université de Paris 8.

L'ILOI est aussi un acteur de la formation continue et en alternance, apportant une réponse aux besoins des entreprises en matière de mutations professionnelles. L'Institut s'appuie sur un vaste réseau de professionnels locaux, nationaux et internationaux.

En deux décennies à peine, La Réunion, forte de ses formations et de ses productions, a acquis une place de choix tant sur la carte réelle du monde que sur les cartes des imaginaires des mondes immatériels du numérique, notamment dans les domaines du cinéma d'animation, du jeu vidéo, de la réalité virtuelle (VR)..., mais aussi dans tout ce qui touche à la « photogrammétrie ».

À titre d'exemple, on peut citer les différentes nominations aux César obtenues par Pipangaï pour des coproductions et la réalisation de films tels que *Adama et Zombillénium*, ce dernier ayant également fait partie de la sélection officielle du Festival de Cannes.

### Une expérience de création artistique en photogrammétrie et en réalité virtuelle

« La carte a beaucoup à voir avec l'art, celui de dépeindre, celui d'écrire pour décrire (littérature) ou pour noter (musique) » (Gilles A.Tiberghien).

Pour mémoire, en 1997, Roger Pic, photographe de renom, ancien grand reporter, alors âgé de soixante-dix-sept ans, assure sur l'île de La Réunion, pour le compte de l'ILOI, l'encadrement d'une formation audiovisuelle numérique. Lui qui, tout au long de sa longue carrière aura bourlingué dans des lieux souvent improbables, devant s'accommoder d'un matériel cinéma et son encombrant, lourd et difficile d'entretien, avait à cette occasion eu l'immense joie de partager avec une génération de talents émergents son émerveillement devant la liberté que le numérique offrait déjà aux artistes, aux reporters et aux professionnels de l'audiovisuel, en général.

Dans une petite vidéo qu'il a réalisée sur l'exposition de sculptures que je présentais à ce moment-là dans un hangar des quais du port, je m'exprimais déjà ainsi : « mes sculptures et moi parlons de voyage et d'aller à la recherche du Nord, là où on dialectise, là où on problématise, où nous ne serons peut-être jamais du voyage. Mais, à l'heure du numérique, nous espérons bien que nous, qui sommes du Sud, pourrons enfin participer au débat ».

Depuis, grâce aux avancées réalisées et aux résultats des travaux de recherche sur la photogrammétrie, je me suis donné les moyens d'organiser une exposition en réalité virtuelle (VR), « Jeu de Dames ».

Pour l'organisation de cette exposition, j'ai été aidé principalement par Jean-François Lépinay, un développeur indépendant (société Bubblefish) qui est formateur à l'ILOI. Il a également participé pour le compte de l'ILOI aux côtés de XD Productions aux recherches appliquées nécessaires à la validation des travaux de recherche du studio Recover 3D. Jean-François Lépinay travaille également au sein d'un espace de *coworking*, un incubateur de projets qui réunit des auto-entrepreneurs et d'anciens stagiaires



« Caméra utilisée pour la capture de mouvements de personnages réels au sein d'une structure appelée le Cyberdôme (réalisation de productions VR (réalité virtuelle) et AR (réalité augmentée), ainsi que de vidéos volumétriques). »

en jeu vidéo ou en animation 3D de l'ILOI. Il s'agit ici de disposer d'une masse critique de compétences pour être capable de générer une dynamique en matière de recherche-crédation-production.

Cette exposition, qui a été présentée en février 2018 à Paris, à l'initiative d'une association proche de l'Unesco (Mémoire de l'Avenir), est une cartographie en 3D d'un échiquier qui, pour le moment, se présente sous la forme d'un carré de 15 mètres sur 15 ; une fois terminé, ses dimensions seront de 30 mètres sur 30. Il se présente comme un objet flottant dans l'espace et bordé sur deux de ses côtés par une tapisserie de 30 mètres de long et de 3 mètres de hauteur.

Sur l'échiquier sont disposées des sculptures, pour le moment au nombre de seize, dont plus de la moitié sont des pièces physiques ayant fait l'objet d'un traitement en photogrammétrie, alors que les autres sont des pièces modélisées en 3D traditionnel. Chacune de ces pièces fait sens et, comme sur la scène de la vie, elle pourrait faire sens autrement, par interaction avec l'autre. Elles sont de type humanoïde (un « peuple en devenir ») : elles sont pour la majeure partie de taille humaine, mais certaines peuvent mesurer plus de trois mètres et peser plusieurs centaines de kilos.

Les avantages d'un tel dispositif résident dans le fait qu'il permet :

- de faire voyager en temps réel une exposition qui était jusque-là entravée par son insularité ;
- à partir d'un espace d'une dizaine de mètres carrés à peine, à tout visiteur muni d'un casque de réalité virtuelle (VR) de réaliser une visite immersive complète des 225 m<sup>2</sup> de l'exposition, avec la possibilité de tourner autour de chacune des pièces sculpturales ;
- d'avoir une relation nouvelle et particulière par rapport à l'œuvre. En effet, vous avez l'espace d'exposition, les œuvres et les commentaires pour vous tout seul. De plus, les œuvres offrant leur transparence se laisseront habiter, elles permettront même au visiteur de découvrir l'exposition dans sa globalité au travers de

la translucidité de leur propre matière. C'est le cas, par exemple, de l'une des pièces, celle dénommée « Dame voilée et dévoilée », qui a été réalisée en hommage à Georges Wolinski, victime de la folie humaine dans les locaux de Charlie Hebdo, lequel fut également l'invité de l'ILOI en 2012 et avec qui Pipangai travailla sur un projet de film. Après avoir tombé tous les voiles restait encore à la Dame la pudeur. De ce fait, la sculpture nous dit : « Et si la vraie nudité était la transparence, et si elle était en verre et contre tous ? »

Aujourd'hui, il est déjà envisageable de rendre possible pour tout un chacun de réaliser dans l'immédiateté une visite virtuelle de cette exposition, partout dans le monde. Au moment de la parution de cet article dans *Les Annales des Mines*, les lecteurs intéressés pourront même (peut-être) se prêter au jeu ([www.jeudedames.re](http://www.jeudedames.re)).

Une visite de l'exposition en 3D sous la forme d'un jeu vidéo et utilisant des géodispositifs est en cours de développement afin de permettre à tous ceux qui ne disposeraient pas encore d'un casque VR de pouvoir quand même en profiter.

Nous concluons en observant que grâce aux performances et aux perspectives de nouveaux usages qu'offrent ces cartographies reconstituées en 3D par le biais de la photogrammétrie ainsi qu'aux visites réalisées en immersion VR, tout territoire est désormais à même de préserver et de valoriser son patrimoine. En dépit de l'étroitesse de son territoire et de son isolement géographique, l'île de La Réunion, à l'instar de beaucoup d'autres

petits territoires, peut nourrir plus que jamais ses rêves de « pays de l'utopie » à la condition de croire et d'investir encore et encore dans la formation de ses talents.

## Références bibliographiques

FUA P. (1991), "A parallel stereo algorithm that produces dense depthmaps and preserves image features", RR-1369, Inria, [inria-00075191](https://hal.inria.fr/inria-00075191), version 1.

FAUGERAS O. & KERIVEN R. (1996), "Variational Principles, Surface Evolution, PDE's, Level Set Methods and the Stereo Problem", RR-3021, Inria, <https://hal.inria.fr/inria-00073673>

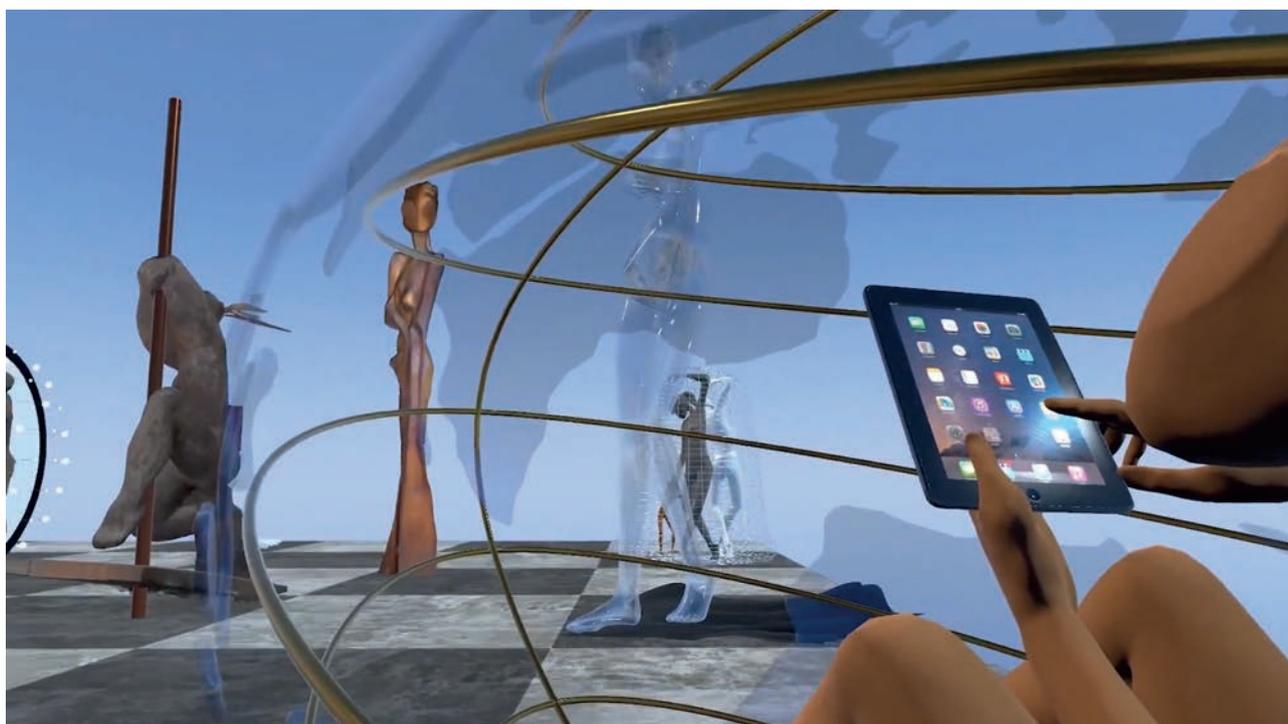
PRÉVOST S., NIQUIN C., CHAMBON S. & GALES G., *Stéréo-corrélation, profondeur et disparité*, CRESTIC.

NIQUIN C., *Reconstruction du relief et mixage réel virtuel par caméra relief multi-points de vues*, CRESTIC.

SÉRAPHINE Alain, « Jeu de Dames », [www.jeudedames.re](http://www.jeudedames.re). Réalisation technique : Lépinay (Jean-Francois) (Jeff. [lepinay@gmail.com](mailto:lepinay@gmail.com)), Bubblefish Entertainment (2018).

Exposition Alain Séraphine. Petite vidéo de Roger Pic (1997) visualisable à l'adresse suivante : <https://www.youtube.com/watch?v=A8dRI2vDILw>

TIBERGHIE Gilles A., « Poétique et rhétorique de la carte dans l'art contemporain », *L'Espace géographique*, 2010/3 (tome 39), pp. 197-210 (DOI : 10.3917/eh.393.0197), [www.cairn.info/revue-espace-geographique-2010-3-page-197.htm](http://www.cairn.info/revue-espace-geographique-2010-3-page-197.htm)



Extrait du petit film de présentation de l'exposition en réalité virtuelle, « Jeu de Dames » ([www.jeudedames.re](http://www.jeudedames.re)). Vidéo réalisée par Roger Pic.

# Cartographie et visualisation

Par **Éric GUICHARD**  
Enssib

Depuis l'essor de l'Internet, les cartes semblent être partout. Et pourtant, au plan de la production comme celui de la réflexion, elles sont détrônées par la visualisation. Cette dernière approche renvoie à des questions de méthode et d'épistémologie, qui absorbent celles de la cartographie, et à des productions liées à des données complexes, multidimensionnelles, et parfois massives. Si leur sémiologie graphique fut quelque peu anarchique, celle-ci se réinvente avec l'arrivée d'un nouveau type d'acteur : les designers-programmeurs. Au final, un espace de dialogue prometteur émerge, qui invite physiciens, informaticiens et géographes à débattre ensemble des apports heuristiques et épistémologiques de la cartographie et de la visualisation.

## Introduction

### Explosion des usages de la cartographie

La cartographie semble être grandement stimulée par l'Internet. Dès les années 2000, des atlas étaient offerts avec les systèmes d'exploitation des ordinateurs. Rapidement, des versions en ligne furent proposées : d'abord sur les ordinateurs, puis sur les téléphones cellulaires. Depuis 2010, la majorité des personnes qui se déplacent à pied, en deux-roues ou en voiture sélectionnent leur itinéraire au moyen de tels systèmes cartographiques interactifs en temps réel : non seulement nous savons quand il nous faut tourner à droite ou à gauche, mais nous pouvons également être informés d'éventuels embouteillages. Ainsi, pour les Français, la carte Michelin a été détrônée par des logiciels d'itinéraire comme GoogleMaps ou Waze. Les amoureux de modes de déplacement doux ont eux aussi abandonné la carte IGN pour OpenStreetMap ou d'autres combinaisons de logiciels et de bases de données que chaque randonneur ou sauveteur peut compléter en temps réel.

Ainsi l'usage de la carte semble-t-il désormais banalisé depuis l'essor des réseaux numériques. Les géographes étudient ce nouveau phénomène qui signale un nouveau rapport au territoire du fait de cette popularisation massive de la cartographie : auparavant, un nombre réduit de personnes utilisaient ou produisaient des cartes.

Des pratiques cartographiques inédites émergent, comme celles des cartes des aéroports, avec la visualisation des flux d'avions en temps réel ; toutes les villes d'importance ont leur(s) carte(s) des transports en commun, et les atlas électoraux ou historiques (comme l'impressionnante carte des enfants juifs de Paris déportés entre 1942 et 1944 : [http://tetrade.huma-num.fr/Tetrade-map\\_Enfant\\_Paris](http://tetrade.huma-num.fr/Tetrade-map_Enfant_Paris)) se multiplient. Enfin, toutes sortes de « micro-cartographies » émergent, comme lorsque les possesseurs de GPS (dont sont dotés la majorité des

téléphones cellulaires) dressent la carte de leurs déplacements piétonniers.

### Dissolution des territoires

Cependant, l'étude des potentialités spatiales de l'Internet marque le pas, en comparaison de ce qui se développait à la fin du siècle dernier. En ces temps, la dimension territoriale de l'Internet était largement fouillée (Desbois, 2001). Sa dimension spatiale était évidente pour les informaticiens (un cube de dimension 4 pour les numéros IP (Guichard, 2007), le Web vu comme un graphe) ; et les géographes conscients des vertus méthodologiques du concept de territoire ne furent pas étonnés de voir l'Internet devenir l'enjeu de conflits, de procès, ce qui signalait son ancrage social, donc actuel, contrairement aux discours des prophètes qui le décrivaient comme un monde virtuel. Si nous nous accordons pour définir le territoire comme étant la somme de représentations qui articulent le spatial et le social, alors le territoire de l'Internet s'est manifesté très tôt. Les expérimentateurs soucieux de mettre en évidence ce territoire pouvaient alors aisément mettre l'Internet en cartes (cartes des réseaux ou des grands sites Web, cartes métaphoriques d'ingénieurs ou d'artistes, comme le Dadamètre de Christophe Bruno : <http://www.iterature.com/dadameter/dadamap.fr.php>) ou mettre ses usages en cartes (par exemple, projection de taux de pratiques sur des pays ou des régions).

Est-ce du fait de la montée en popularité de la notion peu scientifique de « communauté », qui insiste sur les formes d'affinité sociale et néglige donc la dimension spatiale de l'Internet, que ses territoires, en 2019, n'intéressent plus grand-monde, à l'exception de quelques chercheurs comme Boris Beaude ou Henri Desbois ? En 2000, l'Internet n'était pas encore entré dans les chaumières, et la proportion des internautes sensibles aux questions de géométrie était plus importante qu'aujourd'hui. La grande place accordée à l'Internet des pauvres, dont les miettes comportementales deviennent la matière première

des profits des multinationales de l'Internet et de la publicité, réduit mécaniquement l'audience des débats sur la géographie de l'Internet. D'ailleurs, cet Internet, et sa face la plus visible, le Web, sont désormais dénommés « le numérique », terme ambigu qui est peu susceptible d'alimenter une problématique de la spatialité, désormais réservée aux géopoliticiens soucieux de prévoir les cyberguerres de demain.

Notons aussi une homogénéisation des pratiques par le biais de l'industrie : à de rares exceptions près, les producteurs de cartes en ligne sont les grandes firmes de l'Internet, souvent en position de monopole. Avant l'Internet et avant la « mondialisation », ce monopole était exercé par les États qui avaient les moyens économiques et scientifiques de réaliser une cartographie de leur territoire (Desbois, 2015). Celui-ci faisait écho à des structures administratives : pour la France, la ville, le canton, le département, etc. La longue histoire de ces entités institutionnelles et géographiques, dont une partie relevait de l'« espace vécu » pour les nationaux ou leurs familles, a pu s'enraciner en une culture propice au concept de territoire. Ce que permettent moins les représentations de l'espace à l'échelle du monde entier (nouvelles guerres, migrations, indépendances) ou d'une circulation très individualisée d'un point à un autre (aller chez des amis, se rendre dans un commerce...) : autant de pratiques et de réalités peu propices au déploiement de représentations collectives, comme celle du territoire.

## Écriture, graphes et design

### L'essor de la visualisation

Un second facteur explique le déclin scientifique de la cartographie : l'orientation massive vers la visualisation de personnes qui auraient eu la possibilité de produire des cartes (directement ou avec des logiciels dédiés). J'entends par visualisation un ensemble de procédures graphiques destinées à faciliter l'interprétation de jeux de « données » trop complexes ou trop massifs pour pouvoir être rapidement compris par le chercheur ; ces procédures sollicitent de nombreux algorithmes, même si la part humaine reste importante (paramétrages, recodages, choix ultimes). Elles s'inscrivent dans une logique de « preuve graphique » : la production d'un résultat visuel (d'une image organisée par l'enquêteur ou la structure des données, à l'inverse d'une peinture) afin d'infirmer ou de confirmer une hypothèse. Le graphique intervient alors comme un chaînon argumentatif au sein de calculs, de formules ou de textes.

Avec ses sinusoides retraçant les trajectoires des satellites de Jupiter et avec les paraboles dessinées par ses boulettes de papier encrées pour visualiser la gravitation, Galilée fut l'un des précurseurs de cette démarche, dont les physiciens sont friands depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle. Les géographes, pour qui la carte oscille entre illustration ou synthèse d'un phénomène spatial complexe, et méthode permettant de s'approprier une problématique – quitte à faire des centaines de cartes, depuis l'essor des logiciels de cartographie –, ont systématisé cette logique de la preuve (carto)graphique au milieu du XX<sup>e</sup> siècle.

Cette pratique leur est familière quand il s'agit de rendre compte de variables sociales recouvrant une dimension spatiale (fronts pionniers du Brésil (voir les travaux d'Hervé Théry), etc.) ou quand il s'agit de traduire des données satellitaires (avec Fernand Verger comme précurseur du domaine, en France).

Le travail sur des bibliographies scientifiques, sur les pratiques téléphoniques et bancaires de millions de Mexicains afin de prouver l'existence de classes sociales (thèse de Yannick Léo, [https://hal.inria.fr/tel-01429593/file/LEO\\_Yannick\\_2016LYSEN066\\_These.pdf](https://hal.inria.fr/tel-01429593/file/LEO_Yannick_2016LYSEN066_These.pdf)), tout comme la visualisation du génome de la rose (voir les travaux de Jérémy Just, à l'ENS de Lyon), ou celle des recombinaisons d'alliances politiques au fil de la présidentielle de 2017 (Gaumont, Panahi et Chavalarias, 2018), renvoient à de telles pratiques où la production de l'image, supposée convaincre son interlocuteur, sert avant tout à se convaincre soi-même de la pertinence de son raisonnement scientifique. Or, la plupart du temps, les points, vecteurs ou arêtes à représenter sont issus d'espaces de très grandes dimensions, et les distances ont peu de rapport avec la géodésie commune, quand elles ne sont pas arbitraires. Le choix d'une projection optimale nécessite alors autant de doigté que de culture géométrique ou algébrique. Cette exigence de maîtrise graphique a deux conséquences en termes de pratiques comme en termes de recherche.

D'une part, les physiciens désireux de réaliser des cartes de villes ou de régions terrestres vont les produire avec moins d'outils que ceux dont usent les cartographes de métier. Par exemple, pour réaliser une carte des usages du service Vélo'v de Lyon, un jeune chercheur comme Jean-Baptiste Rouquier récupère une carte au format pdf. du réseau des transports urbains de la ville, l'ausculte dans le corps (confus) du texte, puis en extrait quelques informations (fleuves, grands axes, parcs, transports collectifs) ; il superpose à ces couches d'écriture peu lisibles les coordonnées GPS des stations de vélos en libre-service, et développe lui-même les scripts nécessaires à la production d'une carte animée de ces stations, dont la coloration change selon leur taux d'occupation au fil des heures (voir l'article consultable à l'adresse suivante : <http://rsl.revues.org/487>). Pour de tels experts, tout se fait « à la main » : la maîtrise des logiciels habituels de cartographie et d'animation est désormais inutile.

Et les questions de cartographie terrestre vont être rabattues au statut de simples applications de bibliothèques dédiées à des productions graphiques de tous types. D3.js (pour une multitude d'exemples, voir <https://d3js.org/>) est un bon exemple de boîte à outils, où toute production graphique interactive devient un jeu d'enfant à condition d'être très à l'aise en programmation, et où, par exemple, l'ajout d'une ligne dans le script change directement le type de projection terrestre.

D'autre part, cette prolifération visuelle exige un minimum d'organisation, de façon à rendre les graphes lisibles. Ce qui invite les développeurs et les chercheurs à collaborer avec des designers. Ce dialogue est d'autant plus

efficace que la cartographie du début des années 2000 était confuse : entre une sémiologie anarchique, souvent en contradiction avec celle déployée par Jacques Bertin (Bertin, 1967), et une cartographie primitive prenant appui sur les parachutes de Googlemaps, il y avait peu de place pour des cartes ou graphiques porteurs d'informations claires, et de fait pouvant être aisément commentés. La page du designer, Olaf Avenati, (<https://entreformesetsignes.fr/la-recherche/programme-datavisualisation/lov-log-visualisation>) témoigne du caractère fructueux d'une telle collaboration, dans laquelle le designer aide le chercheur en informatique à mieux comprendre le fonctionnement d'un supercalculateur.

À l'Inria (site de Saclay), ce sont désormais deux équipes, Aviz et Ilda, qui se consacrent à ces questions (voir <https://www.inria.fr/equipes/aviz> et <https://www.inria.fr/equipes/ilda>). Et pour nombre de spécialistes des systèmes complexes, le couple analyse/visualisation des données constitue un axe majeur de leurs recherches.

### Le retour de l'épistémologie

La production de ces nouveaux graphiques pose deux types de problèmes à leurs auteurs.

Tout d'abord, celui de la « véracité » des images produites. Les physiciens, qui n'aiment pas les théories non fondées sur des expériences confortées par des mesures précises, sont gênés par ces productions graphiques qui comportent une marge d'erreur parfois non quantifiable. Il s'ensuit une série de questions, qui vont de la fiabilité de la représentation à la recherche de méthodes d'optimisation statistique des projections adoptées. S'y articule une réflexion sur les apports heuristiques de telles représentations, avec le désir de préciser non seulement la fonction de la preuve graphique, mais aussi la totalité de la chaîne argumentative, qui va des « données », par définition artificielles, à l'ensemble des algorithmes et méthodes permettant de les catégoriser et de les visualiser. Les questions relatives au lien entre esthétique et compréhension ne sont pas absentes. La visualisation incite donc ses utilisateurs, majoritairement des physiciens ou des informaticiens, à s'intéresser à des préoccupations épistémologiques qui diffèrent fortement de celles qu'ils connaissaient depuis Einstein et Bachelard. Elle les oriente vers des problématiques que connaissent bien les historiens de la cartographie, qui ont d'emblée signalé le statut ambigu de la carte : à la fois texte et image, et relevant tant de la rationalité que de l'émotion esthétique. Les géographes savent aussi que la carte induit des représentations vivaces (par exemple, en matière territoriale) et produit de dangereux effets de réel, qu'il vaut mieux prévoir. Leur épistémologie se nourrit de tels constats. Il n'est donc pas étonnant de voir les spécialistes de la cartographie et ceux de la visualisation dialoguer ensemble sur ces points, des points sur lesquels les sciences sociales ont une longueur d'avance : ces questions épistémologiques de la cartographie (et donc de la visualisation) ont été bien défrichées par les géographes dans les années 1980-2000.

Se pose ensuite la question de l'évolution des disciplines et de leurs « territoires ». Le second point est le plus aisé à traiter et pourrait déborder le sujet de la visualisation : les plus perspicaces des experts en sciences sociales comme en sciences physiques ou informatiques ont conscience du fait que ces dernières disciplines envahissent les champs des premières. À force d'utiliser les graphes d'échanges en ligne comme jeux de données féconds pour le traitement du signal ou la théorie des graphes, elles arrivent à répondre à des problématiques qui relevaient jusqu'alors du territoire des premières : organisations sociales, avec leurs pôles, marges et hiérarchies, dynamiques politiques ou culturelles, etc. Et certains penseurs hybrides, soucieux d'écouter les deux groupes de disciplines, n'ont pas manqué de contester les axiomes de la sociologie durkheimienne. Le fait que les sciences dites exactes soient aujourd'hui en capacité de traiter des « obtenues » massives et variées (Latour, 2007) du temps présent, donc numériques, et d'en proposer des visualisations pertinentes pour la recherche, l'industrie et les médias, renforce leur domination sur des disciplines plus littéraires et aujourd'hui désargentées.

La question de l'évolution des disciplines est plus complexe. Elle renvoie, d'une part, à la question de l'outillage (informatique) et, d'autre part, à celle de leur rencontre avec le « social ». Au plan de l'outillage, le fait d'utiliser des sources (données) et des algorithmes élaborés collectivement, suffisamment complexes pour qu'une personne seule ne puisse en maîtriser totalement l'origine ni le fonctionnement, pose de nouvelles questions de confiance dans le système technique désormais en place au niveau mondial. Ces questions ne sont pas insolubles, mais elles invitent à reformuler précisément les articulations entre expérience, théorie et technique, selon le climatologue Claude Kergomard. La confrontation des sciences exactes avec le social aura à terme des effets qu'il est difficile d'estimer. D'une part, elle est neuve, et donc imprévisible. D'autre part, elle est aussi impulsée par l'industrie du numérique, qui construit sa fortune sur ce thème par le biais des moteurs de recherche et des plateformes d'intermédiation. Ces deux facteurs alimenteront des questions éthiques chez les experts de l'informatique et de la visualisation, déjà pressenties par nombre d'entre eux. Mais c'est un autre débat...

### Conclusion

La visualisation devient un champ de recherche à part entière. Elle s'appuie désormais sur des méthodes sophistiquées, liées aux données massives et peu structurées à l'origine de cette nouvelle discipline. Elle induit un dialogue inattendu entre deux groupes d'experts : les informaticiens et physiciens, d'un côté, et les designers, de l'autre, parfois avec l'assistance de psychologues. Les questions épistémologiques qu'elle alimente invitent aussi les membres du premier groupe à dialoguer avec les géographes, lesquels ont déjà été confrontés à de telles problématiques avec la cartographie, qui est un pilier méthodologique de leur discipline. La cartographie, aupa-

vant associée à un savoir-faire propre aux représentations graphiques de portions de l'espace terrestre, se dissout désormais dans la visualisation – ce que ne perçoivent évidemment pas les utilisateurs de logiciels d'itinéraire en ligne, ces gros consommateurs de cartes numériques. Mais à l'heure actuelle, la visualisation n'a pas fini d'explorer les problématiques épistémologiques fécondées par la cartographie.

## Bibliographie

BERTIN J. (1967), *Sémiologie graphique. Les diagrammes – Les réseaux – Les cartes*, Paris, La Haye : Mouton, Gauthier-Villars.

DESBOIS H. (2001), « Les territoires de l'Internet : suggestions pour une cybergéographie », in *Comprendre les usages de l'Internet*, GUICHARD (Éric) (dir.), Paris, Éditions Rue d'Ulm, pp. 253-263.

DESBOIS H. (2015), *Les Mesures du territoire. Aspects techniques, politiques et culturels des mutations de la carte topographique*, Villeurbanne, Presses de l'Enssib.

GAUMONT G., PANABI M. & CHAVALARIAS D. (2018), "Reconstruction of the socio-semantic dynamics of political activist Twitter networks – Method and application to the 2017 French presidential election", *PLOS One*, <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0201879>

GUICHARD É. (2007), « Géographie de l'Internet », in *Lieux de Savoir. Espaces et communautés*, JACOB (Christian) (dir.), Paris, Albin Michel, pp. 989–1009, <http://barthes.enssib.fr/articles/Guichard-Geographie-internet.pdf>

LATOUR B. (2007), « Pensée retenue, pensée distribuée », in *Lieux de Savoir. Espaces et communautés*, JACOB (Christian) (dir.), Paris, Albin Michel, vol. I, pp. 605–615.

# La démarche GéoBIM : de la gestion du territoire à celle d'un bâtiment

Par Dimitri SARAFINOF

Institut national de l'information géographique et forestière

Arnaud MISTRE

et Guillaume PICINBONO

CSTB

Bruno VALLET et

Laurent HEYDEL

IGN

La connaissance précise d'un territoire est un élément clé pour son aménagement et son développement durable. Elle passe par une modélisation et une cartographie précises, et ce à différentes échelles, allant jusqu'à celui d'un bâtiment et de son intérieur. Les enjeux sont multiples : expansion urbaine, valorisation du territoire, transports et infrastructures...

La démarche GéoBIM allie les compétences de la modélisation et de la représentation de l'ensemble des domaines du bâtiment (BIM) et de la cartographie conventionnelle (Géo) afin d'offrir une approche globale et multiniveaux en réponse au besoin de mutualisation de l'information cartographique.

Des travaux de recherche et de normalisation ainsi que des expérimentations contribuent à cette démarche GéoBIM, dont l'objectif est de converger sur les formats, les outils et les modalités d'échange de cette information cartographique/géographique nécessaire à la visualisation, à la compréhension et à l'analyse de notre environnement et des projets visant à son développement.

## Présentation du concept GéoBIM

### Les domaines d'application

Le domaine géospatial ou encore celui de la géomatique sont des domaines recourant à la modélisation et à la cartographie du monde réel afin d'avoir une meilleure compréhension de l'environnement qui nous entoure. Après la carte des Cassini, première représentation du royaume de France dans son ensemble du moins tel qu'il était au XVIII<sup>e</sup> siècle, c'est l'entrée dans l'ère du numérique et de l'Internet qui a facilité l'accès pour tout un chacun à cette vision représentée de notre environnement et son partage, notamment au travers d'infrastructures de données géospatiales (<https://www.geoportail.gouv.fr/>).

L'acronyme BIM (Building Information Model/Modelling) représente, quant à lui, le domaine de la construction et ses contraintes, avec un objectif : faire travailler ensemble les différents acteurs, de la maîtrise d'ouvrage jusqu'à l'architecte, en passant par les différentes maîtrises d'œuvre impliquées dans la réalisation d'un projet.

### L'avènement du GéoBIM

Grâce à des cartes de notre territoire toujours plus précises et l'acquisition 3D des bâtiments et des structures, notamment dans nos villes, les frontières de ces deux domaines se sont peu à peu rapprochées. De nouveaux enjeux ont émergé : la mise à jour en quasi-temps réel du modèle 3D d'une ville, une gestion plus poussée des infrastructures (et de leurs cycles de vie), la navigation *indoor/outdoor*...

Afin de répondre à ces problématiques transverses, la démarche GéoBIM s'est peu à peu mise en place en France et en Europe, et ce depuis le début des années 2010 (démarche également appelée GIS/BIM à l'international, GIS (Geospatial Information System) étant l'acronyme anglophone désignant le domaine géospatial). Cette dernière a vocation à proposer des solutions permettant une meilleure intégration des données et processus spécifiques à ces deux communautés. Des activités de normalisation, de recherche et des expérimentations sont ainsi menées, auxquelles l'IGN et le CSTB prennent part. Ces deux

établissements nationaux, complémentaires au regard de leur domaine de compétences, sont devenus des acteurs incontournables sur le sujet.

## Les travaux de normalisation menés sous l'égide...

### ... de l'ISO...

Les activités de normalisation des deux domaines considérés (Géo et BIM) sont menées au sein de deux comités techniques distincts de l'ISO (l'Organisation internationale de normalisation).

Le comité technique 211 de l'ISO (ISO TC211) est en charge de la normalisation de l'information géospatiale au niveau international : il en définit les normes de base (modélisation géométrique/topologique, métadonnées, imagerie...). Un travail important en cours concerne le projet de norme ISO 19166 – BIM to GIS Conceptual Mapping, qui a pour objectif la description du processus de mise en correspondance dans le domaine géospatial des concepts du BIM avec le GIS, pour permettre notamment la construction de bases de données mixtes BIM/GIS.

Le comité technique 59 de l'ISO (ISO TC59) est en charge de la normalisation dans le domaine des bâtiments et des ouvrages de génie civil : plus particulièrement le sous-comité 13 (ISO/TC 59/SC 13), qui se concentre sur l'organisation et la numérisation de ces informations, y compris la modélisation des informations relatives à la construction (BIM). Il est en charge du standard IFC (ISO 16739), le standard d'échange des informations relatives à un projet de construction. Il étudie également le projet de norme ISO/DIS 23386, initié en France sous le pseudonyme de PPBIM (propriétés des produits pour le BIM). Ce futur standard fixera la méthodologie nécessaire à la mise en place et à la gestion des dictionnaires de données utilisés dans le BIM, quelle qu'en soit l'échelle. Le TC59/SC13 travaille bien entendu en liaison avec BuildinSMART International, l'organisation développant et gérant les standards de l'Open BIM (voir *infra*).

Enfin, il faut noter l'engagement de travaux communs à ces deux comités au sein du groupe de travail joint 14 (JWG14 GIS (Geospatial)/BIM interoperability), qui est chargé d'établir un rapport technique identifiant les principaux axes de travail (référencement, représentation géométrique, principes de modélisation, terminologie, processus...) devant permettant la fusion prochaine des environnements Géo et BIM.

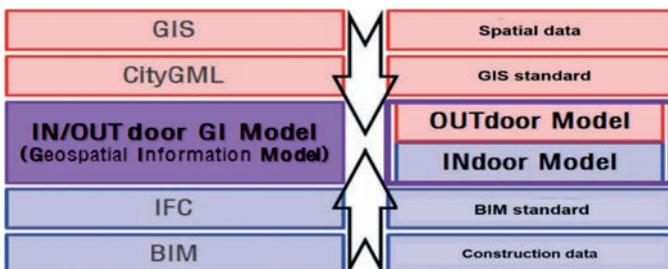


Figure 1 : Fusion des espaces *indoor* et *outdoor* au travers de standards (source : projet de rapport technique JWG14 ISO TC59/TC211).

### ... de l'Open Geospatial Consortium (OGC)...

L'OGC est un organisme majeur de normalisation dédié à l'information géospatiale. Ses standards sont ouverts et accessibles sur Internet (<http://www.opengeospatial.org/>). Il est constitué à la fois d'organismes publics, de fournisseurs de logiciels et d'universités.

Plusieurs standards sont pertinents dans le cadre de la réflexion GéoBIM.

Le standard CityGML définit un modèle de données et un format permettant une description 3D de la ville et de son environnement, et ce à différents niveaux de détail (jusqu'à l'intérieur même des structures). Les bâtiments, les réseaux (routiers, ferrés, transport par voies fluviales...), l'hydrographie, la végétation sont notamment représentés. Les données permettent une visualisation 3D de l'environnement urbain, de réaliser des simulations ou encore de faire des requêtes sémantiques sur les objets du modèle.

Le standard IndoorGML, quant à lui, permet exclusivement la représentation de l'intérieur d'un bâtiment ou d'une structure, sous la forme d'espaces au sein desquels il est possible de naviguer. L'objectif est de localiser des entités fixes ou mobiles présentes à l'intérieur du bâtiment et de fournir des services d'information spatiale permettant de préciser leur position dans l'espace intérieur ; il n'a pas pour but de représenter les composants architecturaux du bâtiment.

Enfin, le standard LandInfra découle de la volonté de standardiser les concepts présents dans le format LandXML, qui est aujourd'hui le standard le plus utilisé pour la modélisation des informations de terrain et d'infrastructures. Il est ainsi dédié à la modélisation des infrastructures, notamment de génie civil (routes, chemins de fer, arpentages, parcelles cadastrales, infrastructures de drainage et de distribution d'eau...). En réussissant à fédérer les acteurs du monde du terrain, des infrastructures et de l'architecture, le standard LandInfra réalise la prouesse de proposer un schéma commun à toutes les implémentations « Infra » dans les différents formats standards : InfraGML (implémentation du modèle au format GML) pour l'OGC et IFC-Infra pour BuildingSMART International.

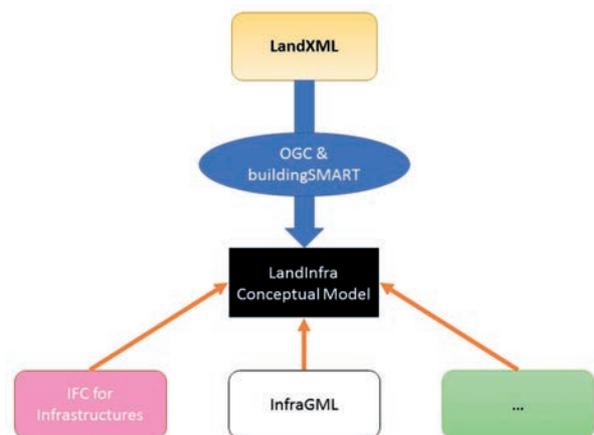


Figure 2 : Processus de définition des standards LandInfra & InfraGML.

### ... et du BSI – Building SMART International

BuildingSMART International est l'organisation faisant autorité dans l'accompagnement des secteurs de la construction et des infrastructures dans la réussite de leur révolution numérique, à travers la définition, la gestion, la normalisation et la promotion de formats d'échange ouverts (« Open BIM »). Le plus connu des standards développés par BuildingSMART est l'IFC, lequel est devenu, depuis sa version IFC4 (2014), le standard ISO d'interopérabilité dans le domaine de la construction.

Parmi les travaux les plus ambitieux actuellement menés au sein du BuildingSMART International peuvent être mentionnés les projets d'extension de ce standard aux domaines de l'infrastructure et du génie civil. En liaison avec l'OGC en ce qui concerne la définition du modèle conceptuel LandInfra, BuildingSMART a élaboré une feuille de route visant à intégrer dans le standard IFC un ensemble de concepts communs à tous les sous-domaines de l'architecture (en particulier, les « alignements » dans IFC 4.1), puis, successivement, les différentes extensions spécifiques aux différents types d'infrastructures (IFC4.2 s'agissant des ponts, de la modélisation des réseaux routiers et ferrés à venir).

### Les travaux de recherche et expérimentations en cours

#### Le projet national MINnD

Lancé en 2014, le projet national MINnD (Modélisation des INformations INteropérables pour les INfrastructures Durables : <https://www.minnd.fr/>) est un projet de recherche collaborative qui a pour objectif de favoriser le développement du BIM (Building Information Modelling) en matière de construction d'infrastructures, à travers l'amélioration de la structuration des données des projets pour faciliter les échanges et le partage des informations

les plus pertinentes. MINnD mobilise un grand nombre d'acteurs ayant des activités liées à la conception, à la construction et à l'exploitation d'infrastructures. Ces acteurs collaborent en particulier à la définition des extensions du standard IFC nécessaires à la prise en compte des spécificités de leurs différents domaines d'activité en matière d'infrastructures.

Le projet national MINnD va poursuivre ses travaux de recherche dans le cadre d'une « saison 2 », prévue de 2019 à 2021. Le nouveau programme a été labellisé « Projet national » par le comité d'orientation du réseau RAGC (recherche appliquée en génie civil), le 21 novembre 2018. Le démarrage opérationnel du projet est programmé pour mars 2019 ; un appel à participation a été lancé. Cette saison 2 vise à progresser sur des sujets tels que la modélisation de l'existant, la gestion du patrimoine et des actifs, les modalités de réception en BIM, la gestion des incertitudes et des tolérances, la poursuite du développement des IFC infra... Le programme de recherche est structuré autour des thématiques suivantes : la structuration des données, leur qualification, leur génération, leur collecte et leur utilisation, ainsi que la collaboration entre les différents acteurs.

#### Le projet BIOM

Dans le cadre de la thématique GéoBIM, il est important de mentionner le projet de recherche BIOM (Building Inside/Outside Modeling). Ce projet financé par l'ANR réunit le CSTB, l'ENPC (laboratoire LIGM, équipe Imagine), l'Inria Sophia Antipolis (équipe Titane), l'INSA Strasbourg (Unité de recherche ICUBE, équipe TRIO) et l'IGN (UMR Lastig) qui en assure la coordination. L'objectif de BIOM est d'automatiser au maximum la modélisation conjointe intérieure et extérieure de bâtiments existants à partir de données images et LIDAR acquises à partir de points de vue aériens et terrestres. Les enjeux scientifiques associés

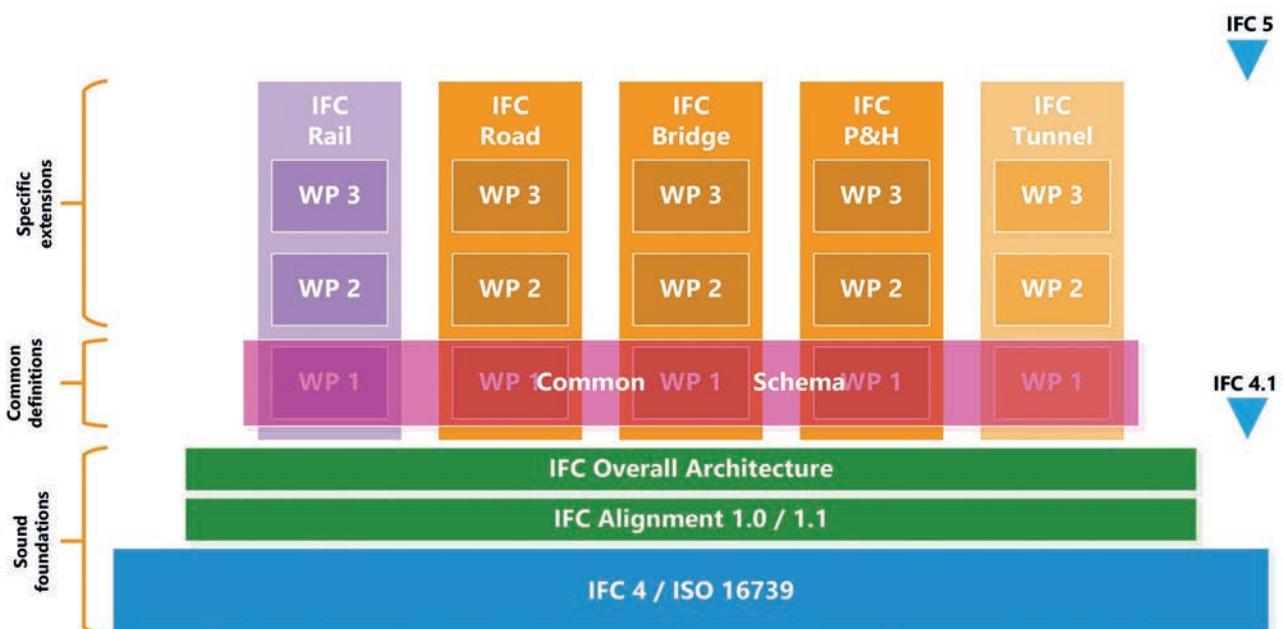


Figure 3 : Feuille de route de la transposition du standard IFC aux infrastructures.



Figure 4 : Les différentes entreprises partenaires du projet MINnD.

sont ceux :

- du traitement de données de télédétection : le recalage et la fusion de données hétérogènes ;
- de la vision par ordinateur : la segmentation sémantique de ces données et leur généralisation pour remonter à un modèle de bâtiment structuré et sémantisé comme ceux décrits par les standards CityGML ou les IFC.

Les modèles BIOM en résultant doivent être aussi détaillés que les données le permettent et aussi fidèles que possible à la réalité. Ces modèles doivent en outre pouvoir adresser de multiples usages :

- inventaire et études urbaines : l'inventaire et la surveillance des bâtiments peut intéresser les autorités locales dans le cadre d'une gestion patrimoniale ;
- gestion du cycle de vie : les architectes peuvent utiliser les modélisations de BIOM dans un projet de rénovation pour restituer l'état initial d'un chantier et celui de la conception.
- construction : comparer le modèle BIOM d'un bâtiment déjà construit avec la conception que peut avoir l'architecte d'une nouvelle construction peut servir aux autorités compétentes pour étayer leur acceptation (ou non) de celle-ci.
- phase d'occupation : les modèles BIOM peuvent alimenter des moteurs de simulation en vue d'une optimisation de la performance et de la durabilité des bâtiments existants, mais aussi en matière de santé, de bien-être et de gestion des risques.

Le projet ne traite pas directement des questions de normalisation relatives à la convergence GéoBIM, mais il les suivra de près en tant qu'utilisateur, puisque la reconstruction de l'enveloppe externe des bâtiments sera opérée à l'échelle du quartier, voire de la ville, dans la logique de l'information géographique, alors que les intérieurs seront modélisés à une échelle plus localisée, sur des bâtiments ciblés, en y intégrant l'enveloppe externe, dans une logique plus proche du BIM.

### Technologies d'acquisition et expérimentations

Parmi les différentes technologiques d'acquisition de l'existant, nous pouvons citer entre autres : la photogrammétrie par autocorrélation qui a beaucoup évolué ces dernières années ; le laser *via* vecteurs fixes ou mobiles ; les mesures dites ponctuelles ; la lumière structurée de type kinect ; les capteurs RGBD qui apparaissent sur les *smartphones* et autre radars et sondes plus spécifiques. Afin de produire des données pertinentes, ces procédés d'acquisition s'appuient souvent sur d'autres technologies : le SLAM (Simultaneous Localization And Mapping) qui est indispensable aux procédés mobiles ; la centrale inertielle qui délivre les mêmes services et est souvent associée au précédent ; ou les GNSS (Global Navigation Satellite System) souvent improprement désignés par l'acronyme GPS.

De nombreux acteurs, notamment de grands groupes industriels ou des institutions publiques, prennent conscience des enjeux que recouvre la numérisation de leur parc immobilier, en lien avec l'évolution de leur métier face à l'essor du numérique. Le CSTB a ainsi pu réaliser avec le service Infrastructure de la Défense (SID) – pour le compte du ministère des Armées, dont l'ampleur de son patrimoine immobilier l'incite à préparer l'avenir –, plusieurs expérimentations à Versailles : acquisitions photogrammétriques par drones, modélisations automatiques à partir de plans, de relevés laser mobiles ou fixes (stations laser extérieures et intérieures), ces derniers ayant fait l'objet en outre d'une modélisation automatique au titre de la confection de la maquette BIM. Tous ont donné lieu à des analyses comparatives et à l'établissement de rapports complets.

L'IGN a également mené plusieurs expérimentations en ce sens. Le lever d'une station de métro avec modélisation 3D a permis de mettre à disposition une maquette numérique fiable et précise. Des millions de points ont été levés en recourant à un scanner laser terrestre, en différentes positions couvrant l'ensemble de la station.

En complément de ces scènes laser, des mesures topométriques (classiques pour un géomètre) ont également été effectuées, permettant ainsi à l'issue des traitements de disposer d'un résultat dont la précision est évaluée à quelques centimètres. L'objectif était de produire une surface 3D « étanche » permettant des simulations de flux d'air, et donc la possibilité de tester différentes configurations en matière d'aération.

L'IGN a en outre effectué une expérimentation d'acquisition permettant de proposer une modélisation 3D du réseau des égouts de Paris, l'objectif étant, grâce à une préparation en amont, de minimiser au maximum les temps d'intervention des égoutiers, en particulier en raison du caractère confiné et nocif du milieu. Plusieurs processus d'acquisition ont été testés, notamment un prototype prometteur se composant de caméras légères et recourant aux techniques de la photogrammétrie.

### Les perspectives de la démarche GéoBIM

La démarche GéoBIM en cours d'élaboration permet la mise en place de processus (acquisition, traitement, analyse de données...) s'appuyant sur des formats et des services normalisés, qui, demain, permettront une meilleure gestion et un développement durable des territoires.

La numérisation du patrimoine existant entame sa révolution à un moment où le recours à celle-ci s'avère de plus

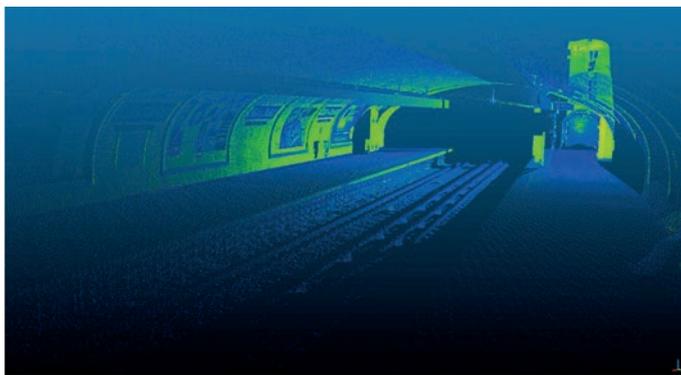


Figure 5: Exemple de scènes laser acquises.

en plus utile et nécessaire. Les solutions se développent, les innovations s'enchaînent et de nouveaux usages deviennent possibles. L'expertise des établissements CSTB et de l'IGN est cruciale pour porter une position commune et cohérente au sein des instances de normalisation, et ce aussi bien au niveau national qu'international.

La démarche GéoBIM s'intègre de fait pleinement dans celle des villes intelligentes en facilitant une gestion durable des bâtiments et des infrastructures façonnant un territoire.

# Les cartes numériques terrestres pour la mobilité, quelles opportunités et quels enjeux ?

Par Yoann NUSSBAUMER  
Chargemap

L'émergence des *smartphones* a rebattu les cartes du secteur de la cartographie en démocratisant l'accès aux cartes numériques et en permettant à de nouveaux services de mobilité d'émerger. Ces services s'appuient notamment sur les progrès des capteurs et les informations remontrées, consciemment ou non, par les utilisateurs.

De leur côté, les principaux acteurs de la cartographie se transforment progressivement en méga-plateformes de mobilité, obligeant les acteurs traditionnels à revoir leurs positions stratégiques.

Ces mutations posent un certain nombre de questions liées à la propriété des données cartographiques ainsi qu'à la diffusion des informations personnelles des utilisateurs, les réponses susceptibles d'y être apportées sont parfois loin d'être évidentes.

## La démocratisation de la cartographie à l'ère du numérique

Au cours des dix dernières années, l'arrivée massive des *smartphones* dans la vie de nos concitoyens a bouleversé un grand nombre de secteurs, ceux de la cartographie et des transports n'ont pas été épargnés.

Les *smartphones*, ces appareils électroniques connectés et bardés de capteurs, possédés par plus de deux milliards d'individus, facilitent la récolte d'une quantité incroyable de données géographiques.

Avec leurs fonctionnalités de géolocalisation, ils auront permis à toute une génération de disposer d'outils cartographiques d'une puissance et d'une précision inédites, souvent au travers d'interfaces utilisateurs d'une simplicité enfantine.

Ce bouleversement a considérablement impacté la valeur perçue de la cartographie. Qui achète encore une carte routière à l'heure où la meilleure carte se trouve dans notre poche et est mise à jour en temps réel grâce aux informations recueillies sur le trafic routier ?

Les géants du numérique sont en première ligne de cette révolution, et plus particulièrement Apple et Google. *Via* leurs systèmes d'exploitation dédiés aux téléphones mobiles et leurs plateformes applicatives, ils ont mis leurs outils cartographiques entre les mains de millions de développeurs d'applications qui s'en sont emparés pour construire de nouveaux services. Aurions-nous assisté

à l'émergence de Booking.com, TripAdvisor ou même de Chargemap sans cet accès facilité à la cartographie numérique ? Certainement pas sous la forme que nous connaissons aujourd'hui.

Cette transformation numérique change profondément notre quotidien, plus particulièrement quand on la considère sous l'angle du transport et de la mobilité. Elle fait émerger de nouvelles opportunités pour notre société, mais également un certain nombre d'enjeux auxquels elle va devoir faire face.

Chargemap est l'un des leaders européens des services de mobilité proposés aux conducteurs de voitures électriques. Sa singularité provient de sa cartographie collaborative des bornes de recharge, laquelle est bâtie avec sa communauté de conducteurs depuis 2011.

Ce référencement géographique des bornes de recharge et de leurs attributs est réalisé en collaboration avec plus de 250 000 membres répartis en Europe. Ces derniers ont apporté près de 2 millions de contributions (ajout et modification de la localisation de bornes, envoi de photos, notations, commentaires) qui sont vérifiées et mises en forme par l'équipe de Chargemap avant leur publication.

Dans leur grande majorité, ces contributions ont été apportées *via* l'application mobile de Chargemap, en situation de mobilité.

## La récolte des données géographiques comme base pour de nouveaux services de mobilité

### Une récolte automatisée grâce à une myriade de capteurs

La démocratisation des outils cartographiques s'est accompagnée d'une formidable progression des capteurs embarqués dans les *smartphones*. Ils mesurent avec précision la localisation de leurs utilisateurs, la vitesse et l'amplitude de leur déplacement, la position dans laquelle est tenu leur *smartphone*, etc. À cela s'ajoute désormais une puissance de calcul embarquée qui a progressé au point de permettre l'intégration de l'intelligence artificielle dans un téléphone.

De plus en plus, en passant par la connexion Internet des *smartphones* ou *via* un accès dédié, de nouveaux objets connectés remontent eux aussi des données cartographiques. Ainsi, les traceurs d'activité, montres et autres bracelets connectés permettent, par exemple, de coupler l'information géographique à des données de santé, cela crée un contexte favorable au développement de nouveaux services. Des bornes de recharge pour véhicules électriques, réparties partout sur le territoire, remontent en temps réel leur statut d'occupation et l'énergie délivrée.

Dans le domaine des transports, l'automobile a commencé sa mutation avec l'arrivée des voitures connectées, elles aussi progressivement bardées de capteurs, dotées de capacités de calcul et de l'intelligence artificielle.

Le constructeur automobile Tesla a ainsi équipé, dès 2016, ses voitures électriques de capteurs destinés à la conduite autonome, qui fonctionnent même lorsque le service Autopilot n'est pas activé. L'entreprise californienne a ainsi utilisé les données récoltées par les capteurs des véhicules conduits par ses clients pour bâtir une cartographie très précise des routes empruntées. Ces cartes haute fidélité sont aujourd'hui un élément stratégique dans la course au développement des voitures autonomes, dont Tesla est l'un des leaders.

### L'humain, toujours un élément indispensable à l'enrichissement des données

Cette profusion de capteurs et d'outils pouvait laisser à penser qu'aucune intervention humaine ne serait désormais nécessaire pour profiter des opportunités offertes par les nouvelles technologies appliquées aux outils cartographiques. Chez Chargemap, nous ne sommes pas tout à fait de cet avis.

Dans le cas du référencement des infrastructures de recharge pour véhicules électriques, il n'est pas possible de bâtir une cartographie de qualité sans impliquer les conducteurs. Si certaines informations peuvent être retournées automatiquement par les véhicules ou les bornes de recharge, d'autres nécessitent une saisie manuelle. Notamment lorsque l'information est diffuse et non accessible *via* une source centralisée et fiable.

De plus en plus de bornes de recharge sont connectées à Internet et remontent des informations automatiquement

auprès de Chargemap. Pourtant, obtenir leur localisation précise, des photos de qualité ou encore des informations précieuses sur les conditions d'accès reste impossible sans une remontée du terrain effectuée par les utilisateurs. À défaut comment savoir que, tous les jeudis, la borne de recharge de ce petit village du Sud de la France n'est pas utilisable, parce que c'est jour de marché et que les camions des commerçants en interdisent l'accès ? Comment obtenir les horaires précis d'ouverture d'un petit supermarché, dont le parking est fermé en dehors de ces plages horaires et rend donc l'accès aux bornes de recharge impossible ? Comment savoir que l'écran de cette borne de recharge très fréquentée a été vandalisé, ce qui ne permet plus son utilisation ?

C'est ce niveau de détail qui fait la renommée de Chargemap auprès des conducteurs de voitures électriques, et celui-ci ne peut être obtenu que par l'implication des utilisateurs de notre service.

Le service de navigation Waze repose sur un principe similaire. En permettant à ses utilisateurs de remonter jusqu'à lui les « zones de danger » sur la route *via* une application mobile très simple d'utilisation, il s'est assuré une solide réputation auprès des conducteurs. En marge de cela, il a constitué – automatiquement, cette fois-ci – une carte très précise du réseau routier et du trafic en temps réel. Le succès fulgurant de cette application n'a pas manqué d'interpeller le géant Google, qui a racheté l'entreprise israélienne pour 1,15 milliard de dollars au cours de l'année 2013.

### L'émergence des méga-plateformes de services de mobilité

Les outils de cartographie mis à la disposition du grand public n'ont cessé ces dernières années d'évoluer vers des plateformes de services, tournées notamment vers le transport et la mobilité. Ainsi, Google Maps et Apple Plan permettent désormais de préparer un itinéraire en voiture, de se déplacer en métro ou encore de commander un VTC pour effectuer un trajet.

Uber, entreprise bien connue pour son service de VTC, a d'ailleurs bien intégré ce changement n'hésitant pas à amorcer sa mutation en réponse aux évolutions de Google et d'Apple. Après avoir racheté à Microsoft une partie des actifs de Bing Maps en 2015, l'entreprise a commencé à étendre sa gamme de services de mobilité. En plus des VTC, Uber propose désormais des vélos et des trottinettes en libre-service, ainsi que des outils logistiques. Uber est d'ailleurs en train de travailler à l'intégration des réseaux de transport en commun dans ses applications.

Quel est le but ultime de ces méga-plateformes ? Connecter la totalité de l'offre de transport disponible au sein d'une seule application mobile pour fournir à ses utilisateurs un accès à un service facilitant les déplacements de demain : les véhicules partagés ou autonomes, les offres de VTC et de transport en commun réunis dans un seul objet, notre *smartphone*.

## La mobilité érigée en service, une bataille de géants

Seuls quelques très gros acteurs sont en mesure de concrétiser efficacement cette vision. Comme toutes les grandes plateformes numériques, ils disposent d'une puissance très importante, lorsqu'elles n'occupent pas une position dominante.

Dans cette bataille, la maîtrise des données cartographiques a pris une importance capitale. Google et Apple seront très certainement amenés à faire la course en tête, mais nombre d'autres acteurs économiques comptent bien ne pas les laisser prendre trop d'avance.

Ainsi, les principaux constructeurs automobiles allemands (Audi, BMW et Daimler) se sont réunis pour racheter en 2015 l'activité cartographie du néerlandais Nokia, pour une somme de 2,55 milliards d'euros. Cette société, rebaptisée Here, est chargée de développer une cartographie haute définition, laquelle est nécessaire au développement des véhicules autonomes. Elle propose également des outils de développement pour les éditeurs de services cartographiques, un chemin déjà emprunté par Google et Apple...

Il faut dire que l'industrie automobile n'a qu'une crainte : manquer le virage du numérique. La désaffection progressive de toute une génération vis-à-vis de l'automobile conjuguée à l'émergence des méga-plateformes numériques de mobilité fait peser un risque considérable sur les constructeurs automobiles. C'est ce qui explique leurs très nombreuses initiatives prises en matière d'auto-partage et leurs propositions de nouvelles formes de mobilité, avec toujours la même composante centrale : un *smartphone* et une cartographie, sur laquelle viennent se greffer des services.

Reste à savoir si l'industrie automobile saura faire face aux nouveaux géants de la cartographie.

## L'épineuse question de la propriété des données

Si les grands acteurs de la cartographie se muent progressivement en plateforme de services de mobilité, la question de la propriété des données reste pendante.

Qui doit être propriétaire des données produites par un véhicule ? Le propriétaire du véhicule, son constructeur ou le cartographe ? Dans quelle mesure les automobilistes sont-ils prêts à partager leurs données, dont certaines sont très personnelles, et avec qui ? Ou plutôt, à quelles conditions les constructeurs automobiles et les cartographes sont-ils prêts à donner accès à ces données au propriétaire du véhicule ?

Quand les collectivités investissent des sommes pharaoniques dans les infrastructures de transport en commun, à quelles conditions celles-ci doivent-elles accepter de céder l'usage ou la propriété des données afférentes aux géants du numérique ?

Quand les fonds de carte les plus précis d'un pays et de ses infrastructures appartiennent à des entreprises privées, quelle est la responsabilité d'un État ? Doit-il investir de l'argent pour développer ses propres jeux de données cartographiques ou s'appuyer sur un acteur économique dont les intérêts stratégiques peuvent diverger ?

Quelle place pour des initiatives de cartographie *open source* telles qu'OpenStreetMap dans un monde où le meilleur moyen pour récolter des données géographiques est d'exercer un contrôle sur les *smartphones* de centaines de millions de personnes ?

Si les réponses à ces questions ne sont pas toujours évidentes, il est clair qu'elles façonneront le monde de la mobilité de demain. Un monde où la cartographie et le numérique occuperont une place toujours plus importante dans nos déplacements, au risque de bouleverser les grands équilibres économiques actuels.

# Les cartes numériques HD, le futur de la mobilité : quelle valeur ajoutée aux systèmes de conduite automatisés ?

Par Vincent MARTINIER  
TomTom France

Des cartes papier aux systèmes de navigation numériques sur écran tactile, l'évolution de la navigation a été un facteur particulièrement important dans l'essor de l'automobile et de la mobilité. La cartographie routière est à l'aube d'une nouvelle révolution. Sa métamorphose, débutée il y a vingt ans de cela, s'est opérée à travers la combinaison de deux facteurs clés : la géolocalisation par satellite et la transformation numérique. Alors que la finalité de la cartographie routière était de permettre à un conducteur de déterminer sa position et de lui proposer un itinéraire pour aller d'un point A vers un point B, l'émergence des systèmes de conduite automatisés se traduit par la délégation de plus en plus de fonctions de conduite à l'intelligence artificielle. Cette délégation sera totale avec l'avènement du véhicule autonome, pour l'essor duquel une nouvelle cartographie en haute définition sera essentielle. C'est le nouvel enjeu sur lequel travaille TomTom, l'un des leaders mondiaux des technologies de géolocalisation.

Dans un monde en mouvement permanent, les changements d'infrastructures routières sont constants. Si une carte ne reflète pas les derniers changements intervenus, tels que la construction d'une nouvelle route, un changement de sens de circulation ou l'ajout de nouveaux éléments d'adresse (numéros de rue, par exemple), l'automobiliste (ou plus tard l'intelligence artificielle à qui les fonctions de conduite sont progressivement déléguées) sera soudainement confronté à des erreurs d'interprétation pouvant compromettre sa sécurité et celle de ses passagers.

La réalité évolue aussi vite que le monde change : chaque jour, de nouvelles routes, de nouvelles rues, de nouvelles signalisations correspondent à des données à ajouter ou à modifier. La difficulté majeure en matière de cartographie routière est ainsi de retranscrire en permanence et dans un délai de plus en plus court les évolutions du réseau routier pour faire en sorte que celle-ci reste à jour.

Les sociétés aujourd'hui capables de proposer une cartographie routière globale, mise à jour régulièrement et présentant un contrôle de qualité strict se comptent sur les doigts d'une main – TomTom, société néerlandaise créée en 1991, est l'une d'entre elles : elle propose une cartographie représentant plus de 62 millions de kilomètres de

routes et une couverture géographique correspondant à 153 pays.

Les bases de données géographiques de TomTom s'enrichissent en permanence à la fois dans une dimension spatiale en raison de l'expansion de sa couverture géographique, et dans les attributs mêmes de la donnée cartographique par l'ajout d'éléments de sécurité et de gestion de la conduite, comme les degrés de dénivelé d'une route ou d'inclinaison d'un virage.

La cartographie routière met ainsi en œuvre des technologies de plus en plus complexes et procède de l'analyse d'une somme considérable de données. En effet, elle est aujourd'hui la résultante d'une agrégation de données permettant de reconstituer des zones, des lignes et des points, et de les relier à des informations de nature sémantique (adresses postales, points d'intérêt, subdivisions administratives, etc.). Le métier de cartographe consiste à produire, à relier et à compiler ces milliards de données en un minimum de temps. Il s'agit, aujourd'hui, de l'un des plus gros défis à relever en matière de *Big Data*.

Chacune de ces évolutions nécessite, au cas par cas, et pour chaque type de donnée, de résoudre un certain nombre de difficultés techniques. Elles concernent tout d'abord la donnée elle-même : il est ainsi nécessaire

d'analyser la typologie de la donnée, sa description (sémantique et modélisation informatique) et ses contraintes intrinsèques (durée de vie, maintenance, mises à jour, etc.). Puis la collecte des données en considérant le grand volume de celles-ci, leur qualité ou les algorithmes d'extraction automatique à mobiliser.

Pour répondre à ces nécessités, TomTom a optimisé au fil des années les techniques de cartographie professionnelles. TomTom s'appuie essentiellement sur deux sources de collecte et de mise à jour des informations, qui viennent enrichir les sources traditionnelles (cadastre, imagerie aérienne, etc.) : le Mobile Mapping, c'est-à-dire les relevés d'informations cartographiques opérés par des véhicules, directement sur le terrain, et les informations communautaires générées par les remontées en temps réel des utilisateurs des systèmes de géolocalisation.

La technique Mobile Mapping s'est progressivement imposée au sein des autres entreprises cartographiques ; elle consiste à embarquer à bord d'un véhicule toute une série de caméras reliées à des récepteurs GPS d'une grande précision afin d'enregistrer les informations constitutives du réseau routier, pour l'essentiel les axes principaux (autoroutes, routes nationales et départementales). La capture d'image présente trois avantages majeurs : elle est exhaustive, extrêmement précise dans le traitement des informations contenues, et elle est pérenne ; en effet, toutes les informations sont stockées et peuvent être traitées *a posteriori*.

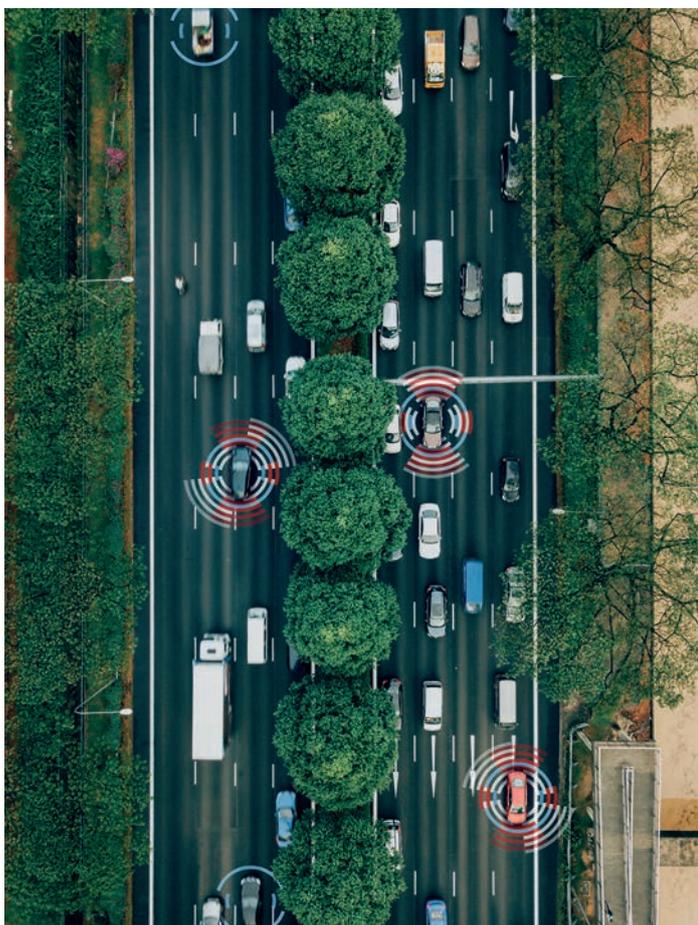


Figure 1 : Les véhicules autonomes compareront les relevés opérés par leurs capteurs avec les attributs de la carte HD pour pouvoir se localiser avec une plus grande précision. © Chuttersnap

En parallèle, TomTom utilise depuis plusieurs années les contributions des membres de sa communauté en agrégeant les traces GPS de plus de 550 millions d'appareils connectés. En moyenne, chaque jour, ce sont plus de 2 milliards de kilomètres parcourus par les conducteurs qui sont ainsi enregistrés par TomTom : cela représente plus de 21 milliards de points de données anonymes enregistrées chaque jour, soit plus de 7 800 milliards sur l'année. Toutes les vingt minutes, les systèmes de TomTom cartographient l'équivalent de la totalité du réseau routier d'une ville comme Berlin.

Il convient alors pour TomTom d'apporter les modifications identifiées dans sa base de données mère, en intégrant toutes les données collectées à partir de ses sources et observations – données traditionnelles (sources administratives officielles), imagerie aérienne, traces GPS en continu –, et de procéder à l'agrégation de toutes ces sources dans sa base de données.

Chaque mois, 1,5 milliard de changements sont ainsi reportés dans ses cartes. En moyenne, la base de données cartographique de TomTom est modifiée plus de cinq cent soixante-dix fois par seconde. Ces changements concernent indifféremment des modifications de nature géométrique, des modifications des caractéristiques routières, la création de nouveaux carrefours, de giratoires, ou encore l'ajout de nouveaux points d'intérêt ou de nouveaux noms de rue et éléments d'adresse.

La phase suivante consiste pour cette entreprise à fournir à ses clients des cartes mises à jour et toujours plus précises, et ce dans un minimum de temps. Pour ce faire, TomTom a mis au point une plateforme de production cartographique dite transactionnelle, qui, alimentée en continu, repose sur l'apprentissage automatique et l'intelligence artificielle pour permettre des cycles courts entre la détection de changements intervenus dans le monde réel et la mise à jour des cartes, avec des niveaux de qualité garantis. Cette évolution permanente permet à TomTom de gérer tous les niveaux de détail, aussi bien pour ses cartes de navigation actuelles que pour ses nouvelles cartes en haute définition indispensables à l'essor des futurs véhicules autonomes.

### La course au temps réel

Jusque tout récemment, le traitement et la livraison des nouvelles cartes s'effectuaient par lots (*batch*) : une nouvelle carte était recompilée, puis transmise au client sur support physique, une fois par an ; puis ce cycle de production est descendu à trois mois. Grâce aux mises à jour incrémentielles de la plateforme transactionnelle, il est possible de produire une carte à un rythme accéléré tout en intégrant chaque jour des millions de modifications (transactions). Chaque modification apportée à la carte est vérifiée et validée afin de satisfaire aux critères de qualité exigés par les clients de l'écosystème de la mobilité.

Une nouvelle version cartographique est désormais produite chaque semaine – un temps de production qui pourrait même être réduit si tant est que l'industrie le demande. Ces nouvelles versions sont postées sur le *cloud*, puis

téléchargées par les services de clients gravitant dans les mondes de l'automobile et de l'informatique.

Le temps écoulé entre un changement intervenu dans le monde réel et la représentation de celui-ci dans les cartes est désormais considérablement écourté, une célérité qui permet à TomTom de fournir des services de mobilité en temps réel et les clés de la future navigation autonome.

### De nouvelles cartes HD pour la conduite autonome

La conduite autonome s'articulera autour de quatre piliers : 1) la détection et l'interprétation des informations collectées au moyen des radars, lidars et caméras embarqués dans les véhicules, 2) le calcul de la trajectoire à prendre en fonction de ces informations et 3) la mécanisation de la détermination de cette trajectoire. Le quatrième pilier est la cartographie HD qui constitue un élément essentiel du puzzle, laquelle améliore considérablement la sécurité et le confort de conduite des véhicules autonomes. Pour tout un ensemble de fonctionnalités sophistiquées d'automatisation de la conduite, les capteurs embarqués font preuve de capacités supérieures aux sens humains. La cartographie HD étend le champ de lecture d'une voiture autonome bien au-delà du prochain virage.

Les véhicules autonomes auront besoin de cartes très différentes de celles utilisées dans les systèmes de navigation actuels. Aujourd'hui, les cartes numériques sont construites pour répondre aux usages des automobilistes : pour leur permettre de s'orienter, de planifier leur voyage et de naviguer jusqu'à leur destination finale. Toutefois, au fur et à mesure que la tâche de conduite assurée par des systèmes de conduite automatisés se mue en une conduite de plus en plus autonome, le rôle des

cartes évolue. Le positionnement par satellite n'est plus assez précis pour répondre aux exigences des véhicules équipés de fonctions automatisées. Une nouvelle génération de cartes spécialement conçues pour les machines et non pour les humains est désormais nécessaire.

Ces cartes de nouvelle génération généralement appelées cartes haute définition (HD) se présentent sous la forme d'une représentation très précise et réaliste de la route. Elles doivent permettre aux véhicules de voir au-delà du champ de vision humain, offrir une représentation précise de la route et des informations environnantes, avec des attributs tels que la géométrie des voies, les panneaux de signalisation, le mobilier routier – et tout cela avec une précision de quelques centimètres. Ces attributs permettent aux véhicules automatisés de se situer avec précision sur la route, et de modéliser leur environnement en interagissant avec leurs capteurs.

Cette technologie est d'ores et déjà essentielle aux véhicules dotés de systèmes avancés d'assistance au conducteur (ADAS) pour une gamme d'applications très large, tel que le contrôle prédictif du groupe motopropulseur. Le véhicule va ainsi adapter sa vitesse aux caractéristiques de la route : par exemple, en anticipant une côte à venir ou un virage serré à négocier. Si le trafic est dense et que les intempéries altèrent la visibilité ou recouvrent les marquages au sol, la cartographie HD permettra de « voir » au-delà afin de renforcer les performances des systèmes d'assistance à la conduite et d'accroître la sécurité.

### Une redondance des systèmes pour plus de sécurité

Obtenir la confiance des futurs usagers est essentiel pour le succès des véhicules autonomes. L'idée même de la défaillance des capteurs est un sujet de préoccupation pour

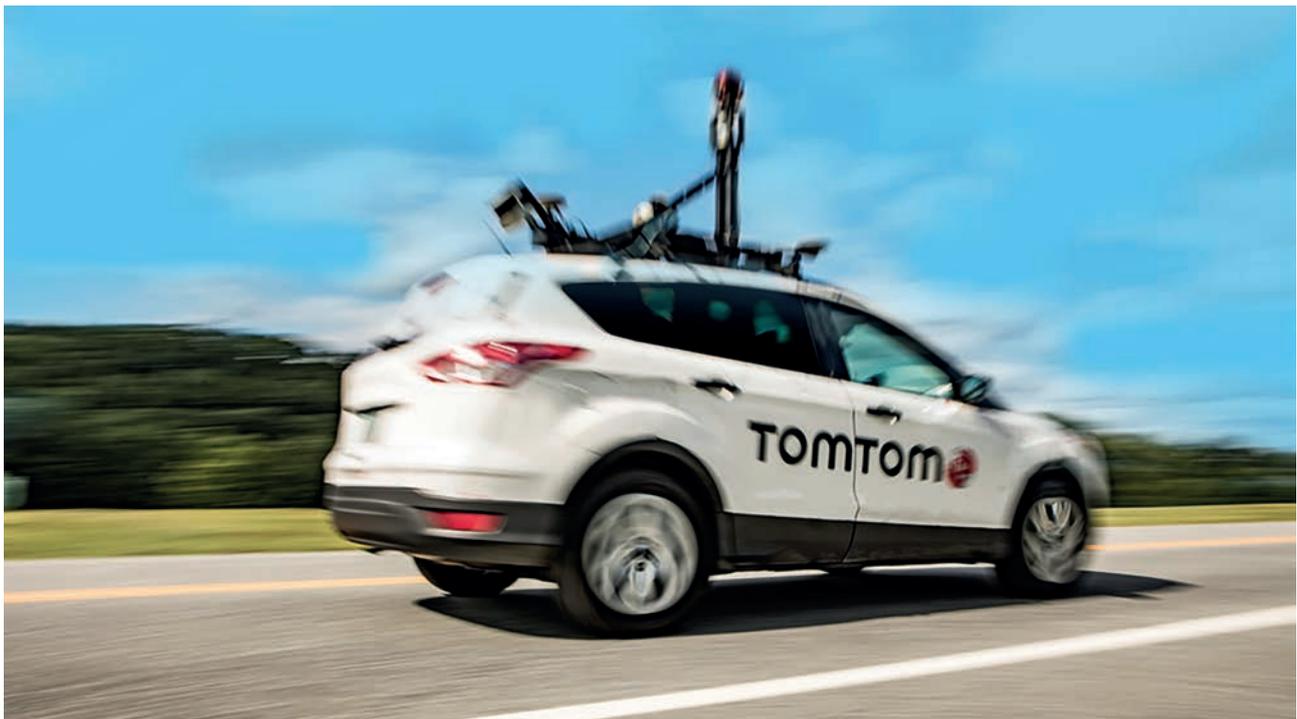
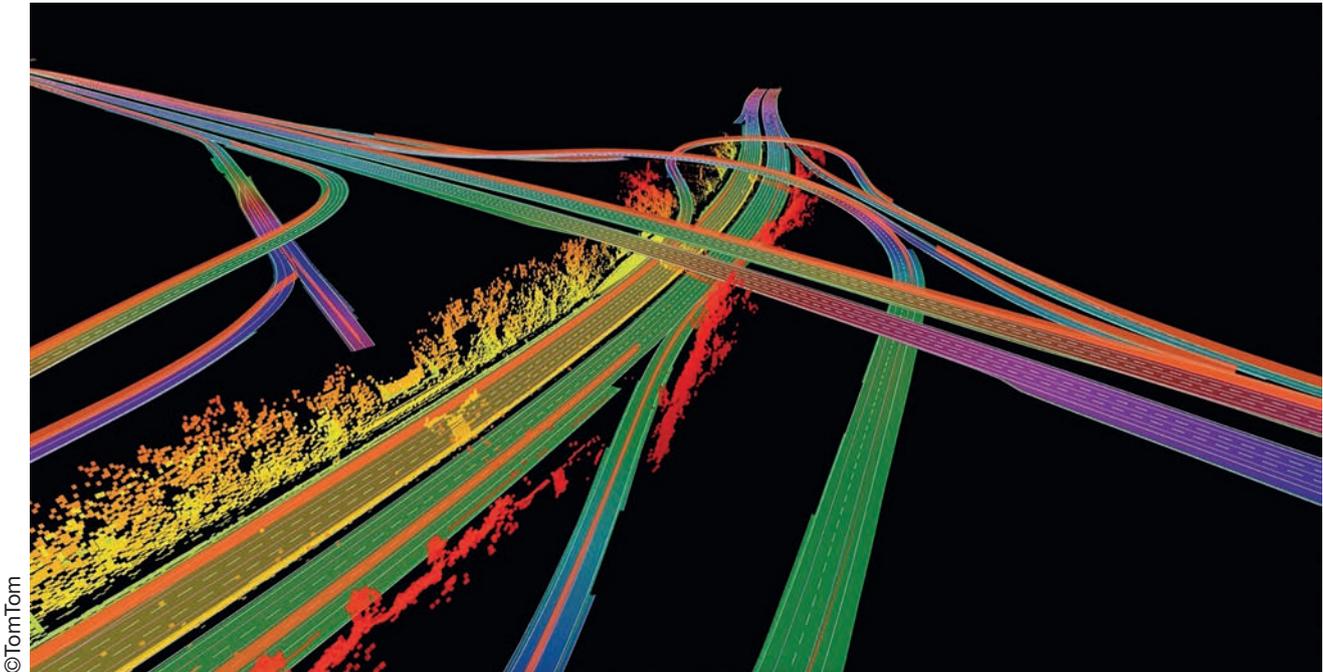


Figure 2 : Les véhicules Mobile Mapping sont la première source de collecte des données utilisées pour confectionner la carte HD.



©TomTom

Figure 3 : Les cartes HD proposent une représentation très précise de la route, avec des attributs tels que la géométrie des voies, les panneaux de signalisation, le mobilier routier...

de nombreux consommateurs. Plusieurs voitures déjà en circulation sont équipées de capteurs capables d'identifier le marquage routier, les véhicules présents à proximité et les obstacles sur la route. Avoir la carte comme couche supplémentaire de détection permet d'éliminer certains doutes. L'amélioration de la sécurité routière est généralement présentée comme le plus grand avantage de la conduite autonome, du fait d'une réduction significative des erreurs humaines au volant. La sécurité supplémentaire apportée par la technologie de cartographie HD est essentielle pour concrétiser la vision que l'on a du véhicule autonome.

### Un système interconnecté

Les cartes HD ne sont pas des produits pouvant fonctionner en autonomie : elles doivent être combinées à d'autres fonctionnalités connectées au sein d'un système automatisé embarqué dans le véhicule. TomTom utilise ainsi les *data* relevées par les divers capteurs du véhicule et les compare à ses données cartographiques en 360°. Le véhicule peut alors déterminer son positionnement exact, avec une précision de l'ordre du décimètre.

Pour s'assurer que les cartes reflètent au mieux la réalité à l'instant T, la carte doit être mise à jour en temps réel. Pour produire sa cartographie HD de base, TomTom utilise comme première source d'information les données

collectées par ses véhicules Mobile Mapping équipés de nombreux capteurs. Les données sont traitées de façon à restituer une vue extrêmement détaillée de l'environnement. Un apprentissage automatique permet d'automatiser et d'accélérer le processus de collecte et de traitement. À ce jour, toutes les autoroutes d'Europe, d'Amérique du Nord et du Japon ont été cartographiées en HD, ce qui représente plus de 400 000 km.

Stockées dans le *cloud*, toutes les données et tous les attributs cartographiques collectés sont retransmis à la voiture autonome, le plus en amont possible. À chaque modification, une mise à jour est envoyée, constituant une pièce d'un puzzle géant. À chaque passage du véhicule autonome, une nouvelle représentation de l'espace intégrant les modifications est remontée au *cloud* de TomTom pour y être traitée instantanément. Ce circuit en boucle fermée permet ainsi de maintenir en permanence la cartographie à jour.

La mobilité va, dans les prochaines années, être de plus en plus partagée, connectée et autonome, rendant les routes plus sûres, les villes moins embouteillées – et donc moins polluées –, et les conducteurs moins stressés. Cette mobilité s'articule donc autour d'un pivot essentiel, la cartographie HD, qui est l'élément indispensable à l'écriture de cette nouvelle page de la navigation.

# De multiples applications pour l'analyse des données AIS (Automatic Identification System) et la géovisualisation interactive de données

Par Damien LE GUYADER  
et Matthieu LE TIXERANT  
Terra Maris

La mise en œuvre de la Planification de l'espace maritime (PEM) nécessite de disposer de données pertinentes. Le déroulement spatio-temporel des usages maritimes et les interactions conflictuelles ou synergiques entre activités constituent des éléments de connaissance indispensables, mais ils sont particulièrement délicats à obtenir dans le milieu marin. Cet article présente synthétiquement une série de méthodes et de résultats obtenus dans le cadre de plusieurs projets de recherche opérationnelle. L'objectif est d'illustrer comment l'analyse des données de l'Automatic Identification System (AIS) peut produire des informations adaptées à la PEM à différents niveaux scalaires pour caractériser le trafic maritime (couloirs de navigation, réseau hiérarchisé de routes maritimes), la pêche maritime (zones et intensités supposées de pêche) et les interactions entre usages. Des exemples élémentaires de géovisualisation interactive de l'information produite sont proposés dans la perspective de faciliter l'analyse exploratoire des résultats.

## Introduction

La croissance rapide de la consommation des espaces maritimes est liée à une tendance globale à la multiplication, à la diversification et à l'intensification des usages et activités humaines en mer (Christie *et al.*, 2014). Cette tendance se manifeste notamment par la croissance du trafic maritime, les pratiques de pêche maritime, l'exploration et l'exploitation du pétrole et du gaz, le développement des activités de loisirs ou encore l'essor des énergies marines renouvelables (EMR). Cette multitude d'activités crée un jeu complexe d'interactions pouvant conduire à des risques environnementaux (Halpern *et al.*, 2008) et à des conflits d'usage (Jones *et al.*, 2016). Les pressions multiples qui s'exercent sur les ressources côtières et la nécessité d'harmoniser les usages de la mer rendent donc nécessaire une approche intégrée de la planification et de la gestion de ces espaces. En juillet 2014, le Parlement et le Conseil européens ont adopté une législation pour la planification de l'espace maritime (directive PEM 2014/89/UE), dont l'objectif est de contribuer à une gestion intégrée

efficace des activités maritimes et à l'utilisation durable des ressources marines et côtières. Une des clés du succès de sa mise en œuvre est de pouvoir disposer de données pertinentes, interopérables et exploitables dans un contexte opérationnel. Le déroulement spatio-temporel des usages maritimes et les interactions conflictuelles ou synergiques entre activités constituent des éléments de connaissance indispensables (Ehler, 2009), mais ils sont particulièrement délicats à obtenir dans le milieu marin (Le Tixerant *et al.*, 2010). Cette information a été identifiée comme lacunaire au sein des systèmes d'information développés par les acteurs maritimes (St. Martin et Hall-Arber, 2008). Elle est aujourd'hui toujours difficile à obtenir et constitue donc un enjeu majeur pour la mise en œuvre de la PEM.

Depuis 2002, le système d'identification automatique (*Automatic Identification System* – AIS) a été rendu obligatoire par l'Organisation maritime internationale : il permet de localiser précisément tout navire qui en est équipé. La mise à disposition relativement récente de données

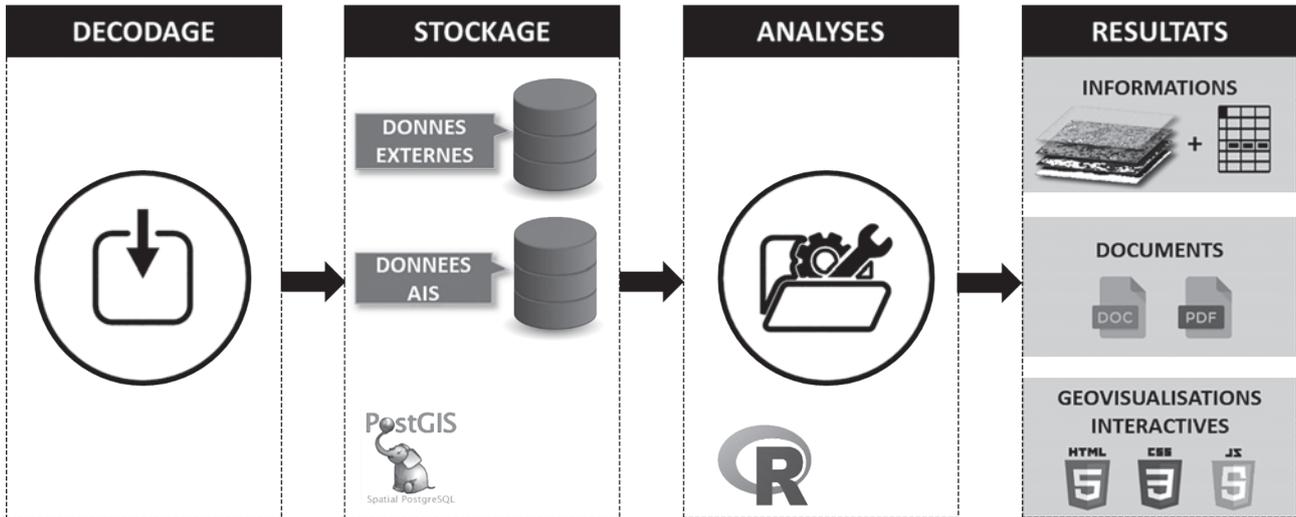


Figure 1 : Représentation schématique du processus d'analyse des données AIS.

archivées, couvrant la quasi-totalité des mers côtières et hauturières grâce au développement de l'AIS satellitaire, constitue une ressource très utile dans le domaine de l'océanographie opérationnelle (Koehn *et al.*, 2013). En effet, l'analyse de données issues de l'AIS renseigne sur la distribution spatiale et temporelle des activités de navigation (Shelmerdine, 2015) ou de pêche maritime (McCauley *et al.*, 2016). Ces données sont en outre exploitées dans le cadre d'applications spécifiques, telles que le suivi du comportement des navires en temps réel (Pallotta *et al.*, 2013), l'évaluation des risques liés aux infrastructures (câbles sous-marins, centrales nucléaires littorales...), l'estimation des courants marins (Guichoux *et al.*, 2016), des polluants chimiques (Jalkanen *et al.*, 2014) et la mesure des émissions sonores (Coomber *et al.*, 2016) générées par le trafic maritime.

Après un rappel des principales caractéristiques de l'AIS, cet article présentera une série de méthodes et de résultats obtenus dans le cadre de plusieurs projets de recherche opérationnelle mis en œuvre par les auteurs dans des contextes divers (Le Tixerant *et al.*, 2018).

## Présentation synthétique de l'AIS

L'AIS, devenu obligatoire dans le cadre de la convention SOLAS <sup>(1)</sup>, est développé dans un objectif d'aide à la sécurité de la navigation et permet une géolocalisation en temps réel des navires émetteurs. À l'échelle de l'Union européenne, ces obligations ont été transcrites dans la directive 2002/59/CE relative à la mise en place d'un système d'information communautaire de suivi du trafic maritime. Tous les navires de transport de passagers, les navires de charge d'une jauge brute égale ou supérieure à 300 tjb (tonneaux de jauge brute) <sup>(2)</sup> et les navires de pêche d'une longueur supérieure à quinze mètres sont soumis à l'obligation d'embarquer un AIS. L'AIS délivre trois catégories d'informations : des informations statiques qui identifient le navire émetteur, des informations dynamiques qui rendent compte de sa position et de son déplacement et des informations spécifiques relatives au trajet effectué. Différents portails en ligne <sup>(3)</sup> permettent

une visualisation du positionnement des navires en temps réel ainsi que de cartes de densité du trafic maritime. Ces portails offrent aussi la possibilité d'acquérir des données archivées et prétraitées pour une zone et une période définies. Dans certains contextes nécessitant de disposer d'une meilleure résolution temporelle, l'exploitation de la donnée brute produite par l'AIS (format NMEA) peut être nécessaire, car les positions des navires ne sont pas rééchantillonnées dans le temps (jusqu'à 2 secondes contre 3 minutes minimum dans le cas de données prétraitées).

## Processus général d'analyse des données AIS

L'exploitation des données AIS archivées relève de l'analyse des déplacements d'objets mobiles (Güting *et al.*, 2000). Les analyses sont réalisées en quatre étapes successives (voir la Figure 1 ci-dessus). Dans le cas d'acquisition de données brutes, une première étape de décodage des trames AIS, puis d'importation et de structuration de celles-ci dans une base de données (PostgreSQL/PostGIS) est nécessaire. Les données AIS peuvent être associées à des données complémentaires de natures variables selon le contexte. Une correction des anomalies est ensuite réalisée (suppression des positions localisées à terre, des signaux dupliqués ou incomplets...). Selon les objectifs poursuivis, ces données sont traitées par analyses spatio-temporelles réalisées sous R. Les informations produites sont associées à des fichiers au format Markdown, ce qui permet de documenter les résultats. Enfin, différents supports dynamiques et interactifs de représentation (carto)graphique de l'information géographique (et temporelle) sont produits dans la perspective

(1) Convention internationale pour la sauvegarde de la vie humaine en mer, chapitre V, règle 19.

(2) Des exemptions sont possibles, sous conditions, pour les navires de charge inférieure à 500 tjb dédiés au cabotage national et les navires de transport de passagers d'une longueur inférieure à quinze mètres ou d'une jauge brute inférieure à 300 tjb effectuant des voyages domestiques.

(3) MarineTraffic, FleetMon, AISlive ou Vessel Finder.

de faciliter la compréhension des résultats et de favoriser leur analyse exploratoire.

## Caractériser le trafic maritime

La caractérisation de la distribution spatio-temporelle de la densité de différents descripteurs relatifs aux activités humaines, à partir de données AIS, est désormais courante. Cependant, il est parfois difficile d'en identifier le motif spatial (*spatial pattern*).

Dans l'objectif d'aboutir à une vision synthétique du trafic maritime, la mise en évidence des principaux couloirs de navigation représente un enjeu de premier plan. Ainsi, une méthode mobilisant la densité de noyau a été développée et testée en rade de Brest afin de discrétiser des zones correspondant à une densité significative du trafic maritime (Le Guyader *et al.*, 2012). Cette méthode s'avère efficace, mais elle nécessite l'identification de groupes de trajectoires homogènes (homogénéité relative des points de départ, des points d'arrivée et d'emprise spatiale). L'identification de ces groupes peut être réalisée à partir de différentes mesures des dissimilarités entre les trajectoires (Hausdorff, Fréchet, DTW), dont le calcul est contraint dans le cas de données massives.

Afin d'accéder à un échelon supérieur dans le degré d'information, le concept d'« autoroutes de la mer » déterminé sur la base d'une hiérarchisation des routes maritimes (réseau primaire, secondaire, tertiaire...) est mis en avant dans différents projets de PEM. L'objectif est d'aboutir à une vision spatialisée synthétique des principales routes et de l'intensité du trafic associé. Des travaux impliquant le développement d'un algorithme spécifique sont en cours pour identifier, à partir de la densité des

trajectoires, un réseau spatialisé et hiérarchisé de routes maritimes. La méthode de constitution du réseau repose sur l'identification automatique de nœuds (ports et points d'intérêt entrants et sortants) et de tronçons ou liens définis comme les chemins de moindre contrainte entre les nœuds. La contrainte spatialisée est définie par une couche de friction composite dépendant de la distribution de la densité des trajectoires et des réseaux hiérarchiques de Strahler (1957). De premiers tests sont actuellement réalisés en Manche (voir la Figure 2 ci-après).

## Décrire l'activité de pêche

Des estimations fines de l'effort de pêche sont nécessaires afin de caractériser les impacts potentiels de certains métiers sur les habitats marins, et d'apporter des informations pertinentes pour la gestion des ressources. Dans ce domaine, le VMS (Vessel Monitoring System) constitue la donnée de référence. Le VMS fournit des rapports sur la position d'un navire à des intervalles de temps réguliers. Pour des raisons de confidentialité, l'accès aux données VMS brutes est très restreint (Lee *et al.*, 2010). La disponibilité des données AIS archivées ouvre donc des opportunités de recherche pour spatialiser les activités de pêche à différentes échelles (McCauley *et al.*, 2016 ; Vespe *et al.*, 2016). Cependant, les données AIS ne comportent pas d'informations permettant de connaître le métier pratiqué par les navires ou de savoir si un navire est en action de pêche (utilisation effective de l'engin) ou non (transit, mouillage, dérive...). Leur exploitation dans ce contexte implique le recours à des méthodologies spécifiques, mobilisant des données hétérogènes et adaptées à l'échelle d'analyse.

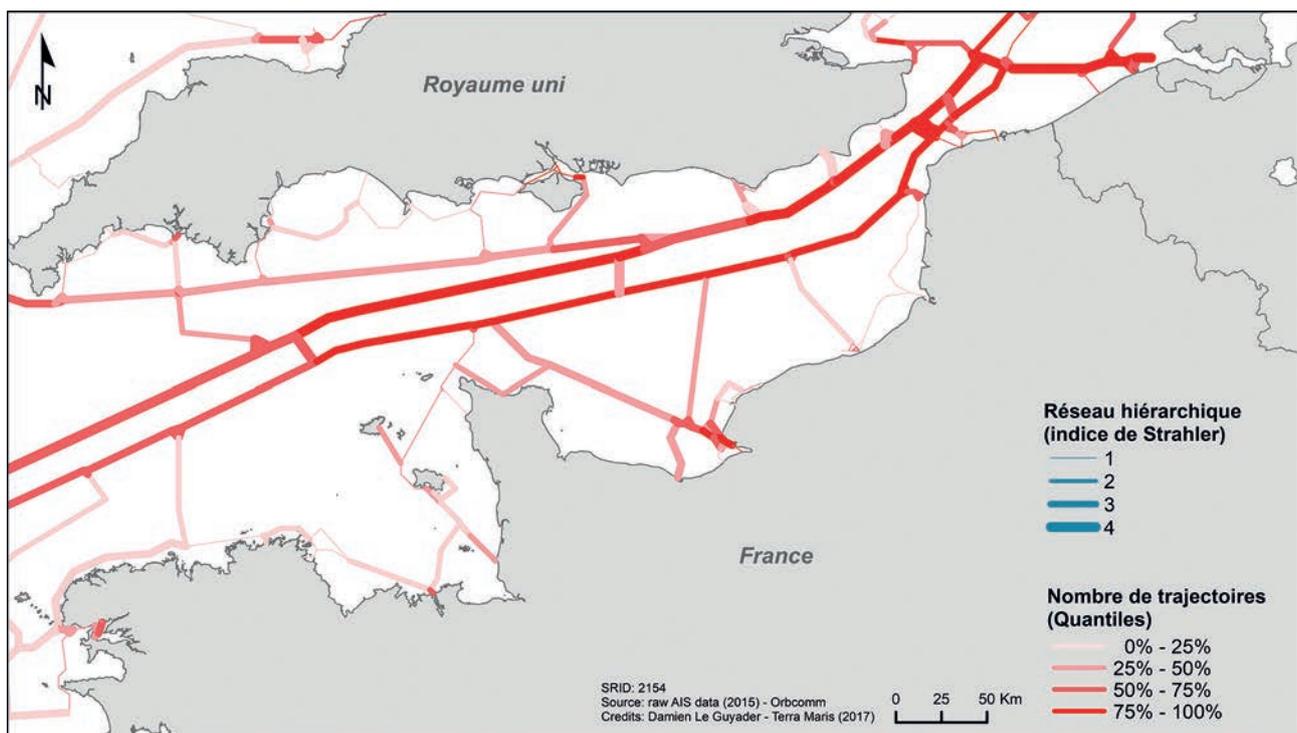


Figure 2 : Réseau spatial hiérarchique des routes maritimes en Manche. Une application cartographique est consultable en ligne : [http://doc.terramaris.fr/DLG/ais\\_network/network.html](http://doc.terramaris.fr/DLG/ais_network/network.html)

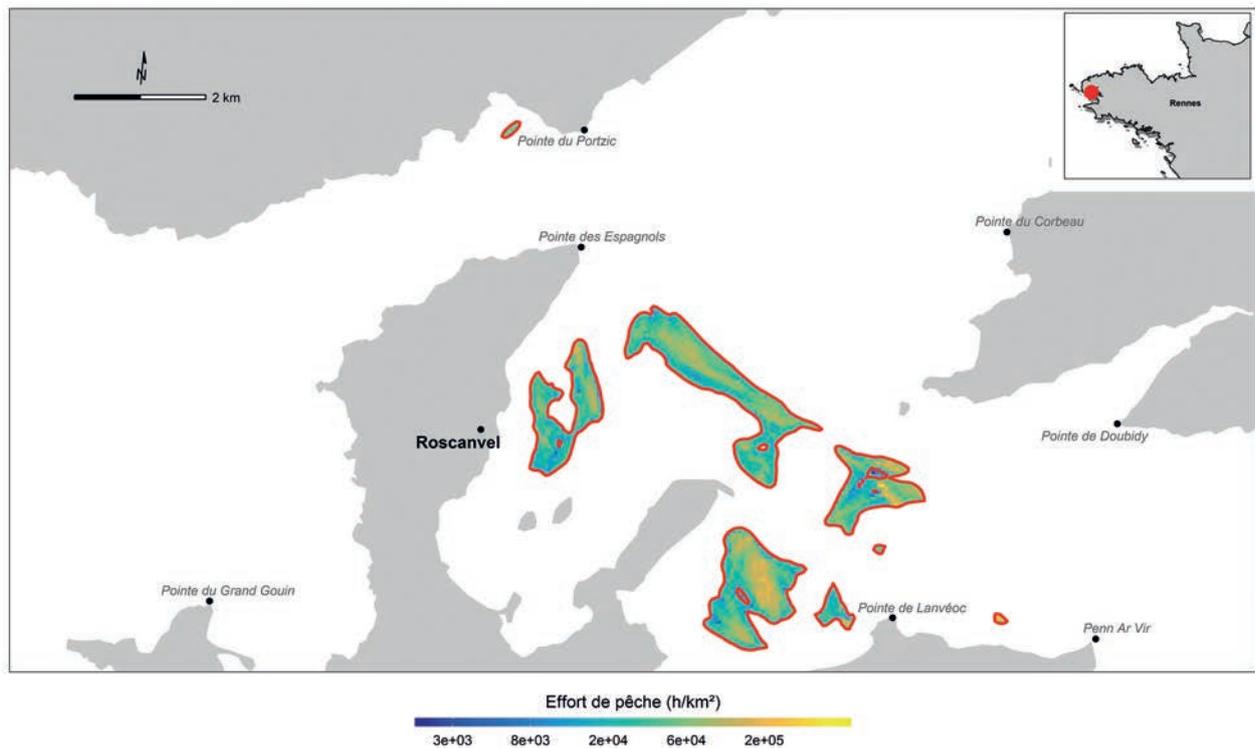


Figure 3 : Distribution annuelle de l'effort de pêche des navires supposés pratiquer la pêche à la coquille Saint-Jacques (Le Guyader et al., 2017). Une application cartographique élémentaire est consultable en ligne : [http://doc.terramaris.fr/DLG/CSJ/csj\\_rdb.html](http://doc.terramaris.fr/DLG/CSJ/csj_rdb.html)

Une étude portant sur la cartographie semi-automatique des zones de pêche à la drague et sur la caractérisation de l'intensité de cette pratique à partir de données AIS a été menée en rade de Brest (Le Guyader et al., 2017) (voir la Figure 3 ci-dessus). La méthode recouvre quatre étapes : 1) structurer une base de données AIS ; 2) identifier pour chaque navire le métier pratiqué quotidiennement à partir de données de débarquement ; 3) estimer les positions supposées des navires en action de pêche à partir de la distribution des vitesses des navires ; et 4) identifier les zones de pêche et estimer l'intensité de la pratique. La performance de la méthode a été évaluée par comparaison aux positions GPS annotées de deux navires volontaires lors d'une marée. Ces travaux ont montré que l'AIS pouvait constituer une ressource complémentaire aux autres sources d'information plus classiquement utilisées (VMS, données d'enquêtes) et fournir des connaissances fines du déroulement de l'activité de pêche côtière à l'échelle locale.

### Évaluer les interactions entre usages

Les données AIS permettent de contribuer à l'évaluation des interactions entre les usages dans le milieu marin (conformité des usages à la réglementation, évaluation des risques, conflits d'usage).

L'évaluation de l'adéquation des mesures réglementaires en vigueur avec les activités observées à partir de données objectives, constitue l'un des besoins identifiés par les gestionnaires de l'espace marin (Le Guyader et al., 2016). Une étude menée à une échelle locale a mis en perspective les couloirs de navigation réellement utilisés par les tankers au regard des chenaux réglementés d'accès au

port (Le Guyader et Ledoux, 2015) (voir la Figure 4 A de la page suivante). Ces résultats d'un grand intérêt pour les gestionnaires de l'espace maritime permettent potentiellement une adaptation des mesures réglementaires aux pratiques ou une révision des mesures adoptées en matière de surveillance et de contrôle.

Dans un objectif d'évaluation des risques, l'identification des positions proximales des navires transitant aux abords d'infrastructures émergées ou situées sur le littoral peut s'avérer nécessaire. Une étude a été réalisée pour estimer à partir des données de l'AIS le risque lié au transit de navires transportant des matières dangereuses à proximité d'installations sensibles érigées sur le littoral (par exemple, des centrales nucléaires, des dépôts pétroliers...) (Le Guyader, 2016). Dans le cas d'un projet d'infrastructure immergée (par exemple, la pose d'un câble sous-marin), l'exploitation de la donnée de l'AIS peut permettre de procéder à une analyse des risques liés au mouillage des navires et, plus précisément, aux éventuels ripages d'ancre en cas de conditions météorologiques défavorables (Le Guyader et Ledoux, 2015) (voir la Figure 4 B de la page suivante).

Les conflits potentiels d'usage de l'espace maritime pour y exercer des activités anthropiques sont classiquement caractérisés par la superposition spatiale des zones de pratique des activités considérées (European MSP Platform, 2016). Or, l'absence de prise en compte de la dynamique temporelle peut s'avérer particulièrement problématique en mer, puisque certaines activités peuvent être exercées au même endroit mais pas au même moment, justifiant dès lors la nécessité d'opérer une distinction entre les interactions spatiales et les interactions spatio-temporelles.

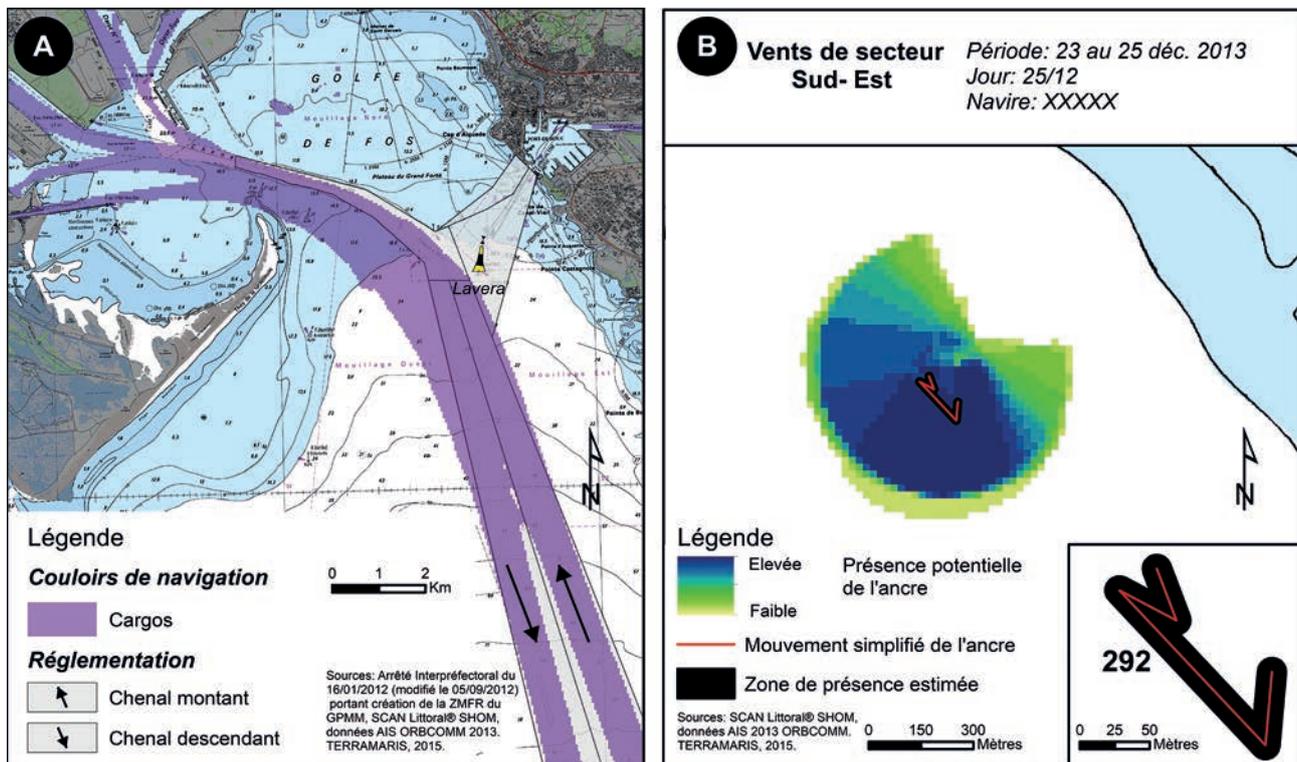


Figure 4 : A) Canaux empruntés par les cargos pour entrer dans le golfe de Fos par rapport aux accès réglementés et B) Estimation de la position potentielle des ancres des navires au mouillage en cas de conditions météorologiques défavorables.

En effet, il a été démontré dans le cadre d'une étude réalisée en rade de Brest, que la prise en compte de la dimension temporelle pour servir à l'analyse des interactions spatiales entre les activités y étant exercées se traduisait par une amélioration significative de l'information apportée, avec un taux de divergence de 70 % par rapport à une étude réalisée en ne tenant compte que de la seule dimension spatiale (Le Guyader, 2012). La mise en évidence des interactions spatio-temporelles entre les différents usages observés en mer implique de combiner l'AIS à d'autres types de données (données réglementaires, données « à dire d'acteurs », données d'observation...) au sein d'une base d'information spatio-temporelle. Son exploitation vise à identifier, à quantifier et à spatialiser les interactions potentielles entre les différentes activités maritimes recensées. Une base d'information spatio-temporelle a été structurée et décrit le déroulement des différentes activités observées en rade de Brest sur une année (2009), à un pas de temps quotidien (Le Guyader, 2012). Son analyse a permis, par exemple, d'établir une hiérarchie des interactions spatio-temporelles entre des activités pondérées par un indice qualitatif de compatibilité entre celles-ci, un indice élaboré à partir d'une enquête réalisée auprès des usagers (voir la Figure 5 de la page suivante) et de distinguer les activités ayant de fortes interactions (par exemple, le transport maritime civil et les activités nautiques encadrées) de celles caractérisées par de faibles interactions, voire aucune (par exemple, la plongée encadrée et les métiers de la drague).

## Conclusion

L'exploitation des données de l'AIS archivées permet de caractériser le trafic maritime, selon les types de navire et

sur des périodes de temps variables, sous la forme d'informations complémentaires (densité des trajectoires, couloirs de navigation, réseau spatial hiérarchisé des routes maritimes). L'AIS peut constituer une ressource complémentaire aux données de référence pour caractériser la pêche maritime à haute résolution spatiale. En comblant certaines lacunes informationnelles, l'AIS contribue aussi à qualifier et à quantifier les interactions entre les différents usages de l'espace marin (conformité des usages à la réglementation, évaluation des risques, conflits d'usage). L'intégration des données de l'AIS au sein de systèmes d'information sur l'espace maritime représente donc un enrichissement indéniable permettant de délivrer des informations pertinentes à différents niveaux scalaires pour favoriser la concertation dans le cadre de la planification de l'espace marin.

La représentation de l'information issue de l'analyse de données spatio-temporelles portant sur des objets mobiles, à l'instar des données de l'AIS, constitue un champ de recherche dynamique favorisé par le développement constant de l'acquisition en temps réel de données géoréférencées par les systèmes de positionnement par satellite. Dans le domaine de la géovisualisation, l'offre de solutions techniques est très abondante. Ces solutions peuvent être classées en fonction du type d'architecture mis en œuvre pour le développement des applications. D'une part, certaines applications reposent sur une architecture serveur-client type Infrastructure de données spatiales (IDS). Elles nécessitent de disposer d'un serveur cartographique pour la manipulation statistique et spatiale des données géographiques et d'un client cartographique pour permettre leur affichage à partir de flux WMS

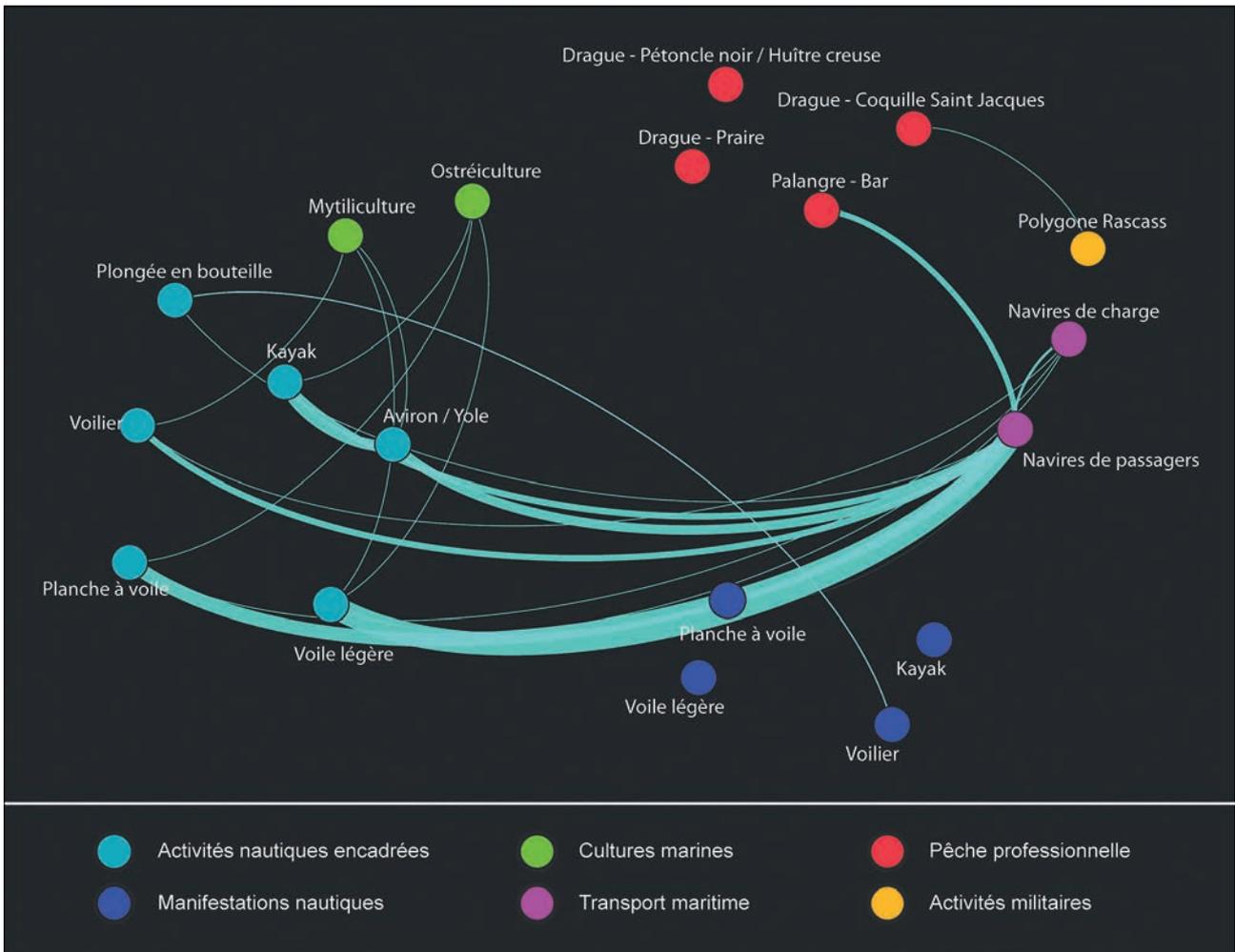


Figure 5 : Interactions potentiellement négatives estimées en 2009 entre les différentes activités, en rade de Brest. Les intersections spatio-temporelles non pondérées entre activités sont consultables en ligne via une application interactive : [http://menir.univ-brest.fr/graph\\_ist\\_rade\\_web](http://menir.univ-brest.fr/graph_ist_rade_web)

et WFS via des solutions commerciales (ArcGis For Server, ArcGis Online), *open source* (GeoNode, GeOrchestra...) ou hybrides (Carto, MapBox). D'autre part, des applications constituées d'une architecture plus légère sont également disponibles. La visualisation de données spatiales stockées dans une base de données ou dans un fichier de format GeoJSON à partir d'un serveur Web couplé à des APIs cartographiques est possible. Pour réaliser nos travaux, nous avons opté pour cette dernière catégorie pour produire des applications élémentaires (nécessitant peu de fonctionnalités) destinées à l'analyse exploratoire des résultats. Elle présente l'avantage de permettre l'analyse des données et la production d'application au sein du même environnement (R) en mobilisant des outils gratuits, libres et ouverts. Pour lors, cette solution permet la production de géovisualisations, telles que des cartes animées, des graphiques interactifs, des cartes interactives et dynamiques (évolution temporelle). Sur le plan technique, la visualisation de données thématiques a-spatiales en interaction avec l'information géographique semble encore se limiter, pour cette solution, aux objets de type ponctuel<sup>(4)</sup>.

(4) [http://doc.terramaris.fr/DLG/ESDA\\_BIGT/esda\\_bigt.html](http://doc.terramaris.fr/DLG/ESDA_BIGT/esda_bigt.html)

## Bibliographie

- CHRISTIE N. *et al.* (2014), "Co-location of activities and designations: A means of solving or creating problems in marine spatial planning?", *Marine Policy*, vol. 43, pp. 254-261.
- COOMBER F. G. *et al.* (2016), "Description of the vessel traffic within the north Pelagos Sanctuary: Inputs for Marine Spatial Planning and management implications within an existing international Marine Protected Area", *Marine Policy*, vol. 69, pp. 102-113.
- EHLER C. (2009), "Marine Spatial Planning, A Step-by-Step Approach toward Ecosystem-based Management", *IOC Manuals and Guides*, vol. 53.
- EUROPEAN MSP PLATFORM (2016), "Adriplan conflict score tool", *European MSP Platform*, <http://msp-platform.eu/practices/adriplan-conflict-score-tool> (consulté le 29 mars 2018).
- GUICHOUX Y., LENNON M. & THOMAS N. (2016), "Sea surface currents calculation using vessel tracking data", *Maritime Knowledge Discovery and Anomaly Detection Workshop Proceedings*, Ispra, Joint Research Centre (JRC).

- GÜTING R. *et al.* (2000), "A Foundation for Representing and Querying Moving Objects", *ACM Trans. Database Syst.*, vol. 25, n°1, pp. 1-42.
- HALPERN B. S. *et al.* (2008), "A Global Map of Human Impact on Marine Ecosystems", *Science*, vol. 319, n°5865, pp. 948-952.
- JALKANEN J.-P., JOHANSSON L. & KUKKONEN J. (2014), "A Comprehensive Inventory of the Ship Traffic Exhaust Emissions in the Baltic Sea from 2006 to 2009", *AMBIO*, vol. 43, n°3, pp. 311-324.
- JONES P. J. S., LIEBERKNECHT L. M. & QIU W. (2016), "Marine spatial planning in reality: Introduction to case studies and discussion of findings", *Marine Policy*.
- KOEHN J. Z., REINEMAN D. R. & KITTINGER J. N. (2013), "Progress and promise in spatial human dimensions research for ecosystem-based ocean planning", *Marine Policy*, vol. 42, pp. 31-38.
- LE GUYADER D. (2012), *Modélisation des activités humaines en mer côtière*, thèse de doctorat, Université de Bretagne occidentale, Brest, 309 p.
- LE GUYADER D. (2016), *Études relatives à la méthodologie d'analyse des risques liés au transport de matières dangereuses par voie maritime : collecte et traitement des données AIS*, Artelia Terra Maris consortium, p. 37.
- LE GUYADER D., BROSSET D. & GOURMELON F. (2012), « Exploitation de données AIS pour la cartographie du transport maritime », *M@ppemonde*, vol. 104, 2011.4.
- LE GUYADER D., LE TIXERANT M. & GOURMELON F. (2016), *Dynamiques des ACTivités mARitimes (DACTARI) : base d'information géographique et temporelle en support à la connaissance et à la scénarisation*, CNRS LETG, Terra Maris, p. 56.
- LE GUYADER D. & LEDOUX S. (2015), *Study of navigation in the Gulf of Fos and related risks*, Artelia Terra Maris consortium, p. 127.
- LE GUYADER D. *et al.* (2017), "Defining high-resolution dredge fishing grounds with Automatic Identification System (AIS) data", *Aquatic Living Resources*, vol. 30, n°39.
- LE TIXERANT M. *et al.* (2018), "How can Automatic Identification System (AIS) data be used for maritime spatial planning?", *Ocean & Coastal Management*, vol. 166, pp. 18-30.
- LE TIXERANT M. *et al.* (2010), "Modelling of human activity development in coastal sea areas", *Journal of Coastal Conservation*, vol. 15, n°4, pp. 407-416.
- LEE J., SOUTH A. B. & JENNINGS S. (2010), "Developing reliable, repeatable, and accessible methods to provide high-resolution estimates of fishing-effort distributions from vessel monitoring system (VMS) data", *ICES Journal of Marine Science*, vol. 67, n°6, pp. 1260-1271.
- McCAULEY D. J. *et al.* (2016), "Ending hide and seek at sea", *Science*, vol. 351, n°6278, pp. 1148-1150.
- PALLOTTA G., VESPE M. & BRYAN K. (2013), "Vessel Pattern Knowledge Discovery from AIS Data: A Framework for Anomaly Detection and Route Prediction", *Entropy*, vol. 15, n°6, pp. 2218-2245.
- SHELMERDINE R. L. (2015), "Teasing out the detail: How our understanding of marine AIS data can better inform industries, developments, and planning", *Marine Policy*, vol. 54, pp. 17-25.
- ST. MARTIN K. & HALL-ARBER M. (2008), "The missing layer: Geo-technologies, communities, and implications for marine spatial planning", *Marine Policy*, vol. 32, n°5, pp. 779-786.
- STRAHLER A. N. (1957), "Quantitative analysis of watershed geomorphology", *Eos, Transactions American Geophysical Union*, vol. 38, n°6, pp. 913-920.
- VESPE M. *et al.* (2016), "Mapping EU fishing activities using ship tracking data", *Journal of Maps*, vol. 12, n° sup. 1, pp. 520-525.

# La cartographie des parcelles agricoles et les services associés à Farmstar

Par Philippe GATE, Baptiste SOENEN, Mathilde CLOSSET et Norbert BENAMOU  
ARVALIS  
et Hervé POILVÉ et Michel FEUGA  
Airbus Defence and Space

Service innovant unique au monde, Farmstar valorise les images satellites et des modèles agronomiques pour aider les agriculteurs dans leurs décisions d'apport d'azote en cours de campagne. Son succès, avec plus 16 000 agriculteurs abonnés exploitant plus de 700 000 hectares, s'explique par sa grande précision sur un élément minéral qui, d'une part, est, en France, avant l'eau, le principal facteur limitant la production agricole tant en quantité qu'en qualité, et qui, d'autre part, peut être responsable d'une baisse de la qualité des eaux (augmentation de la teneur en nitrates des nappes phréatiques). Les bénéfices générés concernent la rentabilité économique (gains de rendement, réduction des doses d'intrants, récolte de grains de meilleure qualité) et les enjeux environnementaux et sociétaux (en évitant tout type d'excès d'azote, en traçant et en justifiant les interventions des agriculteurs). Par ailleurs, grâce aux cartes de zonage livrées aux agriculteurs, chacun d'eux peut faire varier les doses nécessaires en fonction des besoins des plantes en différents points d'une même parcelle.

Cette réussite enviée par beaucoup résulte de l'agrégation de compétences complémentaires entre les agronomes d'ARVALIS et les experts en télédétection d'Airbus.

## Introduction

La production agricole est probablement l'activité économique la plus dépendante des conditions climatiques. Le changement climatique, dont on peut évaluer les effets à la fois en termes de rendement et de variabilité interannuelle des productions à peu près depuis 1995, accroît cette dépendance au climat (Brisson *et al.*, 2010).

À l'échelle de la France, l'azote est, avant l'eau, le principal facteur de limitation de la production de céréales tant sur le plan quantitatif (rendement par hectare) que qualitatif (teneur en protéines des grains) (Gate, 1995). Les sols ne contenant pas suffisamment d'azote pour satisfaire les besoins des cultures, l'agriculteur doit toujours apporter des compléments sous forme d'apport d'engrais, hormis dans le cas des légumineuses qui fixent l'azote atmosphérique. Par ailleurs, les quantités d'azote contenues dans les sols sont variables, à la fois selon le type de sol, les espèces choisies pour la rotation des cultures sur l'exploitation et l'année météorologique, car l'activité des bactéries du sol responsables de la minéralisation de l'azote dépend également des conditions climatiques.

Outre le coût des engrais, tous ces éléments font que la dose à épandre varie de plus en plus d'une année sur l'autre pour une même parcelle, y compris au niveau intra-parcellaire, car les sols sont souvent de nature hétérogène au sein d'une même parcelle. Par ailleurs, l'accroissement de la surface des parcelles utilisées en grandes cultures (moyennes supérieures à 10 hectares (ha)) rend impossible un diagnostic azoté exhaustif de l'ensemble du champ avec les outils classiques.

En réponse à cette demande exprimée par les producteurs, ARVALIS et Airbus ont mis au point une méthode permettant un ajustement des doses d'engrais au plus juste des besoins de la culture, évitant ainsi tout excès dans l'environnement, une méthode basée sur la télédétection satellitaire : le service Farmstar qui couvre aujourd'hui environ 700 000 hectares est en fait l'outil de pilotage de la fertilisation azotée qui est le plus utilisé en France ; il est même unique à l'échelle mondiale. La démarche permet de préconiser, pour chaque partie pixelisée de la parcelle (100 m<sup>2</sup>), la dose optimale, c'est-à-dire la quantité minimale d'engrais permettant d'accéder au

rendement maximum tout en garantissant la qualité des grains (teneur en protéines). Le recours à la télédétection satellitaire permet à la fois une démultiplication des surfaces pilotées et une prise en charge de l'hétérogénéité intra-parcellaire grâce à une spatialisation fine du conseil.

L'élaboration du concept Farmstar et sa mise en œuvre effective sont directement liées à deux projets de recherche financés par la Commission européenne : le projet PAAGE (Pilot Project for Agriculture and AGri-Environment, 1997-1999) et le projet SAAGE (Space Applications for AGriculture and agri-Environment, de 1998 à fin 1999).

## Les principes

### Estimation de variables biophysiques de la canopée

Le concept Farmstar consiste à combiner la technologie spatiale aux connaissances agronomiques. La première étape développée par les experts d'Airbus est d'estimer pour chaque pixel deux paramètres biophysiques et biochimiques de la canopée à partir de modèles de réflectance, l'indice foliaire vert (IFV) et la teneur en chlorophylle (Chl, exprimée en  $\mu\text{g cm}^{-2}$ ). À partir de l'IFV (qui correspond au total de la surface verte des feuilles sur  $1 \text{ m}^2$  de sol, exprimé en  $\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$ ), il est possible d'estimer la biomasse des parties aériennes. Et à partir de Chl, on peut évaluer l'indice de satisfaction des besoins en azote du peuplement (Blondot, Gate et Poilvé, 2005).

Le modèle de réflectance utilisé est le modèle SAIL + PROSPECT. PROSPECT est un modèle générique de transmittance et de réflectance des couverts végétaux (Jacquemout et Baret, 1990 ; Fourty et Baret, 1997) ; SAIL, quant à lui, intègre les propriétés optiques des feuilles ainsi que des paramètres de description de la canopée (Verhoef, 1984). Le modèle utilisé pour les corrections atmosphériques est MODTRAN.

Une première étape importante a consisté à valider la précision des valeurs de l'IFV et de Chl estimées par télédétection (capteur hyperspectral CASI) par rapport à des mesures géolocalisées réalisées sur le terrain (mesures directes de la biomasse, dosage d'azote par spectrométrie de masse et mesures indirectes avec des capteurs de proxidtection, le LI-Cor pour IFV et le Chlorophyll-meter SPAD 502 pour Chl). Ces validations ont porté sur quatre campagnes successives, dont trois réalisées dans trois pays différents (France, Royaume-Uni et Espagne).

La précision moyenne des deux indicateurs est suffisante : 15 % pour IFV et  $2 \mu\text{g cm}^{-2}$  pour Chl (Blondot *et al.*, 2005).

En cours de campagne, les estimations de ces variables sont réalisées à une étape clé de la culture pour la gestion du dernier apport d'azote, celle de la mi-montaison des tiges (valeur moyenne en milieu de printemps).

Évaluer IFV et Chl sur une surface très grande a conduit à utiliser des satellites, dont la fréquence de revisite d'une même zone et la fauchée sont adaptées (famille Spot avec aujourd'hui Spot6 et Spot7, mais aussi Formosat, Deimos-1 et DMC-2, et plus récemment Sentinel2).

### Estimation d'indicateurs agronomiques pour ajuster au plus près la fertilisation azotée

En France, la fertilisation azotée est réglementée. La méthode officielle est celle du bilan prévisionnel, elle est basée sur un bilan de masse entre les entrées et les sorties d'azote (Machet *et al.*, 1990). Cette méthode est parfois entachée d'erreurs en raison de l'incertitude affectant certains paramètres (azote fourni par le sol, besoins azotés de la plante qui sont variables selon les années). Estimer ou prédire la quantité absorbée par la culture est une voie réelle de progrès pour améliorer cette méthode : c'est la culture qui constitue le poste principal du fait qu'elle absorbe la quasi-totalité de l'azote disponible. Pour savoir si la plante est carencée ou en excès, l'agronome utilise l'indice de nutrition azotée basé sur la courbe critique de l'azote (Justes *et al.*, 1994). Dans la phase qui nous intéresse, la relation correspond à l'équation suivante :

$$Nc\% = 5.35W^{-0.442}$$

Où W correspond à la biomasse sèche des parties aériennes ( $\text{t ha}^{-1}$ ) ; Nc à la concentration critique en azote exprimée en pourcentage de la biomasse sèche. Le ratio N présent/N critique correspond à l'INN (indice de nutrition azotée) : quand cet indice est égal à 1, la plante est alimentée à ses justes besoins (optimum) ; inférieur à 1, la plante est carencée, et supérieur à 1, la plante est en excès d'azote. Par ailleurs, par la connaissance de la biomasse, il est possible d'exprimer cet indice en quantité d'azote par hectare dans les parties aériennes (QN). Sur la base de ces valeurs estimées (QN estimé, en tenant compte de l'IFV, de Chl et de QN critique, de Nc pour la biomasse estimée à travers l'IFV), il devient alors possible de préconiser l'apport de doses supplémentaires d'azote dans le but de suivre la courbe critique. Afin d'être sûr d'y parvenir, l'agriculteur utilise la méthode du bilan prévisionnel, mais au moment d'apporter l'azote au stade épis à 1 cm (souvent l'apport le plus important), il minimise dans le cadre de Farmstar la dose apportée par rapport à la dose optimale préconisée par la méthode. Cette condition minimaliste conduit la culture à entrer progressivement en carence, ce qui permet d'ajuster le dernier apport pour satisfaire ses besoins totaux. Les besoins totaux de la culture étant déterminés au stade de la floraison (apogée de la croissance des parties végétatives), un modèle écophysologique projetée dans la dernière version de Farmstar la valeur de QN estimée de la mi-montaison jusqu'à la floraison. Ce modèle simule notamment la croissance, l'absorption d'azote et le niveau journalier du stock azoté du sol (Soenen *et al.*, 2017). La projection jusqu'à la floraison se fait par une projection fréquentielle en utilisant le modèle de fonctionnement sur une série historique de données climatiques afin d'en dégager les valeurs les plus probables (les médianes).

	Méthode du bilan	Farmstar Méthode QN
<b>Écart à la dose optimale</b>	+ 25 kgN.ha <sup>-1</sup>	+ 0.7 kgN.ha <sup>-1</sup> **
<b>r<sup>2</sup></b>	0.34	0.41

Tableau 1 : Écart moyen par rapport à la dose optimale en fonction des deux méthodes de gestion de l'azote (méthode du bilan prévisionnel et Farmstar).

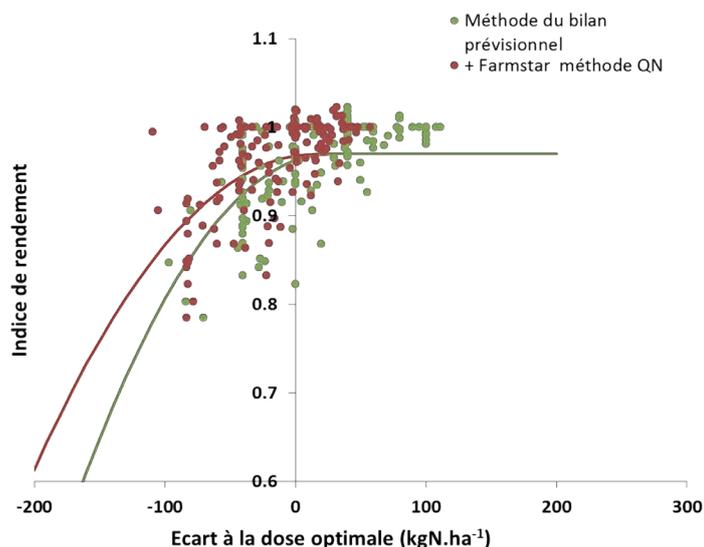


Figure 1 : Relation entre l'indice de rendement et l'écart par rapport à la dose optimale pour apprécier le rendement ( $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ ) en fonction des deux méthodes de gestion de l'azote (méthode du bilan prévisionnel et méthode Farmstar).

La Figure 1 ci-dessus et le Tableau 1 de la page précédente illustrent la performance globale de la méthode en comparant le pilotage assuré par Farmstar (méthode QN) à la méthode du bilan prévisionnel.

La dose optimale correspond à la dose d'azote qui aurait dû être apportée à l'échelle de la parcelle : elle est donc calculée *a posteriori* par ajustement des courbes des réponses en termes de rendement à des doses croissantes d'azote. Ainsi, la méthode Farmstar conduit en moyenne à conseiller des doses très proches de l'optimum ( $0,7 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), alors que la méthode conventionnelle conseille des doses se traduisant par un excès ( $+ 25 \text{ kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ ).

## Applications

Lancé en 2002, le service Farmstar n'a cessé depuis lors de progresser pour couvrir aujourd'hui plus de 700 000 hectares, dont 438 000 de blé, ce qui en fait le premier outil de pilotage agricole en France (voir la Figure 2 ci-dessous). Cette surface correspond à celle exploitée par 16 000 agriculteurs abonnés, avec de plus un taux de fidélisation proche de 90 %.

Cette réussite est due aux bénéfices procurés par la mise en œuvre de cette technologie qui n'a pas d'équivalent (BAUDART *et al.*, 1990 ; DUVAL-FLEURY *et al.*, 2010) :

- rentabilité économique : des gains de rendement pouvant aller jusqu'à 3 quintaux par hectare, et des économies quand les besoins réels en azote sont revus à la baisse grâce à la prévision à la mi-montaison (réduction des doses, voire absence d'apport) ;
- gain environnemental : lié à un moindre apport de l'ordre de  $10 \text{ kg}$  d'azote par hectare. On évite tout type d'excès dans l'environnement en usant de la possibilité d'appliquer des doses différenciées en fonction de l'hétérogénéité intra-parcellaire ;
- qualité : le modèle d'ajustement de la dose prend en compte la migration de l'azote vers les grains pour assurer une teneur en protéines satisfaisant les marchés, notamment ceux de la meunerie et de l'export ;
- traçabilité : la décision de l'apport et l'argumentation de celle-ci sont tracées ce qui donne la possibilité à l'agriculteur de s'assurer que la dose épandue ne soit pas supérieure à celle préconisée par la réglementation.

En début de campagne, chaque parcelle exploitée par un agriculteur est géolocalisée dans une fauchée satellite (voir la Figure 3 de la page suivante). De même, pour chacune des parcelles, toutes les variables nécessaires pour

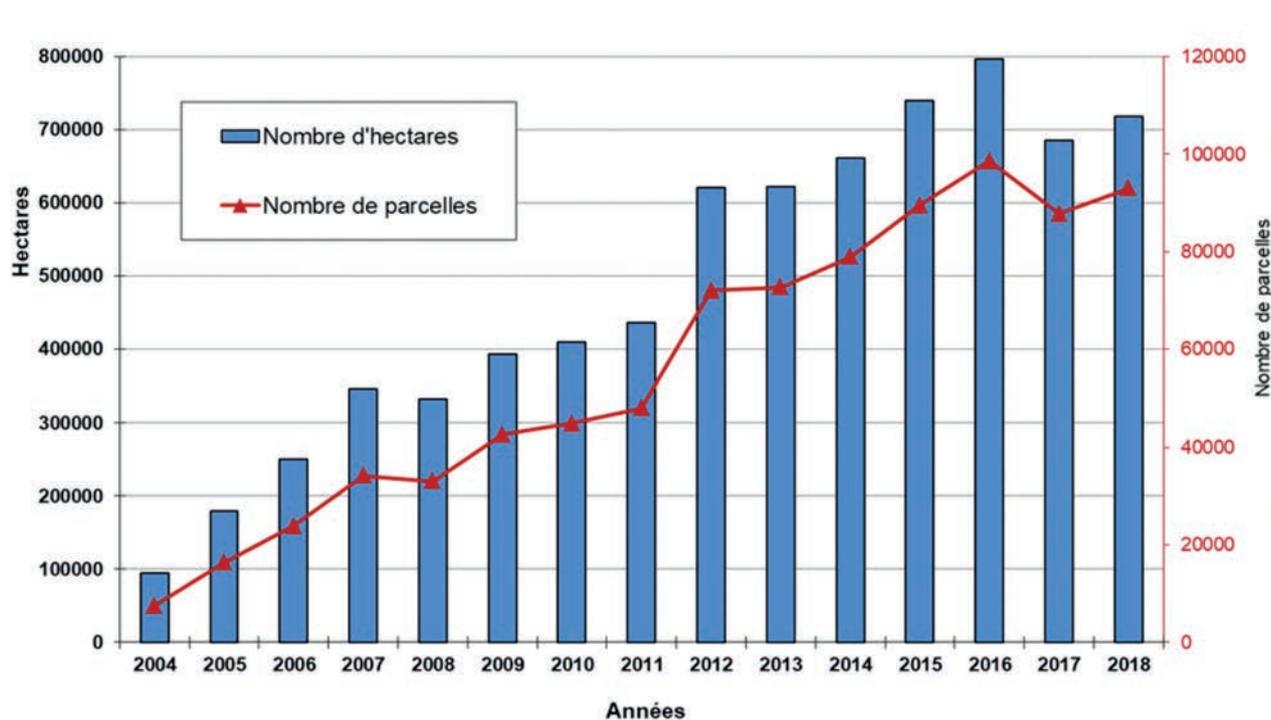


Figure 2 : Évolution du nombre d'hectares et de parcelles Farmstar.



Figure 3 : De la vue satellitaire à la préconisation intra-parcellaire.

incrémenter les modèles agronomiques sont recueillies par le technicien qui dispense le service : coordonnées de la parcelle (afin de spatialiser les données météorologiques journalières), caractéristiques du sol (profondeur, texture...), et pratiques de l'agriculteur (date de semis, variété cultivée...).

Pour chaque parcelle, ARVALIS détermine les moments clés de diagnostic en procédant à des prévisions des différents stades de développement. À partir de ces prévisions, Airbus programme les dates de prises de vue les mieux adaptées à chaque zone géographique en prenant en compte la distribution des stades de développement. Pour chacune des parcelles, sont alors estimées les variables biophysiques clés (Airbus), qui sont converties en statuts azotés, puis en décisions (ARVALIS) par des chaînes de traitement automatisées (voir la Figure 3 ci-dessus).

La Figure 4 de la page suivante donne un exemple de carte de préconisation fournie à l'agriculteur. En fonction de l'hétérogénéité de la parcelle, différentes doses sont conseillées en indiquant la surface approximative de leur épandage. Leur géoréférencement et l'utilisation d'interfaces informatiques permettent aujourd'hui de procéder à des modulations d'application intra-parcellaire pour les machines agricoles (tracteurs et pulvérisateurs).

Au final, sept jours en moyenne séparent le passage du satellite de la délivrance du conseil. À l'échelle d'une campagne, 1 million de données météorologiques sont traitées, et environ 80 millions d'exécutions du modèle agronomique sont effectuées.

## Conclusion et perspectives

Farmstar reste un modèle unique. Son caractère innovant résulte avant tout des complémentarités existant entre

les compétences technologiques d'Airbus et les compétences agronomiques d'ARVALIS.

D'autres conseils spatialisés sont venus progressivement compléter le service Farmstar : état de croissance de la culture, risque de verse physiologique... En réponse à une demande des clients distributeurs, le service a dépassé l'offre de conseil basée uniquement sur l'imagerie satellite pour devenir un vecteur de diffusion plus large, en proposant des modules qui ne font pas appel à la télé-détection, comme la prévision des stades phénologiques et des épidémiologies. Cette dimension de « plateforme intégrée de diffusion de conseils » est permise grâce au cadre très structurant de la base de données parcellaires qui intègre un grand nombre de variables que l'on peut valoriser pour d'autres applications. La plateforme s'est progressivement imposée, notamment pour répondre à la multiplicité des formats des outils proposés par les opérateurs (notamment les coopératives).

La satisfaction des clients est une priorité pour Farmstar, c'est pourquoi l'évolution et l'amélioration des conseils sont continues. Dans les années à venir, le service devra évoluer pour intégrer de nouveaux moyens de télédétection (drones, constellation de satellites Sentinel 2), de nouveaux capteurs (en particulier, des capteurs dédiés à l'estimation des composants du sol), pour renforcer son interactivité avec les agriculteurs par la remontée de leurs pratiques, pour pouvoir réaliser des calculs en temps réel et pour valoriser et faciliter la modulation intra-parcellaire. Ces nouveaux leviers technologiques peuvent ouvrir la porte à de nouveaux conseils, comme la prévision de collecte (rendement et qualité) pour les organismes stockeurs, ou à de nouvelles cultures. La diffusion du modèle à l'étranger est aussi une voie prometteuse. Le champ des possibles est vaste, mais Farmstar, pour suivre

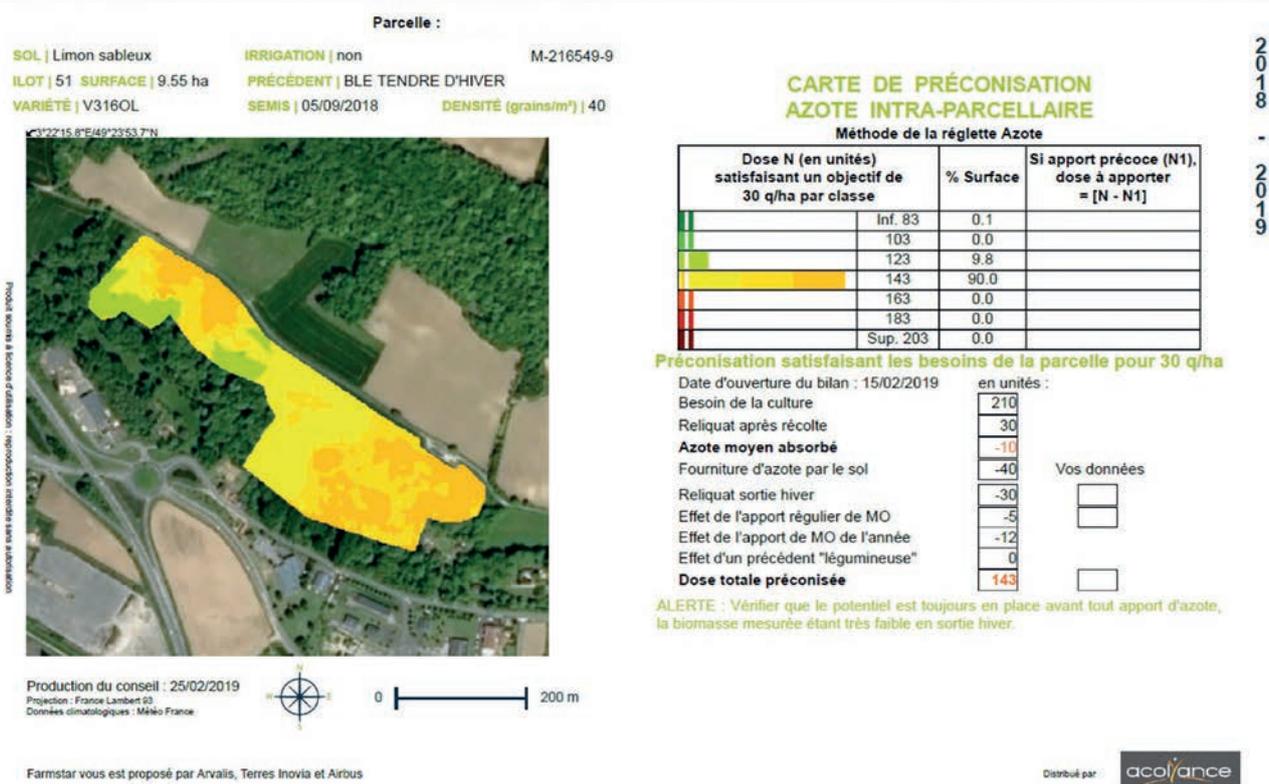


Figure 4 : Carte de préconisation d'apport d'azote au niveau intra-parcellaire.

la pente de l'innovation, devra tenir compte des avancées à la fois techniques et technologiques du monde agricole, des nouvelles réglementations et des attentes des producteurs, tout en conservant une rentabilité économique suffisante pour garantir sa pérennité, cela passera par la construction de nouveaux services.

**Bibliographie**

BRISSON N., GATE P., GOUACHE D., CHARMET G., OURY F. X. & HUARD F. (2010), "Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France", *Field Crops Research* 119 (2010), pp. 201-212.

GATE P. (1995), *Écophysologie du blé : de la plante à la culture*, Lavoisier Éditeur, 424 pages.

BLONDOT A., GATE P. & POILVÉ H. (2005), "Providing operational nitrogen recommendations to farmers using satellite imagery", *Precision Agriculture* 05, edited by J. V. STAFFORD, pp. 345-352 (5<sup>th</sup> European Conference on Precision Agriculture, Uppsala, June 9<sup>th</sup>-12<sup>th</sup>).

FOURTY T. & BARET F. (1997), "Vegetation water and dry matter contents estimated from top of the atmosphere reflectance data: a simulation study", *Remote Sensing of Environment* 61, pp. 34-45.

JACQUEMOU S., BACOUR C., POILVÉ H. & FRANGI J.-P. (1999), "Comparison of Four radiative Transfer Models to Simulate Plant Canopies Reflectance – Direct and Inverse Mode", *Remote Sensing of Environment* 74, pp. 471-481.

JACQUEMOU S. & BARET F. (1990), "PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra", *Remote Sensing of Environment* 34, pp. 75-91.

MACHET J.-M., DUBRULLE P. & LOUIS P. (1990), "Azobil: a computer program for fertilizer N recommendations based on a predictive balance sheet method", *Proceedings 1<sup>st</sup> European Society for Agronomy Congress*, Paris, Session 2, p. 21.

VERHOEF W. (1984), "Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model", *Remote Sensing of Environment* 16, pp. 125-141.

SOENEN B., CLOSSET M., BONNARD A. & LEBRIS X. (2017), « Le pilotage de l'azote sur blé dans le service Farmstar », Colloque Phloème, *actes du congrès*, 24 et 25 janvier 2018, Cité des Sciences et de l'Industrie, Paris.

DUVAL-FLEURY A. D. & LAURENT F. (2009), « Farmstar : bilan du service à l'horizon 2010 », *Perspectives agricoles*, 361, novembre 2009.

BAUDART C., BLONDOT A. & DOUCHE H. (2008), « Farmstar : la précision des satellites pour piloter les cultures », *Perspectives agricoles*, 349, octobre 2008.

JUSTES E., MARY B., MEYNARD J.-M., MACHET J.-M. & THELIER-HUCHE L. (1994), "Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops", *Annals of Botany* 74, pp. 397-407.

# L'utilisation des services cartographiques numériques d'urgence par satellite à des fins de sécurité intérieure

Par Stéphanie BATTISTON, Stephen CLANDILLON et Robin FAIVRE

ICube-SERTIT

Claire TINEL

CNES

et Annett WANIA

JRC

Les satellites d'observation de la Terre ont démontré depuis de nombreuses années leur potentiel pour la gestion des catastrophes naturelles, industrielles ou des crises humanitaires. Des services de cartographie numérique d'urgence se sont développés pour fournir de l'information géographique basée sur l'imagerie spatiale aux acteurs chargés de la prévention des risques, de la gestion de crise et de la reconstruction. Aujourd'hui, plusieurs dispositifs sont opérationnels et apportent régulièrement un soutien aux services de sécurité civile, aux organisations humanitaires, aux compagnies d'assurance ou aux acteurs locaux. La Charte Internationale « Espace et catastrophes majeures » permet de mobiliser les ressources satellites pour répondre aux besoins de la gestion de crise lors de catastrophes majeures, partout dans le monde. Le dispositif européen Copernicus Emergency Management Service (EMS) offre, quant à lui, à la demande, des cartographies en support aux opérations de gestion de crise, de prévention, de mitigation et de relèvement. Des initiatives régionales sont également en train de se développer. La France est un pionnier et un acteur majeur dans ce domaine, tant par les actions initiées par son agence spatiale, le CNES, que par l'implication de la Sécurité civile et l'investissement du service de cartographie rapide strasbourgeois d'ICube-SERTIT.

Le domaine de l'observation de la Terre ne cesse d'évoluer en faveur d'une utilisation de la cartographie numérique d'urgence à des fins de sécurité intérieure. Si les services de sécurité civile en sont les principaux utilisateurs pour la conduite de leurs opérations de gestion de crise, d'autres acteurs commencent à intégrer cette technologie dans leurs plans d'action.

**D**epuis près de vingt ans, les satellites d'observation de la Terre démontrent leur potentiel en matière de gestion des catastrophes naturelles, industrielles ou des crises humanitaires. Des services de cartographie numérique d'urgence se sont développés pour fournir de l'information géographique basée sur l'imagerie spatiale aux acteurs de la prévention des risques, de la gestion de crise et de la reconstruction. Aujourd'hui, plusieurs dispositifs sont opérationnels et apportent régulièrement un soutien aux services de sécurité civile, aux organisations humanitaires, aux compagnies d'assurance ou aux

acteurs locaux. La France est un pionnier et un acteur majeur dans ce domaine, tant par les actions initiées par le CNES que par l'implication du COGIC (Centre opérationnel de gestion interministériel de crise) et l'investissement du service de cartographie rapide d'ICube-SERTIT.

## Observation de la Terre et cartographie numérique d'urgence

### **Des satellites pour observer les catastrophes**

Parmi la multitude de satellites en orbite autour de la Terre,

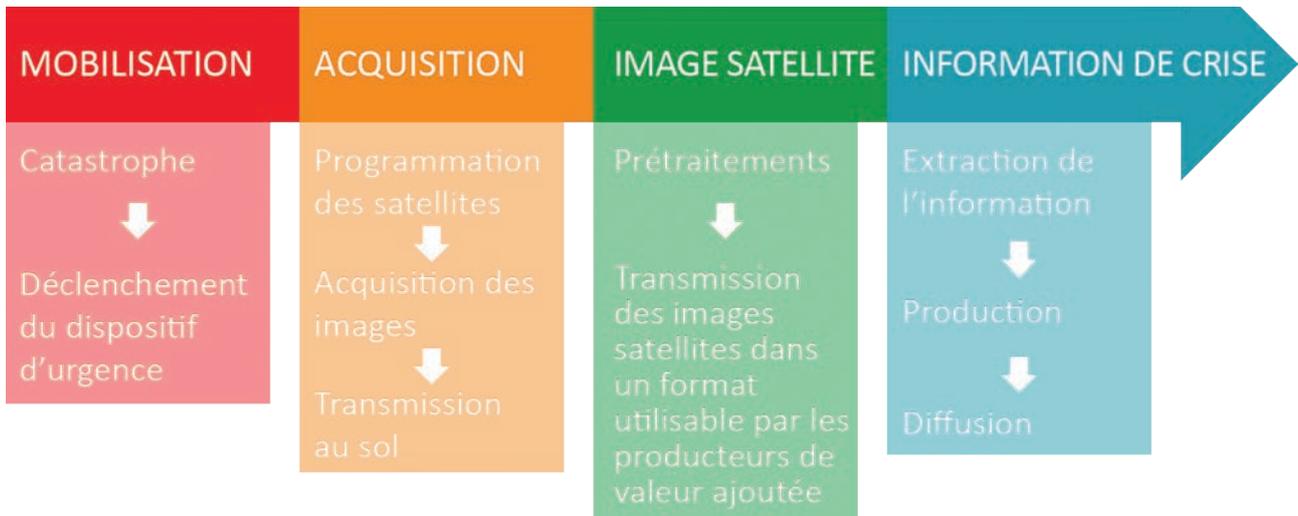


Figure 1 : Les principales étapes de la cartographie rapide (© ICube-SERTIT).

nombre d'entre eux sont dédiés à son observation. Qu'ils délivrent des images optiques ou radar, ils permettent de mettre en évidence l'impact des catastrophes et de suivre leur évolution. Le nombre important des satellites opérationnels et les évolutions technologiques constantes permettent d'obtenir sur plusieurs jours des images d'un même secteur, de jour comme de nuit, et d'imager de vastes zones, y compris les plus inaccessibles, à des précisions allant jusqu'à quelques dizaines de centimètres. Inondations, feux de forêts, séismes ou cyclones, tous sont traqués par l'œil des satellites, comme les derniers-nés des satellites français composant la constellation Pléiades du CNES et auxquels il est très souvent fait appel pour la gestion des catastrophes.

### La cartographie rapide satellitaire pour la gestion de crise et des risques

Afin de transformer les images satellites en géo-informations utiles et exploitables par les acteurs de la gestion de crise et des risques, des services de cartographie numérique d'urgence se sont développés en France, en Europe et dans le reste du monde. La cartographie rapide consiste à produire de l'information géographique à partir d'images spatiales en un temps restreint. Outil d'aide à la décision pour l'ensemble des phases de gestion du risque (prévention, crise, reconstruction), les géo-informations qui en sont dérivées sont complémentaires des observations faites sur le terrain et de la modélisation. Les informations produites durant la phase de crise sont souvent utiles pour la prévention, mitigation et le relèvement, en contribuant au retour d'expérience et à la mémoire du risque. La cartographie rapide satellitaire est construite sur la base d'un système qui se décompose en quatre phases :

- sollicitation du service de cartographie d'urgence par un acteur de la gestion de crise, appelé « utilisateur autorisé » ;
- commande d'images satellites d'archive et/ou programmation de satellites en mode urgent par l'opérateur de cartographie rapide ;

- livraison accélérée des images satellites par les fournisseurs de données ;
- traitement d'images et/ou photo-interprétation en quelques heures pour extraction, production et diffusion de géo-informations de crise par l'opérateur de cartographie rapide à destination de l'utilisateur autorisé.

Il est préférable que tous les acteurs et composantes du système soient opérationnels 24 heures sur 24/7 jours sur 7 (24/7) afin de pouvoir délivrer des géo-informations en un minimum de temps (de quelques heures à quelques jours). Ces informations sont livrées sous forme de cartes numériques et de couches vectorielles intégrables dans les systèmes d'information géographique (SIG) des utilisateurs.

### Des dispositifs opérationnels en support à la gestion de crise

Plusieurs dispositifs d'acquisition satellite et de cartographie d'urgence dédiés à la gestion de crise sont aujourd'hui opérationnels. D'autres, consacrés aux phases de prévention, de mitigation et de reconstruction, viennent les compléter. Les services présentés ci-après sont régulièrement sollicités par les acteurs français de la gestion de crise et des risques.

### La Charte internationale « Espace et catastrophes majeures »

La Charte internationale vise à offrir un système unifié d'acquisition et de fourniture de données satellites à la suite de catastrophes d'origine naturelle ou humaine, pour répondre aux besoins d'« utilisateurs autorisés » (entités ayant un mandat national de gestion des risques, Nations Unies, etc.) lors de situations de crise. Chacune des agences spatiales signataires de la Charte s'engage, dans le cadre de celle-ci, à fournir gratuitement les ressources nécessaires à la gestion d'une crise ; cela inclut l'astreinte pour la programmation des satellites, les programmations des moyens spatiaux disponibles, la fourniture des données acquises et, éventuellement, celle des géo-informations et services associés.

Née en 1999 à l'initiative du CNES et de l'ESA, la Charte voit le nombre de ses participants porté aujourd'hui à dix-sept agences spatiales dans le monde (<https://www.disasterscharter.org>). Depuis 2000, elle a été déclenchée près de six cents fois et plus de cent vingt pays en ont déjà bénéficié. En moyenne (sur la période 2007-2012), la Charte a été activée chaque année pour une quarantaine de catastrophes.

La Charte ne prévoit pas de production systématique d'informations géographiques. Cependant, les membres de la Charte ou des institutions internationales associées sollicitent fréquemment des services de cartographie d'urgence, à l'instar d'UNOSAT, ou d'ICube-SERTIT, avec le soutien du CNES, pour les besoins du COGIC. Les produits essaient de couvrir au maximum l'événement et de s'adapter aux besoins des utilisateurs.

### Copernicus Emergency Management Service (EMS)

EMS est l'un des principaux services du programme européen Copernicus : il fournit gratuitement de l'information géographique (dérivée principalement d'images satellites) pour la gestion des risques et des crises liés aux événements d'origine naturelle ou humaine survenant partout dans le monde. Ce service, géré par le JRC (*Joint Research Centre* – en français, le Centre commun de recherche (CCR)) de la Commission européenne, dispose

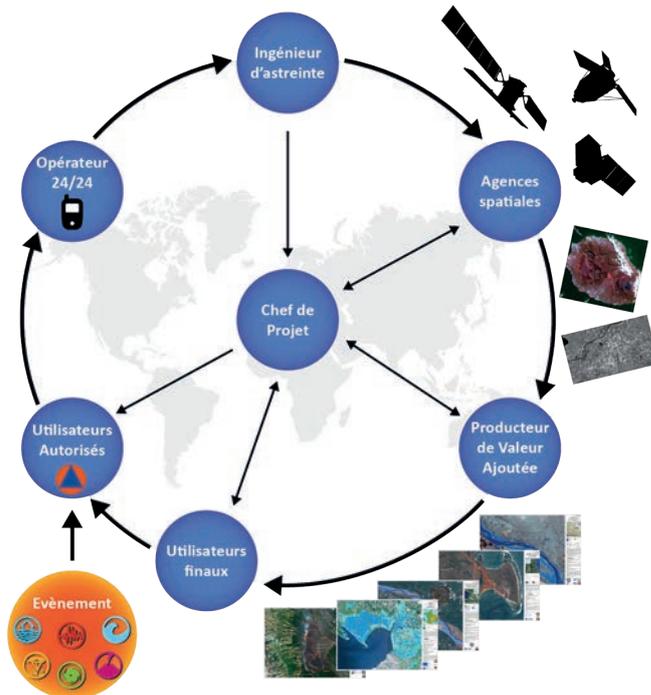


Figure 2 : Mécanisme de déclenchement de la Charte (©2019 Charte internationale).

de deux composantes couvrant l'ensemble du cycle du risque (<https://emergency.copernicus.eu>).

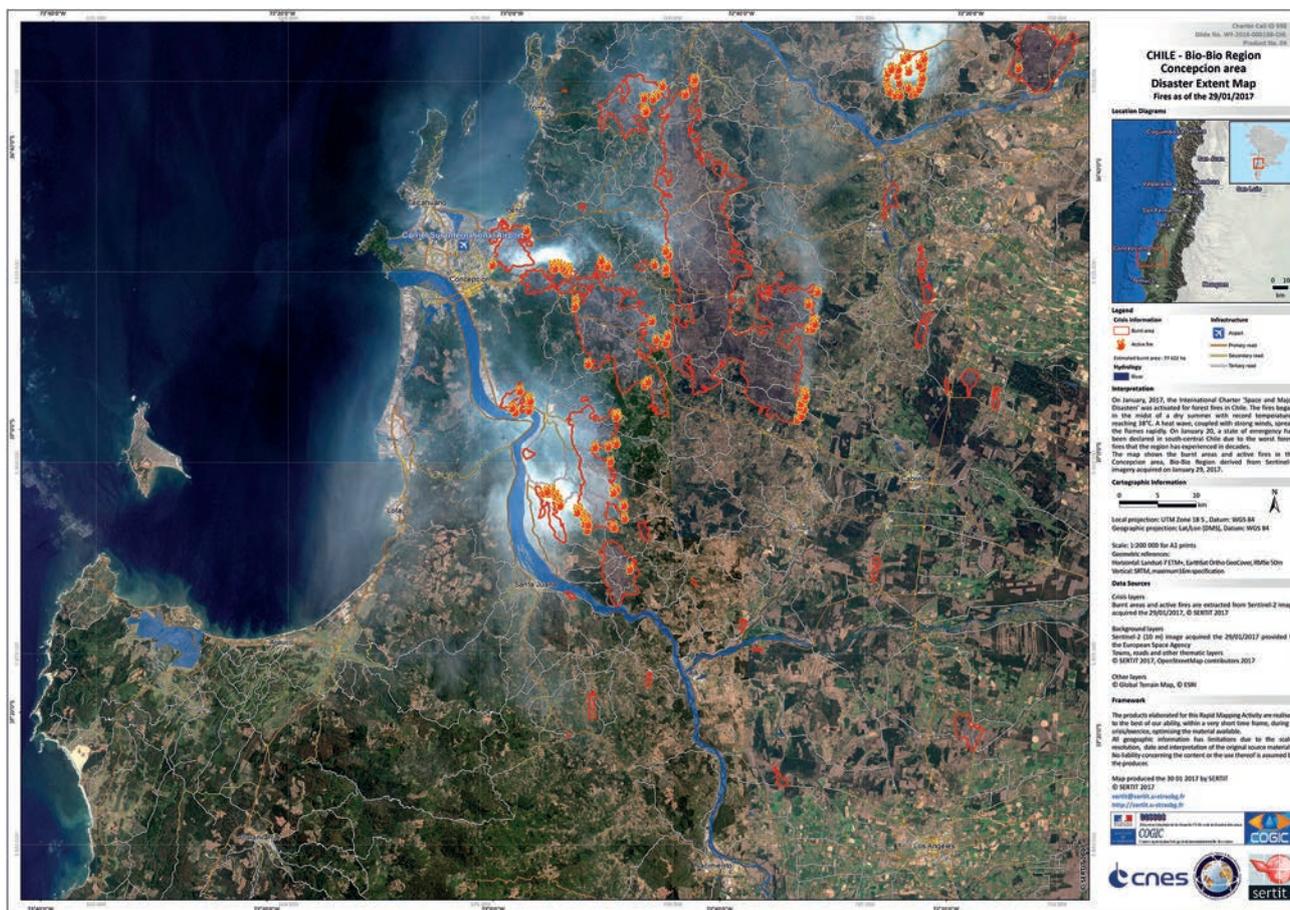


Figure 3 : Carte restituant la propagation des incendies ayant touché le Chili, en 2017. Elle a été élaborée à partir de données Sentinel-2 (©ESA, analyse et traitement d'image réalisé par ICube-SERTIT, 2017).

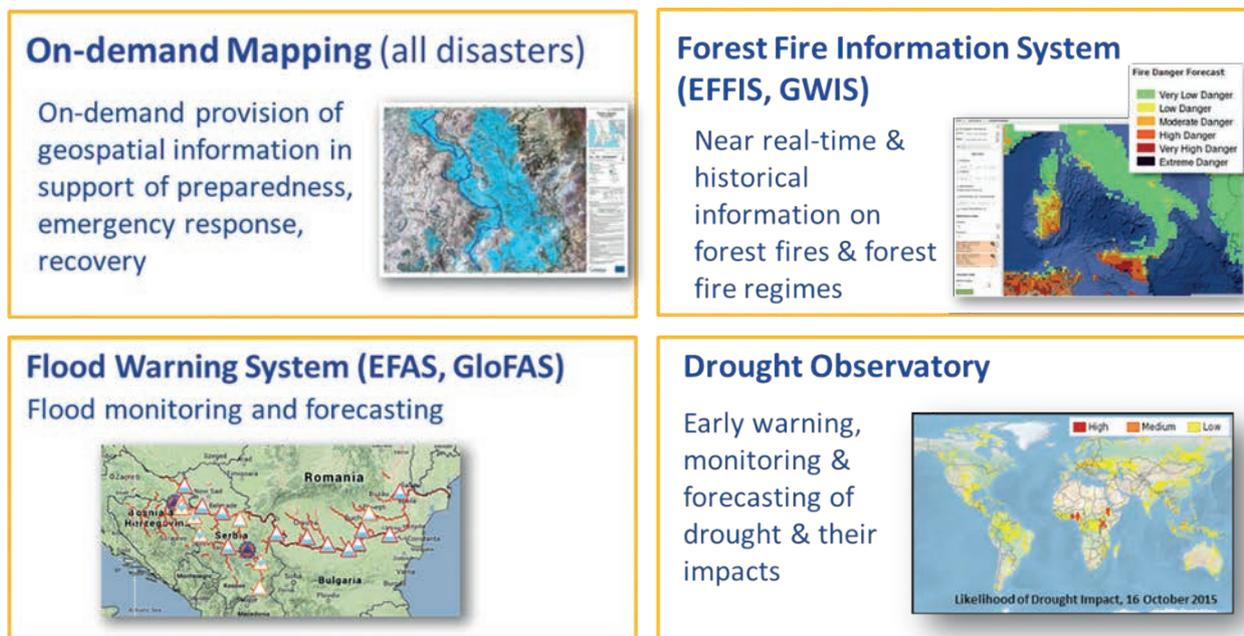


Figure 4 : Les différentes composantes de Copernicus Emergency Management Service (©UE, 2012-2019).

- Early Warning and Monitoring est le volet dédié à l'alerte et à la surveillance : il fournit en continu de l'information sur les inondations en cours et potentielles (EFAS, GloFAS), sur les feux de forêts en temps quasi réel ou sur des feux historiques (EFFIS, GWIS), et des alertes en cas de sécheresse (EDO, GDO).
- EMS-Mapping est consacré à la cartographie sur demande : il délivre des géo-informations en support à la gestion de crise (Rapid Mapping – RM) et à la prévention, à la mitigation et au relèvement (Risk and Recovery Mapping – RRM). Il peut être sollicité par des « utilisateurs autorisés » (le service européen de sécurité civile – ERCC, les services de sécurité civile des États membres – comme le COGIC en France, et autres services de l'Union européenne). Des utilisateurs associés (entités publiques locales, régionales, organisations internationales, ONG) peuvent également y avoir accès par l'intermédiaire des utilisateurs autorisés. Toute demande d'activation passe par l'ERCC qui, après autorisation, la transmet au prestataire de services qui définit le plan de travail, commande les images satellites nécessaires et prépare les produits finaux. EMS-Mapping dispose de son propre système de fourniture urgente de données satellites, mis à disposition par l'ESA.

### Copernicus EMS Rapid Mapping, au service de la gestion de crise

Le service RM fournit de l'information géospatiale dans les heures et jours qui suivent son déclenchement par un utilisateur autorisé en support aux activités de gestion de crise lors de la survenue d'une catastrophe (inondations, séismes, incendies, tempêtes, etc.). Il est opérationnel 24/7 et offre des produits standardisés, tels que des cartographies de référence, des cartographies restituant l'extension d'un événement ou l'intensité des dommages occasionnés. Depuis la création du service, en 2012, le nombre de ses activations a considérablement augmen-

té : EMS RM a ainsi été activé 74 fois en 2018 contre 22 la première année, avec plus de 4 500 produits cartographiques réalisés au total. RM est le service de Copernicus EMS qui est le plus fréquemment sollicité, en particulier pour le suivi d'inondations, tempêtes, séismes et incendies. Le service a notamment été sollicité lors du séisme d'Amatrice en 2016, du cyclone Irma en 2017, des inondations dans l'Aude en 2018, et des deux tsunamis qui ont frappé l'Indonésie en 2018.

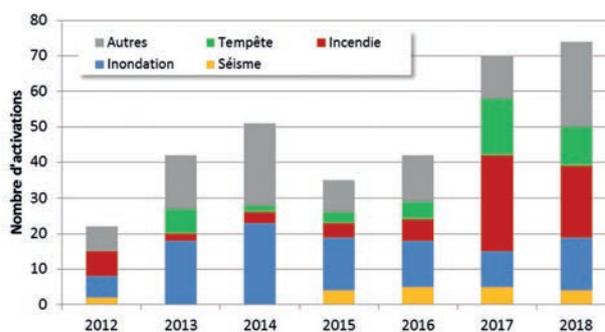


Figure 5 : Nombre des activations Copernicus EMS RM par an, sur la période 2012-2018 (©UE, 2012-2019).

Le délai pour obtenir la livraison d'un premier produit de crise est en moyenne de 48 heures après la demande de l'utilisateur. L'acquisition de l'image représente 80 à 90 % de ce délai. Bien que la programmation des satellites et l'acquisition des images soient optimisées, ce sont les systèmes d'alerte précoce qui permettent un déclenchement du dispositif au plus près de l'événement et donc de réduire ce délai jusqu'à quelques heures. Copernicus EMS intègre ce principe avec les systèmes EFAS/GloFAS pour l'alerte inondation et GDACS pour les séismes, tsunamis, éruptions volcaniques et tempêtes tropicales. Une alerte EFAS ou GDACS peut déclencher des acquisitions satellites anticipées. Il est aussi envisagé d'encourager les



Figure 6 : Carte des inondations de janvier 2018 dans le secteur de Romilly-sur-Seine (département de l'Aube). (Copernicus EMS © 2018 UE, [EMSR265]).

fournisseurs de données satellites à acquérir de manière systématique et proactive des images lorsque le système GDACS indique qu'une catastrophe majeure est sur le point de se produire ou a déjà eu lieu.

### Coopération entre dispositifs et acteurs internationaux

Pour optimiser l'utilisation des ressources satellites, éviter une redondance des activités, standardiser les procédures et produits et donc maximiser l'efficacité des différents dispositifs, une coopération entre les acteurs et les services de cartographie d'urgence est nécessaire. La Charte internationale et Copernicus EMS RM collaborent de plus en plus, le premier dispositif assurant généralement la fourniture des images satellites, et le second la production cartographique. Cette collaboration impacte indirectement d'autres dispositifs ou acteurs internationaux, tels que Sentinel Asia et UNOSAT, et permet une répartition des secteurs d'intérêt à couvrir lors des gros événements. De nombreux acteurs du domaine travaillent sur l'ensemble de ces aspects par le biais d'un groupe de travail, l'IWG-SEM, qui établit des lignes directrices dans le domaine de la cartographie d'urgence et encourage l'échange systématique d'informations pour faciliter la collaboration entre les dispositifs internationaux lors de catastrophes majeures. Cet échange d'informations se concrétise notamment à travers la publication de flux GeorSS indiquant que tel dispositif est actif sur tel évé-

nement et sur telle zone ; et bientôt détaillant les analyses en cours (zone analysée, satellites programmés).

### L'implication de la France aux niveaux européen et international

Pionnière dans le domaine de la cartographie rapide, il y a plus de vingt ans, la France en reste aujourd'hui un moteur important. Le CNES s'investit fortement dans la Charte internationale ainsi que dans la coopération avec les autres dispositifs, s'assurant notamment de leur complémentarité. Il a aussi permis la mise en orbite de nombreux satellites d'observation de la Terre, dont les images sont distribuées par Airbus DS et utilisées pour la gestion des risques et des crises. Le CNES et l'ESA ont également impulsé la création du concept de valeur ajoutée par le service strasbourgeois d'ICube-SERTIT, en collaboration avec la Sécurité civile française. Ces acteurs français du spatial et de la gestion de crise ont par la suite participé à de nombreux projets européens qui ont posé les bases du service opérationnel Copernicus EMS RM. Aujourd'hui, ICube-SERTIT est le service de cartographie rapide français chargé de couvrir les besoins nationaux dans le cadre de la Charte internationale, avec le soutien du CNES ; il est aussi l'opérateur du dispositif Copernicus EMS (RM, RRM, EFFIS), avec d'autres entités européennes, dont la PME française SIRS. La Sécurité civile française est également un acteur clé de ce domaine, puisque cet utilisateur expérimenté et exigeant n'a jamais cessé de faire

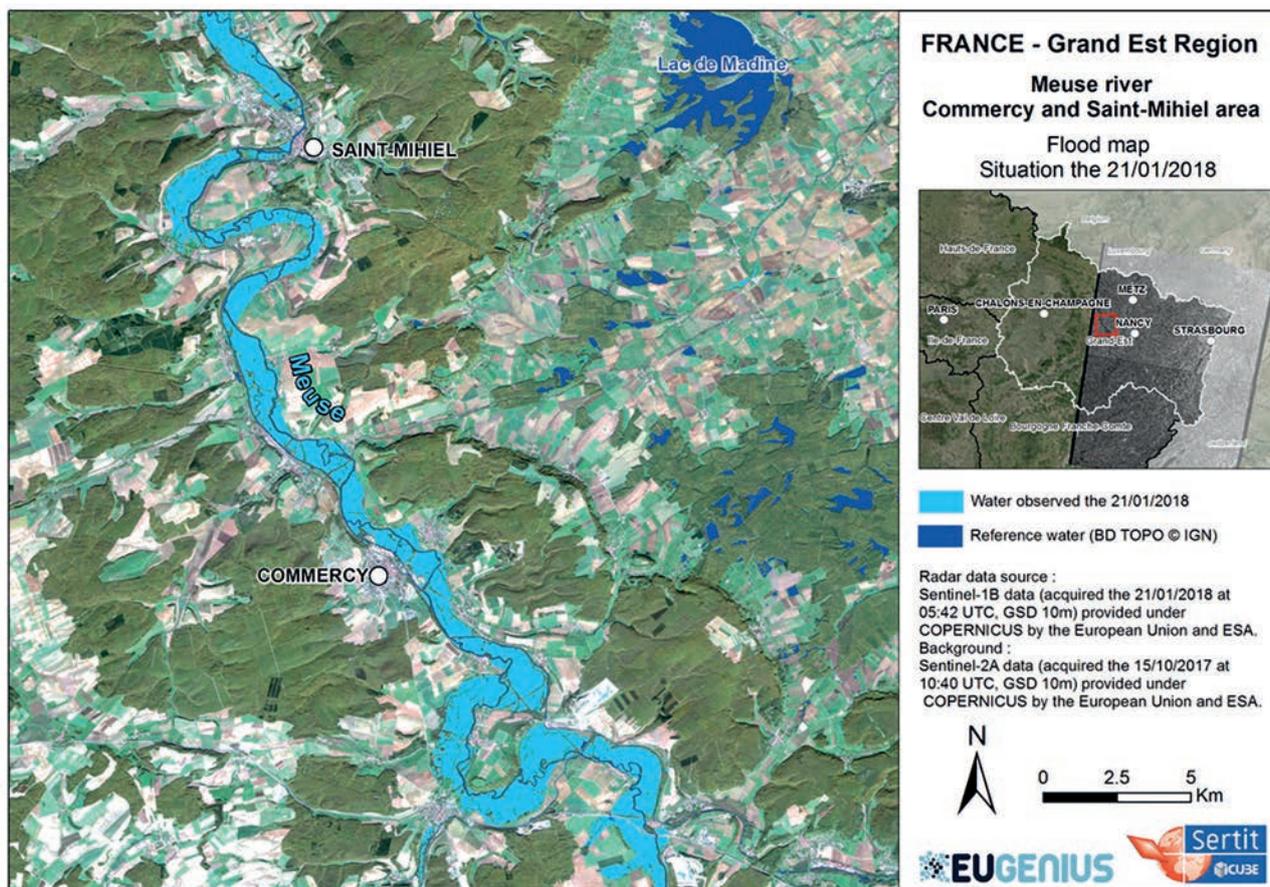


Figure 7 : Carte de l'extension des inondations de la Meuse en 2018 (©2018 ICube-SERTIT, EUGENIUS).

appel aux services de cartographie d'urgence et d'accompagner leur évolution, et ce depuis leurs prémices.

### Les initiatives régionales en France

En cas d'événements d'ampleur modérée, les dispositifs internationaux ne sont pas toujours déclenchés, mais le besoin en géo-informations de crise reste bien présent pour certains acteurs. Un service de cartographie rapide des inondations régionales a ainsi été mis en place par ICube-SERTIT dans le cadre du projet H2020 EUGENIUS pour les acteurs locaux et régionaux de la région Grand Est. Lors des inondations de janvier 2018, un suivi de l'événement a été réalisé sur plusieurs jours, débouchant sur une cartographie de l'extension maximale des inondations, de leur impact et de la durée de submersion, élaborée à l'attention de la DREAL, des DDT et du SPC. Ces derniers ont souligné le fort bénéfice de ces produits en support à leurs missions de gestion des risques et des territoires. Une initiative similaire est en cours de développement dans le nord de la France, en collaboration avec le Cerema, pour le compte du SYMSAGEL.

### Le marché de l'assurance

Les assureurs, réassureurs, courtiers et modélisateurs sont aussi de grands utilisateurs de la cartographie d'urgence satellitaire, en particulier lors d'inondations et de tempêtes. Cette technologie leur permet de disposer rapidement d'une évaluation économique des dommages et du montant approximatif des indemnités à verser. L'ou-

ragan Irma en 2017 a particulièrement démontré l'intérêt de la collaboration entre spatial et assurance, lorsque la cartographie rapide des dommages occasionnés sur l'île de Saint-Martin a pu être réalisée pour la Caisse centrale de réassurance (CCR), quelques jours après le passage de l'ouragan.

### Dispositifs pour la gestion des risques

#### Copernicus EMS Risk and Recovery Mapping (RRM), pour la prévention et la reconstruction

Le dispositif RRM fournit des géo-informations en support à la gestion des risques, lors des phases de prévention, de mitigation et de relèvement. Il a été sollicité deux fois suite aux fortes pluies de mai/juin 2016 ayant affecté la métropole (activations EMSN028 et EMSN035), et une troisième fois suite au passage de l'ouragan Irma en septembre 2017 sur les COM antillaises (EMSN049).

Ce même dispositif a également permis de cartographier l'étendue des inondations de la Seine et du Loing en juin 2016, à la demande du MTES et du Cerema. À partir de ces observations, une cartographie de l'extension maximale potentielle de la crue a été réalisée, ainsi que celle de la profondeur en eau. L'impact des inondations sur l'occupation du sol a également été évalué. Cette étude a été également réalisée sur l'Indre, le Cher et la Loire à la demande de la DRAAF pour le même événement ; les résultats incluent la cartographie de l'impact économique potentiel pour chaque type de culture.



Figure 8 : Carte des bâtiments de l'île de Saint-Martin endommagés par l'ouragan Irma en 2017 (©2017 ICube-SERTIT, CNES, CCR).

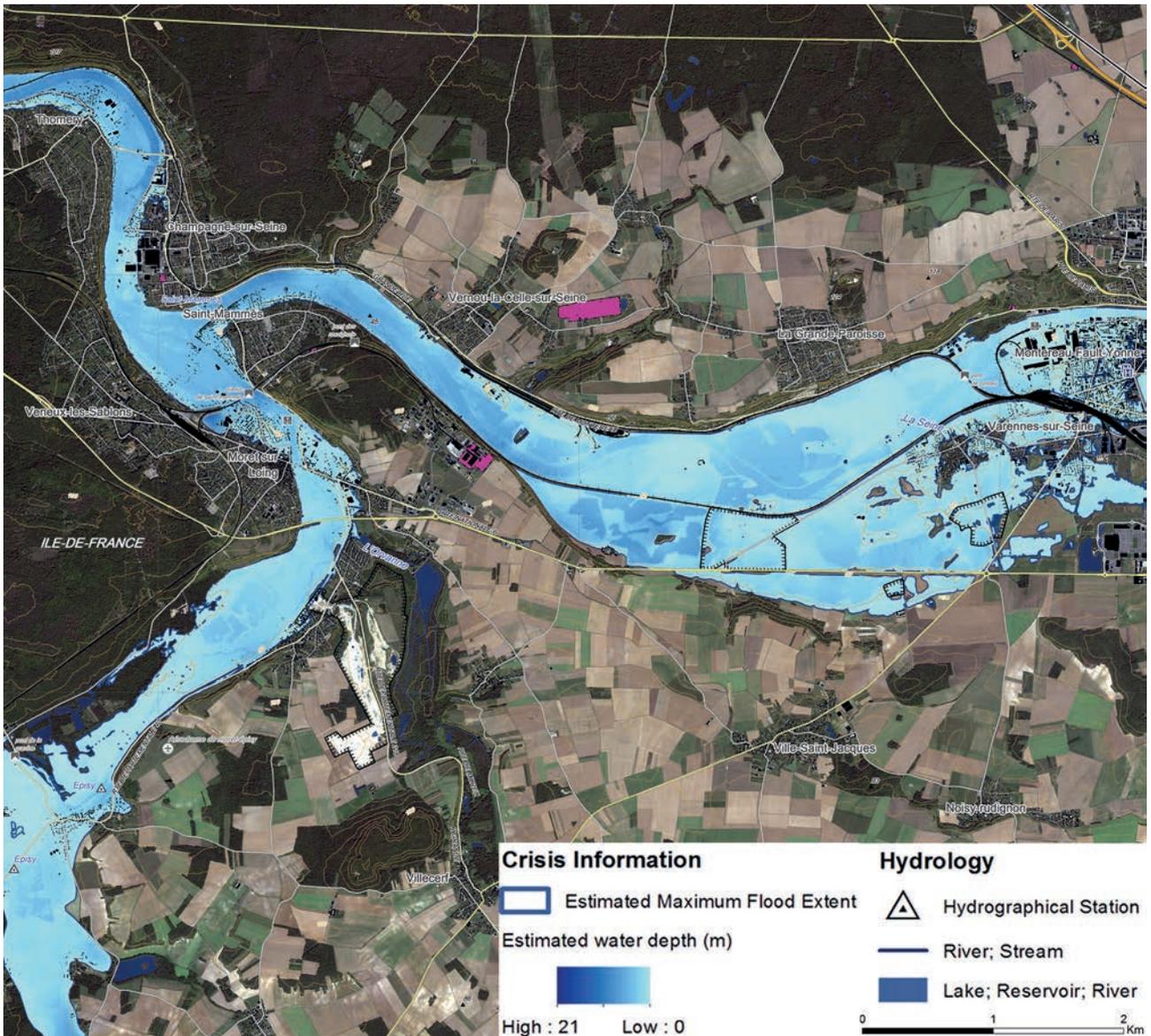


Figure 9 : Carte des profondeurs en eau estimées à la confluence de l'Yonne et du Loire lors des inondations de 2016 (Copernicus EMS ©2016 EU, [EMSN028]).

Depuis 2018 (et encore pendant deux ans), le service RRM fournit un suivi de la reconstruction sur les îles de Saint-Martin et de Saint-Barthélemy afin d'accompagner les autorités dans la gestion du relèvement post-Irma. La fréquence d'observation mensuelle, la première année, est aujourd'hui trimestrielle.

### Recovery Observatory, une initiative internationale pour la reconstruction

Depuis 2014, le groupe « Disasters » du CEOS travaille sur les moyens d'accroître la contribution des données satellitaires à la compréhension et à la gestion d'événements catastrophiques, notamment lors de la phase de reconstruction (*recovery*).

Le CNES et le GFDRR y animent une équipe « Recovery Observatory » (ROOT), composée de fournisseurs d'images satellitaires, d'organisations chargées de la reconstruction et de fournisseurs de géo-informations à base d'images satellites. Suite au passage de l'ouragan Matthieu sur Haïti en octobre 2016, le CEOS a officiellement déclenché le Recovery Observatory (RO) sur la péninsule sud-ouest d'Haïti. Le RO a été mis en place début 2017 pour une durée de quatre ans afin de suivre la reconstruction des zones urbaines et de l'habitat rural, déterminer l'impact de l'ouragan sur les activités agricoles et suivre la réhabilitation environnementale, au bénéfice des autorités haïtiennes et en lien étroit avec WB, UNDP et l'UE.

### Conclusion

L'observation de la Terre ne cesse d'évoluer en faveur de l'utilisation de la cartographie numérique d'urgence à des fins de sécurité intérieure. En effet, la multiplication du nombre de satellites toujours plus performants, l'arrivée des microsatsellites et la collaboration entre dispositifs (EMS-Charte) et systèmes (EMS-GDACS) existants permettent d'accroître l'offre de services à destination des acteurs de la gestion de crise et des risques, avec toujours plus de flexibilité. La commande et la livraison des images satellites sont de plus en plus rapides, tout comme la production de géo-informations, laquelle est de plus en plus automatisée.

La cartographie d'urgence est principalement utilisée en support à la gestion de crise, mais son usage se développe de plus en plus en soutien aux autres phases du cycle du risque. Ainsi, même si les services de Sécurité civile restent les principaux utilisateurs de cette technologie, les acteurs du secteur environnemental sont de plus en plus nombreux à commencer à l'intégrer dans leurs plans d'action, et ce d'autant plus que les informations produites lors de la survenue d'une crise sont utiles pour la mitigation et la reconstruction. Les dispositifs actuels permettent également de couvrir des besoins opération-

nels transnationaux et nationaux, et de plus en plus aux échelles régionale et locale.

### Glossaire

CEOS : Committee on Earth Observation Satellites

CNES : Centre national des études spatiales

COGIC : Centre opérationnel de gestion interministériel des crises

COM : Communauté d'Outre-mer

DDT : Direction départementale des Territoires

DRAAF : Direction régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt

DREAL : Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

EDO : European Drought Observatory

EFAS : European Flood Awareness System

EFFIS : European Forest Fire Information System

EMS : Emergency Management Service of Copernicus

ERCC : Emergency Response Coordination Centre

ESA : European Space Agency

GDACS : Global Disaster Alert and Coordination System

GFDRR : Global Facility for Disaster Reduction and Recovery

GDO : Global Drought Observatory

GloFAS : Global Flood Awareness System

GWIS : Global Wildfire Information System (une initiative globale soutenue par Copernicus et la NASA)

IWG-SEM : International Working Group on Satellite Emergency Mapping

JRC : Joint Research Center

MTES : Ministère de la Transition écologique et solidaire

ROOT : Recovery Observatory Oversight Team

SIG : Systèmes d'information géographiques

SPC : Service de prévision des crues

SYMSAGEL : Syndicat mixte pour le SAGE de la Lys

UNDP : United Nations Development Program

UNOSAT : UNITAR's Operational Satellite Applications Programme

WB : World Bank group

# Observatoire de la Dynamique Côtère de Guyane : la carte interactive, un outil au service d'une gestion durable des littoraux guyanais

Par Julie FURIGA

Chargée de mission à l'Observatoire de la Dynamique Côtère de Guyane

Le littoral de la Guyane française se caractérise par une dynamique sédimentaire et géomorphologique unique au monde, sous l'effet de la migration de bancs de vase. Afin de favoriser le recensement, la création et la diffusion des connaissances à son sujet, la DEAL et le BRGM ont initié la mise en place d'un Observatoire de la Dynamique Côtère de Guyane (ODyC), en 2014. Conformément aux attentes de la Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte, l'ODyC rend publiques l'ensemble des données collectées en la matière. Des outils modernes, tels qu'un site Internet et une base de données documentaire, ont été déployés. Depuis septembre 2018, une carte interactive accessible *via* le portail GéoGuyane poursuit l'objectif de fédérer l'ensemble des partenaires travaillant sur la bande côtière. L'ODyC s'affirme ainsi à travers ces outils venant en appui d'une gestion durable des littoraux de la Guyane.

« Riche de sa diversité, le littoral français constitue un territoire attractif concentrant sur un périmètre relativement étroit une population de plus en plus grande. Or, les différentes tempêtes qu'ont connues nos côtes ces dernières années ont conduit à une prise de conscience de leur évolution et, en particulier, de l'érosion qu'elles subissent ». C'est ainsi que la ministre de l'Environnement de l'époque, Ségolène Royal, introduisit la Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte de 2017.

Afin d'approfondir les connaissances sur le fonctionnement du littoral et adapter les politiques publiques à une gestion raisonnée de ces espaces, des observatoires du trait de côte ont été développés en France. Tout comme la mobilisation des acteurs locaux, la diffusion des données est un objectif essentiel. C'est le rôle qui incombe à l'Observatoire de la Dynamique Côtère de Guyane lequel concentre les savoirs disponibles sur le littoral guyanais, l'un des plus dynamiques au monde. Les bancs de vase qui migrent impactent fortement son fonctionnement en dépit des biens et des activités qui y sont présents. Au moyen d'une carte interactive, complétée d'une base de données documentaire et d'un site Internet, l'ODyC rend publiques l'ensemble des informations acquises.

## L'Observatoire de la Dynamique Côtère de Guyane : objectifs et fonctionnement

### Mise en place de la Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte en Guyane

En 2009, la France s'engage dans la conception d'une politique nationale de gestion de la bande côtière (MEDD, 2009). Pour faire face aux enjeux du littoral, va naître des réflexions d'un groupe de travail<sup>(1)</sup>, la « Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte, vers la relocalisation des activités et des biens ». Les principes d'une gestion raisonnée et durable y sont établis. Les ambitions sont de renforcer la connaissance et de favoriser la mise en place de politiques locales. La stratégie englobe les potentiels de recomposition spatiale de l'ensemble des sites littoraux français, aussi bien métropolitains qu'ultramarins (MEDTL, 2011). Les dispositifs innovants testés et les retours d'expérience ont permis d'enrichir le nouveau programme d'action 2017-2019.

(1) Présidé par Alain Cousin et composé de cinq collèges.

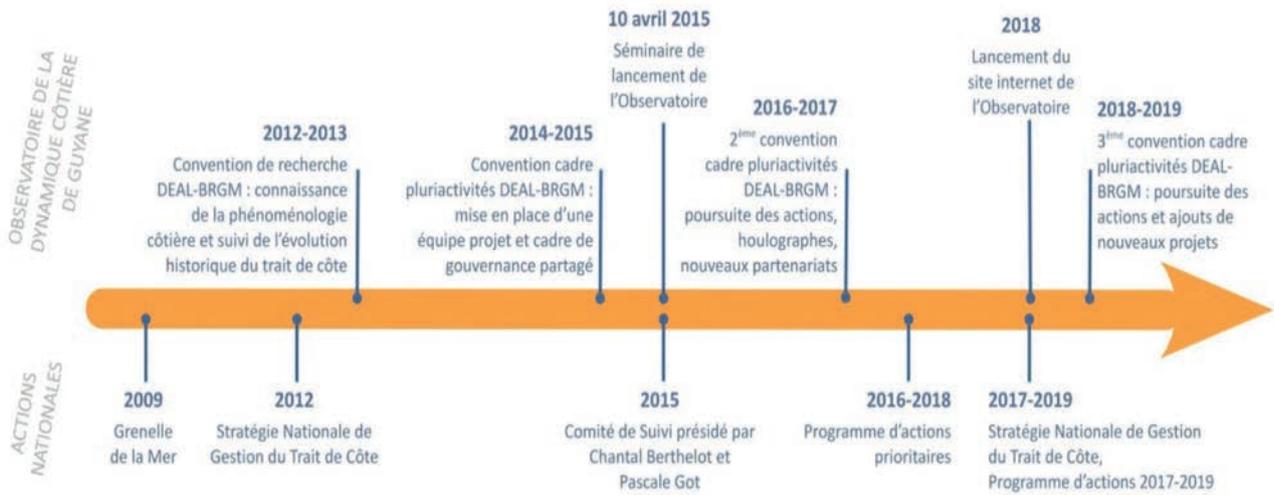


Figure 1 : Parallèle entre les actions nationales pour la gestion du trait de côte et le développement de l'ODyC en Guyane.

Au cœur de la Stratégie s'inscrit la création d'un « réseau d'observation et de suivi de l'évolution du trait de côte, s'appuyant sur les acteurs régionaux ». Ces observatoires<sup>(2)</sup> se doivent d'acquiescer des données locales relatives au trait de côte, afin d'analyser les variations observées pour comprendre et prévoir l'évolution de celui-ci (Garcin, 2010). De plus, ils recensent et diffusent ces informations dans le but d'accompagner les politiques publiques.

Dans un contexte de changement climatique et d'élévation du niveau de la mer, la Guyane doit faire face à des enjeux d'aménagement et à des besoins spécifiquement identifiables en termes d'aide à la décision. La direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DEAL), conjointement avec le Bureau de Recherches géologiques et minières (BRGM), a initié la mise en place, en 2014, de l'Observatoire de la Dynamique Côtière. Le territoire guyanais s'est ainsi doté d'un outil pérenne d'observation de son littoral, avec des méthodologies de suivis adaptées au contexte local. Il s'agit également de fédérer les acteurs et de sensibiliser le grand public.

### Le jeu d'acteur : le cœur de vie de l'ODyC

La Guyane française bénéficie de l'existence sur son territoire d'importantes compétences scientifiques et d'ingénierie du littoral. Les collectivités sensibles aux questions de connaissance et de gestion de la bande côtière se sont naturellement jointes à la démarche. Cette diversité d'acteurs tend à apporter un gage de qualité et d'excellence scientifique.

Par analogie à des dispositifs déjà existants, la gouvernance de l'ODyC s'appuie sur un processus de décision structuré par :

- un comité de pilotage : composé des opérateurs techniques et des collectivités, il identifie les orientations stratégiques ;
- un comité scientifique chargé d'assurer la validité des données et d'approuver les choix stratégiques en lien avec les enjeux scientifiques et les problématiques locales ;

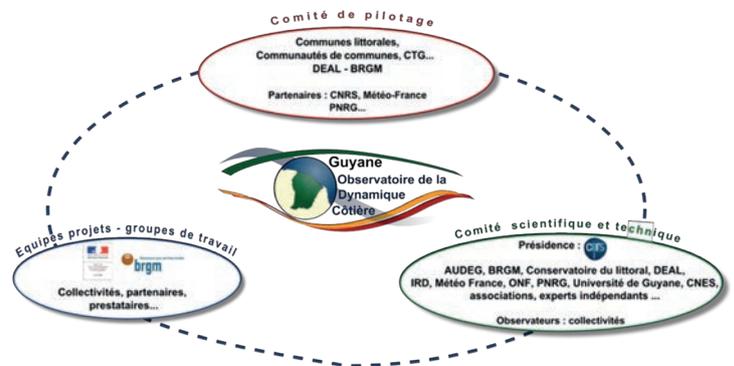


Figure 2 : Schéma du principe de gouvernance de l'ODyC.

- des équipes projet qui interviennent chacune sur des thématiques ciblées.

Le principe de gouvernance a été défini dans l'ambition de fédérer les acteurs institutionnels, opérationnels et scientifiques autour d'« un ensemble de règles, de procédures, de conventions et de principes élaborés, relevant de logiques différentes et en l'absence d'autorité unique » (Philippe, 2014). Il vise à faciliter l'adoption de décisions fondées sur des bases largement consensuelles. Chaque année, les différents partenaires<sup>(3)</sup> s'emploient à tisser de nouveaux liens. L'ODyC est enrichi par cette organisation en réseau.

### Les données de l'ODyC et leur valorisation

#### Les données : lesquelles et pourquoi ?

Par sa dynamique, le littoral guyanais représente un cas unique, qui s'explique par la migration de bancs de vase. À l'origine, il y a l'Amazonie. Les sédiments qui arrivent à l'embouchure du fleuve vont migrer sous l'influence des

(2) La forme juridique de ces observatoires est variable : groupement d'intérêt public, charte...

(3) Voir la liste exhaustive : [observatoire-littoral-guyane.fr/observatoire/partenaires/](http://observatoire-littoral-guyane.fr/observatoire/partenaires/)



Figure 3 : a) Contexte de migration des bancs de vase sur le plateau des Guyanes (d'après Gensac, 2012) et b) fonctionnement en local (source : plaquette de communication de l'ODyC).

vents et de la houle. Au nord du Brésil, une partie de la vase accumulée va former des bancs. Ces bancs de vase vont migrer jusqu'à l'estuaire de l'Orénoque, avant de se disperser en mer (Moisan, 2015). Leur masse moyenne est de l'ordre de deux milliards de mètres cubes (m<sup>3</sup>) ; ils jouent un rôle majeur dans la morphologie des côtes de Guyane (Prost, 2018). L'énergie de la houle incidente qui arrive sur le littoral engendre des phénomènes d'érosion, parfois importants, en période « inter-bancs ». En présence de bancs, les houles sont atténuées par le comportement visco-élastique de la vase. La côte est donc moins vulnérable.

Pour comprendre et quantifier les mouvements sédimentaires, l'ODyC a mis en place des suivis au moyen d'outils adaptés au contexte guyanais. Les différentes techniques, et donc les données récoltées, se basent sur les objectifs de suivi (Longueville, 2016). L'obtention de celles-ci sont dépendantes des moyens humains et financiers qui y sont consacrés. Un exemple des données récoltées par l'Observatoire est donné dans le tableau ci-contre.

Les données directement acquises par l'ODyC sont de diverses natures : physique, météorologique, états de mer, socio-économique... Des données non produites par l'ODyC sont également disponibles. Celles-ci viennent compléter les connaissances sur l'environnement côtier (ouvrages de défense, zones d'aléas érosion et submersion marine, domaines du Conservatoire du Littoral, bathymétrie...). Grâce à la disponibilité des données opérationnelles relatives aux phénomènes littoraux guyanais, la qualité des projets et des actions mis en œuvre est renforcée.

**La carte interactive**

Par quel moyen pouvait-on rendre disponible l'ensemble des connaissances ? Le constat reposait sur l'absence d'outils dédiés à la connaissance du littoral local. À l'image de plateformes déjà existantes (OCA, OBSCAT ou RONLP<sup>(4)</sup>), l'ODyC a souhaité se doter de sa propre carte interactive. Le développement cartographique étant concédé à la DEAL, l'utilisation de la plateforme Géo-

Données récoltées	Outils utilisés	Objectifs poursuivis	Mise à disposition sur la carte
Images aériennes et satellites	Images récoltées au cours de différentes missions	À l'échelle régionale : suivi de l'évolution des bancs de vase	Oui, quelques images sont disponibles. D'autres images sont échangées entre les partenaires scientifiques
Suivi du trait de côte	Photo-interprétation des données historiques. Levés par GPS calcul différentiel pour les données récentes	Suivre l'évolution locale et annuelle des plages les plus fréquentées de Guyane (4 sites)	Oui. TDC historiques (1950-2013) et levés de 2014-2017 (actualisés tous les ans)
Suivi par MNT	Survol par des drones	Connaître les volumes de déplacements sédimentaires	Oui. Des ortho-photographies et des MNT (en téléchargement) sont disponibles depuis 2014
Profil bathymétriques	Levés par GPS calcul différentiel et sonde bathymétrique	Suivre les évolutions topographiques des plages et avant-plages pour connaître les échanges	Non. La technique de représentation de ces données n'a pas encore abouti. Elles sont cependant disponibles sur le site Internet

Tableau 1 : Exemple de données récoltées par l'ODyC et visibilité de celles-ci sur la carte interactive.

Guyane s'est imposée. Ce projet régional, partenarial et participatif, est né en 2011 de l'action conjointe de la direction départementale de l'Équipement (aujourd'hui DEAL) et de l'Agence d'Urbanisme et de Développement de la Guyane. Le contexte réglementaire incitait déjà à faciliter la production, la mutualisation et le partage de l'information géographique (directive INSPIRE<sup>(5)</sup>). Les objectifs de l'outil qu'est l'ODyC, sont de répondre aux attentes des collectivités territoriales en matière d'amélioration de la connaissance et de les aider dans la définition de politiques publiques adaptées, grâce à un site fonctionnel qui simplifie le partage des données. Les retours d'expérience permettent également d'améliorer la quali-

(4) Côte Aquitaine : [www.observatoire-cote-aquitaine.fr/-Cartographie-interactive-](http://www.observatoire-cote-aquitaine.fr/-Cartographie-interactive-); Côte sableuse catalane : [app.aurca.org/vmap/?login=obscat&password=obscat](http://app.aurca.org/vmap/?login=obscat&password=obscat) ; Littoral de Normandie et des Hauts-de-France : [www.ronlp.fr/ronlp/index.php](http://www.ronlp.fr/ronlp/index.php)  
 (5) Directive INSPIRE : [cnig.gouv.fr/?page\\_id=8991](http://cnig.gouv.fr/?page_id=8991)

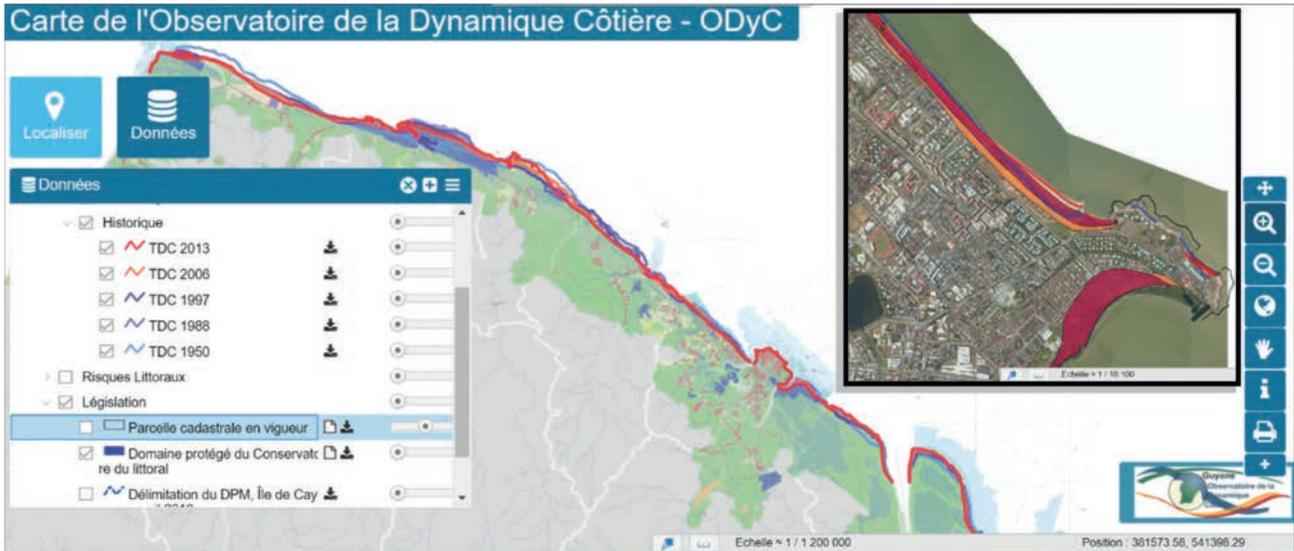


Figure 4 : Extraits de la carte interactive de l'ODyC.

té et la valorisation des ressources géographiques (Web GéoGuyane, janvier 2019). Huit ans après sa mise en service, cette plateforme a pour elle l'avantage d'être bien connue de ses utilisateurs guyanais.

Le site Internet ([www.observatoire-littoral-guyane.fr](http://www.observatoire-littoral-guyane.fr)) est, quant à lui, opérationnel depuis juin 2018. Rapidement, la mise en ligne de la base documentaire ([docs.observatoire-littoral-guyane.fr](http://docs.observatoire-littoral-guyane.fr)) et de la carte interactive ([carto.geoguyane.fr/1/ODYC.map](http://carto.geoguyane.fr/1/ODYC.map)) ont apporté une couverture quasi complète des données possédées par l'ODyC. Après deux mois d'utilisation (entre septembre et novembre 2018), la carte interactive avait déjà été l'objet de plus de cent soixante-dix consultations.

## L'apport de la cartographie pour les gestionnaires locaux

### Les enjeux de la connaissance : de la recherche scientifique à la sphère publique

L'ODyC est un « outil » dédié à l'observation et à la connaissance pour une gestion cohérente et durable de la bande côtière. Dans une tendance à la concentration des activités humaines sur le littoral, les enjeux liés à l'interface terre-mer sont divers. Le support cartographique de l'ODyC doit donc répondre aux attentes évolutives des décideurs. Une mise à jour bi-annuelle (*a minima*) renseigne sur les mutations du territoire, à de multiples échelles. Il est possible d'enrichir la carte de base par l'ensemble des données disponibles sur le portail GéoGuyane. Étant téléchargeables, ces éléments offrent également l'opportunité d'approfondir des projets personnels sous des logiciels cartographiques adaptés. Si une collectivité souhaite mettre à jour son plan local d'urbanisme, elle peut désormais visualiser l'évolution du littoral sur son territoire et évaluer les sites à enjeux. Des données de type juridique (par exemple, la délimitation du domaine public maritime de l'île de Cayenne, avril 2018) sont aussi accessibles. Un gain en termes d'efficacité et de modernité de l'action publique est rendu possible.

Outre les décisionnaires, la société civile bénéficie de ces savoirs. Difficiles à obtenir (ce qui suppose déjà d'avoir

connaissance de leur existence), les données issues de recherches financées par des fonds publics sont désormais partagées (conformément à la loi sur la République numérique<sup>(6)</sup>). L'accès aux informations relatives au littoral pour tout un chacun doit permettre de réduire les clivages entre les chercheurs, les acteurs institutionnels et le grand public.

### Quel avenir pour la carte de l'ODyC ?

C'est de la vivacité partenariale de l'ODyC que dépendra la pérennité du projet. En place depuis peu, la carte interactive a pour ambition de s'adapter aux attentes des acteurs du territoire. En 2019, des réunions à l'attention des collectivités territoriales de Guyane et des acteurs locaux seront organisées pour leur permettre de prendre en main l'ensemble des outils. La formation est indispensable à cette appropriation, et permet également de connaître les attentes des utilisateurs. Ces moments d'échange s'articuleront autour du site Internet de l'ODyC<sup>(7)</sup>, qui rassemble l'ensemble des rapports publiés et des projets menés. De plus, la base de données documentaire, qui recueille actuellement plus de trois cents œuvres, offre un large panorama des productions portant sur le littoral guyanais. Enfin, la carte interactive est une composante « vivante » de cet ensemble. Au-delà des besoins du territoire, son avenir sera également dicté par les attentes du Réseau national des Observatoires du trait de côte<sup>(8)</sup>. L'ODyC, en tant que membre de ce réseau, souhaite faciliter l'interopérabilité des données pour évaluer les retours d'expérience à l'échelle nationale, notamment en lien avec l'ensemble des Outre-mer français.

La carte interactive de l'Observatoire de la Dynamique Côtière de Guyane est un outil récent qui s'imprègne autant des politiques nationales et européennes que

(6) [www.legifrance.gouv.fr](http://www.legifrance.gouv.fr)

(7) Pour rappel, le site : [www.observatoire-littoral-guyane.fr](http://www.observatoire-littoral-guyane.fr) ; la base de données : [docs.observatoire-littoral-guyane.fr/](http://docs.observatoire-littoral-guyane.fr/) ; et la carte : [carto.geoguyane.fr/1/ODYC.map](http://carto.geoguyane.fr/1/ODYC.map)

(8) [observatoires-littoral.developpement-durable.gouv.fr/charte-du-reseau-r17.html](http://observatoires-littoral.developpement-durable.gouv.fr/charte-du-reseau-r17.html)

des attentes intrinsèques au territoire guyanais. Parmi les départements ultra-marins français, la Guyane a su se doter d'un des observatoires du trait de côte les plus complets à ce jour. Le principe de gouvernance, qui est au cœur de son organisation, permet d'apporter un gage de qualité et de pluridisciplinarité des savoirs acquis. Le littoral guyanais extrêmement dynamique sous l'effet de la migration des bancs de vase le long de son rivage, oblige à adapter les politiques de gestion de sa bande côtière pour faire face notamment aux risques d'érosion et de submersion marine. Le contexte climatique propre à la Guyane contraint à innover s'agissant des moyens mis en œuvre pour acquérir des données. Celles-ci sont aujourd'hui pleinement partagées grâce aux outils accessibles en ligne. La carte interactive offre la possibilité aux utilisateurs de croiser entre elles toutes sortes d'informations pour comprendre le caractère évolutif du littoral guyanais. De plus, une base de données documentaire et un site Internet complètent le dispositif de connaissance. Les décideurs publics peuvent ainsi adapter leurs politiques locales en tenant compte des dynamiques anthropiques et naturelles. La démarche va continuer à évoluer pour répondre au défi tout autant scientifique qu'institutionnel et sociétal que pose la gestion du littoral. Bien que non votée, la proposition de loi « portant adaptation des territoires littoraux au changement climatique<sup>(9)</sup> » a tout de même inspiré de nouvelles initiatives pour permettre une évolution législative de la gouvernance et des outils. L'atteinte des objectifs portés par les observatoires du trait de côte devrait en être facilitée.

## Bibliographie

COUSIN A. (2011), *Propositions pour une stratégie nationale de gestion du trait de côte, du recul stratégique et de la défense contre la mer, partagée entre l'État et les collectivités territoriales*, Rapport.

GARCIN M., BULTEAU T., LENÔTRE N. & OLIVEROS C. (2010), « Synthèse des travaux menés sur l'observation de l'évolution du trait de côte », BRGM, 8<sup>ème</sup> JST, Brest.

LONGUEVILLE F. & BOURBON P. (2016), *Synthèse sur les techniques pour le suivi du trait de côte et adaptation dans le contexte de la Guyane*, Rapport final, BRGM/RP-65906-FR, 66 p.

Ministère de l'Écologie et du Développement durable (2009), *Le Livre bleu des engagements du Grenelle de la Mer, 10 et 15 juillet 2009*.

Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement (2011), *Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte : vers la relocalisation des activités et des biens*.

MOISAN M., BOURBON P. & DE LA TORRE Y. (2015), « Observatoire de la dynamique côtière », Année 2, Rapport final, BRGM/RP-65281-FR, 77 p.

PHILIPPE M. (Coord.) (2014), *Glossaire « Risques côtiers »*, Projet ANR Cocorisco (2011-2014), Brest, 56 p.

PROST M. T. R. C., FAURE J.-F., CHARRON C., VARGAS H. V., SANTOS V. F., MENDES A. C. & GARDEL A. (2017), « L'embouchure de l'Amazone, macro-frontière géomorphologique : enseignements de 30 années de recherches franco-brésiliennes sur les systèmes côtiers amazoniens », *Confins*, 33 (mis en ligne en janvier 2018).

## Sites Internet

[www.geoguyane.fr/accueil/presentation/](http://www.geoguyane.fr/accueil/presentation/) (consulté en janvier 2019).

[www.observatoire-littoral-guyane.fr](http://www.observatoire-littoral-guyane.fr) (consulté en janvier 2019).

(9) [www.assemblee-nationale.fr/14/dossiers/adaptation\\_territoires\\_littoraux\\_changement\\_climatique.asp](http://www.assemblee-nationale.fr/14/dossiers/adaptation_territoires_littoraux_changement_climatique.asp)

# La cartographie numérique des bassins hydrologiques : retours d'expérience des agences de l'eau

Par Sarah FEUILLETTE  
et Patricia BLANC  
Agence de l'eau Seine-Normandie

La construction et la représentation des diagnostics d'état des eaux sont complexes du fait du nombre des paramètres à intégrer (polluants chimiques, état bactériologique et physique, présence de la faune et de la flore, état quantitatif...) et des différentes échelles pertinentes (depuis le diagnostic local nécessaire aux usages de loisirs jusqu'au diagnostic global à l'échelle d'un fleuve ou d'une nappe utilisée pour l'alimentation en eau d'une métropole). Les outils numériques sont utilisés par les agences de l'eau pour partager les informations et faire participer le public à la mise à jour des diagnostics d'état des eaux. L'agence Seine-Normandie vient d'ouvrir le portail Géo-Seine-Normandie, qui permet aux usagers de l'eau de contribuer à l'élaboration de l'état des lieux 2019. L'agence Rhône-Méditerranée-Corse, quant à elle, gère pour son compte et celui des cinq autres agences l'application « Qualité Rivière », qui permet à tout un chacun d'accéder aux données cartographiées d'état des eaux.

Les services rendus par les écosystèmes aquatiques et marins sont multiples : supports de loisirs, production de nourriture, atténuation des conséquences des événements naturels (crues, sécheresse, ouragans...). La valeur de ces services a été évaluée pour la France <sup>(1)</sup> à plus de 3 milliards d'euros par an, pour les seules eaux continentales. Plus généralement, l'eau est une ressource essentielle au développement des sociétés humaines. Elle a pris une importance croissante en matière d'hygiène avec le développement des systèmes d'adduction d'eau potable et d'assainissement. Elle est indispensable aux productions agricoles, que ce soit sous la forme de précipitations ou de l'irrigation. Enfin, elle intervient également dans de nombreux procédés industriels comme solvant, ou encore comme matrice de réactions chimiques dans l'extraction de matières premières, pour la production d'énergie, etc. <sup>(2)</sup>. Bien entendu, ces usages peuvent avoir des niveaux d'exigence variables, parfois très élevés, vis-à-vis de la qualité de l'eau utilisée.

Pour bien gérer la ressource en eau, il est indispensable de comprendre comment les flux sont conditionnés par les caractéristiques du territoire : climat, géologie, topographie, liens entre les circulations souterraines et les circulations de surface. Il est également important d'analyser et de corriger les impacts des activités humaines, de manière à ce que la ressource en eau, et les milieux

naturels qu'elle alimente, puissent répondre aux besoins de l'ensemble des activités humaines du territoire. Cela est d'autant plus vrai dans un contexte de changement climatique, qui modifie déjà considérablement les équilibres que nous connaissions jusqu'alors.

En France, la gestion de l'eau repose essentiellement sur trois niveaux :

- À l'échelle des communes, les maires sont historiquement responsables des services d'eau et d'assainissement depuis le XIX<sup>e</sup> siècle, ce qui se traduit, du moins en milieu rural, par une forte proximité entre citoyens et politique de l'eau, et par une grande diversité de situations (en termes de techniques, de prix de l'eau, de modes de gestion...). Les communes peuvent déléguer ces services à des entreprises privées, tout en en demeurant responsables devant leurs administrés. Depuis les lois MAPTAM (2014) et NOTRe (2015) qui portent la réforme territoriale actuelle, les communes doivent s'organiser

(1) CGDD (2018), EFESSE « Les milieux aquatiques continentaux », <https://www.ecologiquesolidaire.gouv.fr/sites/default/files/Th%C3%A9matique%20Les%20milieux%20humides%20et%20aquatiques%20continentaux.pdf>

(2) CNRS, SagaScience : <http://sagascience.cnrs.fr/doseau/decouv/usages/menuUsages.html>

en établissements publics de coopération intercommunale (EPCI) qui deviennent compétents pour la gestion de l'eau potable, l'assainissement des eaux usées et la gestion des milieux aquatiques et de la prévention des inondations (GEMAPI).

- Au niveau des bassins versants de chaque grand fleuve, la gouvernance dite « de bassin » est organisée par la loi sur l'eau de 1964, laquelle a été modifiée en 2006 : planification à long terme, programmation à plus court terme et coordination des actions sont mises en œuvre par les instances de bassin (le comité de bassin qui est un « Parlement de l'eau » où siègent à hauteur de 40 % des élus des différents niveaux de collectivités et dans la même proportion (40 %) des représentants des usagers de l'eau et des acteurs associatifs ; les 20 % restants sont des représentants de l'État et de l'agence de l'eau, qui est un établissement public des ministères de l'Environnement et de l'Économie et des Finances et dont le conseil d'administration est issu du comité de bassin. L'agence perçoit les redevances sur l'eau, qu'elle redistribue sous forme d'aides aux projets ; elle organise également la surveillance de l'état des eaux.
- Enfin, les services de l'État, dont l'action est coordonnée par le préfet coordonnateur de bassin et l'Agence française de la Biodiversité (futur Office français de la Biodiversité), élaborent les normes réglementaires et assurent la police de l'eau.

Les agences de l'eau disposent de données très nombreuses sur les pollutions et les usages de l'eau et sur la qualité des masses d'eau, à travers notamment l'exploitation des formulaires de déclaration de redevances et des demandes d'aides qu'elles instruisent. Ces données représentent un patrimoine considérable dont nous pouvons encore améliorer l'exploitation, en les partageant et en les croisant : l'agence de l'eau Loire-Bretagne est l'une des plus avancées dans ce domaine, à travers l'utilisation d'une infrastructure de données spatiales (IDS) constituée de briques *open source* reposant sur des géodatabases PostgreSQL/Postgis et sur un portail cartographique (geoserver/GeoNode).

Les données contenues dans les applications métiers sont accessibles *via* ce socle et peuvent être croisées par les géomaticiens, en temps réel. L'interconnexion des bases permet d'éviter la création de doublons, de fiabiliser les traitements et les valorisations des données. Les outils bureautiques, sous Excel ou Access, sont eux aussi interconnectés avec les données de la géodatabase. Les données ainsi centralisées sont sécurisées et accessibles à l'ensemble des agents. Au total, ce sont plus d'une centaine de jeux de données, chaque jeu de données pouvant être constitué de dizaines de tables attributaires et de couches cartographiques, qui peuvent être croisées et valorisées, ouvrant plus encore les possibilités d'analyse des données. Les données des référentiels externes sont utilisées par des Web services, évitant ainsi la création de doublons et permettant d'accroître l'efficacité.

Au plan européen, la politique de l'eau est organisée par la « directive-cadre sur l'eau » de 2000 qui s'inspire de la gestion par bassin versant « à la française » et fixe

l'objectif du bon état de toutes les masses d'eau d'ici à 2027 (nous en sommes actuellement, en France, à 40 % de masses d'eau en bon état). Cette directive prescrit la mise à jour, tous les six ans, d'un plan de gestion à l'échelle des grands bassins versants (le SDAGE, dans la réglementation française), qui doit d'abord s'appuyer sur l'état des lieux du bassin : il s'agit notamment de décrire l'état écologique, chimique, physique des eaux et les pressions qui s'exercent sur elles (pollutions, prélèvements, modifications de tracé des rivières), et de prévoir l'évolution de ces données dans les six ans.

2019 est l'année de réalisation d'un nouvel état des lieux de tous les bassins, lequel doit être publié en décembre, pour préparer la révision des SDAGE en 2021. La réalisation de cet état des lieux peut être l'occasion d'améliorer la participation du public à l'élaboration des politiques environnementales, dans un contexte où, partout en Europe, elles sont questionnées : il s'agit d'expérimenter la participation du public non seulement à l'élaboration des politiques – comme c'est le cas aujourd'hui –, mais aussi, plus en amont, à la production des données et diagnostics qui fondent ces politiques. La contestation des politiques environnementales, notamment dans le domaine de l'eau, ne concerne pas que les outils (réglementaires ou fiscaux), elle porte aussi sur le diagnostic réalisé en amont : les polluants qui déclassent telle rivière sont-ils majoritairement d'origine agricole ou urbaine ? La présence de retenues ou de moulins dégrade-t-elle ou améliore-t-elle la qualité de l'eau ? Quel est le vrai coût, pour la collectivité, des pollutions de l'eau ? Les outils numériques cartographiques permettent aujourd'hui de mieux associer un public d'initiés (associations de protection de l'environnement, fédérations de pêche, collectivités de tous niveaux, fédérations de loisirs nautiques, organisations professionnelles, chambres d'agriculture, associations de consommateurs, associations de protection des moulins...) à la production des données sur l'eau. C'est le sens de l'expérimentation « Géo-Seine-Normandie » qui s'appuie sur une interface cartographique numérique pour consulter les acteurs sur l'élaboration de l'état des lieux 2019 du bassin de la Seine.

La mise en perspective de l'état des eaux avec les pressions actuelles et leur évolution récente, ainsi que des éléments d'analyse permettant d'évaluer leur évolution future, offrent la possibilité de se situer globalement dans le processus devant mener vers le bon état des masses d'eau, et d'identifier celles qui sont « à risque de non-atteinte du bon état ».

Sur la base du retour d'expérience des précédents cycles de la directive-cadre sur l'eau, qui a notamment fait ressortir des critiques sur la participation des acteurs jugée insuffisante, cette étape d'identification des problématiques s'appuie cette fois sur le partage et l'appropriation de cet exercice par les différents services et acteurs du bassin, un investissement susceptible de faciliter la mise en œuvre du futur plan de gestion.

L'objectif de cette consultation technique (s'étendant de mi-février à avril 2019) est de recueillir l'avis des acteurs

locaux sur les pressions identifiées comme « significatives », c'est-à-dire susceptibles d'avoir un impact sur l'état de la masse d'eau, aujourd'hui et à l'horizon 2027. Les pressions examinées prennent en compte les rejets polluants, les prélèvements, les pollutions diffuses (nitrates, phosphore, produits phytosanitaires) et les altérations hydromorphologiques.

Les principales fonctionnalités de l'outil de consultation, le portail GéoSN, sont :

- mettre à disposition, en interne comme en externe, les informations résultant de l'état des lieux réalisés à l'échelle des 1 750 masses d'eau (sous formats cartographique et tabulaire) ;
- recueillir les avis sur le caractère significatif des pressions et le risque de non-atteinte du bon état des eaux, les bancaiser pour les exploiter.

Cet outil est alimenté par une base recueillant les données issues des travaux engagés dans le cadre de la réalisation de l'état des lieux.

Les informations mises à disposition sur le portail Géo-SN concernent :

- l'état des masses d'eau (pour information) ;
- la caractérisation des pressions s'exerçant sur elles (pour information) ;
- la significativité de ces pressions au regard de leur impact sur l'état de la masse d'eau (soumis à avis) ;
- le risque de ne pas atteindre les objectifs fixés à l'horizon 2027 et la ou les pression(s) cause(s) (soumis à avis).

Les informations sont accessibles selon le type de masse

d'eau (superficielle continentale, côtière et de transition, souterraine) et par type de pression (macropolluants ponctuels, micropolluants ponctuels, azote diffus, phosphore diffus, phytosanitaires diffus, pressions hydromorphologiques (hydrologie, morphologie, continuité), prélèvements).

Afin de permettre aux acteurs du bassin de formuler un avis et de le justifier, l'outil leur met à disposition des éléments synthétiques qui éclairent le diagnostic pré-rempli, selon une navigation structurée et ergonomique pour l'utilisateur.

L'avis est exprimé à l'échelle de l'organisation (syndicat, collectivité, fédération, association) et non de l'individu. L'accès à l'application est conditionné à une authentification (saisie d'un *login*, d'un mot de passe).

L'information est organisée de manière à :

- permettre à chacun des acteurs de retrouver facilement son territoire, grâce à la description des unités géographiques (spécifiques à la gestion de l'eau : masses d'eau, bassins versants, unités hydrographiques) et administratives (commune, département, etc.) (voir les Figures 2 et 3) ;
- mettre à disposition toutes les données nécessaires à la compréhension de l'état des lieux (voir la Figure 4) ;
- récolter et exploiter le diagnostic argumenté émanant de chaque contributeur, au moyen d'une interface permettant à chacun de donner son avis et de déposer des fichiers pour le justifier (voir la Figure 5).



## Bienvenue sur Géo-Seine-Normandie, participez à la consultation technique de l'état des lieux

Votre structure est interrogée dans le cadre de la consultation technique de l'état des lieux DCE. Le portail est disponible de février à avril 2019.

Pour chaque diagnostic que vous soumettez, merci d'argumenter et de joindre autant d'éléments que possible.

Identifiant

Mot de passe

[Mot de passe oublié ?](#)

Connexion

[Contacter l'administrateur](#)

[Demander un accès pour votre structure](#)

© AESN Géo-Seine-Normandie - Tous droits réservés - Version 1.0.5 (PRCO)

Figure 1.

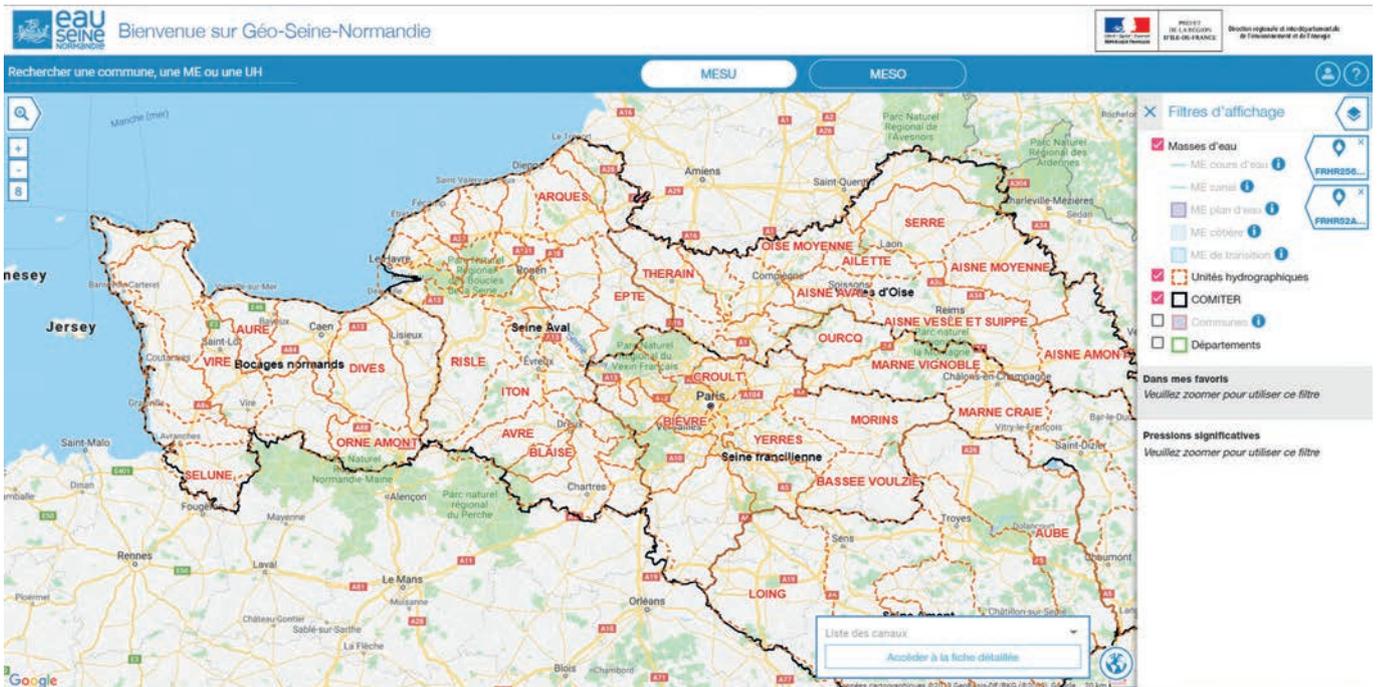


Figure 2.

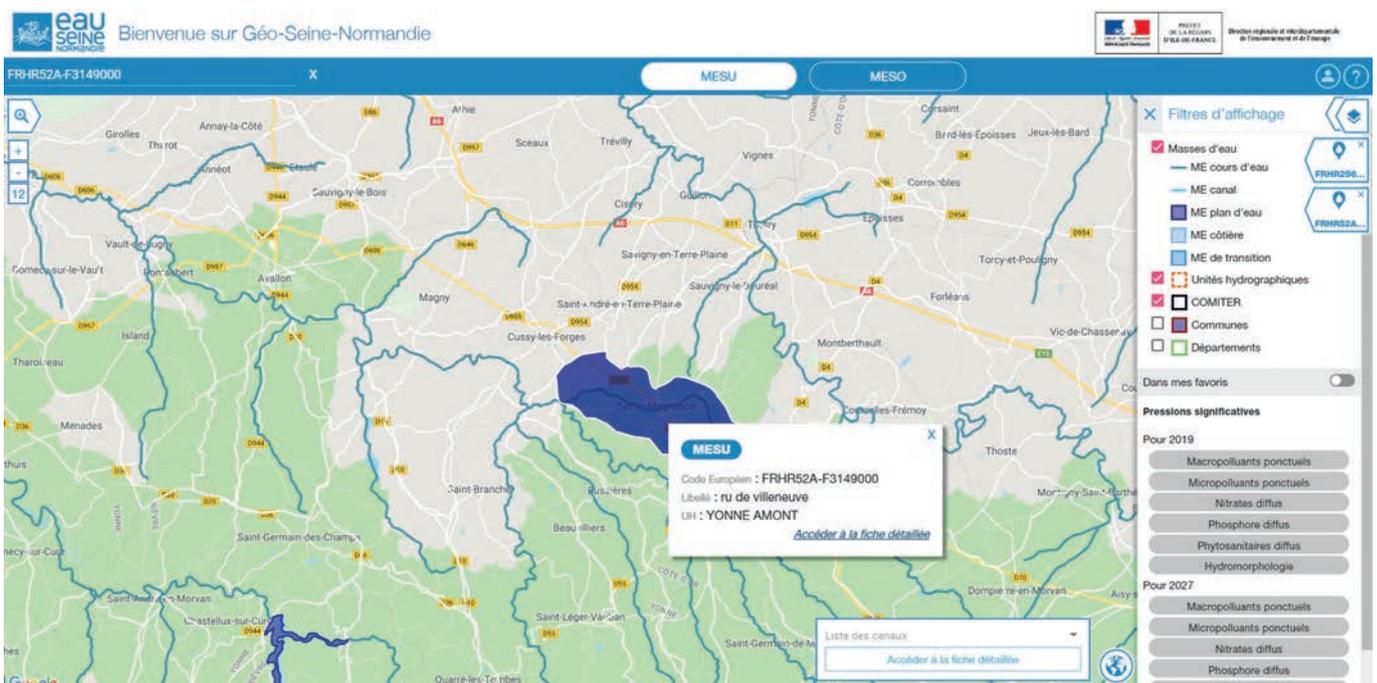


Figure 3.

Un prestataire accompagne l'agence pour trier et traiter les avis reçus, dont le nombre et le contenu ne sont pas connus à l'avance. Cette prestation consiste à organiser et optimiser le recueil des avis des experts locaux, notamment en réalisant une typologie des avis basée, entre autres, sur la nature de l'avis et le type de répondant. Il s'agira également d'apporter des clés de compréhension des avis des experts locaux au travers d'une synthèse générale : tendances d'objections (sur la pression actuelle,

sur sa projection à horizon 2027...), motivations exprimées (argumentaire détaillé, constat empirique, vision plus ou moins optimiste des tendances d'évolution...), enjeux au regard de l'appropriation de l'exercice et de ses résultats.

Les services de l'État (DRIEE, DREAL, DDT) et de l'agence de l'eau seront ensuite amenés à analyser les avis et à juger de leur recevabilité en justifiant les cas de non-prise en compte de ceux-ci.

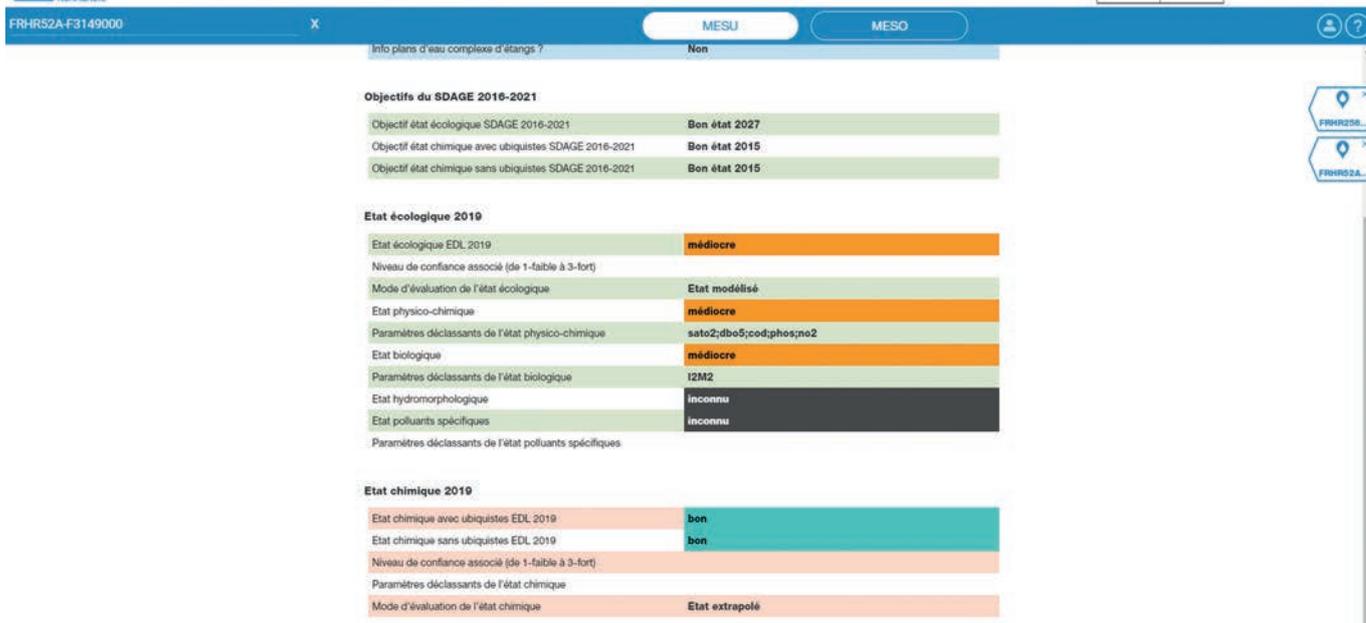


Figure 4.



Figure 5.

Les avis pourront notamment porter sur le diagnostic des pressions significatives causant la dégradation actuelle de l'état des masses d'eau, ou sur leur projection à l'horizon 2027. Les acteurs techniques locaux sont donc susceptibles d'apporter une consolidation ou une critique des :

- éléments ayant conduit à évaluer l'impact actuel des pressions sur les masses d'eau ;
- éléments pris en compte pour établir le scénario tendanciel d'évolution des pressions exercées sur les milieux (contexte socio-économique, avancement des mesures déjà engagées, inertie de certains milieux).

L'exploitation des résultats sera réalisée à partir de l'extraction des avis exprimés sur le portail, qui fera

notamment apparaître des éléments tels que la masse d'eau, l'émetteur de l'avis, la pression, l'année concernée par l'avis et les éléments constitutifs de celui-ci (oui/non et un commentaire).

L'exploitation des résultats consistera également à rédiger une synthèse générale des avis exprimés, approfondie notamment en fonction de leur nombre, de la méthode retenue pour leur prise en compte et des tendances à retenir pour favoriser l'appropriation de l'état des lieux et des étapes de planification à venir (SDAGE, programme de mesures).

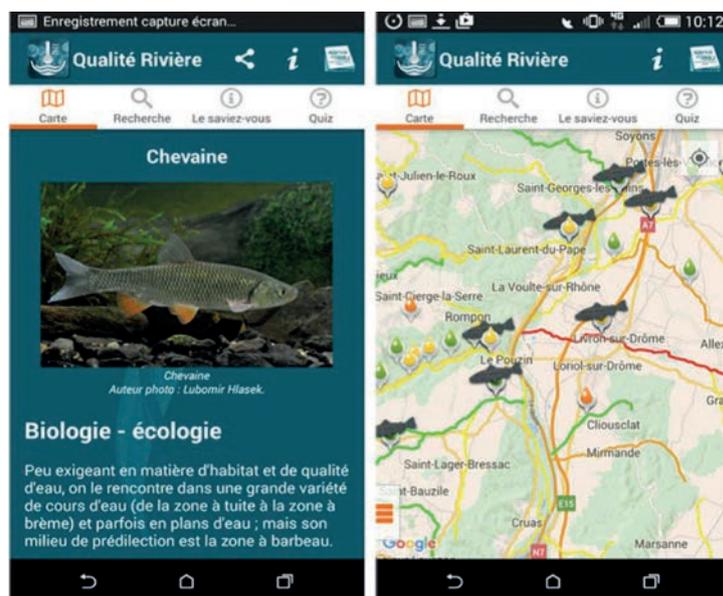
La traçabilité de la prise en compte des avis et de sa justification sera assurée.

Au-delà de son utilisation pour opérer la consultation technique à l'échelon local, l'outil Géo-SN devrait servir à la réalisation d'autres travaux. D'ores et déjà, en parallèle de la consultation technique, il est utilisé en interne pour définir un « pré-programme de mesures » : compte tenu de l'état des masses d'eau et des actions déjà mises en œuvre, il s'agit de définir les mesures complémentaires à mettre en œuvre pour lever les pressions subies.

Les résultats des différents états des lieux réalisés dans les six bassins français seront capitalisés dans l'application « Qualité Rivière » pour *smartphones* et tablettes, qui est gérée par l'agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse depuis cinq ans. Cette application permet de repérer facilement l'état des cours d'eau ainsi que les espèces de poissons vivant dans les rivières de France.

Tous les cours d'eau sont représentés sur une carte interactive selon un code couleur – allant du bleu (très bon état) au rouge (mauvais état) –, correspondant à leur état écologique. Il est également possible de consulter plus précisément les données des trois dernières années afin de visualiser les efforts accomplis par les acteurs des territoires pour restaurer les rivières et éliminer les pollutions.

Il est également possible de consulter la liste des poissons présents dans un cours d'eau, en chaque lieu de pêche d'inventaire. Des fiches explicatives accompagnées d'une photo de chacune des espèces présentées, précisent leur répartition géographique, leur habitat, leur biologie, ainsi que leurs éventuels impératifs de protection.



L'application s'adresse à tous les publics ; elle propose des jeux et des quiz pour tester nos connaissances sur l'eau, ou encore faire connaître les comportements à éviter.

# L'impact d'une plateforme régionale sur l'évolution des pratiques cartographiques des acteurs locaux

Par Christine ARCHIAS

CRIGE Provence-Alpes-Côte d'Azur

Les plateformes régionales d'information géographique jouent un rôle important dans l'évolution des pratiques des acteurs locaux en matière de réutilisation et de valorisation des données géolocalisées. Le CRIGE (Centre régional de l'information géographique) de Provence-Alpes-Côte d'Azur est la tête de pont du réseau des CRIGE, que pilote l'Afigéo (Association française pour l'information géographique).

Elles s'appuient toutes sur un socle de missions couvrant l'acquisition, la collecte, l'intégration, la diffusion et l'accompagnement à la valorisation de données géographiques de référence et métiers. Structures neutres, souples et ouvertes, elles facilitent et encouragent le travail collaboratif, les expériences participatives et les projets innovants dans le domaine de la production et des usages d'informations géographiques.

Par leurs actions en matière d'ouverture des données, de création d'outils performants pour leur diffusion et leur mise en valeur, de mise en réseau d'acteurs divers et variés, elles contribuent à la modernisation des métiers et des pratiques de la cartographie.

Créé par l'État et la région Provence-Alpes-Côte d'Azur pour développer la production, les usages et le partage d'informations géographiques sur le territoire de celle-ci, le CRIGE Sud a fêté ses quinze ans d'existence en 2018. Financé par ses membres fondateurs, par les départements, les métropoles et les communautés d'agglomération de la région précitée, il joue le rôle de centre de ressources géomatiques au profit de tous les producteurs et utilisateurs d'informations géographiques en région. Il existe un CRIGE, ou son équivalent, dans chaque région. Les CRIGE sont fédérés dans un réseau piloté par l'Association française pour l'information géographique (Afigéo).

Pour remplir ses missions, le CRIGE collecte et diffuse des données de référence et métiers *via* une plateforme numérique. Il apporte une expertise et un appui techniques pour simplifier leur intégration. Il anime un réseau de près de 2 000 usagers pour faciliter la valorisation de leurs données. S'il s'adresse en priorité aux acteurs publics et parapublics en charge de l'observation, de la planification et de la gestion des territoires, le CRIGE s'ouvre de plus en plus aux entreprises et aux citoyens à travers l'*open data*.

Enfin, dans le secteur en évolution rapide de l'information géographique, le CRIGE est le porte-parole des acteurs locaux au sein des instances nationales en charge de la

définition et de la mise en œuvre des politiques géomatiques (ministère chargé de l'Écologie, Etalab, Afigéo, Conseil national de l'information géographique (CNIG), Institut national de l'information géographique et forestière (IGN)...). En retour, il assure pour ses usagers une veille sur les grands chantiers conduits aux niveaux national et européen.

## Un accès facilité aux données sources et un partage de celles-ci

### Des référentiels géographiques homogènes à l'échelle de la région

Une des premières missions du CRIGE est de faciliter la mise en place de groupements de commandes entre acteurs publics pour l'acquisition de données essentielles (photographies aériennes, matrices cadastrales, données topographiques, images satellites...) et métiers (forêt, hydrographie, occupation des sols, littoral...).

Avec le développement de l'*open data*, le coût des données, longtemps réhibitoire, n'est plus réellement un frein. Mais certaines données essentielles restent toutefois onéreuses à acquérir, du fait notamment d'une recherche constante de précision de la part des utilisateurs ou du modèle économique des producteurs (données sur les réseaux, données issues de capteurs). Par ailleurs, le

foisonnement des données ouvertes soulève la question de leur qualité (origine, description, validité), gage d'une réutilisation efficiente.

La démarche « mutualiste » du CRIGE permet de consolider, d'entreposer (si nécessaire) et de rendre accessible à tous ses usagers un socle commun de données homogènes et de qualité relatives au territoire régional. Les acteurs publics s'appuient sur le CRIGE pour alimenter le volet spatial des outils de connaissance, de planification et de gestion <sup>(1)</sup> du territoire régional. Cette cohérence générale facilite la production, dans des délais courts, d'analyses spatiales complexes. La possibilité offerte aux entreprises et aux citoyens d'accéder au même socle de données pour produire leurs propres analyses développe une vision partagée du territoire. La coordination et l'efficacité des politiques publiques s'en trouvent renforcées et la concertation entre les acteurs économiques et les habitants des territoires en est améliorée.

### Un point d'accès privilégié à des services géographiques

Depuis sa création, le CRIGE, grâce au soutien de ses membres, a pour ambition de jouer le rôle de guichet unique de l'information géographique en région. Tous participent financièrement à l'administration et à la maintenance d'un géoportail régional qui a vocation à cataloguer, labelliser et diffuser en ligne les données géographiques émanant de tous les producteurs locaux. Même si cet objectif d'être le « guichet unique » n'est pas totalement atteint, le principe d'un point d'accès de référence opéré au travers d'une structure « tiers de confiance » fait consensus à l'échelle de la région.

Les adaptations régulières de l'infrastructure pour tenir compte des évolutions importantes et rapides du secteur de l'information géographique expliquent en partie la pérennité de ce choix. Après la mise en place de services Web visant à garantir son interopérabilité avec les portails nationaux de référence (Géoportail de l'IGN, data.gouv.fr, géoportail de l'urbanisme <sup>(2)</sup>), l'infrastructure du CRIGE a évolué pour pouvoir s'adapter à l'ouverture des données et aux finalités de la loi n°2016-1321 du 7 octobre 2016 pour une République numérique (loi Lemaire). L'objectif visé à travers le nouveau portail DataSud est l'accès à la donnée « en un clic » pour le plus grand nombre possible d'utilisateurs.

La possibilité d'accéder directement, *via* une infrastructure pérenne et évolutive, à des données géographiques et ouvertes est un levier important pour augmenter le volume et la performance des productions cartographiques au niveau de la région. Elle limite le temps de recherche. Elle offre la garantie, pour une partie au moins du stock, de disposer de données documentées, de qualité et actualisées régulièrement. Elle propose aux professionnels un accès à des services en ligne de chargement et de transformation de données qui simplifient d'autant leur réutilisation dans des outils spécialisés (services Web, dataviz, marque blanche, API <sup>(3)</sup>) ; des services qui grâce à une infrastructure « client » minimale peuvent être facilement consommés par des citoyens. Enfin, elle permet à

l'écosystème des *start-ups* régionales de développer des applications innovantes basées sur la géolocalisation.

## Une animation organisée autour des réutilisations des données

### Partage des méthodes et des résultats

La simplicité d'accès à des données documentées, si possible standardisées, est une condition nécessaire, mais non suffisante pour générer rapidement des produits cartographiques conformes aux besoins des utilisateurs. Pour les acteurs publics, cela nécessite de disposer ou de faire appel à des compétences et à des outils spécifiques, dont nombre d'organismes ne disposent pas. C'est particulièrement le cas des analyses et indicateurs spatialisés qui répondent à des exigences réglementaires <sup>(4)</sup> et dont la production repose sur des binômes géomaticien/thématicien compte tenu des connaissances exigées. C'est également le cas pour des données d'un usage plus complexe comme les images satellites ou les modèles numériques.

Le CRIGE assure un rôle d'animateur avec pour objectif de faciliter la valorisation cartographique tous azimuts d'un large éventail de données mises à disposition. Il met les acteurs concernés en relation les uns avec les autres ainsi qu'avec des experts du domaine, au sein de groupes de réflexion et d'ateliers participatifs. Ces actions, qui drainent un public régulier et important, permettent d'échanger sur des besoins, des pratiques, des méthodes et des outils de production cartographique. Le caractère largement ouvert de cette animation permet à des collectivités et à des services de l'État de rencontrer des entreprises et des chercheurs en capacité de développer des méthodologies et des applications innovantes. Ces mesures sont mises en place dans le cadre de « pôles métiers <sup>(5)</sup> » qui permettent de regrouper les acteurs par filière.

L'animation autour des usages passe également par la présentation et la mise en valeur de retours d'expérience lors de séminaires d'information du réseau géomatique régional. De plus en plus de présentations sont disponibles sous la forme de tutoriels et de webinaires pour les sujets qui s'y prêtent. L'animation se décline sur tout le territoire régional, au plus près du terrain dans le cadre de « tournées départementales ». Cette formule permet de

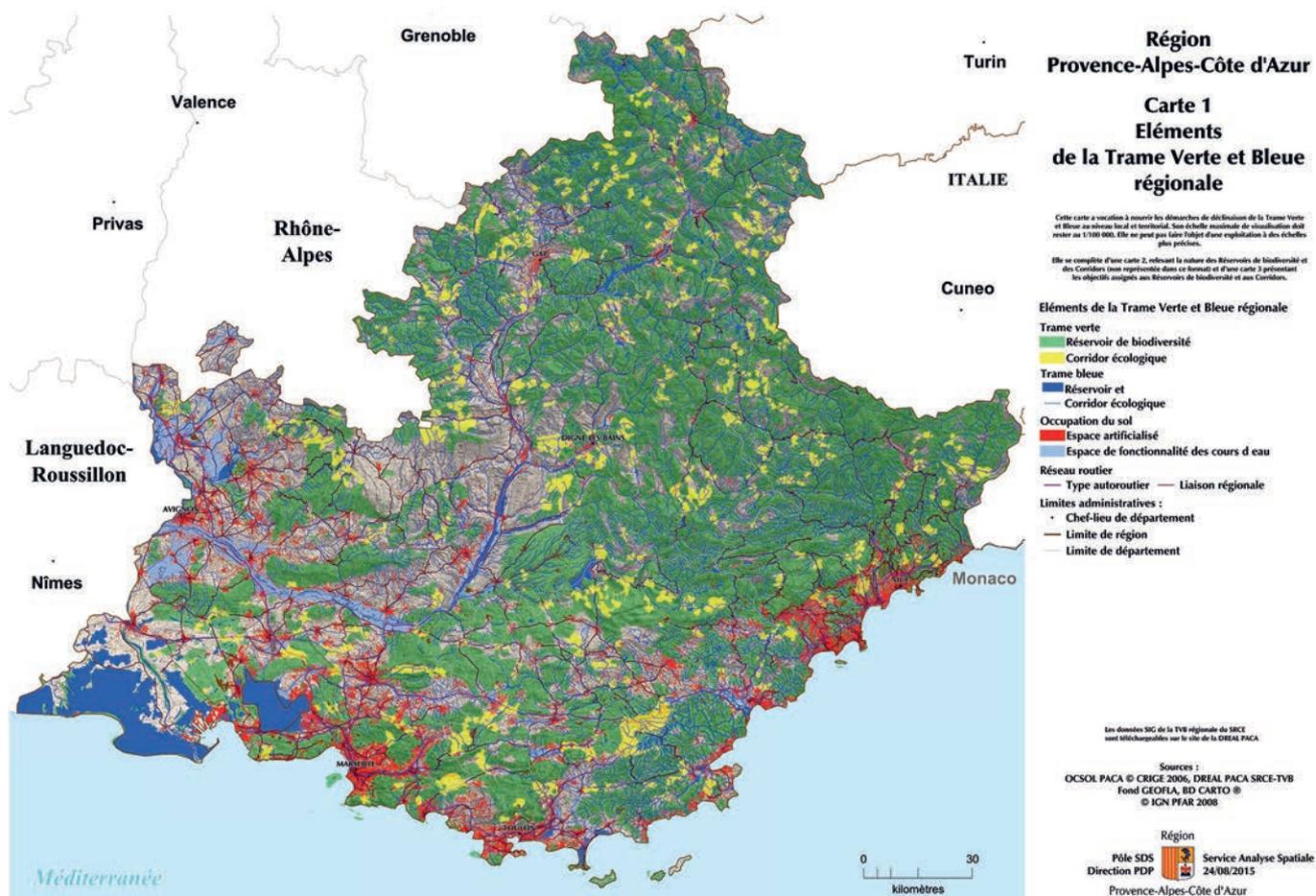
(1) Observatoires de la forêt, de l'adaptation au changement climatique, du foncier économique, de l'eau, etc., schémas de cohérence territoriale (SCOT), d'aménagement régional (SRADDET), d'accès à la ressource forestière (SRCE), de développement économique et innovation (SRDEII), d'accès au numérique (SDAN), etc., applicatifs de gestion du droit des sols, des réseaux, des transports publics, etc.

(2) Mise en conformité avec les règles de la directive 2007/2/CE du Parlement européen et du Conseil du 14 mars 2007 établissant une infrastructure d'information géographique dans la Communauté européenne (INSPIRE).

(3) Application Programming Interface.

(4) Trame verte et bleue, consommation d'espace, zonages d'urbanisme (plans locaux, servitudes d'utilité publique), zonages environnementaux, etc.

(5) Il existe sept pôles métiers recouvrant six thèmes : Climat-Air, Forêt, Urbanisme, Mer-Littoral, Agriculture et Eau-Environnement. Au total, il rassemble près de sept cents participants, soit une moyenne de cent participants par pôle.



Trame verte et bleue de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur.

« Les analyses et indicateurs spatialisés répondent à des exigences réglementaires ».

traiter des questions en lien avec les compétences et les moyens des plus petites collectivités, tout particulièrement les communes. Elle facilite le contact, d'une part, avec les élus, – les premiers utilisateurs des productions cartographiques –, et, d'autre part, les citoyens, qui constituent une cible prioritaire pour l'accès à ces cartographies.

### Définition de nouvelles données pour répondre aux besoins locaux

Les pôles métiers servent également de cadre à la définition concertée de nouvelles données et notamment à la déclinaison locale de référentiels nationaux. En effet, les données produites par des opérateurs nationaux, si elles présentent l'avantage d'être homogènes et disponibles sur l'ensemble du territoire national, manquent parfois de précision (insuffisance des détails) pour décrire parfaitement les réalités locales. Les cartographies par trop généralistes qui en découlent ne permettent pas d'apprécier les enjeux réels des territoires. Pour permettre une compatibilité ascendante et respecter les standards, le CRIGE accompagne les acteurs locaux dans la production de modèles de données enrichis, dérivés des modèles nationaux.

À l'inverse, il joue un rôle d'agrégateur de données très locales à l'échelon régional. Cette action permet d'accompagner les producteurs locaux (intercommunalités,

communes, syndicats) dans la standardisation de leurs données, sans dégrader leur précision et donc en augmentant leur qualité. Les opérateurs des observatoires et schémas régionaux peuvent ainsi intégrer des données existantes avec la garantie que celles-ci présentent le niveau de qualité requis pour alimenter des outils réglementaires et qu'elles pourront faire l'objet ultérieurement d'une actualisation simplifiée et plus régulière.

Toujours dans le cadre des pôles métiers, le CRIGE accompagne ses membres dans la définition et la production de nouvelles données *ex nihilo*. Ainsi, des groupes constitués des utilisateurs les plus gros demandeurs travaillent à la définition d'un contenu (spécifications, modèles de données) et de modalités de production (marché, partenariats entre autorités publiques) et de réutilisation des données (licences, API).

### La coconstruction de données et d'analyses

#### Développement du géocollaboratif

Le développement du géocollaboratif en matière de construction de données géographiques permet de limiter les effets négatifs de plusieurs des grands problèmes auxquels sont confrontés les cartographes : l'exhaustivité,

l'actualisation et la standardisation des données. Inspiré des « wiki géographiques » alimentés par des communautés de contributeurs, dont le modèle le plus emblématique est le projet OpenStreetMap, le géocollaboratif permet d'associer plusieurs catégories d'acteurs pour coconstruire des données *via* des outils de contribution évolués accessibles sur tout type de terminal, en particulier les *smartphones* et les tablettes.

Ce mode de production cartographique essaime peu à peu chez les producteurs de données publiques. La mise à disposition d'un outil facile d'accès, simple d'utilisation et garantissant une mise en forme minimale des données saisies, permet d'accélérer l'alimentation d'une base de données et son actualisation. Le modèle facilite l'enrichissement des données nationales ou régionales par les acteurs de terrain. Les grands producteurs institutionnels de référentiels géographiques affichent leur volonté de développer le mode collaboratif, mais, en priorité, avec des « partenaires de confiance ».

D'abord mis en œuvre pour produire des données publiques, ce modèle facilite, par son caractère ouvert, la contribution citoyenne. Ainsi, des données coproduites par des partenaires publics peuvent être consultables, enrichies et actualisées par des citoyens. Certaines collectivités organisent dans cette optique des carto-parties, qui permettent, facilement et rapidement, de saisir, d'enrichir, de préciser ou d'actualiser des données géolocalisables.

### Mise en place de guichets ouverts

Pour développer le travail en mode contributif, le CRIGE a créé, sous la forme de prototypes et sur des territoires tests, plusieurs guichets collaboratifs ouverts. Axés sur les thèmes de la desserte forestière, des équipements collectifs publics et des zones d'activité économique, ces projets doivent permettre de tester la faisabilité technique, organisationnelle et économique de ce nouveau mode de partenariat en matière de création, d'actualisation, de stockage et de maintenance de bases de données géographiques ouvertes.

Le prototype relatif à la desserte forestière a débouché sur le projet VIAforest soutenu par des acteurs publics, dont l'URACOFOR, la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, la DRAAF, les départements, l'ONF, le CRPF et le FCBA<sup>(6)</sup>. Ce guichet permettra à des « tiers de confiance » (*community sourcing*) d'alimenter une base socle, à partir d'informations de terrain sur la desserte forestière, pour l'enrichir et l'améliorer (nouveaux tronçons, nouveaux ouvrages). Il permettra aussi de signaler, en temps réel, depuis un *smartphone*, d'éventuels désordres affectant les pistes et les ouvrages (obstruction, inondation, acci-

dent...). Sa consultation sera ouverte à tous les professionnels de la forêt, en particulier aux exploitants. L'IGN est partenaire du projet. Il entame, en parallèle, le développement d'un guichet national généraliste sur la desserte forestière. L'interopérabilité des outils et des données va permettre d'articuler entre eux ces deux guichets et de réaliser des gains partagés en matière de stockage, de mise à jour et de maintenance des données.

La logique de guichet contributif est particulièrement adaptée à des données complexes comme les équipements collectifs publics. Composée de sources d'information multiples issues d'opérateurs nombreux et divers, elle intéresse à la fois les gestionnaires de ces équipements et le grand public. La consolidation du prototype de guichet régional des équipements publics collectifs (EquipCo), basé sur une nomenclature régionale coconstruite par des acteurs publics et des associations citoyennes, sera assurée à la fois par les gestionnaires et les usagers (*crowdsourcing*).

L'exemple du CRIGE Provence-Alpes-Côte d'Azur atteste du rôle important joué par les plateformes régionales en matière d'information géographique, notamment au regard de l'évolution des pratiques cartographiques des acteurs locaux, qu'il s'agisse d'organismes publics, d'entreprises, de chercheurs, ou encore du monde associatif.

L'accès simplifié à un stock de plus en plus important de données de qualité, régulièrement mises à jour et accessibles *via* un guichet unique, l'accompagnement par des experts pour pouvoir les intégrer dans des outils simples et nouveaux, et la possibilité d'échanger les pratiques et expériences relatives à leur mise en valeur au profit d'un éventail d'utilisateurs large et varié participent très fortement à l'évolution des méthodes et des productions cartographiques ainsi qu'à celle de leurs usages.

Cette mise en relation de tous les types d'acteurs au sein un lieu neutre et ouvert, alliée à l'évolution des outils et techniques de production et de consommation de données géographiques et de produits dérivés, permet une modernisation de l'ensemble des métiers de l'aménagement du territoire, accélère le développement de projets innovants et répond aux attentes de citoyens soucieux d'améliorer leur connaissance et leur pratique du territoire.

(6) Union régionale des communes forestières (URACOFOR), direction régionale de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Forêt (DRAAF), Office national des forêts (ONF), le Centre régional de la propriété forestière (CRPF), Institut technologique Forêt Cellulose Bois Ameublement (FCBA).

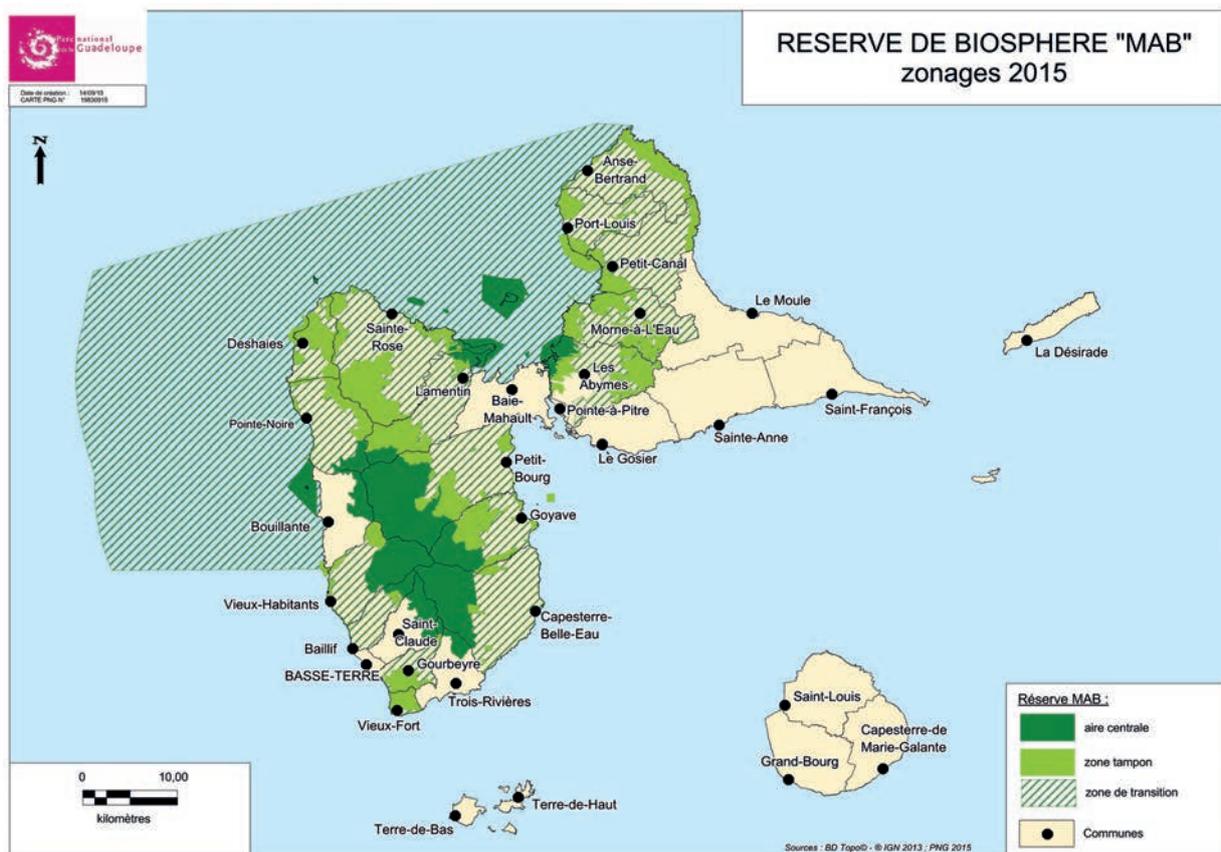
# KaruGéo : le portail d'information géographique de la Guadeloupe, un projet de territoire

Par Anouk ROBILLARD  
KaruGéo

Avec le développement d'Internet et le besoin clairement exprimé à l'échelle internationale de faciliter l'accès, l'utilisation et le partage de données géographiques, dans l'optique d'une transparence de l'action publique, nous voyons émerger, depuis près de vingt ans, des Infrastructures de données géographiques (IDG), dont le circuit de diffusion de l'information s'étend bien « au-delà des frontières de leurs organisations d'origine » (Gautreau et Noucher, 2013).

En créant une IDG régionale, les acteurs guadeloupéens ont montré leur volonté de participer à la coconstruction de la circulation de l'information géographique à différentes échelles.

C'est ainsi qu'en 2016, KaruGéo – le portail d'information géographique de la Guadeloupe – voit le jour. En mutualisant leurs moyens, l'État, le Conseil régional, le Conseil départemental et le Parc national de la Guadeloupe, proposent, *via* un outil Web, un ensemble de fonctionnalités permettant la construction et la circulation du patrimoine de données régionales « socles » et/ou « métiers ».



Réserve de biosphère de la Guadeloupe s'inscrivant dans le cadre du programme de l'UNESCO sur l'Homme et la biosphère (MAB - Man and the Biosphere Programme), zonages réalisés en 2015.

« KaruGéo, le portail d'information géographique de la Guadeloupe, voit le jour en 2016. »

## Contexte réglementaire : la démocratisation des données géographiques

La démocratisation de l'accès à l'information géographique est portée, en tout premier lieu, par la loi CADA du 17 juillet 1978, dont l'objectif est de faciliter l'accès aux documents administratifs à toute personne qui en fait la demande. Elle a été ensuite complétée par une série d'ordonnances venant conforter cette idée de démocratisation, tant en matière d'accès et de réutilisation des données considérées qu'en matière de tarification.

L'accès pour tous aux documents administratifs est donc un objectif porté par la loi CADA, laquelle est complétée par la directive PSI<sup>(1)</sup> (*public sector information*) de 2003, qui introduit la notion de réutilisation des informations publiques. La transposition de cette directive européenne en droit français, le 6 juin 2005<sup>(2)</sup>, ainsi que, quelques mois plus tard, l'adoption du décret<sup>(3)</sup> du 30 décembre 2005 ouvrant la possibilité de la réutilisation des données publiques à des fins commerciales<sup>(4)</sup>, viennent poser les premiers jalons législatifs de l'*open data*.

C'est dans ce contexte réglementaire d'ouverture des données qu'est adoptée par le Parlement européen la « directive INSPIRE<sup>(5)</sup> ». L'ambition de ce texte est d'« établir en Europe une infrastructure de données géographiques pour assurer l'interopérabilité entre les bases de données et faciliter la diffusion, la disponibilité, l'utilisation et la réutilisation de l'information géographique en Europe » (CNIG, 2018<sup>(6)</sup>). Elle permet la mise à la disposition des décideurs et des citoyens de données géographiques fiables et de qualité. Transposée en droit français par l'ordonnance du 21 octobre 2010, cette réponse européenne à la structuration de l'information géographique est concrétisée au niveau national par les Infrastructures de données géographiques<sup>(7)</sup>, que sont le Géocatalogue et le Géoportail. Noucher (2013) définit l'échelon régional comme le maillon essentiel de la production et du partage de l'information géographique, il vient compléter les dispositifs nationaux et européens mis en place.

### KaruGéo, une réponse régionale à la directive INSPIRE

La mise en place d'une IDG en Guadeloupe est portée par l'État, le Conseil régional, le Conseil départemental et le Parc national de la Guadeloupe à travers l'outil KaruGéo, dont les objectifs sont :

- le développement d'un partenariat régional entre les différents acteurs impliqués dans l'information géographique ;
- l'acquisition, dans le respect du Code des marchés publics et des droits d'auteur, de droits d'utilisation et de reproduction de bases de données et de données géographiques destinées à être mises à la disposition des adhérents à l'infrastructure, en adaptant le format de diffusion aux différents publics visés ;
- l'articulation avec les dispositifs déjà existants en matière de production et de diffusion de données métiers ;
- l'accompagnement des adhérents producteurs de données ;

- la valorisation de l'information géographique auprès des acteurs publics et privés ainsi que du grand public.

Cette plateforme régionale, lancée en 2016 sous progiciel Prodigé, permet de centraliser l'information géographique produite sur le territoire guadeloupéen, de créer et cataloguer les métadonnées correspondantes, de produire des cartes et de les partager avec l'ensemble des acteurs, décideurs, administrations, associations..., mais aussi, plus largement, avec le grand public. En centralisant les données et en les partageant librement, elle rompt avec les systèmes préexistants reposant sur des solutions SIG internes qui fonctionnaient en « silos » (Noucher, 2013), ce qui rendait la donnée peu accessible et donc difficilement partageable. Elle contribue ainsi à l'organisation de l'information géographique aux échelles régionale et nationale et, plus largement, à l'échelle européenne, à travers des outils de moissonnage<sup>(8)</sup> en cours de structuration.

Ce projet s'articule autour d'un « site portail ». Il propose les fonctionnalités propres aux plateformes Prodigé que l'on retrouve sur le territoire national, à savoir : consultation des fiches métadonnées, visualisation des données, production de cartes interactives (superposition de données thématiques pour répondre à une problématique fléchée), cartes statiques, téléchargements (directs ou *via* des services standardisés OGC<sup>(9)</sup>).

À ce jour, quarante structures, d'horizons divers<sup>(10)</sup>, ont adhéré, par la signature d'une convention, à ce projet participatif et ont déjà implémenté sur la plateforme près de cinq cents jeux de données, soit cent quatre-vingt-

(1) Directive PSI (public sector information) – Directive 2003/98/CE du Parlement européen du 17 novembre 2003.

(2) Ordonnance n°2005-650 du 6 juin 2005.

(3) Décret n°2005-1755 du 30 décembre 2005.

(4) Il faudra attendre la révision, en 2013, de la directive PSI, puis sa transposition en droit français via la loi Valter du 28 décembre 2015, pour voir préciser que l'accessibilité et la réutilisation, tant pour des usages commerciaux que non commerciaux, sont exigées pour tous documents entrant dans le champ d'application de la directive précitée (hors données des services publics industriels et commerciaux).

(5) La directive européenne 2007/2/CE du 14 mars 2007, dite directive INSPIRE, vise à établir une infrastructure d'information géographique dans la Communauté européenne pour favoriser la protection de l'environnement.

(6) Conseil national de l'information géographique.

(7) « Une infrastructure de données géographiques (IDG) est une structure de mutualisation, d'échange et de diffusion de données géographiques à l'échelle d'un territoire et au bénéfice d'acteurs publics, et indirectement des citoyens » (AFIGÉO, 2018).

(8) Mécanisme permettant de collecter des métadonnées figurant dans un catalogue distant et de les stocker sur le nœud local pour un accès plus rapide (Géosource).

(9) Open Geospatial Consortium est un consortium international qui promeut des standards ouverts permettant de faciliter les échanges de données géographiques. Plusieurs standards OGC existent : WMS, WFS, CSW...

(10) Des établissements publics de coopération intercommunale (EPCI) – communauté d'agglomération et communauté de communes –, des communes, des structures publiques ou assurant des missions de service public, telles que l'Agence des 50 pas géométriques, l'Agence régionale de santé (ARS), le Conservatoire du littoral, l'Établissement public foncier de Guadeloupe, Routes de Guadeloupe, la Chambre de Commerce et d'Industrie, des centres de recherche ; le BRGM, le CIRAD, l'INRA, des syndicats intercommunaux de l'eau, des associations...

dix-huit services et soixante-seize cartes. Plus de trois cents jeux de données sont accessibles, en visualisation et en téléchargement, au grand public. Le reste des données implémentées, lesquelles sont considérées comme des données sensibles ou propriétaires (par exemple, les référentiels IGN), sont uniquement consultables et téléchargeables par les adhérents *via* leur login et leur profil d'utilisateur.

Les données sont regroupées dans des rubriques thématiques. La Figure 1 ci-après liste uniquement les thématiques aujourd'hui alimentées en données. Les thématiques « Environnement », « Référentiels (IGN) », « Sciences et techniques », « Aménagement/Logement » et « Agriculture » sont largement représentées, au contraire d'autres (par exemple, « Réseau », « Économie/Finances ») qui sont sous-alimentées. Pour autant, quantité ne veut pas dire qualité. De manière générale, un grand nombre de données implémentées, hormis celles de la rubrique « Référentiels (IGN) », sont anciennes et souffrent donc d'une absence de mise à jour en continu, et d'un défaut de structuration, ce qui limite fortement leur fiabilité et leur mobilisation à terme.

Cette tendance s'explique en partie par l'absence d'une véritable culture SIG au niveau régional. En effet, peu de structures possèdent aujourd'hui des compétences SIG ou montrent un intérêt pour cette question. La culture de la carte papier reste largement ancrée dans les pratiques des institutions, notamment des collectivités locales.

À ce jour, les principaux contributeurs sont : la DEAL <sup>(11)</sup> Guadeloupe, qui a pendant longtemps été quasiment la seule à assurer la production de données géographiques à l'échelle régionale et la diffusion des données issues de l'IGN – ce qui explique la forte représentation des thématiques « Environnement », « Aménagement/Logement », « Sciences et technique », « Référentiels (IGN) », qui recouvrent des compétences propres aux DEAL – ; le Conseil départemental, la DAAF <sup>(12)</sup> Guadeloupe et le Parc national de la Guadeloupe. Parties prenantes de KaruGéo, ces structures mettent leurs compétences et leur patrimoine de données à la disposition d'un réseau d'acteurs constitué de collectivités et structures publiques, d'as-

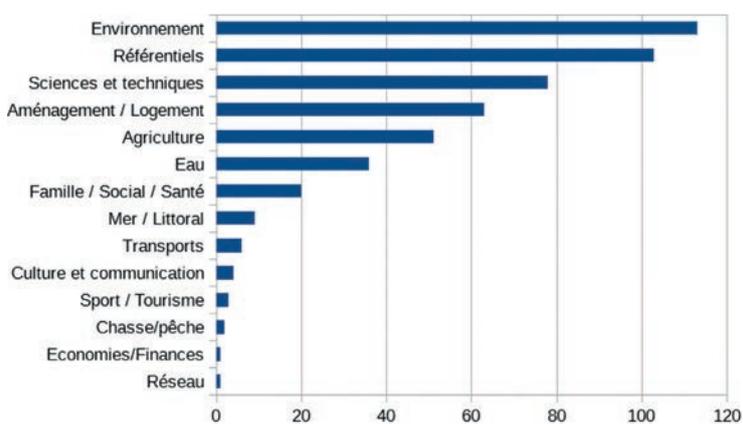


Figure 1 : Répartition des jeux de données par rubriques thématiques (données KaruGéo, 2017).

sociations... Pour autant, elles ne peuvent à elles seules répondre à l'ensemble des besoins exprimés en matière d'information géographique. Une implication plus large des autres structures est nécessaire. Pour amorcer une véritable dynamique, l'animation d'un réseau d'acteurs est primordiale. L'enjeu est d'engager les contributeurs actuels à être plus actifs et d'inciter d'autres établissements à rejoindre cette démarche.

## Enclencher une dynamique de production de données géographiques sur nos territoires

Sur ce territoire exigu de près de 1 700 km<sup>2</sup> (Guadeloupe continentale et dépendances), situé dans la zone caraïbe et distant de plus de 6 700 km de l'Hexagone, les enjeux environnementaux (*hot spot* de la biodiversité), de santé publique (effets indésirables du chlordécone (un pesticide) sur la santé, maladie vectorielle, etc.), d'aménagement, de gestion des risques, de fiscalité et de développement économique, sont importants et complexes. Les acteurs ont donc besoin de données géographiques « socles <sup>(13)</sup> » et « métiers <sup>(14)</sup> » qui soient structurées et fiables, afin de pouvoir mener à bien les missions de service public qui sont les leurs.

Or, le territoire guadeloupéen présente aujourd'hui des lacunes importantes en termes de bases de données géographiques : problématiques de mise à jour des données, données hétérogènes non consolidées, manque d'exhaustivité des traitements thématiques...

Soucieux d'impulser une nouvelle dynamique en réponse à ces carences, KaruGéo a profité de son positionnement pour animer des communautés de pratiques « métiers » en cohérence avec les spécificités et les besoins locaux. Pour ce faire, l'offre classique de Prodiges a été complétée par l'ajout de fonctionnalités de gestion de contenus éditoriaux et par la mise en place d'espaces de travail collaboratif. L'objectif est d'informer et de fédérer un réseau d'acteurs pour structurer et organiser la production de données géographiques existantes ou futures, et de pouvoir répondre aux problématiques régionales et nationales.

À ce jour, la communauté KaruGéo collabore, sous la forme d'un groupe de travail, à l'élaboration de deux référentiels d'importance portant sur des thématiques lacunaires, voire inexistantes : le référentiel « Adressage », qui est essentiel pour répondre à des questions d'ordre fiscal, de facturation, à des besoins en matière de secours, et le référentiel « Occupation des sols à grande échelle en deux dimensions », qui a vocation à regrouper des don-

(11) DEAL : direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement.

(12) DAAF : direction de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt.

(13) Donnée « socle » correspond à des données de base, des « fonds de carte » produits par un opérateur dont c'est la mission principale, l'IGN par exemple (Faure-Muntian, 2018).

(14) Donnée « métier » désigne les données produites pour les besoins de l'exécution d'une mission, par un opérateur dont ce n'est pas la spécialité (Faure-Muntian, 2018).

nées indispensables à l'analyse des politiques publiques mises en œuvre, comme mesurer la consommation d'espace, protéger la biodiversité, gérer les littoraux, etc.

Ces groupes thématiques sont coordonnés et pilotés par KaruGéo à l'initiative de certains de ses membres. La coordination se veut résolument ouverte afin d'optimiser la réussite des projets. Les membres ont exprimé leurs attentes et leurs besoins. La compréhension commune du projet a permis de définir des objectifs partagés. Les actions sont en cours de mise en œuvre.

En complément, des groupes de travail restreints sont mis en place pour accompagner les collectivités, notamment dans la rédaction de leurs cahiers des charges techniques.

### Un premier pas vers l'Open Data

L'Open Data, ou « données ouvertes » en français, sont des données dont l'accès, l'exploitation et la réutilisation sont libres de droit. Selon l'Open Knowledge Foundation<sup>(15)</sup>, « les critères essentiels de l'Open Data sont la disponibilité, la réutilisation et la distribution et la participation universelle ». La notion d'interopérabilité – c'est-à-dire la capacité d'au moins deux systèmes à pouvoir échanger entre eux – constitue l'« essence [même] de l'Open Data » (Bastien, 2017). La question des normes est donc primordiale.

L'existence de KaruGéo traduit en elle-même la volonté des acteurs guadeloupéens de s'inscrire dans la dynamique de l'Open Data. La solution Web Prodige, par ses fonctionnalités, répond à ces grands principes. Une interface de cartographie dynamique permet à tous les utilisateurs de visualiser et de télécharger les données publiques<sup>(16)</sup> de la plateforme. Les interactions avec les autres outils régionaux (ceux du Conseil départemental) et nationaux (Géocatalogue, Géoportail de l'urbanisme), que permettront les outils de moissonnage en cours d'élaboration, faciliteront la diffusion et le partage du patrimoine régional de données géographiques.

Les outils existent déjà. L'effort fourni par les contributeurs actuels doit monter en puissance et amener à une implication plus importante de tous les acteurs du territoire, tant dans la production quantitative et qualitative des données que dans leur mise à disposition qui reste à ce jour encore trop lacunaire, voire inexistante selon les domaines. L'ouverture des données n'est pas encore culturellement intégrée dans les pratiques. Les blocages sont multiples : quels usages sera-t-il fait des données ? Par qui ? Quels sont les risques ? Quels intérêts sont en jeu ? Pourquoi partager librement une donnée alors que l'engagement financier n'est supporté que par un seul acteur ? Autant de questions qui ressortent des échanges intervenus et qui constituent autant de freins au processus d'appropriation.

Des actions vont être engagées afin, d'une part, de répondre au contexte réglementaire de la mise à disposition effective des données INSPIRE – pour une transparence de l'action publique – et, d'autre part, de sensibiliser les différents acteurs sur les nouvelles opportunités de développement économique offertes par les nouvelles technologies faisant appel aux données ouvertes.

Un changement de paradigme est donc aujourd'hui à opérer. La plus-value de la donnée n'est pas liée à sa rétention, mais, bien au contraire, à sa libre circulation et à sa réutilisation, et ce même dans la sphère privée.

### Bibliographie

GAUTREAU P. & NOUCHER M. (2013), « Gouvernance informationnelle de l'environnement et partage en ligne des données publiques. Politiques et pratiques de l'Open Data environnemental (Amérique du Sud-France) », *Netcom. Réseaux, communication et territoires*, série/n°27-1/2, pp. 5-21.

NOUCHER M. (2013), « Infrastructures de données géographiques et flux d'informations environnementales. De l'outil à l'objet de recherche », *Netcom. Réseaux, communication et territoires*, série/n°27-1/2, pp. 120-147.

GEORIS-CREUSEVEAU J., GOURMELON F. & CLARAMUNT C. (2015), « Infrastructures de données géographiques : quelle contribution à la gestion intégrée des zones côtières françaises ? », *VertigO, la revue électronique en sciences de l'environnement*, vol. 15, n°1.

GONCALVES D. & RUFAT S. (2016), « Open data et droit de la donnée : les collectivités à l'épreuve des réglementations européennes », *Cybergeo: European Journal of Geography, Web and Science/n°787*.

LINARES S., MOURGUIART C. & RUELLE B. (2013), « GéoGuyane : plateforme mutualisée pour le partage de l'information géographique en Guyane », *Netcom. Réseaux, communication et territoires*, série/n°27-1/2, pp. 237-244.

FAURE-MUNTIAN V. (2018), « Les données géographiques souveraines – Rapport au gouvernement », Paris, ministère de la Transition écologique et solidaire.

BASTIEN L. (2017), « Open Data définition : qu'est-ce que c'est ? À quoi ça sert ? », *Le Big Data – Le magazine Cloud & Big Data* [En ligne], novembre 2017, consulté le 14 décembre 2018, disponible sur : <https://www.lebigdata.fr/open-data-definition>

(15) Open Knowledge Foundation : une association promouvant l'Open Data et la culture libre en France et à l'international.

(16) Annexes de la directive INSPIRE.

# La cartographie numérique, un instrument de progrès ou de fracture sociale ?

Par Claire TUTENUIT

Présidente de l'association Le Ruban Vert ([www.lerubanvert.net](http://www.lerubanvert.net)) et déléguée générale de l'Association française des Entreprises pour l'Environnement (EpE)

À première vue, la cartographie numérique est un outil fantastique. Alors que la plupart des cartes papier sont obsolètes à peine éditées, qu'elles ne sont jamais au bon format ou à l'échelle pertinente, la cartographie numérique se veut répondre à toutes ces difficultés d'accès. D'un simple clic, chacun peut accéder à l'information cartographiée, géolocalisée, à jour, et fournie par différents prestataires de services, publics ou privés.

En pratique, pourtant, ce n'est pas aussi simple...

Il est un fait qu'en ce qui concerne la fourniture de cartes commerciales, c'est extrêmement simple : en quelques clics, en effet, Google Maps permet de trouver le restaurant le plus proche, voire le restaurant chinois ou éthiopien se situant à proximité, et ce n'est qu'en de rares occasions qu'une adresse ne figure pas sur le site correspondant à ce service. De même Waze ou Sytadin aident à localiser les embouteillages, à choisir l'itinéraire le plus adapté, et guident votre véhicule plus sûrement que le meilleur navigateur physique, ou même qu'un chauffeur de taxi expérimenté.

De même, les cartes permettent de localiser, pour chaque chaîne commerciale, le magasin le plus proche, et même de vous guider jusqu'à lui.

Les difficultés commencent pour les cartes qui relèvent du service public et donnent accès à divers documents administratifs : plans d'occupation des sols, schémas régionaux de cohérence écologique, ZNIEFF (zones naturelles d'intérêt écologique, faunistique et floristique), cartes des espèces menacées, cartes des pratiques agricoles servant à l'élaboration de la politique agricole, géoportails précisant en principe tout ce qu'il y a à savoir sur une parcelle donnée, cartes montrant telle ou telle contrainte d'occupation du sol. Le profane qui essaie d'utiliser ces cartes administratives se heurte à différentes difficultés. C'est en particulier le cas des acteurs intervenant dans le domaine de l'environnement, qui interfère avec nombre d'autres secteurs : agriculture, urbanisme, eaux, géologie, écologie. Une association d'environnement, aussi petite soit-elle, a l'obligation de se familiariser avec tous les outils numériques mis en place pour gérer ces sujets...

De même que nul n'est censé ignorer la loi, nul n'est censé ignorer quelle carte représente quelle donnée. Or, toute administration en charge d'un sujet a vocation à recourir à la cartographie. L'utilisateur se trouve confronté à sa méconnaissance des cartes, de leurs émetteurs, du propriétaire-fabricant de telle ou telle carte et des sites Internet où il peut trouver l'information pertinente.

Le site Géoportail créé par l'IGN, qui est, en principe, la référence unique, est bien fait, mais il est parfois difficile d'usage. Ainsi, en dépit de nombreuses tentatives, je n'ai jamais réussi à trouver comment imprimer une partie seulement d'une carte affichée à l'écran : la partie imprimée est toujours différente de celle sélectionnée à l'écran. Pourquoi de telles difficultés ? D'autres difficultés techniques peuvent ça et là se présenter...

Un autre inconvénient spécifique à la cartographie numérique est qu'elle n'a pas de mémoire : la carte est disponible et consultable à un instant donné, mais il n'est pas possible de la télécharger et donc de la sauvegarder pour pouvoir la comparer avec une version ultérieure ; l'exemple de la carte des cours d'eau et des bandes-tampons que les agriculteurs doivent aménager de chaque côté d'un cours d'eau (dites BCAE, bonnes conditions agricoles et environnementales) est éclairant. Le ministère de l'Agriculture publie chaque année un décret faisant référence à une carte. Établie au niveau de chaque département, cette carte représente les nouvelles bandes BCAE à respecter à un moment donné, mais sans indiquer les changements apportés par rapport à la version précédente : aux acteurs de les trouver par comparaison avec la carte de l'année précédente – laquelle n'est plus ac-

cessible ! De plus, cette carte des BCAE (se connecter à [http://carto.geo-ide.application.developpement-durable.gouv.fr/1271/CC\\_CE\\_201708.map](http://carto.geo-ide.application.developpement-durable.gouv.fr/1271/CC_CE_201708.map), et sélectionner échelle 1/10 000) s'affiche sur un fond blanc ne permettant pas de repérer précisément les tracés concernés, sauf si l'on connaît par cœur la carte IGN locale – les professionnels ont peut-être la capacité à fusionner des cartes, mais pas une association de terrain. Les BCAE ne sont pas, à ma connaissance, intégrées au Géoportail, ni aux PLU ou aux PLUi. Même si l'option paraît offerte, il n'est pas possible de télécharger la carte pour pouvoir la conserver en mémoire.

Un acteur de terrain, que ce soit un agriculteur ou une association, ne peut donc pas se forger une opinion d'ensemble sur l'évolution de la politique des BCAE.

Cette gestion des cartes est allée de pair avec un autre changement cartographique d'importance : la révision de ce qui s'appelle la cartographie des cours d'eau. Les cartes IGN comportaient traditionnellement des tracés pleins (cours d'eau permanents) et des tracés en pointillés (correspondant aux cours d'eau intermittents). Ces cours d'eau intermittents ont fait l'objet d'un déclassement quasi systématique par leur requalification en « non-cours d'eau », la carte électronique des cours d'eau s'est ainsi trouvée d'un coup amputée de nombreux tracés correspondant à des fonds de vallons, là où les écoulements sont en effet intermittents. De ce fait, la carte des BCAE a été revue l'année suivante, supprimant toutes les obligations de constitution de bandes-tampons autour de ces zones d'écoulement privilégié – puisque tel est le nom poétique qui leur est donné en matière hydrologique.

Les acteurs de terrain se sont trouvés dès lors devant des cartes difficiles à interpréter : où sont les BCAE ? Les bandes-tampons ont-elles disparu parce qu'elles bordaient des « non-cours d'eau », ou pour d'autres raisons ? Comme la carte publiée par le ministère de l'Agriculture ne comporte pas d'explication, mais seulement la représentation linéaire des BCAE, cela a suscité beaucoup de réclamations auprès des DDT, voire généré de nombreux contentieux. Cela s'est aussi traduit par beaucoup de changements méconnus de la plupart des citoyens, ceux-ci n'ayant pas été à même d'identifier les changements demandés par les agriculteurs ou les Chambres d'agriculture – seuls les services compétents et les acteurs reconnus (y compris bien sûr certaines associations) étant consultés.

Cela amène à un questionnement sur la démocratie : comment le citoyen peut-il suivre l'évolution des décisions administratives quand il n'a pas la possibilité d'en assurer la traçabilité par rapport à la représentation graphique qu'il avait consultée auparavant, ni la faculté de se reporter à celle-ci ?

Qui est responsable de la production de la carte ? De son récolement avec la carte IGN ou le Géoportail ? De sa modification ? Les cartes numériques comportent rarement ces informations.

Cet exemple montre aussi un changement profond dans les modes d'action des citoyens : les informations digi-

tales sont essentiellement accessibles à des professionnels qualifiés. Dans le cas de la carte des BCAE évoqué ci-dessus, une seule personne au sein des équipes d'une DDT est capable de préparer électroniquement les arrêtés ministériels. Les autres sont seulement autorisées à les lire, ils n'en sont pas les administrateurs. Du côté des interlocuteurs de l'administration (collectivités locales, agriculteurs ou associations), la professionnalisation ne peut être du même niveau, pour des raisons de coût pour les acteurs précités. L'asymétrie dans l'accès et la compréhension des informations se sont significativement accrues par rapport à la carte papier IGN.

Indirectement, la digitalisation incite aussi l'administration à complexifier les données et ses décisions. Dans l'exemple précité, il reste des cours d'eau intermittents (alimentés en eau plus de six mois par an), mais il y a aussi dans certains cas des BCAE résiduels autour de zones d'écoulement privilégié estampillées « non-cours d'eau ». La carte des cours d'eau établie par le MTES et l'IGN et celle des BCAE produite par le ministère de l'Agriculture ont commencé à diverger et vont sans doute continuer à le faire, puisque chacun d'eux a sa propre cartographie, applique une réglementation différente et se préoccupe peu des problèmes d'interface avec les autres réglementations. Où la synthèse par parcelle sera-t-elle encore accessible ? Qui vérifiera la cohérence et fera les arbitrages, alors que le Préfet, lui-même, n'a pas de lecture directe des problèmes ? La décision a de grands risques d'être prise sur la base de critères purement politiques, sans aller au fond des enjeux.

Les mêmes divergences peuvent être observées à différents niveaux de la décision politique. Géoportail est un site national : les collectivités locales ont-elles la capacité de le modifier ? Quelle est la procédure de correction des erreurs ? Quels sont les délais de prise en compte des modifications demandées par les collectivités locales, par exemple suite à l'adoption d'un PLUi ? Les cartes numériques, contrairement aux cartes papier, ne sont pas datées, la traçabilité de leurs évolutions n'est donc pas assurée. Si elle l'était, l'ensemble serait encore plus complexe et, sans doute, encore moins accessible pour tout un chacun.

L'incompatibilité entre les référentiels est un autre problème. Géoportail est un outil bien pratique pour représenter le parcellaire, on le sait. En revanche, les références cadastrales des parcelles ne sont pas incluses dans le site. Or, toute demande déposée auprès des services d'enregistrement au sujet d'une parcelle ne l'est pas par référence au numéro de parcelle figurant sur Géoportail, mais sur la base des « références cadastrales », lesquelles sont inaccessibles sur Géoportail. Pourquoi ?

Les cartes numériques reflètent-elles fidèlement la réalité ?

La réponse à cette question dépend de la procédure encadrant la mise à jour des cartes. Comment celle-ci est-elle élaborée ? On comprend que les différents acteurs administratifs doivent communiquer régulièrement les informations administratives permettant d'actualiser les

cartes IGN ou le Géoportail. Pourtant, certains changements continuent d'être apportés en dehors de tout respect des procédures : comblement de mares, changement d'affectation d'un terrain... Qui s'en rend compte ? La numérisation permet-elle une actualisation plus rapide ou, au contraire, celle-ci reste-elle occasionnelle ?

En fin de compte, la cartographie numérique a des points communs avec la cartographie papier : sa non-traçabilité et l'arbitraire apparent des modifications décidées par l'administration.

Elle a également d'autres défauts :

- multiplicité des fonds de carte et divergences entre les cartes établies par les différentes administrations, non-récolement entre les fonds de carte,
- instabilité, avec des évolutions plus rapides que pour les cartes papier,
- inaccessibilité (même parfois en lecture) pour les utilisateurs non professionnels,
- tendance à une complexification permise par cette digitalisation,
- éloignement par rapport aux réalités du terrain.

Ces défauts pourraient-ils être corrigés ? Sous l'impulsion de quelle autorité ?

En conclusion, je dirai que la cartographie numérique, ou plutôt les cartographies numériques, sont le reflet de notre société ; alors que les technologies sur lesquelles elle est fondée auraient permis de résoudre les difficultés évoquées ci-dessus, voire de les éviter, elles n'ont malheureusement pas été utilisées pour ce faire, et l'organisation administrative nécessaire pour en assurer la coordination n'a pas été mise en place. Il en résulte une diversité, voire une multiplicité similaire à celle de l'administration française, avec une différence par rapport à une gestion assurée par des personnes physiques : les administrations qui ont mis en place les différents systèmes informatiques ne sont pas capables d'expliquer aux usa-

gers les raisons des dysfonctionnements observés. Les services, dont une bonne partie des ressources est mobilisée par l'informatique, n'ont guère de temps à consacrer aux citoyens. Ceux-ci sont donc confrontés à cette mosaïque de cartographies et systèmes non communicants et non compatibles entre eux, sans mode d'emploi pour permettre une compréhension des interférences ou des incohérences observées. Avant même d'avoir l'ambition de les surmonter, il faut pour l'utilisateur faire déjà beaucoup d'efforts pour les repérer en plus de ceux à déployer pour accéder aux différentes cartographies.

Osant un résumé un peu caricatural, je dirai que la cartographie numérique est aujourd'hui un mélange de Kafka, de Feydeau et de fracture numérique. Si le monde de l'informatique y gagne, les actions réelles y perdent, car ce sont autant de ressources immobilisées (au détriment, par exemple, d'actions en faveur de l'environnement). En général, le citoyen s'y perd, sauf s'il est aidé d'experts en cartographie digitale et de lobbyistes capables d'aller dialoguer avec le Préfet pour obtenir une interprétation, à son avantage, des ambiguïtés et des contradictions de la réglementation. Le citoyen normal perd beaucoup de temps et d'énergie quand il essaie de s'en servir. Il ne peut en concevoir que de l'amertume, notamment s'il est du mauvais côté de la fracture numérique.

Plus profondément, cela pose la question de la démocratie. Quel accès a le citoyen normal aux débats sur l'usage des sols ? Il est maintenu dans un état d'infériorité technique, marqué en général par son incompréhension des enjeux, dont il doit se faire, seul, une idée, et de son impuissance à s'exprimer – sauf à se constituer en groupes quasi professionnels qui dépendent de ressources financières elles aussi contrôlées par de plus puissants que lui.

Quel avenir pour cette cartographie numérique ? À chacun de s'en faire sa propre idée ! La jeune génération vivra peut-être mieux l'aspect technique, mais les incohérences internes au secteur public resteront.

# Comment mettre la *Blockchain* au service de la mise en œuvre de l'Accord de Paris sur le climat

Par Patrice GEOFFRON

Université Paris-Dauphine, PSL, Laboratoire d'Économie de Dauphine (LEDA) UMR-CNRS-IRD

et Stéphane VOISIN

Institut Louis Bachelier, PSL

Les technologies de *Blockchain* permettent le stockage et la transmission d'informations, de manière transparente et sécurisée et sans l'intervention d'un organe central de contrôle. Le champ d'expérimentation de ces technologies est vaste, notamment leur mobilisation au service de la lutte contre le changement climatique. Dans ce contexte, nous discutons dans cet article le potentiel de ces technologies pour accélérer la mise en œuvre de l'Accord de Paris sur le climat, en tant qu'elles peuvent permettre de créer de la transparence et d'accroître la vérifiabilité des données relatives aux émissions de gaz à effet de serre et l'interopérabilité d'initiatives prises localement dans ce domaine. Nous présentons, dans ce cadre, un « prototype » de registre du carbone basé sur la *Blockchain* et développé en partenariat avec la Caisse des Dépôts, ainsi qu'avec la coalition des initiatives de *Blockchain* climatique (Climate Chain Coalition), soutenue par l'ONU Climat, et que nous avons concouru à initier durant le One Planet Summit qui s'est tenu à Paris, en décembre 2017.

Depuis une dizaine d'années, le paysage fiduciaire s'est enrichi de monnaies qualifiées de « crypto », au premier rang desquelles figure le Bitcoin. Né en 2008, à l'amorce d'une grande crise qui allait fissurer la confiance dans les institutions financières, ces monnaies (Ethereum, Ripple, Litecoin, IOTA, et bien d'autres encore) se singularisent moins par leur virtualité (caractère assez banal dans le monde numérique), que par le fait qu'elles sont émises sans banque centrale, tout en étant interchangeables avec l'euro, le dollar, le yen...

Elles ont en commun de reposer sur la *Blockchain* qui est une « technologie de stockage et de transmission d'informations, [de manière] transparente et sécurisée, qui fonctionne sans organe central de contrôle » (selon *Blockchain France*)<sup>(1)</sup>. En d'autres termes, la *Blockchain* constitue un grand registre largement « distribué » (c'est-à-dire dupliqué dans le réseau) : les transactions réalisées de pair-à-pair, sans intervention d'une autorité centrale ou d'un intermédiaire, sont compilées et empilées sous forme de blocs au sein du registre qui contient leur historique.

Les informations contenues dans les blocs (transactions, titres de propriété, contrats divers...) sont protégées par des procédés cryptographiques qui empêchent les utilisateurs de les modifier *a posteriori*. Ces chaînes sont « publiques » (accessibles pour tous) comme dans le cas de Bitcoin, « privées » (soumises à une autorisation préalable) ou bien encore organisées sous forme de « consortiums » (des groupements d'acteurs – des institutions financières, par exemple – qui définissent des règles et des finalités au sein d'un club fermé).

Notre objectif est, dans cet article, de présenter, au travers des nombreuses initiatives et expérimentations mobilisées au service de la transition énergétique, le potentiel de ces technologies pour accélérer la mise en œuvre de l'Accord de Paris sur le climat. Dans ce cadre, nous évoquerons un programme de recherche développé à cette fin<sup>(2)</sup>, lequel a notamment permis de mettre au point un « prototype » de registre du carbone basé sur la *Blockchain* (en partenariat avec la Caisse des Dépôts), et d'être, fin 2017, l'un des initiateurs de la coalition des initiatives de *Blockchain* climatique (Climate Chain Coalition), soutenue par l'ONU Climat.

(1) Plus largement, la *Blockchain* relève des Digital Ledger Technologies (technologies de registres digitaux).

(2) Au sein de l'Institut Louis Bachelier, PSL.

## Instaurer la confiance sans intervention d'un « tiers » dédié : un vaste champ d'applications potentielles au service de la transition environnementale

Les applications potentielles de la *Blockchain* sont très vastes au regard des perspectives et de la diversité des sources de réduction des coûts de transaction et/ou d'amélioration de l'efficacité dans des domaines généralement administrés par des « tiers de confiance » : réserve de valeur, enregistrement et transfert d'actifs (financiers, propriété foncière, propriété industrielle ou intellectuelle...), garantie de traçabilité (*supply chains* dans le secteur de l'agroalimentaire, l'industrie pharmaceutique...), affichage de l'empreinte environnementale (dans les systèmes de transport), exécution automatique de contrats (dans l'assurance, notamment<sup>(3)</sup>), Internet des objets (dans l'espace domestique ou urbain)... Bien qu'aucun retour d'expérience ne permette, dès maintenant, d'évaluer la portée des cas d'usages ou des disruptions, la nécessité, *a minima*, d'adapter produits et processus pour des métiers traditionnellement structurés autour de tiers de confiance (banques, offices notariaux, offices de brevet...) n'est pas à exclure<sup>(4)</sup>.

Les systèmes énergétiques entrent également dans le champ des expérimentations. Des projets-pilotes sont en cours, notamment autour d'une production électrique décentralisée (à base de photovoltaïque) et échangée de pair-à-pair dans le voisinage (un écoquartier, une zone industrielle...). L'objectif est l'émergence de systèmes énergétiques dans lesquels les agents économiques concluent des contrats de fourniture d'énergie de manière automatisée et sans intermédiaire, favorisant ainsi des modes d'autoconsommation collective<sup>(5)</sup>.

Outre les processus de relevé des consommations et de facturation et les opérations de compensation, la *Blockchain* permet également de certifier l'origine verte de l'énergie échangée et d'en encourager le développement. Par exemple, la fondation SolarCoin<sup>(6)</sup> vise à promouvoir la production d'électricité d'origine renouvelable et la constitution de micro-réseaux d'énergie distribuée en récompensant les producteurs d'électricité d'origine solaire par l'attribution de jetons de crypto-monnaie. De nombreux projets s'inscrivent dans des logiques de compensation carbone (Poseidon<sup>(7)</sup>, Climate Seeds<sup>(8)</sup>...), de lutte contre la déforestation (Gainforest<sup>(9)</sup>)... Soulignons enfin que l'usage de « *smart contracts* » peut également s'inscrire dans des logiques d'adaptation aux effets du changement climatique : par exemple, ils peuvent intervenir en tant que supports de services d'assurance paramétriques pour couvrir l'occurrence d'événements météorologiques extrêmes (par exemple, la survenue d'épisodes de gel dans la viticulture<sup>(10)</sup>).

Dans le cadre de la « transition énergétique », les usages de la *Blockchain* exigent de faire preuve de vigilance sur plusieurs points, au premier rang desquels figure la consommation électrique sous-jacente. Schématiquement, l'absence d'un tiers suppose de disposer d'un protocole de validation des informations insérées dans la chaîne qui permette d'établir la confiance. À cette fin, certains protocoles de validation des blocs (d'établissement du « consensus »)

requièrent une grande puissance de calcul informatique qui permet d'apporter une « *proof of work* » (preuve de travail), mais celle-ci induit une consommation électrique élevée : dans le cadre de ce type de protocole, des agents du réseau (dénommés « mineurs ») mobilisent leur puissance de calcul de façon à valider les blocs et sont rémunérés, en retour, en recevant une contrepartie en crypto-monnaie. Les besoins en énergie sont loin d'être négligeables, car ce mode de validation des blocs requiert toute une organisation industrielle reposant sur la constitution de fermes de serveurs destinées au minage<sup>(11)</sup>. Certes, d'autres protocoles peuvent être envisagés, moins énergivores, comme la « *proof of stake* » (preuve d'enjeu) qui indexe la capacité de validation des blocs en fonction de la détention de la crypto-monnaie et non pas de la puissance de calcul. Ajoutons qu'une *Blockchain* privée ou de consortium dans laquelle les utilisateurs sont connus et autorisés n'a pas nécessairement besoin d'un protocole de consensus aussi exigeant (et basé sur la compétition entre les mineurs) que la « *proof of work* », de sorte que l'énergie requise est plus réduite. En pratique, même une *Blockchain* publique pourrait se satisfaire d'un protocole de validation sobre en puissance de calcul à la condition que les utilisateurs fussent connus. Quoi qu'il en soit, il est évident que, dès lors qu'il s'agit d'envisager le déploiement d'une *Blockchain* dans le cadre de la lutte contre le changement climatique, l'énergie nécessaire au dispositif doit être prise en compte (tant en termes de volume que d'empreinte carbone) dans l'analyse de la pertinence du celui-ci<sup>(12)</sup>.

(3) La *Blockchain*, outre des informations relatives à des transactions, peut intégrer des ordres automatiques sous la forme de « *smart contracts* » : insérés dans le code et donc inamovibles, ils permettent de déclencher automatiquement l'exécution de contrats d'assurance en fonction de la survenue d'événements prédéterminés (par exemple, des retards dans le transport aérien).

(4) La nature même de la *Blockchain* peut également menacer les champions du numérique, des intermédiaires puissants organisés en grandes plateformes et qui, dès lors, peuvent également être concernés par ce glissement vers la désintermédiation : sachant que la *Blockchain* connecte à faible coût des agents économiques de « pair-à-pair », ces derniers pourraient envisager d'échanger en direct ce qui fait aujourd'hui l'objet de transactions organisées par des plateformes.

(5) Un cadre d'autoconsommation collective valorise les complémentarités avec des participants (commerces, habitations...), dont les profils d'usages permettent d'échanger de l'énergie (généralement photovoltaïque), la *Blockchain* servant alors à tenir la « *comptabilité* » de ces échanges.

(6) <https://solarcoin.org>

(7) <https://poseidon.eco>

(8) <https://www.climateseed.com>

(9) <https://gainforest.org>

(10) Le projet « Gel et vignes » conduit par Atos et les instituts techniques agricoles (Acta), est un projet qui vise à simplifier le processus d'indemnisation : un *smart contract* est associé à une application mobile qui permet au viticulteur d'envoyer à son assureur une photo des dégâts occasionnés par le gel (en complément de données fournies par Météo France) et de bénéficier ainsi d'une indemnisation très rapide.

(11) En 2019, la consommation électrique de Bitcoin (de l'ordre de 50 TWh) équivaudra à celle de la ville de Singapour.

(12) La consommation énergétique n'est pas le seul sujet d'attention. Le passage à l'échelle constitue également un enjeu : la réplication du registre sur les différents nœuds du réseau peut induire un nombre limité de transactions insérées dans un bloc en un temps donné (7 transactions par seconde pour le Bitcoin, contre 2 000 par seconde pour le réseau VISA).

## Des vertus de la *Blockchain* bien adaptées à la logique sous-jacente à l'Accord de Paris

Au-delà des expérimentations qui viennent d'être évoquées, il convient d'examiner la manière dont la *Blockchain* pourrait accompagner la mise en œuvre de l'Accord de Paris, qui constitue un nouveau cadre de la lutte contre le changement climatique. Une telle interrogation, susceptible d'apparaître comme singulière en première analyse (en présence d'un accord qui lie des États), est en fait assez logique au regard des principes essentiels sur lesquels repose cet Accord.

L'élément essentiel est que les États, parties à l'Accord de Paris, doivent communiquer leurs INCD (*Intentionally Determined Contributions* – contributions volontaires nationales), conformément à son article 4. Cette logique d'engagements volontaires, synonyme d'absence de caractère contraignant, rend absolument indispensable l'existence d'un dispositif crédible de vérification des réalisations : les informations fournies par les États au regard de leurs engagements de réduction des émissions de gaz à effet de serre doivent l'être en suivant des démarches transparentes et être insérées dans un système fiable de comptabilisation : il s'agit du processus de MRV (*measurement, reporting and verification*)<sup>(13)</sup>. En outre, en raison du transfert, à partir de 2020, de près de 100 milliards par an à destination des pays les plus fragiles, comme prévu dans l'Accord, est également nécessaire un suivi des effets de ces flux financiers. Comme ces financements sont destinés à des États ne disposant pas toujours des moyens adaptés pour crédibiliser leurs MRV, un vide institutionnel doit être comblé.

Quel concours peut apporter la *Blockchain* dans ce nouveau cadre stratégique de la lutte contre le changement climatique ? Dès lors que la réussite de l'Accord de Paris est subordonnée à des objectifs de traçabilité, la mise à disposition *via* la *Blockchain* de registres distribués, fiables et infalsifiables présente évidemment un grand intérêt pour crédibiliser les MRV. Par exemple, SouthPole, la IXO Foundation et Gold Standard développent une application *Blockchain*, dont l'objectif est de rationaliser et d'accélérer les procédés de vérification des données fournies pour améliorer la gestion des inventaires de gaz à effet de serre et la génération de crédits carbone<sup>(14)</sup>. Les coûts du MRV peuvent être réduits potentiellement de 90 % par rapport aux procédures usuelles. Un autre intérêt de la *Blockchain* sera de faire émerger des normes de MRV, ubiquitaires et faisant consensus, depuis le bas vers le haut. Car une autre caractéristique essentielle de l'Accord de Paris (contrairement à la logique du protocole de Kyoto) est d'encourager l'engagement d'acteurs non étatiques (villes, régions, ONG, entreprises...), de sorte que la réussite de la stratégie procédera, plus qu'auparavant, d'une dynamique de type « *bottom-up* », dont le *Blockchain* sera un des leviers essentiels.

C'est dans ce contexte que nous avons développé un partenariat avec la Caisse des Dépôts, dont la mission est de gérer le registre français des émissions de gaz à

effet de serre (dans le cadre du marché européen de permis d'émission, l'EU-ETS). L'objectif était de développer un « prototype » permettant de tester la capacité de la *Blockchain* à fournir une infrastructure efficace et peu coûteuse pour accélérer la diffusion des registres du carbone, en particulier ceux des pays en développement. Ce « prototype » a été élaboré en amont de la COP23 et permet de tester une infrastructure pilote de *Blockchain* administrée (sous Ethereum) de manière privée<sup>(15)</sup>. L'ambition de ce prototype est non seulement de montrer qu'il est possible de répliquer, au travers d'une *Blockchain*, les fonctionnalités d'un grand registre européen, mais également de suggérer la possibilité du déploiement d'initiatives au plan local et d'assurer leur interopérabilité.

## Une coalition d'acteurs des *Blockchains* climatiques soutenue par l'ONU Climat

Face à cet impératif de coordonner les initiatives de *Blockchains* climatiques, nous avons été à l'initiative de la constitution d'une coalition à l'issue de la COP 23<sup>(16)</sup>, lors du One Planet Summit qui s'est tenu à Paris, le 12 décembre 2017. Cette Climate Chain Coalition (CCC)<sup>(17)</sup> est soutenue par l'ONU (l'UNFCC en charge des actions onusiennes dans le cadre de la lutte contre le changement climatique) qui voit dans ces technologies de multiples vertus. Elles sont capables :

- « de renforcer le suivi, la notification et la vérification des impacts de l'action climatique,
- d'améliorer la transparence, la traçabilité et la rentabilité de l'action climatique,
- de renforcer la confiance entre les acteurs du climat,
- de rendre les mécanismes d'incitation à l'action climatique accessibles aux plus pauvres,
- de soutenir la mobilisation en faveur de la finance verte. »<sup>(18)</sup>

Cette Climate Chain Coalition, qui regroupe plus d'une centaine d'initiatives privées et publiques, a pour objectif de faire progresser la collaboration entre ses différents membres en les faisant travailler sur des questions d'intérêt commun, d'aider à l'amélioration de l'intégrité

(13) Le MRV s'articule autour de trois tâches : la mesure et la collecte des données et informations sur les émissions, les actions et le soutien (transferts financiers, de connaissances entre les parties) à la réduction des émissions ; le rapport des informations collectées dans des formats normalisés afin de les rendre accessibles et comparables ; la vérification régulière de l'exactitude, de la qualité et de la conformité aux normes et aux processus en vigueur des informations rapportées par des examinateurs certifiés, pour dresser des bilans et tirer des enseignements des procédures.

(14) <https://medium.com/ixo-blog/south-pole-ixo-foundation-and-gold-standard-develop-blockchain-application-for-carbon-credit-b80a484be3ca>

(15) Voir : <http://www.theclimatechain.org>

(16) L'Institut Louis Bachelier fait partie des co-fondateurs du projet, aux côtés de ClimateCHECK (Canada) et de Climate Ledger Initiative (Suisse).

(17) [www.climatechaincoalition.io](http://www.climatechaincoalition.io)

(18) L'ONU soutient la technologie *Blockchain* pour l'action climatique, UNFCCC, 23 janvier 2018.

environnementale et des résultats de l'application des *Blockchains* œuvrant pour le climat, ainsi que de leurs effets en termes de développement. La Charte commune aux membres de la CCC énonce une dizaine de principes, parmi lesquels la recherche de standards communs <sup>(19)</sup>, l'anticipation des risques frauduleux <sup>(20)</sup> et la recherche de protocoles efficaces sur le plan énergétique et sobres en carbone <sup>(21)</sup>.

L'objectif fondamental de la CCC coalition est de coordonner les multiples initiatives et cas d'usages locaux de *Blockchains* climatiques afin de favoriser leur cohérence et leur interopérabilité. Cette interopérabilité est essentielle, car la solution la plus efficace, et de loin la plus réaliste pour atteindre les objectifs de l'Accord de Paris, implique nécessairement la démultiplication des initiatives de terrain, en raison d'engagements étatiques revus à la baisse depuis la COP21 dans le prolongement du désengagement américain et de l'observation, en 2017 et 2018, d'un rebond des émissions mondiales de gaz à effet de serre. La conviction des membres de la coalition est que les écosystèmes qui s'assemblent patiemment présentent un avantage considérable par rapport aux solutions *top-down* : ils sont résilients. Une propriété vertueuse que l'économiste Bernard Lietaer <sup>(22)</sup>, un des artisans-fondateurs de l'Euro, s'est efforcé de démontrer dans le cadre des travaux qu'il a menés pour le compte du Club de Rome. En effet, la *Blockchain* considérée ne présente pas les caractéristiques d'une chaîne qui serait à la merci du moindre maillon faible ou de décisions politiques, comme le protocole de Kyoto en fut la victime, mais bien celle d'une organisation autonome distribuée qui, à l'instar du Web, relève plutôt d'une toile extrêmement résistante, qualité précieuse dans la lutte climatique.

Le foisonnement des projets de *Blockchain* observés au sein de la coalition Climate Chain et au-delà de son périmètre d'action présente aussi l'avantage d'être à l'origine d'une dynamique ascendante qui s'inscrit parfaitement dans l'esprit de l'Accord de Paris : une approche consensuelle basée sur des engagements volontaires, dont on se donne collectivement les moyens de mesurer, voire de récompenser l'impact. Un protocole de solidarité qui ressemble au cahier des charges de la plupart des *Blockchains*. Mais là où l'Accord de Paris lie d'abord les

États qui l'ont ratifié, les *Blockchains* climatiques peuvent en prolonger l'esprit jusqu'aux interstices des réalités sociales des communautés, des régions et surtout des villes et des zones urbaines qui concentreront d'ici à dix ans plus de 70 % des émissions de gaz à effet de serre.

Armées de protocoles capables de connecter entre elles l'ensemble des initiatives de crypto-actifs dédiés au climat (comme le propose la technologie de Bancor <sup>(23)</sup>), les *Blockchains* climatiques dessinent la possibilité de faire émerger de toutes les strates la nouvelle valeur sociale du carbone (que Michel Aglietta appelle de ses vœux <sup>(24)</sup>). Et, ce faisant, de créer l'interopérabilité capable de fournir une image claire de l'empreinte carbone globale et de l'alignement de celle-ci sur la trajectoire fixée par l'Accord de Paris. Un tel schéma bénéficie également d'un avantage politique considérable par rapport aux initiatives centralisées de tarification du carbone : une acceptabilité sociale forte qui est propre aux initiatives ascendantes issues du terrain local et communautaire, et qui recouvre un enjeu majeur : apporter des réponses conciliant à la fois les défis écologiques et les défis sociétaux.

(19) « Nous collaborerons pour établir des normes de base dans le développement d'outils connexes pour étayer l'efficacité des applications des DLT, pour la gouvernance du changement climatique. »

(20) « Nous nous associerons à une stratégie proactive pour identifier et tenter d'atténuer les activités frauduleuses associées à l'application des DLT dans la gouvernance du changement climatique et de la durabilité en général, le cas échéant. »

(21) « En tant qu'organisations soucieuses de l'intégrité environnementale en général et du changement climatique en particulier, nous reconnaissons certains effets négatifs et défis actuels de nombreuses applications DLT (en particulier celles utilisant la Blockchain avec la preuve de travail comme mode de consensus) concernant leurs niveaux de consommation d'énergie et leurs émissions de GES. »

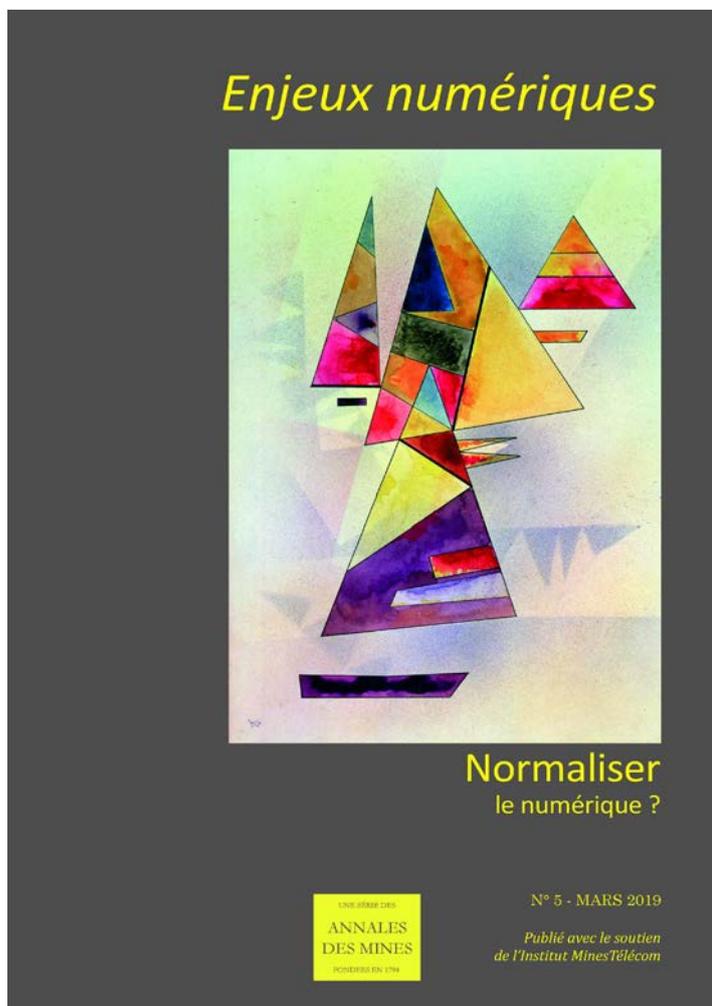
(22) Voir, notamment : "Why Complementary Currencies Are Necessary to Financial Stability: The Scientific Evidence", in From Bitcoin to the Burning Man, The Quest for Identity and Autonomy in a Digital Society, John Clippinger and David Bollier (eds), ID3 and Off The Common Books, 2014.

(23) <https://about.bancor.network/protocol/>

(24) Voir, notamment : « Transformer le régime de croissance », sous la direction de Michel Aglietta, Rapport pour la CDC, 2018.

# ENJEUX NUMÉRIQUES

## Normaliser le numérique ?



### Introduction

Jacques SERRIS et Laurent TOUTAIN

### Les enjeux de la normalisation du numérique

Quel est l'apport d'une norme volontaire dans le domaine du numérique? Pourquoi les acteurs s'y intéressent-ils ?

Olivier PEYRAT et Jean-François LEGENDRE

Ouverture, standardisation technique et regulation

Pierre-Jean BENGHOZI

La standardisation de l'IoT à l'ETSI et l'alliance AIOTI

Patrick GUILLEMIN

Norme numérique et green IT

Amélie BOHAS, Françoise BERTHOUD et Gabrielle FELTIN

Standards et concurrence dans les technologies de communication

Justine BULKAERT et Axel GAUTIER

### Diversité des normes et stratégies des acteurs

La bataille WiFi (IEEE) HiperLan (ETSI)

Philippe JACQUET

5G Standardisation

Achilleas KEMOS, Bernard BARANI and Peter STUCKMANN

La normalisation de l'informatique en nuage (*Cloud computing*)

Cédric SIBEN

La normalisation et le Big Data

Charles HUOT

Normalisation et fréquence

François RANCY

Norme numérique et eSanté

Karima BOURQUARD

La normalisation des systèmes de transport intelligents

Michelle WETTERWALD

Le ePUB dans l'édition numérique, une norme et son adoption en évolution

Chloé GIRARD

Les normes pour l'accessibilité numérique

Armony ALTINIER

L'accessibilité du livre numérique

Luc AUDRAIN

### HORS DOSSIER

Le baromètre 2018 du numérique

Gérard LALLEMENT et Matthias de JOUVENEL

La régulation du droit d'auteur dans l'environnement numérique

Alexandra BENSAMOUN

Mars 2019

Ce numéro a été coordonné par Jacques SERRIS et Laurent TOUTAIN

# Cartography 4.0: Maps for navigation in the 21<sup>st</sup> century

## Preface

Daniel Bursaux, Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN)

## Introduction

Françoise Roure and Didier Pillet, Conseil Général de l'Économie (CGE)

## Designing and making cartography 4.0

**Earth System, an infrastructure research program of data and services on the cutting edge of digital imagery and cartography**

Frédéric Huynh, director of IR Système Terre; Nicolas Baghdadi, IRSTEA, director of the pole Theia; Michel Diament, IPGP, director of the pole ForM@Ter; Nicole Papineau, CNES, director of the pole AERIS; Gilbert Maudire, IFREMER, director of the pole ODATIS; Richard Moreno, CNES, technical director of IR Système Terre; and Pierre Maurel, IRSTEA, in charge of Dinamis

Observe, understand and predict the history, operation and evolution of the Earth system, subject as it is to global changes, is a fundamental topic for research and a necessity for pursuing sustainable development goals. This calls for an interoperable infrastructure to speed up the extraction, analysis, diffusion and intelligent use of data, and for indicators and models derived from national and international systems of observation. Intended for scientists, public officials and innovators, these products and services are accessible via the Internet portals that, used for space missions and observation networks, support sustainable development. Coordinate, federate and optimize the existing set of institutions, arrangements and means are among the major ambitions of the Earth System program (IR Système Terre) with its European and international aspirations.

**A new engine for 3D geospatial data visualization on Géoportail: iTowns**

Mirela Konini, IGN, Alexandre Devaux and Mathieu Brédif, Paris-Est University, LASTIG GEOVIS, IGN, ENSG

Visualization is a user-preferred mode of interaction for geographical information. An effective graphic representation of geographical data is all the more important when the data are massive and diverse, and when users and uses are varied. Moving beyond the 2D visualization on a map printed on paper or displayed on screen, 3D visualization raises new issues. Appropriate tools are needed to handle the volume of data and multiplicity of formats,

and to manage the visualization and styles to be applied as well as interaction and browsing features. The IGN's technological platform for visualizing geographical data in three dimensions on the Web, iTowns, proposes advanced features for interactions in a metrological environment. Initially designed by the IGN's research laboratories for visualizing data from images and LiDAR (images coming from a moving vehicle equipped with sensors), iTowns has evolved and can now be used for immersively browsing a large volume of 3D data on a range of scales from space to ground level. Interfaces are available for manipulating the data. As the 3D visualization engine of Géoportail, iTowns is continually being endowed with new features. Besides 3D visualization for the general public, it can be used to develop professional Web applications for co-visualizing different types of data, annotating them, and then making analyses, measurements, etc.

**The contribution of SIG 4D to a modern cartography for the 21<sup>st</sup> century**

Marie Lacroix, Docteur ès Géosciences/Géomatique

Owing to their universality, maps are fitting tools for communication and analytics. The visualization and mapping of spatial data are ever more present in everyday communications. The legacy of cartography is described along with this discipline's current development as new techniques from information and communications technology are put to use: virtual reality, stereography, Anaglyph 3D, holography and 4D simulation. Cartography is continually undergoing changes that are making it easier to visualize phenomena not previously represented, such as underground networks or urban traffic flows. This opens the way toward designing tools for assisting decision-making in a wide range of fields.

**Why Standards Matter – The objectives and roadmap of the International Open Geospatial Consortium (OGC)**

Mark Reichardt, Open Geospatial Consortium (OGC), and François Robida, BRGM

The vision and mission of the Open Geospatial Consortium is discussed, with emphasis on its role to bring the power of location to decision makers around the world. OGC standards have significantly improved location information sharing worldwide and enable rapid integration of location data and technologies used in traditional mapping. OGC's focus now is to improve decision making through the efficient application of location to a range of social, economic and environmental topics. OGC standards facilitate the rapid mobilization of new data sources (e.g. commercial imagery, Lidar) and new and disruptive technologies (e.g. IoT, autonomous and unmanned systems)

to address challenges related to climate change, water resource availability, urban planning and management, insurance risk assessment, public safety, alternative energy placement, and land administration to name a few.

### Geostatistics for building 3D geological models

Didier Renard and Christian Lajaunie, Centre de Géosciences, MINES ParisTech – PSL University; Simon Lopez, Direction Géoressources/Unité GSO; Cécile Allanic, Direction Géoressources/Unité GBS; Philippe Calcagno, Direction Géoressources/Unité REG, Bureau de Recherches Géologiques et Minières; Gabriel Courrioux and Bernard Bourguine, Direction Géoressources/Unité GSO

By updating 2D geological cartography, 3D geological models will play a fundamental role in the Geological Survey of France. Models will be built using varied data on both surfaces and depths in order to make a coherent (but imperfect) representation of the subsoil. Model-builders will test and visualize hypotheses to back up interpretations. The tools designed and used by the Geological and Mining Research Bureau (BRGM) rely on geostatistical models. Based on geological correlations and stochastic fields, the potential field method, simple et flexible, coherently integrates data and assigns coefficients to cases of uncertainty. Far from being opposed, the interpretations made by geologists and stochastic representations can make use of each other.

### On using real-time cartography in immersive cinema: The example of the partnership between ILOI and XD Productions

Jacques Peyrache, CEO of XD Productions, and Alain Séraphine, president of ILOI

The third dimension, which photogrammetry has brought to cartography, was first put to use by the army. By the 1990s, this technology was drawing the attention of private research. Since computer-generated images still had limited artistic and economic credibility, photogrammetry became a field of study for developing video games, cartoons, movies, etc. In this context, XD Productions, already busy with software for motion capture in 3D, oriented its research toward volumetric video and devised algorithms of real-time photogrammetry. It designed a studio capable of automatically building 3D models of movements in real time. To produce a first full-length film for demonstrating its innovation, XD Productions turned toward the Image Institute of the Indian Ocean (ILOI), which, as early as 1995, had started focusing on training and education in computer graphics as a tool for the development of the island of La Réunion.

### Cartography and visualization

Éric Guichard, ENSSIB

Maps seem to be everywhere since the growth of the Internet, but for production purposes, more attention has been given to visualization procedures, which raise methodological and epistemological questions that cover map-making. Visualization also uses complex, multidimensional, even massive data. The somewhat anarchic

graphic semiotics has been reinvented since the emergence of a new occupation: designer-programmers. A promising space has been opened for a dialog where physicists, computer scientists and geographers discuss heuristic and epistemological advances in map-making and in visualization.

## Uses of Cartography 4.0

### GeoBIM: From managing a territory to managing a building

Dimitri Sarafinof, Bruno Vallet and Laurent Heydel, IGN; Arnaud Mistre and Guillaume Picinbono, CSTB

Accurate knowledge of a territory is a key element for its development and sustainable development. It involves precise modelling and mapping at different levels of scale, including buildings and interiors. The stakes are multiple: urban expansion, territorial development, transport and infrastructure...

The GeoBIM approach combines the skills of modelling and representing buildings (BIM) and conventional mapping (Geo) domains in order to offer a global and multi-level approach to the need of sharing cartographic information.

Research, standardization and experimentation activities contribute to this GéoBIM approach in order to converge on formats, tools and methods for exchanging this cartographic/geographic information necessary for the visualization, understanding and analysis of our environment and its development projects.

### Digital land maps for transportation and mobility: Opportunities and issues?

Yoann Nussbaumer, Chargemap

Cartography is breaking records thanks to smartphones, which have popularized the access to digital maps and been used to launch new transportation services. These services rely, in particular, on the advances made with sensors and on information from users, whether or not they are aware of this. The major players in map-making have gradually become megaplatforms of “mobility”, thus forcing traditional players on this market to revise their strategies. These changes raise questions about the ownership of cartographical data and the dissemination of users’ personal information. The answers are from evident...

### High definition digital maps, mobility’s future: What value will be added to driverless vehicle systems?

Vincent Martinier, TomTom France

From printed road maps to digital geolocation systems on touch screens, navigation has always been important, whether for the automobile industry or current forms of transportation (“mobility”). The cartography of highways is at the dawn of a new revolution. Its metamorphosis, which started twenty years ago, has come out of a combination of two major factors: geolocation by satellite and the digital transition. The purpose of road maps was to enable a driver to find the current position and provide a

view of an itinerary for going from one point to another. In contrast, automatic steering systems are transferring more and more functions to artificial intelligence – a transfer that will be complete with driverless vehicles, for which a new high-definition cartography will be essential. TomTom, a world leader in geolocation technology, is working on this...

### Applications for analyzing AIS data and interactively geovisualizing data

**Damien Le Guyader and Matthieu Le Tixerant**, Terra Maris

Relevant data are needed to carry out the EU's maritime spatial planning program (MSP). Since maritime activities involve spatiotemporal interactions of conflict or of synergy, knowledge of them is indispensable; but obtaining the relevant data is a sensitive question. This overview of the methods and findings of several operational research programs seeks to show how the analysis of data from an automatic identification system (AIS) can produce information, adapted on various scales, for the MSP to use to describe maritime traffic (a ranking of sea lanes), fishing zones (as well as the presumed intensity of fishing), and interactions between uses of the sea. Elementary examples of an interactive geovisualization of the information thus produced are provided to make it easier to undertake an exploratory examination of the results.

### Maps of farmlands and Farmstar's services

**Philippe Gate, Baptiste Soenen, Mathilde Closset and Norbert Benamou**, ARVALIS; **Hervé Poilvé and Michel Feuga**, Airbus Defense and Space

Farmstar, an innovative service unique in the world, processes satellite images and runs agronomic models in order to assist farmers in making decisions about fertilizer inputs. Its success – more than 16,000 subscribing farmers who work more than 700,000 hectares – can be set down to the accuracy of its information about an element that is the major limitation (before water in France) on the quantity and quality on farm yields and that might be lowering the quality of the water supply (increasing nitrate concentrations in groundwater). The benefits are economic (higher yields, reduced inputs, better quality of the grain harvested), environmental and societal (by avoiding excess nitrogen input of any sort, by tracking and justifying farmers' actions). Thanks to the zoning maps delivered to subscribers, farmers are able to vary doses of fertilizer as a function of plant needs in different parts of a single field. This much envied success story has come out of a cumulation of complementary skills and qualifications by agronomists at ARVALIS and experts in teledetection at Airbus.

### Using emergency cartographical services by satellite for civil defense

**Stéphanie Battiston, Stephen Clandillon and Robin Faivre**, ICube-SERTIT; **Claire Tinel**, CNES, and **Annett Wania**, JRC

For several years now, satellites for observing the Earth have demonstrated their potential for assisting the

management of natural or industrial disasters, not to mention humanitarian crises. Emergency digital mapping services have developed to provide geographical information based on satellite images to officials in charge of risk prevention, crisis management and reconstruction. Several arrangements, now operational, provide regular support to civil defense services, humanitarian organizations, insurance companies and other organizations. The international charter "Space and Major Disasters" provides for mustering satellite resources to respond to catastrophes anywhere in the world. The EU's EMS (Copernicus Emergency Management Service) offers, on request, maps to support disaster management operations, prevention work and reconstruction. Regional initiatives are also under way. France is a pioneer and major player in this field, owing to the actions of its space agency (CNES), its civil defense services and the speedy mapping services offered by ICube-SERTIT. The observation of the Earth is constantly evolving toward emergency digital mapping services for security purposes. While the major user is civil defense (for disaster management), other organizations are starting to integrate this technology in their action plans.

### Observatoire de la Dynamique Côtière de Guyane: Its interactive map, a tool for the sustainable management of Guiana's coast

**Julie Furiga**, coordinator at the Observatoire de la Dynamique Côtière de Guyane (ODyC)

A characteristic of French Guiana's coast is unique in the world, namely the sedimentation and geomorphological processes stemming from the movement of banks of silt. To list sites where this is happening and develop and diffuse knowledge about this process, government agencies (DEAL and BRGM) set up an observatory in 2014: Observatoire de la Dynamique Côtière de Guyane (ODyC). In compliance with the national strategy for an integrated management of the coastline, the ODyC publishes all the data it collects. Modern tools, a website and a documentary database have been developed. Since September 2018, an interactive map (accessible via GéoGuyane) has been made in pursuit of the objective of federating all partners working on the coastline. These tools support a sustainable management of coastal areas in French Guiana.

### The digital mapping of water basins: Feedback from water agencies

**Sarah Feuillette and Patricia Blanc**, Seine-Normandie Water Agency

Given the number of parameters (chemical pollutants, bacteriological and physical information, the presence of wild- and plant life, data on the quantity of water, etc.) and the various scales (from the local diagnosis necessary for leisure activities to a general diagnosis at the scale of a river or a watershed that supplies an urban area), it is complicated to design water surveys and present their findings. Water agencies use digital tools to share information with the public and to involve the public in actions for updating water surveys. The Seine-Normandie Agency

has just opened a website, Géo-Seine-Normandie, where users can now contribute to assessments of the water supply. The Rhône-Mediterranean-Corsica Agency manages (for itself and five others agencies) an application (Qualité Rivière) for access to data on the state of river water.

### A regional platform's impact on local cartographical practices

Christine Archias, CRIGE Provence-Alpes-Côte d'Azur

Regional platforms of geographical information modify the practices of the local organizations that reuse and exploit geolocation data. The center of geographical information (CRIGE) in the Provence-Alps-Riviera region is the bridgehead of a network of such regional centers around AFiGéo. The assignments of these centers are to acquire, collect, integrate, diffuse and develop geographical data. As neutral, flexible, open organizations, they promote and facilitate cooperation, participatory experiences and innovative projects for producing and using geographical data. Thanks to their actions for opening data, for creating efficient tools to diffuse and exploit data and for developing user networks, these centers help modernize the processes and practices of map-making.

### KaruGéo: Guadeloupe's website of geographical information

Anouk Robillard, KaruGéo

As the Internet has developed, a clear need has been voiced at the international level for accessing and sharing geographical data. This fits into a trend toward transparency in public affairs. Over the past twenty years, infrastructures of geographical data (IDG) have been set up that diffuse information well beyond the bounds of the organizations that produce the information. By creating its own regional IDG, Guadeloupe has proven its determination to take part in circulating geographical information. KaruGéo, the website for this purpose, was set up in 2016. By pooling means, the state, regional and departmental councils, and the National Park of Guadeloupe have proposed a Web tool with a set of features for storing and circulating a legacy of regional data.

### Digital cartography: Progress or a social cleavage?

Claire Tutenuit, president of the association Le Ruban Vert and delegate of the Association Française des Entreprises pour l'Environnement (EpE)

At first sight, digital cartography seems to be a fantastic tool. Printed maps are obsolete and seldom republished. Besides, they are never in the right format or on the right scale. Digital maps are intended to handle these problems of access. With a simple click, anyone may obtain updated geolocation information from public or private service-providers. In actual practice however, things are not so simple...

### Miscellany

#### How to put blockchain technology at the service of the Paris climate agreement

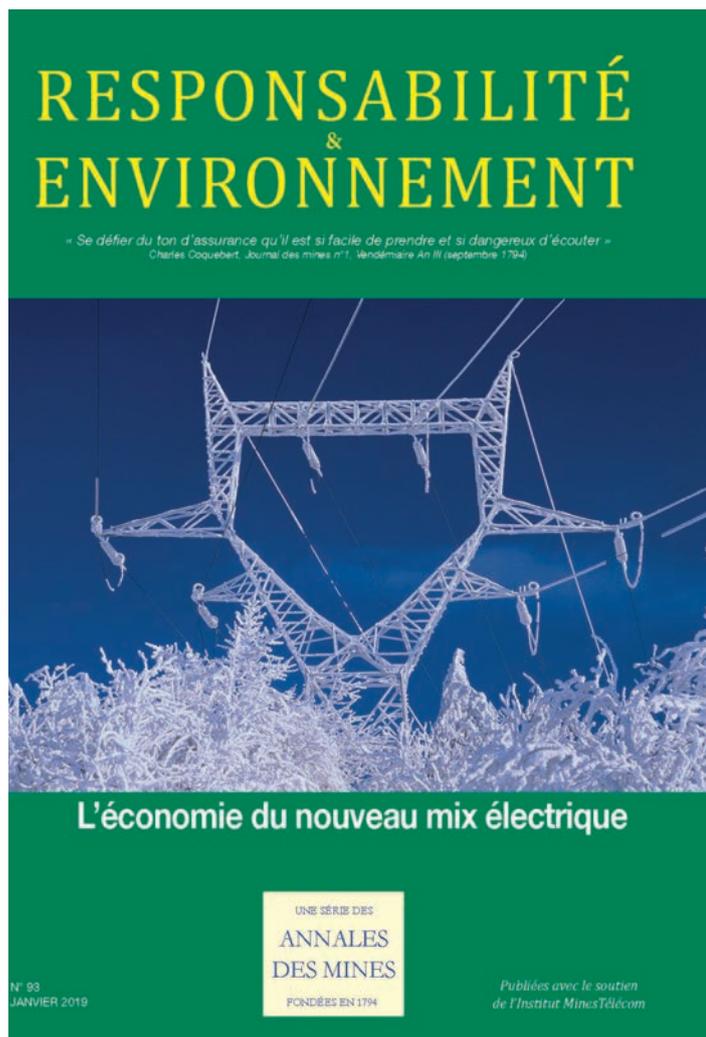
Patrice Geoffron, Paris-Dauphine University, PSL, Laboratoire d'Économie de Dauphine (LEDA) UMR-CNRS-IRD, and Stéphane Voisin, Institut Louis Bachelier, PSL

Blockchain technology is used to store and convey information in a safe, transparent way and without a central control authority. The scope of experimentation with blockchains is vast, extending to the fight against climate change. What is this technology's potential for accelerating the implementation of the Paris climate agreement? After all, a blockchain creates the conditions for transparency, increases the possibility of verifying data on greenhouse gas emissions and improves the interoperability of local initiatives. A "prototype" of a blockchain carbon registry is presented that the Caisse des Dépôts has designed in a partnership with the Climate Chain Coalition supported by UN Climate. The authors took part in initiating this coalition during the One Planet Summit held in Paris in December 2017.

*Issue editor: Françoise Roure and Didier Pillet*

# RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

## L'économie du nouveau mix électrique



Introduction :

**Fabrice DAMBRINE**

### Les coûts de la transition électrique

Analyse micro-économique de l'intégration des EnR électriques intermittentes dans un système de production électrique

**Fabrice DAMBRINE**

Évaluation macroéconomique de la transition électrique en France  
**Nicolas GOVILLOT, Richard LAVERGNE et François VALÉRIAN**

Les énergies intermittentes : jusqu'où ?

**Jean-Pierre HAUET**

Le stockage de l'électricité : la solution à l'intégration des EnR intermittentes ?

**Étienne BEEKER et Richard LAVERGNE**

### Transition électrique : le point de vue des acteurs économiques

Les incohérences de la transition électrique au regard de la politique de transition énergétique

**Dominique FINON**

ENGIE et la transition énergétique. Passer du rêve à la réalité : un bouquet énergétique 100 % renouvelable à l'horizon 2050

**Gwenaëlle AVICE-HUET**

Le comptage communicant, une condition essentielle pour une transition énergétique réussie

**Michel DERDEVET**

Les énergies renouvelables et la transition électrique

**Jean-Louis BAL**

Le rôle du nucléaire dans la transition électrique

**Valérie FAUDON**

Transition énergétique : coordonner baisse du nucléaire et montée des ENR pour éviter d'affaiblir plus encore la compétitivité industrielle

**Stéphane DELPEYROUX**

### Transition électrique : gouvernance et modèles de développement

Transition électrique : la fin d'un consensus allemand ?

**François VALÉRIAN**

La transition électrique, entre marchés et objectifs politiques

**Jacques PERCEBOIS**

Le rôle du prix du carbone dans la transition électrique

**Christian DE PERTHUIS et Boris SOLIER**

50 %, ou 50 % ?

**Jean-Marc JANCOVICI**

### Hors-Dossier

Bilan énergétique de la France métropolitaine en 2017 Données provisoires  
**Sous-direction des Statistiques de l'énergie, CGDD, MTES**

Le bilan carbone de la France : 20 ans déjà !

**Jean-Philippe LAFONTAINE**

Janvier 2019

Ce numéro est coordonné par **Fabrice DAMBRINE**

Ce numéro peut être consulté et téléchargé gratuitement sur notre site

<http://www.annales.org>

## ALLANIC Cécile



D.R

Cécile Allanic est ingénieur au BRGM. Elle met à profit ses compétences de géologue structuraliste pour construire de nombreux modèles géologiques à vocation de recherche fondamentale (Référentiel Géologique de la France) et appliquée (risque gravitaire, géothermie, hydrogéologie). Elle intervient sur des projets nationaux et internationaux, ainsi que sur des problématiques de réservoirs fracturés. Elle contribue également au développement d'outils pour l'exploitation des modèles géologiques. Elle est titulaire d'un doctorat en géologie structurale et géodynamique.

## ARCHIAS Christine



D.R

Depuis 2003, Christine Archias est directrice du Centre régional de l'information géographique de Provence-Alpes-Côte d'Azur (CRIGE), le centre de ressources géomatiques de la région et, depuis 2014, vice-présidente de l'Association française pour l'information géographique (Afigéo), en charge du pôle Usages et de l'animation nationale du réseau

des CRIGEs.

Christine Archias est géographe-urbaniste.

Elle est titulaire d'un Mastère Dynamiques et analyse spatiales – spécialités traitement d'images satellites et géomatique, de l'AMU Aix-en-Provence, et d'un Mastère Urbanisme – spécialité développement local, de l'IUAR Aix-en-Provence.

Auparavant, elle a été :

- de 1999 à 2003 : cheffe de la cellule Planification et information géographique de la DREAL Provence-Alpes-Côte d'Azur ;
- de 1994 à 1998 : chargée de mission Géomatique au CEREMA – Agence Méditerranée ;
- de 1990 à 1993 : cheffe de projet Aménagement du territoire au CEREMA – Agence Méditerranée.

## BAGHDADI Nicolas



D.R

Nicolas Baghdadi a obtenu son doctorat à l'Université de Toulon en 1994. De 1995 à 1997, il a été chercheur postdoctoral à l'INRS-Ete au Québec (Canada). De 1998 à 2008, il a travaillé au BRGM, à Orléans. Depuis 2008, il est directeur de recherche à l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (IRSTEA), à Montpellier.

Ses activités de recherche portent sur la télédétection micro-ondes, le traitement d'images et l'analyse de données de télédétection aéroportée et par satellite. Son domaine d'intérêt principal est l'analyse de données de télédétection (SAR, Lidar, optique) et l'estimation de paramètres environnementaux (teneur en humidité du sol, rugosité de surface, biomasse forestière). Il est actuellement directeur scientifique du pôle thématique Surfaces continentales, Theia.

## BATTISTON Stéphanie



D.R

Stéphanie Battiston est responsable adjointe du Service de cartographie rapide du SERTIT, la plateforme de services du laboratoire ICube, au sein de l'Université de Strasbourg.

Après un Master spécialisé dans les technologies spatiales (télédétection, systèmes d'informations géographiques, cartographie) à l'Université Louis Pasteur

à Strasbourg, elle rejoint en 2004 le SERTIT, service de traitement d'images et de télédétection, et participe aux activités de soutien à la gestion des risques naturels et de l'environnement. Impliquée dès lors dans la mise en place du service de cartographie rapide du SERTIT, opérationnel 24/7/365, elle contribue au développement de la cartographie d'urgence à partir de l'imagerie satellite pour les acteurs de la gestion de crise, à la mise en place des dispositifs opérationnels actuels, au développement de nouveaux marchés et de nouvelles applications, pour de nouveaux utilisateurs, et ce par le biais de projets de Recherche & Développement français et européens. Impliquée dans la plupart des activations du service de cartographie d'urgence, dans le cadre de la Charte internationale Espace et catastrophes majeures ou encore de Copernicus EMS, elle est notamment intervenue lors de la survenue du tsunami en Asie du Sud-Est en 2004, du séisme en Haïti en 2010, du tsunami au Japon en 2011, des inondations dans le Loiret en 2016 ou encore du cyclone Irma dans les Antilles en 2017. En parallèle aux activités dédiées à la gestion de crise, Stéphanie Battiston s'investit également dans celles relatives aux risques et à la reconstruction.

Elle est également responsable du Système de management de la qualité du service de cartographie rapide du SERTIT, certifié ISO 9001 depuis 2011.

## BENAMOU Norbert



D.R

Norbert Benamou est ingénieur civil des Ponts et Chaussées. Il est titulaire d'un DEA en recherche opérationnelle de Paris-Dauphine et d'un MBA de l'INSEAD. Il s'est d'abord investi dans le domaine du numérique, en créant et dirigeant plusieurs sociétés relevant de ce secteur,

il a eu à gérer d'importants projets de recherche nationaux et européens. Avant de prendre la direction générale d'Arvalis en 2018, il a dirigé la SATT Nord, la Société d'accélération du transfert de technologie pour le nord de la France. Il a par ailleurs présidé le réseau national des SATT.

### **BLANC Patricia**



D.R

Patricia Blanc est ingénieur général des Mines et directrice générale de l'agence de l'eau Seine Normandie depuis 2016. Elle a auparavant exercé plusieurs fonctions dans le domaine de la prévention des pollutions et des risques au ministère de l'Environnement, après un début de carrière en Lorraine, où elle était en charge du développement économique au SGAR.

### **BOURGINE Bernard**



D.R

Bernard Bourguine est ingénieur au BRGM. Il est expert en géostatistique et intervient sur l'ensemble des projets du BRGM pour apporter des réponses opérationnelles pour la quantification de l'incertitude spatiale. Il participe également au développement de l'outil GDM Multilayer. Il est ingénieur civil des Mines et docteur en géostatistique.

### **BRÉDIF Mathieu**



D.R

Ingénieur en chef des Mines, Mathieu Brédif a obtenu un doctorat en traitement du signal et des images à Télécom ParisTech sur la reconstruction 3D de modèles de ville. Chercheur au sein du laboratoire LASTIG à l'IGN, membre de l'équipe de géovisualisation, il s'intéresse notamment au traitement et à la visualisation de données massives,

incertaines et hétérogènes (images, nuages de points et modèles 3D). Il est diplômé de l'École polytechnique (promotion X2000), de Télécom ParisTech et est titulaire d'un Master of Science en informatique de Stanford.

### **BURSAUX Daniel**

Daniel Bursaux dirige l'Institut national de l'information géographique et forestière depuis le 5 novembre 2014. Son mandat a été renouvelé pour quatre ans en novembre 2018.

Jusqu'en juillet 2008, Daniel Bursaux a exercé les fonctions de directeur général des Infrastructures, des Transports et de la Mer au ministère de l'Écologie, du Développement



D.R

durable et de l'Énergie, après avoir été directeur général de la Mer et des Transports.

De novembre 2005 à avril 2007, il a été directeur adjoint, puis directeur du cabinet du ministre des Transports, de l'Équipement, du Tourisme et de la Mer.

De 2001 à 2005, Daniel Bursaux a été directeur général des services de la région Alsace après

avoir exercé, pendant six ans, une fonction similaire au sein du Conseil général du Bas-Rhin.

De 1993 à 1995, il a exercé la fonction de conseiller technique au sein du cabinet du ministre délégué à l'Aménagement du territoire et aux Collectivités locales.

Diplômé de l'École polytechnique, Daniel Bursaux est ingénieur général des Ponts, des Eaux et des Forêts et est titulaire d'un Master of Science du Massachusetts Institute of Technology (MIT).

### **CALCAGNO Philippe**



D.R

Philippe Calcagno est ingénieur au BRGM. Il est expert en modélisation géologique et animateur du Référentiel Géologique de la France. Il intervient sur de nombreux projets nationaux et internationaux portant sur la géothermie. Il est également l'un des inventeurs de l'outil GeoModeller. Il est docteur en géophysique.

### **CLANDILLON Stephen**



D.R

Stephen Clandillon est responsable du service de cartographie rapide du SERTIT. Spécialiste de la cartographie d'urgence, de la gestion des risques et des études environnementales, il gère de nombreux projets traitant de la gestion des catastrophes par télédétection ainsi que différents projets environnementaux. Il entretient de nombreux contacts

avec les utilisateurs, les clients et les partenaires, tant au niveau local qu'au niveau international.

Il a participé à la première activation précurseur de la cartographie rapide, l'inondation ayant frappé en 1996 la ville de Gandia en Espagne (pour le compte du Conseil de l'Europe), et à la grande majorité des actions de cartographie rapide engagées depuis lors par le SERTIT. Ces activations ont été réalisées dans le cadre de la Charte internationale Espace et catastrophes majeures, du service Copernicus EMS RM, d'un contrat-cadre du CNES et de nombreux programmes à valeur ajoutée de l'ESA et de la Commission européenne (SAFER, etc.). Stephen Clandillon a été plusieurs fois chef de projet pour le

compte de la Charte internationale ou est intervenu en soutien direct de celle-ci.

De plus, il mène des projets de recherche et développement sur la cartographie rapide, tels que HEIMDALL (H2020, 2017-2020) : un outil de gestion coopérative multi-risques pour l'échange de données, la planification de l'intervention et l'élaboration de scénarios ; ASAPTERRA (ESA, 2014-2016) : un projet sur les méthodes optiques et SAR pour la cartographie rapide ; et PREFER (FP7, 2012-2015) : apport de la télédétection spatiale pour la prévention des feux de forêt et le suivi de la régénération de la végétation en milieu méditerranéen.

Pendant quinze ans, Stephen Clandillon a été en charge de la cartographie des essences et des dynamiques forestières, en appui des services forestiers régionaux dans le cadre des problématiques de conservation des forêts et de gestion de la ressource. Plus récemment, il a réalisé la cartographie de la trame verte parcourant le territoire de l'Eurométropole de Strasbourg.

Au cours de la période 2017/2018, Stephen Clandillon a eu le privilège d'assumer la présidence de l'IWG-SEM (International Working Group on Satellite based Emergency Mapping), un groupe de travail qui propose des normes de cartographie rapide et promeut la coopération/collaboration entre les différents dispositifs proposant de la cartographie rapide. Il encourage un tel rapprochement afin d'améliorer l'impact des services qu'ils apportent aux utilisateurs. Stephen Clandillon est régulièrement consulté sur les questions relatives à la cartographie rapide et les dispositifs à venir, par le CNES (Centre national d'études spatiales) ainsi que par diverses entités de la Commission européenne.

## CLOSSET Martine



D.R

Mathilde Closset est titulaire d'un diplôme d'ingénieur agronome de l'ENSAIA de Nancy. En fonction chez Arvalis – Institut du végétal, elle a travaillé pendant un an sur la mise en œuvre opérationnelle du service FARMSTAR, puis elle a ensuite pris les fonctions de chef Projet qu'elle exerce depuis six ans.

## COURRIOUX Gabriel



D.R

Gabriel Courrioux est ingénieur au BRGM. Il a développé de nombreuses méthodes de modélisation géologique et est l'un des inventeurs de l'outil GeoModeller. Il est docteur en géologie et justifie d'une formation complémentaire sur la modélisation informatique.

## DEVAUX Alexandre



D.R

Alexandre Devaux est ingénieur de recherche à l'IGN. Il est diplômé en vision par ordinateur (Université Paris Descartes). Il s'est ensuite spécialisé en visualisation et interaction. Ses travaux ont notamment permis de créer la première version d'iTown et, plus récemment, d'expérimenter des technologies innovantes, telles que la réalité mixte.

## DIAMENT Michel



D.R

Michel Diament est physicien (corps national des astronomes et physiciens) à l'Institut de physique du globe de Paris. Il a obtenu ses doctorats de troisième cycle (1981) et d'État (1987) à l'Université Paris-Sud (Orsay). Il y a débuté sa carrière en 1982, en qualité d'enseignant-chercheur, avant de rejoindre l'IPGP en 1990. Les domaines de recherche qu'il aborde, vont des géosciences marines – y compris l'altimétrie satellitaire, la géophysique appliquée (méthodes potentielles), la volcanologie, le comportement mécanique de la lithosphère – à la géodynamique. Spécialiste de gravimétrie et de microgravimétrie, il s'est intéressé ces dernières années à la gravimétrie satellitaire. Il a publié plus de cent quinze articles dans des revues à comité de lecture et un livre de cours de géophysique publié en 1987 (la cinquième édition est sortie en 2016).

Il dirige le pôle national de données et de service ForM@Ter (<http://www.poleterresolide.fr>).

## FAIVRE Robin



D.R

Robin Faivre est ingénieur de recherche au sein de la plateforme SERTIT (Service régional de traitement d'image et de télédétection) du Laboratoire ICube (UMR 7537 – Université de Strasbourg – CNRS). Il est titulaire d'un Master spécialisé dans les risques naturels qu'il a obtenu en 2009 (Faculté de géographie et d'aménagement – Université de Strasbourg). Depuis 2014, il prépare un doctorat en télédétection à l'Université de Strasbourg et à l'Université technologique de Delft (TU Delft – Pays-Bas). Après avoir contribué durant sa thèse au suivi du bilan hydrologique par télédétection sur le plateau du Tibet (projet FP7 CEOP-AEGIS), il rejoint ICube SERTIT en 2015. Depuis lors, il participe activement au service de cartographie rapide de la plateforme, qui opère principalement pour le compte de Copernicus EMSR RM et de la Charte internationale.

Robin Faivre est également chef de projet Risques et reconstruction, et supervise, notamment, les activations dans le cadre du service Copernicus EMSR RM. De plus, il est responsable de la contribution d'ICube SERTIT – pour le compte du CNES – au déploiement du Recovery Observatory en Haïti (projet initié au sein du CEOS). Par ailleurs, il a été très actif dans le suivi par satellite des opérations de reconstruction post-Irma menées par le CNES dans les îles de Saint-Martin et Saint-Barthélemy.

### FEUGA Michel



D.R

Michel Feuga est diplômé de l'INSA et de Sup'Aéro. Il a rejoint Matra Espace en 1985 pour travailler dans le domaine des segments sol de contrôle de satellites d'observation. Après y avoir occupé diverses responsabilités dans la conduite de programmes, puis d'équipes, il rejoint l'activité de Services d'observation de la Terre d'Airbus en 2007. Michel

Feuga dirige aujourd'hui les activités de services thématiques, dont la mission principale est de livrer des solutions clé en main, basées sur la télédétection spatiale, destinées à divers marchés verticaux, en particulier celui de l'Agriculture.

### FEUILLETTE Sarah



D.R

Sarah Feuillette est ingénieur agronome et des eaux et forêts. Après une thèse réalisée en Tunisie sur la gestion d'une nappe en lien avec l'évolution de la demande en eau, elle rejoint l'agence de l'eau Seine Normandie en 2002, où elle y dirige depuis 2007 le service Planification, évaluation et prospective.

### FURIGA Julie



D.R

Chargée de mission « Observatoire de la Dynamique Côtière de Guyane » pour la direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement de Guyane à partir de 2016, Julie Furiga a développé l'ensemble de l'interface du site Internet et des différents outils de l'ODYC. Elle a précédemment exercé des fonctions de cartographe au sein de la

direction départementale des Territoires et de la Mer d'Ille-et-Vilaine et travaillé à la gestion d'un port de plaisance et de pêche dans le Finistère. Elle est diplômée d'un Master sciences de la mer et du littoral (promotion 2015) de l'Institut universitaire européen de la Mer (UBO, 29).



D.R

### GATE Philippe

Philippe Gate est le directeur scientifique d'ARVALIS – Institut du végétal. Cet Institut technique agricole financé par les producteurs est en charge de la recherche appliquée sur les céréales à paille, le maïs, la pomme de terre, le lin fibre, le tabac, le riz et les fourrages, de la production

jusqu'aux débouchés.

Philippe Gate a pour mission principale d'assurer l'excellence scientifique et technique de l'ensemble des activités conduites par l'Institut et de développer les meilleurs partenariats scientifiques en France et à l'étranger.

D'abord sélectionneur, Philippe Gate a effectué une grande partie de sa carrière à l'ITCF (Institut technique des céréales et des fourrages), puis à ARVALIS – Institut du végétal, en tant qu'éco-physiologiste. Tout au long de son parcours professionnel, il s'est attaché à mieux comprendre le fonctionnement des plantes dans leur milieu, avec pour souci de se nourrir d'autres domaines de compétences complémentaires. Le fruit de son travail a profité à des applications opérationnelles, utiles et utilisées par les producteurs et les conseillers : modèles de croissance et de développement pour prévoir les stades de développement des céréales, application de la télédétection pour l'ajustement de la conduite des cultures (offre de services FARMSTAR), fonctionnement de la plante malade et carencée, diagnostic de la stagnation des rendements (contributions relatives du changement climatique et des pratiques), propositions de solutions pour s'adapter au dérèglement climatique. Depuis de nombreuses années, Philippe Gate s'intéresse aux applications du numérique dans toutes leurs dimensions à la fois pour des innovations méthodologiques (datasciences pour l'acquisition de références) et pour des innovations s'adressant aux producteurs (objets connectés, couplage modèle-capteurs, recherche collaborative...).

Philippe Gate est un fervent partisan des approches pluridisciplinaires pour résoudre les grands enjeux auxquels devra faire face l'agriculture de demain. Depuis de nombreuses années, il défend une agronomie sans frontières, allant de la génétique au numérique, avec l'agro-écologie multi-performante comme modèle agricole afin que les innovations servent au plus grand nombre possible d'agriculteurs.

Philippe Gate est membre correspondant de l'Académie d'Agriculture.



D.R

### GEOFFRON Patrice

patrice.geoffron@dauphine.psl.eu

Docteur en économie industrielle, Patrice Geoffron est professeur d'économie à l'Université Paris-Dauphine. Après avoir été vice-président international de Paris-Dauphine, il en

dirige aujourd'hui l'équipe Énergie-climat qui anime un Master (Énergie-Finance-Carbone) et plusieurs chaires de recherche (économie du climat, marchés européens de l'électricité, économie du gaz, *Blockchain* climat & énergie). Son intérêt se porte plus particulièrement sur la convergence entre électricité et télécommunications dans le cadre de la transition bas-carbone et sur les nouvelles organisations, nouveaux usages et nouveaux modèles économiques émergents : *smart grids*, *smart cities*, *blockchain*, stockage... Il est membre du conseil scientifique de Think Smart Grids, coéditeur de la revue *Economics and Policy of Energy and the Environment* et membre du board de l'*International Journal of Management and Network Economics*.

### GUICHARD Éric



D.R

Éric Guichard est enseignant à l'Esssib, chercheur au laboratoire Triangle (ENS-CNRS) et à l'IXXI (Institut des systèmes complexes, Lyon) et ancien directeur de programme au Collège international de philosophie. Il a fondé l'équipe Réseaux, savoirs & territoires (ENS Ulm), qu'il dirige toujours, et le RAIL (Réseau de l'atelier Internet lyonnais).

Philosophe et anthropologue du numérique, et donc de la technique (écriture incluse), il adopte une démarche concrète et empirique. Attentif à l'évolution des sciences sociales suite à la double pression des transformations industrielles contemporaines et des sciences « exactes », il développe une pensée critique du numérique qui concilie épistémologie et philosophie politique. Il organise aussi l'école d'été de cartographie et de visualisation, dont la troisième édition se tiendra à l'Esssib, du 1<sup>er</sup> au 3 juillet 2019. Il a publié de nombreux articles, dont la majorité est accessible sur HAL et à l'URL suivante : <http://barthes.esssib.fr/articles>. Les derniers ouvrages qu'il a dirigés sont *L'Internet : regards croisés* et *Écritures*. Sur les traces de Jack Goody (2011 et 2012, Presses de l'Esssib).

### HEYDEL Laurent



D.R

Après des études de géomètre en école préparatoire au Lycée Loritz à Nancy et à l'École nationale des sciences géographiques, Laurent Heydel a intégré l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) au sein duquel il est aujourd'hui responsable du département des Travaux spéciaux du service de Géodésie et de métrologie. Le

département des Travaux spéciaux se compose d'une équipe de seize personnes et répond à des demandes très diverses dans le domaine de la métrologie géodésique et dimensionnelle. Outre ces travaux, qui peuvent prendre la forme de prestations d'appui à des équipes de recherche/

développement, d'évaluation/test de prototypes et de projets de pré-production, ce département contribue au positionnement de l'IGN en tant que spécialiste de la topométrie de précision et du géopositionnement. Laurent Heydel fait également partie du conseil de l'AFT (Association française de topographie).

### HUYNH Frédéric



D.R

Frédéric Huynh est ingénieur de recherche hors classe à l'IRD. Il est ingénieur diplômé de l'École centrale de Marseille (1990). Il dirige l'Infrastructure de recherche « Pôles de données et services pour le système Terre » depuis 2017, après avoir été représentant de l'IRD au Brésil (2012-2017) et directeur de laboratoires (UMR ESPACE-DEV, Maison de la

téledétection, Montpellier), durant plus de quinze ans. Il est spécialiste de l'observation de la Terre par satellite, de la géomatique et des systèmes d'information et d'aide à la décision en matière de gestion de l'environnement et des ressources. Il justifie d'une centaine de références (publications, ouvrages...) et a coordonné plus d'une cinquantaine de projets de recherche nationaux, européens et internationaux dans les domaines précités.

### KONINI Mirela



D.R

Mirela Konini est docteur en traitement du signal et des images de l'ENSEEIH. Elle a travaillé dans les domaines des télétransmissions et de l'imagerie numérique. Ses travaux ont porté pour l'essentiel sur la conception de systèmes de transmission pour les drones et sur la mise en place d'algorithmes pour l'optimisation automatique du rendu des

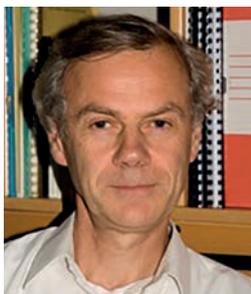
images basés sur la quantification des attributs et des artefacts. Depuis 2016, Mirela Konini est cheffe du projet iTowns à l'IGN.

### LACROIX Marie

Marie Lacroix est titulaire d'un doctorat en géosciences – géomatique de l'Université Pierre et Marie Curie (Paris) traitant des « méthodes pour la reconstruction, l'analyse et l'exploitation des réseaux tridimensionnels urbains ». Elle travaille aujourd'hui dans le domaine de la modélisation 3D de l'habitat.

### LAJAUNIE Christian

Christian Lajaunie a mené une carrière d'enseignant-chercheur au Centre de géosciences de MINES ParisTech – PSL University, jusqu'à la fin du mois de septembre 2018. Retraité depuis cette date, il conserve néanmoins une activité de conseil au titre de collaborateur bénévole.



D.R

Ses travaux ont porté sur l'application de méthodes statistiques et géostatistiques à des domaines applicatifs très divers, tels que l'hydrographie, l'épidémiologie, la bio-informatique et l'estimation minière.

### LE GUYADER Damien

Damien Le Guyader est titulaire d'un doctorat de géographie qu'il a préparé au sein du Laboratoire LETG-Brest (UMR 6554 CNRS). Sa thèse, qu'il a soutenue en 2012, portait sur la modélisation des activités humaines en mer côtière. Ses intérêts de recherche portent sur la modélisation du socio-système marin et côtier dans une perspective d'aide à la gestion. Il a ensuite contribué au projet Ra2Brest (modélisation et scénarisation des activités humaines en rade de Brest) et au projet DACTARI (dynamiques des activités maritimes : base d'information géographique et temporelle en support à la connaissance et à la scénarisation). En 2013, il obtient le prix de thèse du Groupement de recherche « Méthodes et applications pour la géomatique et l'information spatiale » (GDR MAGIS). Dans une optique de transfert des méthodes développées dans le cadre de ses recherches, Damien Le Guyader intègre Terra Maris en 2015 en tant que chef de projet R&D.

### LE TIXERANT Matthieu

En 2004, Matthieu Le Tixerant soutient une thèse de géographie préparée au sein du laboratoire LETG-Brest (UMR 6554 CNRS) portant sur la dynamique des activités humaines en mer côtière et mobilisant les nouvelles technologies de l'information géographique. Ces travaux de recherche suscitant l'intérêt des acteurs de la mer et du littoral, l'idée d'un transfert-valorisation au sein d'une entreprise a émergé dans son esprit. Le projet est alors soutenu par Bretagne Valorisation (UBO), le technopôle Brest-Iroise et l'incubateur d'entreprise de Bretagne EMERGYS, pour aboutir en juin 2006 à la création de la SARL Terra Maris. En 2007, Matthieu Le Tixerant obtient le prix Bretagne Jeune chercheur dans la catégorie « Terre et mer/Exploitation et préservation ».

### LOPEZ Simon



D.R

Simon Lopez est ingénieur au BRGM. Il travaille sur l'intégration des modèles géologiques et des modèles de transfert de masse et d'énergie dans le sous-sol profond, avec une application à la géothermie. Il est ingénieur civil des Mines. Il est titulaire d'un doctorat en géostatistique.

### MARTINIER Vincent



D.R

Vincent Martinier est, depuis 2017, directeur de la communication et des relations extérieures du Groupe TomTom en France.

Ses expériences au niveau international dans des entreprises high-tech lui ont permis de comprendre comment rendre accessibles au plus grand nombre des technologies parfois complexes.

Au milieu des années 1990, il commence sa carrière comme responsable Marketing France chez Motorola, alors leader mondial des télécommunications, où il contribue à l'explosion de la téléphonie mobile. Il rejoint au tournant des années 2000 Pinnacle Systems, leader des solutions de montage et distribution vidéo, où il accompagne à l'international la transition du marché analogique vers le tout-numérique. Il rejoint TomTom en 2012 en tant que directeur marketing France de la division Grand public, où il a, en particulier, géré le lancement et le développement des montres connectées.

À travers son rôle de porte-parole du Groupe auprès des médias, groupes industriels et instances politiques, en France, Vincent Martinier a pour objectif de contribuer à faire de TomTom une référence en matière de conduite autonome, de mobilité intelligente et électrique ainsi que dans le domaine des véhicules connectés.

Spécialiste indépendant des technologies de localisation, TomTom redéfinit la mobilité grâce à ses cartes, logiciels de navigation, informations-traffic et autres services en temps réel, tous d'une extrême précision. TomTom a créé l'appareil de navigation facile à utiliser, qui a changé notre façon de nous orienter en voiture. L'entreprise travaille aujourd'hui avec les plus grands fabricants d'automobiles et fournit des solutions de géolocalisation aux développeurs d'applications de mobilité ainsi qu'aux plus grandes entreprises comme Microsoft, Apple ou Uber. Chaque jour, plusieurs millions de personnes utilisent ses technologies en France et dans le monde.

### MAUDIRE Gilbert



D.R

Gilbert Maudire est ingénieur en mathématiques appliquées et informatiques de l'ENSEEIH-T (Toulouse, 1985). Il travaille à l'Ifremer depuis 1992, où il est aujourd'hui directeur adjoint du département « Infrastructures de recherche et systèmes d'information ». Il a été impliqué ou en charge du développement et de l'exploitation de plusieurs

systèmes d'information, comme le Centre de données océanographiques (Sismer), le système de gestion des données halieutiques (Harmonie) ou le centre de données Coriolis pour l'océanographie opérationnelle, une composante des Copernicus Environmental Marine Services.

Spécialiste de la gestion des données marines et des systèmes d'information, Gilbert Maudire a une bonne expérience de leur conception, de leur développement et de leur conduite en conditions opérationnelles, dans des contextes distribués et interopérables. Il a ainsi coordonné la mise en place de l'infrastructure SeaDataNet de 2006 à 2011. Financée par l'Union européenne, elle fédère aujourd'hui plus de cent vingt centres de données marines pan-européens. Il est désormais directeur du Pôle de données Océan-Odatis.

### MAUREL Pierre



D.R

Pierre Maurel est agri-géographe de formation et est titulaire d'un doctorat en sciences de l'information et de la communication dans le champ de l'intelligence territoriale. Il travaille à l'Irstea depuis 1987, dans le domaine de la géomatique appliquée à la gestion de l'environnement et au développement territorial. En fonction à la Maison de la télédé-

tection au sein de l'UMR TETIS, ses recherches récentes portent sur les usages et les impacts de l'information spatiale dans les processus de gouvernance et de développement territorial. Depuis 2013, il coordonne l'EQUIPEX GEOSUD dans le cadre élargi du Pôle Theia afin de développer, au niveau national, l'utilisation de l'imagerie satellitaire par la communauté scientifique et dans l'action publique.

### MISTRE Arnaud



D.R

Après de nombreuses années à étudier et à exercer dans le domaine de l'innovation, participant notamment à réalisation de maquettes numériques, Arnaud Mistre a rejoint, en 2015, la division MIC (Maquette numérique et ingénierie concourante) du CSTB, exerçant au sein de la direction « Technologies de l'information ». Il y apporte son expertise

sur la numérisation de l'existant au travers d'une approche multi-échelles, tous capteurs et vecteurs confondus. Sur toutes ces questions, il intervient en tant que référent pour le CSTB. Son action est essentielle pour la recherche menée en aval par le CSTB sur les sujets de modélisation automatique, notamment au travers de projets de recherche européens comme BIM4Ren, ou *via* l'ANR BIOM. Cette expertise transverse l'amène à participer en tant que chef de projet ou expert à des projets structurants pour le compte du ministère des Armées, d'Engie, d'EPA (Paris-la-Défense, Euromed, l'EPA Marne), etc. Il est en outre impliqué dans le montage de projets et intervient également sur des initiatives stratégiques en tant que parrain pour l'accélérateur de *start-ups* du CSTB, le CSTB Lab, ou encore comme coordonnateur du soutien apporté par le CSTB à l'INRIA et

à l'Université Côte d'Azur dans le cadre des Instituts interdisciplinaires d'intelligence artificielle.

### MORENO Richard



D.R

Diplômé de Sup'Aero (1995), Richard Moreno est ingénieur CNES, expert senior en données d'observation de la Terre. Il est impliqué dans le développement segments-sol et de systèmes de valorisation de données depuis plus de vingt ans (IASI, SMOS, PEPS...). Il est directeur technique de l'infrastructure de recherche « Système ». Il est membre du CEOS WGISS (Comité sur les satellites d'observation de la Terre/groupe de travail sur les systèmes et services d'information). Il est l'un des représentants du CNES auprès de l'ESA DCB (Data Coordination Body). Il est également expert auprès de la Commission européenne dans les domaines Copernicus, Big Data et valorisation des données.

### NUSSBAUMER Yoann



D.R

Titulaire d'un DUT Services et réseaux de communication de l'Institut universitaire technologique de Mulhouse et d'un Master d'informatique de SupInfo Strasbourg, Yoann Nussbaumer est un pionnier de la mobilité électrique.

En 2008, il crée le site automobile-propre.com, qui est devenu depuis la référence dans le do-

maine des véhicules électriques et hybrides, ainsi que sur les sujets liés à la mutation du secteur automobile vers des solutions plus respectueuses de l'environnement. Le site affiche aujourd'hui une audience de quatre millions de pages vues par mois et se classe parmi les sites automobiles les plus consultés en France.

En parallèle, conscient de l'importance des données de localisation des bornes de recharge dans l'adoption des véhicules électriques, il crée en 2011 le service Chargemap, qui deviendra une société indépendante d'Automobile Propre en 2015.

Dopée par une levée de fonds d'un demi-million d'euros en 2016, Chargemap continue depuis lors de développer sa cartographie communautaire, et a également créer un badge d'accès et de paiement compatible avec de très nombreux réseaux de recharge en Europe. Aujourd'hui, ce sont plus de 250 000 utilisateurs inscrits qui utilisent le service pour la recharge de leur véhicule électrique.

### PAPINEAU Nicole

Nicole Papineau est directrice adjointe de l'IPSL et est directrice d'AERIS, le Pôle de données Atmosphère de l'IR Système Terre. Elle a soutenu, en 1985, sa thèse de doctorat à l'Université Pierre et Marie Curie, celle-ci portait sur la spectroscopie du gaz carbonique à température élevée. Après



D.R

avoir pendant dix ans exercé en tant que chercheuse à l'ONERA, Nicole Papineau entre en 1992 au CNES pour occuper le poste de responsable du programme Atmosphère moyenne. Elle a été ensuite directrice adjointe de la recherche à Météo-France, puis directrice adjointe scientifique au CNRS-INSU. Elle a également travaillé au CNES en

tant que scientifique senior, au sein de la direction financière, et a été présidente du conseil d'administration de Mercator Ocean, précurseur français de MyOcean. Elle a une grande expérience des programmes spatiaux, de l'atmosphère et du climat et de la coopération internationale.

## PEYRACHE Jacques

Ancien élève de Sciences Po (IEP Grenoble) et de l'IDHEC (27<sup>ème</sup> promotion – 1974), il rejoint TF1 (1975-1987) en tant que producteur-réalisateur (1975-1982), puis en tant que responsable de la Recherche-images (1982-1987).

Il fonde Pixibox (1987-1994), dont il est le directeur général (Paris – Saint-Malo – Los Angeles – Hô-Chi-Minh-Ville). Pixibox devient vite le N°1 mondial du dessin animé numérique.

En 1993, il fonde PEGS (le N°1 mondial des logiciels de traitement et composition numérique de dessins animés). En 1994-1995, il crée Pixibox International Corporation (Los Angeles, États-Unis), au sein duquel il exerce les fonctions de président et CEO et, dans le même temps, Pixibox Vietnam, dont il est le CEO (Hô-Chi-Minh-Ville).

De 1995 à 1998, il est directeur général de Medialab, filiale Nouvelles technologies du groupe CANAL+ (Paris).

En 1998, il fonde XD Productions, dont il est le président-directeur général et l'actionnaire majoritaire (en association avec Charente Libre – Groupe Sud-Ouest).

Il est le fondateur du SPFA (Syndicat des producteurs de films et animation), qu'il préside de 1989 à 1995. Il est membre de la FICAM.

## PICINBONO Guillaume



D.R

Guillaume Picinbono a obtenu son doctorat en sciences pour l'ingénieur à l'INRIA en 2001 et a rejoint le CSTB, pour exercer au sein de la division MIC (Maquette numérique et ingénierie concurrente) de la direction opérationnelle « Technologies de l'information ». Il y occupe le poste d'expert Maquettes numériques et est impliqué dans différents

projets de recherche (ANR, FUI, OSEO, FP7...) et d'expertise BIM. En particulier, il a collaboré avec des industriels des produits de construction (Saint-Gobain, Legrand...) au développement d'une nouvelle génération d'outils d'aide à la prescription et à la mise en œuvre de systèmes constructifs et d'équipements innovants. Au cours de ces

projets, il a développé une expertise sur l'utilisation du format standard d'interopérabilité ISO-IFC. En parallèle, il a participé, en tant qu'expert et conseil, à la conception et à la réalisation de plusieurs équipements immersifs de réalité virtuelle : salle immersive Le Corbusier au CSTB Sophia Antipolis, salle immersive Gouraud-Phong à l'INRIA Sophia Antipolis, salle Callisto de la Cité des Sciences et de l'Industrie et salle Oscar Niemeyer au CSTB Paris.

## PILLET Didier

Ingénieur général des Mines et diplômé de Télécom Paris Tech, Didier Pillet, après avoir exercé plusieurs fonctions opérationnelles de R&D dans le secteur industriel, a intégré, en 2009, le Conseil général de l'Économie (CGEJET). Au sein du CGE, il effectue des missions ministérielles ou interministérielles d'expertise, d'audit et d'inspection, liées notamment à l'industrie, à l'énergie et au développement durable.

## POILVÉ Hervé



D.R

Diplômé de l'École polytechnique et ingénieur des Mines, Hervé Poilvé entre en 1988 chez Matra Espace pour exercer dans l'ingénierie système des satellites scientifiques et d'observation. Depuis 1996, il travaille sur le développement d'algorithmes de traitement des images satellites à fin de caractérisation des cultures et de la végétation, en

général. Il a mis en place la première génération des produits de conseil du service Farmstar. Les mêmes outils de traitement servent aujourd'hui aux multiples services proposés par Airbus dans le domaine de l'agriculture et de la forêt.

## REICHARDT Mark



D.R

Mark Reichardt is the Director of Strategic Opportunities with the Open Geospatial Consortium (OGC). He works to identify and implement new programs, partnerships and member engagement that helps the Consortium further advance the benefits of open standards-based integration of location information and

technology across different domains of use such as smart and resilient cities, energy and utilities, and insurance.

Mark Reichardt joined OGC in November 2000 as Director of Marketing and Public Sector Programs; became the President of OGC and a member of the Board of Directors in September 2004; and served as President and CEO from 2018 until early 2019.

From 1980 to 2000 Mark Reichardt was involved in mapping/geospatial production and technology modernization programs for the US Government. In 1999, Mark Reichardt was selected to establish a international

Spatial Data Infrastructure (SDI) program for the US Federal Geographic Data Committee. In this position, Mark Reichardt helped to establish globally compatible national and regional SDI practices in Africa, South America, Europe, and the Caribbean. He was instrumental in establishing several nation-to-nation collaborative SDI agreements.

Mark Reichardt serves as a member of the US National Academy of Science Mapping Science Committee, and the Group On Earth Observations (GEO) Programme Board.

## RENARD Didier



D.R

Didier Renard est enseignant-chercheur au Centre de géosciences de MINES ParisTech – PSL University. Il a participé au développement de méthodologies (PluriGaussiennes, SPDE).

Il a contribué à la conception de plusieurs logiciels de géostatistique commerciaux de réputation internationale, tels que BLUEPACK, ISATIS® ou, plus

récemment, MINESTIS®. Il est l'auteur principal de la librairie RGeostats.

## ROBIDA François



D.R

François Robida is Director at BRGM, the French Geological Survey, in charge of the Data and Digital Infrastructures scientific program. He is in charge of the definition of the strategy and coordination of BRGM activities in this area.

François Robida is a Mining Engineer, graduate of the Nancy School of Mines (Engineer Degree

with specialization in geostatistics). Prior to taking this position in BRGM, François Robida held different positions in the organization related to computer science applications to earth sciences, being in charge of the design and development of software related to all aspects of geology.

As "Terre Virtuelle" project co-leader since 2001 (Terre Virtuelle/Virtual Earth is a BRGM R&D corporate project to support the development of new services through the use of new technologies), François Robida has promoted and introduced interoperability, Grid computing and Virtual Reality technologies within BRGM. The project delivered in 2003 the first OGC compliant portal in France.

François Robida has been involved in development of interoperability at different levels for two decades, as member of the Board of Directors of Open Geospatial Consortium (OGC), member of the European Expert Group for INSPIRE during the preparation phase of the Directive, Chair of the Working Group on "Geospatial information & INSPIRE" of the European Geological Surveys association (EuroGeoSurveys), Chair of the international Commission

for the Management and Application of Geoscience Information (IUGS/CGI), Member of the GEO Data Sharing Working Group (GEO/DSWG), member of the High Level Expert Group on EOSC (European Open Science Cloud). François Robida has been the coordinator of BRGM contribution and co-lead of the OneGeology initiative (120 countries involved) since its launch, and is taking part to the French Ministry of Research participation for the building and co-hosting of EPOS, the European infrastructure for geosciences.

## ROBILLARD Anouk



D.R

Anouk Robillard est animatrice de la plateforme KaruGeo depuis 2016. Elle est titulaire d'un DEA en géographie de l'Université de Bordeaux et d'un DU de systèmes d'informations géographiques et méthodes de l'analyse géographique obtenu en 2008 à l'Université de Poitiers. Depuis 2007, elle travaille en Guadeloupe à la

coordination de projets urbains et environnementaux. Elle a travaillé sur différents projets innovants comme la mise en place d'une démarche HQE dans des projets d'aménagements au sein d'un cabinet d'architecte, ainsi que sur la planification urbaine (ZAC, PLU, EIES, etc.) au sein d'un cabinet d'urbanisme.

Spécialiste de l'analyse spatiale des problématiques urbaines et environnementales, elle a développé, au fil de ses expériences, des compétences en géomatique (acquisition et intégration de données, traitement et analyse, diffusion, production cartographique, gestion de projets) et des compétences en animation, concertation et négociation. L'aménagement territorial dans une optique de développement durable se situant à l'interface d'enjeux sociaux et politiques spécifiques à différents territoires, elle a été amenée à concilier les points de vue, objectifs et stratégies d'une multitude d'acteurs : entreprises privées, collectivités territoriales, services techniques de l'État, etc.

Aujourd'hui animatrice et administratrice de la plateforme KaruGeo, une infrastructure régionale d'informations géographiques, elle travaille à la structuration, à la capitalisation et au partage de l'information géographique. Elle a pour objectif de créer une véritable culture et dynamique des SIG sur le territoire guadeloupéen.

## ROURE Françoise

Contrôleur général économique et financier, le Dr. Françoise Roure est la présidente de la section Sécurité et Risque du Conseil général de l'Économie (CGE) au ministère de l'Économie et des Finances. Elle a créé et présidé la section Technologies et société du CGE, après avoir présidé la section Économique et juridique du Conseil général des Technologies de l'information. Elle est vice-présidente du groupe de l'OCDE sur les biotechnologies, les nanotechnologies et les technologies convergentes.

## SARAFINOF Dimitri



D.R

Dimitri Sarafinof a suivi un cursus d'ingénieur à l'École nationale des sciences géographiques, concrétisé par un Master ParisTech en management des systèmes d'informations et applications géographiques. Il est actuellement responsable du département Normalisation et référentiels projets au sein de l'IGN, une équipe composée d'experts et de chefs de projet expérimentés permettant à l'Institut et à la France de faire valoir leurs positions au sein des instances de normalisation. Ses implications et responsabilités sont multiples. Il assure la présidence de la Commission nationale de l'information géographique et spatiale de l'AFNOR, qui est la commission nationale miroir du Comité technique 211 de l'ISO, lequel traite de la géomatique. Il est également impliqué dans les activités de l'OGC (Open Geospatial Consortium), assurant un suivi plus particulier des thématiques des services Web, la modélisation 2D/3D et les *smart cities*. Enfin, pour le compte du ministère des Armées, il contribue à la définition d'une infrastructure de données géographiques OTAN se concrétisant par l'élaboration d'un accord de normalisation sur les services Web géospatiaux.

## SÉRAPHINE Alain



D.R

Alain Séraphine a obtenu en 1975 un diplôme national des Beaux-Arts avec les félicitations du jury et une mention pour son engagement pédagogique. C'est en s'investissant dans une démarche d'« artiste impliqué » qu'Alain Séraphine va cultiver dans son île (La Réunion) des œuvres qui conjuguent culture, social et économie.

Pour servir le climat, il commence, dès 1979, des travaux de recherches et œuvre à la création :

- de SEE, un système d'économie d'énergie, destiné à assurer l'autonomie énergétique de populations isolées ;
- de L'ARCHE, un système pour l'auto-réalisation et la construction d'un habitat évolutif (antisismique et anticyclonique).

En 1991, il fonde l'École supérieure des Beaux-Arts de La Réunion ;

En 1994, il crée l'Institut de l'image de l'océan Indien ;

En 1995, il fonde avec Abdéali Goulamaly, un industriel, Pipangaï, une société de production dans le cinéma d'animation ;

EN 1997, il fonde la Biennale Arts Actuels Réunion.

## SOENEN Baptiste



D.R

Diplômé de l'École d'ingénieur de Bordeaux Sciences Agro, en 2010, Baptiste Soenen s'est rapidement spécialisé en fertilisation et gestion quantitative de l'eau. Il est aujourd'hui responsable du service Agronomie-Économie-Environnement à ARVALIS, au sein de la direction Recherche & Développement d'Arvalis - Institut du végétal.

## TINEL Claire



D.R

Claire Tinel est représentante du CNES (Centre national d'études spatiales, l'agence spatiale française) auprès du secrétariat exécutif de la Charte internationale Espace et catastrophes majeures.

Après avoir obtenu en 1998 un diplôme d'ingénieur en mécanique, Claire Tinel prépare un Master de télédétection, puis

une thèse sur les propriétés microphysiques et physiques des nuages à partir de mesures radar et lidar spatiaux. Elle obtient son diplôme de docteur en télédétection à l'Université Pierre et Marie Curie de Paris, en 2002.

En 2003, elle rejoint l'ESA (agence spatiale européenne) à Noordwijk (aux Pays-Bas), dans le cadre d'un post-doctorat. Pendant deux ans, elle étudie les performances en termes de transfert radiatif du futur radar nuages embarqué sur la mission EarthCARE qui va être lancée en 2020. En 2005, elle rejoint le centre technique du CNES à Toulouse, en tant qu'ingénieur en qualité image pour effectuer l'étalonnage radiométrique de capteurs optiques en vol.

En 2010, elle se voit confier la direction du programme ORFEO ayant pour objectif de préparer les scientifiques et les institutionnels à utiliser les images des satellites optiques Pléiades du CNES, satellites d'observation de la Terre à très haute résolution spatiale, dans le contexte de thématiques environnementales (aménagement du territoire, littoral, géologie, foresterie, hydrologie, risques, sécurité...).

Depuis 2014, elle représente le CNES auprès du secrétariat exécutif de la Charte internationale Espace et catastrophes majeures. La Charte a été initiée par le CNES et l'ESA en 1999. Aujourd'hui, les dix-sept agences spatiales signataires de la Charte unissent leurs efforts pour programmer en priorité leurs satellites d'observation de la Terre afin de fournir gratuitement des informations de télédétection aux gestionnaires de crises et aux premiers intervenants lors des premières heures suivant une catastrophe naturelle. Entre 2000 et 2018, la Charte a été activée près de six cents fois ; ce sont ainsi plus de cent vingt pays dans le monde qui ont déjà bénéficié de ses services.

## TUTENUIT Claire

Ingénieure du corps des Mines, Claire Tutenuit est déléguée générale de l'Association française des Entreprises pour l'Environnement (EpE).

Créée en 1992, cette association regroupe une quarantaine de grandes entreprises françaises et internationales issues de tous les secteurs de l'économie qui veulent mieux prendre en compte l'environnement dans leurs décisions stratégiques et dans leur gestion courante. Les travaux sont disponibles sur [www.epe-asso.fr](http://www.epe-asso.fr).

## VALLET Bruno



D.R

Bruno Vallet est ingénieur en chef des Mines, ancien élève de l'École polytechnique et de Télécom ParisTech. Il est docteur en informatique de l'Institut national polytechnique de Lorraine suite à une thèse en informatique graphique soutenue en 2008 à l'INRIA Nancy, sous la direction de Bruno Lévy.

Il travaille depuis en tant que chargé de recherche à l'IGN, plus particulièrement à l'analyse et à la reconstruction de scènes urbaines à partir de données hybrides. Il dirige depuis 2018 l'équipe de recherche ACTE (acquisition et traitement de données).

Ses centres d'intérêt ont été successivement la reconstruction de modèles 3D de bâtiments à partir d'images aériennes, le recalage de données de cartographie mobile sur ces mêmes modèles 3D, l'utilisation de ces données pour la reconstruction et la texturation de façades, la détection d'objets urbains et la détection de changement. Il est le porteur du projet de recherche collaborative ANR BIOM (Building Inside/Outside Modeling).

## VOISIN Stéphane



D.R

[stephane.voisin@institutlouis-bachelier.org](mailto:stephane.voisin@institutlouis-bachelier.org)

À l'Institut Louis Bachelier, Stéphane Voisin supervise le programme interdisciplinaire sur la finance verte et durable et coordonne le programme de recherche Blockchain for Good. Analyste financier et extra-financier et spécialiste de la finance durable, il a dirigé, de 2005 à

2016, le bureau d'étude Sustainable Investment Research de Cheuvreux, puis par la suite Kepler Cheuvreux. Il est consultant expert en analyse intégrée et en innovation digitale au service de la finance verte.

De 2013 à 2016, Stéphane Voisin a été directeur de la recherche & Investissements durables de Kepler Cheuvreux, DE 2005 à 2013, il a occupé les fonctions de directeur du bureau de recherche extra-financière & ISR de Cheuvreux. Auparavant, il a été :

- vice-président, responsable de la structuration thématique chez JPMorgan Chase (Londres) ;

- directeur dérivés actions chez Barclays (Paris) ;
- et analyste, structuration & innovation financière à Paribas (Londres).

Par ailleurs, il est :

- membre de la Société française des analystes financiers (SFAF) ;
- membre de la Task Force Technique de l'IIRC – Integrated Reporting ;
- membre du Conseil scientifique de l'Indice Low Carbon, Euronext ;
- membre du comité référentiel européen EFFAS KPIs et DELPHI ESG Investment Standard ;
- membre du Comité technique du Carbon Disclosure Project (CDP) ;
- administrateur expert du think tank "2 Degrees Investing" ;
- administrateur d'Agrisud International ;
- membre expert de l'Institut du capitalisme responsable ;
- président du Conseil scientifique de la Fondation GoodPlanet.

Il est titulaire d'un Master Gestion financière de la NY University.

Il enseigne la « Finance durable » au sein du Master DD-MSO à l'Université Paris-Dauphine.

Il est l'auteur de *The Economics of Sustainable Development*, J.-M. Lasry & co, Economica, 2010.

Il a obtenu les prix suivants:

- Farsight Award for Sustainability Research, Gresham College & City of London (2012) ;
- 1<sup>st</sup> European Sustainability Research, Thomson Extel (2011-2015) ;
- 1<sup>er</sup> Prix de l'analyse extra-financière l'AGEFI/Extel (2008-2012).

## WANIA Annett



D.R

Annett Wania a suivi des études de géographie à Halle (Saale) en Allemagne, puis elle a obtenu son diplôme de doctorat en géographie de l'Université de Strasbourg, en 2007. Depuis, elle travaille au Centre commun de recherche de la Commission européenne (JRC), à Ispra, en Italie, à l'interface recherche et politique. Elle est spécialisée dans la

gestion et le traitement de l'information spatiale, de son extraction à partir de données de télédétection, en particulier des images satellites. Des connaissances qu'elle a acquises lors des travaux qu'elle a réalisés dans différents domaines, tels que la gestion de l'environnement naturel et urbain, l'agriculture et la gestion de crises. Au JRC, elle a entre autres été impliquée dans des projets de recherche ayant pour objectif la définition de services d'informations pré-opérationnelles basées sur des images satellitaires pour la gestion de crises. Depuis 2014, elle travaille au sein de groupe du JRC responsable de l'implémentation des services de cartographie sur demande (*on-demand Mapping*) du Copernicus Emergency Management Service. Depuis 2017, elle est cheffe de projet du service de cartographie d'urgence (Copernicus EMS Rapid Mapping).