

RÉDUCTION DE L'ERREUR SYSTÉMATIQUE DE MESURE GÉOMÉTRIQUE PAR ENRICHISSEMENT ALTIMÉTRIQUE DES DONNÉES GÉOGRAPHIQUES

par Jean-François Girres

Université Paul-Valéry Montpellier 3 – UMR GRED
Route de Mende 34199 MONTPELLIER Cedex 5
jean-francois.girres@univ-montp3.fr

Dans la majorité des logiciels SIG, les mesures géométriques (longueur, surface) calculées à partir de la géométrie des objets vectoriels sont réalisées en deux dimensions, ce qui génère des sous-estimations systématiques. Plusieurs raisons peuvent expliquer cette situation, comme les lacunes en termes de modélisation géométrique des données vectorielles, ou encore l'absence de méthodes correctement implémentées pour calculer ces mesures à l'aide d'altitudes. Afin de réduire l'erreur systématique impliquée par l'omission des altitudes dans les mesures géométriques, cet article propose des méthodes pour (1) enrichir la géométrie des objets géographiques en utilisant des données altimétriques provenant de sources externes, (2) calculer la longueur et la surface à l'aide d'altitudes. Ces propositions sont mises en œuvre au sein d'un modèle permettant à tout utilisateur de SIG de prendre en compte le terrain dans les calculs de longueur et de surface, et ainsi d'évaluer la sous-estimation systématique impliquée par des mesures géométriques en deux dimensions. Une expérimentation est ensuite réalisée pour illustrer le fonctionnement du modèle et tester l'impact de la qualité de plusieurs sources de données altimétriques sur les mesures géométriques. Les résultats démontrent que les modèles numériques d'élévation disponibles gratuitement permettent de réduire de manière réaliste l'erreur de mesure. Sur la base de comparaisons avec des bases de données à haute résolution, l'expérimentation montre également que l'omission du terrain n'est pas suffisante pour expliquer la totalité de l'erreur de mesure. En effet, ceci suppose de modéliser et combiner d'autres processus accumulés sur des données vectorielles impactant les mesures géométriques, telles que l'erreur de saisie ou encore la projection cartographique.

Introduction

Les mesures géométriques (longueur, surface) calculées à partir de la géométrie des objets géographiques sont par définition imprécises. Cette imprécision peut varier en fonction de différents processus utilisés pour créer (par exemple, l'erreur de saisie) ou représenter (la projection cartographique par exemple) des données géographiques vectorielles. Dans ce contexte, nombre de recherches ont proposé des méthodes pour estimer globalement l'imprécision des mesures de longueur ou de surface calculées à partir de la géométrie des objets vectoriels. Par exemple, Chrisman et Yandell (1988) ou Prisley *et al.* (1989) ont proposé des modèles statistiques permettant d'estimer l'impact de l'erreur de positionnement des sommets des géométries vectorielles sur les mesures de surface et de longueur. D'autres contributions, telles que Griffith (1989), Goodchild *et al.* (1999), ou plus récemment Leung *et al.* (2004) ou De Bruin *et al.* (2008) ont également proposé des modèles pour estimer globalement l'imprécision des mesures de longueur et de surface calculées à partir de géométries vectorielles.

Néanmoins, ces contributions font face à deux limitations majeures afin d'estimer de manière réaliste l'imprécision des mesures géométriques. Tout d'abord, dans ces études, les mesures sont calculées en deux dimensions, ce qui génère des sous-estimations systématiques des longueurs ou des surfaces. Deuxièmement, ces contributions sont basées sur l'hypothèse que l'erreur de mesure géométrique est homogène et ne varie pas selon les conditions locales des données géographiques. Cependant, la réalisation de simples comparaisons entre des jeux de données démontre clairement que l'erreur de mesure géométrique varie en fonction de la localisation des objets géographiques.

Pour illustrer cette situation, deux sources bien connues d'erreur de mesure géométrique sur les données vectorielles peuvent être utilisées à titre d'exemples. La première porte sur l'impact de la projection cartographique, qui provoque des erreurs prévisibles (Chrisman et Girres, 2015) selon le système de référence de coordonnées (SRC) utilisé et l'emplacement des données. La seconde source porte sur l'omission du

terrain dans le calcul de longueur et de surface (en particulier dans les zones montagneuses ou vallonnées, figure 1), ce qui génère également des sous-estimations systématiques des mesures effectuées (voir par exemple Fisher et Tate, 2006). Ces exemples démontrent que l'erreur de mesure varie effectivement en fonction de la localisation des données vectorielles.

Dans ce contexte, cette recherche tend à considérer que pour estimer correctement l'imprécision des mesures géométriques, il est nécessaire d'identifier et d'évaluer les impacts de tous les processus (utilisés pour capturer ou représenter les données) accumulés sur la géométrie des objets vectoriels et qui affectent ces mesures (Girres, 2012). Pour atteindre cet objectif, cette recherche propose de (1) modéliser les impacts respectifs de chaque composante de l'erreur de mesure finale, et (2) proposer des méthodes pour combiner ces impacts et évaluer l'imprécision globale de mesure.

À cet égard, le calcul des mesures géométriques sans prise en compte des altitudes peut être considéré comme une cause d'erreur classique, et cet article se concentrera plus particulièrement sur cette composante bien connue de l'erreur de mesure. En effet, dans la plupart des logiciels SIG, les mesures ne sont réalisées qu'en deux dimensions. Cette situation génère des sous-estimations systématiques des longueurs et des surfaces calculées, qui sont le plus souvent négligées en termes d'aide à la décision.

Pour évaluer cet impact, cet article propose des méthodes permettant de calculer des mesures de longueur et de surface à l'aide d'altitudes, suite à un enrichissement altimétrique préliminaire de la géométrie des données vectorielles (si l'information d'altitude n'est pas définie). Ces méthodes sont mises en œuvre dans un modèle permettant à tout utilisateur de SIG d'évaluer l'impact de l'omission du terrain sur les mesures géométriques et, par conséquent, de réduire l'erreur systématique de mesure.

La section suivante de l'article présente différents éléments permettant de comprendre les causes et les conséquences des mesures géométriques en deux dimensions sur les objets géographiques. La section 3 présente des propositions pour enrichir la géométrie des objets vectoriels et calculer correctement les mesures géométriques avec des altitudes. Enfin, des expérimentations sont présentées dans la section 4 pour illustrer le fonctionnement des méthodes proposées et évaluer l'impact de la qualité des sources d'information altimétrique sur la réduction de l'erreur de mesure géométrique.

Causes et conséquences des mesures géométriques en deux dimensions

La limitation des mesures géométriques en deux dimensions dans la plupart des logiciels SIG peut s'expliquer par plusieurs raisons. Nous développerons en particulier celles relatives aux lacunes en termes de modélisation géométrique des données vectorielles, et aux méthodes implémentées pour calculer les mesures géométriques.

Lacunes dans la modélisation géométrique des données vectorielles

La création d'une base de données géographiques demeure une tâche complexe, et plusieurs processus peuvent être utilisés pour capturer la géométrie des objets vectoriels. Selon les besoins de l'utilisateur et en fonction des moyens techniques déployés par le producteur de la base de données, la modélisation géométrique inclura, ou non, des informations d'altitude. Par exemple, dans la base de données BDTOPO (IGN, 2011), une base de données topographiques à grande échelle disponible sur l'ensemble de la France, les routes sont représentées à l'aide de polygones tridimensionnelles, tel qu'exposé en figure 2a dans le format WKT (*Well Known Text*). À l'inverse, dans la base de données *OpenStreetMap* (Girres et Touya, 2010), les routes ne sont modélisées qu'avec des polygones bidimensionnelles où l'altitude n'est pas détaillée.

En effet, la saisie de l'information d'altitude demeure coûteuse et implique des processus de production appropriés (par exemple, restitution photogrammétrique ou relevés GPS de précision). Si les spécifications n'imposent pas d'information d'altitude, la modélisation géométrique des objets géographiques sera généralement limitée en deux dimensions, ce qui demeure plus simple à produire.

De plus, même si l'information d'altitude est renseignée dans la géométrie des objets, certains formats de données vectorielles ne gèrent pas les géométries tridimensionnelles, ce qui empêche tout calcul de mesures géométriques en trois dimensions. Pour faire face à ces problèmes, les informations d'altitude peuvent être stockées comme attributs des objets. Par exemple, dans la base de données BDTOPO, les altitudes des routes sont également enregistrées à l'aide de deux champs dans la table d'attributs, nommés «Z-INI» et «Z-FIN» (figure 2b), correspondant aux altitudes des sommets initiaux et finaux de chaque objet routier. Entre ces deux extrémités, aucune altitude n'est renseignée, ce qui est problématique pour calculer une longueur tridimensionnelle correcte.

Par ailleurs, même si aujourd'hui la modélisation des altitudes est relativement facile à mettre en œuvre pour les polygones, la tâche s'avère plus complexe pour les polygones. En effet, la modélisation des contours des polygones à l'aide de géométries tridimensionnelles n'est pas suffisante, car elle ne tient pas compte des variations d'altitudes à l'intérieur du polygone. Par exemple, les cimetières extraits de la BDTOPO sont modélisés à l'aide de polygones où le contour représente la bordure du cimetière. Même si les altitudes sont complétées sur le contour, il n'est toujours pas possible d'effectuer des mesures tridimensionnelles correctes des surfaces, car les altitudes situées à l'intérieur du polygone sont inconnues (figure 3b). Bien que cette situation ne soit pas problématique pour des formes planes, elle peut générer des erreurs de surface importantes dans les reliefs vallonnés.

Ainsi, pour éviter les sous-estimations de mesures de surface pour les polygones, une modélisation géométrique correcte des altitudes doit être mise en œuvre. Également, des méthodes appropriées pour mesurer les longueurs et les surfaces en trois dimensions doivent être plus généralement intégrées dans les logiciels SIG.

Limites des algorithmes de mesures géométriques

Dans la plupart des logiciels SIG, les fonctionnalités de mesure géométrique ne sont généralement fournies qu'en deux dimensions. Ainsi, les calculs de longueur sont effectués en utilisant l'équation 1 et les calculs de surface en utilisant l'équation 2.

$$L = \sum_{(1)} ((x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2)^{0.5}$$

$$A = 0.5 \sum x_i (y_{i+1} - y_{i-1}) \quad (2)$$

Avec le développement des SIG 3D, de nouvelles méthodes de calcul sont progressivement disponibles pour faciliter les mesures en trois dimensions. Mais si les géométries des objets sont mal modélisées, ces fonctionnalités demeurent inutiles. Pour remédier à ce problème, cet article propose des méthodes appropriées d'enrichissement altimétrique de la géométrie des objets vectoriels, afin de calculer les longueurs et les surfaces à l'aide d'altitudes, et ainsi d'évaluer la sous-estimation systématique impliquée par des mesures en deux dimensions.

Mesures géométriques basées sur un enrichissement altimétrique

Comme indiqué précédemment, le calcul de mesures géométriques avec altitudes suppose une modélisation correcte de l'information altimétrique ainsi que des méthodes appropriées pour calculer les longueurs et les surfaces. Lorsque l'information d'altitude est absente de la géométrie originale des données vectorielles, des méthodes pour enrichir les objets géographiques à l'aide des modèles numériques de terrain (MNT) sont proposées. À cet égard, un modèle (figure 4) est développé pour (1) enrichir automatiquement la géométrie des objets des bases de données géographiques en utilisant des informations d'altitude extraites d'un MNT, afin de (2) calculer les longueurs et surfaces en trois dimensions et évaluer l'impact de l'omission du terrain sur les mesures géométriques.

Pour effectuer ces tâches, une étape préliminaire de prétraitement du MNT est effectuée. En effet, les modèles numériques de terrain sont généralement disponibles au format raster, où les informations d'altitude sont affectées à chaque pixel. Pour extraire des informations d'altitude d'un MNT et enrichir des objets vectoriels, il est plus adapté de le vectoriser. Par conséquent, une conversion préliminaire du MNT d'un format raster en un réseau de triangles réguliers est effectuée, comme illustré en figure 5.

L'enrichissement de la géométrie des polygones et des polygones avec des informations d'altitude et les méthodes de mesures géométriques en trois dimensions proposées sont développées dans les sous-sections suivantes.

Enrichissement des polygones et mesures de longueur

Afin de tenir compte des variations d'altitudes entre chaque sommet, la polygones d'origine est sur-échantillonnée (ou densifiée) de sommets supplémentaires. Le sur-échantillonnage s'effectue en créant un nouveau sommet à partir de chaque arc superposé du réseau de triangles réguliers, comme illustré en figure 6.

Une fois la géométrie de la polygones sur-échantillonnée, les altitudes sont affectées sur chaque sommet en utilisant une équation cartésienne de plan (équation 3).

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (3)$$

Enfin, les mesures de longueur tridimensionnelle sont effectuées en utilisant l'équation 4.

$$L_z = \sum ((x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2)^{0.5} \quad (4)$$

Enrichissement des polygones et mesures de surface

Pour les polygones, les problèmes relatifs à l'enrichissement géométrique et au calcul de surface demeurent plus complexes. En effet, les polygones doivent disposer de coordonnées tridimensionnelles sur le contour, mais également à l'intérieur de la géométrie, afin de représenter les variations internes d'altitudes.

La méthode de sur-échantillonnage du contour du polygone est similaire à celle proposée pour les polygones (voir la section 3.1). Pour compléter les altitudes à l'intérieur du polygone, la géométrie initiale est également sur-échantillonnée en utilisant les triangles et les portions de triangles situés à l'intérieur du polygone, comme illustré en figure 7. Des altitudes sont ensuite affectées sur chaque sommet du polygone sur-échantillonné en utilisant l'équation 3.

Pour calculer les surfaces avec les altitudes, différentes stratégies sont proposées selon les caractéristiques des géométries polygonales sur-échantillonnées. Ainsi, la méthode proposée différencie les triangles et les portions de triangles (figure 8) à l'intérieur du polygone.

Pour les triangles entièrement situés à l'intérieur de la géométrie, la surface est calculée directement. Chaque triangle est défini par deux vecteurs u et v , et la surface tridimensionnelle $A_z(T)$ du triangle est définie à l'aide de l'équation 5.

$$A_z(T) = \frac{1}{2} \| u \times v \| \quad (5)$$

Pour les portions de triangles, la surface n'est pas calculée directement. Une méthode, basée sur le taux de recouvrement entre la partie du triangle P dans le triangle T , est alors proposée. Le taux de recouvrement r (équation 6) est défini comme le rapport entre la surface de la portion du triangle $A(P)$ par rapport à celle du triangle entier $A(T)$ en deux dimensions.

$$r = A(P) / A(T) \quad (6)$$

La surface $A_z(P)$ avec altitude de la portion du triangle est ensuite définie en multipliant la surface tridimensionnelle de l'ensemble du triangle $A_z(T)$ avec

le taux de recouvrement r (équation 7).

$$A_z(P) = r * A_z(T) \quad (7)$$

Enfin, pour calculer la surface du polygone avec altitudes, on utilise les sommes des surfaces des triangles et des portions de triangles, comme proposé dans l'équation 8.

$$A_z = \sum A_z(P) + \sum A_z(T) \quad (8)$$

Le paragraphe suivant décrit la mise en œuvre de ces méthodes.

Implémentation du modèle

Les méthodes proposées pour enrichir les données vectorielles avec des informations d'altitude et calculer des mesures géométriques tridimensionnelles sont mises en œuvre dans un modèle dédié aux utilisateurs de SIG qui souhaitent estimer l'impact de l'omission du terrain sur les longueurs ou les surfaces. Le modèle est implémenté à l'aide de la bibliothèque *GeOxygene* (Grosso *et al.*, 2012), une plate-forme Java développée au sein du laboratoire COGIT de l'IGN, dédiée à la manipulation des données vectorielles. Les fonctionnalités pour l'enrichissement altimétrique et les mesures 3D sont basées sur le package *GeOxygene 3D* (Brasebin, 2009). Enfin, pour faciliter son utilisation par des utilisateurs SIG non-experts, le modèle est implémenté sous la forme d'une extension du logiciel SIG *OpenJUMP*, comme illustré en figure 9.

Pour illustrer le fonctionnement du modèle et tester l'impact des sources d'information altimétrique sur les mesures géométriques, une expérimentation est proposée dans la section suivante.

Expérimentation

Les méthodes développées pour faciliter l'enrichissement géométrique des données vectorielles et permettre des mesures géométriques avec altitudes font face à deux problèmes majeurs : la disponibilité des modèles numériques de terrain et leur qualité. Un modèle numérique de terrain (MNT), qui représente les altitudes au niveau du sol, est généralement coûteux à produire, car il implique des relevés de terrain afin d'être créé. Ainsi, les modèles numériques de terrain ne sont pas toujours disponibles en tous points de la planète. Pour surmonter cette absence, les modèles numériques d'élévation (MNE), qui représentent les altitudes au niveau du sol (lorsque celui-ci n'est pas recouvert) et des éléments de sur-sol (par exemple le toit des bâtiments ou la canopée d'une forêt) peuvent être utilisés. Au

contraire des MNT, les MNE peuvent être facilement disponibles dans le monde entier, car ils sont produits à l'aide de capteurs satellitaires, et sont souvent mis à disposition gratuitement en ligne. Ainsi, afin de fournir des méthodes reproductibles pour éliminer les erreurs de mesure systématiques impliquées par l'omission du terrain, il est important d'étudier l'impact de la qualité des données disponibles pour représenter les altitudes. Les problèmes liés à la qualité des sources d'information d'altitude (par exemple la taille de pixel, le type d'information, la précision verticale...) ont déjà été étudiés dans de nombreuses contributions (Shortridge, 2001 ; Fisher et Tate, 2006 ; Oksanen, 2006). Ainsi, l'expérimentation suivante cherche à comparer les enrichissements réalisés avec un MNT et un MNE afin d'évaluer leurs impacts respectifs en termes de réduction des erreurs systématiques de mesure. Enfin, une application du modèle sur les résultats d'un service de calcul d'itinéraire est proposée.

Évaluation de l'impact des modèles numériques de terrain et d'élévation sur les mesures

Les expérimentations suivantes ont l'intention d'étudier : (1) l'impact de la résolution spatiale (c'est-à-dire la taille du pixel) du MNT, et (2) la comparaison entre MNT et MNE sur la réduction de l'erreur de mesure géométrique. Pour effectuer ces expérimentations, un réseau routier et une entité administrative situés dans

le département de l'Isère (figure 10) sont extraits de la base de données BDCARTO (IGN, 2010). La base de données BDCARTO est une base de données bidimensionnelle sur l'ensemble de la France, permettant des représentations cartographiques à moyenne échelle (du 1:50 000 au 1:250 000). Elle a été produite initialement en numérisant les cartes topographiques au 1:50 000 (IGN, 2010). Par conséquent, cette base de données ne dispose pas d'information d'altitude.

Les deux jeux de données sont enrichis avec le MNT BDALTI (IGN, 2011) représenté à différentes résolutions spatiales (50 m, 100 m, 200 m, 250 m, 500 m et 1000 m) afin d'évaluer l'impact de la taille de pixel sur l'erreur de mesure. Pour comparer les impacts respectifs de MNT et MNE sur l'erreur de mesure, le MNE SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*, voir Farr *et al.*, 2007) est également utilisé. Le MNE SRTM est disponible dans le monde entier avec une résolution spatiale de 90 m. Il a été préféré à d'autres MNE disponibles librement, comme le MNE ASTER (Hirt *et al.*, 2010), du fait de sa meilleure précision verticale. Les différentes sources d'informations d'altitude utilisées pour les expérimentations sont illustrées en figure 11.

Comme référence pour l'expérimentation, la longueur du réseau routier 2D est d'environ 17,46 km et la surface de l'unité administrative 2D est d'environ 7,92 km². Après application des méthodes d'enrichissement, les longueurs et surfaces avec altitudes ont été calculées. Les différences de mesure avec et sans altitudes sont détaillées dans la table 1.

| Données altimétriques | Réseau routier | | | Entité administrative | | |
|-----------------------|------------------|------------|------------|-------------------------------|---------------------------|------------|
| | Longueur 3D (km) | Erreur (m) | Erreur (%) | Surface 3D (km ²) | Erreur (km ²) | Erreur (%) |
| BDALTI 50m. | 17.56 | 94.4 | 0.54% | 8.25 | 0.32 | 4.01% |
| BDALTI 100m. | 17.58 | 112.9 | 0.65% | 8.24 | 0.32 | 3.98% |
| BDALTI 200m. | 17.61 | 145.2 | 0.83% | 8.23 | 0.31 | 3.87% |
| BDALTI 250m. | 17.64 | 170.9 | 0.98% | 8.23 | 0.3 | 3.82% |
| BDALTI 500m. | 17.65 | 180.2 | 1.03% | 8.17 | 0.24 | 3.04% |
| BDALTI 1000m. | 17.56 | 97.8 | 0.56% | 8.06 | 0.13 | 1.62% |
| SRTM 90 m. | 17.59 | 129.9 | 0.74% | 8.28 | 0.34 | 4.39% |

Table 1 : Différences de mesures avec et sans altitudes à l'aide de plusieurs sources de données altimétriques

Les résultats de l'expérimentation montrent que, pour le réseau routier, la différence de longueur augmente lorsque la résolution spatiale du MNT diminue, à l'exception de celui présentant la résolution spatiale la plus basse (avec une taille de pixel de 1000 m). L'enrichissement avec le MNE SRTM génère une différence de longueur légèrement supérieure, par rapport à un MNT de résolution spatiale équivalente (le MNT BDALTI_100 m). Mais cette différence de

longueur reste négligeable, si nous comparons avec un MNT de plus faible résolution spatiale.

Pour comparer ces résultats avec des données de qualité supérieure, la longueur du même réseau routier calculée à partir de la base de données BDTOPO (IGN, 2011) est d'environ 17,74 km, ce qui signifie que l'erreur de longueur est d'environ 277,4 m.

Ces résultats sur le réseau routier démontrent que l'enrichissement géométrique permet de réduire l'erreur systématique de mesure de longueur, même en utilisant un modèle numérique d'élévation comme le MNE SRTM. Néanmoins, les comparaisons de longueur avec un réseau routier à haute résolution, comme celui de la BDTOPO, montrent que la sous-estimation systématique impliquée par l'omission du terrain n'est pas suffisante pour expliquer l'ensemble de l'erreur de mesure. Par conséquent, d'autres sources d'erreurs de mesure doivent être étudiées afin de modéliser l'ensemble de l'imprécision de mesure, comme par exemple l'erreur de saisie ou l'approximation polygonale des courbes.

Enfin, les résultats de l'expérimentation sur l'entité administrative montrent que globalement, la différence de surface diminue lorsque la résolution spatiale du MNT diminue. L'enrichissement avec le MNE SRTM génère également une différence de surface plus importante, mais qui demeure relativement proche de la différence observée avec un MNT de résolution spatiale équivalente (le MNT BDALTI_100 m.).

Ces résultats démontrent que l'utilisation d'un MN disponible librement, tel que le SRTM, n'est pas suffisante pour évaluer l'ensemble de l'erreur de mesure. Cependant, par comparaison avec des MNT de résolutions spatiales équivalentes, son utilisation génère des résultats assez réalistes afin de calculer la sous-estimation systématique impliquée par des mesures géométriques en deux dimensions.

Application à un service de calcul d'itinéraire

Pour illustrer le fonctionnement du modèle dans une application grand public, un itinéraire a été calculé entre les villes de Saint-Lô (Normandie) et Paris, en utilisant le service de calcul d'itinéraire de *GoogleMaps*. La longueur de l'itinéraire calculé est de 312.691 km. En utilisant le modèle, l'itinéraire calculé est enrichi d'altitudes extraites du MNE SRTM, et la sous-estimation impliquée par l'omission du terrain est calculée. Les résultats montrent que la sous-estimation de la longueur de l'itinéraire sans altitudes est d'environ 179 m., ce qui demeure très faible.

Par rapport aux expérimentations réalisées en zone montagneuse dans la section précédente, ces résultats démontrent clairement que si l'impact de l'omission du terrain sur les mesures géométriques demeure insignifiant dans les zones à faible relief, il devient important dans les zones montagneuses et devrait être pris en compte de manière plus générale dans les applications sollicitant

les mesures géométriques avec un logiciel SIG. De manière plus générale, le développement de services de calcul d'itinéraires utilisant des données géographiques collaboratives pourrait également bénéficier de cette contribution. Par exemple, *OpenRoutingService* (Schmitz *et al.*, 2008) est un service de routage basé sur les données *OpenStreetMap*, dont le réseau routier est encore modélisé à l'aide de polygones bidimensionnelles. Cette application, qui fournit un service de calcul d'itinéraire dédié au cyclisme, pourrait grandement bénéficier des résultats de cette contribution afin de fournir des services plus adaptés aux cyclistes, pour lesquels les questions relatives aux altitudes et aux pentes sont fondamentales.

Conclusion et perspectives

Cet article propose des méthodes simples permettant de calculer des mesures géométriques (longueurs, surfaces) sur des bases de données géographiques vectorielles enrichies d'informations altimétriques externes, afin de réduire l'erreur systématique impliquée par des mesures en deux dimensions. Cette proposition repose sur le fait que de nombreuses bases de données géographiques sont livrées sans informations d'altitude (ou avec des altitudes modélisées de manière incorrecte) et que la plupart des logiciels SIG ne fournissent que des fonctionnalités de mesures géométriques en deux dimensions, ce qui génère une sous-estimation systématique des longueurs ou des surfaces calculées.

Ainsi, cet article propose des méthodes pour (1) enrichir la géométrie des objets vectoriels avec des données altimétriques externes, (2) proposer des méthodes pour calculer des mesures géométriques avec des altitudes. Les expérimentations réalisées montrent que l'utilisation de ces méthodes avec des modèles numériques d'élévation disponibles gratuitement permet de réduire les erreurs de mesure de façon réaliste, par comparaison avec des modèles numériques de terrain. Néanmoins, les résultats montrent que l'impact du terrain n'est pas suffisant pour évaluer l'ensemble de l'erreur de mesure. D'autres processus influant sur les mesures géométriques et leur combinaison (Girres, 2012) doivent donc faire l'objet d'études plus approfondies. Par exemple, les impacts de la projection cartographique ou de l'erreur de saisie n'ont pas été abordés dans cet article, mais pourraient être combinés pour estimer globalement l'imprécision de mesure.

Plus généralement, avec la disponibilité accrue de modèles numériques d'élévation dans le monde entier, il semble aujourd'hui pertinent de généraliser l'utilisation des méthodes proposées dans cet article sur les bases de données vectorielles dépourvues d'information

altimétrique. Ce problème est particulièrement intéressant pour les bases de données collaboratives, telles que *OpenStreetMap*, qui sont le plus souvent uniquement disponibles en deux dimensions. Si la question de la qualité des bases de données *OpenStreetMap* a déjà été largement étudiée (Haklay, 2010; Girres et Touya, 2010),

les questions relatives à l'enrichissement altimétrique systématique de ces données pourraient également être prises en compte afin d'adapter ces bases de données aux besoins spécifiques des applications SIG sollicitant des mesures géométriques, comme les services de calcul d'itinéraire.

Bibliographie

Brasebin M., 2009, « Geoxygene : An Open 3D Framework for the Development of Geographic Applications », *Proceedings of the 12th International Conference on Geographic Information Science (AGILE'09)*, Hanover, Germany.

Chrisman N., Girres J.-F., 2015, « First, do no harm: Eliminating Systematic Error in Analytical Results of GIS Applications », dans Shi W., Wu B., Stein A., (dir.), *Uncertainty Modelling and Quality Control for Spatial Data*, CRC Press, Taylor and Francis, p. 27-44.

Chrisman N., Yandell B., 1988, « Effects of Point Error on Area Calculations : A Statistical Model », *Surveying and Mapping*, n°48, p. 241-246.

De Bruin S., Heuvelink G.B.M., Brown J.D., 2008, « Propagation of Positional Measurement Errors to Agricultural Field Boundaries and Associated Costs », *Computers and Electronics in Agriculture*, n°63(2), p. 245-256.

Farr T., Rosen P., Caro E., et al, 2007, « The Shuttle Radar Topography Mission », *Reviews of Geophysics*, n°45(2), p. 1-33.

Fisher P., Tate N., 2006, « Causes and Consequences of Error in Digital Elevation Models », *Progress in Physical Geography*, n°30(4), p. 467-489.

Girres J.-F., 2012, « Modèle d'estimation de l'imprécision des mesures géométriques de données géographiques. Application aux mesures de longueur et de surface », Thèse de doctorat, Université Paris-Est, France.

Girres J.-F., Touya G., 2010, « Quality assessment of the French OpenStreetMap dataset », *Transactions in GIS*, n°14(4), p. 435-459.

Goodchild M.F., 2004, « A General Framework for Error Analysis in Measurement-Based GIS », *Journal of Geographical Systems*, n°6(4), p. 323-324.

Goodchild M.F., Shortridge A., Fohl P., 1999, « Encapsulating Simulation Models with Geospatial Data Sets », dans Lowell K., Jaton A., (dir.), *Spatial Accuracy Assessment : Land Information Uncertainty in Natural Resources*, Ann Arbor Press, p. 123-129.

Griffith D., 1989, « Distance Calculations and Errors in Geographic Databases », dans Goodchild M.F., Gopal S., (dir.), *The Accuracy of Spatial Databases*, Taylor & Francis, p. 81-90.

Grosso E., Perret J., Brasebin M., 2012, « Geoxygene : an Interoperable Platform for Geographical Application Development », dans Bucher B., Le Ber F., (dir.), *Innovative Software Development in GIS*, John Wiley & Sons, p. 67-90.

Haklay M., 2010, « How Good is Volunteered Geographical Information? A Comparative Study of OpenStreetMap and Ordnance Survey Datasets », *Environment and Planning B: Planning and Design*, n°37(4), p. 682-703.

Hirt C., Filmer M., Featherstone W., 2010, « Comparison and Validation of Recent Freely-Available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4.1 and GEODA DEM-9s ver3 Digital Elevation Models Over Australia », *Australian Journal of Earth Sciences*, n°57, p. 337-347.

IGN, 2011, *BDALTI Version 1 - Descriptif de Contenu*, Institut Géographique National, France. Disponible à l'adresse http://professionnels.ign.fr/sites/default/files/DC_BDALTI1.pdf

IGN, 2010, *BDCARTO Version 3.1 - Descriptif de Contenu*, Institut Géographique National, France. Disponible à l'adresse http://professionnels.ign.fr/sites/default/files/DC_BDCARTO_3_1.pdf

IGN, 2011, *BDTOPO Version 2.1 - Descriptif de Contenu*, Institut Géographique National, France. Disponible à l'adresse http://professionnels.ign.fr/sites/default/files/DC_BDTOPO_2-1.pdf

Leung Y., Ma J.-H., Goodchild M.F., 2004, « A General Framework for Error Analysis in Measurement-Based GIS - Part 4 : Error Analysis in Length and Area Measurements », *Journal of Geographical Systems*, n°6(4), p. 403-428.

Oksanen J., 2006, « Digital Elevation Model Error in Terrain Analysis », Thèse de doctorat, University of Helsinki, Finland.

Prisley S., Gregoire T., Smith J., 1989, « The Mean and Variance of Area Estimates Computed in an Arc-Node Geographical Information System », *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, n°55, p. 1601-1612.

Schmitz S., Zipf A., Neis P., 2008, « New Applications Based on Collaborative Geodata - the Case of Routing », *Proceedings of XXVIII INCA International Congress on Collaborative Mapping and Space Technology*, Gandhinagar, Gujarat, India.

Shortridge A., 2001, « Characterizing Uncertainty in Digital Elevation Models », dans Hunsaker C., Goodchild M.F., Friedl M., Case T., (dir.), *Spatial Uncertainty in Ecology : Implications for Remote Sensing and GIS Applications*, Springer, New York, USA. 238-257.