

Évaluation de la qualité des données OpenStreetMap sur la Sarthe et réflexion sur le processus de contribution

■ Ophélie PETIT - Pierrick BILLON - Jean-Michel FOLLIN

L'École supérieure des géomètres topographes (ESGT) s'intéresse de près à OpenStreetMap (OSM), un projet de cartographie libre et collaborative. Dans le cadre de projets d'élèves de troisième année se déroulant début 2011, la qualité des données routières d'OSM a été évaluée pour le département de la Sarthe (Auber, Billon et Petit, 2011). La comparaison a été effectuée avec les données de référence françaises (le RGE de l'IGN) selon divers paramètres de qualité des données spatiales (géométrique, attributive, exhaustivité). Ce papier offre un tour

d'horizon des études européennes menées autour de la qualité d'OpenStreetMap, propose une méthodologie de caractérisation des données OSM, explique comment des indices ont été mis en œuvre et enfin présente une analyse critique des modes de contribution ainsi que des réflexions concernant l'amélioration du processus. Il montre que si le réseau routier d'OSM se caractérise par une exactitude géométrique suffisante en vue d'une utilisation dans un SIG, des attributs en nombre réduit mais fréquemment renseignés et une précision sémantique satisfaisante, il présentait, en janvier 2011, une couverture faible voire inexistante dans les zones rurales. Cependant, ce manque d'exhaustivité s'est réduit en l'espace d'un an, entre les mois de janvier 2011 et 2012 la longueur du réseau sarthois représenté dans OSM a doublé atteignant près de 35 % du réseau présent dans le référentiel à grande échelle.

■ MOTS-CLÉS

OpenStreetMap, OSM, estimation de la qualité, données géographiques collaboratives, précision.

Introduction

Connaissez-vous OpenStreetMap ? Ce projet né il y a six ans au Royaume-Uni fait partie de la grande famille de l'information géographique volontaire (VGI, *Volunteered Geographical Information*) et il en est certainement le représentant le plus significatif. OpenStreetMap ou plutôt OSM suit le modèle de "peer production" développé par Wikipedia : son principe est de créer et faire vivre une base de données géographique vectorielle à grande échelle couvrant l'ensemble de la planète sous licence "libre", c'est-à-dire librement utilisable et éditable.

La plupart des cartes actuelles, même gratuites, sont soumises à des licences souvent restrictives. De même, les services en ligne édités par des institutionnels (comme le Géoportail de l'IGN) et surtout des sociétés privées (comme Google Maps) limitent l'utilisation de cartes à des consultations dans un cadre personnel.

La gratuité des données et la possibilité de les utiliser à des fins person-

nelles ou commerciales (dans le cadre de services) font le succès d'OSM. Pour preuve, de nombreux services émergent, par exemple le calculateur d'itinéraire à vélo disponible sur le site de la ville de Paris (www.vgps.paris.fr) ou encore l'initiative *opennoisemap* d'universitaires allemands (www.opennoisemap.org) qui constitue une cartographie du bruit sur la base de contributions individuelles. De plus en plus d'entreprises, d'universités et de particuliers utilisent OSM et de plus en plus de collectivités y participent. Par ailleurs des conventions ont été passées avec des fournisseurs de données comme la Direction générale des finances publiques (DGFIP) et la société Microsoft qui mettent à disposition leurs données comme source de digitalisation : respectivement le plan cadastral informatisé français et l'imagerie aérienne et satellitaire Bing Maps. Cependant, à l'ère de l'interopérabilité et des standards de l'ISO/TC 211¹, une telle base de données géographique est-elle de qualité ?

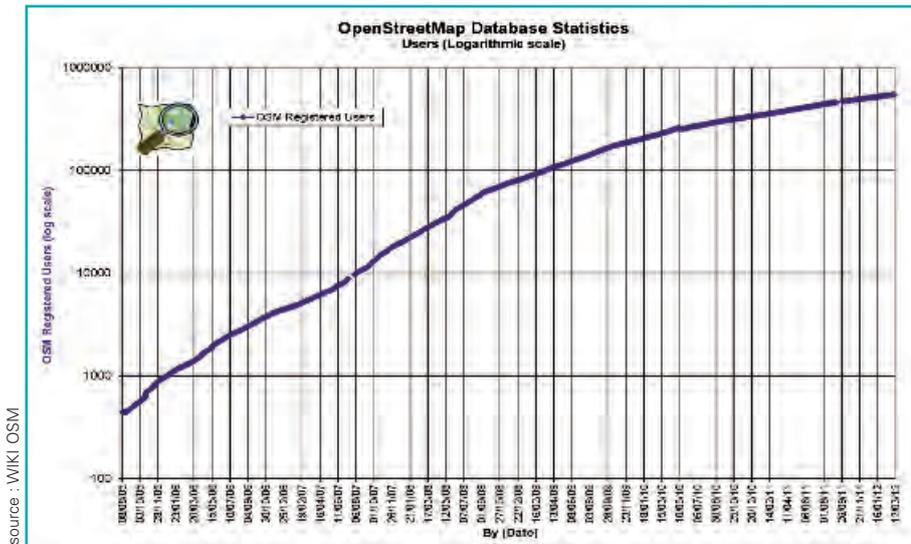
■ Historique et objectifs du projet

En réaction au caractère privé de l'information géographique dans la majorité des Etats, le britannique Steve Coast met en place en 2004 un portail cartographique pour importer les données GPS et produire une carte libre, gratuite et collaborative.

Depuis la création en 2006 de la fondation OpenStreetMap, le nombre de contributeurs augmente de manière exponentielle atteignant à ce jour plus de 500 000.

L'objectif premier de constituer une base de données exhaustive du réseau routier a été élargi avec la prise en compte de nombreux autres thèmes tels que les points d'intérêt, l'occupation du sol et le réseau hydrographique. Toutes les données géolocalisables peuvent être intégrées dans OSM à condition de leur définir un "tag" c'est-à-dire un attribut.

- (1) Comité technique de l'ISO visant à établir un ensemble de standards pour l'information géographique numérique.
- (2) La question de la qualité se pose par rapport à l'utilisation de ces données dans un SIG (recherche de rues, divers traitements simples) comme nous le verrons par la suite.



source : WIKI OSM

Figure 1. Nombre de contributeurs (échelle logarithmique)

■ Limites et avantages

Le grand atout d'OpenStreetMap est sa licence libre qui permet à la fois une exploitation large des données mais aussi leur protection (licence virale). Une communauté dynamique, importante et soudée améliore la coordination des travaux et encadre l'évolution d'OSM. Par exemple elle a défini à travers les "map features" une nomenclature permettant de décrire de façon homogène les objets cartographiés avec le système des tags.

De plus en plus d'organismes privés soutiennent financièrement OpenStreetMap (Microsoft en 2010) ou offrent de nouveaux services³ basés sur ses données (applications de smartphones, logiciels). Cependant, comme l'a annoncé Steve Coast en 2011, le nouveau défi d'OpenStreetMap est l'amélioration de sa qualité. En effet, il apparaît dans les études que nous présenterons en partie 2 que les données OSM souffrent d'un certain nombre de défauts liés au fonctionnement même du projet (hétérogénéité, faiblesse dans les zones peu peuplées, etc.).

■ Objectifs de l'étude

Le but de l'étude est non seulement d'effectuer un état de l'art des recherches autour de la qualité des données VGI, mais aussi d'évaluer la qualité des données routières issues d'OpenStreetMap sur le département de la Sarthe.

Notre objet d'étude, le réseau routier,

en plus d'être l'objectif initial d'OpenStreetMap présente un véritable enjeu en termes de qualité puisqu'il est fréquemment utilisé pour la simple recherche d'une rue d'après son nom ou le calcul d'itinéraires. S'il semble encore trop tôt pour charger le réseau routier OpenStreetMap français dans un GPS de voiture en raison de défauts de couverture et du manque de renseignement de certains attributs notamment dans les zones rurales (sens unique, noms de voie...), l'utilisation d'OpenStreetMap est envisageable pour certaines fonctions d'analyse spatiale comme, par exemple, la création d'une zone tampon autour de routes d'importance. La Sarthe a été choisie pour cette étude car elle offre un réseau routier diversifié (autoroutes, voies secondaires, tertiaires, voies résidentielles, chemin...) ainsi qu'une grande variété de zones en terme d'urbanisation (zones urbaines densément peuplées, zones périurbaines en développement, zones rurales). La disponibilité des données et la situation géographique de l'ESGT ont également guidé le choix.

En plus d'une étude quantitative et qualitative de différents paramètres de qualité, il s'agit de proposer une méthodologie de contribution. Certains contributeurs affirment, par exemple, que le GPS offrirait la meilleure qualité en termes d'exactitude géométrique. Qu'en est-il en réalité? Mais avant toute chose, comment

évaluer la qualité d'un jeu de données géographiques?

Etat de l'art sur l'évaluation de la qualité d'OSM

Les premiers travaux sur la qualité de l'information géographique sont apparus dans les années 60 avant de se multiplier avec le développement des SIG dans les années 80. (Van Oort P., 2006) a recensé les plus significatives et a dégagé les critères de qualité qui font consensus. Il a ainsi comparé les travaux d'Aronoff, de l'USA-SDTS⁴, de l'International Cartographic Association, du Comité Européen de Normalisation CEN/TC287 et les normes ISO 19113 (concernant la qualité) et ISO 19114 (traitant son évaluation). Il dégage ainsi différents critères de qualité dont seuls trois vont être explorés dans cette étude :

- la précision géométrique (*positional accuracy*) qui donne une estimation des écarts entre la position réelle d'un point et sa position décrite dans le jeu de données ;
- la précision attributaire (*attribute accuracy*) comprenant selon l'auteur la précision sémantique (*semantic accuracy*), qui quantifie les erreurs portant sur les propriétés "littérales" des données. Pour le cas des données routières il s'agirait d'une route nationale considérée dans la base de données comme une autoroute ;
- et l'exhaustivité (*completeness*) qui quantifie les manques et les excès, c'est-à-dire la non-représentation d'une donnée présente dans le monde réel ou inversement.

■ La précision géométrique

En 2008 Mordechai Haklay rédige une des premières analyses de la qualité d'OSM. Cette étude se concentre sur la ville de Londres et sur l'Angleterre. Cette précision géométrique est calculée selon deux techniques : une comparaison statistique et une com-

(3) Cloudmade et GeoFabrik depuis 2007, Mapquest depuis 2010.

(4) USA-SDTS *United States of America spatial data transfer standard*: format de fichier permettant la distribution de données géospatiales et contenant une partie définition de la qualité.



paraison visuelle. La comparaison statistique est basée sur une analyse effectuée par (Zulfikar N. 2008) où la précision de localisation est déterminée en comparant un échantillon de segments d'autoroutes OSM à des données bien plus précises : celle de l'"Ordonnance Survey". Elle considère qu'une analyse point par point ne peut être menée en raison des différences géométriques entre OSM et les bases de données de l'Ordonnance Survey. Elle opte donc pour une analyse basée sur une technique de zones tampon (Figure 2) développée par (Goodchild et Hunter, 1997). Elle crée deux zones tampon : la ligne à tester ayant un petit rayon (généralement 1 m) et la ligne de référence en ayant un plus fort. Elle calcule ensuite le recouvrement de ces deux surfaces. Selon la taille du "buffer" (zone tampon) choisi et le pourcentage de recouvrement, elle détermine la précision. Par exemple, pour un "buffer" de 20 m et l'autre de 1 m, elle obtient un recouvrement de 80%. (Haklay M., 2008) montre quant à lui que pour une zone tampon de 6 m, approximativement 80% des données autoroutières des deux jeux se superposaient.

Aamer Ather, reprend cette méthode dans (Ather A., 2009). Il utilise des zones tampon de 10 m pour les données du "Integrated transport Layer" (données routières anglaises) et de 1 m pour OSM, et obtient entre 98 et 100 % de recouvrement. En abaissant le "buffer" à 5,6 m, il descend à une classe de [96 - 98 %] de recouvrement. Il conclut que la précision d'OSM est bonne.

Le COGIT est un laboratoire de l'IGN qui étudie les problématiques liées à l'utilisation des données topographiques vectorielles. De récentes publications du laboratoire témoignent de l'intérêt grandissant de l'IGN pour les projets collaboratifs comme OpenStreetMap.

Dans leur article (Girres et Touya, 2009) présentent leur étude de la qualité d'OSM. Ils expliquent leur démarche : l'appariement⁵, le calcul de distance moyenne⁶ et de Hausdorff⁷ et analysent leurs résultats. En comparant les thèmes linéaires routiers, ils obtiennent une distance de Hausdorff moyenne de 13,57 m, donc supérieure à la précision de la base de données de référence dont l'erreur moyenne quadratique est de 2 m. Par exemple, en étudiant les carrefours des thèmes routiers, ils obtiennent une distance de Hausdorff moyenne de 6,65 m soit une erreur de position moyenne trois fois supérieure à celle garantie par la BD TOPO[®]. En menant des calculs de distance euclidienne ils obtiennent des résultats nettement inférieurs. En effet, le principe de la distance de Hausdorff est de ne conserver que les résultats les plus "désavantageux".

Même si leurs méthodes et leurs jeux de données sont différents, le COGIT et les universitaires anglais obtiennent des ordres de grandeur similaires.

■ La précision attributive

Dans ses dernières recherches (Haklay M., 2010) a évalué la quantité d'attributs sur l'ensemble de l'Angleterre. Il a remarqué que cette dernière était très faible et progressait beaucoup plus lentement que la géométrie. En effet, la

couverture géométrique s'est améliorée de 18,6% entre mars 2009 et mars 2010 tandis que la progression des renseignements attributaires n'a atteint que 9,6%. La raison principale est qu'il est nécessaire de faire un levé sur le terrain pour trouver le nom d'une rue (sinon il y a violation des copyrights).

Dans les villes couvertes, des produits tels que "sightwalk"⁸ vont s'avérer très utiles pour renseigner toutes ces bases de données, les contributeurs pourront retranscrire les noms inscrits sur les plaques des rues. Pour la France, la difficulté est moindre puisque le Cadastre permet la copie de ses attributs.

Dans (Girres et Touya, 2010), la "précision" attributive correspond à la qualité interne du jeu de données. Pour son évaluation, les auteurs utilisent soit une approche quantitative avec l'indicateur du taux de renseignement de cet attribut⁹, soit une approche qualitative.

Selon eux, la précision attributive est réduite en raison de "l'absence de spécifications précises avec peu de valeurs remplies pour les attributs secondaires"¹⁰ (29%) et 40% d'erreurs pour les attributs principaux comme le nom des lacs ou la nature de routes."

Pour l'évaluation de la précision sémantique, les auteurs font correspondre les classes de deux jeux de données, ils associent les tags "motorway" et "primary" dans OSM au type de routes "primaire" dans le référentiel à grande échelle (RGE) puis calculent le nombre

- (5) L'appariement est une étape presque indispensable lorsque l'on souhaite réaliser une étude de qualité comparée. Son but est de mettre en correspondance des objets homologues, représentant la même réalité afin d'effectuer une comparaison.
- (6) La distance moyenne est un rapport entre la surface séparant deux polygones et leur longueur moyenne.
- (7) La distance de Hausdorff est un indicateur de similarité entre deux formes, elle calcule la plus petite des distances maximales entre les deux géométries. Il s'agit donc d'un estimateur de qualité défavorable.
- (8) Concurrent allemand de Google Street View : <http://www.sightwalk.com>. La licence de Street View (Google Maps) n'autorise pas les produits dérivés à l'inverse de Sightwalk.
- (9) Ce terme apparaît dans (Maué et Schade, 2008) et dans (Guptill et Morrison, 1995).
- (10) Pour le réseau routier, les attributs secondaires peuvent être par exemple le nombre de voies, la vitesse maximum, la nature du revêtement, les sens unique.

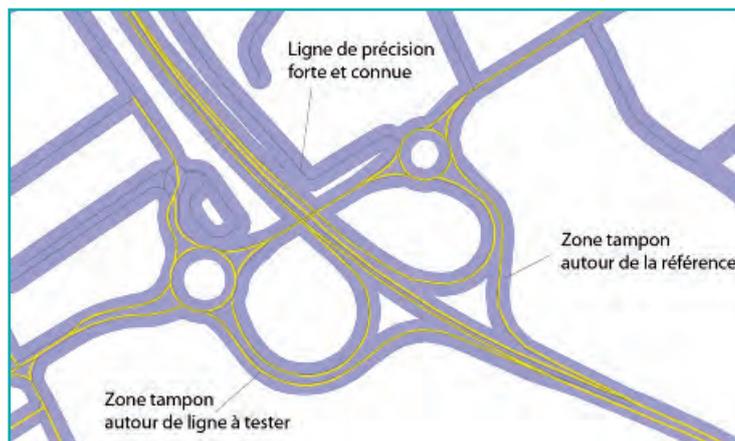


Figure 2 : Principe de la méthode des buffers.



de correspondances sémantiques exactes pour les routes appariées des 2 jeux¹¹. D'après le COGIT (Girres et Touya, 2009) : "La précision sémantique dépend directement de la clarté des spécifications : les routes de nature "autoroute" ou "principale" sont presque toutes justes sémantiquement (comparaison automatique avec la BD TOPO®) mais les routes "résidentielles" ou "tertiaires", plus floues, sont sémantiquement fausses à 50 %".

Cependant, comme l'ont souligné les forums de contributeurs, il est difficile de comparer les types de voies car OSM et le RGE n'ont pas les mêmes critères. En effet les types de voies d'OpenStreetMap ont été conçues pour s'appliquer au réseau routier mondial alors que celui du RGE s'applique exclusivement à la France. De ce fait, les "routes à une chaussée" dans le RGE recouvrent aussi bien les routes "résidentielles" que les routes "tertiaires" dans OSM.

D'après Girres et Touya (2010), il est possible d'expliquer cette faible précision par :

- une utilisation insuffisante de spécifications pourtant très détaillées,
- la possibilité de créer de nouveaux tags non présents dans les spécifications, contrepartie d'une trop grande liberté,
- le manque de recommandations concernant les noms : aussi bien le format (capitales, préfixes...) que le tag utilisé pour nommer un élément.

Les auteurs recommandent donc vivement de standardiser les spécifications afin d'améliorer aussi bien la précision attributive que sémantique. Ils pensent "que l'amélioration de la qualité des données OSM nécessite de trouver l'équilibre idéal entre les spécifications et la liberté de contribution. Un moyen commode pour atteindre un tel équilibre serait d'utiliser un contrôle de cohérence automatique avec cahier des charges strict."

■ L'exhaustivité

Pour estimer l'exhaustivité, (Zielstra et Zipf, 2010) de l'université de Heidelberg en Allemagne ont comparé la quantité d'informations entre TeleAtlas et OpenStreetMap. La com-

paraison a porté sur trois échelles distinctes : celle du pays, celle de villes moyennes et celle de grandes villes. Pour réaliser leur étude sur les données de voirie ou "street network", les auteurs ont calculé la longueur totale du réseau choisi dans une zone déterminée pour les deux jeux de données. En cas de différence de longueur totale, ils ont considéré qu'un de leurs jeux de données était plus complet que l'autre. Ils en ont conclu que dans les grandes villes, OSM était globalement plus riche que TeleAtlas et ce dans toutes les catégories. De plus, comme l'avait montré Mordechai Haklay, ils ont constaté que la croissance d'OSM était extrêmement rapide. Les zones peu denses restent cependant insuffisamment couvertes.

Haklay a montré que fin mars 2010 la couverture de l'Angleterre était de 69,8% contre 51,2% l'année précédente. En mai 2011, il a mis au point une interface web permettant de comparer l'exhaustivité d'OSM en 2008, 2009, 2010 et 2011 (cf. figure 3). Dans chaque cellule de la grille (taille de la maille : 1 km / 1 km), il calcule la différence de longueur entre le réseau OSM

- (11) Pepijn van Oort regroupe les précisions sémantiques et attributaires dans la catégorie "précision attributive" comme le fait la norme ISO 19113. Nous en ferons de même dans ce papier.
 (12) <http://orca.casa.ucl.ac.uk/~ollie/osm-compare/>
 (13) <http://beta.letuffe.org/>

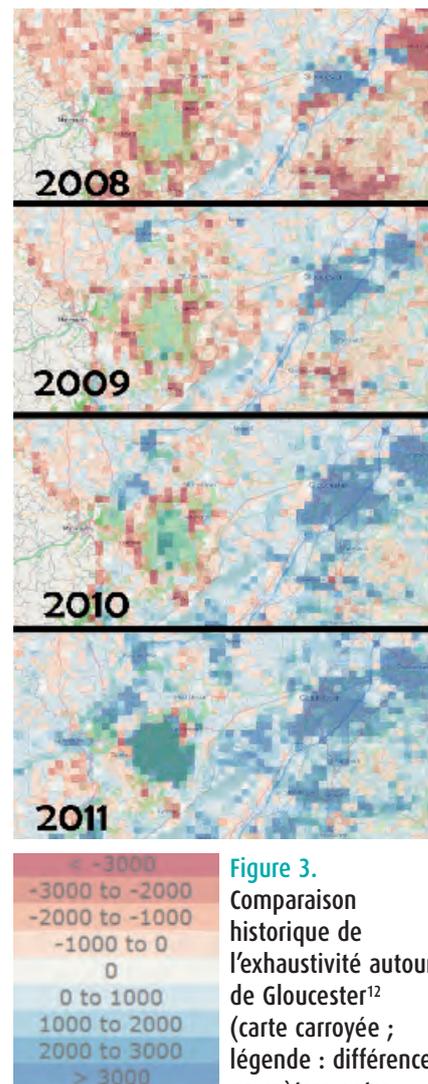


Figure 3. Comparaison historique de l'exhaustivité autour de Gloucester¹² (carte carroyée ; légende : différence en mètres entre OSM et Meridian2)

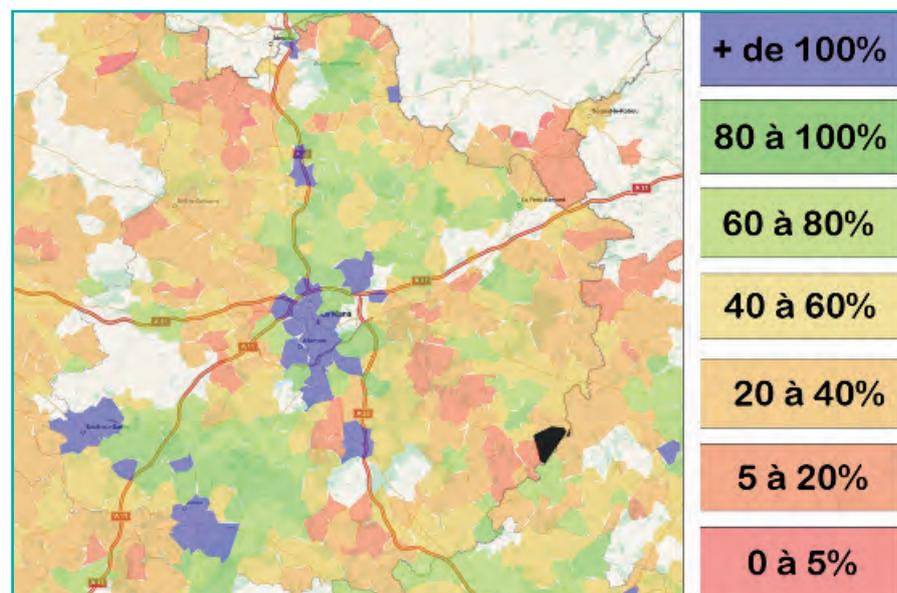


Figure 4. Écart (%) du nombre de km de voirie entre le cadastre vecteur et OpenStreetMap par commune - (auteurs : Frédéric Rodrigo et Sylvain Letuffe¹³).



et Meridian 2 (la base de l'Ordonnance Survey au 1:50 000^e).

Par ailleurs, il a montré que des "cellules vides" dans Meridian 2 disposaient de données dans OSM. Ce qui prouve que la communauté OSM crée ses propres données et a bien pour but de cartographier l'intégralité du territoire.

En France, des initiatives comparables ont été menées par des contributeurs à l'image de la carte de l'exhaustivité du réseau routier OSM français (Figure 4). Ici la référence est un réseau issu du cadastre, résultant de l'interpolation à partir des limites de parcelles. Cette carte permet aux contributeurs de repérer les communes moins bien cartographiées dans OpenStreetMap.

Proposition d'une méthodologie d'évaluation appliquée à des données sur la Sarthe

Il existe une définition européenne de la qualité des données géographiques, cependant, selon les pays, les méthodes pour l'estimer sont différentes. Les contributeurs ont élaboré leurs propres outils d'autocontrôle, comme QualityStreetMap, afin de produire des informations géographiques fiables. Ces outils sont essentiellement dédiés :

- à l'évaluation de la complétude attributive,
- à la vérification de la cohérence logique,
- au suivi des modifications.

Peu d'outils permettent le contrôle de l'exactitude géométrique et pour cause : des données de référence sont nécessaires. Pour cette étude du réseau sarthois, la référence choisie est le référentiel français : le RGE. Nous comparerons donc le linéaire routier d'OpenStreetMap au linéaire du RGE, dont la précision est métrique.

■ OSM et le RGE : deux bases de données aux logiques différentes

Il faut bien souligner les différences de finalité entre les données d'OSM et celle du Référentiel à grande échelle : les données du RGE sont des données de référence à l'échelle de la France, l'IGN ayant une mission de service

public qui l'oblige à représenter l'ensemble du territoire de manière uniforme et avec une excellente qualité. En revanche les données d'OSM sont issues de contributeurs volontaires qui ne bénéficient pas des mêmes moyens, mais qui œuvrent pour créer une information dédiée au SIG, accessible et utilisable pour tous. Ces deux bases de données n'ont donc pas la même finalité.

Par ailleurs les deux jeux sont différents aussi bien dans la structuration des données que dans les spécifications (géométrie, attributs).

Dans le RGE, les relations topologiques sont appuyées, comme pour la plupart des données géographiques, sur une structure de graphe.

Dans OpenStreetMap, les données sont organisées en "primitives". Il en existe trois types :

- les nœuds avec un identifiant, des tags et des coordonnées géographiques
- les chemins formés d'une succession de nœuds avec un identifiant et des tags,
- les relations rassemblant une ou plusieurs primitives, chacune ayant en plus un attribut type "rôle". Les relations permettent de lier ou de modéliser des objets sans avoir à dupliquer des géométries (par exemple un parcours de bus).

Afin de normaliser l'acquisition de données, l'IGN a mis en place un cahier des charges sur lequel sont indiquées toutes les spécifications pour le levé. En ce qui concerne OSM il existe également un document qui a pour but d'homogénéiser la représentation du tracé, mais il n'existe pas de spécifications concernant le levé. Par exemple, pour les tronçons de routes,

le RGE s'appuie sur l'axe de la voie en tenant compte du bas-côté, tandis que les spécifications OSM n'indiquent pas sur quel axe il faut se baser. Nous avons été contraints de partir de l'hypothèse qu'OSM et le RGE avaient la même notion d'axe de voirie afin d'effectuer nos calculs de comparaison, mais cette absence de spécification doit être prise en compte pour l'analyse des résultats.

■ Les Indicateurs

Pour estimer la qualité, nous avons effectué l'appariement des deux réseaux à l'aide du plugin Roadmatcher du logiciel libre OpenJump. Nous avons ainsi pu obtenir des liens entre des segments homologues que nous avons pu exploiter à la fois pour le calcul de l'exhaustivité, de l'exactitude géométrique, et de la précision attributive (taux de renseignement et comparaison sémantique). Pour effectuer les comparaisons OSM/RGE, le découpage des données a suivi le découpage communal. Cette unité de comparaison est différente de celle de Hakley qui a opté pour un maillage du territoire.

Pour l'exhaustivité, un calcul de densité du réseau a été mené selon la formule : Nombre de km de voie dans OSM / Nombre de km de voie dans le RGE * 100

Pour l'exactitude géométrique nous avons retenu la distance de Hausdorff (cf figure 5) utilisée par Girres et Touya. La formule est la suivante, pour deux polygones composés de séries de sommets $A = \{a_1, \dots, a_NA\}$ et $B = \{b_1, \dots, b_NB\}$, la distance de Hausdorff H est : $H(A, B) = \max(h(A, B), h(B, A))$ Où $h(A, B)$ et $h(B, A)$ sont les distances euclidiennes entre les deux jeux de données.



Figure 5. Schéma décrivant l'indicateur de distance de Hausdorff

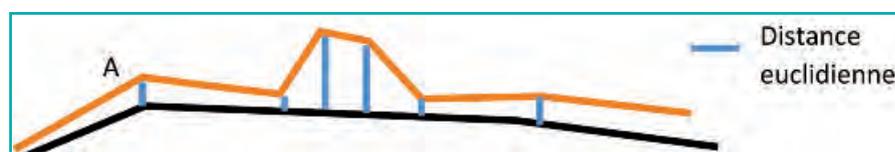


Figure 6. Schéma décrivant l'indicateur de distance euclidienne moyenne



Nous lui avons associé un indicateur de distance euclidienne qui nous a paru donner un meilleur aperçu de la qualité globale du réseau. L'indicateur de distance euclidienne moyenne consiste, après extraction des nœuds (points) du réseau routier OSM, à calculer leur distance euclidienne à la référence (RGE) (cf. figure 6).

Contrairement à la "distance moyenne" utilisée par le COGIT, cette méthode n'est pas pondérée par la distance entre les points ni par la longueur des tronçons. Or le réseau OSM n'est pas homogène, le risque est donc que les forts écarts soient minimisés dans le résultat final. Néanmoins elle permet de donner un aperçu des écarts de l'ensemble des points du réseau à la référence et à ce titre reste un bon indicateur de qualité.

Pour l'étude de la précision attributaire nous avons mené deux analyses :

- une comparaison des taux de renseignement (nombre de tronçons renseignés / nombre total de tronçons * 100) selon le type de voie ainsi que le calcul du taux de renseignement de l'attribut "nom" par commune (Nombre de km de voie nommée dans OSM/Nombre de km de voie nommée dans le RGE*100).

- une analyse fine de la précision sémantique qui a permis d'évaluer la similitude stricte de l'attribut "nom" et d'analyser les causes des différences (orthographe, nom incomplet, différence, ponctuation) en menant une comparaison manuelle.

Cette analyse de la précision sémantique est quelque peu inédite. Elle apporte un éclairage sur la qualité des attributs "noms" renseignés dans OpenStreetMap.

■ Méthodologie de contribution

Pour contribuer, plusieurs méthodes existent :

- le GPS : les contributeurs peuvent intégrer leur propre trace à OSM et les traces enregistrées par d'autres utilisateurs,
- la connaissance d'un lieu, notamment en matière de toponymie, qui permettra de renseigner de la manière la plus efficace les attributs.
- digitaliser ou intégrer des données

dans le domaine public (Landsat, TIGER, Corine Land Cover...),

- digitaliser ou intégrer des données propriétaires (Imagerie aérienne Bing Maps, Yahoo Maps, Cadastre français raster et vecteur).

- corriger des erreurs et des bugs.

Un certain nombre d'outils facilitant la contribution à OSM ont été développés¹⁴, parmi lesquels :

- Potlatch, éditeur en ligne,
- JOSM, application Java indépendante
- le plugin OSM pour QGIS...

Parmi toutes ces méthodes, laquelle permet d'obtenir les données de meilleure qualité ?

Pour s'assurer de la qualité des données, nous avons analysé les différences entre deux modes : le GPS et la digitalisation. Nous avons donc levé une même commune avec les deux méthodes. Pour la digitalisation nous avons utilisé le logiciel JOSM, outil simple d'utilisation qui offre des fonctionnalités avancées d'édition de la géométrie ainsi que des "préréglages" qui permettent de renseigner facilement les attributs.

Pour le levé GPS, nous avons utilisé le GPS Juno conçu à des fins SIG, abordable pour des contributeurs OSM (640 €). Nous avons également utilisé le système d'augmentation EGNOS qui permet d'améliorer la précision de notre levé. EGNOS est constitué de stations terrestres réparties sur toute l'Europe qui vont recevoir les données émises par les satellites GPS puis en déduire des corrections pour chaque station. Une grille de correction est calculée et transmise à notre récepteur



Figure 7. Capture d'écran du logiciel JOSM avec superposition de la couche cadastre et des photos aériennes de Bing.

GPS via des satellites de télécommunications. L'accès à ce segment d'augmentation est gratuit et ne nécessite pas d'abonnement. Il permet d'atteindre une précision théorique métrique, cependant en raison d'une perte fréquente de signaux nous avons obtenu une précision effective de 2,18 m.

Nos choix de contribution se sont portés sur deux communes peu cartographiées à l'époque de nos travaux : la Chapelle-Saint-Aubin, commune périurbaine couverte par les orthophotos de Bing (Figure 7) avec une résolution de 1 pixel pour 50 cm, et sur la commune de Cogners, commune rurale, couverte uniquement par imagerie satellitaire avec une résolution moins bonne de 1 pixel pour 4 m.

Pour la digitalisation, nous avons choisi de superposer le cadastre et l'imagerie Bing car le cadastre permet de bien cerner l'axe des voies, de connaître les noms de rues et l'imagerie Bing permet de déterminer l'occupation du sol, l'emprise des voies et éventuellement de corriger des erreurs du cadastre.

Pour évaluer nos contributions aussi bien par GPS que par digitalisation, nous avons utilisé l'indicateur de distance euclidienne moyenne.

■ Analyse des résultats

L'exhaustivité : le talon d'Achille d'OpenStreetMap

Quel est l'état d'avancement du projet OSM ? C'est par cette première question que nous avons débuté nos recherches. La figure 8 représente la densité du réseau routier d'OSM par rapport au RGE. On constate que la Sarthe respecte les tendances européennes : une grande ville comme Le Mans est très bien représentée et les campagnes sont généralement délaissées. Ce phénomène peut être expliqué par une probabilité plus forte de trouver des contributeurs dans ces zones et le fait que chaque contributeur cartographie en priorité sa ville de résidence.

L'exhaustivité est le grand point faible du réseau routier sarthois. En ne repré-

(14) Se référer au e-book <http://fr.flossmanuals.net/openstreetmap/>.



sentant que 15 % du réseau RGE en janvier 2011 à l'échelle du département, il n'était exploitable qu'au sein des villes majeures comme la Flèche (45 %) ou le Mans (55 %). Cependant les manques sont comblés progressivement puisqu'en janvier 2012 la couverture monte à près de 35 % du RGE et Le Mans est complet à près de 80 %.

Une exactitude géométrique suffisante pour une utilisation de type SIG

	Hausdorff (ESGT)
Maximum	45,83 m
Minimum	0,02 m
Moyenne	6,64 m
σ	6,92 m

Tableau 1. Écarts entre le RGE et OSM selon les distances de Hausdorff

Sur la Sarthe, la distance de Hausdorff est en moyenne de 6,6 m avec un écart-type de 7 m. Ces résultats sont inférieurs à ceux obtenus par le COGIT (calculé sur Hendaye), cet écart peut être attribué soit à une meilleure qualité du réseau routier sarthois, soit à la correction par nos soins d'un certain nombre d'erreurs aberrantes. Effectivement, le calcul de cette distance ne tient pas compte des extrémités des polygones et des polygones en boucle. De ce fait un certain nombre d'enregistrements ont été corrigés manuellement. Cependant les écarts obtenus témoignent d'une exactitude globale satisfaisante en vue d'une utilisation de type SIG.

Sur la première carte (Figure 10), on constate tout d'abord que les zones bien cartographiées ne se trouvent pas uniquement dans les zones urbaines. En effet, on s'aperçoit que Le Mans bénéficie d'une bonne exactitude, mais c'est également le cas pour le secteur Nord-Ouest du département où les distances et les écarts-types sont faibles (environ 1 m). A contrario, on observe des zones moins bien cartographiées, comme par exemple le secteur Est du département. Si l'on regarde à présent la carte basée sur les distances d'Hausdorff (Figure 11), on s'aperçoit que les tendances de la carte précédente sont généralement respectées. On constate cependant certaines diffé-

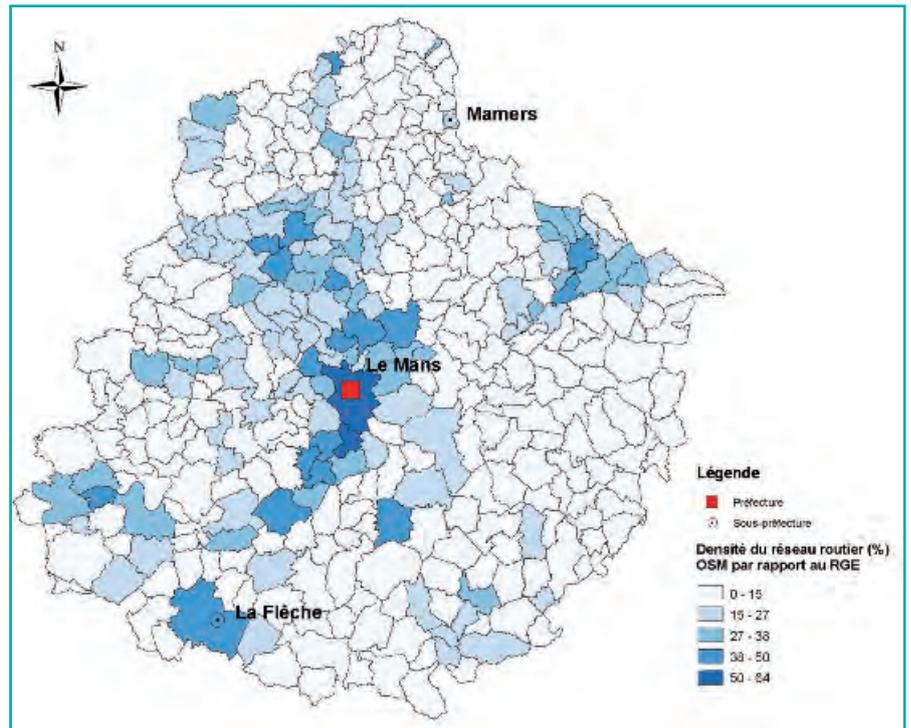


Figure 8. La densité du réseau routier OSM par rapport au RGE en janvier 2011

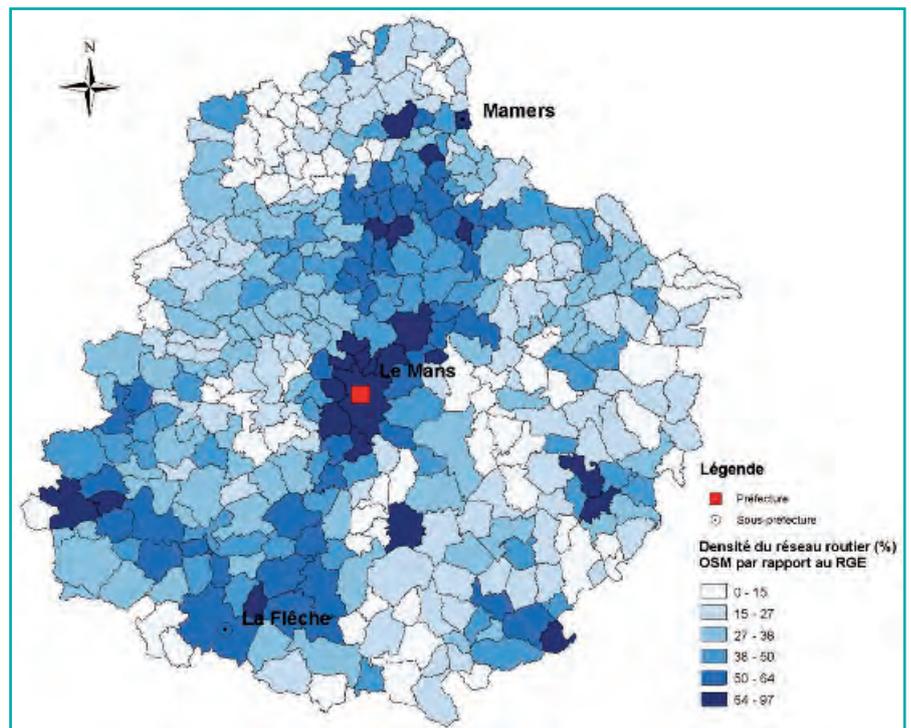


Figure 9. La densité du réseau routier OSM par rapport au RGE en janvier 2012

rences, la commune de Douillet dans le nord-est de la Sarthe présente par exemple une distance euclidienne faible mais une distance de Hausdorff forte, ce qui traduit la présence d'erreurs ponctuelles fortes mais une qualité d'un bon niveau général. Par contre on remarque que d'une

manière globale les écarts-types et les écarts moyens sont plus importants (comme nous l'avons indiqué précédemment, la distance d'Hausdorff ne retient pour chaque polygone que l'écart à la référence le plus important). La distance de Hausdorff est donc un indicateur plus exigeant.



Statistiques (m)	Autoroute	Voies piétonnes	Voies secondaires	Voies tertiaires	Voies primaires	Rue
Nb	2 621	3 532	13 577	15 383	4 385	21 062
Max	27,2	29,8	29,8	29,9	29,2	29,9
Min	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Moyenne	4,0	3,6	3,2	2,5	2,5	2,0
Écart type	4,0	5,3	3,6	2,9	2,5	2,9

Tableau 2. Tableau des précisions relatives d'OSM en fonction du type de voie sur l'ensemble du département

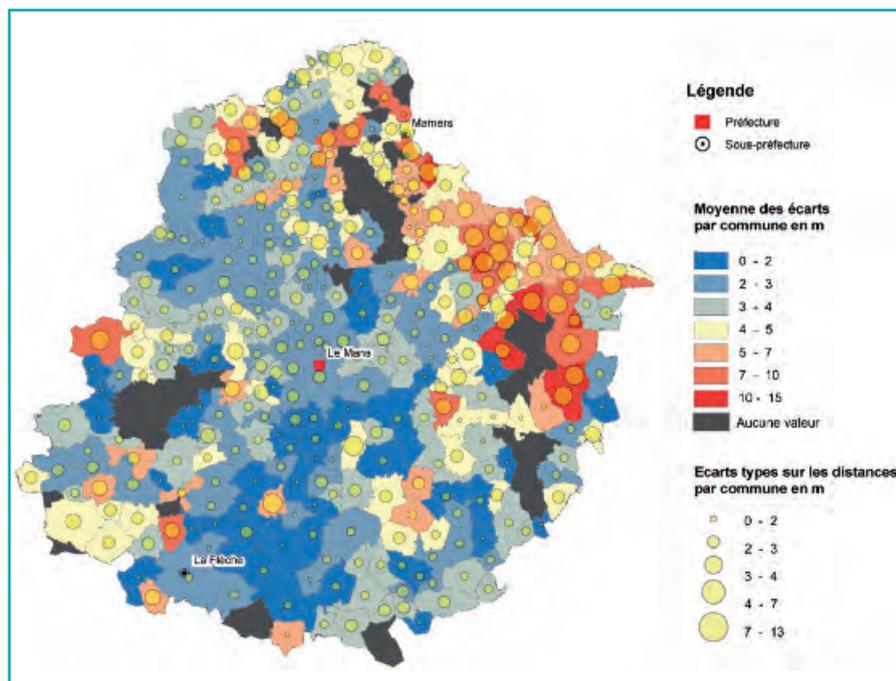


Figure 10. Exactitude géométrique par distance euclidienne

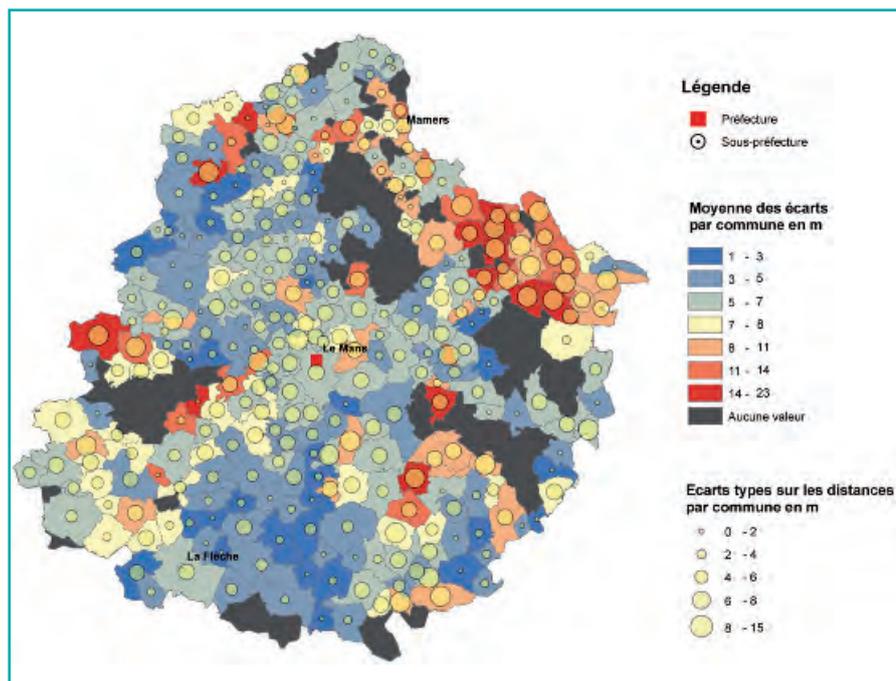


Figure 11. Précision géométrique par distance de Hausdorff

Ces cartes nous montrent le défaut d'homogénéité que peuvent avoir les données d'OSM, directement corrélé à la qualité du travail du contributeur. Si plusieurs contributeurs travaillent sur la même zone, ils vont pouvoir se corriger entre eux et ainsi améliorer au fur et à mesure l'exactitude des données. Sinon, si un seul contributeur cartographie une zone, l'exactitude des données dépendra directement de son travail.

En s'intéressant à la source des écarts (Tableau 2), il est apparu que les autoroutes et les voies piétonnes étaient les plus éloignées du RGE. Plusieurs hypothèses peuvent être élaborées pour expliquer ce phénomène :

- Les phénomènes de masques (GPS) plus fréquents pour les voies piétonnes (rues étroites en centre-ville, sous couvert forestier en milieu rural).
- La largeur de la chaussée pour les autoroutes : notre référence le RGE, représente l'axe de la chaussée. En l'absence de spécifications pour la digitalisation ou le lever des autoroutes, nous pouvons supposer que les contributeurs n'intègrent que la voie de droite ou la voie de gauche. Au calcul, ce biais serait donc mis en évidence.

Par ailleurs, nous ne constatons pas de différence flagrante d'exactitude entre zones rurales et zones urbaines.

Des attributs moins nombreux mais bien renseignés

Dans OpenStreetMap, trois attributs sont renseignés automatiquement : la date, le nom du contributeur et la source lorsqu'il s'agit du cadastre. Dans le RGE le nombre d'attributs est fixe, dans OSM il est variable. Le nombre d'attributs par enregistrement est plus faible dans OSM que dans le RGE. Cependant sur le réseau sarthois les contributeurs renseignent fréquemment les attributs non

► automatiques à savoir le type et le nom ou la référence. Ainsi sur les routes secondaires, tertiaires et résidentielles on atteint plus de 50 % d'attributs renseignés ce qui est comparable voire supérieur au RGE.

Une sémantique à 71 % identique

En comparant les attributs du réseau apparié, il est apparu que 71 % de noms de voie étaient strictement identiques pour près de 2 000 enregistrements sur l'ensemble de la Sarthe. Comme on peut le voir dans la figure 14, les 29 % d'erreurs sémantiques sont majoritairement dus à une différence de ponctuation et d'orthographe.

■ **Contribution à OSM : La digitalisation offre une bonne exactitude géométrique**

De la même manière que nous avons étudié les données d'OSM sur le département de la Sarthe, nous avons réalisé des tests pour estimer la qualité des données pour lesquelles nous avons contribué. Nous avons pour cela conservé le même protocole. Les données qui servent de référence sont toujours celles du RGE.

Pour la Chapelle Saint-Aubin, dont le réseau routier a été digitalisé à partir de la superposition du cadastre (PCI) et des orthophotos de Bing, nous avons obtenu les résultats résumés dans le tableau 3.

Statistiques (m)	Voirie (orthophoto + PCI)
Nombre de valeurs	866
Max	10,5
Min	0,0
Moyenne	1,2
Écart-type	1,1

Tableau 3. Précision géométrique pour la méthode de contribution par digitalisation sur La Chapelle-Saint-Aubin

En termes d'exactitude géométrique, nos résultats dépassent toutes nos attentes. En effet, la précision relative des données est de 1,2 m ± 1,1 m. Il faut de plus se rappeler que la précision du RGE au sein de la commune est de 1,5 m environ. Nous obtenons donc une précision relative qui est meilleure que la pré-

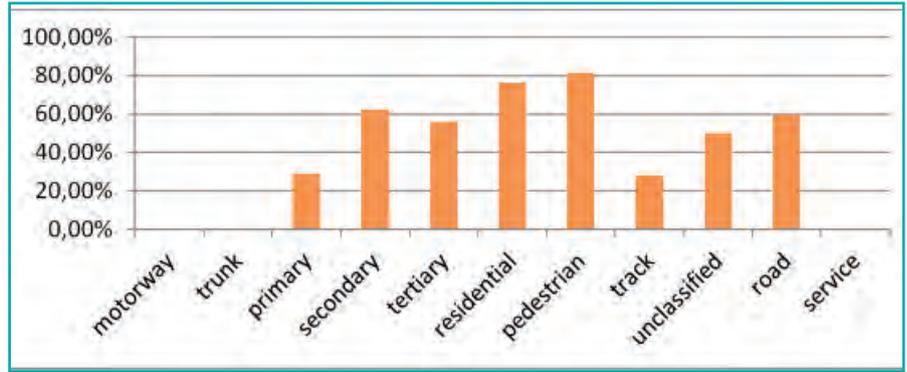


Figure 12. Pourcentage d'attribut "name" renseigné dans OSM selon la nature de la voie

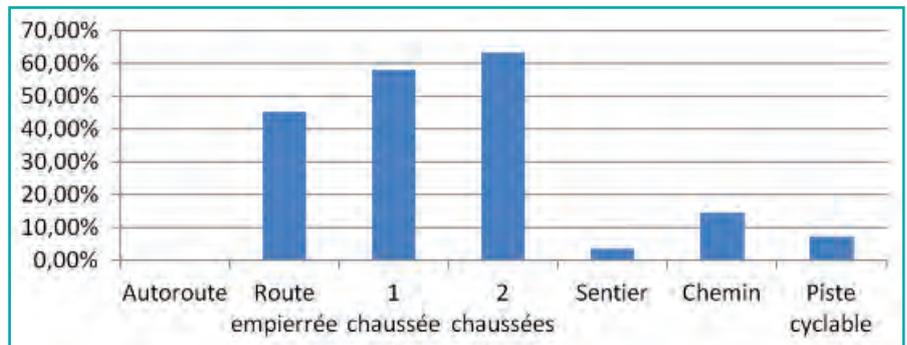


Figure 13. Pourcentage d'attribut "nom" renseigné dans le RGE selon la nature de voie

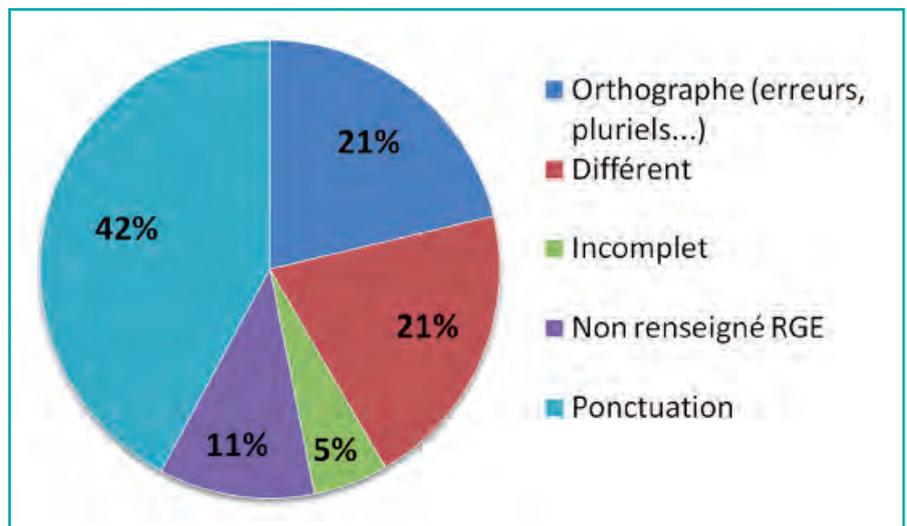


Figure 14. La répartition des erreurs sémantiques dans OSM

cision de la référence, ce qui rend plus difficile l'interprétation des résultats. On pourrait très bien imaginer que nos données sont plus précises que la référence, mais rien ne nous permet de l'affirmer, il aurait fallu pour cela bénéficier d'un jeu de données plus précis.

Sur la commune de Cogners, nous ne disposons pas d'orthophotos. La résolution des images satellites de Bing est nettement moins bonne.

Statistiques (m)	Voirie (image satellite + PCI)
Nombre de valeurs	817
Max	25,6
Min	0,0
Moyenne	2,4
Écart-type	2,3

Tableau 4. Précision géométrique par digitalisation sur la commune de Cogners



Cela impacte sur nos résultats comme nous pouvons le voir sur le tableau 4. Nous constatons que nos résultats sont moins bons que ceux obtenus à La Chapelle-Saint-Aubin, la précision relative obtenue est de $2,4 \text{ m} \pm 2,3 \text{ m}$. On perd 1 m de précision (environ) lorsqu'on digitalise sur une commune uniquement couverte par de l'imagerie satellitaire.

En comparant nos contributions par levé GPS au RGE, nous obtenons ainsi les précisions suivantes sur la commune de La Chapelle-Saint-Aubin :

Statistiques (m)	Voirie (GPS)
Nombre de valeurs	1 388
Max	26,0
Min	0,0
Moyenne	1,9
Écart-type	1,5

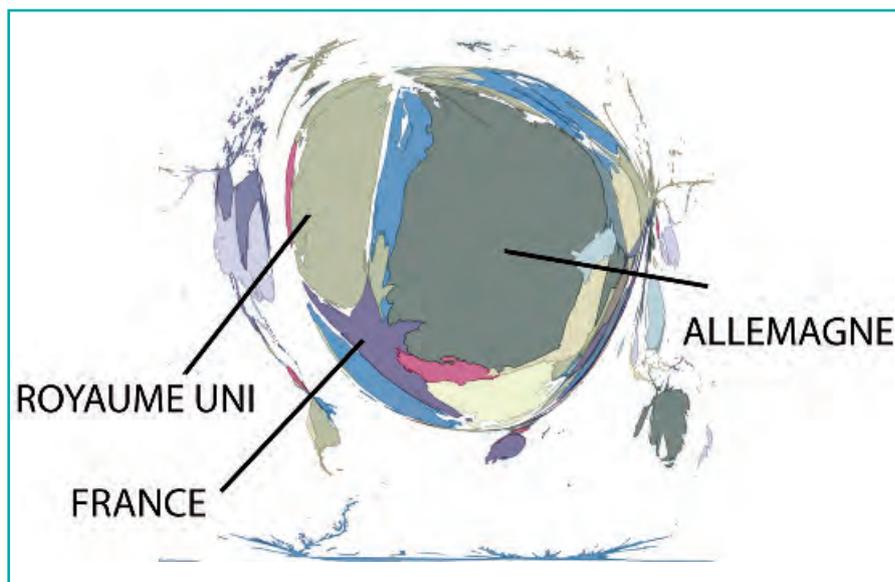
Tableau 5. Tableau des statistiques pour la méthode de contribution par levé GPS

Les résultats sont tout à fait corrects. En effet, nous trouvons une précision relative par rapport au RGE de $2 \text{ m} \pm 1,5 \text{ m}$. Le GPS que nous avons utilisé peut donner des résultats d'une précision d'environ 2 à 5 m lorsqu'il capte les données EGNOS. Cela explique les précisions obtenues.

Nous avons montré que la digitalisation sur des orthophotos de qualité en s'aidant du plan cadastral n'avait rien à envier à la méthode GPS. Cependant lorsque seules des images de plus faible résolution sont disponibles, le GPS reste la meilleure solution. Dans l'idéal il faudrait coupler une digitalisation (rapidité sur les voies bien visibles) à une intervention terrain afin de répertorier les attributs, les points d'intérêt (panneau de signalisation, etc.) et lever les chemins sous couvert forestier. Lorsque l'imagerie Bing est de mauvaise qualité, le levé GPS sera par contre impératif.

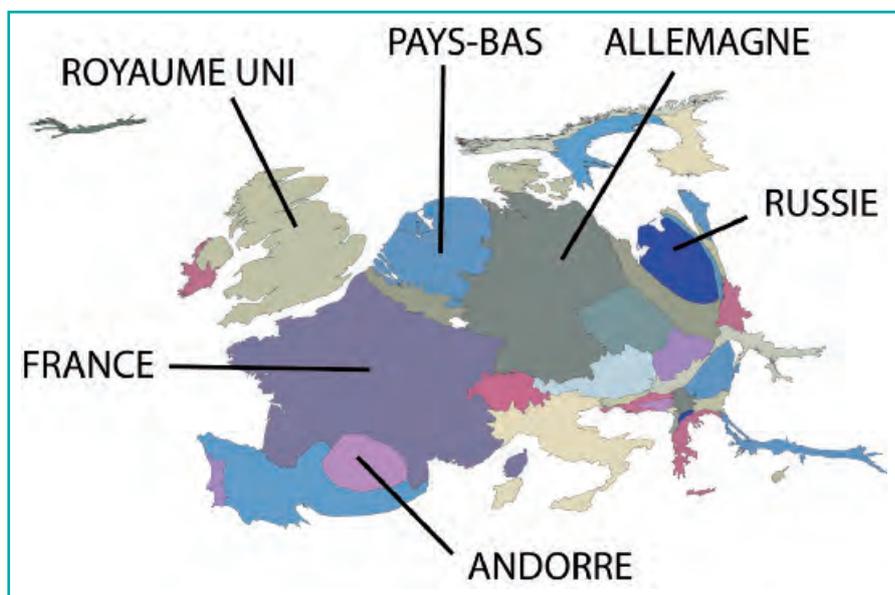
Conclusion

Jusqu'en 2010, le réseau français dans OSM était moins avancé que chez nos voisins européens. La comparaison des études de (Haklay M.2010), (Zielstra D., Zipf A., 2010) et (Girres et Touya, 2010)



source : Cloudmade London, auteur : Matt Amos.

Figure 15. Cartogramme du nombre de points d'intérêts dans OSM par pays du monde en 2008 (rapport du nombre de points sur la surface du territoire).



source : Geofabrik, auteur : Ophélie Petit.

Figure 16. Cartogramme de la densité d'OpenStreetMap en Europe en 2011 (rapport du poids des fichiers OSM (polygone + lignes + points) sur la surface du territoire).

montre que, dès les origines du projet, l'Allemagne, le Royaume-Uni et les Pays-Bas se sont fortement impliqués dans OpenStreetMap comme en témoigne cette carte en anamorphose (Figure 15) de 2008.

Fin 2011, la France semble avoir rattrapé son retard (cf. Figure 16).

Cet accroissement rapide du nombre d'entités dans OSM peut être attribué aux collectivités de plus en plus convaincues par le concept d'OpenData (dont la ville du Mans, qui vient d'ouvrir ses données en février 2012), à la possibilité d'intégrer aisément le bâti du

cadastre français vecteur, de digitaliser des informations depuis le cadastre ou les images de Bing, mais surtout à l'augmentation et à l'implication des contributeurs. Grâce à tous ces facteurs, il est possible d'imaginer qu'OpenStreetMap puisse bientôt allier fiabilité et quantité d'information.

Évidemment des améliorations peuvent être envisagées. Notre étude sur la qualité a montré que les données OSM présentaient une forte incomplétude, un faible nombre d'attributs et de forts écarts-types du point de vue de l'exactitude géométrique. Ce dernier



problème résulte probablement de l'absence de spécifications précises pour le levé comme pour la digitalisation. En imposant le levé de l'axe des voies, en définissant une échelle de référence et une résolution minimale pour la digitalisation, la précision géométrique pourrait être non seulement améliorée mais aussi homogénéisée. Néanmoins la précision des données VGI est tout à fait respectable pour une utilisation SIG et nous formons de grands espoirs d'amélioration grâce à Bing et au cadastre français.

Les données du RGE qui nous ont servi de référence tout au long de notre étude bénéficient d'une précision meilleure que les données d'OSM, mais ces données n'ont pas les mêmes finalités. Nous considérons donc qu'il n'y a pas de concurrence entre les deux jeux de données.

Il n'existe pas à l'heure actuelle de métadonnées de qualité sur OSM. Il pourrait être intéressant de créer un indicateur composite de qualité qui aurait une fonction de "certification" et regrouperait les différents paramètres de qualité que nous avons présentés. Cet indicateur pourrait être intégré dans un fichier de métadonnées associé à chaque téléchargement depuis la plate-forme OpenStreetMap.

OpenStreetMap est encore un petit monde. Mais grâce à son organisation, à la volonté et à la motivation de ses membres qui s'activent pour communiquer sur le projet (l'association OpenStreetMap France a vu le jour début octobre 2011), il devrait continuer à séduire les collectivités, les entreprises et le grand public. ●

Bibliographie

- Auber M., Billon P., Petit O., 2011.** *Les données routières d'OpenStreetMap dans la Sarthe : comparaison avec le RGE et contribution au projet (2011)*, Rapport de projet.
- Van Oort P., 2006.** *Spatial data quality: from description to application*, Wageningen Universiteit, Nederland.
- Joos G., 2006.** *Data Quality Standards*, Shaping the Change XXIII FIG Congress Munich, Germany, October 8-13, 5/10.

- Guptill, S.C., Morrison, J.L. (edited by), 1995.** *Elements of Spatial Data Quality*, 1st ed. Elsevier Science, pp 1-135.
- Langaas, S., "Cartographical Data and Data Quality Issues"**, UNEP et CGIAR Cooperation, disponible sur www.nlh.no/ikf/gis/dcw/arendal-base-data.pdf, pp. 1-8 (1995).
- Flavin, R.W., Andrews A.J., Kronvang B., Muller-Wohlfeil D., Demuth S., and Birkenmayer A., (1998).** ERICA European Rivers and Catchments, pp 4-102 .
- Haklay M. 2008.** *How good is volunteered geographical information? A comparative study of OpenStreetMap and Ordnance Survey datasets.*
- Haklay M., 2010.** *Openstreetmap completeness evaluation*, <http://povesham.wordpress.com/2010/04/openstreetmap-completeness-evaluation-march-2010/>
- Haklay M., 2011.** *OpenStreetMap and Ordnance Survey Meridian 2 comparison - 2008 - 2011*, <http://povesham.wordpress.com/2011/05/20/openstreetmap-and-ordnance-survey-meridian-2-comparison-2008-2011/>
- Zulfiqar N, 2008.** *A Study of the Quality of OpenStreetMap.org maps: A comparison of OSM data and Ordnance Survey Data*, Thèse MEng, Londres, Collège universitaire de Londres, p.54.
- Goodchild M.,F. et Hunter G,J, 1997.** *A simple positional accuracy measure for linear features.* Journal International de la science de l'information géographique, 11(3), 299 -306.
- Goodchild M.,F. et Hunter G,J, 1996.** *Communicating uncertainty in spatial databases*, Transactions in GIS
- Aamer A., 2009.** *A Quality Analysis of OpenStreetMap Data*, MEng, Londres, Collège universitaire de Londres.
- Girres J.-F. et Touya G., 2009.** *Première évaluation de la qualité des données libres d'OpenStreetMap en France*, Colloque International de Géomatique et d'Analyse Spatiale SAGEO'09, 25-27 novembre, Paris (France).
- Girres J.-F. et Touya G., 2010.** *Quality Assessment of the French OpenStreetMap Dataset.* Transactions in GIS 14 (4), 435-459.
- Maué P. et Schade S., 2008.** *Quality Of Geographic Information Patchwork*, 11th AGILE International Conference on Geographic Information Science 2008, University of Girona, Spain.
- Zielstra D., Zipf A., 2010.** *A Comparative Study of Proprietary Geodata and Volunteered Geographic Information for Germany.*

- Neis P., Zielstra D., Zipf A., 2011** *The Street Network Evolution of Crowdsourced Maps: OpenStreetMap in Germany 2007-2011*
- Van Der Biest F., 2008** *OpenStreetMap : un état des lieux*, Géomatique Expert - N° 62 - Avril-Mai 2008

Contact

Ophélie PETIT

ophelie.petit.chevalier@gmail.com

Pierrick BILLON

p.billon@ageis-ge.fr

Jean-Michel FOLLIN

jmfollin@cnam.fr

École Supérieure des géomètres topographes (ESGT)

ABSTRACT

The concept of Volunteered Geographic Information (VGI) makes sense for 7 years with the development of OpenStreetMap (OSM). OSM follows the peer production model that created Wikipedia: its principles are to create and support vector geographic databases covering the entire planet under "free" license, that is to say freely usable and editable. In line with studies by COGIT laboratory in France, and German or English researchers, this paper evaluates the quality of OSM road data for a French Department: Sarthe. Various aspects of spatial data quality (geometric, semantics, completeness) have been studied, through comparisons with the French reference data (RGE of the IGN), and the accuracy of OpenStreetMap has been estimated. Furthermore, two methods of contribution: digitizing and GPS survey were compared in order to provide clues to contributors. Geometry and literal data are consistent with GIS users. The weakness of OSM lies rather in a lack of attributes information as well as geometry. However the number of contributors amounts each day and the recent possibilities of digitizing from Bing Maps and Cadastre web map services provides important outlooks.



Administration en Ligne (AeL), l'autoroute des démarches numériques

■ Stéphane COUDERQ

Le Canton de Genève a entrepris en 2008 un vaste chantier numérique : la mise en œuvre de 10 prestations en ligne pour améliorer les relations entre les citoyens et l'administration, le web étant un vecteur de communication majeur. 31 millions de francs ont alors été alloués au lancement de ce vaste programme. Parmi ces dix prestations, l'une allait faire appel à la technologie des Systèmes d'Information Géographique (SIG) : les demandes d'autorisation de construire sur le territoire Genevois. L'Etat de Genève a confié à l'entreprise Topomat Technologies les développements des applications AeL (Administration en Ligne) faisant appel aux technologies SIG. Ces projets informatiques ont démarré en 2009.

AeL et Système d'Information Géographique, les projets

■ Demandes d'autorisation de construire

Le premier projet alliant la géographie au programme AeL fut les demandes d'autorisation de construire. Le but étant de simplifier les démarches des professionnels de la construction, essentiellement des architectes, et de diminuer les délais de traitement des dossiers au sein de l'administration. Plusieurs applications ont été développées, tant pour servir les architectes que les fonctionnaires devant traiter les dossiers d'autorisation de construire. Ont vu le jour :

- un premier guichet "Requérant", au service de tout citoyen, mais dans les faits, plus orienté pour les architectes.
- un deuxième guichet "Rapport d'entrée" permettant au service des Demandes d'Autorisation de Construire (DAC) de gérer les demandes et de jouer le rôle de coordinateur au sein de l'administration parmi plus de 100 services préavisés donnant leur avis favorable ou non favorable à la demande. Il s'agit là d'une véritable plate-forme d'ajustement demandant aux services pré-

■ MOTS-CLÉS

SIG Web, Géoservices, e-gouvernement, administration en ligne, demande de subvention, énergie, autorisation de construire.

aviseurs de statuer en parallèle sur un dossier, et non plus les uns après les autres, comme c'était le cas jusqu'à présent.

L'architecte réalise une demande d'autorisation via le guichet "Requérant". La géographie est omniprésente. Le requérant, après s'être identifié – Identifiant AeL unique pour toutes les prestations –, puis après avoir saisi les informations le caractérisant, se localise géographiquement, dessine ou intègre son projet de construction sur le terri-

toire. A la suite de quoi, le système expert "traversera" sur le lieu précis de la demande, l'ensemble des couches du SIG Genevois, et détectera les restrictions de droit public pouvant affecter le projet concerné. Cette requête spatiale aura pour effet de ne demander au requérant seulement les informations nécessaires, déduites de l'emplacement géographique du projet. L'information géographique permet donc de simplifier et de diminuer les informations que doit fournir le requérant. Les objets géographiques ainsi que les informations liées (attributs et documents numériques) sont immédiatement enregistrés dans des bases de données de l'Etat. Le requérant a tout loisir de travailler sur sa demande pendant une période indéterminée. Les informations sont enregistrées dans des bases de données temporaires non accessibles par les fonctionnaires. Ce n'est qu'à la validation finale du requérant que les informations stockées sont dirigées vers des bases de données ouvertes et donc accessibles aux fonctionnaires devant statuer sur cette demande d'autorisation de construire.

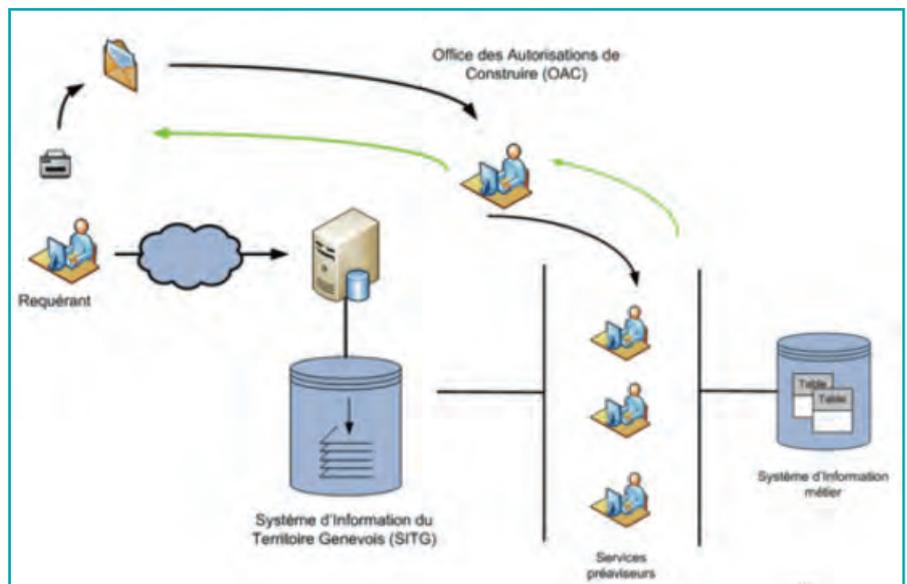
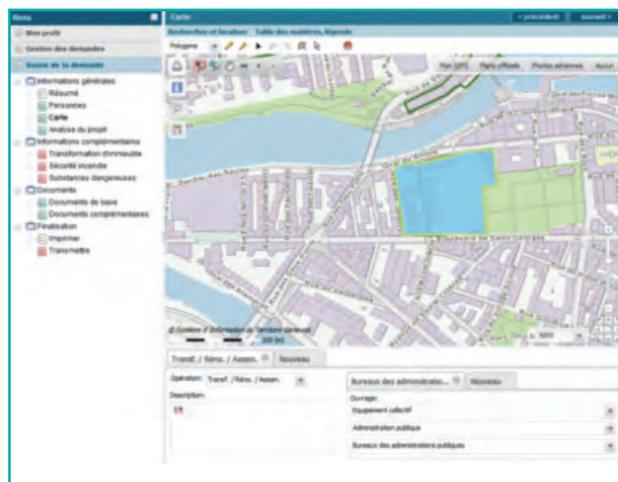


Schéma du processus de requête.



Guichet cartographique requérant



Guichet cartographique TopoSub

▶ La mise en production de l'ensemble du processus sera effective cette année.

■ Amélioration des bilans énergétiques des bâtiments (TopoSub)

Sur la base de la même architecture informatique, le programme de l'Administration en Ligne de l'Etat de Genève (AeL) a donné l'impulsion à la réalisation d'un guichet lié à l'amélioration des bilans énergétiques des bâtiments. Cette application a pour but de faciliter la démarche du requérant lors du dépôt d'une demande de subvention.

Ce guichet permet au citoyen de réaliser une demande de subvention dans le cadre de travaux techniques à réaliser dans son habitat (forage géothermique, installation énergie-bois, installation solaire thermique...).

Cette application a pour vocation de gérer deux cycles de vie de cette démarche : le premier cycle étant la demande de subvention proprement dite, le deuxième, la demande de paiement.

La géographie est également centrale dans ce processus, car le requérant doit impérativement se localiser géographiquement et sélectionner sur la carte le bâtiment concerné par sa demande. Côté administration, c'est un SIG Desktop qui prend le relais. Le collaborateur du Service Cantonal de l'Energie (SCaE) dispose donc d'un SIG complet et d'une base de données alimentée automatiquement par le requérant via le site web. Ces outils lui permettront d'analyser la demande, de répondre au citoyen et de réaliser les statistiques ainsi que le suivi global de toutes les demandes.

■ Technologies SIG employées

Les technologies SIG employées sont essentiellement celles d'Esri et Topomat Technologies. Les composants formant le socle SIG sont ArcGIS Server (Esri) et TopoMaps (API Cartographique Topomat). Dans le cas du projet énergétique, ArcGIS Desktop joue le rôle de back-office. Les webservices forment le cœur de la solution. Ils permettent l'accès sécurisé aux bases de données de l'Etat via un

processus d'enrôlement AeL, de visualiser les données cartographiques, de saisir les informations (en y rattachant des documents électroniques - GED), de transmettre de part et d'autre des informations sur le statut du processus.

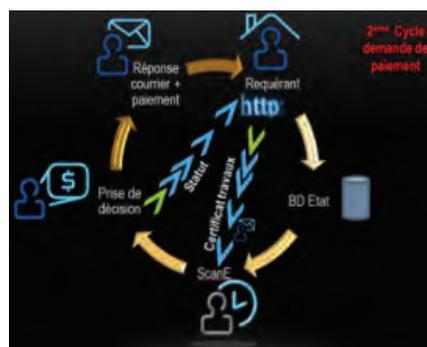
■ Tendances

Les Systèmes d'Information Géographique s'appuyant sur des technologies serveur et sur les web-services apportent une nouvelle dimension à l'utilisation des données géographiques. Désormais, des systèmes SIG experts ne sont pas seulement disponibles en mode desktop, mais bel et bien sur nos navigateurs, et donc accessibles au plus grand nombre. Le déploiement de telles solutions est facilité. Sans occulter le potentiel énorme des solutions desktop, il est évident que les solutions serveurs vont prendre de plus en plus de place dans nos applications quotidiennes. ●

Contact

Stéphane COUDERQ

Topomat Technologies - Directeur
scouderq@topomat.ch



ABSTRACT

GIS at Citizen's service. State of Geneva is developing e-government solutions in the fields of building permit and energy saving.

Le nouveau réseau géodésique national du Cameroun

■ Jean-Louis CARME

Cet article présente les travaux de réalisation du nouveau réseau géodésique national du Cameroun effectués par la société FUGRO GEOID pendant l'année 2011. Après une description des principales phases du projet, le texte présente les méthodes utilisées lors du traitement des données.

Sont ainsi passés en revue la mise en référence et le calcul des 25 points du réseau de premier ordre par rapport au Core Network de l'International GNSS Service (IGS), le calcul et l'ajustement par blocs des 510 points du réseau de second ordre, et enfin la détermination d'une nouvelle surface de correction altimétrique (CGM11: Cameroon Geoid Model 2011) par adaptation du modèle global EGM2008 sur un réseau de 130 points GPS nivelés répartis sur l'ensemble du territoire. La grille CGM11 permettra à l'avenir de calculer les altitudes au-dessus du niveau moyen de la mer dans le référentiel NGAC (Nivellement Général de l'Afrique Centrale, utilisé au Cameroun) de points mesurés par GPS sur le territoire.

Projet

A la fin de 2010, le Ministère des Domaines et des Affaires Foncières du Cameroun (MINDAF) s'est engagé dans un vaste projet de réforme foncière et de modernisation du Cadastre et se dote, à ce titre, d'un réseau géodésique national de référence, matérialisé au sol.

Jusqu'alors, les informations cadastrales, domaniales, patrimoniales et foncières du Cameroun étaient collectées sur la base de multiples systèmes plus ou moins cohérents au niveau national. Le livre foncier du pays pouvait donc s'en trouver mis en cause. Pour la population, un cadastre national est un outil qui permettra de mettre fin aux nombreux conflits fonciers.

Au-delà de cet objectif, ce réseau de grande précision est destiné à être utilisé pour appuyer les travaux de cartographie, la délimitation des frontières ou le développement d'infrastructures sur l'ensemble du territoire (routes, voies ferrées, lignes électriques, oléoducs...).

Le MINDAF a confié la réalisation de ce nouveau canevas géodésique à FUGRO GEOID, société spécialisée en géodésie, topographie, hydrographie, scanning laser, cartographie LIDAR et géomonitoring, membre du groupe FUGRO, leader mondial dans le domaine des géosciences.

Pour superviser cette réalisation, le MINDAF a mandaté IGN France International.

Spécifications

Le nouveau réseau géodésique devait être constitué de 25 bornes de 1^{er} ordre espacées tous les 200 km, encadrées chacune par 4 bornes auxiliaires, et de 500 bornes de 2nd ordre ou repères géodésiques scellés dans un affleurement rocheux espacés tous les 20 à 30 km.

En outre, chacune des 370 communes formant le territoire Camerounais devait être pourvue d'au moins un point géodésique, sans aucune considération de géométrie.

MOTS-CLÉS

Cameroun, 2011, réseau géodésique national, GPS précis, ajustement par moindres carrés, surface de correction altimétrique, modèle de géoïde régional



Figure 1. Situation du Cameroun

Géographie

Même si, avec une superficie de 475 442 km² et une population d'un peu moins de 20 millions d'habitants, le Cameroun est un pays de taille moyenne en Afrique, ses caractéristiques physiques font de cette réalisation un projet de grande envergure.

En effet, le pays est d'abord très étendu. 1 240 km séparent la limite septentrionale de la forêt équatoriale du bassin du Congo au sud et le lac Tchad en bordure du Sahara au nord. D'est en ouest, son étendue maximale est de 850 km entre la rivière Sangha à la frontière avec le Congo et la Centrafrique et la péninsule de Bakassi à la frontière du Nigeria. Ainsi, un projet qui prévoit que chaque fraction du territoire soit équipée d'une borne géodésique nécessite d'avoir à parcourir au final des distances considérables.

Par ailleurs, le relief du Cameroun est compliqué, en particulier sur toute sa partie occidentale. La dorsale camerounaise, alignement de hauts plateaux et de montagnes constitué d'un bloc du socle soulevé et recouvert d'épanchements basaltiques, traverse ainsi les régions

► sud-ouest (où le Mont Cameroun culmine à 4095 m), nord-ouest et Adamaoua, interrompu au nord par l'effondrement que constitue le bassin de la Benoué. A l'extrême nord, on trouve encore les monts Mandara avant la grande plaine inondable du bassin du Logoné. Bien que moins accidentés, les plateaux vallonnés des régions Centre et Sud sont traversés par de nombreux cours d'eau.

Enfin, ce contexte géographique difficile est rendu particulièrement contraignant du fait que de nombreuses pistes ne sont réellement praticables qu'en dehors de la saison des pluies, dont les dates varient, selon les régions, entre mars et octobre. Ainsi, à l'extrême nord, la mousson africaine dure 2 mois tandis que sur le littoral et les montagnes et plateaux de l'ouest, les pluies tombent régulièrement pendant 8 mois entre mars et octobre.

Travaux préparatoires

Cette phase a consisté en l'élaboration d'un avant-projet de pré-localisation des sites candidats, des accès possibles ainsi que des repères de nivellement disponibles a priori. Ont également été rédigés le plan de réalisation et de contrôle et les procédures d'exécution des différentes phases du projet.

Une première ébauche d'avant-projet a été établie en fonction de considérations géométriques et des accès a priori. Cet avant-projet a ensuite été affiné au cours d'ateliers de travail et de réunions de concertation avec l'ensemble des responsables régionaux et départementaux des services du Cadastre afin de mettre à jour la liste de l'ensemble des communes avec leur nom officiel et leur situation exacte ainsi que de tous les villages importants et lieux-dits judicieusement situés.



Figure 4. Séminaire de travail

A l'issue de cette étude 555 sites ont ainsi été présélectionnés.

Reconnaissance sur le terrain

Cette opération stratégique avait plusieurs objectifs :

- valider, modifier ou annuler le choix des différentes localités présélection-



Figure 2. Lac Tchad



Figure 3. Monts Mandara



Figure 5. Rivière de l'Adamaoua



Figure 6. Piste dans le Centre



nées ainsi que le type de point (1^{er} ou 2^e ordre), le cas échéant rajouter des sites supplémentaires ;

- préciser l'emplacement exact des points ainsi que le type de matérialisation (bornes de 1^{er} ou 2^e ordre, repère géodésique scellé). En plus des critères de sélection classiques (pérennité du site, de préférence sur le domaine public, stabilité du sol, absence de masques GPS), la préférence était donnée aux sites situés à proximité d'un repère de nivellement ;

- reconnaître les différents itinéraires d'accès aux sites et notamment leur praticabilité avec un camion et un pick-up 4 x 4 selon les saisons (état général, durées, vitesses moyennes des différents tronçons, passages de gués, ponts submersibles, zones de bourniers ou ravinées, sections dégradées en dévers au-dessus de falaises, passage de grumiers ou autres camions lourdement chargés en direction du Tchad, etc.) ainsi que les repères de nivellement des mailles situés sur ou à proximité de ces itinéraires.

La reconnaissance a été réalisée conjointement par les équipes FUGRO GEOID et les responsables régionaux et départementaux du cadastre.

Au final, 535 sites ont été implantés, dont 25 pour le réseau de 1^{er} ordre et 510 pour celui de 2^e ordre, les 10 sites surnuméraires étant prévus pour compenser l'abandon de sites qui se seraient avérés inaccessibles pendant les phases de matérialisation ou d'observations. Par ailleurs, 145 repères de nivellement ont

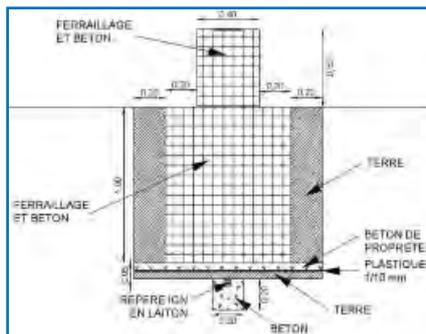


Figure 7. Schéma des bornes de 1^{er} ordre

été identifiés sur le terrain, dont seulement 30 situés à proximité d'un site d'implantation (moins de 1 km).

Matérialisation

Les 25 bornes de 1^{er} ordre ont été construites in situ par trois équipes dédiées (conducteur de travaux, maçons et aides).

Les bornes de 2^e ordre ont été confectionnées sur des chantiers de préfabrication situés dans chacune des dix régions – la qualité du béton utilisé étant ainsi validée en laboratoire par un bureau d'études et de contrôles géotechniques – puis transportées sur les différents sites par trois équipes de transport (camions). Cinq à huit équipes de pose ont ensuite effectué la mise en place de 485 bornes. Une équipe spécifique était chargée du percement et scellement des repères géodésiques des 25 points matérialisés dans un affleurement rocheux.

Un coordinateur et deux responsables équipés de pickups 4x4 ont encadré ces équipes sur le terrain.

Le schéma des bornes de référence est présenté en figure 7. L'alignement du repère en laiton à travers la plaque d'aluminium sommitale au-dessus du repère souterrain a été réalisé grâce à la mise en place de 2 paires de chaises (gabarit) reliées par des cordons dont l'intersection était rigoureusement alignée à la verticale du repère souterrain au moyen d'un fil à plomb. Les 4 bornes auxiliaires en béton encadrent le point.

Enfin, autour de toutes les bornes (1^{er} et 2^e ordres) a été mise en place une clôture métallique de protection sur laquelle est fixée une plaque d'information mentionnant le statut officiel du site.

Les opérations de matérialisation se sont déroulées de façon satisfaisante en dépit de conditions souvent difficiles et qui ont soumis les véhicules à rude épreuve compte tenu du début de la petite saison des pluies en avance de plus de 3 semaines par rapport aux prévisions.

Observations

La campagne d'observations a été conduite en plusieurs étapes :

- calibration et contrôle des instruments en atelier (antennes GPS, nivelle sphérique et plomb optique des embases, adaptateurs à nivelle torique) ;
- préparation logistique et planification des campagnes d'observations.
- acquisition de données GPS sur les 25 points géodésique de 1^{er} ordre, les 510 points géodésiques de 2^e ordre et les 100 bornes auxiliaires, ainsi que les 100 points GPS temporaires situés à



Figure 8. Etapes de la construction des bornes de 1^{er} ordre



Figure 9. Borne de 2^e ordre



proximité d'un repère de nivellement et destinés au rattachement altimétrique du réseau.

- Nivellement direct des points géodésiques et points GPS temporaires situés à proximité des 145 repères de nivellement reconnus (cheminements n'excédant pas 1 km).
- Renseignement des fiches d'observations.
- Collecte, contrôle, et archivage des données acquises.
- Validation des observations au fur et à mesure de l'acquisition.

Les réseaux de 1^{er} et 2^e ordres ont été observés simultanément afin de minimiser les déplacements, toujours compliqués, et respecter ainsi les délais d'exécution.

Huit équipes équipées de récepteurs et antennes GPS géodésiques identiques (Trimble 5700 et Zephyr Geodetic) évoluaient simultanément selon un schéma de déplacements établi à l'avance. Cinq d'entre elles étaient également pourvues d'un deuxième ensemble d'équipement GPS, et quatre également d'un niveau électronique (Trimble Dini). En outre, les 4 ensembles GPS utilisés pour l'observation des points de 1^{er} ordre étaient également équipés d'adaptateurs à nivellement torique.

Le schéma d'observation a été scindé en 27 triangles principaux reliant les points de 1^{er} ordre, dans certains cas regroupés deux par deux en quadrilatères (dans les zones de moindre densité des points géodésiques de 2^e ordre).

Lors de chaque session d'observation, 3 à 4 points de 1^{er} ordre et 5 à 9 points de 2^e ordre (ou bornes auxiliaires et points GPS temporaires) étaient observés simultanément. La durée des sessions d'observation des points de 2^e ordre était comprise entre 4 heures (durée minimale spécifiée) et 12 heures. La durée des sessions d'observations des points de 1^{er} ordre a varié entre 72 heures (durée minimale spécifiée) et 12 jours en fonction du nombre de triangles principaux auxquels appartenaient les points.

A l'intérieur de chaque triangle principal (ou quadrilatère principal), les 4 ou 5 équipes évoluant sur les points de 2^e ordre se voyaient attribuer chacune

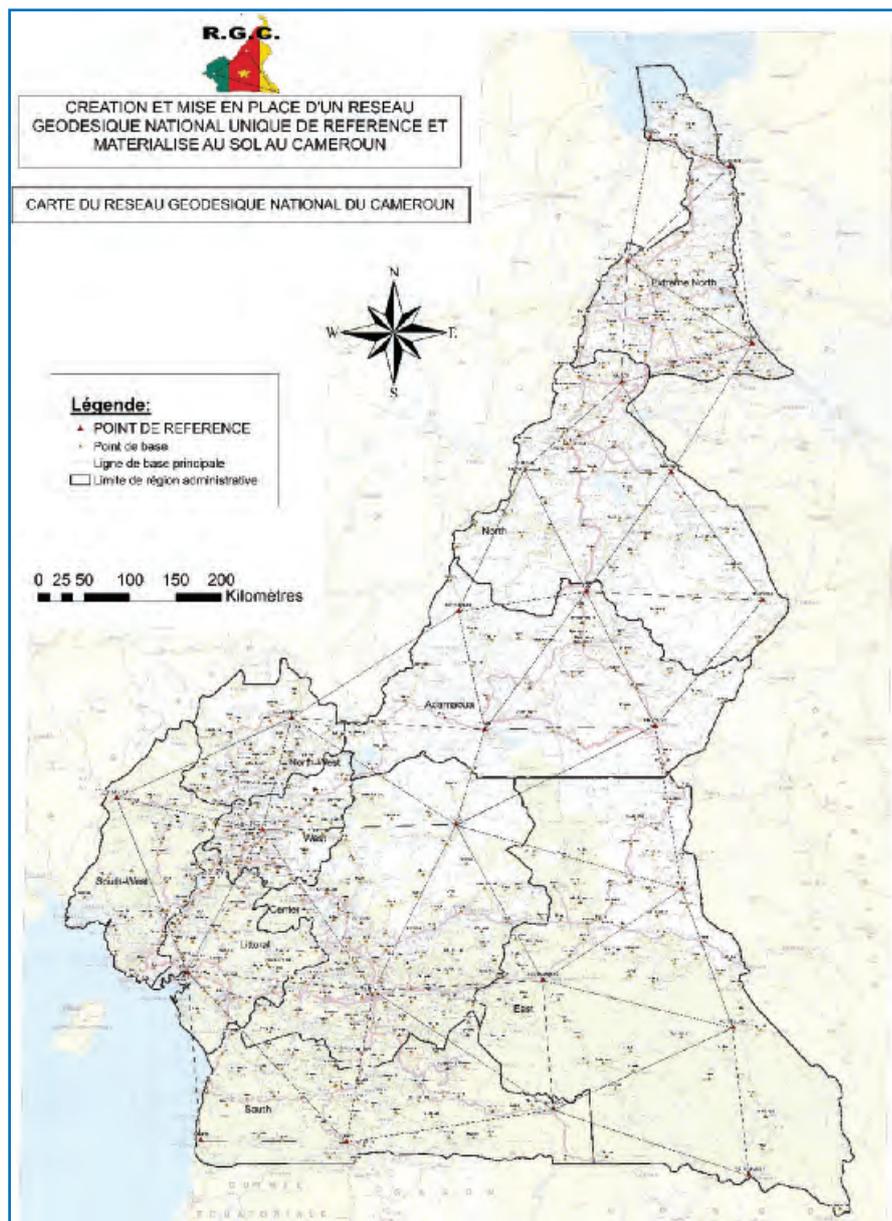


Figure 10. Schéma du réseau : 27 triangles principaux reliant les 25 points de 1^{er} ordre

une zone d'étendue réduite. Ce schéma atypique, tout en permettant de former des polygones avec des lignes de base GPS plus équilibrées (car reliant des points toujours relativement éloignés les uns des autres), a également permis d'augmenter le nombre de sessions et ainsi fortement contribué au respect des délais.

Les nivellements ont été intégrés aux déplacements des équipes et effectués dans les règles de l'art.

Les observations ont fait l'objet de procédures de contrôle spécifiques afin que toute erreur puisse être détectée et corrigée. Ainsi, par exemple, chaque mesure de hauteur d'antenne a été

photographiée, le mètre-ruban étant maintenu allongé entre le repère et l'encoche de mesure sur l'antenne, puis contrôlée indépendamment a posteriori.

La phase d'observation s'est déroulée sans problème majeur malgré un cas de paludisme ayant nécessité un rapatriement sanitaire et un grand nombre d'imprévus liés aux déplacements : effondrement du pont sur la piste principale entre Banyo et Tibati pendant la phase d'observation GPS (événement ayant entraîné un détour de plus de 400 km des équipes), grumier accidenté couché en travers de la piste entre Sangmelima et Mintom II, panne du bac entre Lomié et Mintom II...



Géoréférencement

■ Référentiel géodésique

Le calcul du réseau géodésique national du Cameroun a été effectué dans le référentiel géodésique ITRF 2008 Epoque 2011.5, correspondant presque exactement au milieu de la période d'observation (2011.503).

L'ITRF 2008 correspond à la dernière réalisation de l'ITRS et, par conséquent, s'est imposé comme le référentiel le plus approprié.

Le choix de l'Epoque 2011.5 permet de s'affranchir des systématismes liés à une modélisation imparfaite des vitesses des points du réseau géodésique du Cameroun. En effet, les modèles de vitesse disponibles (NNR-Nuvel-1a, ITRF2008 et précédents) sont, selon toute vraisemblance, relativement imprécis au Cameroun compte tenu à la fois du nombre réduit de stations permanentes sur la plaque Africaine et la sous-plaque Somalienne et de leur répartition déséquilibrée. En particulier, l'hypothèse de rigidité de la plaque dans cette zone ne peut être établie, notamment compte tenu de l'existence de la Dorsale Volcanique du Cameroun. En tout état de cause, les modèles existants ne peuvent pas être validés pour l'instant en l'absence de stations permanentes dans la région.

Au contraire des points du réseau, les vitesses des stations IGS permanentes sont parfaitement connues puisqu'elles ont été calculées à partir de longues séries temporelles (excédant toujours 2½ ans). En outre, elles peuvent être validées pendant la période de mesure grâce aux solutions quotidiennes et hebdomadaires (fichiers SINEX) calculées par les principaux centres de calcul (COD, MIT, SIO...).

Le choix de l'Epoque 2011.5 est donc apparu comme le plus pertinent dans l'hypothèse où un nouveau modèle de vitesse verrait le jour dans les années à venir, les coordonnées publiées des points du réseau géodésique du Cameroun n'étant alors pas biaisées par l'application d'un modèle imprécis devenu obsolète.

■ Référentiel altimétrique

Le référentiel altimétrique utilisé au

Cameroun est le Nivellement Général d'Afrique Centrale (NGAC), dont le marégraphe de référence se situe à Pointe Noire au Congo, et auquel est associé un système d'altitudes orthométriques.

Traitement de données

■ Mise en référence et calcul du réseau de 1^{er} ordre

Problématique

La précision de mise en référence d'un réseau de points GPS est d'autant plus élevée que le maillage constituant les stations fiducielles de référence est dense et équilibré. A contrario, des stations de référence mal réparties au plan géométrique peuvent entraîner des erreurs non négligeables.

Pour éviter d'introduire un systématisme lié à un déséquilibre des stations de rattachement et donc optimiser la mise en référence dans l'ITRF2008, l'IGS (*International GNSS Service*) a défini un sous-réseau fondamental de l'IGS08 (*Core Network, Rebischung et al, 2011*).

Méthode

La mise en référence du réseau de 1^{er} ordre a été réalisée à l'aide de la suite logicielle de calcul de précision GAMIT-GLOBK, développée conjointement par le MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), le CfA (*Harvard Smithsonian Center for Astrophysics*) et le SIO (*Scripps Institution of Oceanography*).

Nous avons fait le choix d'effectuer un calcul global des 25 points dans le réseau de l'IGS selon une approche en trois étapes :

Dans la première étape, nous avons utilisé les doubles-différences de phase des observations journalières pour estimer les coordonnées des points observés, le délai zénithal atmosphérique de chaque station toutes les deux heures, les paramètres d'orbites (dérivés des orbites précises finales calculées par les différents centres de calcul IGS, SIO, MIT) et les paramètres d'orientation de la Terre (dérivés du mouvement polaire et de la différence UT1-UTC fournis par l'IERS) en appliquant de faibles contraintes de départ à l'ensemble des paramètres.

Nous avons permis un contrôle des orbites en incluant les observations de 12 stations permanentes IGS réparties le plus régulièrement possible sur la plaque Africaine pour 8 d'entre elles (ADIS, MAS1, NKLG, NOT1, RABT, RAMO, SUTH, WIND) et la sous-plaque Somalienne (dont les paramètres de rotation ne sont pas très différents) pour 4 d'entre elles (HARB, MALL, MBAR, NURK).

Cette première étape a fourni un réseau flottant de grande précision (c'est-à-dire avant la mise en référence) dans la mesure où les stations IGS utilisées permettent d'augmenter la redondance du réseau d'observations avec des lignes de base supplémentaires dans toutes les directions à l'extérieur du réseau de référence du Cameroun).

Dans la seconde étape, nous avons utilisé ces solutions journalières faiblement contraintes et leurs matrices de covariance comme quasi-observations que nous avons combinées via un filtre de Kalman dans GLOBK pour déterminer un jeu de coordonnées des 37 stations de ce réseau avec une grande précision relative. La mise en référence dans l'ITRF du réseau découle directement de l'intégration des 12 stations IGS sélectionnées.

Ces deux premières étapes ont été répétées en utilisant les coordonnées calculées lors de ce premier calcul (*postfit coordinates*) comme données d'entrée (*a priori coordinates*) d'un second calcul GAMIT-GLOBK. Ce second calcul a fourni une solution régionale très précise mais affectée par la géométrie particulière des stations IGS présentes sur la plaque Africaine et la sous-plaque Somalienne.

Lors de la troisième étape, nous avons combiné les quasi-observations journalières de notre solution régionale avec les quasi-observations de la solution globale issue de données de phase de 80 stations IGS fournies par le *Geodesy and Geodynamics Group du Department of Earth, atmospheric and Planetary Science* du MIT pour s'affranchir des systématismes liés à la géométrie particulière de la solution régionale compte tenu de l'objectif de mise en référence au mieux dans l'ITRF 2008



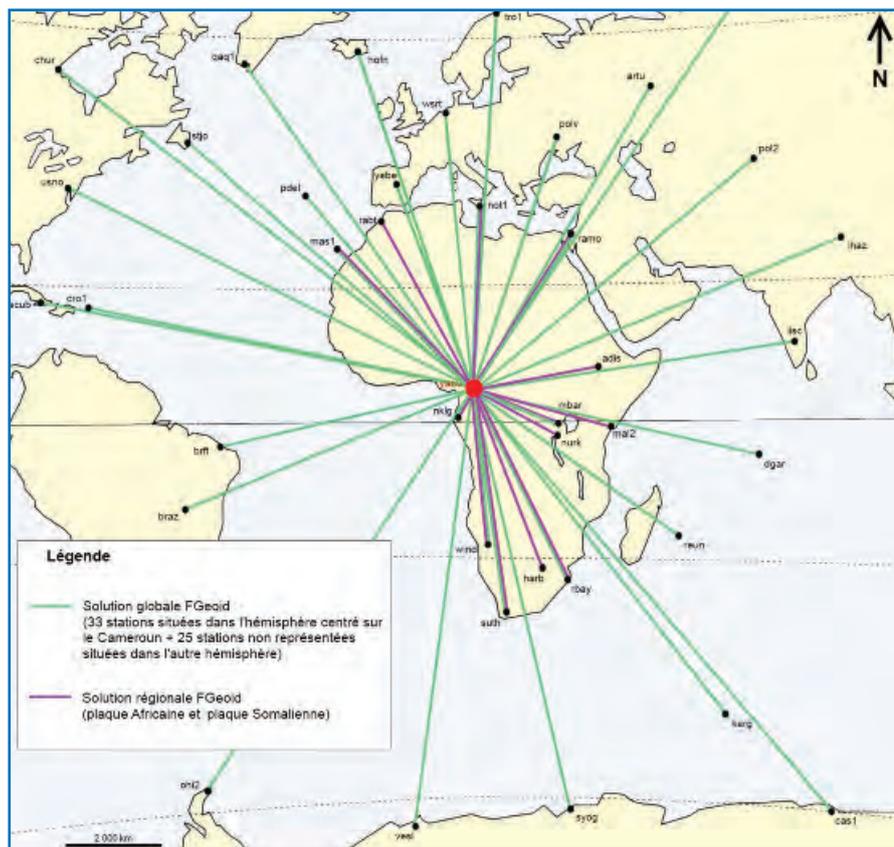


Figure 11. Schéma partiel du réseau de rattachement à l'IGS

(et non, par exemple, d'un sous-ensemble particulier, comme ça aurait été le cas pour mesurer des déformations locales en géophysique). Nous avons appliqué de fortes contraintes sur les 80 stations IGS de notre réseau de stabilisation et relâché les contraintes sur les satellites GPS ainsi que sur les paramètres d'orientation de la terre. Les coordonnées finales des points du réseau ont été déterminées en calculant une similitude spatiale à 6 paramètres – 3 translations et 3 rotations, mais pas de facteur d'échelle (voir à ce sujet Dong et al, 1998) – qui minimise les écarts entre les positions des stations IGS issues de notre solution et leurs homologues fournies par le centre de calcul ITRF.

Cette solution finale a été calculée en 4 itérations à partir des 58 stations IGS les plus cohérentes entre elles, dont 7 communes avec notre solution régionale (MAS1, MBAR, NKLK, NOT1, RAMO, SUTH, WIND).

Résultats

Nous avons généré les séries temporelles de toutes les solutions journalières calculées avec le module GLRED de GLOBK pour les 25 points de réfé-

rence afin d'analyser leur répétabilité. Les EMQ obtenues sont inférieures à 4,6 mm en planimétrie et 8,6 mm en hauteur, ce qui est acceptable étant donné les conditions d'acquisition (mise en station sur un trépied lesté, sessions perturbées par des pluies tropicales, période caractérisée par plusieurs éruptions solaires).

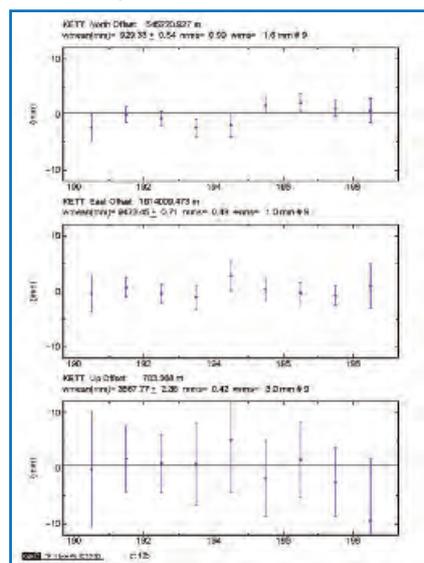


Figure 12. Exemple de série temporelle sur le point de Kette (9 jours) en Nord, Est et Hauteur. L'échelle verticale est de 10 mm.

Globk Analysis, GLOBK Version 5.16		
Position system stabilization results		
X Rotation (mas)	-0.15815 +-	0.01544
Y Rotation (mas)	1.64639 +-	0.01542
Z Rotation (mas)	-0.26548 +-	0.01699
X Translation (m)	-0.00283 +-	0.00046
Y Translation (m)	0.00475 +-	0.00046
Z Translation (m)	-0.00568 +-	0.00050
Postfit RMS = 0.00251 m		

Table 1. Résultat de l'adaptation GlobK-Glorg

La table 1 présente les paramètres de la similitude spatiale appliquée aux observations. L'EMQ a posteriori de cet ajustement final (2,5 mm) et les valeurs des résidus sur les stations IGS (inférieures à 12 mm) ont démontré la cohérence du réseau de rattachement.

L'examen de ces incertitudes permet de confirmer la précision légèrement moindre des points situés à la périphérie du réseau par rapport à celle des points situés au centre (Mbe, Tibati, Yoko, Yaoundé, Abong-Mbang).

La composition quadratique des précisions calculées, de la précision de l'adaptation globale et du systématisme du réseau global IGS par rapport à l'ITRF 2008 permet d'estimer une exactitude moyenne à 2-σ des points de référence dans le référentiel ITRF Epoque 2011,5 de 6,2 mm en planimétrie et 13,1 mm en hauteur.

Ces valeurs sont satisfaisantes et conformes à ce que l'on pouvait attendre compte tenu des conditions citées plus haut et de la situation géographique du réseau.

■ Calcul et ajustement du réseau de 2^e ordre

Méthode

Le calcul des vecteurs GPS reliant ces points entre eux et aux points de 1^{er} ordre a été effectué au moyen de deux logiciels distincts afin d'avoir deux solutions de calcul pour chacune des lignes de base retenues.

Le calcul principal a été effectué avec le logiciel TTC (*Trimble Total Control*), tandis que le calcul de contrôle était réalisé avec l'un des trois logiciels TGO (*Trimble Geomatics Office*), LGO (*Leica Geomatics Office*) ou TBC (*Trimble Business Center*).



La sélection des lignes de base GPS retenues a été opérée de telle sorte que :

- Les vecteurs soient les plus courts possibles.
- Les cheminements constitués des vecteurs reliant les points de base soient des polygones fermés reliant tous les points de référence de la session en deux ou trois boucles.
- La géométrie des polygones ainsi formés soit la plus équilibrée possible par rapport au triangle principal (ou au quadrilatère) formé des points de 1^{er} ordre.
- Les critères statistiques de qualité GPS et les différences entre les deux logiciels utilisés soient satisfaisants.
- Le nombre de vecteurs retenus pour chaque session soit limité par la règle d'indépendance (vecteurs non triviaux).

Au terme de cette sélection, les lignes de base retenues étaient validées au moyen d'un calcul de fermeture de boucles (vecteurs rigoureusement indépendants).

Enfin, les lignes de base validées ont été ajustées par moindres carrés sur les vingt-cinq (25) points de référence au moyen du logiciel GEOLAB, développé par BWI (Bitwise Ideas).

Cet ajustement a été réalisé par triangles (ou quadrilatères) en contraignant les points géodésiques de 1^{er} ordre à leurs coordonnées calculées précédemment dans le référentiel ITRF2008 Epoque 2011.5.

L'analyse des résidus de ces ajustements contraints a fourni un dernier contrôle du calcul.

Résultats

Les résultats des ajustements par moindres carrés des différents sous-réseaux ont été validés en examinant les paramètres suivants :

- Le facteur de Variance et le résultat du test du Chi carré (X^2).
- Les valeurs des résidus normalisés de l'ajustement ainsi que leurs valeurs absolues.

Les appoints sont restés millimétriques à centimétriques, les valeurs absolues les plus élevées n'excédant pas 5 cm, toujours sur la composante X_G (proche de la verticale). Au final, les incertitudes finales des coordonnées des points de 2^e ordre varient entre 4 mm et 12 mm en

Est et Nord, 5 mm et 15 mm en hauteur ellipsoïdale.

Surface de référence altimétrique

Problématique

Le cahier des charges prévoyait que les points du nouveau réseau géodésique national soient rattachés par nivellement géométrique à des repères de nivellement du NGAC situés à proximité. En pratique, la distance maximale de 1 km avait été retenue. Cependant, étant donné le déséquilibre de la géométrie des mailles de nivellement, le grand nombre prévisible de repères détruits (nivellement effectué par l'IGN français au début des années 1950) et les contraintes sur la position des points du réseau géodésique, ce nivellement ne pouvait être réalisé que pour un petit nombre de ces points.

Aussi avait-il été prévu que les altitudes orthométriques des points du nouveau réseau géodésique soient déterminées à partir de leurs hauteurs ellipsoïdales et des ondulations d'un modèle de géoïde homogène avec le référentiel NGAC. La modélisation d'une telle surface de correction altimétrique présentait également l'avantage d'éliminer les erreurs liées à une possible altitude erronée de certains repères de nivellement compte tenu de leur âge (près de 60 ans).

Pour améliorer la modélisation de cette surface, nous avons intégré au réseau 115 points GPS temporaires situés à proximité d'un repère de nivellement, portant ainsi à 145 le nombre de points GPS nivelés.

Méthode

De nombreux auteurs (Doerflinger, 1997, Nocquet et al. 2000) ont montré qu'un géoïde géométrique (déterminé à partir de seuls points GPS nivelés) ne permettait pas de rendre les anomalies de courte et moyenne longueurs d'onde du géoïde. L'utilisation de données complémentaires (modèle de champ global, mesures gravimétriques, modèle numérique de terrain) est fortement recommandée.

Une approche en deux étapes est souvent proposée. Certains auteurs (Jiang

et al. 1996) ont montré qu'un modèle de surface altimétrique pertinent consistait à utiliser un modèle de géoïde gravimétrique déterminé au cours d'une première étape pour effectuer une interpolation entre les points GPS nivelés.

Dans cette hypothèse, la détermination du modèle de géoïde requis résulte donc de deux éléments :

- L'élaboration d'un modèle de géoïde gravimétrique ou la sélection d'un modèle parmi les grilles existantes.
- Le choix d'une méthodologie d'adaptation du modèle retenu à la réalisation du référentiel NGAC que constituent les points GPS nivelés.

Le terme géoïde ne doit pas ici être pris dans son acception rigoureuse. Ainsi, la surface de correction calculée ne corrige pas nécessairement le modèle de géoïde gravimétrique dans le sens d'une plus grande précision mais plutôt pour le faire correspondre au mieux avec la réalisation du NGAC sur le territoire camerounais, considérée comme suffisamment fiable.

■ Modèles de géoïde existants

Au Cameroun, deux modèles de géoïde gravimétrique utilisables a priori ont été identifiés : CGM2005 (*Cameroon Geoid Model 2005*) et EGM2008 (*Earth Gravitational Model 2008*).

Le modèle AGP2003 (*African Geoid Project 2003*), ou sa révision de 2006, a été estimé redondant avec CGM05.

CGM05

Le modèle CGM05 a été développé en 2005 au sein du LAREG (Laboratoire de Recherche en Géodésie de l'IGN) par J. Kamguia, chargé de recherche à l'INC. L'étude de l'article de synthèse de ces travaux (Kamguia et al, 2007) permet de pointer un certain nombre d'éléments susceptibles de remettre en cause le choix de cette grille comme modèle gravimétrique de référence :

- Le modèle global EGM96 utilisé en référence (même s'il a été en partie combiné avec GGM02C) a une précision annoncée très inférieure à celle de l'EGM08. En outre, il semble qu'il modélise mal les variations de gravité sur le continent Africain (Mery, 2003).
- Le MNT GLOBE utilisé pour déterminer les anomalies de petite longueur





d'onde est, semble-t-il, peu représentatif de la topographie sur ce continent (Mery, 2003). L'auteur lui-même recommande que le CGM05 soit recalculé en utilisant les données de SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*, 2001).

- Plus problématique, la validation du modèle CGM05 a été effectuée en utilisant un réseau de 87 points GPS nivelés tous situés dans la seule zone de Douala.

Même si l'écart-type des différences a été jugé encourageant (11 cm après adaptation), il nous a semblé que la surface réduite de la zone de test en atténuait fortement la portée. D'ailleurs, la méthode d'adaptation choisie n'était effectivement réellement applicable que sur une petite surface.

EGM2008

EGM2008 (ou EGM08, *Earth Gravitational Model 2008*) est un modèle du potentiel de gravité développé par l'US National Spatial Intelligence Agency en combinant par moindres carrés le modèle global ITG-GRACE03S avec les données de gravité d'une grille mondiale de pas 5'. Cette grille a été obtenue en fusionnant les données de gravimétrie terrestre, aéroportée et dérivée de mesures d'altimétrie.

Par rapport à EGM96 auquel il succède, EGM08 représente une amélioration d'un facteur 6 en résolution, et 3 à 6 en précision en fonction des régions. Fourni avec une résolution d'environ 9 km et une précision mondiale annoncée de 15 cm à 1- σ (18.3 cm d'après Pavlis et al., 2008), le modèle de gravité EGM08 est le modèle global le plus utilisé en 2011. Il a été validé dans de nombreux pays au moyen de réseaux de points GPS nivelés. Dans les zones où les données de gravité étaient de très bonne qualité, cette précision atteint 5 à 10 cm (après avoir supprimé systématisme et tendance linéaire), ce qui lui confère un statut comparable à celui de certains modèles de géoïde régionaux actuels.

Cependant, d'après Pavlis, le Cameroun fait partie des zones dans lesquelles les anomalies de gravité sont issues de "remplissage" (*fill-in*) parce que les

données de gravité n'étaient pas dans le domaine public (*proprietary data*). La procédure de remplissage utilise les anomalies de gravité de Bouguer, et reconstitue les anomalies à l'air libre en utilisant les altitudes du MNT mondial DTM2006, principalement issu de la mission SRTM. Aussi, la précision probable d'EGM08 au Cameroun est-elle sans doute plus proche des 18,3 cm annoncés par Pavlis.

Validation des points GPS nivelés retenus

Sur la carte des ondulations du modèle EGM08 (dont la précision est connue), nous avons fait apparaître les 145 points GPS nivelés avec les écarts bruts entre leur ondulation EGM08 et leur ondulation GPS nivelé.

La carte a fait apparaître une bonne homogénéité des écarts entre les deux types d'ondulation dans les différentes zones malgré quelques couples de points proches avec des écarts légèrement différents. 15 points aberrants ont été éliminés. L'un des points (écart de 46 cm) a donné lieu à une étude plus fine, mais a finalement été conservé car situé au centre d'une zone d'anomalies cohérentes (21, 25, 26, et 33 cm au nord, 14, 19, 24 cm au sud), dans une zone d'affleurement du socle (plateau de l'Adamaoua), et associé à un repère de nivellement proche fixé sur le mur d'un bâtiment administratif en parfait état.

Au final, 130 points GPS nivelés ont ainsi été retenus.

Choix du modèle de géoïde gravimétrique

Pour effectuer ce choix, nous avons comparé les différences entre les ondulations des modèles EGM08 et GPS nivelé corrigées de la moyenne de leurs écarts respectifs (systématisme) avec les différences entre les ondulations des modèles CGM05 et GPS nivelé à encore corrigées de la moyenne de leurs écarts respectifs (systématisme). Cette analyse a clairement fait apparaître la cohérence entre le GPS nivelé et l'EGM08, avec une répartition normale des écarts. L'écart-type est de 18 cm et confirme donc la précision annoncée du modèle. On peut également noter que tous les écarts sont inférieurs à 3.5 fois l'écart-type.

Point GPS nivelé	Différence des ondulations EGM08-GPS Nivelé corrigées de la moyenne des écarts (mètres)	Différence des ondulations CGM05-GPS Nivelé corrigées de la moyenne des écarts (mètres)	Différence des ondulations EGM08-CGM05 corrigées de la moyenne des écarts (mètres)
Abong-Mbang_RN	0,09	0,53	-0,44
Akonolinga_RN_Po	0,04	1,23	-1,19
Ambam_RN_Ss-pref	-0,21	-0,73	0,52
Ayos_RN_PTT	0,09	1,02	-0,92
Bafia_RN_Meteo	-0,18	0,09	-0,27
Batouri_RN_Aero	-0,01	-0,36	0,35
Batouri_RN_Ctr	-0,02	-0,38	0,37
Batouri_RN_Ss-pref	-0,03	-0,40	0,37
Beka_RN33	0,36	-0,02	0,38
Belaba_RN15	0,22	0,11	0,11
Bertoua_III_RN	0,10	-0,16	0,25
Bogo_RN47	-0,07	-0,50	0,43
Bongolo_RN	-0,11	0,44	-0,55
Campo_RN	-0,09	-0,12	0,02
Doume_RN63	0,02	-0,21	0,22
Doume_RN64	-0,03	-0,26	0,23
Dourbeye_RN	0,18	-0,09	0,27
Ebolowa_RN17	-0,25	0,70	-0,89
Efoulan_RN	-0,05	0,50	-0,54

Table 2. Extrait du tableau de comparaison entre CGM05 et EGM08

L'analyse fait clairement apparaître la moins bonne cohérence du modèle CGM05. L'écart-type excède 55 cm, donc très au-delà de la précision annoncée (11 cm) au vu de comparaisons effectuées sur la seule zone autour de Douala. Nous fournissons dans la table 2 un extrait de cette comparaison.

Nous avons donc sélectionné le modèle géopotential EGM08 et abandonné le modèle CGM05.

Choix d'une méthodologie d'adaptation

Trois méthodologies au moins pouvaient être envisagées a priori : krigage ordinaire (KO), collocation par moindres carrés (CMC) ou cokrigage.

Dans les deux premières méthodes, les quasi-observations qui doivent être modélisées sont en fait les différences d'ondulations géoïdales (entre EGM08 et GPS nivelé). Le modèle interpolé doit ensuite être ajouté à la grille EGM08. Lorsque CMC est utilisée, EGM08 doit d'abord être transformé en enlevant les éventuels systématismes et tendance entre les deux jeux de données de sorte que l'hypothèse de moyenne nulle nécessaire à l'application de la méthode soit respectée.

Dans la troisième méthode, le modèle principal est constitué des ondulations géoïdales des points GPS nivelés et le modèle secondaire les ondulations géoïdales de EGM08.



Après avoir testé les différentes possibilités, le modèle interpolé des écarts d'ondulations entre les géoïdes gravimétrique et géométrique optimal a été obtenu par krigeage ordinaire appliqué avec une fenêtre glissante et lissé au moyen d'une fonction multiquadratique inverse. Cette grille a ensuite été sommée à la grille EGM2008 pour fournir la surface de correction altimétrique CGM11 (Cameroon Geoid Model 2011). Cette analyse a été effectuée avec le logiciel ArcGIS – Geospatial / Geostatistical Analyst (ESRI).

Les altitudes orthométriques NGAC de l'ensemble des points du réseau ont ensuite été calculées par soustraction des ondulations de la grille CGM11 des hauteurs ellipsoïdales (ITRF2008 Epoque 2011.5, ellipsoïde GRS-80) de ces points. La carte présentée *figure 13* montre à la fois les écarts (en grands caractères) sur les 130 points GPS nivelés entre les ondulations issues du GPS nivelé et les ondulations EGM08, les courbes de niveau de la surface obtenue par krigeage ordinaire lissé de ces écarts, et enfin les écarts sur les 535 points du

réseau entre la solution CGM11 finale et l'application du seul modèle EGM08 (écarts en petits caractères). L'examen de la répartition géospatiale de ces écarts a permis de valider la nouvelle grille CGM11.

Cette carte permet de mesurer l'influence des points GPS nivelés. La grille CGM11 semble acceptable dans toutes les zones. Les zones les plus incertaines sont certainement le bassin du Faro dans l'Ouest des régions Adamaoua et Nord et toute la partie orientale de la région Nord. Signalons que cette bande, située à la frontière des régions Adamaoua et Nord n'est correctement pourvue en repères de nivellement qu'en son centre.

Les solutions obtenues par CMC et cokrigeage se sont avérées nettement inférieures. Ce résultat ne remet pas forcément en cause le bien-fondé de ces deux méthodes mais plutôt les paramètres utilisés dont la plupart procèdent d'une analyse empirique de la structure géospatiale des données. En effet, il est apparu que la difficulté de cette interpolation était due à la très grande hétérogénéité de la répartition des points GPS nivelés avec une absence totale de points dans un certain nombre de zones.

La précision de la nouvelle grille CGM11 est estimée entre 10 et 20 cm selon les zones, en fonction de la densité des points GPS nivelés et de la pente locale du géoïde. Cette grille pourrait cependant être améliorée avec une campagne de nivellement et gravimétrie.

Conclusion

Le nouveau réseau géodésique du Cameroun a été réalisé avec des spécifications qui sont allées au-delà du cahier des charges et dans les délais, de janvier à décembre 2011.

25 bornes de 1^{er} ordre et 510 bornes et repères scellés de 2^e ordre ont été établis à travers le territoire. Les coordonnées planimétriques de ces points ont été déterminées dans un référentiel homogène avec l'ITRS, et leurs altitudes dans le référentiel NGAC en vigueur.

Par ailleurs, une nouvelle grille de correction altimétrique utilisable pour déterminer des altitudes au-dessus du

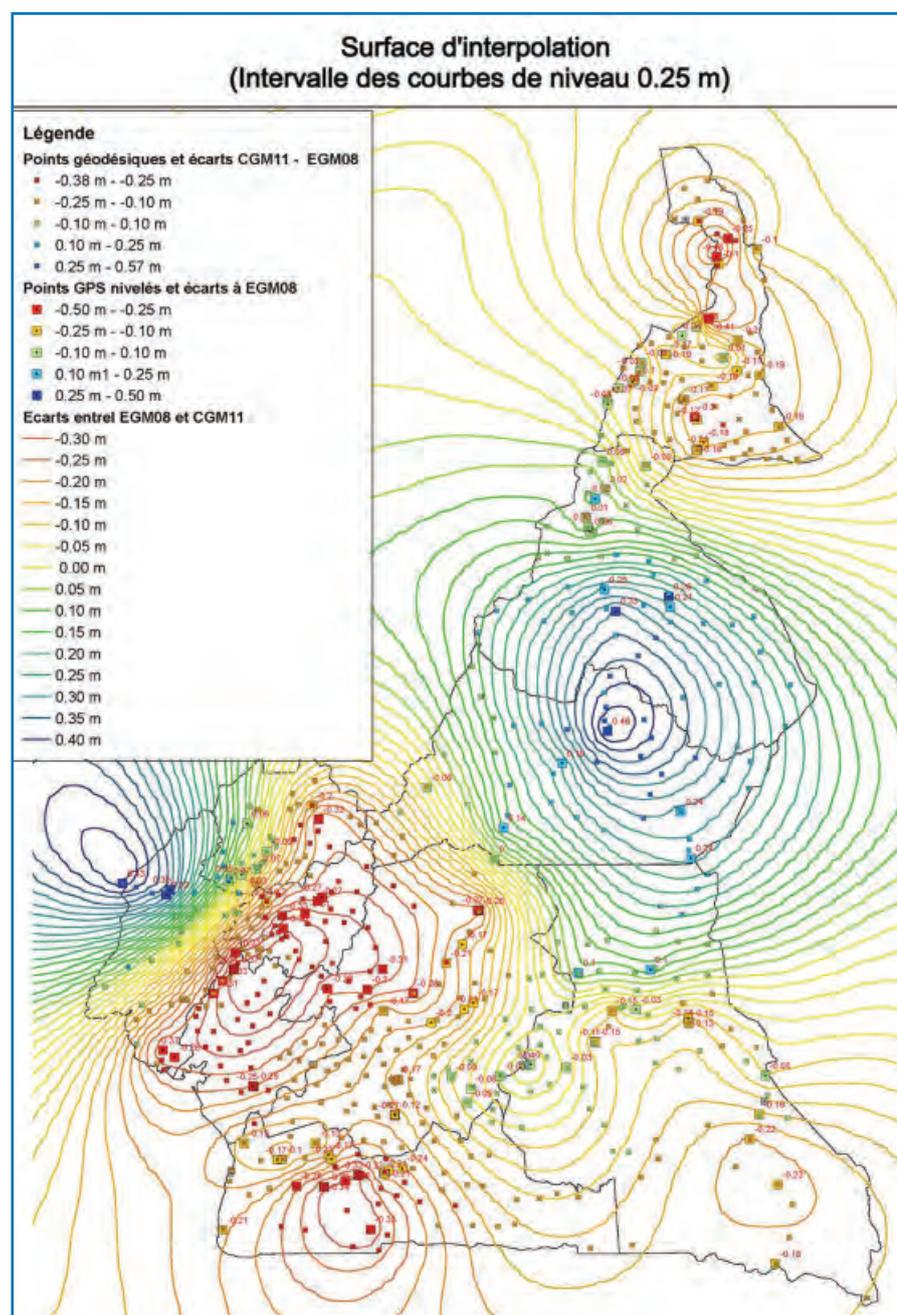


Figure 13. Surface d'interpolation des différences d'ondulations entre EGM08 et Points GPS nivelés





niveau moyen de la mer dans le référentiel NGAC à partir de mesures GPS a été déterminée. ●

Contacts

Jean-Louis CARME

Directeur technique de FUGRO GEOID

jl.carme@fugro.com

s.lacombe@fugro.com

c.michel@fugro.com

Bibliographie

Doerflinger E, Jiang Z, Duquenne H, Bayer R, Determination of the quasi-geoid in a Mountainous area : example of the

eastern pyrenees (France), International Association of Geodesy Symposia, vol 117: Gravity, Geoid and Marine Geodesy, Springer-Verlag, 1997.

Doerflinger E, Utilisation de la méthode de positionnement satellitaire GPS pour la détermination précise des altitudes relatives et absolues, Thèse de doctorat. - Université des Sciences et des Techniques, Montpellier, 1997*

Gribov A, Krivoruchko K, Mathematical Geology, Volume 36, Number 2, February 2004

Herring TA, King RW, McClusky SC, Gamit reference manual, release 10.4, October 2010

Herring TA, King RW, McClusky SC, GlobK reference manual, release 10.4, December 2010

IGN France – Service de la Géodésie et du Nivellement, Etude du Système géodésique adapté au Cameroun, Mars 2007

Kamguia J, Tabod CT, Nouayou R, Tadjou JM, Manguelle-Dicoum E, Kande HL, The Local Geoid Model of Cameroon: CGM05, Nordic Journal of Surveying and Real Estate Research, Vol. 4, Nb. 2, 2007

Merry CL, The African Geoid Project and its relevance to the unification of African vertical reference frames. Proceedings, 2nd Regional Conference of the Fédération Internationale des Géomètres, Marrakech, Morocco, December 2003

Nocquet JM, Duquenne H, Boucher C, Harmel A, Willis P, Conversion altimétrique RGF93-IGN69, Conseil National de l'Information Géographique, Groupe de travail permanent Positionnement statique et dynamique, Février 2000

Pavlis NK, Holmes SA, Kenyon SC, Factor JK (2008) An Earth Gravitational Model to Degree 2160: EGM2008, EGU General Assembly 2008, Vienna, Austria, April

(*) On peut noter que cette thèse a été réalisée dans le cadre d'un contrat de collaboration entre le laboratoire de Géophysique et Tectonique UMR5573 (CNRS et Université de Montpellier II) et la société FUGRO GEOID.

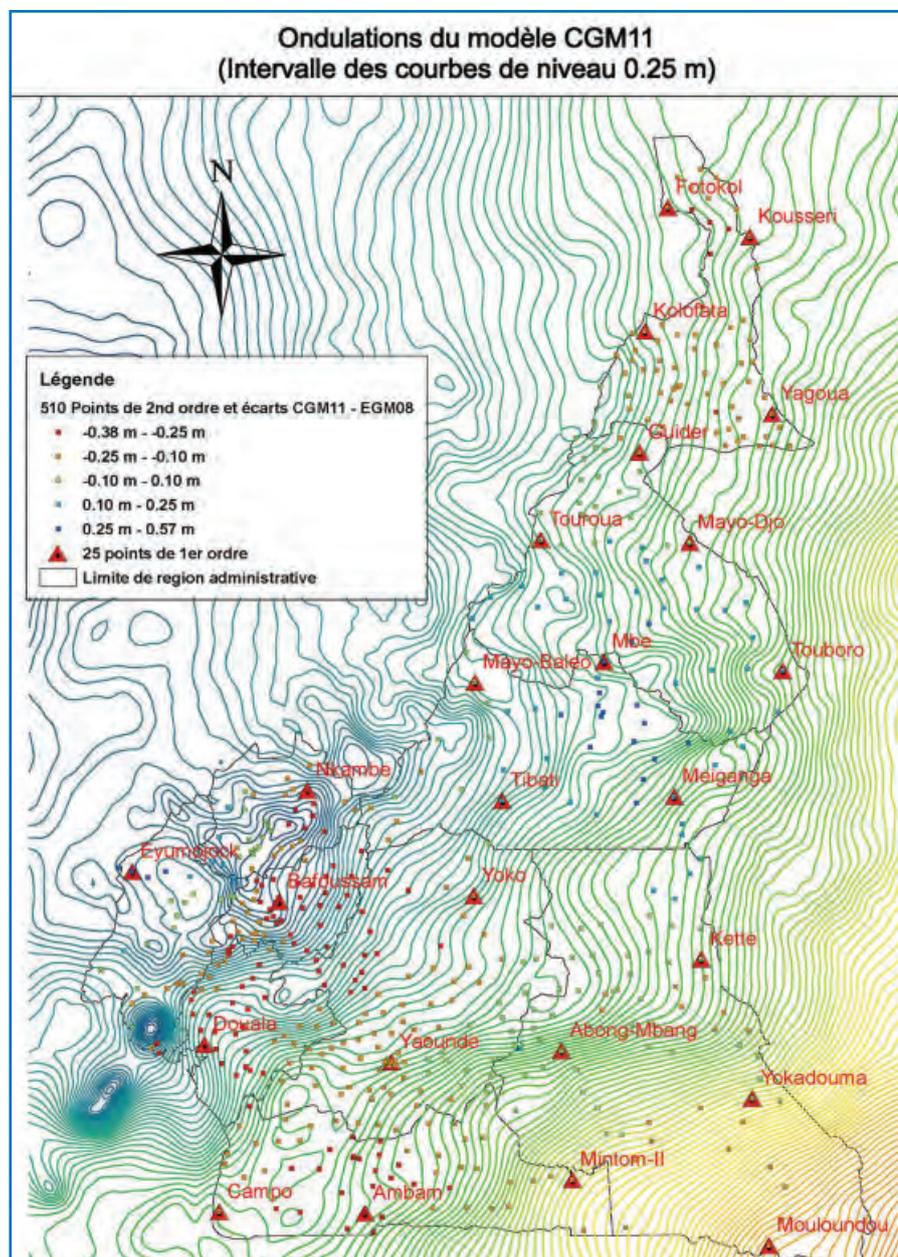


Figure 14. Modèle de géoïde CGM11 (surface de correction altimétrique vers NGAC)

ABSTRACT

This paper presents the establishment of the new Cameroon national geodetic network carried out by FUGRO GEOID during year 2011. After a description of the project's main stages, the text focuses on the methods implemented for data processing.

So, we examine the processing and geodetic referencing of the 25 First Order network points with respect to the International GNSS Service (IGS) Core Network, the processing and piece-wise least squares adjustment of the 510 Second Order network points, and finally the determination of a new height correction surface (CGM11: Cameroon Geoid Model 2011), developed by fitting of the EGM2008 global model to a network of 130 GPS levelled point distributed through the whole territory. In the future, the CGM11 grid will allow deriving heights above Mean Sea Level in the NGAC height datum (Nivellement Général de l'Afrique Centrale, used in Cameroon) from GPS-measured points within the territory.

Élaboration d'une grille de conversion de coordonnées géographiques

Application à la région d'Oran

■ Sid Ahmed MEDJAHED - Ali ZEGGAI

L'utilisation du système GPS conduit à une solution globale, les coordonnées géodésiques (longitude GPS & latitude GPS) sont exprimées par rapport au système WGS84. Généralement, chaque pays ou chaque territoire possède sa propre référence géodésique. Afin d'exploiter localement les avantages de l'outil GPS, il est nécessaire de transformer les coordonnées GPS en coordonnées exprimées dans le système local.

En géodésie, il existe plusieurs modèles de transformation qui permettent le passage d'un système géodésique à un autre. L'emploi de ces modèles passe par des étapes de traitement plus ou moins complexes (ex. : le choix de l'approche de transformation, le choix des points d'appui et la sélection des points de contrôle...), d'où la nécessité de mettre en place une méthodologie de transformation destinée directement à l'utilisateur. Cette approche est appelée conventionnellement transformation par grille. Elle est basée sur le principe de construction et l'utilisation d'une grille planimétrique (2D) pour la transformation de la longitude et la latitude entre deux datum géodésiques (WGS84 et Nord Sahara).

MOTS-CLÉS

Transformation, WGS84, Nord Sahara, Grille planimétrique.

En Algérie, le système géodésique Nord Sahara 1959 constitue l'infrastructure sur laquelle s'appuient tous les travaux géodésiques et cartographiques. Ce système a été déduit du système Europe 1950 (ED50) par la transformation suivante :

$$\lambda_{NS} = \lambda_{ED50} - 0^{\text{Gr}}.0004$$

$$\varphi_{NS} = \varphi_{ED50} - 0^{\text{Gr}}.00484$$

Le système Nord Sahara 1959 est basé sur l'ellipsoïde de Clarke 1880A (recommandé à la conférence de Bukavu au Zaïre) et dont les paramètres sont [8] :

$$\text{Demi grand axe (a)} : 6378249.145 \text{ m}$$

$$\text{Aplatissement (f)} : 293.46500$$

Outre sa vieillesse, le système géodésique national Nord Sahara connaît de nombreux problèmes dus essentiellement aux techniques utilisées pour sa réalisation, parmi ces problèmes, nous citons [1] :

- la mauvaise définition de l'origine de ce système car il est déduit du système ED50 ;
- la non-homogénéité du réseau qui est due à la combinaison entre le réseau du nord et le canevas du sud, issus de deux sources d'observations différentes (géodésique et astronomique) ;
- le manque d'information de la hauteur du géoïde relative à l'ellipsoïde de Clarke 1880A (Nord Sahara) ;
- la couverture partielle du réseau sur le territoire national.

Aujourd'hui, l'ensemble des réseaux géodésiques nationaux, continentaux et mondiaux sont réalisés par les techniques de positionnement spatial, parmi ces systèmes, l'outil GPS est le plus utilisé actuellement, les coordon-

nées obtenues après le traitement et l'ajustement des observations GPS sont exprimées dans un système de référence géodésique, géocentrique, tridimensionnel et mondial appelé WGS84 basé sur l'ellipsoïde WGS84 caractérisé par :

$$\text{Demi grand axe (a)} : 6378137.00 \text{ m}$$

$$\text{Excentricité (e)} : 0.0818191980426$$

L'utilisation du GPS en Algérie est souvent liée à la transformation des coordonnées. Les résultats obtenus sont exprimés dans le système en vigueur en Algérie (Nord Sahara).

Le présent article a pour but de présenter l'approche de transformation par grilles. L'exploitation de la grille est générée et utilisée par un programme (grand public) pour l'exploitation des coordonnées dans une cartographie existante basée sur le système géodésique national.

Méthodes de transformation entre systèmes géodésiques

Il existe plusieurs modèles de transformation qui permettent le passage d'un système géodésique à un autre :

- **modèles globaux** : le modèle de Bursa Wolf, le modèle de Molodensky-Badekas, le modèle de Veis, le modèle géographique de Molodensky...
- **modèles locaux** : le modèle des lignes géodésiques, la transformation polynomiale par la multiple régression (MREs)...

Le choix d'un modèle de transformation adéquat est influencé par [6] :

- le domaine pour lequel le modèle doit être appliqué

- la présence des distorsions dans l'un ou l'autre système géodésique ou bien les deux à la fois.
- le type de transformation souhaitée (2D ou 3D), et le système de coordonnées utilisé (géographique, cartésien ou plan)
- la précision recherchée suivant le type d'application.

Transformation polynomiale par la multiple régression (MREs)

L'emploi d'une méthode de transformation pour le calcul des paramètres de passage entre deux référentiels géodésiques exige l'homogénéité entre ces deux référentiels. Certains référentiels géodésiques locaux réalisés par la méthode classique, présentent un manque d'information en termes d'orientation et d'échelle et par conséquent le problème de transformation se pose.

Diverses approches ont été proposées, parmi ces méthodes, la transformation polynomiale par multiple régression ou MREs [4]. En termes simples ce sont des fonctions de polynômes qui représentent les distorsions entre les deux systèmes géodésiques, en fonction de la position en latitude et en longitude [6] :

$$\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \Delta\varphi$$

Avec :

λ_1, φ_1 : Les coordonnées géodésiques dans le premier système (WGS84)

λ_2, φ_2 : Les coordonnées géodésiques dans le deuxième système (Nord Sahara 1959)

$\Delta\lambda$: La différence en longitude entre les deux systèmes géodésiques.

$\Delta\varphi$: La différence en latitude entre les deux systèmes géodésiques.

Pour $\Delta\lambda$, la formule de la régression multiple s'écrit :

$$\begin{aligned} \Delta\lambda &= A_0 + && \text{Ordre 0} \\ A_1U + A_2V + && \text{Ordre 1} \\ A_3U^2 + A_4UV + A_5V^2 + && \text{Ordre 2} \\ A_6U^3 + A_7U^2V + A_8UV^2 + A_9V^3 + && \text{Ordre 3} \\ A_{10}U^4 + A_{11}U^3V + A_{12}U^2V^2 + A_{13}UV^3 + A_{14}V^4 + && \text{Ordre 4} \\ A_{15}U^5 + A_{16}U^4V + \dots + A_{105}V^{13} && \text{Ordre 13} \end{aligned}$$

Pour $\Delta\varphi$, la formule de la régression multiple s'écrit :

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= B_0 + && \text{Ordre 0} \\ B_1U + B_2V + && \text{Ordre 1} \\ B_3U^2 + B_4UV + B_5V^2 + && \text{Ordre 2} \\ B_6U^3 + B_7U^2V + B_8UV^2 + B_9V^3 + && \text{Ordre 3} \\ B_{10}U^4 + B_{11}U^3V + B_{12}U^2V^2 + B_{13}UV^3 + B_{14}V^4 + && \text{Ordre 4} \\ B_{15}U^5 + B_{16}U^4V + \dots + B_{105}V^{13} && \text{Ordre 13} \end{aligned}$$

Où

A_i et B_i : coefficients de la MREs.

$U = K \cdot (\varphi - \varphi_0)$: latitude géodésique normalisée du point de calcul.

$V = K \cdot (\lambda - \lambda_0)$: longitude géodésique normalisée du point de calcul.

(λ_0, φ_0) : coordonnées origine du premier système.

K : facteur d'échelle.

Application de la MREs dans la région d'Oran

L'objectif de l'application est de déterminer les paramètres de transformation bidimensionnelle entre les coordonnées géodésiques rapportées à l'ellipsoïde de révolution WGS84 et celles rapportées à l'ellipsoïde de Clarke 1880A associé au système Nord Sahara. Ces paramètres sont les coefficients A_i et B_i calculés par les équations de la transformation polynomiale.

Les données utilisées sont collectées de la manière suivante : données GPS : issues des observations menées lors des campagnes GPS à travers la région d'Oran
données Nord Sahara : issues des observations de la triangulation et de la géodésie classique en Algérie.

L'équation de la régression sur λ s'écrit :

$$\begin{aligned} \Delta\lambda &= -0,000000006 - 0,000025582 \cdot U + 0,000020706 \cdot V \\ &- 0,000153838 \cdot U^2 - 0,000036369 \cdot U \cdot V + 0,000040856 \cdot V^2 + \\ &0,000822261 \cdot U^3 - 0,001138648 \cdot U^2 \cdot V - 0,001457295 \cdot U \cdot V^2 + \\ &- 0,000546643 \cdot V^3 \end{aligned}$$

L'équation de la régression sur φ s'écrit :

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= 0,000000001 - 0,000009969 \cdot U + 0,000046024 \cdot V + \\ &0,000067966 \cdot U^2 - 0,000120882 \cdot U \cdot V + 0,000006113 \cdot V^2 - \\ &0,000321816 \cdot U^3 + 0,000986396 \cdot U^2 \cdot V - 0,000583960 \cdot U \cdot V^2 + \\ &0,000350958 \cdot V^3 \end{aligned}$$

Avec : $U = \lambda_i - 0^\circ508837967$

$$V = \varphi_i + 35^\circ594102044$$

Les résultats de la transformation sont résumés dans les tableaux suivants :

Sur les quatorze (14) points d'appui

Composante	Min	Max	RMS	RMS Calcul
dλ (Sec)	-0.0043	0.0051	0.0021	0.088 m
dφ (Sec)	-0.0044	0.0063	0.0023	
dE (m)	-0.1074	0.1284	0.0536	
dN(m)	-0.1351	0.1943	0.0702	

Tableau 1. Résultats sur les points d'appui

Sur les quatre (04) points de contrôle

Composante	Min	Max	RMS	RMS Calcul
dλ (Sec)	-0.0023	0.0009	0.0016	0.133 m
dφ (Sec)	-0.0055	0.0050	0.0041	
dE (m)	-0.059	0.024	0.041	
dN(m)	-0.172	0.155	0.127	

Tableau 2. Résultats sur les points de contrôle

Les écarts représentent les différences entre les coordonnées réelles obtenues dans le cadre de la géodésie classique (système Nord Sahara) et celles calculées par l'approche de transformation polynomiale. L'écart moyen obtenu sur les points

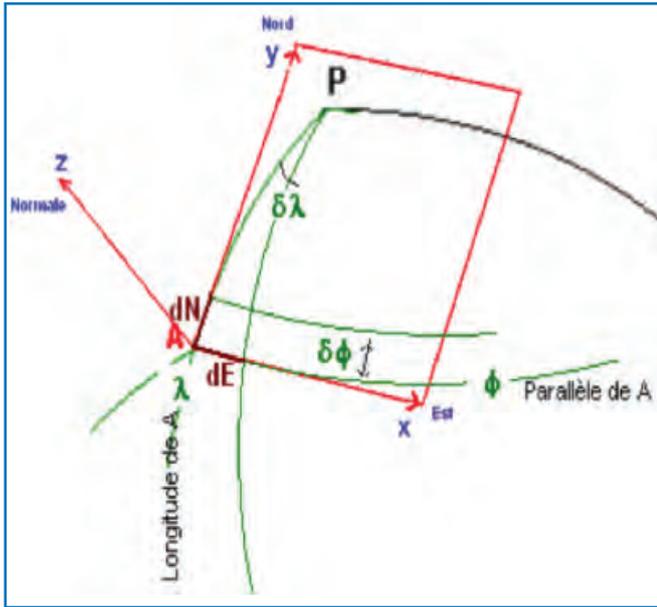


Figure 1. Le repère géodésique local

de contrôle est de l'ordre de 14 cm. La précision de la transformation est acceptable (< 20 cm) pour les applications géodésiques à moyenne précision. L'approche de la transformation par les équations de la multiple régression peut être appliquée pour transformer les coordonnées WGS84 vers le système national Nord Sahara.

Remarque : Les différences $d\lambda$ et $d\phi$ sont respectivement les écarts en longitude et latitude. Ces écarts sont exprimés (cf. : tous les tableaux) en seconde sexagésimale [1]. Les différences dE et dN correspondent aux valeurs de $d\lambda$ et $d\phi$ sur la surface de la terre suivant l'Est et le Nord (E : Easting, N : Northing). Les écarts correspondent à :

$$dE = dX = N \cos \phi \cdot d\lambda$$

$$dN = dY = \rho d\phi$$

Avec N et ρ : Respectivement la normale et le rayon de courbure et comme dE et dN sont petits, nous pouvons appliquer les formules approchées suivantes :

$$dE = dX = R \cos \phi \cdot d\lambda$$

$$dN = dY = R d\phi$$

Où R est le rayon moyen de la terre égal à 6 371 km.

■ sur la longitude

M R E S	σ_0 a priori	$\hat{\sigma}_0$ a postériori	$\chi^2_{Théorique}$		χ^2_{obs}	t-distribution de Student's		Test de khi-deux	Test de Student
		0.005	0.0021	95%	9.488	0.7301	95%	2.776	Positif

Tableau 3. Test de Student et de khi-deux sur la longitude

■ sur la latitude

M R E S	σ_0 a priori	$\hat{\sigma}_0$ a postériori	$\chi^2_{Théorique}$		χ^2_{obs}	t-distribution de Student's		Test de khi-deux	Test de Student
		0.005	0.0023	95%	9.488	0.8276	95%	2.776	Positif

Tableau 4. Test de Student's et khi-deux sur latitude

Étude statistique et validation des résultats

Dans le but d'étudier les résultats de la transformation des coordonnées par la MREs deux tests statistiques seront examinés.

1-Test de Khi deux : Ce test a pour but d'éliminer les grosses erreurs. Les observations issues d'une population sont acceptées si : $\chi^2_{n-m} < \chi^2_{Théorique}$ [5]

Où χ^2_{n-m} est la valeur de la distribution de Khi-deux à un degré de liberté et un niveau de signification α .

La probabilité est donc : $Pro(\chi^2_{obs} < \chi^2_{Thé}) = 1 - \alpha$

Le test statistique de khi-deux est donné par la formule suivante : $\chi^2 = (n - m) \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2}$

σ_0 : c'est l'écart-type a priori prise égale à ± 0.005 seconde en référence à la précision des points d'appui Nord Sahara sur la zone d'Oran (± 15 cm) [2]

2-Test de Student's : Le deuxième test est le test de Student's, l'observation est acceptée si : [5]

$$\bar{m} - t \cdot \hat{\sigma}_0 \leq V_i \leq \bar{m} + t \cdot \hat{\sigma}_0$$

Où t : c'est la valeur tabulée de la distribution de Student's

\bar{m} : la moyenne des résidus

$\hat{\sigma}_0$: c'est l'écart-type du vecteur des résidus

Pour le degré de liberté (ddl) = 4, les résultats des tests statistiques sont résumés dans les deux tableaux ci-dessous.

Les résultats de l'étude statistique indiquent que le test de khi-deux est positif, ceci signifie que les résidus suivent la loi normale et le test de Student's indique qu'aucune des observations n'a été rejetée.

Enfin et d'après les résultats obtenus, on conclut que l'approche de la transformation par les équations de la régression multiple employée pour la transformation des coordonnées GPS dans notre application (Région d'Oran) est suffisante et elle sert à élaborer la grille planimétrique de conversion de coordonnées.

Transformation par la grille planimétrique

La transformation de λ et φ entre les deux datum consiste en la construction d'une surface de correction de coordonnées, cette surface représente le décalage en λ et φ entre les deux datum. Chaque nœud de la grille contient les informations nécessaires pour transformer les coordonnées. Il s'agit de la distorsion en longitude ($d\lambda_{Grille}$) et en latitude ($d\varphi_{Grille}$).

Le principe de l'utilisation de la grille de conversion planimétrique est le suivant :

1^{er} Étape : Positionner le point à transformer sur une maille de la grille et les 4 nœuds de la maille sont à rechercher.

2^e Étape : Calculer la distorsion en longitude et en latitude par une méthode d'interpolation (deux interpolateurs seront utilisés) :

1 - Interpolation bilinéaire : Soit une maille élémentaire constituée de quatre nœuds notés 1,2,3,4 délimitée par [2] :

Les longitudes : $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$

Les latitudes : $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$

Avec : $\lambda_1 = \lambda_2, \lambda_3 = \lambda_4$ et $\varphi_1 = \varphi_3, \varphi_2 = \varphi_4$

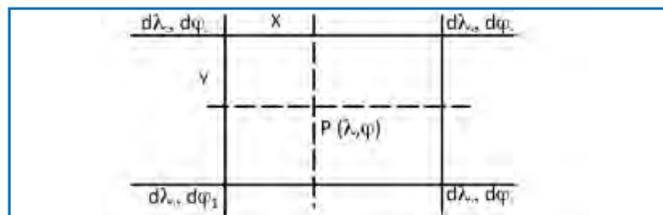


Figure 2. Interpolation de $d\lambda$ et $d\varphi$

Soit un point "P" appartenant à cette maille de coordonnées (λ, φ) , on obtient la valeur de la variation de la longitude ($d\lambda$) et la valeur de la variation de latitude ($d\varphi$) en fonction des valeurs aux nœuds ($d\lambda_1, d\lambda_2, d\lambda_3, d\lambda_4$) et ($d\varphi_1, d\varphi_2, d\varphi_3, d\varphi_4$) par l'interpolation bilinéaire de la façon suivante :

La distorsion en longitude : $d\lambda_p$

$$d\lambda_p = (1-x)(1-y)d\lambda_1 + (1-x)y d\lambda_2 + x(1-y)d\lambda_3 + xy d\lambda_4$$

La distorsion en latitude : $d\varphi_p$

$$d\varphi_p = (1-x)(1-y)d\varphi_1 + (1-x)y d\varphi_2 + x(1-y)d\varphi_3 + xy d\varphi_4$$

Avec : $X = \frac{\lambda_p - \lambda_1}{\lambda_3 - \lambda_1}$ et $Y = \frac{\varphi_p - \varphi_1}{\varphi_2 - \varphi_1}$

2- Interpolation par le plus proche voisin (PPV) : la méthode d'interpolation du PPV consiste à attribuer à chaque site Si cible dans la sélection un poids inversement proportionnel à la distance entre ce site et le point à estimer S_0 , dans notre cas on obtient la distorsion en longitude et en latitude par la formule suivante [3] :

$$d\lambda_p = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{d\lambda(s_i)}{|s_i - s_0|}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{|s_i - s_0|}} \quad \text{et} \quad d\varphi_p = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{d\varphi(s_i)}{|s_i - s_0|}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{|s_i - s_0|}}$$

Avec :

n_0 : Le nombre de données prises en compte (le nombre de voisins utilisés)

S_i : correspondent à la distance angulaire entre le point cible et le point source défini par :

$$S_i = \arccos(\sin \varphi_i \sin \varphi_0 (\cos \lambda_i \cos \lambda_0 + \sin \lambda_i \sin \lambda_0) + \cos \varphi_i \cos \varphi_0)$$

Avec : (λ, φ) sont des coordonnées géographiques relatives aux données sources (λ_0, φ_0) et à la grille cible (λ_i, φ_i)

3^e Étape : Transformer les coordonnées λ_1 et φ_1 exprimées dans le 1^{er} datum vers le 2^e datum (λ_2 et φ_2) en utilisant les formules de la MREs suivantes :

$$\lambda_2 = \lambda_1 + \Delta\lambda$$

$$\varphi_2 = \varphi_1 + \Delta\varphi$$

Élaboration de la grille planimétrique dans la région d'Oran

L'élaboration de la grille de conversion planimétrique dans la région d'Oran a été effectuée en utilisant les mêmes coefficients calculés par la MREs dans la transformation 2D dans la région d'Oran. Chaque grille plane est fournie sous forme d'un fichier (Texte/Binaire) selon la configuration suivante :

- En tête : $\lambda_{Min}, \lambda_{Max}, \varphi_{Min}, \varphi_{Max}, \Delta\lambda, \Delta\varphi, Nc, NI$

- Corps de la grille : $d\lambda, d\varphi$

La grille plane calculée sert à la transformation de la longitude et la latitude obtenue par GPS vers le datum lié au système Nord Sahara. Les nœuds de la grille planimétrique sont exprimés en coordonnées géographiques.

Afin de tester la validité de la grille 2D pour la transformation des coordonnées GPS en coordonnées Nord Sahara, une étude comparative a été réalisée sur le point (305B), ce point a été mesuré par observations classiques et par observations GPS, avec :

	WGS84 (GPS)	NS59 (Triangulation)
λ	-0°313807883	-0°312976469
φ	35°858269158	35°858163164

Tableau 5. Les coordonnées du point 305

La position du point 305B et les limites de la grille 2D calculée dans la région d'Oran sont représentés dans le schéma suivant

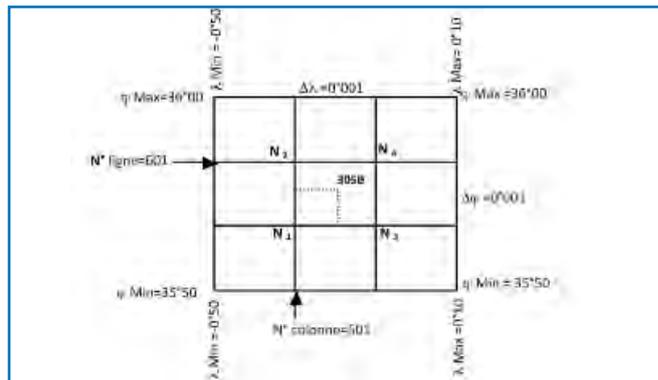


Figure 3. Position du point 305B

Les distorsions en longitude et en latitude sur les Quatre nœuds (maille) avoisinant le point 305B sont représentées dans le tableau suivant :



Nœud N° 01		Nœud N° 02	
λ	-0°314	λ	-0°314
φ	35°858	φ	35°859
dλ	0°000574972	dλ	0°000572918
dφ	-0°000063711	dφ	-0°000063288
Nœud N° 03		Nœud N° 04	
λ	-0°313	λ	-0°313
φ	35°858	φ	35°859
dλ	0°000573838	dλ	0°000571776
dφ	-0°000063637	dφ	-0°000063215

Tableau 6. Calculs sur les nœuds avoisinant le point 305B

Les distorsions calculées sur le point 305B par l'emploi de l'interpolation bilinéaire (IBL) et l'interpolation du plus proche voisin (PPV) sont :

$$d\lambda_{IBL} : 0^{\circ}000574201$$

$$d\phi_{IBL} : -0^{\circ}000063583$$

$$d\lambda_{PPV} : 0^{\circ}000573887$$

$$d\phi_{PPV} : -0^{\circ}000063540$$

Le tableau suivant illustre l'écart en longitude et en latitude calculé entre la position réelle déterminée par mesures géodésiques et la position calculée par la grille de transformation planimétrique :

Position mesurée	Position calculée par grille		Différence (Sec)
0°312976469	λ _{IBL}	-0°313233682	2.0671
	λ _{PPV}	-0°313233996	2.0660
35°858163164	φ _{IBL}	35°858205575	-0.2289
	φ _{PPV}	35°858205618	-0.2287

Tableau 7. Résultats de la transformation du point 305B

On remarque qu'il existe une petite différence entre la position réelle et la position calculée en utilisant la grille de conversion planimétrique.

La précision de la grille 2D est liée à la précision de l'approche de transformation employée pour sa construction, il s'agit de la MREs dans notre application.

Conclusion

Les modèles de transformation à trois dimensions restent mal adaptés pour le cas de l'Algérie à cause du manque d'information sur la hauteur du géoïde relatif à l'ellipsoïde de Clarke 1880A. Afin de résoudre le problème nous avons transformé les deux composantes (longitude et latitude) par l'emploi d'une transformation polynomiale type régression multiple (MREs). Les résultats obtenus dans la région d'Oran montrent que cette approche peut être appliquée pour transformer les observations GPS vers le système national Nord Sahara avec une précision de 14 cm, une grille planimétrique (2D) pour la transformation des coordonnées géodésiques dans la région d'Oran a été élaborée. La grille élaborée dans la région d'Oran représente la surface de correction de coordonnées entre les deux datum. Elle permet

à l'utilisateur de transformer directement leurs coordonnées GPS sans passer par les étapes de traitement des logiciels de transformations disponibles en Algérie et elle permet aussi d'éviter les travaux de rattachement en planimétrie sur les points géodésiques. ●

Contacts

Sid Ahmed MEDJAHED - Ali ZEGGAI

sid.medjahed@yahoo.com

Centre des Techniques Spatiales - Division de Géodésie Spatiale (Arzew- Oran/Algérie)

Bibliographie

- [1] S.A.Medjahed (Février 2006) *Intégration des données GPS, Nord Sahara et de Nivellement en vue d'une transformation tridimensionnelle. Cas de l'Algérie.* Mémoire de Magister CNTS
- [2] S.A Medjahed (2008) *Génération de grilles de conversions de coordonnées géodésiques - Rapport de Recherche -CTS*
- [3] K.Kokoche Omar (2007) *Élaboration d'une grille de conversion altimétrique pour la Mans Métropole-mémoire d'ingénieur - École Supérieure des Géomètres et Topographes (ESGT).*
- [4] European Petroleum Survey Group (EPSG) - *Guidance Note Number 7 - Coordinate Conversions and Transformations including Formulas.*
- [5] A.Zeggai, S.A Benahmed Daho, B. Ghezali, H.Taibi, R. Ait Ahmed Lamara (2006) *Conversion altimétrique des hauteurs ellipsoïdales par GPS.* Revu XYZ N° 109 - 4^e trimestre 2006
- [6] Merrin Pearse and Chris Crook Crook (Report: GS 1997/11) *Recommended transformation parameters from WGS84 to NZGD49- Geodetic System Technical Report - Toitu te Land Whenua Information New Zealand.*
- [7] NATIONAL IMAGERY AND MAPPING AGENCY (2000) - *Its Definition and relations ships with local geodetic systems -TECHNICAL REPORT.*
- [8] A .Reyt (1960) *Les principales étapes de la géodésie en Afrique du Nord et leur incidence cartographique.* éditeur. Imprimerie IGN

ABSTRACT

Words Key: Transformation, WGS84, Nord Sahara, two dimensional grid.

The use of the GPS system, conducted us to a global solution, the geodetic co-ordinates (GPS longitude & GPS latitude) are expressed in relation to the WGS84 system. Generally, every country or each territory possesses its geodetic reference. In order to exploit advantages of the GPS tool locally, it is necessary to transform the GPS co-ordinates in the local system. In geodesy there are several models of geodetic transformations that allow the passage of a geodetic system another. The using of these models through the processing steps more or less complex (e.g. the choice of the transformation approach, the choice of support points, selection controls points etc.).From where the necessity to put an intended transformation methodology in place directly to the user. This approach is called transformation conventionally by grid and it based on the principle of construction and the use of a two dimensional grid (2D) for the transformation of the longitude and the latitude between two geodetic datum (WGS84 and North Sahara).

Nomenclature du nouveau produit BD forêt La base de données nationale de la forêt française Une nomenclature nationale pour répondre à de multiples contraintes

■ **Thierry TOUZET**

L'inventaire forestier national (IFN), vient de fusionner avec l'Institut géographique national (IGN) pour devenir le nouvel IGN (Institut national de l'information géographique et forestière). L'IGN est désormais chargé de l'inventaire

permanent des ressources forestières nationales indépendamment de toute question de propriété et doit constituer et mettre à jour "un référentiel géographique de description des essences forestières cohérent avec le référentiel à grande échelle". L'institut doit saisir plus de 16 millions d'hectares de forêt et 2,5 millions d'hectares d'espaces naturels et semi-naturels sur les 550 000 km² du territoire. Les principales caractéristiques de la forêt française sont le morcellement et la diversité des espèces. Le projet initié fin 2006 a un objectif de production du référentiel en dix ans sur la base de dix départements par an, au moyen d'un effectif de vingt-cinq photo-interprètes forestiers et deux contrôleurs.

MOTS-CLÉS

Forêt, nomenclature nationale, forestière

vement scellée par le décret n° 2011-1371 du 27 octobre 2011. L'ensemble des missions relatives à la forêt a été conservé dans la nouvelle structure.

Les missions forestières de l'IGN

L'IGN réalise les opérations d'inventaire sur l'ensemble du territoire français au moyen d'un échantillon constitué pour une période de dix ans, dont un dixième est traité chaque année. Les données relatives aux points sont recueillies à partir de la BD Ortho[®] ainsi que d'observations et de mesures sur le terrain. Ces informations dendrométriques, écologiques et floristiques sont enregistrées dans des bases de données et mises à la disposition du public. L'IGN utilise également les référentiels images aériennes, essentiellement l'émulsion infrarouge couleur du RGE pour réaliser le "référentiel géographique de description des essences forestières cohérent avec le référentiel à grande échelle" (Art.2, alinéa 3 du décret statutaire). Le référentiel est réalisé par département, il a pour objectif la représentation spatiale de la forêt française mais aussi des espaces naturels et semi-naturels que sont les landes, les garrigues et maquis, les pelouses alpines... quelle que soit la propriété publique ou privée. Le référentiel se veut exhaustif pour qualifier tous les ensembles boisés de plus de 0,5 ha. Cette couche d'information améliore de façon très sensible la précision des résultats statistiques et apporte une information indispensable à toutes les études spatiales.

Historique de la BD forêt

Le produit BD Forêt proposé au catalogue des produits 2012 de l'IGN était connu au temps de l'IFN sous le nom de "carte forestière". D'abord proposée au format papier, elle devient grâce au

Outre l'amélioration des moyens techniques pour la collecte des données et leurs contrôles, la réussite du projet repose sur la mise au point d'une nomenclature thématique forestière qui permette de répondre à la demande des utilisateurs mais également aux contraintes de temps, de charge de travail et donc de contraintes économiques. La demande des utilisateurs porte fortement sur la cohérence des données et l'interopérabilité avec les référentiels nationaux.

L'IFN a mis au point une nomenclature thématique nationale et hiérarchique à quatre niveaux : couverture du sol, densité du couvert, composition d'ensemble et essences. La surface minimale de représentation est de 0,5 ha (seuil de surface minimale de la définition internationale de la forêt) avec indication de la composition (feuillue/résineuse) dès le seuil minimal.

Les spécifications sont également cohérentes avec celles des référentiels nationaux et notamment la couche végétation du Référentiel à grande échelle (RGE[®]) qui caractérisent les éléments arborés hors forêt que sont les haies, les vergers et les bosquets.

La nomenclature standard constitue un socle de base qui peut également être enrichi pour répondre à une demande régionale spécifique à condition que les

ajouts s'emboîtent dans l'arbre de décision. La couche forestière détaillée est un produit pour les études environnementales et constitue un appui à l'ensemble des acteurs de la filière forestière.

Historique de l'inventaire forestier national

L'IFN a été créé en 1958 par ordonnance signée par le général de Gaulle, pour mieux connaître les potentialités des forêts françaises. Il est chargé de l'inventaire permanent des ressources forestières nationales, indépendamment de toute question de propriété (article R 521-1 du code forestier). L'IFN est devenu établissement public à caractère administratif sous tutelle du ministre chargé des forêts en 1994 et a occupé le château des Barres à Nogent-sur-Vernisson, lieu encore rempli de mémoire pour beaucoup de forestiers. Depuis le 1^{er} janvier 2012, il a fusionné avec l'IGN, le siège du nouvel IGN est désormais à Saint-Mandé (Val-de-Marne) dans le Pôle géosciences qui accueille également le siège de Météo-France ainsi que l'antenne parisienne du SHOM (service hydrographique et océanographique de la marine). La fusion décidée dans le cadre de la mise en œuvre de la RGPP (Révision générale des services publics) a été définitive-



développement des systèmes d'information géographique (SIG) une base de données géographique.

La première carte forestière produite par l'IFN a été réalisée en 1962 en partenariat avec l'IGN. Un programme de production de cartes papier au 1/100 000^e avait été décidé pour représenter le massif landais, il s'est ensuite étendu à la Lorraine. Ce programme ambitieux a permis la production de très belles cartes mais malheureusement il s'est arrêté en 1967, bien avant d'être achevé, par manque de moyens financiers.

L'IFN a utilisé l'informatique dès les années 70, et a produit des cartes de type "cartogrammes" (cartes par point). Les préparations restent toujours manuelles jusqu'à l'arrivée des systèmes d'information géographique (SIG) au début des années 80. En 1986, l'IFN publie la première carte réalisée de façon entièrement numérique et en 1998, il produit la première carte forestière couvrant tout le territoire national à partir de la juxtaposition de tous les départements extraits d'une base de données cartographiques numériques. C'est la première base nationale d'occupation du sol exploitable dans les SIG.

Jusqu'en 2006, la base de données forestière est une phase de l'inventaire statistique. Elle détermine l'échantillon de points levé sur le terrain. L'objectif de l'inventaire statistique étant d'évaluer la ressource forestière, l'indicateur de référence est le volume de bois sur pied. Pour cette raison, la clé d'entrée pour la détermination des types de peuplement pour la base version 1 est la structure forestière, on parle de futaie, de taillis, de taillis sous futaie..., la reconnaissance de l'essence est secondaire. La carte est un outil statistique et pour consolider le dispositif, elle est composée de trois couches d'informations thématiques : les régions forestières, les catégories de propriété et les types de formation végétale. Les trois couches sont parfaitement liées et partagent les mêmes limites. Les types de formation végétale s'appuient sur les catégories de propriété par référence aux régions forestières. Le croisement des trois thèmes constitue une couche de polygones appelés DEC (domaine d'étude cartographié). L'unité minimale de col-

lecte (UMC) est de 2,25 ha. Les points de l'inventaire statistique sont tirés dans des strates constituées à l'intérieur des domaines d'étude statistiques (DES) obtenus par regroupements de DEC.

En 2005, une méthode de sondage systématique appliquée sur l'ensemble du territoire remplace la méthode précédente d'inventaires départementaux tournants effectués tous les dix à douze ans. La base forestière n'est plus une phase amont de l'inventaire, elle est utilisée pour affiner la précision des résultats *a posteriori*. Dès lors, elle devient indépendante et de nouvelles spécifications sont définies ainsi que de nouveaux objectifs pour une version 2.

Des objectifs redéfinis pour produire une version 2

Six nouveaux objectifs ont été définis pour faire évoluer la base forestière

- s'appuyer sur la définition internationale de la forêt ;
- établir une nomenclature nationale ;
- cartographier les essences ;
- être interopérable avec les référentiels nationaux ;
- couvrir l'ensemble du territoire métropolitain en moins de dix ans
- rechercher un processus de mise à jour

Les 3 premiers objectifs sont liés à la définition de la nomenclature.

■ S'appuyer sur la définition internationale de la forêt

Afin de garantir une homogénéité à long terme ainsi qu'une cohérence statistique avec d'autres thématiques, il a été décidé que la représentation de la forêt s'appuierait sur la définition désormais admise le plus largement au niveau international, fournie par la FAO (Food and Agriculture Organization) en 2005 (Global Forest resources Assessment 2005, FRA2005) : *"La forêt est un territoire occupant une superficie d'au moins 50 ares avec des arbres pouvant atteindre une hauteur supérieure à 5 m à maturité in situ, un couvert arboré de plus de 10 % et une largeur moyenne d'au moins 20 m. Elle n'inclut pas les terrains dont l'utilisation du sol prédominante est agricole ou urbaine."*

L'abaissement à 0,5 ha de la surface minimum de représentation a des

conséquences importantes sur le nombre de faces à représenter et sur la longueur de lisière de forêt à saisir.

■ Établir une nomenclature nationale

Contrairement à la version 1, la nomenclature devra être identique pour tous les départements afin d'assurer une continuité d'interprétation entre départements voisins. Une nomenclature nationale permet la réalisation de statistiques sur des surfaces s'affranchissant des limites administratives.

■ Cartographier les essences

Pour être en meilleure adéquation avec les besoins de l'ensemble des utilisateurs mais également pour être en adéquation avec les pays qui élaborent une base forestière, il est envisagé d'abandonner la cartographie des structures (futaie, taillis, taillis sous futaie...) au profit des essences. Cette décision a pour avantage de rendre un produit plus homogène sur l'ensemble du territoire, la structure du peuplement étant une variable difficile à coder et qui très souvent ne donnait pas satisfaction à l'utilisateur final. Maintenant, la couverture du sol puis la composition en essences correspondent à un enchaînement dans l'arbre de détermination d'un peuplement. Voir figure 1.

■ Être interopérable avec le RGE®

Un premier objectif est d'être en cohérence temporelle et géographique avec le référentiel image (BD Ortho®) mis à jour tous les cinq ans (bientôt trois ans). Un deuxième objectif est d'être en cohérence logique avec le référentiel topographique (BD Topo®) dans ses composantes végétation et réseaux (routiers, voies ferrées et cours d'eau). Une segmentation automatique de l'image apportera une réponse au premier objectif.

Un rapprochement des spécifications répondra en partie au deuxième objectif. Il faudra également veiller à la cohérence des limites avec la couche végétation et la couche des réseaux.

■ Couvrir l'ensemble du territoire métropolitain en moins de dix ans

L'objectif fixé est la réalisation de cette nouvelle version en moins de dix ans. La version 2 n'utilise que peu d'informations de la version 1, du fait de l'augmentation de la précision géométrique et des chan-

gements de spécifications (entrée différée). Pour beaucoup de départements en version 1 (cf. section 2), l'information sur l'essence est totalement absente. Il sera nécessaire d'exploiter au maximum l'image infrarouge couleur ainsi que toutes informations exogènes, notamment les points des levés de terrain de l'inventaire statistique. Les vérifications sur le terrain sont aussi possibles.

■ **Aller vers un processus de mise à jour**

La précision permet d'envisager la mise à jour du référentiel forestier en saisissant uniquement les différentes évolutions de la forêt (déforestation, plantation...). Cette mise à jour peut être faite partiellement en s'appuyant sur les partenaires de la filière bois, les gestionnaires, les collectivités.

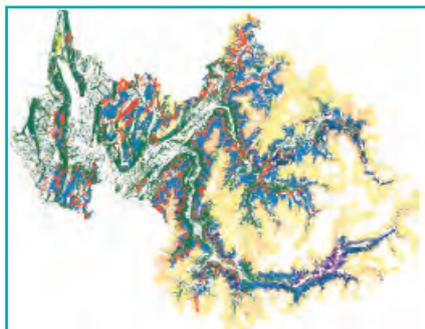
Des contraintes fortes

■ **Contraintes économiques**

La définition d'une nouvelle version de la couche forestière s'accompagne de contraintes essentiellement économiques. Malgré le surcroît de travail, les moyens alloués à la production seront constants, voire légèrement réduits. Au démarrage du projet, la production reposait sur vingt-cinq photo-interprètes forestiers répartis sur le territoire en cinq équipes, auxquels il fallait ajouter deux personnes pour l'organisation, la préparation et les contrôles. La BD Forêt est un produit facturé. L'estimation du coût est établie sur la base de la surface cartographiée. Même si le produit s'inscrit dans un marché concurrentiel peu hostile car il n'existe pas de produit comparable avec la même précision homogène sur l'ensemble du territoire, le modèle économique reste fortement contraint du fait des utilisateurs pour l'essentiel relevant du secteur public.

La réponse à cette contrainte a été la recherche d'un partenaire pour mutualiser les moyens de production et ceux des connaissances.

Les photo-interprètes forestiers ont des compétences d'experts en gestion forestière, en lecture du paysage et une excellente maîtrise des SIG. Les contrôles sur le terrain, coûteux financièrement, seront diminués et devront être compensés par l'accès facilité à de nom-



Visuel de la BD Forêt de la Savoie (date de référence 2006 - année de la prise de vue BD Ortho)

breuses données exogènes, données statistiques forestières, couche forestière version 1, d'autres types d'images comme la BD Ortho® antérieure (de cinq ans) à la référence utilisée, des cartes géologiques, pédologiques, des guides de typologie des stations forestières ou encore du recueil d'informations sur l'écologie des espèces.

■ **Contraintes liées à une forêt française diversifiée et morcelée**

La forêt métropolitaine couvre plus de 16 millions d'hectares de forêt et 2,5 millions d'hectares d'espaces naturels sur les 550 000 km² du territoire. Elle se caractérise par un fort morcellement, l'exemple de la Bretagne et en particulier du département du Morbihan (56) illustre bien cette spécificité avec plus de 26 000 faces saisies dans la base forestière couvrant une surface d'environ 141 000 ha et presque la moitié des faces ont une surface inférieure à 2 ha et sont isolées. Une autre caractéristique de la forêt est sa grande diversité d'espèces avec 40 essences ayant un volume de plus de 1 million de m³ sur pied et 29 plus de 10 millions.

La nomenclature devient la base de la réussite du projet

En 2006, l'IGN et l'IFN ont signé un partenariat pour produire conjointement la couche végétation, composante de la BDTopo® et la couche forestière. La mutualisation des moyens et des connaissances permet d'augmenter la productivité. Des gains de productivité peuvent être dégagés grâce au développement d'applications dédiées, avec des outils d'aide à la saisie, mais aussi

par l'apport de processus issus de la recherche des laboratoires COGIT et MATIS de l'IGN, segmentation d'images, classifications semi-automatiques... Chaque partenaire apporte sa compétence, l'IGN la manipulation et traitement de données, l'IFN son expertise en thématique forestière.

Il apparaît rapidement que la définition de la nomenclature est un élément essentiel pour une bonne maîtrise des coûts tout en restant au plus près de la demande des utilisateurs. La problématique de la précision thématique est plus complexe car elle s'exprime de façon très diverse selon les utilisateurs par rapport aux spécificités géographiques régionales, selon que la forêt est en zone méditerranéenne, zone de montagne, zone bocagère, etc.

Une nomenclature maîtrisée

La prise en compte des objectifs et des contraintes présentés ci-dessus a abouti à la mise au point d'une nomenclature thématique hiérarchique à quatre niveaux (figure 1) :

le 1^{er} niveau décrit la couverture du sol ;
le 2^e niveau décrit la densité du couvert arboré ;

le 3^e niveau décrit la composition d'ensemble, feuillus, résineux ou mixte ;

le 4^e niveau décrit les essences.

La carte forestière repose sur l'estimation par le photo-interprète des seuils de densité de couvert des arbres.

- le seuil de 10 % de couvert absolu des arbres permet de séparer la forêt des autres types de formations végétales, notamment les landes ;

- le seuil de 40 % de couvert absolu des arbres sépare la forêt ouverte et la forêt fermée ;

- le seuil de 75 % de couvert libre relatif des arbres détermine la notion de pureté d'un peuplement selon sa composition ou son essence. Le couvert libre correspond en photo-interprétation (vision du dessus du peuplement) à la surface des houppiers ayant accès à la lumière. Il est qualifié de relatif quand on détermine la proportion d'un sous-peuplement par rapport à un autre.

La définition internationale de la forêt abaisse l'UMC à 0,5 ha. Elle définit le niveau 1 de la nomenclature et l'entrée de l'arbre de décision avec la notion de

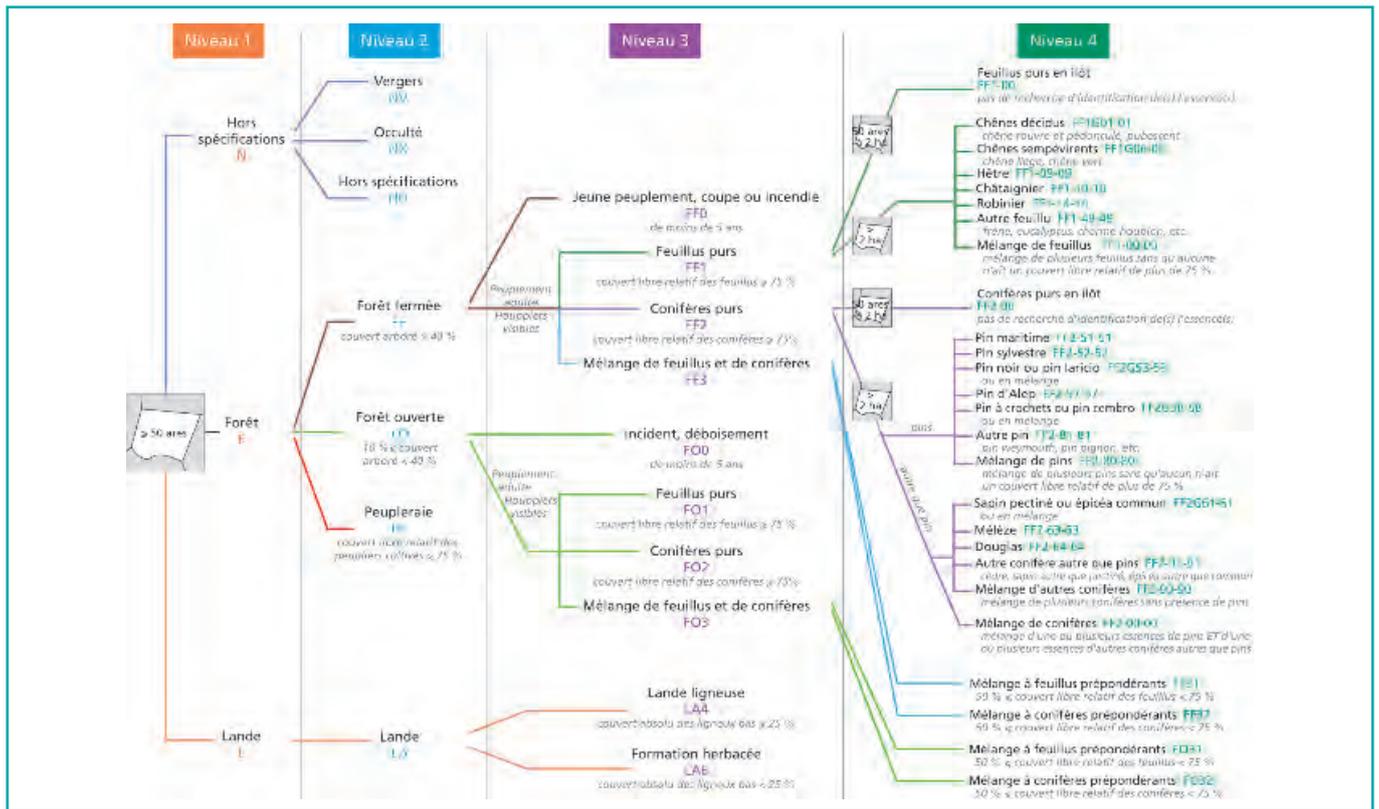


Figure 1. Nomenclature de la couche forestière

▶ couvert boisé. Au-dessus de 10 % de couvert boisé, en excluant les territoires d'utilisation agricole (vergers) et ceux d'utilisation récréative, on parle de forêt. Pour être complet, il faut également tenir compte de la hauteur potentielle des arbres *in situ*.

Pour être en cohérence sémantique et logique avec le RGE®, les définitions des objets cartographiés de la couche végétation sont harmonisées et se réfèrent également à la définition internationale de la forêt et notamment les terrains arborés hors forêt (haies, bosquets...) prennent en compte les seuils de référence de 50 ares pour la surface et de 20 m pour la largeur. Une haie est un terrain arboré, d'une largeur inférieure à 20 m et d'une longueur supérieure à 25 m. Un bosquet est un terrain arboré d'une largeur inférieure à 20 m et d'une surface comprise entre 5 et 50 ares, il est composé d'au moins quatre arbres. Un arbre isolé ou un bouquet d'arbres est composé de moins de quatre arbres. Pour la BD Topo®, la surface minimale de représentation (surface des houppiers) est arrêtée à 80 m². Le niveau 3 correspond à celui de la

couche végétation de la BD Topo®, il correspond à l'union de la couverture du sol, de la densité de couvert et la composition d'ensemble.

■ Le principe d'une nomenclature nationale

La nomenclature proposée est identique pour tous les départements. Elle est conçue de façon hiérarchique. La nomenclature nationale constitue un socle de base. La détermination d'un type est faite selon un arbre de décision, auquel des branches peuvent être ajoutées.

Des types spécifiques peuvent être ajoutés à la demande des utilisateurs. Ils devront garantir l'intégrité de la nomenclature de base et devront s'emboîter dans l'arbre de décision. C'est le cas de certaines demandes régionales, exemple de la zone méditerranéenne, pour laquelle la forêt ouverte sera davantage détaillée, ou certaines essences de chênes (chêne vert, chêne liège) seront discriminées. La discrimination des essences de chênes pourra constituer un niveau 5 de la nomenclature. Le choix des essences est un élément fondamental de la notion du socle de base que constitue la nomenclature

nationale. Le socle ne répond pas aux particularités régionales, elles sont une option et une extension.

■ Le choix des essences

Le niveau 4 correspond à la cartographie des essences, à l'exception des peupleraies séparées au niveau 2. Les peupleraies font partie de la forêt, mais sont définies à partir d'un couvert boisé de 10 %, par conséquent il n'existe pas de forêt ouverte de peupliers. Le choix des essences a été fait à partir des relevés statistiques. Ils correspondent aux essences les plus représentées en surface sur le territoire métropolitain. Par exemple, ce critère a été déterminant pour que le robinier fasse partie de la nomenclature de base. Il a été longtemps porté en débat et mis en concurrence le plus souvent avec le frêne qui est une essence plus valorisée sur le plan économique. Il se trouve que depuis quelques années, le robinier prend de plus en plus d'importance pour la filière bois. Un autre critère qui a prévalu pour le choix des essences a été la reconnaissance du type par photo-interprétation sur image en IRC. Le frêne sur ce critère est très difficile à distinguer. Ce critère de reconnaissance



sur image IRC est aussi la cause de certains regroupements d'essences, comme celui du pin laricio et pin noir, ou du sapin pectiné et de l'épicéa.

Si un terrain est couvert par une essence pure autre que celles définies dans la nomenclature de base, le terrain sera singularisé et noté "Autre feuillu pur" ou "autre pin pur", etc. L'essence n'est pas indiquée. Elle peut l'être par annotation, si la face est contrôlée au sol ou si le photo-interprète est sûr de son choix.

■ Des contraintes qui pèsent sur la nomenclature

Les deux contraintes fortes décrites précédemment sont liées car la diversification et le morcellement de la forêt ne peuvent être appréhendés que dans le modèle économique défini. Il est possible de cartographier beaucoup plus d'essences, pour toutes les surfaces de plus de 0,5 ha mais la charge de travail dépassera les capacités de production. Plusieurs choix ont été faits pour mettre en adéquation capacité financière de production (moyens matériels, logiciels et humains) et données utiles. Le principe de base est de tirer le maximum d'information de l'image IRC pour limiter les contrôles sur le terrain qui sont dans le processus de production les étapes les plus coûteuses. L'essence coûte cher car elle occasionne de nombreux contrôles sur le terrain alors que la composition en feuillus ou résineux est accessible facilement sur l'image IRC et presque automatiquement.

Le seuil de 0,5 ha entraîne la saisie d'un nombre considérable de faces lié au morcellement de la forêt française. Ainsi trois principes sont validés.

En premier, la caractérisation des essences est proposée seulement pour les massifs boisés supérieurs à deux hectares et dont la densité du couvert boisé est supérieure à 40 %. On caractérise les espèces seulement pour la forêt "fermée" et pour des ensembles cohérents pour les gestionnaires de la forêt. Pour les massifs compris entre 0,5 et 2 ha, seule la composition en feuillus et résineux est notée. Dans les massifs de grande surface, lorsque les limites ne sont pas nettes, un type de formation végétale doit avoir une surface au minimum de 10 ha. La diversité des espèces est également une contrainte, le deuxième principe a

été de retenir uniquement la notion de pureté du peuplement. Elle s'apprécie par l'estimation du seuil de 75 % de couvert libre relatif des arbres de même essence. On distingue par exemple les forêts fermées pures de hêtre, de douglas, de pin maritime, etc.

La notion de prépondérance dans un peuplement pourrait être très intéressante dans certains types comme par exemple les chênaies-hêtraies ou les hêtraies-sapinières du nord-est de la France, mais le travail devient vite trop important. La prépondérance peut être proposée pour certaines zones spécifiques sur demande de l'utilisateur et avec des financements complémentaires externes. Ces types se retrouvent dans une catégorie de mélanges de feuillus, de mélanges de conifères ou de mélanges de feuillus et de conifères en précisant quelle composition est prépondérante (seuil de couvert supérieur à 50 % et inférieur à 75 %).

Enfin, un autre regroupement est opéré et concernent les jeunes reboisements, les coupes rases, les incidents, ils se trouvent dans un seul type. La encore, la précision de l'essence pour les reboisements ou les plantations nécessiteraient un déplacement systématique. Ce regroupement est réalisé sur un critère de possibilité de photo-interprétation. Les vérifications terrain servent uniquement à lever les doutes. Ce type fera l'objet d'une attention particulière lors des mises à jour.

Conclusions et perspectives

La nouvelle méthode statistique d'inventaire, de par sa moindre dépendance avec la cartographie, a permis de mener un travail de réflexion sur la nomenclature des types de peuplement. La nouvelle nomenclature a abouti à un système hiérarchique, suffisamment souple pour s'adapter à l'évolution des besoins des utilisateurs. Elle a été validée par des utilisateurs avec lesquels des nomenclatures étendues ont été constituées. C'est le cas du travail qui a été conduit avec le Centre régional de l'information géographique de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (CRIGE-PACA) pour lequel une nomenclature de plus de soixante-dix types a été élaborée à partir de la

nomenclature de base. Ce travail à façon dégage des ressources propres pour l'établissement et permet à l'utilisateur d'obtenir une information sur mesure à des coûts plus justes.

Une perspective de recherche et d'évolution des spécifications concerne la végétation en zones urbaines. Selon la définition internationale de la forêt, les territoires boisés d'utilisation récréative ne sont pas des forêts, par conséquent, il convient de trouver une méthode pour les isoler. La description des espaces boisés urbains est très complexe et nécessite une grande précision du fait de l'imbrication avec les réseaux routiers et les bâtiments. La problématique de l'arbre en ville (alignements de bord de rue, espaces verts, jardins privés...) est très spécifique par rapport à l'objectif de réalisation de la couche végétation ou de la précision de la couche forestière. Des travaux de recherche sont menés pour isoler ces espaces boisés par croisement avec des zones d'extension urbaine, qui pourraient être spécifiées à partir d'objets de la BD Topo®. ●

Contact

Thierry TOUZET

thierry.touzet@ifn.fr

Références

M. Duprez, S. Lucas, L'IF n°20, *Nouvelle cartographie forestière - De la production à l'utilisation*, IFN, 8 pages, 3^e trimestre 2008
http://www.ifn.fr/spip/IMG/pdf/IF20_carto.pdf
 IFN, *Guide technique, La cartographie forestière version 2*, 52 pages
www.ifn.fr/spip/IMG/pdf/Guide_technique_cartographie_IFN1.11.pdf

ABSTRACT

The main features of French forests are fragmentation and species diversity. The idea of making a database logging based on the international definition of forest (FAO, 2005), in 10 years began in 2007 initially to NFI and to NGI today. Apart from improved technical means for data collection and their controls, the project's success rests on the development of a national classification for meet user demand but also to time constraints, load work and therefore to financial constraints.

Adine Sagalyn au pays de Daguerre

■ Jean-Pierre MAILLARD

Les studios de Bry font l'actuelle renommée de Bry-sur-Marne, "moult vieille Paris" si on en croit sa devise. Mais, comme toutes les communes, Bry-sur-Marne garde et entretient la mémoire de ses gloires locales notamment celle de Talleyrand, d'Etienne de Silhouette, d'Hervé Bazin ou encore celle de Louis Daguerre (1787-1851) qui y est enterré. L'inventeur de la photographie a vécu de longues années dans la commune de l'est parisien dont il a été un citoyen actif. Outre sa fonction de conseiller municipal, Louis Daguerre a surtout marqué sa présence pour la postérité en réalisant un diorama dans l'église Saint-Gervais-Saint-Protais.

Le diorama

Le diorama se présente sous la forme d'une installation et d'une toile peinte recto-verso, de 5,35 m sur 6 m, dont la perception change avec l'évolution de la lumière du jour. Rappelons que Daguerre est d'abord un décorateur de théâtre, créateur d'effets spéciaux à une époque où l'électricité et la 3D n'existaient pas. Le diorama de Bry-sur-Marne installé dans le chœur de la petite église représente la nef d'une cathédrale qui crée l'illusion d'un édifice grandiose.

Cette œuvre a pris une importance particulière car elle reste le dernier diorama au monde, toutes les autres réalisations ayant disparu dans l'incendie de l'atelier de Daguerre. Inscrit à l'inventaire supplémentaire des monuments historiques, le diorama fait actuellement l'objet d'une restauration de même que le lieu de culte qui le reçoit. Cette action patrimoniale conduit la ville dans un vaste projet culturel centré sur la photographie en lien notamment avec l'Institut national de l'audiovisuel (INA), justement implanté à Bry-sur-Marne.

L'Association des artistes bryards (AAB)

Sans relation avec le diorama, les artistes locaux sont regroupés en association depuis une décennie en particulier pour créer le salon des Beaux-arts de Bry, vitrine de l'expression picturale et statuaire locale. L'AAB rassemble désormais plusieurs dizaines de

membres et c'est dire la vitalité artistique communale d'une ville de 15 000 hab. On peut se demander si l'émulation n'est pas à l'origine de ce foisonnement. En effet, c'est un artiste consacré, Etienne Audfray, qui a été plus de trente ans le maire de la commune (1965-1998). On peut croire que son mode d'expression et sa sensibilité culturelle ont touché ses concitoyens. Etienne Audfray, cartographe de formation et sculpteur visiblement inspiré par Maillol, a ainsi conduit le devenir de la cité avant de présider pendant six ans la société nationale des Beaux-arts (1998-2004). Quoi qu'il en soit, l'AAB rejoint les multiples associations culturelles de notre pays qui mettent leurs efforts bénévoles au service de la création et de la promotion des œuvres. C'est également dans des salons non médiatisés que l'on peut souvent trouver des sujets d'émerveillement ou de réflexion. Certes, toutes les œuvres ne se valent pas mais on ne peut pas reprocher aux organisateurs, à Bry au premier chef à la présidente Catherine Vigier-Ferrandin, d'encourager les artistes locaux. En revanche, le ou les invités d'honneur donnent de la tenue à la manifestation et servent sa reconnaissance. En 2012, pour la première fois ouvert aux photographes, le 8^e salon de Bry, qui s'est déroulé du 9 au 25 mars, a invité l'un d'entre eux Adine Sagalyn. Comme le public du vernissage, elle a écouté les interventions élogieuses de l'association et des édiles Jean-Pierre Spilbauer, maire, et Gilles Carrez, député, dans une

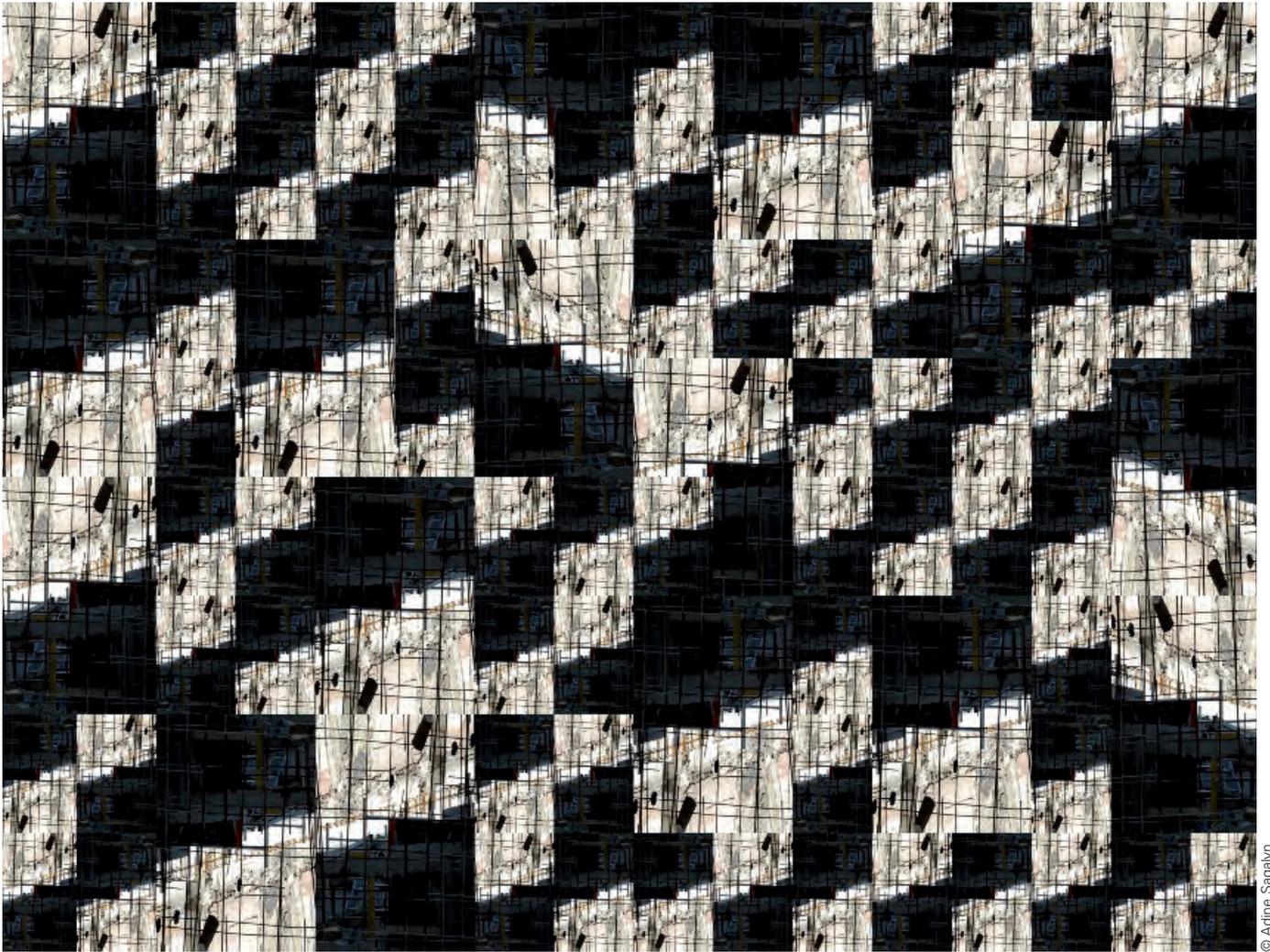
ambiance provinciale inattendue dans une commune de la banlieue parisienne.

"Echo lines"

Dans les salons de l'hôtel de Malestroit, la première œuvre qui s'offrait à la vue, à droite en entrant, est intitulée "Echo lines". C'est un tirage photographique de 70 cm x 94 cm contrecollé sur de l'aluminium qui suscite instantanément la curiosité et se perçoit comme une abstraction géométrique. Cependant, ce qui est regardé comme un puzzle inachevé, un damier déformé est en réalité une mosaïque réalisée à partir d'une palette de clichés photographiques unitaires, ordonnés par l'artiste.

Adine Sagalyn traite son sujet pour saisir la texture de la matière, la lumière, la géométrie des formes, leur rythme et leur mouvement. C'est un travail de cadrage qui fait basculer la perception et induit sa transformation vers une approche plastique. La juxtaposition des images induit une dynamique qui révèle le sujet. En effet le regard va et vient de l'ensemble au détail, une façon de revoir ce que l'on croyait connaître et de le redécouvrir avec plus d'intérêt. Alors on voit qu'en réalité "Echo lines" traite d'une opération d'aménagement, précisément de sa phase mise en état des sols qui a débuté par une démolition.

Ainsi l'artiste compose des photographies d'éléments hétérogènes, certains immédiatement identifiables et d'autres rendus insolites. La conception et le rapprochement d'images est le cœur de son travail avec la prise en compte de l'agencement architectural. Pour autant, Adine Sagalyn saisit les instantanés qui lui parlent, prend la réalité telle quelle, sans mise en scène. Les clichés unitaires ne sont pas retouchés, seuls les formats de restitution peuvent changer d'échelle pour servir la composition.



© Adine Sagalyn

“Echo lines”

Dans la recherche de la géométrie aléatoire qui s'en dégage, les sujets de prédilection d'Adine Sagalyn sont la minéralité du paysage urbain et les artefacts produits de façon industrielle. Sa créativité s'est particulièrement développée dans ce dernier domaine.

L'Art industriel sur mesure

Le concept est né d'une démarche artistique visant à révéler la beauté et la singularité du patrimoine industriel. Les éléments qui composent les produits, les machines qui les fabriquent, et la façon dont ils sont stockés puis assemblés, sont autant de matériaux des compositions photographiques d'Adine Sagalyn. La photographe s'est risquée à une profession de foi : *“Je veux susciter un autre regard sur l'entreprise : un regard émerveillé. Et plus*

encore, apporter une nouvelle dimension à travers le prisme artistique. La matière industrielle oscille, alors, entre réalité et imaginaire. Chaque objet porte la trace du savoir-faire fondateur de l'entreprise. Je veux donner à voir toute la beauté contenue dans le monde de l'entreprise et participer ainsi à l'élaboration de son mythe.”

Par exemple, l'artiste l'a mis en œuvre dans le hall d'accueil d'un bâtiment de la société Danone Vitapole à Palaiseau. Adine Sagalyn y a installé “Kaléidoscope”, une fresque photographique de 500 m² valorisant les matières premières de Danone, le lait, le blé et l'eau et leur transformation en produits finis. La subtilité des répétitions et des variations d'images, leurs juxtapositions, le jeu des formes courbes ou géométriques créent des résonances visuelles qui appellent une lecture multiple.

Adine Sagalyn

Née en 1959 à New York de mère artiste et de père proche de la photographie d'art américaine, Adine Sagalyn vit en France depuis 1981. Elle travaille en tant que photographe portraitiste et d'architecture depuis une vingtaine d'années. Naturalisée française depuis quatre ans, elle vit aujourd'hui à Saint-Mandé, à deux pas du siège de l'AFT. Son travail est partagé entre sa production personnelle et la réponse aux commandes d'industriels séduits par sa démarche de transformation visuelle.

Il aurait été bien regrettable de ne pas rencontrer une voisine autant “Art et géométrie” qui inscrit la photographie pourtant figurative dans la lignée des créations de Dewasne, Vasarely, Yvaral et autres maîtres de l'abstraction géométrique. ●