

Evaluation a priori de la qualité d'un MNS

Olivier de Joinville ^{* +}, Grégoire Maillet ^{*}, Henri Maître ⁺, Michel Roux ⁺

^{*} Institut Géographique National, Laboratoire MATIS, 2 avenue Pasteur, 94160 SAINT MANDE.

⁺ Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, Département TSI, 46 rue Barrault, 75013 PARIS.

E-mail des auteurs : olivier.de-joinville@ign.fr ; gregoire.maillet@ign.fr ; maitre@tsi.enst.fr ; mroux@tsi.enst.fr.

Résumé

Les MNS (Modèles Numériques de Surfaces) sont de plus en plus utilisés pour de nombreuses applications en milieu urbain. Les utilisateurs doivent par conséquent connaître leur précision et leur exactitude en fonction de leurs besoins.

Dans cet article, nous allons décrire une méthode d'évaluation *a priori* des MNS calculés par corrélation sans les comparer avec une référence, mais simplement en estimant leur confiance vis à vis des paramètres utilisés dans les algorithmes. Le but est de détecter et de localiser les pixels dont la fiabilité altimétrique n'est pas certaine.

Trois critères ont été retenus pour évaluer la qualité d'un appariement par corrélation : la valeur du coefficient de corrélation, l'ambiguïté et l'imprécision. De nombreux tests ont prouvé que l'impact du critère d'ambiguïté était le plus discriminant dans l'évaluation de la qualité des MNS.

Une combinaison de ces trois critères en fonction de leur dispersion permet de créer les cartes de confiance dont la valeur de chaque pixel représente une erreur d'appariement possible.

A l'issue de nombreux essais, nous avons constaté, comme prévu, que les pixels dont la fiabilité est la plus faible se situent majoritairement dans des zones d'occultation, des zones non texturées ou fortement bruitées ou des zones d'ombre et de végétation.

Mots clés : Cartes de confiance, contrôle qualité, corrélation, exactitude, modèles numériques de surface, précision.

1 Introduction, contexte

Certains travaux (Cord, 1998; Förstner, 1984 et Paparoditis, 1998) ont déjà traité du problème de la qualité géométrique d'un MNS en fonction d'une référence 3D, mais les besoins des utilisateurs sont si disparates dans leurs applications qu'il n'existe pas vraiment de spécifications qualitatives appliquées à la cartographie urbaine.

Pour évaluer un MNS calculé par corrélation, il est intéressant d'adopter une approche *a priori* (sans référence) et *a posteriori* (avec référence).

La deuxième approche consiste à comparer le MNS calculé avec une référence construite ou existant déjà. Nous ne la traiterons pas dans cet article, elle est expliquée dans (Joinville, 2000).

La première approche peut être divisée en 2 parties principales :

Avant la corrélation, il est déjà possible de repérer approximativement les zones sur lesquelles il risque d'y avoir des problèmes. Il existe en effet des paramètres qui peuvent influencer *a priori* sur la qualité des appariements. Ils dépendent essentiellement du paysage reconstruit (complexité et densité du bâti), de la qualité intrinsèque du corrélateur, de la technique d'acquisition de l'image (caméra numérique ou image scannée) ainsi que des

conditions de prise de vues. Il est intéressant également dans cette phase de pouvoir quantifier et localiser les parties cachées sur un couple stéréoscopique (Joinville, 2000).

Juste après la corrélation, une phase d'auto-évaluation peut s'effectuer en utilisant des indicateurs de traçabilité de la technique de corrélation employée.

C'est cette dernière partie qui sera développée dans cet article. Nous allons définir trois critères d'estimation de la qualité, dont la combinaison nous permettra de construire des cartes de fiabilité.

2 Définition des critères d'évaluation

Trois critères d'évaluation de la qualité d'une carte de disparité ou d'un MNS calculé par corrélation automatique (Faugeras, 1993 ; Fua, 1993) ont été adoptés pour les corrélateurs utilisant des courbes de corrélation le long d'un intervalle de disparité (corrélation classique à partir de l'espace image) ou d'altitude (multi-corrélation à partir de l'espace objet, Papanoditis, 2001) :

- La valeur du coefficient de corrélation : quels sont les pixels dont la valeur du coefficient de corrélation se situe en dessous d'un certain seuil déterminé de manière empirique en fonction de la taille de la fenêtre ?
- La hauteur des pics secondaires par rapport à celle du pic principal : quel est le nombre de pics dont la hauteur est proche de celle du pic principal et quel est l'écart en disparité (ou en altitude) entre ces pics ?
- La forme du pic principal : est-il aplati ou pointu ?

Les appariements bi-directionnels (corrélation aller et retour sur plusieurs couples d'images) ont été également testés. Les pixels qui ne sont pas revenus à leur point de départ sont en majorité ambigus (donc non fiables).

Nous n'avons pas testé s'il existait des pixels "jugés non fiables" qui étaient cependant revenus à leur point de départ, mais il est fort probable que cette configuration puisse se produire ce qui limiterait l'exhaustivité de détection des pixels non fiables de la corrélation aller et retour.

2.1 La valeur du coefficient de corrélation

Ce critère est bien connu et a déjà été utilisé de nombreuses fois dans des cartes de coefficient de corrélation. Il est cependant insuffisant car il n'apporte qu'une information sur le rapport signal à bruit de la corrélation sans assurer systématiquement l'exactitude des appariements. Il doit donc être complété par les deux autres critères précédemment mentionnés.

2.2 L'ambiguïté

Si au moins les deux premiers pics de la courbe de corrélation ont des valeurs proches, on considère qu'il y a une ambiguïté dans le choix final et donc que l'appariement ne peut pas être vraiment fiable.

Afin de quantifier les incertitudes liées à la présence de plusieurs pics très rapprochés, une carte « d'ambiguïtés » va être construite. Pour cela on recherche les pics secondaires dont la hauteur est très proche de la valeur du pic principal (usuellement entre 0.85 et 0.95 fois sa valeur) et on mesure la distance maximale (écart en disparités) parmi tous ces pics (pic principal et pics secondaires, cf. Figure 1).

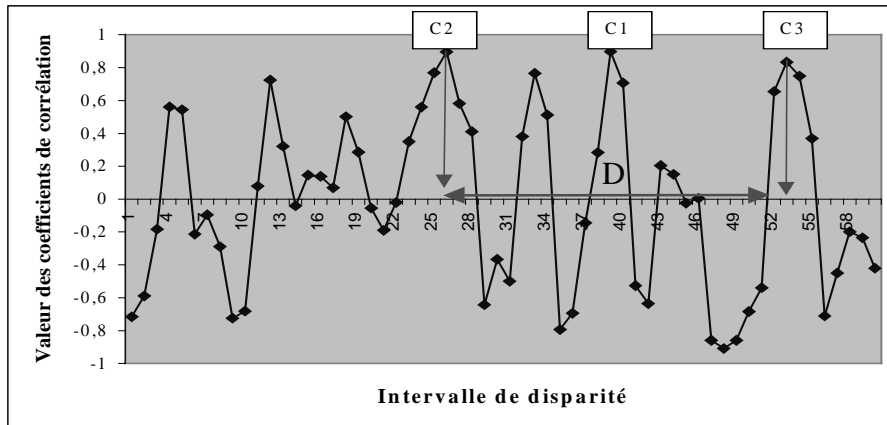


Figure 1 : Mesure des incertitudes dans les cartes d'ambiguïtés

Ici la courbe présente deux pics secondaires (C_2 et C_3) de valeur au moins égale à 0.9 fois le pic principal et l'ambiguïté est mesurée par l'écart en disparité D qui est compris entre les deux pics. Si C_1 avait été à la place de C_3 , on aurait pris la distance séparant C_1 et C_2 .

2.3 L'imprécision

Si le pic principal est globalement très arrondi, cela ne signifie pas forcément que l'appariement soit faux, en revanche la disparité entre les deux pixels homologues sera imprécise en raison des difficultés à déterminer la position exacte du maximum.

La Figure 2 nous montre comment la base d'un pic de corrélation est calculée. On avance pixel par pixel à gauche du pic jusqu'à ce que la différence entre la valeur du coefficient de corrélation du pic et celle du point examiné dépasse un certain seuil (fixé ici à 0.25). On effectue la même opération à droite et la base représente la valeur absolue de l'écart de disparité entre les deux pixels ayant satisfait à la condition d'arrêt.

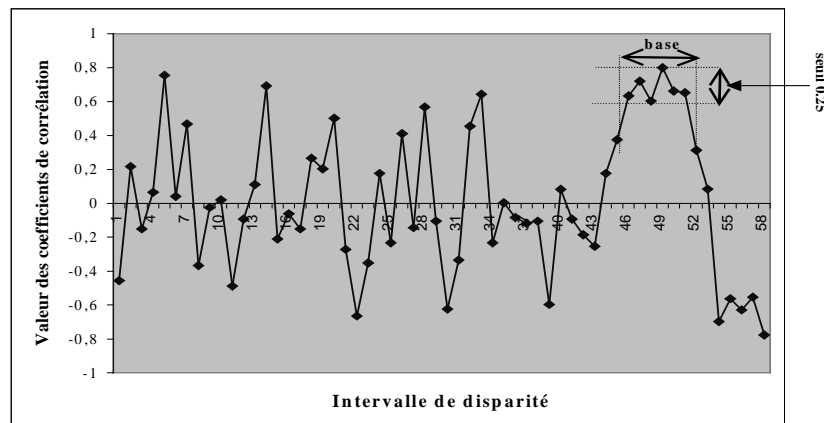


Figure 2 : Mesure de la base dans les cartes d'imprécision

La base est un indicateur qui nous permet de quantifier la précision de la corrélation sur notre point. Contrairement à la notion d'ambiguïté qui a été définie précédemment où le choix d'une hypothèse d'appariement est difficile et peut conduire à un résultat totalement faux, ici l'appariement sera approximatif et c'est cette incertitude qui nous fournit un indicateur de précision.

3 Création de cartes de fiabilité

Nous allons maintenant créer des cartes de fiabilité par combinaison linéaire de ces trois critères.

Dans un premier temps, nous allons examiner le lien entre la valeur du coefficient de corrélation et les deux autres critères pour confirmer la nécessité d'utiliser simultanément les trois critères dans les cartes de confiance. Ensuite nous étudierons l'importance de chacun des critères pour pouvoir les pondérer dans les cartes de synthèse. Ces cartes de fiabilité globales seront tout d'abord étudiées en fonction de la taille de la fenêtre utilisée, puis contrôlées sur des surfaces.

3.1 Lien entre la valeur du coefficient de corrélation et les deux autres critères

Le but est de savoir si les valeurs des coefficients de corrélation ont un impact sur l'ambiguïté ou l'imprécision. En d'autres termes, si sur un point la valeur du coefficient de corrélation est importante, les valeurs d'ambiguïté et d'imprécision sont-elles, comme on pourrait le supposer, plutôt faibles ?

Pour cela on trace une courbe décrivant les variations des valeurs d'ambiguïté moyennes¹ (resp. d'imprécision) en fonction des valeurs de coefficient de corrélation triées dans l'ordre croissant.

Nous avons travaillé sur un couple d'images (cf. Figure 3) avec une fenêtre de corrélation de taille 7.

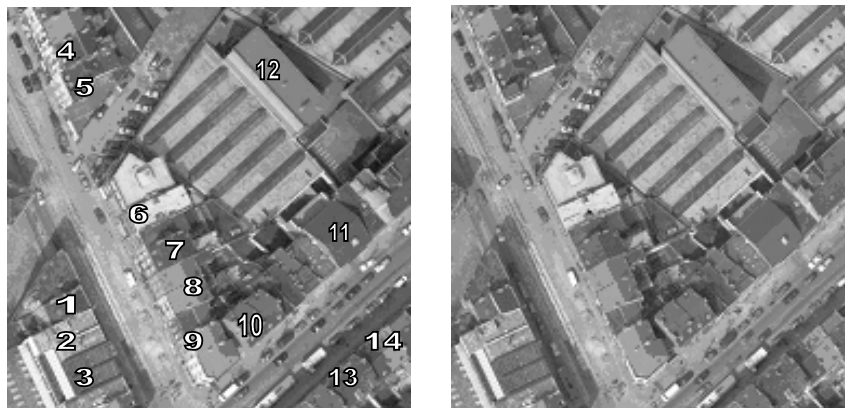


Figure 3 : Couple stéréoscopique d'images scannées sur la ville de Bruxelles (1024x1024, 8cm de résolution au sol) avec les 12 bâtiments sélectionnés.

Nous obtenons les courbes suivantes :

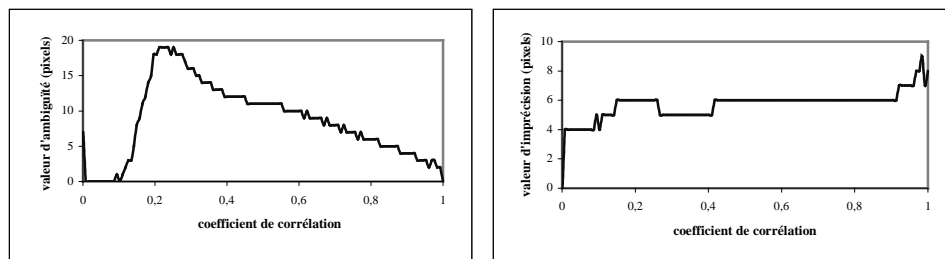


Figure 4 : Courbes reliant les valeurs de coefficient de corrélation aux valeurs d'ambiguïté et d'imprécision.

¹ Les valeurs des coefficients de corrélation étant discrétisées sur 256 valeurs, il est fréquent de rencontrer des valeurs semblables sur de nombreux points de l'image. Nous associons alors à ces pixels la moyenne des valeurs d'ambiguïté (resp. d'imprécision) correspondantes.

Concernant les valeurs d'ambiguïté, on constate un pic très net vers 0.25, puis la courbe décroît logiquement de manière régulière avec l'augmentation des valeurs du coefficient de corrélation. En revanche on constate que les valeurs de coefficient de corrélation les plus faibles (inférieures à 0.2) sont en moyenne très peu ambiguës.

Concernant les valeurs d'imprécision, on remarque que ce sont plutôt les hautes valeurs de coefficients de corrélation qui sont les plus imprécises. Cela peut se comprendre car la translation progressive d'une assez grande fenêtre le long d'un contraste n'entraîne pas de brusques changements de valeur de coefficient de corrélation d'un pixel à l'autre.

Cette petite étude confirme que l'on ne peut pas s'appuyer uniquement sur les valeurs des coefficients de corrélation pour avoir une idée de la qualité des appariements. En effet, les coefficients de corrélation élevés ne sont pas à l'abri d'ambiguïtés et surtout d'imprécisions assez fortes.

3.2 Importance de chacun des critères

Le but de ce paragraphe est de connaître l'importance de chacun des critères pour pouvoir les pondérer de manière globale dans les cartes de fiabilité.

Pour chaque bâtiment (cf. Figure 3) on va mesurer une fonction de similarité² (largeur normalisée du nuage de points obtenu) sur l'ensemble des pixels entre la valeur d'écart avec la référence³ et la valeur du critère de fiabilité défini (cf. Figure 5).

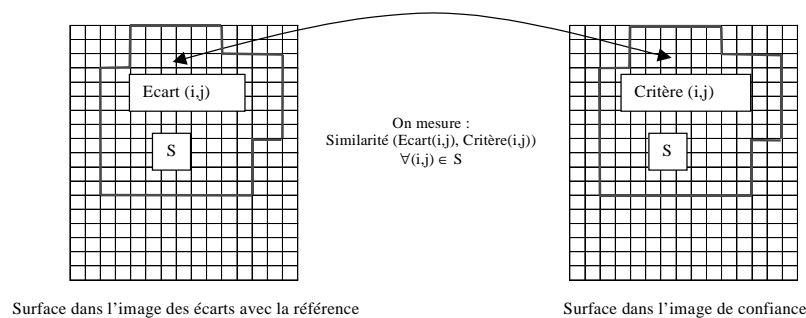


Figure 5 : Mesure de la fonction de similarité entre les images des écarts et de chacun des trois critères d'évaluation.

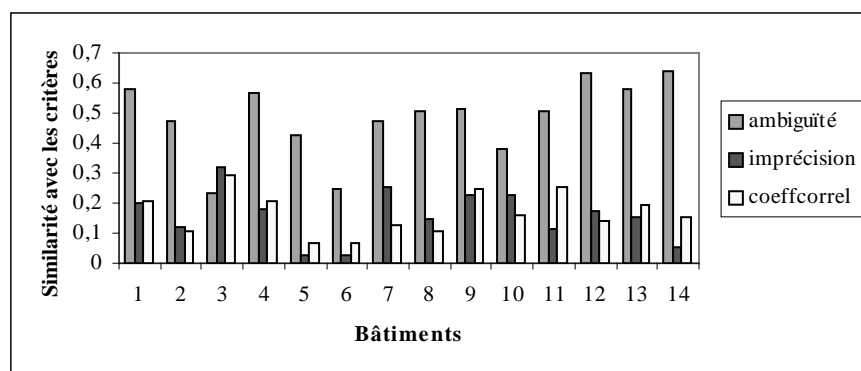


Figure 6 : Histogramme définissant les similarités entre les écarts et chaque critère.

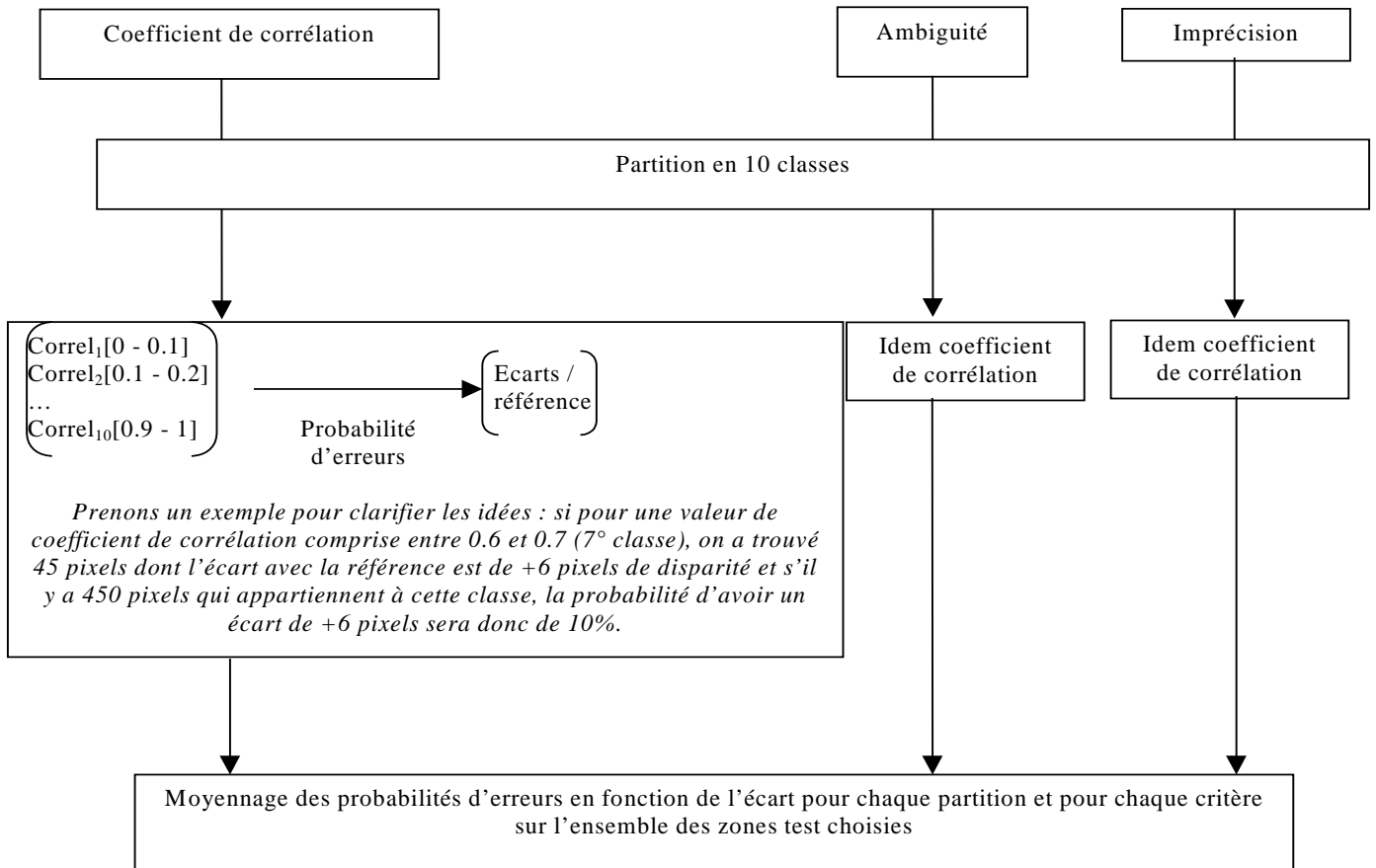
² La valeur de similarité doit être proche de 1 en valeur absolue pour qu'il y ait similarité parfaite.

³ Cette référence est soit une vérité terrain, soit une référence interpolée (Joinville, 2000)

Cette technique de mesure de l'importance des différents critères sur la qualité des corrélations nous confirme bien l'impact prédominant de l'ambiguïté sur les deux autres critères (excepté pour le bâtiment 3).

Il existe également une autre méthode qui permet de connaître l'influence des 3 critères sur les erreurs possibles avec la référence. Il s'agit de mesurer la probabilité d'avoir telle ou telle erreur en fonction des critères retenus et des zones test étudiées.

Le diagramme ci-dessous résume la méthode :



3.3 Carte de synthèse

3.3.1 Synthèse pondérée par l'inverse de la dispersion des valeurs pour chaque bâtiment

Suite à l'étude du paragraphe précédent nous allons construire une carte de fiabilité par combinaison linéaire pondérée des cartes relatives à chaque critère.

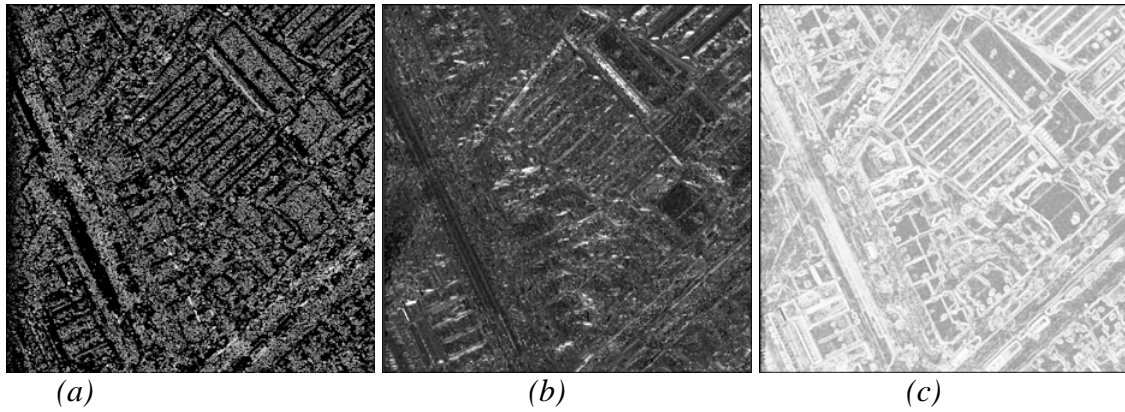


Figure 7 : Cartes des différents critères.

En (a) se trouve la carte d'ambiguïté (plus les pixels sont clairs, plus ils sont ambigus), en (b) la carte d'imprécision (plus les pixels sont clairs, moins ils sont précis) et en (c) la carte des coefficients de corrélation (plus les pixels sont clairs, plus leur coefficient de corrélation est élevé).

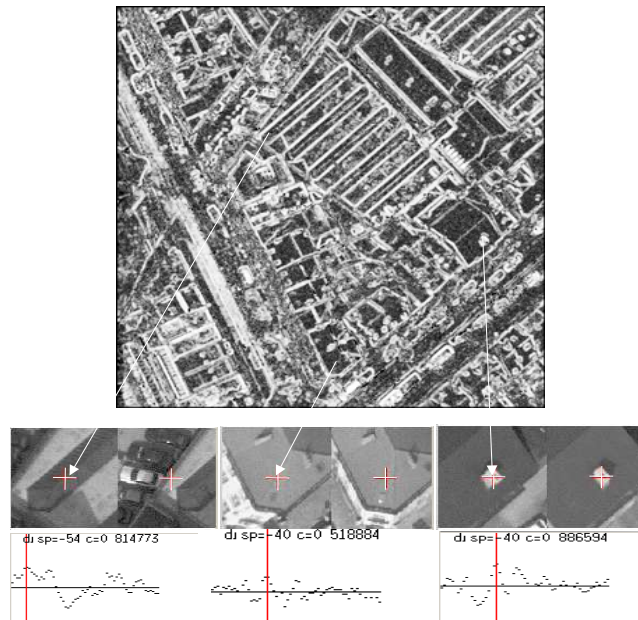


Figure 8 : Carte de fiabilité combinant les 3 critères sur la zone de Bruxelles.

Plus les pixels sont clairs, plus ils sont fiables

Cette carte a été obtenue en appliquant les poids suivants sur chacune des images⁴ :

- carte d'ambiguïté : 60%,
- carte d'imprécision : 15%,
- carte des coefficients de corrélation : 25%.

Nous avons effectué un contrôle manuel sur trois points : un point pas fiable du tout (à gauche), un peu fiable (au milieu) et un fiable (à droite). On vérifie que la carte de fiabilité a correctement jugé les points : la valeur de fiabilité du point pas fiable du tout est de 0.16⁵, celle du point peu fiable 0.48 et celle du point fiable 0.98. Le coefficient de corrélation du

⁴ Les valeurs de chaque image n'étant pas uniforme au niveau des unités (ambiguïté et imprécision en mètres et coefficient de corrélation sans dimension), la combinaison des images s'effectue après les avoir normalisé par rapport aux valeurs mini et maxi de chacune de leur distribution.

⁵ Les valeurs de fiabilité sont codées entre 0 et 1.

point peu fiable est élevé mais sa disparité associée est fortement biaisée par l'ambiguïté de sa courbe, l'erreur est de 30 pixels de disparité soit environ 9,5m ce qui est considérable sur notre zone d'étude. L'erreur du point peu fiable est de 10 pixels de disparité soit environ 3,20m. Inversement le pic de la courbe du point fiable est bien marqué et l'appariement est très précis.

3.3.2 Synthèse pondérée par l'inverse de la dispersion des valeurs pour chaque bâtiment

Chaque pixel de chaque zone test a un triplet associé de trois valeurs (coeff-correl, ambiguïté, imprécision) et à chacune de ses valeurs correspond une classe (les critères sont partitionnés en 10 classes) possédant un histogramme d'écart avec la référence qui possède une moyenne et un écart type. Si l'on adopte des hypothèses gaussiennes, la moyenne de l'histogramme représente la valeur d'écart la plus fréquente et l'écart type la dispersion de ces valeurs. Plus les valeurs d'écart sont dispersées (écart type important), moins la valeur de la moyenne est fiable et l'inverse pour des valeurs d'écart resserrées.

La valeur finale de fiabilité sera une combinaison linéaire des moyennes normalisée et pondérée par l'inverse de la variance des écarts. Cette valeur représentera donc un écart probable avec la référence tenant compte de la qualité des indicateurs mis en jeu.

Prenons un exemple pour illustrer les valeurs de fiabilité globale. Le tableau ci-dessous représente les plages de valeurs des 10 classes de chaque critère.

Coefficient de corrélation [0 → 1]			Ambiguïté [0 → 1m]			Imprécision [0 → 20cm]		
Classe	Moyenne	Variance	Classe (cm)	Moyenne	Variance	Classe (cm)	Moyenne	Variance
0 – 0,1			0 – 10			0 – 2		
0,1 – 0,2			10 – 20			2 – 4		
0,2 – 0,3			20 – 30			4 – 6	15 cm	8 cm
0,3 – 0,4			30 – 40			6 – 8		
0,4 – 0,5			40 – 50			8 – 10		
0,5 – 0,6	35 cm	21 cm	50 – 60			10 – 12		
0,6 – 0,7			60 – 70	59 cm	41 cm	12 – 14		
0,7 – 0,8			70 – 80			14 – 16		
0,8 – 0,9			80 – 90			16 – 18		
0,9 – 1			90 – 100			18 – 20		

Considérons un pixel dont les valeurs du triplet coefficient de corrélation, ambiguïté et imprécision sont : 0.54, 65cm, 5 cm. Chacune de ces trois valeurs correspond à une classe particulière en gras sur le tableau ($0.54 \in [0,5-0,6[$, $65\text{cm} \in [60\text{cm}-70\text{cm}[$ et $5\text{cm} \in [4\text{cm}-6\text{cm}[$).

La valeur définitive de fiabilité affectée à ce pixel sera de :

$$Fiab(i, j) = \frac{\frac{M_{0.5}}{\Gamma^2_{0.5}} + \frac{M_{60}}{\Gamma^2_{60}} + \frac{M_5}{\Gamma^2_5}}{\frac{1}{\Gamma^2_{0.5}} + \frac{1}{\Gamma^2_{60}} + \frac{1}{\Gamma^2_5}} = \frac{\frac{35}{21} + \frac{59}{41} + \frac{15}{8}}{\frac{1}{21} + \frac{1}{41} + \frac{1}{8}} = 25,3 \text{ cm}$$

3.4 Contrôle des cartes de confiance

Nous allons contrôler la fiabilité de ces cartes de confiance et ainsi avoir une idée de la pertinence des critères retenus pour mesurer la fiabilité des corrélations. Pour se faire, nous avons calculé la similarité entre les cartes d'erreurs (écarts avec la référence) et les valeurs de

fiabilité relevées sur les cartes de confiance (même méthode que celle décrite dans la Figure 5 en remplaçant critere(i,j) par fiabilité(i,j)) .

Si les cartes de confiance étaient parfaitement justes, on devrait obtenir une valeur moyenne de similarité de -1 pour chaque bâtiment, parce que, plus les bâtiments sont justes (faibles différences avec la référence), plus ils sont fiables (hautes valeurs de fiabilité).

Nous obtenons les résultats suivants sur les 14 bâtiments sélectionnés dans l'image de la Figure 3.

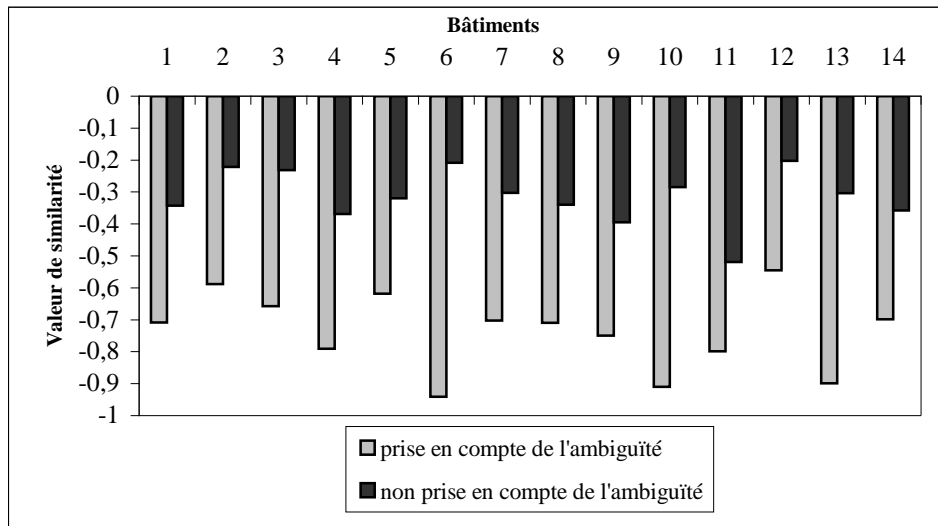


Figure 9 : Histogramme mesurant la confiance que l'on peut accorder aux cartes de fiabilité.

L'histogramme de la Figure 9 nous permet d'aboutir aux deux conclusions suivantes :

- Les cartes de confiance sont nettement plus fiables lorsque le critère d'ambiguïté est pris en compte.
- Les cartes de confiance sont robustes pour des bâtiments dont les écarts par rapport à la référence sont les plus importants (bâtiment 4, 11 et 14 dont la moyenne absolue des écarts par rapport à la référence est très importante, d'après des mesures effectuées par rapport à une référence construite). Cela signifie que les nombreuses erreurs de la corrélation ont bien été détectées par les cartes de confiance.

4 Conclusion, perspectives

Cette étude nous a permis de définir des critères d'évaluation de qualité d'un MNS calculé à partir de corrélations utilisant des courbes de corrélation. On constate que le critère d'ambiguïté est le plus significatif par rapport à la précision et à la valeur du coefficient de corrélation. L'ambiguïté peut conduire en effet à des aberrations énormes et elle est fréquente surtout pour les fenêtres de petite taille. Augmenter la taille des fenêtres pour réduire les ambiguïtés ne représente pas non plus une solution idéale car les grandes fenêtres délocalisent les bords de toit.

Les cartes de confiance obtenues ont été contrôlées de manière ponctuelle et surfacique. Leur fiabilité dépend fortement de la prise en compte du facteur d'ambiguïté.

Des cartes de confiance ont été également créées pour des corrélations n'utilisant pas de courbes de corrélation telle que la programmation dynamique (Baillard, 1997). Dans ce cas le critère d'ambiguïté est difficile à définir, car les points homologues sont appariés selon l'optimisation d'une fonction de coût qui assure l'unicité de la solution, la mise en évidence

d'une solution ambiguë et donc dégradée n'aurait par conséquent que peu de sens. Pour l'instant des critères tels que la valeur du pic de corrélation et la variance des valeurs de coefficient de corrélation entre les contours ont été retenus. Ce dernier critère représente la variance des valeurs de coefficient de corrélation entre un point de l'image de référence et un ensemble de points situés autour du point homologue et ne dépassant pas les lignes de contour.

Les cartes de confiance pourraient être utilisées dans une chaîne de production de MNS et l'utilisateur pourrait en fonction de ses besoins en précision sélectionner les zones qui l'intéressent de manière assez fiable et rapide sans disposer nécessairement d'une référence. Le choix de cette dernière est en effet particulièrement délicat car, soit les données qui la constituent ne sont pas en nombre suffisant, soit elle peut être entachée d'une erreur parfois excessive et insuffisamment maîtrisée (Polidori, 1995).

Des cartes de confiance vont également être appliquées à des MNS calculés à partir d'autres capteurs (par exemple des capteurs laser (Baltsavias, 1999)) et d'autres techniques algorithmiques (Fradkin, 1999; Roux, 1998).

5 Bibliographie

Baillard, C., 1997. Analyse d'images aériennes stéréoscopiques pour la restitution 3D des milieux urbains, détection et caractérisation du sursol. Thèse, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications de Paris.

Baltsavias, E., 1999. A comparison between photogrammetry and laser scanning. ISPRS, Vol.54, pp. 83-94.

Cord, M., 1988. Analyse d'images aériennes haute résolution : détection et modélisation du bâti en zone urbaine. Thèse, Université de Cergy-Pontoise.

De Joinville, O., Maître, H., Piquet Pellorce D., Roux, M., 2000. How to Design DEM Assessment Maps. PRRS 2000, n° 1 901725 12 X, Andorre.

Faugeras O. et al., 1993. Real Time Correlation-Based Stereo : Algorithm, Implementations and Applications, Rapport de Recherche INRIA 2013.

Förstner, W., 1984. Quality Assessment of Object Location and Point Transfer Using Digital Image Correlation Techniques. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Rio de Janeiro, pp.197-219.

Fradkin, M., Roux, M., Maître, H., 1999. Urban areas description using multiple aerial images. SFPT, Special issue on workshop 3D Geospatial data production : meeting application requirement. Vol.153, pp.36-53, Paris.

Fua, P. 1993. A parallel stereo algorithm that produces dense maps and preserves image features, Machine Vision and Applications, 6(1).

Paparoditis, N., 1998. Reconstruction tridimensionnelle de paysages urbains en imagerie stéréoscopique satellitale haute résolution. Thèse, Université de Nice Sophia-Antipolis.

Paparoditis, N., Maillet, G., 2001. Improving Aerial Image Matching Techniques In Urban Areas Using a New True Multi-Stereo Approach Guided From Object Space. 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology, Cairo, Egypt.

Polidori, L., 1995. Réflexions sur la qualité des Modèles Numériques de Terrain, SFPT, Vol.139, pp.10-19.

Roux, M., Leloglu, U., Maître, H., 1998. Dense urban DEM with three or more high-resolution aerial images. IRS, Symposium on GIS between vision and application, pp.347-352, Stuttgart.