



HAL
open science

**Évaluation de la marge d'erreur liée au
ré-échantillonnage des données Litto3D® et du RGE
Alti® de l'IGN**
Guillaume Thirard

► **To cite this version:**

Guillaume Thirard. Évaluation de la marge d'erreur liée au ré-échantillonnage des données Litto3D® et du RGE Alti® de l'IGN. 2019. hal-02421418

HAL Id: hal-02421418

<https://hal.science/hal-02421418>

Preprint submitted on 20 Dec 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



EVALUATION DE LA MARGE D'ERREUR LIÉE AU RÉ-ÉCHANTILLONNAGE DES DONNÉES LITTO3D® ET DU RGE ALTI® DE L'IGN (*DOCUMENT TECHNIQUE*)

Réalisation : Guillaume THIRARD (LETG-Caen/BRGM Orléans)

Dernière modification : 23/03/2018

I. DÉMARCHE DE L'ANALYSE

L'objectif de ce travail est de caractériser le meilleur rapport entre échelle de visualisation et résolution de MNT, afin de déterminer la résolution la plus adaptée à chacune des trois échelles de travail envisagées dans le cadre des travaux cartographiques du programme Ricochet.

Pour ce faire, il a été nécessaire de réaliser un comparatif à la fois quantitatif et qualitatif entre une donnée de base ponctuelle considérée fiable (point GPS issu du référentiel géodésique de l'IGN) et deux bases de données de l'IGN : le MNT RGE Alti® et le MNT Litto3D®.

II. LES DONNÉES EN ENTRÉE

1. Le RGE Alti®

Le RGE Alti® est composé de données hétérogènes et remplace la BD Alti®. Elle couvre le territoire national à des résolutions de 1 et 5 m. Le descriptif de contenu de la donnée précise que plusieurs techniques d'acquisition des données sont mises en œuvre par l'IGN pour sa réalisation [IGN, 2017] :

- La technologie Lidar est déployée pour les zones inondables et littorales, et sur les grands massifs forestiers ;
- La technologie Radar est utilisée sur les zones de montagne ;
- Les techniques de corrélation de photographies aériennes sont utilisées sur le reste du territoire (avec l'utilisation de recouvrement stéréoscopique plus important en zone urbaine) ;
- Enfin, les données BD Alti® (de résolution initiale 25m) sont intégrées dans le RGE Alti® quand de nouvelles acquisitions ne sont pas encore disponibles.

La précision de ces données est décrite comme étant la suivante :

Donnée	Résolution initiale	Précision planimétrique	Précision altimétrique
Litto3D®	1 m	0,4-0,5 m	0,2 à 0,5 m (contrôlée à 0,3 m)
Données radar	5 m	Non contrôlée	< 7 m (valeur extrême à très forte pente)
Corrélation photo aériennes	1 m	Non contrôlée	0,5 à 0,7 m
BD ALTI®	25m	Non contrôlée	2 à 8 m

Sur le secteur d'étude, seules les données Litto3D® et BD Alti® ont été harmonisées pour la création du RGE Alti®.

2. Précision de la donnée lidar Litto3D®

La résolution initiale de livraison de la donnée litto3D® est de 1m.

Concernant sa précision, la plaquette technique de la donnée Litto3D® explique que la précision altimétrique d'un levé LIDAR est principalement limitée par celle de la trajectographie. Elle est de l'ordre de 15 à 20 cm (1 sigma, soit précision donnée à 68%).

La précision planimétrique dépend quant à elle directement de la hauteur de vol : elle varie de 20 à 50 cm (1 sigma, soit précision donnée à 68%) pour des altitudes variant de 1000 à 3000m [IGN, 2015].

3. Données utilisées dans le cadre de l'analyse

Les données suivantes ont été utilisées pour l'analyse :

Donnée	Résolution	Année de livraison	Territoire couvert
RGE Alti®	5m	2015	Normandie
Litto3D®	1m	2012	Normandie

A défaut de disposer du RGE Alti® à une résolution de 1m, la donnée Litto3D® 1m a été intégrée à l'analyse afin de déduire l'erreur moyenne du RGE Alti® 1m sur la bande littorale. En effet, la donnée RGE Alti® s'appuie exclusivement sur la donnée Litto3D® pour les zones couvertes par la donnée Lidar, à savoir une bande littorale d'environ 2km ainsi que les zones basses potentiellement inondables en arrière littoral.

A partir de ces deux jeux de données, l'analyse a porté sur deux des trois territoires du projet Ricochet, qui ont été analysés conjointement :

- L'axe Houlgate-Honfleur (Calvados), en remontant jusqu'à Pont l'Evêque (\approx 10km à l'intérieur des terres)
- L'axe Quiberville-Penly (Seine-Maritime), en remontant jusqu'à Lindeboeuf (\approx 20km dans les terres)

III. LE RÉSEAU GÉODÉSIQUE DE L'IGN

Les données qui serviront de base à la comparaison sont issues du serveur de fiches géodésiques de l'IGN (<https://geodesie.ign.fr/fiches/index.php?module=e&action=visugeod>).

Une distinction qualitative est à faire concernant les données ponctuelles XYZ issues de cette base, entre :

- Les repères de nivellement, qui ont une résolution XY très faible avec des valeurs exprimées en kilomètres à seulement deux décimales (c.à.d. arrondies au décamètre) et des valeurs Z très précises, exprimées en mètres avec trois décimales (précision millimétrique).

Système d'altitude : NGF-IGN 1969	
76,094 m	
ALTIUDE NORMALE	
Système : RGF93 (ETRS89) - Projection : LAMBERT-93	
E (km) :	481.91
N (km) :	6915.59
Département : CALVADOS Numéro INSEE : 14754 Commune : VILLERS-SUR-MER	

Figure 1 - Exemple de point de nivellement « N.P.K3Q3 – 57 » à Villers-sur-Mer (coordonnées XY arrondies à 10m correspondant à X = 481 910 m ; Y = 6 915 590 m)

- Les repères du réseau géodésique de détail qui ont une résolution XYZ centimétrique avec une précision généralement de l'ordre de 10 cm en planimétrie et 50 cm en altimétrie.

Système : RGF93 (ETRS89) - Projection : LAMBERT-93 - Système altimétrique : NGF-IGN 1969					
Point	e (m)	n (m)	Précision plani	Altitude (m)	Précision alti
a	560442.89	6982147.70	< 10 cm	88.17	< 50 cm
b	560429.24	6982136.81	< 10 cm	88.90	< 50 cm
c	560411.06	6982167.82	< 10 cm	93.37	< 50 cm

Figure 2 - Exemple de site du réseau de détail (DIEPPE II)

- Les repères du réseau géodésique de base, qui affichent une résolution millimétrique en XYZ avec une précision planimétrique inférieure à 10cm et altimétrique inférieure à 10mm. Il s'agit du référentiel le plus fiable de l'IGN qui soit mis à disposition.

Système : RGF93 (ETRS89) - Projection : LAMBERT-93 - Système altimétrique : NGF-IGN 1969					
Point	e (m)	n (m)	Précision plani	Altitude (m)	Précision alti
a	491410.187	6925869.544	< 5 cm	43.206	< 5 mm
b	491548.249	6926286.146	< 1 cm	18.487	< 5 mm

Figure 3 - Exemple de site du réseau géodésique de base (VILLERVILLE I)

Les repères de nivellement ont pour caractéristique d'être rarement situés au niveau du sol, mais préférentiellement sur des murs, des monuments, etc... ce qui rend l'utilisation du Z compromise. D'autre part, au vu de la résolution décimétrique en XY, l'analyse comparative avec des rasters de résolution 1 m apparaîtrait peu pertinente.

Bien que les repères du réseau géodésique soient parfois également sur des bâtiments ou en haut de monuments (flèches d'églises, château d'eau, etc...), certaines bornes situées au sol apparaissent pertinentes et exploitables dans le cadre de la présente analyse.

Le choix a donc été fait de ne conserver que les repères du réseau géodésique de détail et de base situés au niveau du sol.



Figure 4 - Points du réseau géodésique de l'IGN sur le site du Calvados (geodesie.ign.fr)

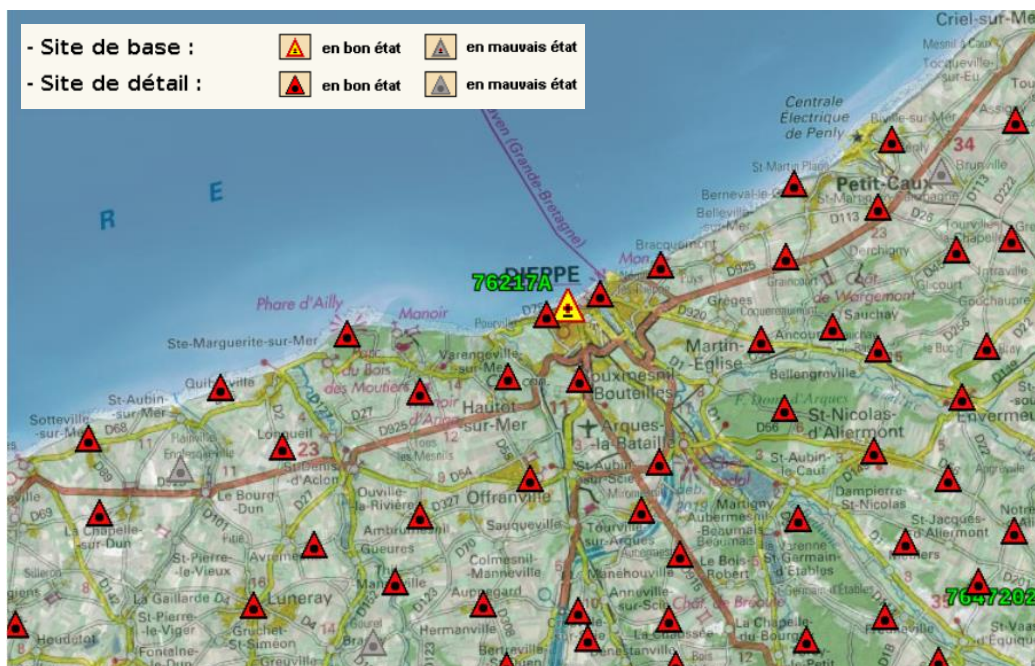


Figure 5 - Points du réseau géodésique de l'IGN sur le site de Seine-Maritime (geodesie.ign.fr)

IV. ÉTAPES PRELIMINAIRES

1. Préparation des données

La première étape a consisté à synthétiser les données XYZ des repères IGN dans un fichier Excel pour les deux sites analysés.

Dans un second temps, un fichier de points en format shape a été généré sous ArcGIS à partir de ces données d'entrée.

Une troisième étape a consisté à fusionner les dalles de MNT disponibles pour couvrir l'ensemble des points géodésiques IGN choisis.

La fusion a été réalisée via l'outil « Mosaïque vers nouveau raster » de l'extension Spatial Analyst. Un type de pixel « 32_BIT_FLOAT » a été retenu afin de préserver l'intégrité des données initiales (chiffres à deux décimales).

Puis il a s'agit de ré-échantillonner le MNT RGE Alti®. Seul le référentiel à un pas de 5 m étant disponible au moment de l'analyse, ce dernier a donc été ré-échantillonné à un pas 10m, puis de 20m.

Grâce aux MNT Litto3D®, une analyse comparative à 4 résolutions (1, 5, 10 et 20m) a pu être réalisée sur la bande littorale couverte par la donnée lidar.

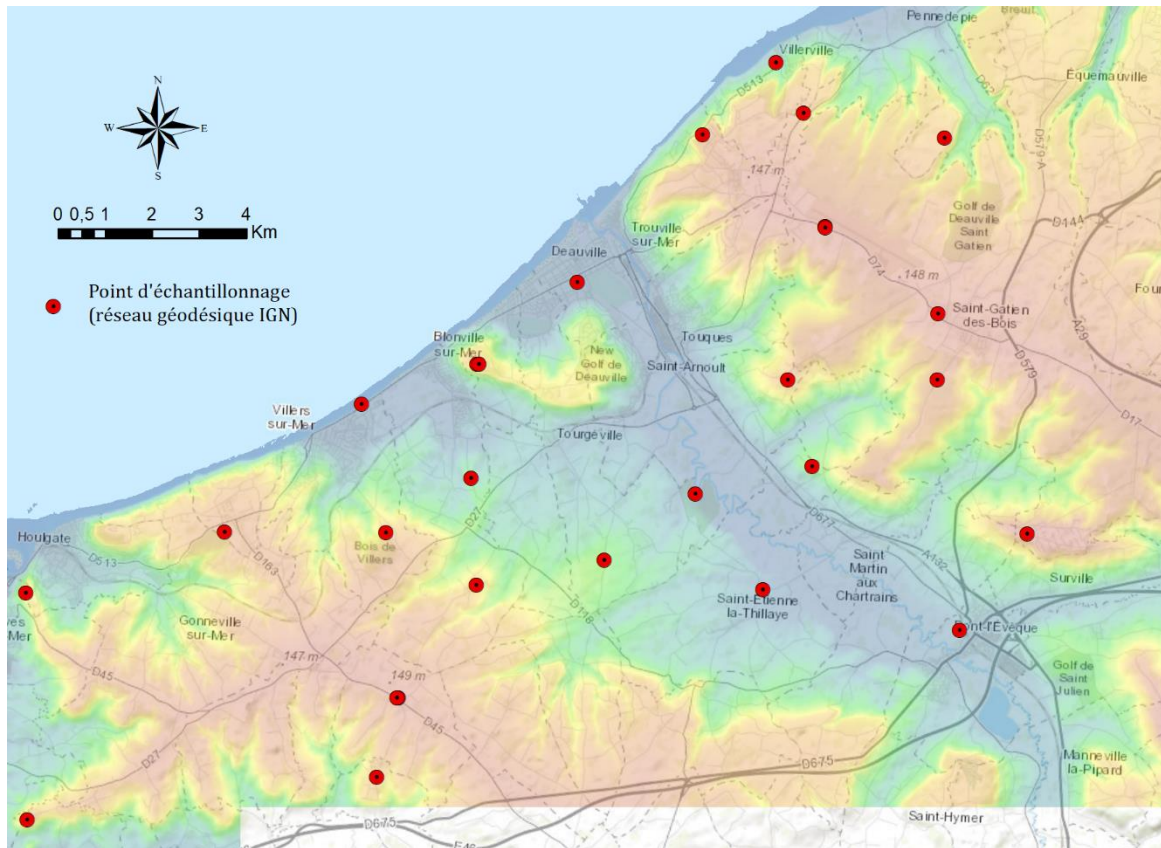


Figure 6 - Points IGN pris en compte pour l'analyse sur le site du Calvados

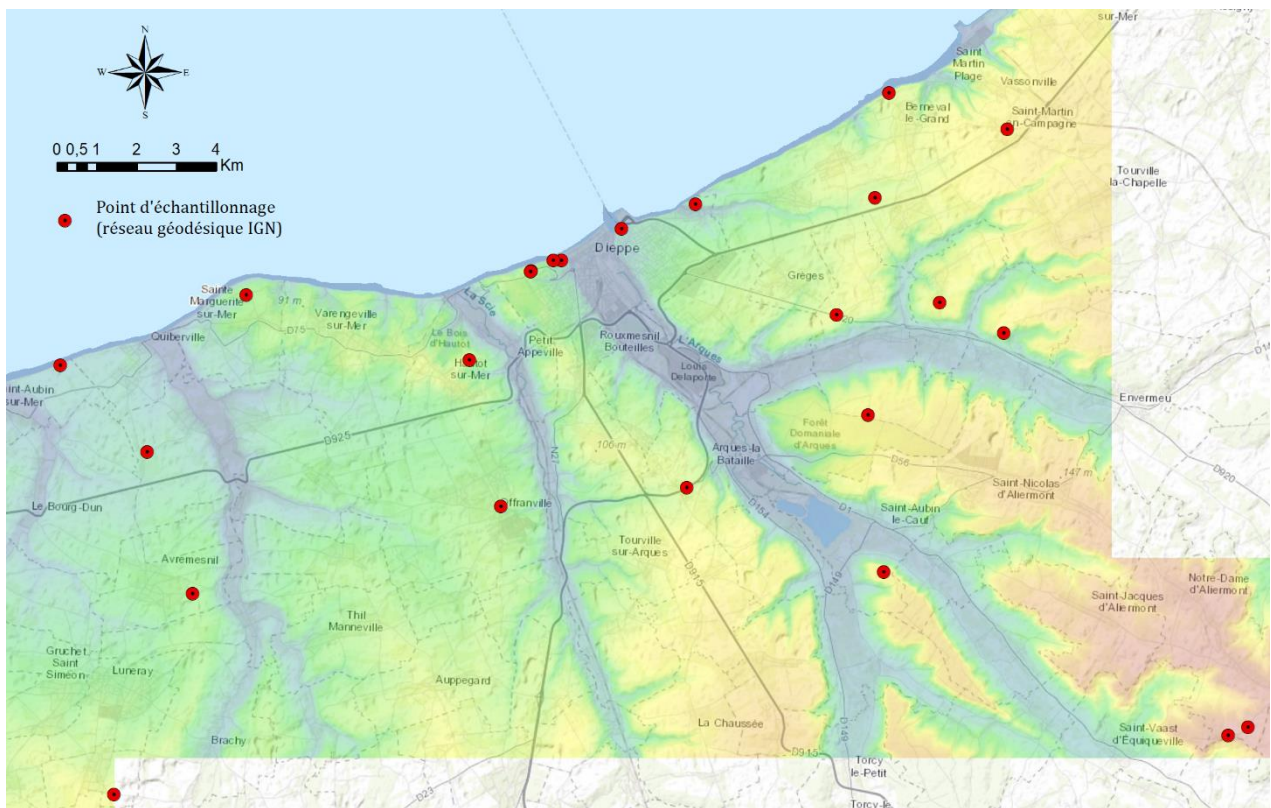


Figure 7 - Points IGN pris en compte pour l'analyse sur le site de Seine-Maritime

2. Choix de la méthode d'interpolation

La dégradation du MNT a été réalisée sous ArcGIS®, grâce à une méthode de ré-échantillonnage dite « bilinéaire », qui exécute une interpolation permettant de déterminer la nouvelle valeur d'une cellule en fonction d'une distance moyenne pondérée des valeurs des centres des quatre cellules en entrée les plus proches [ESRI, 2016 ; Richards J.A., 2013].

Cette méthode d'interpolation est reconnue comme étant appropriée au ré-échantillonnage de données continues de MNT [Grohman et al, 2006 ; Zakšek et al., 2005]. Elle a pour effet de lisser les données de manière progressive et présente l'avantage de donner des résultats fiables malgré une complexité raisonnable [Lillesand et al, 2004 ; Gonzalez et al., 2008 ; Chang, 2009].

Trois autres méthodes sont proposées par le logiciel ArcGIS®, mais n'ont pas été retenues :

- Deux méthodes dites du « voisin le plus proche » et de la « majorité », qui conviennent davantage aux données discrètes (ex : valeurs binaires « 0/1 »), et non aux données continues comme dans le cas présent ;
- Une méthode dite « bicubique », qui est quant à elle applicable aux données continues.

Cette dernière méthode est reconnue comme donnant des résultats souvent très proches de l'interpolation bilinéaire [Rees W.G., 2000]. Certains auteurs la considèrent même comme étant plus fiable [Kidner, 2003 ; Shi et al., 2005], car prenant en compte 16 valeurs au voisinage.

Une analyse simple de sensibilité a donc été réalisée et les écarts de valeurs entre les deux méthodes d'interpolation ont été caractérisés afin de justifier le choix opéré. Un ré-échantillonnage à une résolution de 20m a été réalisé avec les deux méthodes d'interpolation sur les MNT Litto3D® 1m et RGE Alti® 5m. Les valeurs ont ensuite été comparées au droit d'un échantillon de points du réseau géodésique IGN. Les marges entre les deux méthodes d'interpolation sont les suivantes :

- MNT Litto3D® (13 points échantillonnés) :
 - \bar{x} des écarts : 0,003 m (soit 0,3 cm) ;
 - σ des écarts : 0,016 m (soit 1,6 cm).
- MNT RGE Alti® (28 points échantillonnés) :
 - \bar{x} des écarts : 0,010 m (soit 1,0 cm) ;
 - σ des écarts : 0,024m (soit 2,4 cm).

Au vu des résolutions altimétriques des levés IGN et des deux MNT décrites ci-avant, ces valeurs confirment que les écarts sont négligeables entre les deux méthodes.

Par ailleurs, la méthode bicubique a pour caractéristique de pouvoir générer des valeurs en dehors de la plage de valeurs initiales [ESRI, 2016], ce qui n'est pas souhaitable dans notre cas. D'autre part, le ratio temps de traitement/qualité du modèle est à la faveur de l'interpolation bilinéaire, qui propose des temps de traitement très faibles pour une bonne fiabilité des données. Toutes ces raisons justifient donc le choix de l'utilisation de la méthode d'interpolation bilinéaire.

V. RÉSULTATS

1. Dispersion des données

a. Tendence générale de répartition

En première approche, il convient d'analyser la dispersion des écarts entre les données issues du référentiel géodésique de l'IGN et les MNT à différentes résolutions afin de caractériser l'hétérogénéité ou l'homogénéité des plages de valeurs.

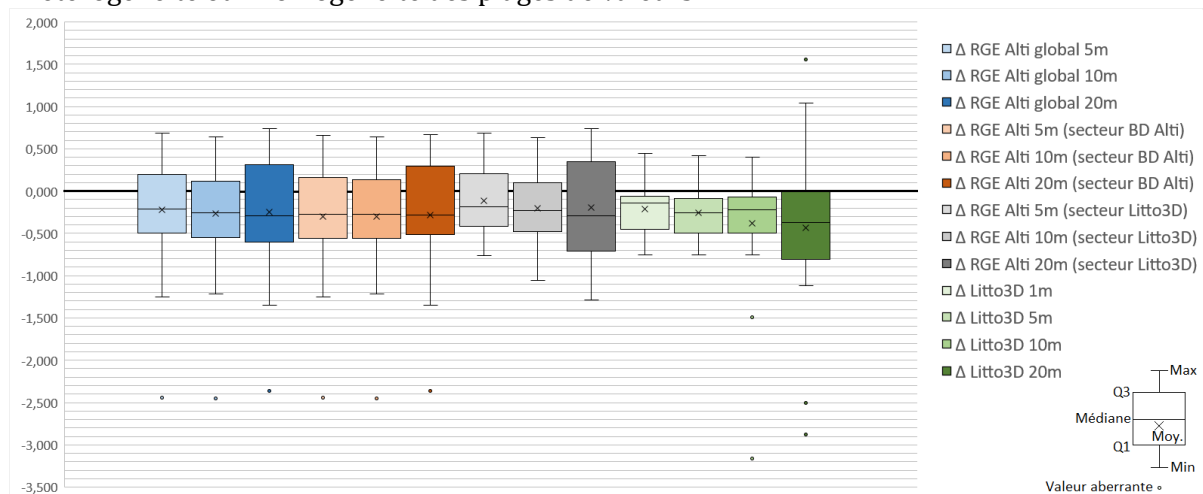


Figure 8 - Dispersion des écarts entre levés IGN et MNT aux différentes résolutions étudiées

Pour l'ensemble des jeux de données, il est constaté que les valeurs des MNT sont très souvent situées en-dessous des points géodésiques de l'IGN. Il est possible d'expliquer cette tendance par deux postulats :

- Un filtrage un peu trop marqué de la végétation et des bâtiments par l'IGN (passage du MNE au MNT) peuvent générer de petits affaissements topographiques du MNT nettoyé. Les points IGN situés à proximité d'un bosquet, d'une forêt ou d'un bâtiment quelconque pourraient donc être affectés d'une valeur sous-estimée.
- D'autre part, certains points géodésiques IGN sont situés sur des bornes en granit de petite taille, mais pouvant être suffisantes à générer de légères surestimation d'altitude de l'ordre d'un à deux décimètres.



Figure 9 – Exemple de borne en granit au point géodésique « AUBERVILLE I-1 »

b. Répartition des valeurs du RGE Alti®

Concernant les données du RGE Alti® aux échelles 5, 10 et 20m, il est constaté une certaine stabilité des écarts extrêmes (min, max et valeurs aberrantes), dont les valeurs varient peu. Ce sont finalement les 50% des valeurs comprises entre le 1^{er} et le 3^{ème} quartile qui évoluent le plus. Ces valeurs évoluent d'ailleurs d'avantage sur les zones du RGE couvertes par la donnée Litto3D® que sur les zones couvertes par la BD Alti®. Cette tendance peut s'expliquer par les résolutions initiales des MNT. En effet, la donnée Litto3D®, qui a une résolution d'origine de 1m, sera logiquement plus dégradée après ré-échantillonnage que la donnée BD Alti® dont la résolution initiale est de 25m.

c. Répartition des valeurs du Litto3D®

Les valeurs de Δ du MNT Litto 3D® montrent quant à elle une certaine stabilité entre les résolutions 1 et 5 m. Cependant, on constate sur les MNT à résolution 10 et 20 m l'apparition de valeurs fortement aberrantes. Les deux valeurs les plus extrêmes (DIEPPE IIa et BERNEVAL-LE-GRAND Ia) sont situées au niveau du sol (figure 10), loin de tout bâtiment ou escarpement et respectivement dans un champ et un jardin. On constate cependant la présence d'une haie sur le point de Dieppe, dont le nettoyage aurait pu générer une erreur substantielle. Leurs Δ à résolution 1m sont d'ailleurs respectivement de -0,75 m (Dieppe) et -0,12 m (Berneval-le-Grand). La dégradation de leurs marges d'erreurs aux résolutions 10 et 20m ne peut ensuite s'expliquer que par un biais d'interpolation dont les causes directes sont statistiques.



Figure 10 – (A) Point géodésique IGN « DIEPPE IIa » ($\Delta = -2,88m$ à résolution 20m) ; (B) Point géodésique IGN « BERNEVAL-LE-GRAND Ia » ($\Delta = -2,50m$ à résolution 20m).

A résolution 20m, les écarts extrêmes sont accompagnés d'une dispersion de l'ensemble de la plage de valeurs, caractérisée par un écartement non seulement des valeurs min et max, mais également des 1^{er} et 3^{ème} quartiles.

On constate cependant aux résolutions 1, 5 et 10m un regroupement plus important des valeurs centrales en comparaison avec la donnée RGE Alti®. D'autre part, bien que les 1^{er} et 3^{ème} quartiles s'écartent davantage à résolution 20m, cet écart reste moindre que le MNT du RGE Alti® à maille équivalente.

2. Caractérisation de l'écart-type

De manière simple, la tendance globale de perte de précision peut être caractérisée par le calcul de l'écart-type, correspondant à la racine carrée de la variance, c'est à dire à la moyenne quadratique des écarts à la moyenne. L'écart-type est noté σ .

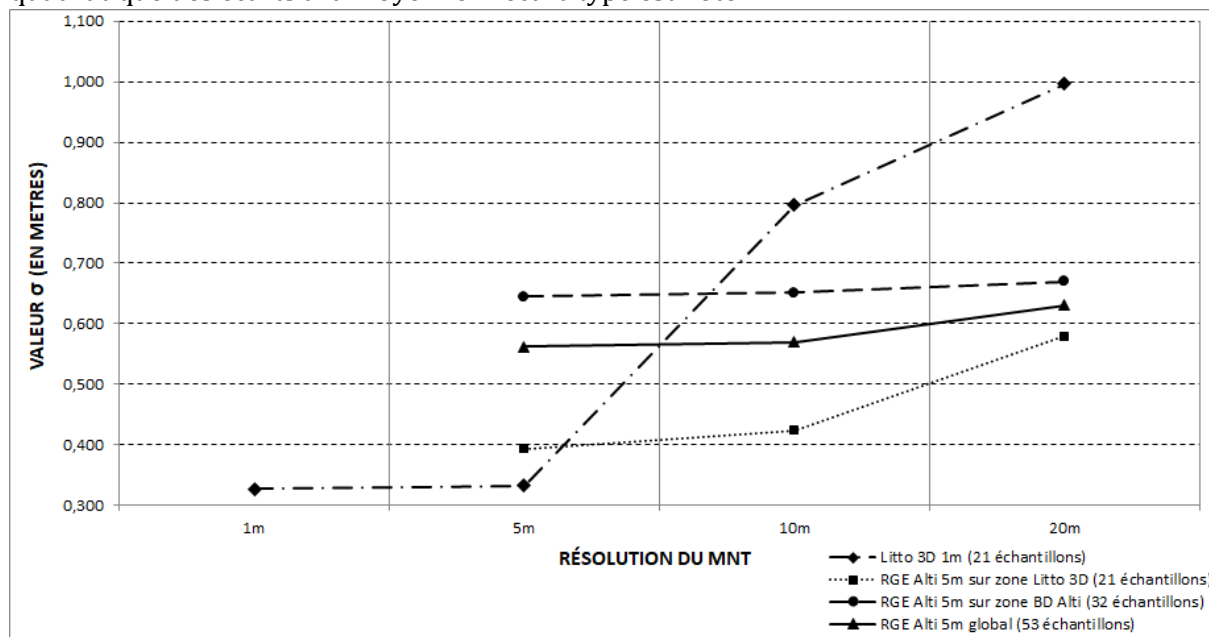


Figure 11 - Marges d'erreur par caractérisation de l'écart-type

Plusieurs constats ressortent de cette première analyse. Tout d'abord et sans surprise, la donnée Litto3D® dans sa résolution d'origine possède l'écart-type le plus faible (0,327m).

On constate que son σ après ré-échantillonnage à 5m coïncide peu ou prou avec les valeurs des points issus du RGE Alti® sur l'emprise de la zone Lidar (dans une bande littorale de 2km), ce qui confirme que la technique de ré-échantillonnage utilisée donne des résultats proches de ceux de l'IGN à cette résolution (à 5 cm près).

Cependant, le MNT Litto3D® 1m voit son écart-type accroître de façon exponentielle à mesure que l'on diminue sa résolution, au point de devenir moins précise que la BD Alti® dès une résolution de 10m.

Le RGE Alti® connaît quant à lui une variation plus modérée de son écart-type à mesure que l'on abaisse sa résolution, passant de 0,56m dans sa résolution d'origine, à 0,57m à un pas de 10m - puis à 0,63m à un pas de 20m.

Une distinction existe cependant selon les secteurs. Comme constaté dans les plots de répartition, la diminution de la qualité des données est plus franche en zone littorale :

- Sur la frange littorale, le σ de la donnée RGE Alti® oscille entre 0,38m et 0,56m ;
- En zone continentale, la valeur σ est quant à elle comprise entre 0,65m à un pas de 5m et 0,68m à un pas de 20m.

Comme précisé précédemment, cela s'explique par la résolution initiale des jeux de données, la donnée Litto3D® 1 m ayant subi une plus forte dégradation que la donnée BD Alti® 25m - ré-échantillonnée à une résolution proche de la donnée d'origine.

On se rend compte que l'étude de l'écart-type n'est pas suffisante car elle ne traduit pas la tendance observée dans les plots de répartition. L'accroissement exagéré de la courbe des

données issues du ré-échantillonnage du Litto3D® 1m laisse à penser que cette méthode d'évaluation de la qualité accorde trop d'importance aux valeurs extrêmes et aberrantes.

3. Caractérisation de la RMSE

Afin de s'absoudre de ce biais, la RMSE (Root-mean-square-error) a également été caractérisée. Celle-ci permet de déterminer l'erreur estimée et correspond à la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne.

Elle est calculée grâce à l'équation suivante :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n (y'i - yi)^2}$$

Où y' est la valeur modélisée du MNT, y la valeur mesurée sur le terrain par l'IGN et n le nombre de points de contrôle (Davis JC., 2002).

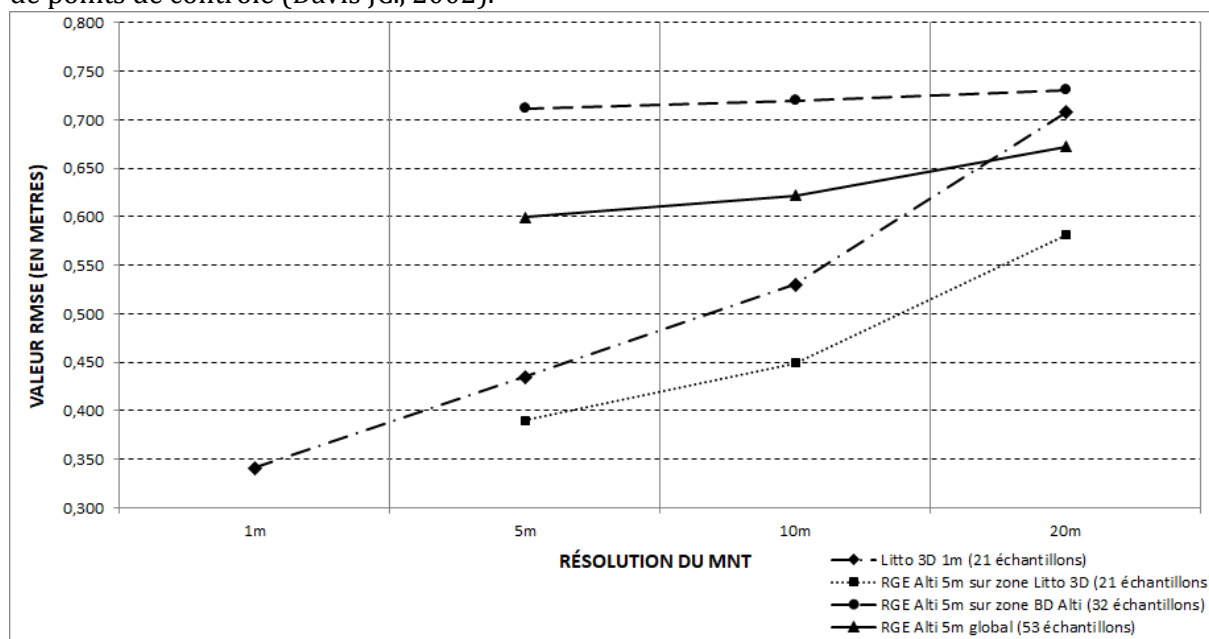


Figure 12- Marges d'erreur par caractérisation de la RMSE

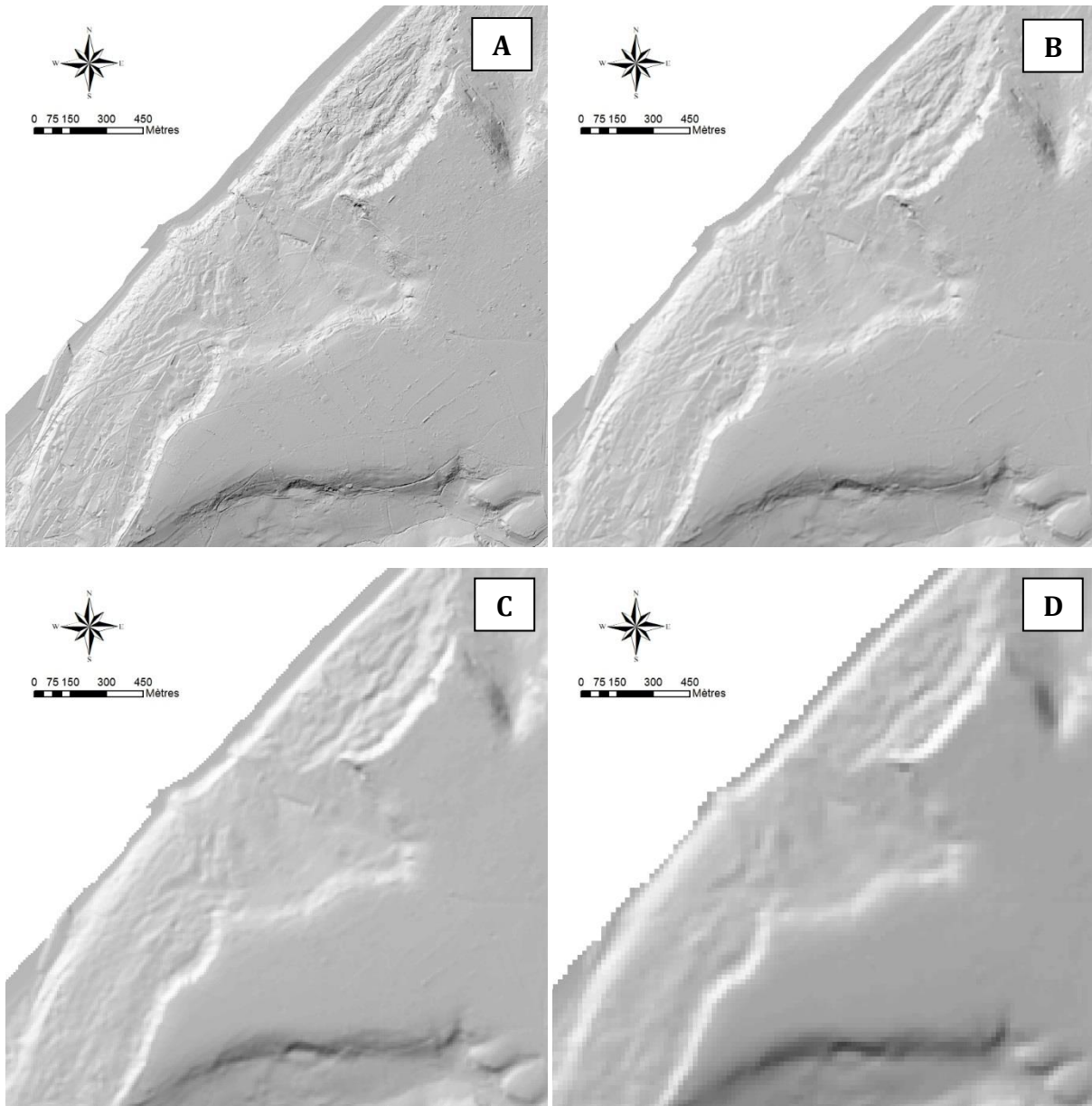
Une erreur quadratique moyenne petite est le signe d'une faible variance de l'erreur de prévision et d'une erreur moyenne réduite (Bouthevillain et al, 1995). La RMSE a été caractérisée car elle permet une meilleure pondération des erreurs importantes.

La RMSE nous permet de confirmer que les valeurs extrêmes contrôlent la tendance générale de distribution statistique par analyse de l'écart-type. Les données extrêmes sont effectivement davantage lissées par analyse de la RMSE.

Il est constaté une évolution plus progressive de la marge d'erreur de la donnée Litto3D®, dont la qualité est davantage comparable avec la donnée du RGE Alti® aux résolutions 10 et 20 m.

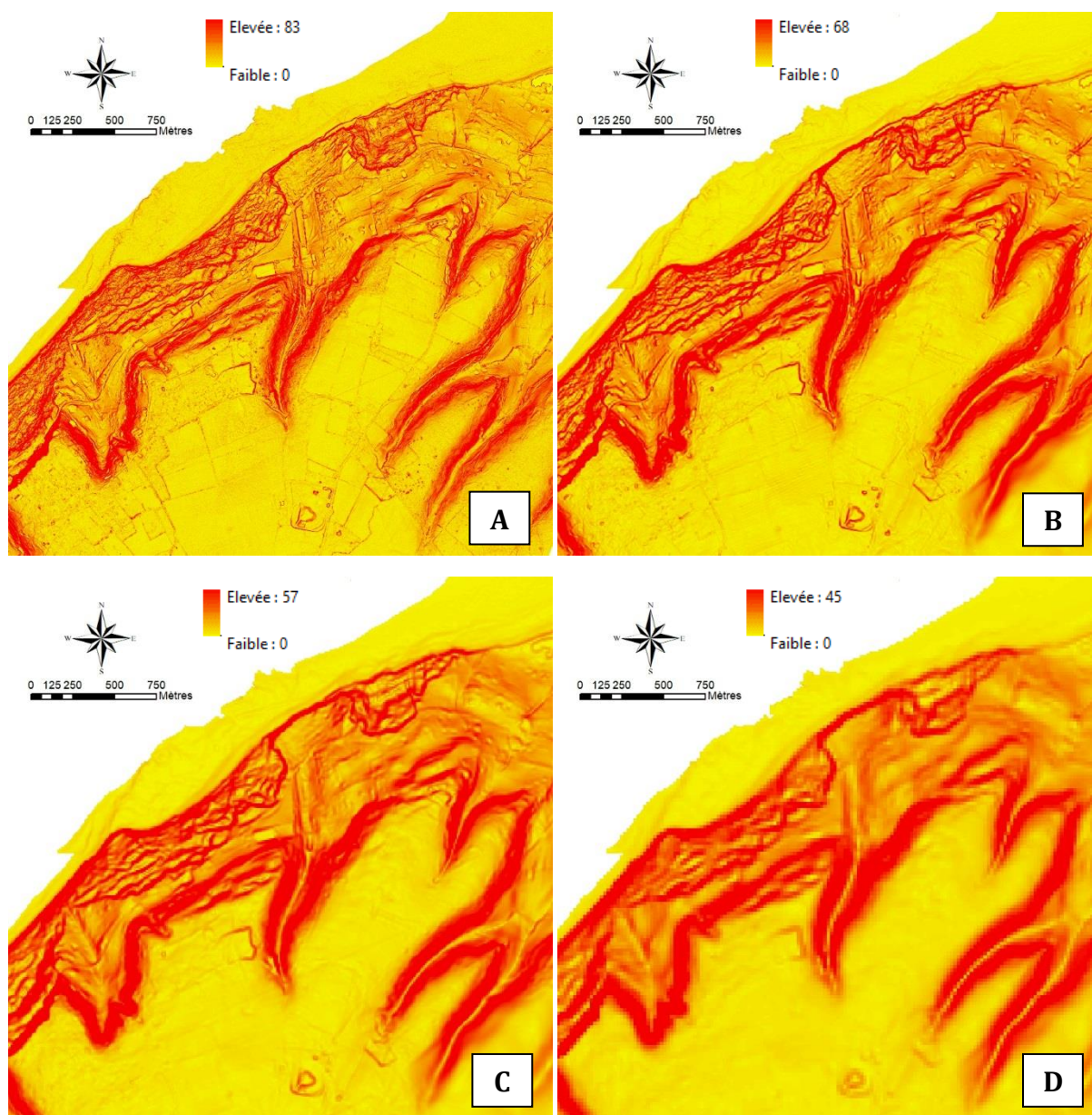
On constate cependant que la tendance est identique pour le RGE Alti® entre l'analyse par écart-type et par RMSE, ce qui exprime une certaine stabilité de la distribution à mesure que la maille est dégradée. A nouveau, ce meilleur comportement du RGE Alti® au ré-échantillonnage est sans doute lié à la résolution initiale à 25m de la BD Alti®, puisque l'on constate un accroissement plus important de la RMSE en bordure littorale qu'en secteur continental, avec une augmentation non négligeable entre les résolutions 10 et 20m (RMSE passant de 0,45 à 0,58m).

4. Analyse visuelle



(A) MNT Litto3D® de résolution 1m ; (B) MNT RGE Alti® de résolution 5m ; (C) MNT RGE Alti® ré-échantillonné à 10m ; (D) MNT RGE Alti® ré-échantillonné à 20m

Figure 13 – Comparatif visuel des MNT ré-échantillonnés (ombrages)



(A) MNT Litto3D® de résolution 1m ; (B) MNT RGE Alti® de résolution 5m ; (C) MNT RGE Alti® ré-échantillonné à 10m ; (D) MNT RGE Alti® ré-échantillonné à 20m

Figure 14 – Comparatif visuel des MNT ré-échantillonnés (valeurs de pentes)

L'analyse visuelle permet de distinguer les pertes de détails liées au ré-échantillonnage des MNT et de mettre en évidence les irrégularités locales dues à des erreurs et biais dans l'interpolation (Hutchinson & Gallant, 2000 ; Fressard, 2013).

Hormis le lissage d'artéfacts présents sur le MNT Litto3D® 1m liés au passage de MNE à MNT (due au nettoyage de la végétation, des habitations, etc.), il est principalement constaté une perte d'information progressive normale liée au changement de résolution.

Ce lissage est bien retranscrit dans les gammes de valeurs de pentes issues de chaque MNT. On constate en effet que la pente maximale des MNT passe de 83° à une résolution métrique à 45° à une résolution de 20m. Cette perte d'information non-négligeable s'explique par le moyennage opéré par le logiciel lors du ré-échantillonnage, d'où la valeur de 45° correspondant à la bissectrice d'un angle droit et caractéristique d'un lissage excessif de l'ensemble de la plage de valeurs.

VI. CONCLUSIONS ET PRÉCONISATIONS

1. Dégradation des données

Au final, il s'avère que si la dégradation visuelle est nette entre les résolutions 1, 5, 10 et 20m, l'analyse des marges d'erreur par caractérisation de l'écart-type et de la RMSE ne montre pas d'accroissement majeur de la marge d'erreur du RGE Alti® dans sa globalité. A l'inverse, la donnée Litto3D® originale semble se dégrader plus rapidement que le RGE Alti® lors du ré-échantillonnage, sa précision initiale étant meilleure. Il est également constaté l'apparition de valeurs aberrantes en lien avec le ré-échantillonnage de la donnée Litto3D®, contrairement à la donnée RGE Alti® dont les valeurs, bien que moins précises, semblent plus stables lorsqu'elles sont dégradées.

On note cependant un accroissement plus important de la marge d'erreur pour les points du RGE Alti® situés sur la bande littorale de 2km couverte par la donnée Litto3D®. Sur ce secteur :

- Entre les résolutions 5 et 10m, la marge d'erreur s'accroît de 7% pour l'écart-type contre 14% pour la RMSE ;
- Entre les résolutions 10 et 20m, la marge d'erreur augmente de 36% pour l'écart-type et 29% pour la RMSE, ce qui traduit une perte non-négligeable de précision du MNT.

Il apparaît donc que si la donnée la plus précise correspond bien à la donnée Litto3D® à un pas de 1m, la donnée RGE Alti® échantillonnée à 5 et 10m apparaît tout à fait exploitable dans le cadre des travaux visés. La donnée ré-échantillonnée à un pas de 20m semble quant à elle connaître une trop grande perte d'information pour pouvoir être considérée comme fiable, aussi bien d'un point de vue visuel que d'un point de vue statistique.

2. Choix de résolution de MNT

Dans le cas présent, le choix de résolution doit permettre de bénéficier d'une maille très fine des MNT sur les sorties cartographiques aux échelles définies. Au-delà de la conservation de l'intégrité statistique et graphique des données, nous cherchons ainsi à éviter un rendu pixellisé sur les exports.

Valenzuela et Baumgardner (1990), ont défini qu'un pixel devait avoir une taille supérieure à 0,5mm pour être visible sur papier.

Vink (1975), défini quant à lui la plus petite résolution lisible (MLA ou Maximum Location Accuracy) comme étant comprise entre 0,1 et 0,25mm.

D'après les travaux de Vink, Hengl (2006) propose de définir la MLA par l'équation suivante :

$$p \geq SN \cdot MLA = SN \cdot 0,00025 \quad (0,0001)$$

ou MLA est la taille minimale de pixel discernable sur le papier, p est la taille de pixel et SN l'échelle de travail.

De manière plus explicite, Hengl définit la limite maximale de visibilité d'un pixel sur une carte par le quotient de l'échelle souhaitée par un facteur 0,00025. Par exemple, au 1 : 50 000^e, la taille limite à laquelle un pixel serait visible est la suivante :

$$MLA = 50\ 000 \cdot 0,00025 = 12,5 \text{ m}$$

Au vu des travaux cités, il est préconisé l'utilisation des données suivantes à chacune des échelles de travail envisagées :

Echelle de travail	MLA	Résolution de MNT préconisée	Taille de pixel à l'impression	Jeu de donnée à utiliser	Traitement du MNT
1 : 5 000 ^e	1,25m	1m	0,2 mm	Litto3D® 1m/ RGE Alti® 1m	Aucun (donnée de base)
1 : 10 000 ^e	2,5m	5m	0,5 mm	RGE Alti® 5m	Aucun (donnée de base)
1 : 25 000 ^e	6,25m	10m	0,4 mm	RGE Alti® 5m	Ré-échantillonnage bilinéaire

A échelle 1 : 5 000^e et selon la méthode de Hengl, la MLA étant supérieure à la résolution choisie, les pixels du MNT devraient être invisibles à l'œil nu.

Concernant les échelles au 1 : 10 000^e et 1 : 25 000^e, la résolution étant égale ou inférieure à deux fois la limite de distinction des pixels, ces derniers devraient être à peine visibles sur les exports et sorties papier.

Enfin, à toutes les résolutions, les valeurs de pixels à l'impression restent inférieures ou égales à 0,5mm, limite de visibilité fixée par Valenzuela et Baumgardner (1990).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

Bouthevillain K., Mathis A. (1995) - Prévisions : mesures, erreurs et principaux résultats, *Economie et statistique*, N°285-286, pp. 89-100.

Chang, KT. (2009) - "Computation for Bilinear Interpolation.", Introduction to Geographic Information Systems. 5th ed. New York, NY: McGrawHill, 2009. Print.

Davis JC. (2002) - Statistics and data analysis in geology. Third Edition Wiley, 639 p.

ESRI (2016) - Cell size and resampling in analysis, *ArcMap 10.3 User Guide* (online).

Fressard M. (2013) - *Les glissements de terrain du Pays d'Auge continental (Normandie, France) Caractérisation, cartographie, analyse spatiale et modélisation*. Géographie. Université de Caen, 337p.

Gonzalez R., Woods R. (2008) - « Image sampling and Quantization », *Digital Image Processing*, Pearson Prentice Hall.

Hengl T. (2006) - Finding the right pixel size, *Computers & Geosciences*, n°32, pp.1283-1298.

Hengl T., Gruber S., Shrestha D.P. (2004) – Reduction of errors in digital terrain parameters used in soil-landscape modelling, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, n°5, pp97-112.

IGN (2015) - *Litto3D® Version 1.0 : Descriptif de contenu*, 32p.

IGN (2017) - *RGE ALTI® Version 2.0 : Descriptif de contenu*, 38p.

Kidner D. B. (2003) - Higher-order interpolation of regular grid digital elevation models, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 24, n°14, pp. 2981-2987.

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., and Chipman, J. W. (2004) - *Remote Sensing and Image Interpretation*, 5th edition. John Wiley & Sons.

Rees W.G. (2000) - The accuracy of Digital Elevation Models interpolated to higher resolutions, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 21, n°1, pp. 7-20.

Richard John A. (2013) – *Remote sensing digital image analysis : An Introduction*, Fifth edition, Springer, 503p.

Shi W. Z., Li Q. Q., Zhu C. Q. (2005) - Estimating the propagation error of DEM from higher-order interpolation algorithms, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 26, n°14, pp. 3069-3084.

Valenzuela, C., Baumgardner, M. (1990) - Selection of appropriate cell sizes for thematic maps. *ITC Journal* n°3, 219–224.

Zakšek K., Podobnikar T. (2005) - An effective DEM generalization with basic GIS operations, 8th ICA workshop on Generalisation and Multiple Representation, Coruña (July 7-8th, 2005), 10p.