

Évaluation de produits cartographiques : un système opérationnel à différents niveaux de contrôle

Cartographic product evaluation :
An operational system with different checking levels

N. Chehata^{1,2}, G. Stamon³

¹ Institut EGID, Bordeaux 3 – équipe GHYMAC. 1 Allée F. Daguin, 33607 Pessac

² Institut Géographique National – laboratoire MATIS. 2/4 avenue Pasteur, 94165 Saint-Mandé Cédex

³ Université Paris 5 – laboratoire CRIP5 – SIP. 45 rue des saints-pères, 75006 Paris
nesrine.chehata@egid.u-bordeaux.fr, Stamon@math-info.univ-paris5.fr

Manuscrit reçu le 5 juillet 2006

Résumé et mots clés

Cette étude présente une plate-forme d'évaluation de produits cartographiques. On propose trois niveaux de contrôle ; ponctuel, vectoriel 2D et vectoriel 3D permettant de gérer les différents types de produits disponibles : MNE (Modèle numérique d'élévation) et modèles 3D de bâtiments.

Un état de l'art détaillé des critères d'évaluation de la qualité des MNE urbains sera présenté. On présentera, dans un deuxième temps, le système opérationnel d'évaluation des produits cartographiques avec trois niveaux de contrôle correspondants aux espaces de représentation des différents produits. On propose différents outils de jugement qualitatifs et quantitatifs. Les évaluations peuvent être intrinsèques ou extrinsèques en utilisant un produit de référence. La plateforme constitue un système générique, permettant l'intervention d'un opérateur humain dans la chaîne de traitement. Quelques exemples d'applications seront présentés. La fin de cette étude sera consacrée à une discussion sur la pertinence des évaluations et des métriques utilisées, en soulevant les problèmes de l'évaluation des produits cartographiques et les perspectives pour améliorer ces évaluations.

Évaluation, produits cartographiques, MNE, Modèles 3D, évaluation ponctuelle, évaluation surfacique, évaluation volumique.

Abstract and key words

This study presents an evaluation protocol of cartographic products. We propose three evaluation levels depending on the space representation of these products: pixel level, vector levels in 2D and 3D which respectively deals with DEM (Digital Elevation Model) and 3D building models.

First, a state of the art on the evaluation of cartographic product quality is presented. Then, our operational system will be described. Evaluations can be qualitative or quantitative, intrinsic or extrinsic. It is a generic system that deals with different products. Besides, it allows the interaction with a human operator in the evaluation process. Some applications will be presented showing the system efficiency in real cases.

Finally, a discussion about cartographic product evaluation is conducted. It shows the most relevant criteria for each evaluation level and draws some perspectives for improvement.

Evaluation criteria, cartographic products, DEM, 3D building models, raster evaluation, surface evaluation.

Remerciements

Ce travail a été réalisé en collaboration avec l'Institut Géographique National, le Centre National des études spatiales et l'université Paris 5.

Les auteurs tiennent à remercier l'IGN d'avoir fourni les produits cartographiques pour cette étude et tout particulièrement M. Sylvain Airault pour sa précieuse expertise dans l'évaluation de produits cartographiques.

1. Introduction

Depuis la commercialisation de nouvelles données satellitaires de résolution submétrique (Eros, Quickbird, Ikonos), ou laser aéroporté à très haute résolution, la génération de produits cartographiques intéresse de plus en plus la communauté scientifique. Les enjeux principaux concernant l'acquisition et l'utilisation de données altimétriques se situent au niveau des milieux urbains et des objets du sursol (bâtiments et végétation). Les données utilisées en entrée sont très variées (images aériennes, satellitaires, laser, radar). La restitution du relief est réalisée sur différents paysages (urbain, péri-urbain), à différentes résolutions [8-70 cm] et avec différentes configurations [B/H, multi-vues, utilisation de données externes,...]. De nombreux travaux existent sur le calcul de modèles numériques d'élévation (MNE) ou la reconstruction 3D de bâtiments [Baillard, 1997, Taillandier, 2004, Chehata, 2005]. Ces produits peuvent être utilisés dans différentes applications telles que l'aménagement du territoire, la téléphonie mobile ou encore les simulations 3D. Depuis quelques années, des chaînes de traitement automatisées existent et sont opérationnelles pour générer des modèles numériques d'élévation et des bases de données 3D à partir d'images aériennes [Jibrini, 2002, Flamanc *et al.*, 2003]. L'enjeu actuel est de pouvoir qualifier ces produits dérivés. Leur évaluation intéresse d'une part les producteurs et les utilisateurs des données qui auront, à terme, besoin de mesurer la qualité de leurs données pour vérifier l'adéquation des produits dérivés aux spécifications et donc aux besoins. D'autre part, l'évaluation des produits est nécessaire pour la comparaison des processus de fabrication et des différentes méthodologies développées.

L'objectif de cette étude est de définir un protocole d'évaluation des produits cartographiques. On s'intéresse à l'évaluation de deux produits dérivés. Tout d'abord, le MNE (Modèle Numérique d'Élévation) qui est représenté en $2D^{1/2}$. Le MNE raster correspond à une grille régulière où la valeur de chaque pixel renvoie son altitude sur le terrain. On s'intéresse également à l'évaluation des modèles de bâtiments tridimensionnels, très peu étudiée en littérature. Dans un premier temps, un état de l'art détaillé des indicateurs de qualité utilisés dans la littérature sera présenté. Dans un deuxième temps, on s'intéressera à la plate-forme d'évaluation opérationnelle et aux indicateurs choisis dans notre cadre

d'application. La dernière partie de l'étude présentera différents exemples d'applications et permettra de faire un bilan sur la problématique d'évaluation des produits cartographiques.

2. État de l'art

La qualification des produits dérivés porte essentiellement sur deux critères ; la précision géométrique et l'exhaustivité de la reconstruction. Les indicateurs de qualité d'un MNE peuvent être séparés en deux classes : mesure de la qualité intrinsèque et mesure de la qualité extrinsèque.

2.1. Qualité intrinsèque

Un MNE peut être évalué de manière intrinsèque, sans utiliser une référence externe. On a relevé dans la littérature, deux méthodes d'évaluation intrinsèque de MNE qui sont présentées dans cette section.

2.1.1. Mise en concurrence de plusieurs stratégies

Dans [Gooch et Chandler, 2000], l'auteur propose une méthode d'auto-évaluation basée sur la mise en concurrence de plusieurs stratégies de calcul ou, plus exactement, sur la comparaison de deux MNE calculés avec le même algorithme et un paramétrage différent. Sur l'image de différence des deux MNE, les valeurs proches de 0 sont considérées comme des altitudes fiables. Ceci permet de renvoyer une mesure de fiabilité des altitudes du MNE calculé.

2.1.2. Comparaison du MNE avec des données image

Dans [Schiewe, 2000], l'auteur propose une approche basée sur la comparaison entre les lignes de rupture du MNE et les contours de l'image, partant du principe que les discontinuités géométriques (lignes de rupture) correspondent souvent à des discontinuités radiométriques.

L'auteur évoque également la possibilité d'utiliser l'image pour effectuer une validation du MNE sur des critères sémantiques.

Les objets détectés dans l'image peuvent être associés à des règles de comportement altimétrique : les surfaces d'eau sont planes et horizontales ou encore les routes sont horizontales perpendiculairement à leur axe et ont une pente inférieure à un seuil le long de leur axe. L'inconvénient de cette approche est que certaines des règles utilisant la sémantique de l'image peuvent être utilisées pour la production du MNE, notamment par les approches basées sur une séparation sol/sur-sol [Baillard, 1997, Fournier et Cord, 2000]. Il devient alors délicat d'utiliser les mêmes critères pour la génération du résultat et son évaluation.

2.2. Qualité extrinsèque

La qualité extrinsèque d'un MNE est évaluée par rapport à une référence externe qui constitue une « vérité-terrain ». On distingue trois niveaux de contrôle de la qualité d'un MNE : le contrôle ponctuel, linéaire et surfacique. Pour chaque niveau de contrôle, la mesure de la précision géométrique d'un MNE pose trois sous-problèmes :

1. La mise en correspondance de détails homologues entre le MNE produit et le MNE de référence.
2. Le choix de la mesure de distance entre les détails homologues.
3. Le choix de l'indicateur statistique qui va permettre de qualifier de manière globale le MNE à partir des distances entre les différents détails homologues.

2.2.1. Contrôle ponctuel

• **Mise en correspondance :** Le contrôle ponctuel est la méthode la plus couramment utilisée pour le contrôle de la qualité des MNE. Dans [Abbas, 1994], l'auteur en donne une description détaillée. Elle consiste à évaluer la qualité d'un produit par la distance entre les points homologues connus à la fois dans la référence et dans le produit. Cette méthode est bien adaptée à l'évaluation de données régulièrement échantillonnées, comme les MNE maillés (raster), où la notion d'homologue est implicite. Cependant, le contrôle ponctuel est très sensible aux décalages planimétriques entre les deux MNE. Cette méthode d'appariement majore les erreurs (cf. figure 1), en ne mesurant qu'un simple écart altimétrique Δ_z entre deux détails ayant une même position planimétrique (M, M'_1), alors que le point M'_2 est le véritable homologue.

Ce contrôle ponctuel est bien moins adapté aux données vectorielles, parce que l'appariement des points caractéristiques n'est

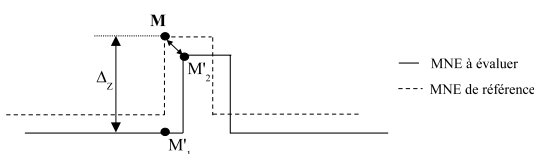


Figure 1. Comparaison ponctuelle entre un MNE produit et la référence.

pas évident en bords de bâtiments par exemple ou bien parce que les structures homologues issues de la référence et du produit n'ont pas la même représentation structurelle en raison du niveau de généralisation.

• **Choix de l'indicateur statistique :** Pour un ensemble n de points homologues, l'estimation globale de la qualité est souvent donnée par l'erreur moyenne quadratique (EMQ) dont l'expression est la suivante :

$$EMQ = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \epsilon_i^2} \text{ avec } \epsilon_i = d(P'_i, P_i) \quad (1)$$

où d est une distance entre le point P_i de la référence et le point P'_i du produit.

Dans le cadre du contrôle ponctuel de MNE, on considère généralement l'écart altimétrique entre deux pixels ayant la même position planimétrique. Il est également indispensable de calculer le biais sur les mesures en effectuant la moyenne arithmétique des écarts en z entre les mesures et la référence. Ce biais permet de mettre en évidence une erreur systématique correspondant à une translation en z entre les mesures et la référence. Les biais en z apparaissent dans les cas d'évaluations avec une référence absolue. Ce biais est, en partie, dû aux erreurs d'aérotriangulation [Kasser et Egels, 2001].

• **Évaluation des erreurs par classes :** La plupart des auteurs ont recours à l'erreur moyenne quadratique comme indicateur de qualité. Cette erreur peut être calculée sur l'ensemble des pixels du MNE. Dans d'autres cas, les écarts ne sont mesurés que sur un sous-ensemble de points caractéristiques [Acharya *et al.*, 2000, Gong *et al.*, 2000, Kleusberg et Klaedtke, 1999]. Dans [Scharstein *et al.*, 2002], les auteurs évaluent et comparent différents algorithmes d'optimisation globale. Ils proposent trois mesures d'erreur qui dépendent de la nature de la région considérée :

- Taux d'erreur dans les régions non occultées : $E_{\bar{0}}$
- Taux d'erreur dans les régions homogènes, non texturées : $E_{\bar{T}}$
- Taux d'erreur dans les régions proches des discontinuités : E_D

2.2.2. Contrôle linéaire

Le contrôle linéaire est adapté à l'évaluation des structures linéaires et surfaciques. Il consiste à mesurer l'écart non plus entre points homologues, mais entre des formes ou des primitives homologues A et B. Les métriques les plus souvent utilisées pour mesurer l'écart entre deux structures sont les suivantes :

• **Distance de Hausdorff :** La distance de Hausdorff entre deux ensembles A et B peut s'écrire :

$$D_H(A, B) = \text{MAX}(\text{sup} \{d(x, B)/x \in A\}, \text{sup} \{d(x, A)/x \in B\}) \text{ avec } d(x, A) = \text{inf} \{d(x, a)/a \in A\} \quad (2)$$

Cette mesure renvoie la plus grande des plus petites distances entre les deux ensembles A et B. Dans [Abbas, 1994], l'auteur utilise la distance de Hausdorff pour le contrôle linéaire planimétrique de base de données vectorielles cartographiques. Toutefois, la mesure de Hausdorff renvoie une distance maximale entre les deux ensembles. Cette distance est par conséquent très sensible au bruit de localisation des limites des structures.

• **Distance de Baddeley :** Afin d'éviter de mesurer une distance maximale entre les deux ensembles, on peut généraliser la distance de Hausdorff [Baddeley, 1992]. En remarquant que la distance de Hausdorff peut s'écrire sous la forme :

$$D_H(A, B) = \sup \{|d(x, B) - d(x, A)| / x \in A \cup B\} \quad (3)$$

On peut généraliser la distance L^∞ de Hausdorff à un espace L^p où $p = [1, \infty[$. Cette nouvelle mesure généralisée peut s'écrire :

$$D_H^p(A, B) = \sqrt[p]{\frac{1}{\text{Card}(A \cup B)} \sum_{x \in (A \cup B)} (d(x, B) - d(x, A))^p} \quad (4)$$

Elle traduit alors non plus un écart maximal, mais un écart moyen entre les deux ensembles. Pour $p = 2$, cette mesure s'apparente dans son écriture à l'EMQ du contrôle ponctuel.

S

• **Mesure de Vinet :** On retrouve dans la littérature d'autres mesures de dissimilarité entre régions [Vinet, 1991]. Cette mesure repose sur la détermination des couples de régions renvoyant le recouvrement maximal entre les deux ensembles de régions. Soit K le nombre de couples de régions et R_K leurs recouvrements respectifs. La mesure de dissimilarité s'exprime alors comme suit :

$$D_V = 1 - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^K R_K \quad (5)$$

N étant le nombre de pixels total de toutes les régions.

Cette mesure est souvent utilisée comme critère d'évaluation des segmentations en régions. Cependant, elle ne correspond pas à une mesure topologique et n'est pas une véritable distance.

2.2.3. Contrôle surfacique ou volumique

De la même manière, on peut généraliser le contrôle linéaire pour évaluer plus généralement des modèles de surfaces 3D. Cette mesure apporterait un plus par rapport au contrôle ponctuel traditionnel notamment pour des reliefs présentant des fortes discontinuités (milieu urbain). Pour le contrôle surfacique, dans [Ragia et Förstner, 1999], les auteurs proposent des mesures surfaciques entre des ensembles de régions 2D quelque soit leurs types et leurs structures internes. Ils distinguent deux familles de métriques : les métriques géométriques (forme, localisation), qui sont fondées sur l'étude de la différence symétrique entre les deux régions : $a \ominus b = (a - b) \cup (b - a)$ et les métriques structurelles (détection et sur-détection). Les auteurs

proposent également des mesures topologiques basées sur des graphes d'adjacence entre régions.

Concernant l'évaluation volumique ou 3D, à notre connaissance, le sujet n'a pas été traité dans la littérature.

3. La plate-forme d'évaluation

On propose dans cette étude un outil opérationnel d'évaluation de produits cartographiques que l'on appellera EvalMNE.

La plate-forme d'évaluation a été développée afin de répondre aux besoins suivants :

1. une plate-forme générique permettant d'évaluer les différents produits cartographiques (MNE, modèles 3D de bâtiments).
2. une évaluation qualitative qui permet à un opérateur humain de juger rapidement la qualité du produit obtenu.
3. une évaluation quantitative qui renvoie des indicateurs de qualité des produits obtenus.

Les produits cartographiques dont on dispose se situent à différents niveaux de détails (raster/ vecteur, 2D/3D). Notre objectif est de pouvoir évaluer chaque produit, en utilisant les critères les plus pertinents vus dans la littérature et de proposer de nouvelles métriques dans le cas de l'évaluation 3D. Pour assurer la genericité de la plate-forme, on propose trois niveaux d'évaluations différents (cf. figure 2), correspondant aux niveaux de description des produits en entrée. Un premier niveau pixel à pixel permet de gérer les MNE produits et référence qui sont sous forme raster. Un deuxième niveau d'évaluation vectorielle en 2D si l'on dispose de deux ensembles de facettes 2D à comparer. Le dernier niveau d'évaluation permet de comparer deux modèles de bâtiments vectoriels en 3D.

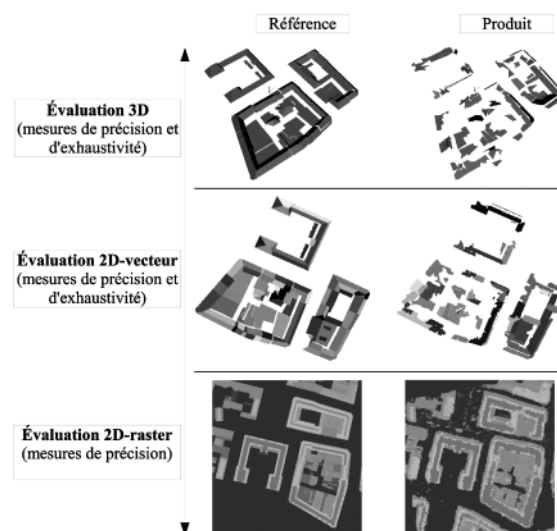


Figure 2. Plate-forme EvalMNE : trois niveaux de contrôle.

La plate-forme permet à chaque niveau de contrôle, des évaluations qualitatives. Pour les évaluations quantitatives, on s'intéressera aux mesures de précision géométrique et aux mesures d'exhaustivité de la reconstruction pour les niveaux vectoriels 2D ou 3D. Dans le cadre de cette étude, les évaluations topologiques ne seront pas abordées. Les indicateurs de qualité mis en œuvre à chaque niveau d'évaluation seront détaillés dans ce qui suit.

3.1. Évaluation ponctuelle

Le premier niveau d'évaluation est le plus utilisé dans la littérature et concerne l'évaluation des MNE raster. Le problème de la comparaison pixel à pixel est sa sensibilité aux décalages en x, y . Les mesures de différence regroupent, par conséquent, les erreurs planimétriques et altimétriques. Cette évaluation nécessite une étape de recalage planimétrique des produits comparés. Cette étape ne sera pas détaillée dans cette étude. On supposera que les produits évalués présentent de faibles décalages. En cas de forts décalages, des outils qualitatifs (cf. section 3.1.3) permettent de les détecter. L'opérateur humain procédera alors à une étape de recalage planimétrique avant les évaluations. En cas d'absence ou de faibles décalages, afin de décorréler les erreurs planimétriques et altimétriques, les évaluations seront réalisées sur différentes classes [Scharstein *et al.*, 2002]. Dans un contexte urbain dense, trois classes sont généralement choisies de manière thématique, à évaluer séparément : la classe de bâtiments « B », les bords de bâtiments « BB » qui regroupent les régions proches des discontinuités et la classe du sol « S ».

3.1.1. Outils de création de classes

La plate-forme fournit un outil interactif et efficace pour la saisie des masques de classes. La création des masques peut-être réalisée :

1. en semi-automatique :
 - par croissance de régions à partir d'un germe discriminant choisi par un opérateur.
 - à partir de l'histogramme du MNE qui fournit des classifications par filtres d'altitudes. L'interface (cf. figure 3) présente un gestionnaire de masques qui permet de saisir les pixels correspondants aux filtres d'altitude. Il est possible d'affecter les pixels d'un masque à une classe donnée et de fusionner différents masques.
2. en automatique :
 - par des opérations morphologiques. Par exemple, les bords de bâtiments sont obtenus par soustraction du MNE érodé à son dilaté.

3.1.2. Évaluations quantitatives

La comparaison pixel à pixel consiste à calculer des statistiques sur les différences d'altitude entre le MNE produit et le MNE de

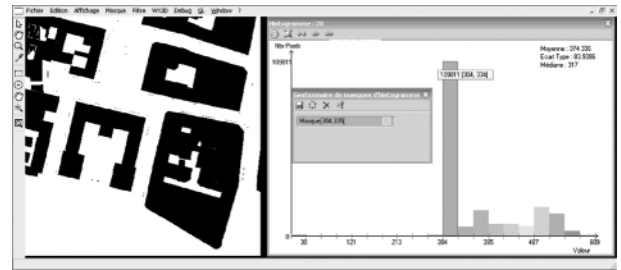


Figure 3. Interface de saisie de masques de classes sous EvalMNE.

référence. On mesure la moyenne, l'écart-type et l'EQM des erreurs. En supposant que la répartition des erreurs suive une loi Gaussienne, les écarts aberrants sont filtrés en seuillant l'histogramme à une valeur fonction de l'écart-type des mesures. La valeur du seuil est généralement fixée à 2,6 l'écart-type, ce qui correspond à une probabilité de 1 % pour une mesure d'être fausse.

3.1.3. Évaluations qualitatives

• **Classification des erreurs :** La plate-forme permet de réaliser des différences d'altitudes entre MNE et de classifier de manière automatique les erreurs (cf. figure 4). Le résultat est une carte d'altitudes qui permet de juger rapidement la qualité du produit et la précision de reconstruction.

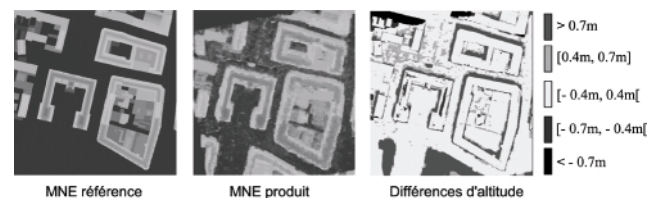


Figure 4. Évaluation qualitative : Différences d'altitude. Centre-ville Amiens, résolution : 50 cm.

• **Répartition des erreurs :** La figure 5 illustre les histogrammes des différences d'altitude pour les trois classes séparément. L'interprétation de l'EQM n'est pertinente que si l'on suppose que la distribution des erreurs est Gaussienne. En pratique, on voit deux exemples de répartitions non Gaussiennes qui peuvent fausser la mesure de l'erreur moyenne quadratique (cf. figure 5).

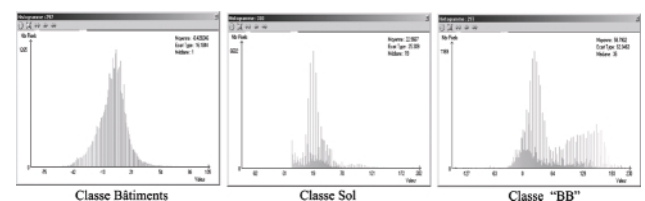


Figure 5. Histogramme des différences d'altitude par classes.

L'exemple de la classe Sol « S » correspond à la présence d'écarts aberrants en bord d'histogramme qui peuvent être dus à la présence de végétation ou de véhicules qui ne sont pas modélisés dans le MNE de référence. L'exemple de la classe « BB » correspond à une courbe d'erreur bimodale qui met en évidence deux causes d'erreur différentes qu'il conviendrait de séparer préalablement. Dans notre cas, la classe « BB » regroupe effectivement les deux types d'erreurs : planimétrique et altimétrique.

• **Comparaison de profils 1D :** La plate-forme propose également un outil de comparaison locale de profils (cf. figure 13). Les profils linéaires permettent de mettre en évidence visuellement des problèmes de décalages planimétriques ou altimétriques, mais également de qualifier les surfaces reconstruites en termes de bruit, de lissage, etc. Dans le cas d'une évaluation intrinsèque de deux MNE générés avec des paramètres différents, on peut supposer que les profils locaux entre deux MNE sont dépendants linéairement. À partir des profils 1D, on peut alors calculer localement l'erreur planimétrique par le coefficient de corrélation de Pearson qui permet de mesurer la relation linéaire existant entre deux variables.

S

$$r_{xy} = \frac{Cov(x,y)}{Var(x) * Var(y)} = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

$$= \frac{SS_{xy}}{\sqrt{SS_{xx}SS_{yy}}} \quad (6)$$

avec :

$Cov(x,y)$ est la covariance de x et y
 x une variable, $Var(x)$ est la variance de x

Cette mesure reste toutefois locale et est réalisée le long d'un profil sur les deux MNE à comparer.

3.2. Évaluation vectorielle

Les évaluations vectorielles consistent à comparer un ensemble de facettes extraites à des facettes de référence. Dans un contexte urbain, les facettes correspondent généralement à des toits de bâtiments. Les facettes de référence sont obtenues à partir d'un modèle 3D vectoriel qui constitue la vérité-terrain. On dispose, en pratique, d'une base de données de modèles 3D TRAPU® de l'IGN¹ qui constitue une référence absolue. Cette base a été constituée manuellement dans les années 80. La localisation tridimensionnelle est calculée sans optimisation des paramètres de prise de vue par des points d'appui. Autrement dit, les coordonnées altimétriques des points du terrain peuvent changer en fonction des conditions de prise de vue. Dans le cadre de l'évaluation des produits cartographiques, l'erreur altimétrique absolue ne sera pas très fiable. En pratique, on utilisera la même mission aérienne pour calculer les produits et pour saisir manuellement des références relatives afin de s'affranchir

des problèmes d'aérotiangulation. La précision altimétrique mesurée sera alors une précision *relative*.

Toutefois, la base de données TRAPU® référence absolue, permettrait de réaliser des évaluations planimétriques absolues ou bien des comparaisons topologiques (formes des bâtiments, relations de voisinage,...). Ces évaluations topologiques ne seront pas abordées dans cette étude.

3.2.1. La mesure d'exhaustivité de la reconstruction

L'évaluation des taux de détection et de sur-détection des primitives par rapport à la référence permet d'estimer l'exhaustivité de la reconstruction. Pour cela, on utilise des critères d'évaluation de primitives proposés par [McGlone et Shufelt, 1994] et qui sont souvent utilisés dans un cadre cartographique [Matikainen *et al.*, 2004, McKeown *et al.*, 2000]. On notera TP (True Positive), le nombre de facettes de référence qui ont été correctement reconstruites. TN (True Negative), le nombre de facettes de référence qui ne sont pas reconstruites. Enfin, FP (False Positive) sont les facettes reconstruites et qui ne correspondent à aucune facette de référence.

On définit alors deux mesures de qualité ; le taux de détection T_d et de sur-détection T_{sd} comme suit :

$$T_d = \frac{TP}{TP + TN} \quad ; \quad T_{sd} = \frac{FP}{TP + FP} \quad (7)$$

Ces mesures nécessitent une étape de mise en correspondance entre les facettes calculées et les facettes de référence. Cette étape peut être réalisée manuellement par un opérateur humain, ou bien de manière automatique. Le critère de mise en correspondance sera le taux de recouvrement.

L'avantage de ces mesures est qu'elles prennent en compte les appariements $1 - 1$, $1 - N$ et $N - 1$.

La mise en correspondance est l'étape la plus délicate des évaluations vectorielles. Pour contrôler cette étape, on dispose au niveau de l'interface d'une visualisation des ensembles appariés avec la possibilité de supprimer des éléments mal appariés. Cette étape permet également de choisir, empiriquement, la valeur du taux de recouvrement en fonction des scènes à analyser.

3.2.2. Évaluation vectorielle 2D

L'évaluation vectorielle 2D correspond à un contrôle surfacique du produit. On dispose en entrée d'un ensemble de facettes 2D et d'un modèle de référence vectoriel 3D. Le modèle 3D de référence est projeté dans les images en utilisant un Z-buffer. L'évaluation consiste à mettre en correspondance les deux ensembles de facettes 2D de manière automatique. On utilisera comme critère le recouvrement planimétrique des régions. Les évaluations portent d'une part, sur l'exhaustivité de la détection (cf. section 3.2.1, d'autre part sur la qualité des facettes 2D. Ce contrôle surfacique revient à évaluer la qualité de segmentation 2D d'un modèle. Les métriques mises en œuvre sont des métriques utilisées pour l'évaluation des segmentations en

1. Institut Géographique National.

régions : la distance de Baddeley et la longueur de polygonisation. Dans un contexte urbain, les facettes 2D correspondent généralement à des toits de bâtiments qui constituent des régions de formes simples. Le critère de polygonisation caractérisera la simplicité de la région.

3.2.3. Évaluation vectorielle 3D

Ce niveau d'évaluation permet de comparer deux modèles vectoriels en 3D. On ne considère que les primitives 3D représentant des surfaces planes. Cette étape correspond à un contrôle volumique des modèles 3D de bâtiments.

La plate-forme permet de réaliser la mise en correspondance automatique entre les facettes calculées et les facettes de référence par des critères de recouvrement planimétrique et de distance volumétrique (cf. section 3.2.4). Un élagage suivant la distance volumétrique permet d'éliminer les facettes de référence appartenant au sol. En cas de superposition de plusieurs facettes, la facette supérieure sera retenue comme homologue. La figure 11 illustre l'interface d'évaluations vectorielles 3D. La plate-forme permet de comparer simultanément plusieurs modèles produits par rapport à un modèle de référence. Les facettes appariées entre les différents modèles sont superposées dans une vue 3D afin de pouvoir contrôler visuellement les appariements automatiques et juger, de façon qualitative, la reconstruction des facettes 3D. Les évaluations 3D renvoient des mesures d'exhaustivité (taux de détection et sur-détection) et des mesures de précision des facettes 3D. On propose trois métriques 3D : la distance volumétrique, la puissance volumétrique et l'erreur angulaire qui seront détaillées dans ce qui suit.

3.2.4. Critères d'évaluation des facettes 3D

On propose trois métriques volumiques pour les évaluations en 3D.

- **Erreur angulaire :** Pour comparer les pentes des facettes, on utilise l'erreur angulaire entre les normales des plans des deux facettes $e(\perp\pi_f, \perp\pi'_f)$, $\perp\pi_f$ étant la normale au plan π de la facette f . L'inconvénient de cette mesure est qu'elle ne tient pas compte de la surface des facettes.

- **Distance volumétrique :** La distance volumétrique permet d'évaluer la distance entre une facette F et une facette référence F_r , en prenant en compte la surface des facettes et la position des deux plans porteurs respectifs.

La figure 6 illustre les distances proposées suivant la position des deux plans porteurs.

La distance volumétrique est définie comme suit :

$$D(C(F), F_r) = \begin{cases} |D(C, \pi_r)| & \text{si } F \cap \pi_r = \emptyset \\ \frac{\sum_i A(F^i) \cdot |D(C(F^i), \pi_r^i)|}{\sum_i A(F^i)}, & (8) \\ F = \bigcup_i F^i & \text{sinon} \end{cases}$$

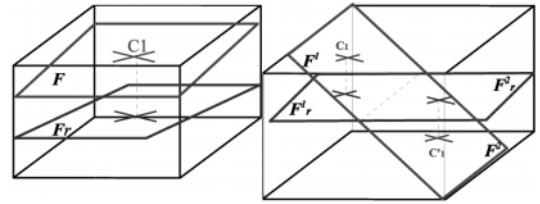


Figure 6. Distance entre deux plans 3D.

avec :

$\pi(F)$: le plan porteur de la facette F ,

$A(F)$: l'aire de la facette F ,

$C(F)$: le centre de gravité de F ,

$D(x, P)$: la distance d'un point x à un plan P .

Pour le calcul de la distance volumétrique, la facette F est découpée suivant la ligne d'intersection avec le plan de référence π_r en plusieurs facettes F^i . La distance finale est égale à la somme des distances des centres de gravité des facettes découpées F^i au plan de référence, pondérées par les surfaces de chaque facette. La distance volumétrique est finalement normalisée par la surface de la facette initiale. L'avantage de cette métrique est qu'elle permet de prendre en compte la position des deux plans et surtout la surface des facettes. Une petite erreur angulaire entre facettes peut devenir importante sur des grandes surfaces.

- **Puissance volumétrique :** Cette métrique est calculée de la même façon que la distance volumétrique sauf que les distances sont signées. Elle traduit par conséquent, l'emplacement de la facette évaluée (au-dessus ou au-dessous) par rapport à la facette de référence. La combinaison des deux métriques volumétriques lève l'ambiguïté sur la position relative de deux facettes.

3.2.5. Problématique de la comparaison vectorielle

Le problème qui se pose lors de la comparaison vectorielle est la différence de niveau de généralisation entre modèles. Les modèles 3D proviennent de différentes chaînes de traitement. Suivant le degré de généralisation choisi, les modèles peuvent être très différents, par rapport au nombre de primitives utilisées, au niveau de détail recherché, à la présence ou pas de superstructures (chiens-assis, cheminées...), et au niveau de découpage des facettes. Cependant, la topologie est généralement respectée entre les différents modèles. D'après ces constatations, il est nécessaire d'avoir le même niveau de généralisation pour comparer deux modèles vectoriels.

En pratique, la plate-forme permet à un opérateur humain de modifier, de manière interactive, les modèles 3D de référence, par fusion et suppression de facettes, pour assurer le même niveau de généralisation. Les facettes les plus souvent supprimées correspondent aux superstructures et à des facettes appartenant au sol. Des outils de découpage d'une scène 3D par un opérateur humain ont également été développés pour pouvoir focaliser en 3D sur une zone de test précise.

4. Applications

Cette plate-forme a été utilisée pour évaluer la qualité de différents produits cartographiques. Les applications sont présentées par type de produit cartographique.

4.1. Évaluation d'un MNE raster

Dans la plate-forme, un MNE raster sera évalué de façon ponctuelle. La première application concerne l'évaluation d'un nouveau processus de production de MNE [Chehata, 2005], contraint par des primitives 3D. Le processus est basé sur une optimisation contrainte dans un volume 3D, réalisée par coupes de graphes. Une première évaluation (cf. figure 7) consiste à démontrer l'apport des primitives dans le processus. Les deux MNE sont comparés avec le MNE TRAPU®.

Les images sont à 50 cm de résolution. Les primitives 3D sont extraites à partir d'un couple stéréoscopique de rapport $B/H = 0,2$. La figure 7(a) montre l'impact des segments, la figure 7(b) montre l'impact conjoint des segments et des facettes.

Sur les deux images, la classification des erreurs permet de voir que les différences d'altitudes varient entre -40 cm et 40 cm sur les toits de bâtiments et une grande partie du sol. Les bords de bâtiments présentent les plus grandes différences d'altitude qui sont supérieures à 70 cm.

De manière qualitative, on remarque que les différences sur les toits sont plus bruitées pour les segments. L'utilisation des facettes permet en effet de régulariser les toits. Par contre, une facette 3D mal-estimée est rapidement repérable. La modélisation des toits est faussée et on obtient des erreurs localisées certes, mais qui peuvent être supérieures à 40 cm sur les toits (le bâtiment en « U » sur la figure 7(b)).

D'après les évaluations quantitatives (cf. figure 8), l'EMQ sur les altitudes de toits est de 20 cm, par contre sur les bords de toit, l'erreur est de l'ordre de 110 cm. Cette dernière classe est difficile à évaluer puisqu'elle regroupe intuitivement les erreurs planimétriques et altimétriques.

Les segments 3D présentant une bonne précision planimétrique grâce au faible rapport B/H , modélisent correctement les discontinuités des façades et améliorent les résultats au niveau des

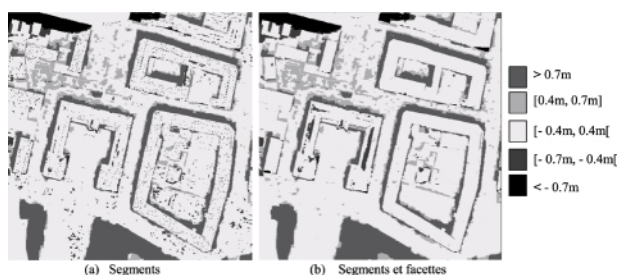


Figure 7. Images de différence d'altitudes $k = 0.1 - C_f = 0.5$.

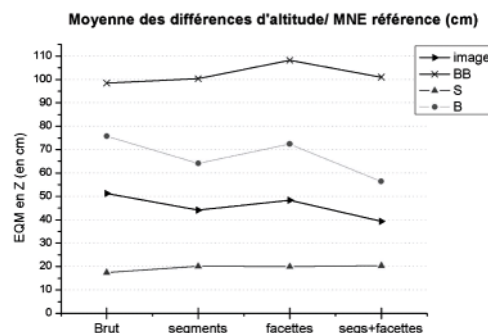


Figure 8. Erreur Quadratique Moyenne des différences d'altitude par classe et par primitives utilisées.

classes « BB » et « S ». Par contre, l'apport des facettes est plus difficile à prouver quantitativement : d'une part elles ne concernent que la classe de bâtiments qui ne présente pas beaucoup de points et d'autre part, des facettes mal reconstruites faussent les résultats d'évaluation.

4.2. Évaluation de facettes 2D

En disposant d'un ensemble de facettes 2D, l'évaluation est réalisée au deuxième niveau de contrôle. Une des applications a été d'évaluer un algorithme d'extraction de facettes à différentes résolutions : 50 cm et 70 cm, dans le cadre d'un projet avec le CNES² sur les images du futur satellite PLEIADES-HR.

La figure 9 montre les deux ensembles de facettes extraites à deux résolutions différentes : 50 et 70 cm et les mesures d'exhaustivité correspondantes.

Le taux de détection des facettes est supérieur à 50 cm, ce qui était prévisible. Par contre, l'évaluation permet de valider la fiabilité de la méthode puisque le taux de sur-détection des facettes reste faible pour les deux résolutions.

Cependant, on a pu constater que les mesures quantitatives (cf. distance de Hausdorff) sont difficilement interprétables et exploitables à l'échelle d'un bâtiment ou d'une ville.

4.3. Évaluation d'un modèle 3D

La première application permet de comparer le processus d'extraction de facettes 3D à deux résolutions différentes. La figure 10 illustre l'impact de la résolution sur les taux de détection et sur-détection ainsi que sur la précision de la reconstruction de facettes 3D [Chehata *et al.*, 2003]. Sur des petites surfaces, le critère de l'erreur angulaire reste le critère le plus facile à interpréter.

2. Centre National des Etudes Spatiales.

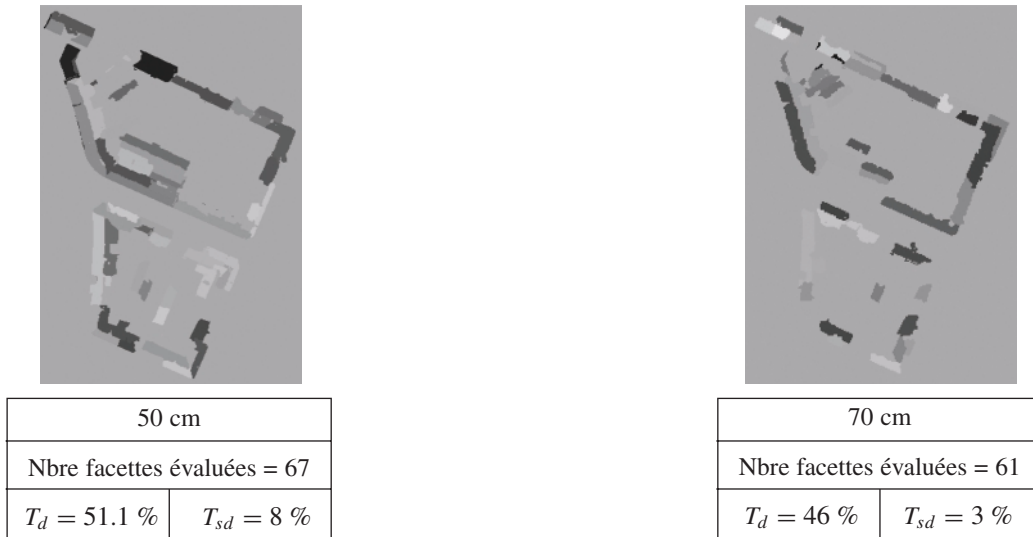


Figure 9. Évaluation 2D en fonction de la résolution.

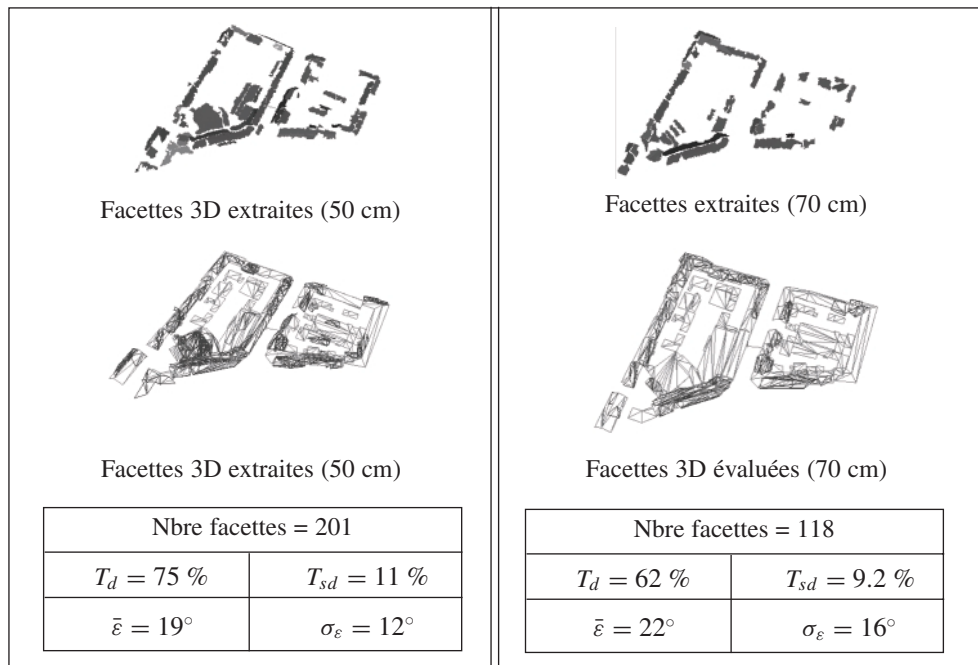


Figure 10. Évaluations 3D : Impact de la résolution.

Le taux de détection des facettes 3D à 50 cm est nettement supérieur à celui obtenu à 70 cm, ce qui a été également vérifié en 2D. Par contre, les taux de sur-détection sont comparables et restent faibles. Les mesures volumétriques relèvent un manque de précision altimétrique lors de la reconstruction, dû à un faible rapport B/H du couple stéréoscopique.

La deuxième application consiste à comparer trois modèles vectoriels générés en semi-automatique avec différentes chaînes de traitement. On dispose d'un modèle automatique 3D à partir d'images aériennes 20 cm (modèle de référence), d'un modèle 3D semi-automatique généré à partir de simulations d'images PLEIADES-HR (50 cm) et d'un modèle 3D (ISTAR[®]) généré en semi-automatique à partir d'images à 20 cm. La figure 11 montre l'interface de statistiques de la comparaison des deux derniers modèles par rapport à la référence.

Tout d'abord, on constate que les taux de détection sont de l'ordre de 50 %. Ce taux est faible à cause des différences de niveaux de généralisation entre les modèles. Ce qui confirme la problématique de l'évaluation vectorielle (section 3.2.5).

Les critères de distance sont exprimés en mètres. La distance volumétrique permet de mettre en évidence en moyenne la distance qui sépare deux modèles vectoriels. À la même résolution de 20 cm (Modèles ISTAR et caméra numérique), $D_{vol} = 0,54m \pm 0,59$. Entre des modèles générés à 20 et 50 cm, elle passe à $D_{vol} = 1,14m \pm 2,4$.

Par contre, la mesure de la puissance volumétrique n'est pas facilement interprétable à l'échelle d'un bâtiment. Elle sera essentiellement utilisée à l'échelle d'une facette.

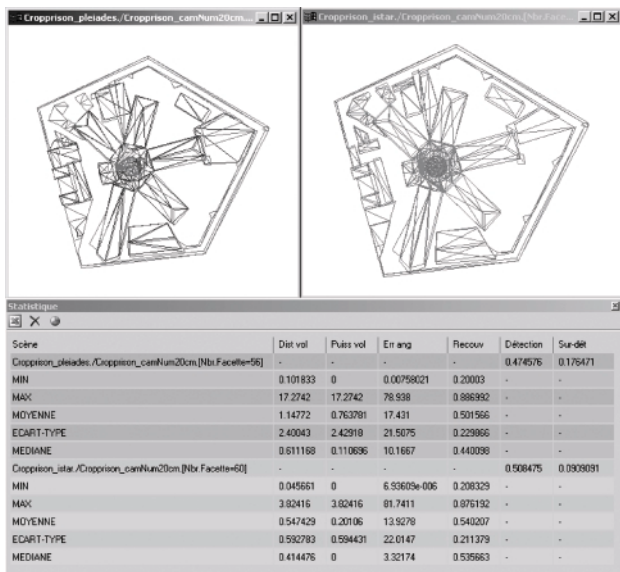


Figure 11. Interface de statistiques vectorielles 3D.

5. Pertinence de l'évaluation

Afin de juger de la pertinence de l'évaluation de la plateforme, des simulations ont été réalisées pour les évaluations ponctuelles qui correspondent aux évaluations les plus courantes. Les données ont été simulées, à partir du MNE TRAPU® à 50 cm de résolution, en dégradant les altitudes par un bruit Gaussien et en simulant un décalage planimétrique entre deux MNE raster. Les mesures quantitatives sont effectuées sur les différences d'altitudes entre le MNE de référence et le MNE simulé.

Sur les premières simulations, les altitudes des pixels sont dégradées par un bruit Gaussien de moyenne 4 m et d'écart-type σ variable. La figure 12 montre les mesures de différences. Pour des écart-types variant de 0,5 m à 7 m, on retrouve la moyenne des différences d'altitude autour de 4 m, l'écart-type des différences d'altitude varie en fonction du σ du bruit Gaussien.

Sur les deuxièmes données, on simule une translation suivant l'axe des x et un bruitage Gaussien des altitudes : Une translation $T(4,0)$ de 4 pixels suivant x soit 2m de décalage et un bruit

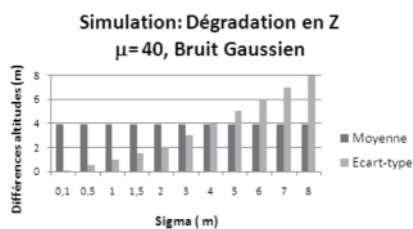
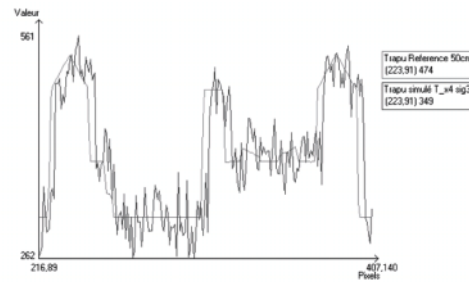


Figure 12. Pertinence de l'évaluation en cas de bruitage des altitudes.

Gaussien de $\sigma = 3$ m. La figure 13 montre un profil 1D du MNE de référence et du MNE simulé.



(a) Comparaison de profils

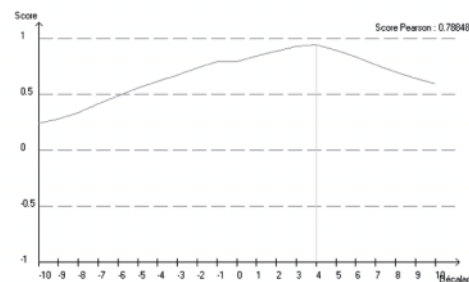


Figure 13. Évaluation qualitative : Comparaison de profils.

Malgré un fort bruitage en Z , le score de Pearson permet de mettre en évidence le décalage ($\Delta_x = 4$ pixels) suivant le profil 1D. La figure 14 montre l'évaluation des simulations avec différents décalages planimétriques et différents σ pour le bruit Gaussien. De façon quantitative, un décalage planimétrique est détecté en cas de forts écart-types sur les classes d'évaluation. On remarque sur le graphique des moyennes, une inversion de la moyenne des différences d'altitude à partir ($\Delta_x = 5$ pixels). Les moyennes négatives correspondent à une différence entre le sol du MNE simulé et les bâtiments du MNE référence.

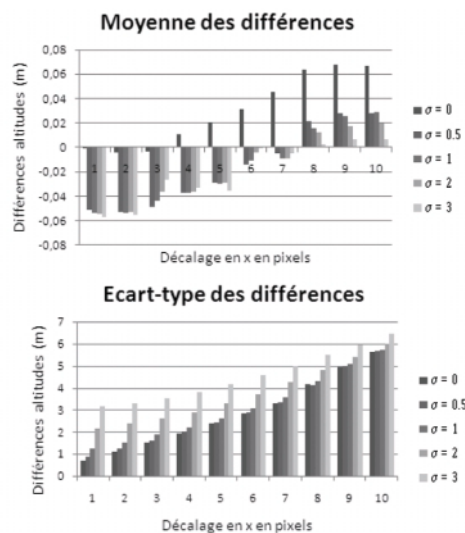


Figure 14. Pertinence de l'évaluation en cas de décalage planimétrique et de bruitage en Z .

L'inversion de la moyenne traduit le chevauchement de deux bâtiments différents entre le MNE simulé et le MNE de référence mais qui ont des altitudes similaires.

La simulation d'un décalage suivant x montre la pertinence de l'évaluation suivant un profil 1D. Dans le cas d'un décalage suivant x, y , l'opérateur humain peut intervenir pour une étape de recalage global des deux produits, en estimant le décalage suivant différentes orientations. Cette étape ne sera pas détaillée dans cette étude.

Les évaluations ponctuelles sont pertinentes dans le cas de faibles décalages planimétriques. Pour de forts décalages, les outils qualitatifs sont pertinents pour détecter ces décalages et permettre à un opérateur humain de procéder à une étape de recalage fin des produits.

6. Conclusion et Perspectives

La plate-forme développée propose trois niveaux d'évaluation, en fonction des produits cartographiques dont on dispose. Les travaux existants portent essentiellement sur les contrôles ponctuel et surfacique. Les métriques classiques ont été mises en œuvre dans la plate-forme. Le premier apport se situe au niveau des évaluations ponctuelles où l'on dispose d'un outil interactif et intuitif pour la création de masques de classes à partir d'un MNE de référence raster afin de décorréliser les erreurs planimétriques et altimétriques lors des évaluations. Ce premier niveau d'évaluation fournit aussi bien des évaluations qualitatives que quantitatives. Il permet également l'intervention d'un opérateur humain pour le choix des classes d'évaluation et pour un recalage fin des produits si nécessaire.

Le deuxième apport se situe au niveau des évaluations 3D où l'on propose deux métriques volumétriques qui prennent en compte la surface des facettes 3D. Des outils de focalisation et de gestion des modèles 3D ont été également développés permettant à l'utilisateur de régler le niveau de généralisation des modèles vectoriels.

La plate-forme proposée répond aux besoins requis par l'utilisateur. Elle dispose, tout d'abord, d'une interface intuitive permettant d'intégrer l'utilisateur dans la boucle de traitement. Ensuite, les trois niveaux de contrôle permettent de traiter aussi bien des images (2D), des MNE ($2D^{1/2}$) que des modèles 3D. La plate-forme est générique puisque les produits cartographiques peuvent provenir de différentes sources : données altimétriques optiques à très grande résolution ou bien obtenues par laser ou radar aéroportés.

Les applications présentées dans cette étude regroupent plusieurs cas d'évaluation opérationnelle : évaluation extrinsèque par rapport à une vérité-terrain, évaluation de produits issus de processus de calcul différents ou bien des évaluations intrinsèques, en comparant des produits obtenus avec des paramètres différents.

Suite aux différents tests et évaluations, on constate que les évaluations quantitatives et qualitatives au niveau raster sont pertinentes en cas de faible décalage planimétrique. La plateforme est totalement opérationnelle à ce niveau. Concernant les évaluations vectorielles, plusieurs outils qualitatifs sont développés et permettent à un expert de juger de la qualité des produits. Les évaluations quantitatives sont difficiles à interpréter à l'échelle d'un bâtiment ou d'une ville. On privilégiera plutôt les mesures d'exhaustivité (2D/3D). Les mesures de précision en vectoriel sont plus adaptées à un contrôle local des facettes.

La plate-forme d'évaluation constitue un premier prototype opérationnel et évolutif. L'objectif sera de l'enrichir avec de nouveaux indicateurs de qualité. À court terme, on se focalise sur l'évaluation ponctuelle. Afin de mesurer l'erreur planimétrique entre deux MNE, on envisage de développer des méthodes globales automatiques de recalage de MNE raster. Dans un deuxième temps, il faudra appliquer les contrôles linéaires et surfaciques au niveau du MNE raster. On peut envisager, par exemple, d'extraire des lignes de rupture altimétrique du MNE et de les comparer aux segments extraits dans une image aérienne. On s'intéressera par la suite aux contrôles surfaciques et volumiques, qui devront être enrichis par un contrôle topologique et structurel pour améliorer la pertinence de l'évaluation vectorielle et prévoir des métriques 3D plus adaptées à l'échelle d'une ville.

Références

- [Abbas, 1994] Y. ABBAS. *Base de données vectorielles et erreur cartographique. Problèmes posés par le contrôle ponctuel. Une méthode alternative fondée sur la distance de Hausdorff: le contrôle linéaire.* Thèse de Doctorat, Université Denis-Diderot, Paris 7, 1994.
- [Acharya et al., 2000] B. ACHARYA, J. FAGERMAN et C. WRIGHT. Accuracy assessment of DTM data : a cost effective approach for a large scale digital mapping project. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXXIII ISPRS*, 33(B2):105-111, 2000. Amsterdam, Netherlands.
- [Baddeley, 1992] A.-J. BADDELEY. An error metric for binary images. *Robust Computer Vision*, pages 59-78, 1992.
- [Baillard, 1997] C. BAILLARD. *Analyse d'images aériennes stéréoscopiques pour la restitution 3D des milieux urbains.* Thèse de Doctorat, ENST, 1997.
- [Chehata et al., 2003] N. CHEHATA, F. JUNG, M. PIERROT-DESEILLIGNY et G. STAMON. A region-based matching approach for 3d-roof reconstruction from high resolution satellite stereo pairs. In *APRS: DICTA'03*, volume II, pages 889-898, Décembre 2003. Sydney, Australia.
- [Chehata, 2005] N. CHEHATA. *Modélisation 3D de scènes urbaines à partir d'images satellitaires à très haute résolution.* Thèse de Doctorat, Université René Descartes, Paris 5, 2005.
- [Flamanc et al., 2003] D. FLAMANC, G. MAILLET et H. JIBRINI. 3-D city models: an operational approach using aerial images and cadastral maps. In *PIA: Photogrammetric Image Analysis*, volume XXXIV(3/W8), pages 53-58, Munich, Germany, Septembre 2003.
- [Fournier et Cord, 2000] J. FOURNIER et M. CORD. Évaluation et optimisation d'une chaîne de stéréorestitution par corrélation adaptative. In *RFIA*, Paris, 2000.
- [Gong et al., 2000] J. GONG, Z. LI et Y. ZHOU. Effects of various factors on the accuracy of DEMs : an intensive experimental investigation.

- Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(9):1113-1117, Septembre 2000.
- [Gooch et Chandler, 2000] M. GOOCH et J. CHANDLER. A novel error detection technique for automatically generated digital elevation models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXIII ISPRS, 33:302-309, 2000. Amsterdam, Netherlands.
- [Jibrini, 2002] H. JIBRINI. *Reconstruction automatique de bâtiments en modèles polyédriques 3-D à partir de données cadastrales vectorisées 2-D et un couple d'images aériennes à haute résolution*. Thèse de Doctorat, ENST, laboratoire MATIS, 2002. IGN-SR-02-005-C-THE-HJ.
- [Kasser et Egels, 2001] M. KASSER et Y. EGELS. *Photogrammétrie numérique (Collection ENSG-IGN)*. Lavoisier, hermes edition, Octobre 2001.
- [Kleusberg et Klaedtke, 1999] A. KLEUSBERG et H-G. KLAEDTKE. Accuracy assessment of a digital height model derived from airborne synthetic aperture radar measurements. In *Photogrammetric week*, 1999.
- [Matikainen et al., 2004] L. MATIKAINEN, J. HYYPPÄ et H. KAARTINEN. Automatic detection of changes from laser scanner and aerial image data for updating building maps. In *In XXth ISPRS Congress, Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, volume XXXV B2, pages 434-439, Istanbul, Turkey, Juillet 2004.
- [McGlone et Shufelt, 1994] J.-C. MCGLONE et J.-A. SHUFELT. Projective and Objective Space Geometry for Monocular Building Extraction. In *13th Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 54-61, Juin 1994. Seattle, USA.
- [McKeown et al., 2000] D. MCKEOWN, T. BULWINDLE, S. COCHRAN, W. HARVEY, J. MCGLONE et J. SHUFELT. Performance evaluation for automatic feature extraction. In *In XXth ISPRS Congress, Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, volume XXXIII B2, pages 379-394, Amsterdam, The Netherlands, Juillet 2000.
- [Ragia et Förstner, 1999] L. RAGIA et W. FÖRSTNER. Automatically Assessing the Geometric and Structural Quality of Building Ground Plans. *Revue Française de Photogrammétrie et Télédétection*, 153:22-31, 1999.
- [Scharstein et al., 2002] D. SCHARSTEIN, R. SZELISKI et R. ZABIH. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. *International Journal of Computer Vision*, 47(1):7-42, 2002.
- [Schiewe, 2000] J. SCHIEWE. Combining geometrical and semantical image information for the improvement of digital elevation model. In *EARS&L Symposium*, 2000.
- [Taillandier, 2004] F. TAILLANDIER. *Reconstruction de bâti en milieu urbain: une approche multi-vues*. Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique, Octobre 2004.
- [Vinet, 1991] L. VINET. *Segmentation et mise en correspondance de régions de paires d'images stéréoscopiques*. Thèse de Doctorat, Université de Dauphine, Paris 9, 1991.



N. Chehata

Diplômée de l'Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg en 2001, elle a obtenu le DEA PIC, Spécialité traitement d'images à l'université Strasbourg I, en 2001. Elle a réalisé sa thèse à l'IGN au laboratoire MATIS en collaboration avec le CNES et l'université de Paris 5. Elle a soutenu sa thèse en Juin 2005 sur la reconstruction de surfaces 3D à partir d'images satellitaires THR. Depuis Septembre 2006, elle est maître de conférences en Informatique à l'institut EGID - Bordeaux 3. Ses domaines de compétence sont le traitement d'images, la télé-détection, la photogrammétrie et la reconstruction 3D.



G. Stamon

Professeur « Emérite » depuis septembre 2003 à l'université Paris 5. Professeur « Classe exceptionnelle » depuis 1995. Il est docteur d'Etat dans le domaine de la Reconnaissance des Formes Visuelles (Faculté des Sciences de Paris) ; thèse soutenue en 1974. Il est directeur scientifique d'une cinquantaine de thèses préparées et soutenues à l'Université Française. Il est auteur ou co-auteur d'environ 200 papiers scientifiques dans le domaine de la reconnaissance de formes, le traitement d'images et la vision par ordinateur. Il est le fondateur et le directeur de l'équipe de recherche « Systèmes Intelligents de Perception » SIP - CRIP5, Université René Descartes - Paris 5. Il collabore avec différentes universités internationales en tant que professeur invité (Université de Montréal, Concordia (Montréal), Université M.E.T.U (Turquie) et Almaden Research Center - IBM (Californie - USA)). Il a été éditeur associé de la revue *Pattern Recognition Letters* de 1997 à 2005. Il a été président de la Commission Pédagogique Nationale d'Informatique - IUT de 1983 à 1991, Vice-président de la Commission Européenne d'Informatique CEPIS de 1992 à 1995 et président du Comité Scientifique - CST « IMAGE » de l'Institut Géographique National (IGN - France) de 1993 à 2003. Il a également été conseiller scientifique de IBM - France de 1981 à 1986 et conseiller scientifique de l'INRIA - France de 1991 à 1999.