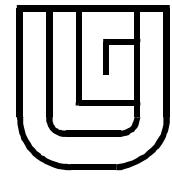




MINISTÈRE DE LA REGION WALLONNE
DGA - Direction Générale de l'Agriculture
IG2 – Division des aides à l'agriculture



UNIVERSITÉ DE LIÈGE
Faculté des Sciences
Unité de Géomatique



Avril 2008

TABLE DES MATIERES

Avertissement	3
I. Introduction et définition de la précision	3
II. Description générale des produits	5
III. Résultats de l'étude de la qualité des produits	7
III.1. La radiométrie de l'orthoimage	8
III.1.1. Matériel et méthode	8
III.1.2. Approche quantitative : résultats et discussion	8
III.1.3. Approche qualitative et semi-quantitative : résultats et discussion	10
III.2. La planimétrie de l'orthoimage et du MNS	18
III.2.1. Matériel et méthode	18
III.2.2. Résultats et discussion	18
III.3. L'altimétrie du MNS	22
III.3.1. Matériel et méthode	22
III.3.2. Qualité altimétrique du MNS sur base du PICC : résultats et discussion	23
III.3.3. Qualité altimétrique du MNS sur base de levés GPS : résultats et discussion	27
III.3.4. Qualité altimétrique du MNS sur base de profils LIDAR : résultats et discussion	30
III.3.5. L'erreur altimétrique en fonction de la pente et de son orientation : résultats et discussion	31
IV. Conclusions et recommandations	35
IV.1. La radiométrie de l'orthoimage	35
IV.2. La planimétrie	36
IV.3. L'altimétrie du MNS	37
V. Lexique et acronymes	38

AVERTISSEMENT

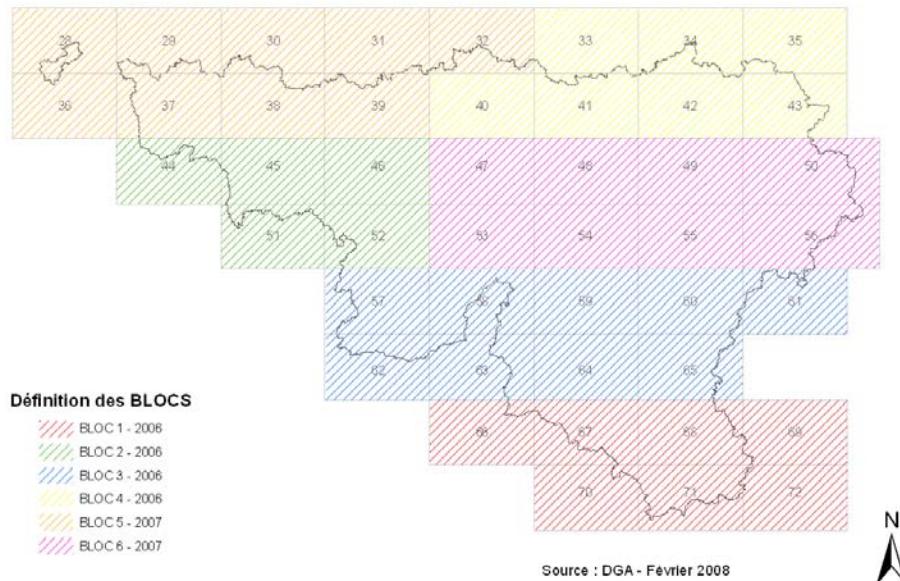
Ce document est la synthèse d'une étude scientifique basée sur des notions de statistiques peu accessibles pour des lecteurs non avertis. Toutefois, le chapitre des conclusions et recommandations est indépendant de l'analyse le précédent et donne des indications de précision et des conseils d'utilisation des produits.

Tout avis ou suggestion des utilisateurs des données est le bienvenu auprès de Monsieur Yves Cornet, Laboratoire Surfaces, Unité de Géomatique, Université de Liège (Ulg) – Courriel : ycornet@ulg.ac.be.

I. INTRODUCTION ET DEFINITION DE LA PRECISION

Au cours des années 2006-2007, la Direction Générale de l'Agriculture (DGA-IG2) a effectué le renouvellement des images aériennes et produit un Modèle Numérique de Surface (MNS) sur l'ensemble du territoire wallon. Leur qualité a été contrôlée par l'Unité de Géomatique de l'Université de Liège, lequel a porté sur trois critères principaux : la radiométrie, la planimétrie et altimétrie. Ce contrôle a été effectué par 'bloc', lesquels sont définis dans la figure suivante.

BLOCS de contrôle qualité - Vols 2006 -2007



Délimitation des blocs de contrôle – Vols 2006-2007

En ce qui concerne le contrôle de la qualité de l'information géométrique (planimétrie et altimétrie), la définition de notion de précision s'impose afin de bien comprendre le contenu de ce document. Cette notion est définie par 3 paramètres statistiques portant sur la distribution de l'erreur signée, e , connue pour un échantillon de points : la variance, la moyenne et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne.

L'erreur signée, e , peut être estimée sur chacune des 3 composantes, X, Y ou Z, par la différence entre la valeur de référence, v_r , et la valeur mesurée, v_m :

$$e = v_r - v_m$$

L'incertitude, le premier paramètre, est une mesure globale de la qualité géométrique qui intègre les 2 autres paramètres : l'imprécision et l'inexactitude. Elle est exprimée par la racine de l'erreur quadratique moyenne (*Root Mean Square Error – RMSE*) :

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\sum(e)^2/n} \quad (MSE = Mean\ Square\ Error)$$

1. *L'imprécision* : est quantifiée par une mesure de variance de l'erreur signée, var_e , c'est-à-dire la dispersion autour de l'erreur signée moyenne ou biais.
2. *L'inexactitude* : est quantifiée par une mesure de l'erreur signée moyenne ou le biais, \bar{e} , donné par la formule suivante :

$$\bar{e} = \sum e/n$$

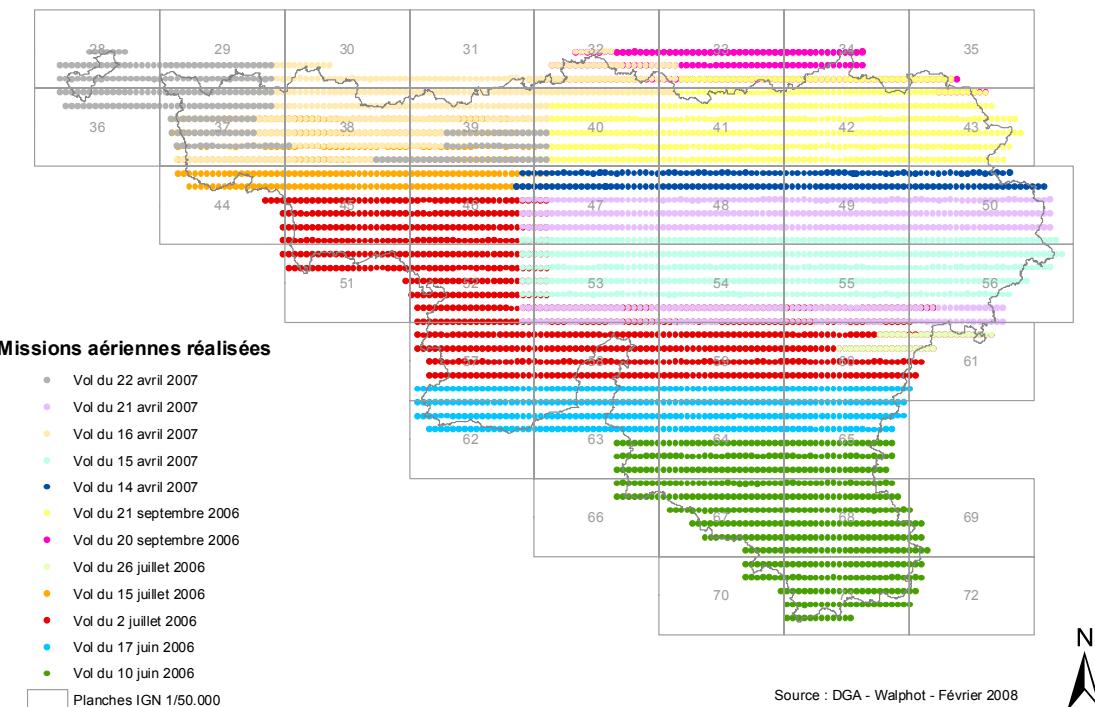
La relation mathématique entre les 3 paramètres est la suivante :

$$var_e = MSE - \bar{e}^2$$

II. DESCRIPTION GENERALE DES PRODUITS

INFORMATIONS GENERALES	
<i>Caméra</i>	Vexcel UltraCam D (numérique)
<i>Fournisseur</i>	AM WALPHOT-EUROSENSE
<i>Altitude de vol</i>	5844 mètres
<i>Recouvrement longitudinal</i>	$60\% \pm 5\%$
<i>Recouvrement latéral</i>	$40\% \pm 5\%$
<i>Système de projection</i>	Lambert 1972 (International European Datum ED50)
<i>Distance focale</i>	105.2 mm
<i>Taille physique du pixel</i>	9 μm

Photographies aériennes acquises en 2006 et 2007



Plan de vol des missions aériennes – Vols 2006-2007

ORTHOIMAGE	
<i>Dates d'acquisition</i>	Du 10 juin au 21 septembre 2006 et du 14 au 22 avril 2007
<i>Résolution</i>	50 centimètres
<i>Bandes spectrales couvertes</i>	Bleu (410-530 μm), Vert (490-630 μm), Rouge (585-680 μm), Proche Infra-rouge (685-910 μm)
<i>Format</i>	Binaire - 8 bits non signés - BSQ (R, V, B, PIR (cfr lexique)), (A afficher sans accentuation de contraste (cfr lexique))
<i>Résolution radiométrique</i>	8 bits non signés par pixel et bande spectrale

Dimensions des mailles ORTHO distribuées (64 Mb)	Largeur de l'image (X) : 2 km (= 4000 pixels)
	Hauteur de l'image (Y) : 2 km (= 4000 pixels)
Technique de production	<ol style="list-style-type: none"> 1. <u>Stéréo-préparation</u> : calibration des paramètres d'orientation externes des prises de vues (GPS/INS – cfr lexique) sur base de résultats d'une aérotriangulation + définition des paramètres internes de la caméra. 2. <u>Production d'images L3</u> : à partir d'images brutes L0 et d'images L2 (panchromatique haute résolution et multispectral basse résolution) par pansharpening. 3. <u>Orthorectification</u> : sur base des images L3 et du MNS (5m de résolution) 4. <u>Correction radiométrique</u> : homogénéisation globale des couleurs. 5. <u>Mosaïquage</u> : découpage en mailles de 2km*2km et production de métadonnées par mailles.
MNS	
Dates d'acquisition	Du 10 juin au 21 septembre 2006 et du 14 au 22 avril 2007
Résolution	5 mètres
Format	Binaire - codage réels 32 bits
Dimensions des mailles MNS distribuées (planche IGN (cfr lexique) 1/50.000ème) (81.92 Mb)	Largeur (X) : 32 km (= 6400 pixels) Hauteur (Y) : 16 km (= 3200 pixels)
Technique de production	Corrélation automatique d'images L2 (panchromatiques très haute résolution) sous le logiciel BAE Socet Set

III. RESULTATS DE L'ETUDE DE LA QUALITE DES PRODUITS

L'ensemble de la production de l'orthoimage aérienne et du MNS devait respecter les critères de qualité définis par le Cahier Spécial des Charges. Les erreurs planimétriques et altimétriques par maille ORTHO exigées dans celui-ci sont exprimées dans le tableau 1 par l'incertitude (racine de l'erreur quadratique moyenne ou *RMSE*). Les écarts individuels mesurés en valeur absolue en tout point de contrôle ne pouvaient jamais dépasser 3 fois la *RMSE* maximale autorisée.

Tableau 1 Erreurs géométriques, planimétriques et altimétriques, exigées par le Cahier Spécial des Charges

MAX RMSE (incertitude)	
ORTHOIMAGE	
« Précision » planimétrique	1 m
MNS	
« Précision » planimétrique	5 m
« Précision » altimétrique	2 m (plaine, non boisé) 5 m (ailleurs)

La « précision » planimétrique du MNS n'a pas été estimée. L'orthorectification ayant été réalisée à l'aide du MNS, l'estimation de la « précision » planimétrique de l'orthoimage a été jugée représentative de la « précision » planimétrique du MNS. Néanmoins, sur un MNS à 5 m de résolution, il est impossible de localiser un objet avec une « précision » inférieure à la résolution du pixel ou de déterminer exactement la position de la limite d'un objet à face verticale, par exemple.

La distinction entre « plaine, non boisé » et « ailleurs » est complexe à prendre en compte car le terme « ailleurs » peut signifier, par exemple, le sommet de la canopée. Or le contrôle de la « précision » géométrique dans ce contexte est impossible, faute de référence fiable. Le MNS du SETHY (cfr lexique) peut néanmoins servir de référence dans ce cas. Il ne couvre toutefois que des zones peu pentues des fonds de vallées principales et le bas de leurs versants.

III.1. LA RADIOMETRIE DE L'ORTHOIMAGE

III.1.1. Matériel et méthode

Le contrôle de la qualité radiométrique porte sur une mosaïque de 9 mailles de 2 km sur 2 km, centrées sur une maille de référence. Le choix des mailles de référence a été réalisé en respectant la représentativité spatiale de l'échantillon de mailles. Par ailleurs, chaque maille a été caractérisée par l'occupation prédominante du sol (sols urbanisés – cultures et prairies – forêts – pas de prédominance) et par l'énergie du relief. Les mailles ont donc aussi été sélectionnées afin d'assurer au mieux la représentativité de l'échantillon vis-à-vis de la diversité des contextes d'occupation du sol et de relief au sein des différents blocs.

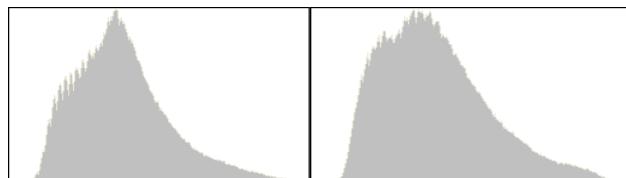
Le contrôle a été effectué selon deux méthodes distinctes exposées dans les § III.1.2. et III.1.3. : une approche quantitative (statistiques mono et bivariées, histogramme.) ainsi qu'une approche qualitative et semi-quantitative (détection du flou, d'anomalies, du bruit (cfr lexique), etc.).

Le contrôle repose sur un échantillon de 60 mailles de référence sur l'ensemble du territoire wallon.

III.1.2. Approche quantitative : résultats et discussion

Régularité des histogrammes, entropie et taux de saturation de chaque canal

Tous les histogrammes analysés traduisent une entropie (cfr lexique) importante et sont presque toujours réguliers. Seuls quelques histogrammes de la bande rouge de mailles appartenant aux blocs 5 et 6 sont bruités (cfr lexique).



Maille 55-131, à gauche ; maille 65-129, à droit

Exemples d'histogrammes bruités de la bande rouge de mailles appartenant aux blocs 5 et 6.

La saturation a été calculée pour les valeurs 0 (noir) et 255 (blanc) dans chaque canal. Deux taux ont été calculés : le taux de saturation relatif au noir et celui relatif au blanc. Il s'agit du rapport entre la fréquence absolue de la valeur 0, dans le premier cas, et 255, dans le second, et le nombre de pixels de l'image. Les taux de saturation sont très faibles. Ils sont presque toujours bien inférieurs à 1 % de part et d'autre de l'histogramme (noir et blanc). Ils sont généralement un peu plus élevés pour les blocs 1 à 4. On y observe généralement une saturation un peu plus importante pour le canal bleu. Pour les blocs 5 et 6, les saturations deviennent nulles pour les canaux visibles et tout à fait négligeables pour le canal PIR (cfr lexique).

Statistiques bivariées : matrice des corrélations

Les matrices des corrélations mettent en évidence la complémentarité du PIR et des 3 canaux visibles dans tous les cas.

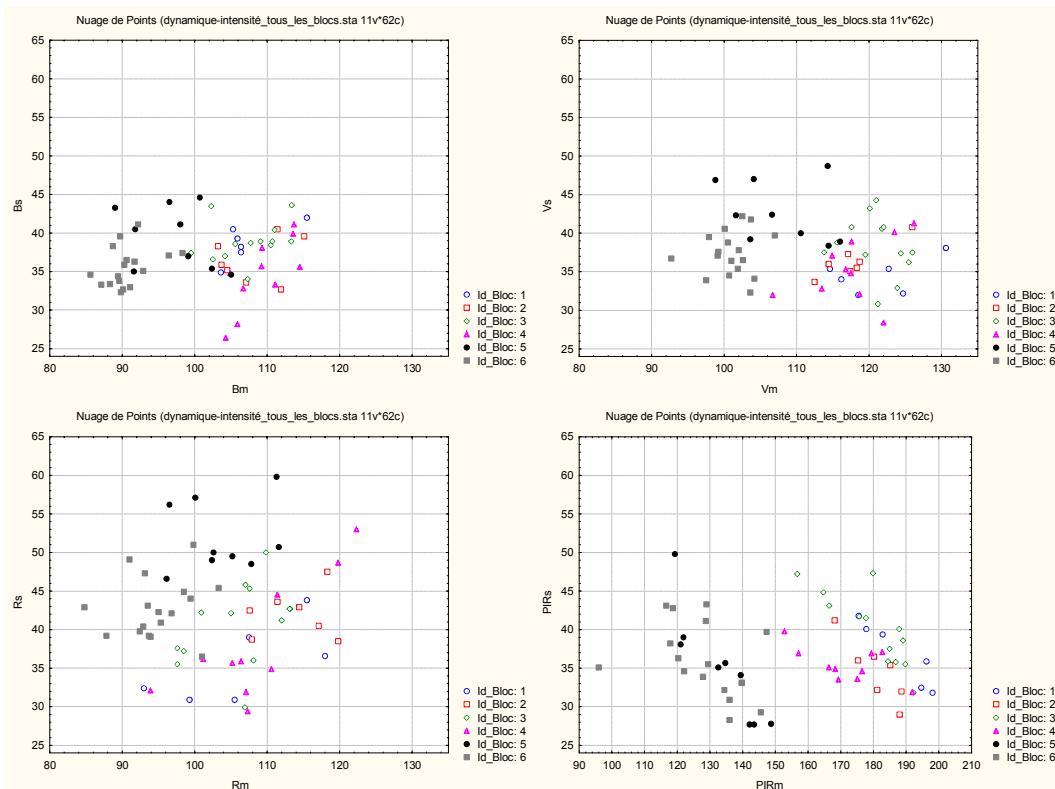
Statistiques monovariées : dynamique et brillance

La brillance (cfr lexique) moyenne est relativement peu variable sur les différentes mailles contrôlées pour un canal donné. On remarque généralement une brillance moyenne assez comparable pour les 3 canaux visibles et beaucoup plus élevée pour le PIR.

La dynamique (ou contraste – cfr lexique) est très importante pour tous les canaux. Elle peut être un peu plus importante pour certaines mailles dans le canal rouge.

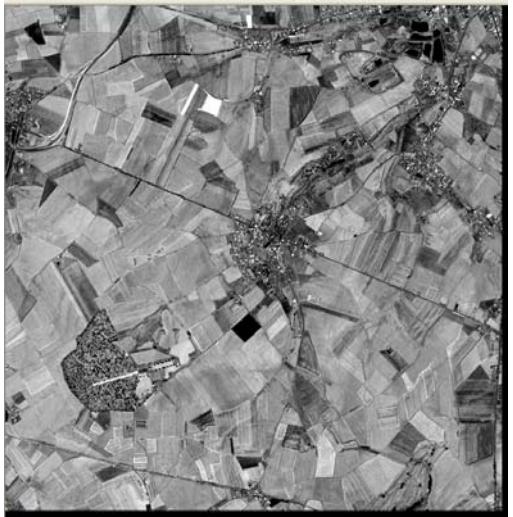
L'occupation du sol prédominante et l'énergie du relief des mailles semblent ne pas avoir un effet déterminant sur la brillance et la dynamique (cfr lexique).

Les canaux PIR, V et B des mailles des blocs 5 et 6 montrent des valeurs de brillance nettement différentes de celles des blocs 1 à 4. Ceci est probablement lié à la période précoce de survol (avril) et à une procédure d'égalisation radiométrique différente.



Représentation graphique, par canal, de l'écart-type (Rs , Vs , Bs ou $PIRs$ (cfr lexique)) en fonction de la brillance ou intensité moyenne (Rm , Vm , Bm ou $PIRm$) de l'ensemble des mailles selon le bloc d'appartenance.

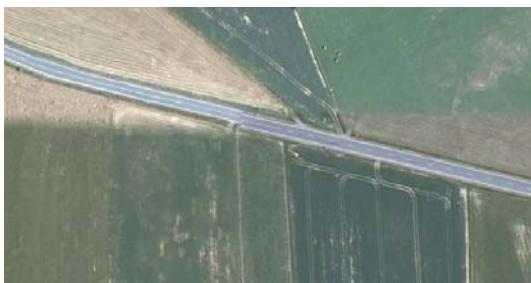
III.1.3. Approches qualitative et semi-quantitative : résultats et discussion

	Vols 2006 Blocs 1 à 4	Vols 2007 Blocs 5 et 6
Anomalies		
Raccords rectilignes et curvilignes	<p>L'ensemble de l'échantillon contrôlé répond aux normes de qualité du Cahier Spécial des charges.</p> <p>L'altération relative des teintes, de la saturation et de l'intensité (cfr lexique) de part et d'autre des raccords entre prises de vue est assez prononcée, mais la dynamique reste importante.</p> <p>Un décalage géométrique peut être observé de part et d'autre du raccord. Un effet de flou peut aussi être observé très localement. Sur les blocs 1 à 4, les raccords sont rectilignes et sont plus particulièrement perceptibles sur des occupations du sol marginales (sols non couverts de végétation, par exemple), mais ils ont aussi été observés en espace forestier. Dans ce cas, on peut parfois observer en plus d'une altération des couleurs, une inversion du dévers des arbres liée à un faible effet de parallaxe.</p> <p>L'exploitation numérique sur l'ensemble du territoire, n'est pas permise (classification, par exemple). Une exploitation numérique locale en tenant compte des raccords entre prises de vue est envisageable.</p> 	<p>L'ensemble de l'échantillon contrôlé répond aux normes de qualité du Cahier Spécial des charges.</p> <p>Les raccords sont perceptibles localement sur des champs très réfléctifs ou des plans d'eau.</p> <p>Sur les blocs 5 et 6, ces raccords sont moins fréquents, ne sont pas rectilignes et ne se marquent pas uniquement par l'altération radiométrique, mais aussi par de faibles décalages géométriques et par un flou systématique. Ce flou est localisé dans une zone tampon étroite le long des raccords et probablement lié à une procédure de filtrage de type passe bas.</p> <p>L'exploitation visuelle est améliorée par rapport aux blocs 1 à 4 mais l'exploitation numérique n'est probablement envisageable qu'en prenant des précautions comparables à celles mentionnées pour les blocs 1 à 4. Des tests doivent cependant être réalisés pour vérifier leur nécessité pour les blocs 5 et 6.</p> 

Raccords rectilignes et curvilignes



Maille 30-93



Maille 41-71



Maille 41-71

Trois exemples de raccords rectilignes entre prises de vue: altération des teinte, saturation et intensité en vraie couleur). Ces exemples sont représentatifs des blocs 1 à 4.



Maille 64-142

Raccord curviligne entre prises de vue : changement d'orientation du dévers des sapins, altération des teinte, saturation et intensité en vraie couleur), flou et décalage planimétrique (route). Cet exemple est représentatif des blocs 5 et 6.



Maille 63-136

Autre exemple d'anomalie radiométrique et de flou dus à la présence d'un raccord typique des blocs 5 et 6.

Déformations locales

Un autre type d'altération géométrique consiste en déformations locales planimétriques qui apparaissent clairement au niveau de structures linéaires telles que les routes et dans des contextes de fortes variations d'altitude du MNS. Ces déformations sont ainsi visibles au niveau de routes qui traversent des zones forestières, de routes en déblais ou de ponts. Ce type de déformations affecte probablement aussi les zones dégagées en lisière forestière mais il est bien entendu plus difficilement mis en évidence.

Certains bâtiments peuvent aussi être déformés de la sorte, mais ceci a été très peu souvent observé sur les mailles contrôlées.



Maille 60-76

Orthorectification sur la surface du MNS influencée par un déblai en bordure d'autoroute et sa traversée d'un vallon transversal



Maille 70-13

Orthorectification sur la surface irrégulière du MNS influencée par le sommet de la canopée en bordures de route



*Maille 59-84
Déformation du pont due à une forte variation locale d'altitude – une partie du pont est orthorectifiée à l'altitude de la route qui passe en dessous.*

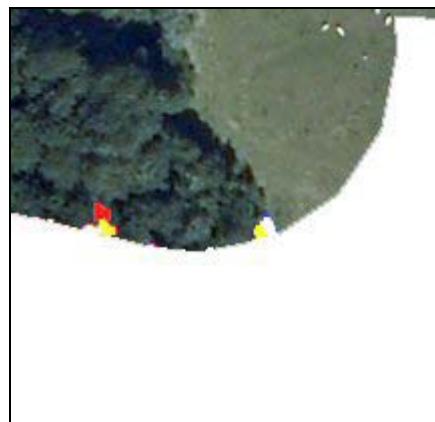


*Maille 80-89
Déformation d'un bâtiment*

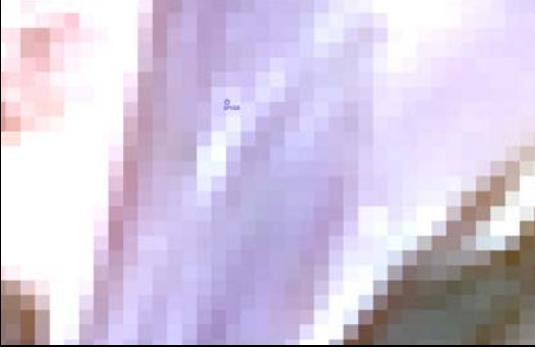
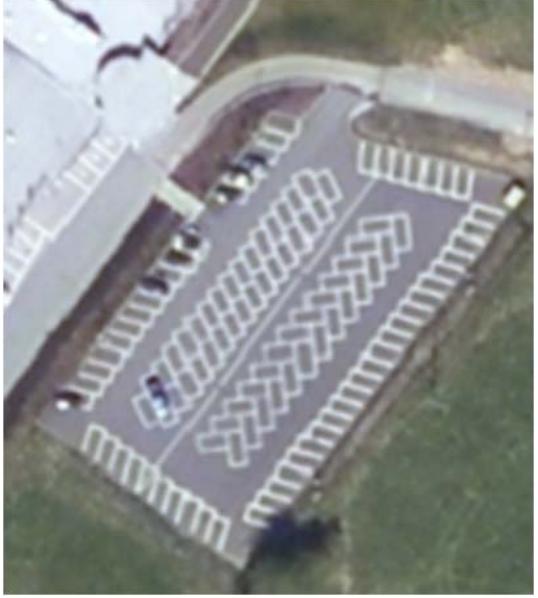
Il s'agit de tâches de couleur rouge, bleu, jaune, cyan ... sur la composition colorée en vraie couleur. Elles apparaissent dans une zone tampon d'extension très limitée en bordure du territoire wallon en raison de l'absence d'information dans une ou plusieurs bandes spectrales.

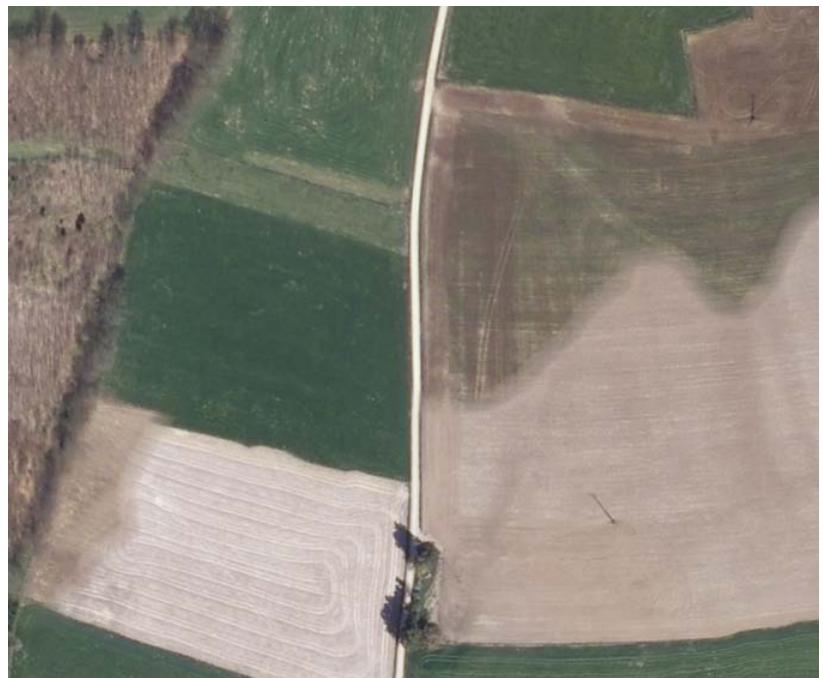
Très fréquentes dans la zone tampon autour de la frontière du territoire wallon sur les mailles intersectées par cette frontière au sein des blocs 1 et 2.

Petites tâches de couleur rouge, bleue, jaune, cyan ...

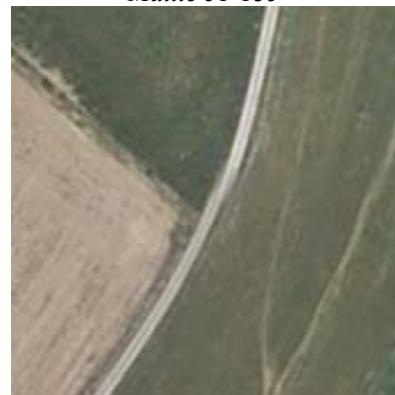


Deux exemples de tâches colorées de la maille 53-70 du Bloc 2

<p><i>Dilatations linéaires locales</i></p>	<p>Il s'agit probablement d'artefacts liés à la procédure de rééchantillonnage en zone d'occlusion visible à proximité de lisières (forte variation d'altitude du MNS). Ces artefacts sont très localisés et très peu fréquents.</p>  <p style="text-align: center;"><i>Maille 34-103 Dilatation linéaire locale en bordure de lisière forestière probablement liée à un ré-échantillonnage en zone d'occlusion.</i></p>
<p>Flou</p> <p><i>Flou</i></p>	<p>Le flou a été évalué en analysant des objets aux limites franches ou des objets linéaires de faible largeur (< résolution de l'ORTHO).</p> <p>A l'exception du flou important, apparaissant dans une zone tampon de quelques mètres le long des raccords au sein des blocs 5 et 6, les objets aux limites franches et très contrastées ou les objets linéaires de faible largeur sont peu affectés par le flou. Dans cette zone tampon, c'est probablement la règle de superposition entre images utilisées ou peut-être un filtrage de type passe-bas qui explique le flou.</p> <p>De ce point de vue, l'orthoimage présente une excellente qualité sur l'ensemble des blocs.</p>
	 <p style="text-align: center;"><i>Maille 40-125 Exemple d'objet (ligne blanche au sol sur une route) analysé pour déterminer le flou. Il s'agit ici d'un point levé au GPS (GPS026 – Bloc 3 pour valider la planimétrie</i></p>  <p style="text-align: center;"><i>Mailles 51-135 Exemple de zone choisie pour l'analyse du flou sur le bloc 6.</i></p>



Maille 51-135



Maille 55-131

Deux exemples de flou et de décalage planimétrique associés à la présence de raccords entre prises de vue typiques des blocs 5 et 6

Bruit

Bruit

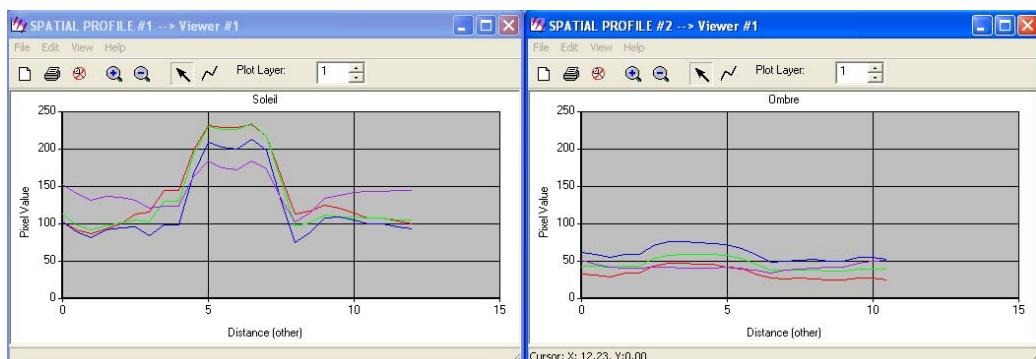
Une analyse du coefficient de variation du signal dans les 4 canaux a aussi été réalisée sur des surfaces homogènes de couleur peu saturée et d'intensité variant de faible à élevée (parkings macadamisés, toits plats de bâtiments industriels, surfaces bétonnées ...). La valeur de ce coefficient sur de telles surfaces peut être un indicateur du bruit. Elle est parfois relativement importante. Néanmoins, il est difficile d'attribuer cette variabilité au bruit avec certitude ou à une variabilité réelle de la nature de la surface et donc de sa réflectance (cfr lexique).

Nous avons donc adopté une autre approche qui nous permet d'affirmer que le bruit est globalement faible. En effet, les 4 composantes principales ont été extraites de chaque image polygénique à 4 canaux sur chacune des mosaïques de 9 mailles analysées lors du contrôle radiométrique. Toutes ces composantes, même celles expliquant la plus faible part de la variance, sont structurées spatialement. On peut donc admettre que le bruit est négligeable.

Détails dans les ombres

Les ombres peuvent être de longueur légèrement variable d'un vol à l'autre selon la saison. Par ailleurs, la transparence de la canopée de certaines espèces de feuillus sur les blocs 5 et 6 en raison des vols précoce d'avril constitue un élément favorisant la perception des structures et limites dans leur ombre.

La variance du signal dans l'ombre est atténuée mais souvent elle reste suffisante que pour y détecter les structures et limites, surtout dans le canal bleu.



Maille 55-13

Comparaison de deux profils radiométriques (dans et hors de l'ombre)



Maille 65-87

Illustration de la relative « transparence » de la canopée de certaines espèces de feuillus bordant la route. Cette situation est caractéristique des blocs 5 et 6 en raison des vols précoce d'avril 2007.
Notez aussi la déformation de la route sous le pont, orthorectifiée à l'altitude du pont.

Voile atmosphérique

Voile atmosphérique

L'analyse visuelle des images en vraie et fausse couleurs permet d'affirmer que l'interprétation visuelle n'est pas perturbée par un effet de voile qui atténuerait l'information texturale.

Néanmoins, un effet comparable à un voile atmosphérique est perceptible à proximité des raccords entre prises de vue avec une atténuation apparente (il s'agit d'images numériques !!!) du contraste d'un côté du raccord.

Par ailleurs, très localement, des panaches de fumée (feu, industrie) ou quelques petits voiles nuageux sont visibles.



Bloc 3 : présence d'un voile de nuages et de fumées en zone forestière.



*Maille 74-79 - Bloc 5
présence d'un voile nuageux*

Vignettage

Vignettage

En photographie argentique traditionnelle, le vignettage peut être défini comme une variation radiale d'intensité depuis le centre de la prise de vue.

Aucune trace de vignettage n'a été observée sur les mailles contrôlées.

III.2. LA PLANIMETRIE DE L'ORTHOIMAGE ET DU MNS

III.2.1. Matériel et méthode

Le contrôle planimétrique a été réalisé en comparant les coordonnées planimétriques repérées sur l'orthoimage, à celles d'une référence. La référence est soit le PICC (cfr lexique) (points facilement identifiables sur le terrain), soit des points remarquables levés par GPS.

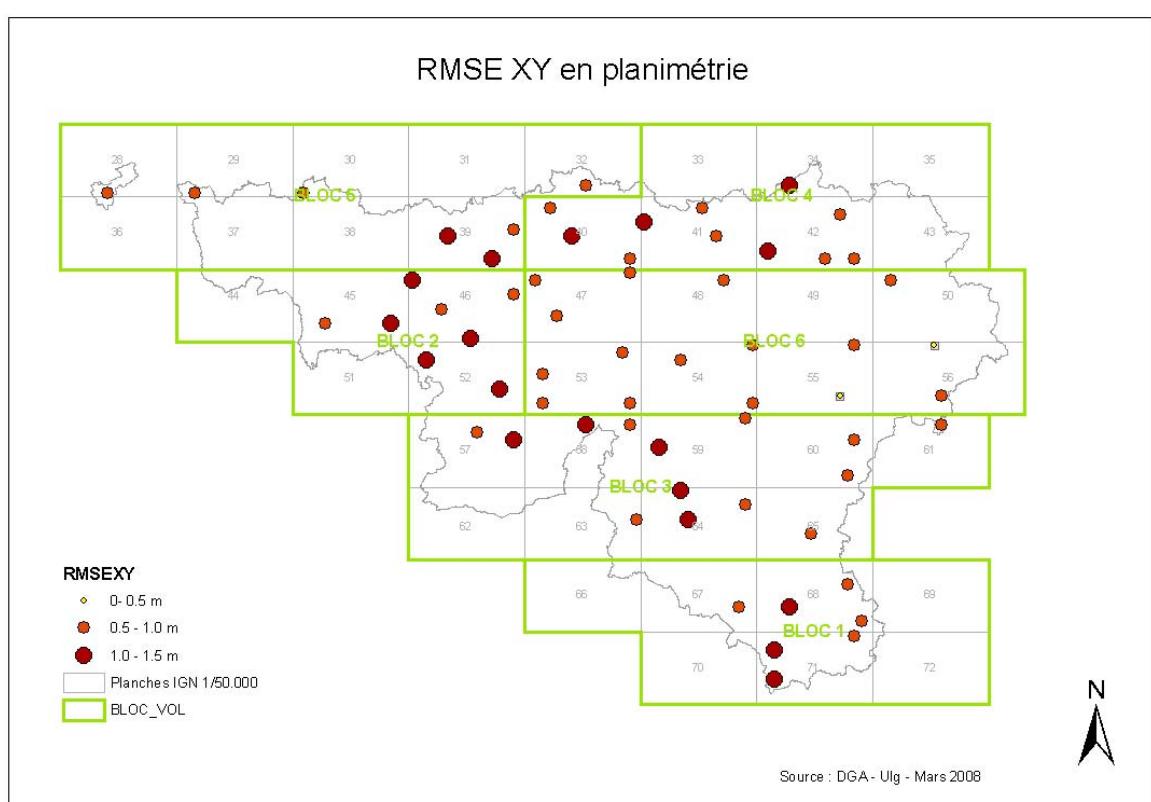
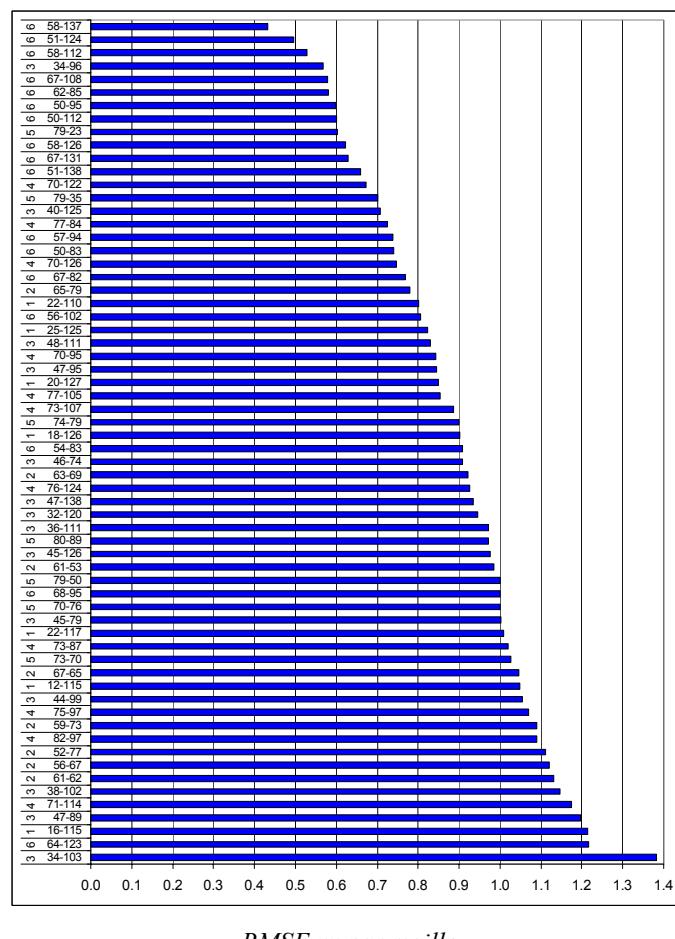
Dans ce rapport, les erreurs résultant de la comparaison entre les coordonnées planimétriques de l'orthoimage et celles de référence (PICC+GPS) ont été analysées. Signalons par ailleurs que seuls les blocs 3 et 6 ont été contrôlés sur base de points GPS faute de données du PICC dans certaines zones de ces blocs.

Le contrôle de la planimétrie a porté sur 64 mailles de 2 km x 2 km sur l'ensemble des blocs, ce qui représente 2687 points. De la même façon que pour le contrôle de la radiométrie, le choix des mailles a été réalisé en respectant la représentativité spatiale et en prenant en considération l'énergie du relief. Le critère d'occupation du sol n'a cependant pas été déterminant dans cette sélection. Ainsi, les mailles considérées pour le contrôle planimétrique ne sont pas nécessairement communes à celles utilisées pour le contrôle radiométrique.

Une remarque méthodologique s'impose d'emblée pour nuancer la norme de « précision » prévue par le Cahier Spécial des Charges. Elle concerne l'influence de la nature des points choisis pour ce contrôle. Même lorsque ces points sont des points remarquables au sol localisés sur des limites franches (lignes blanches sur les routes, bordure de deux types de revêtements contrastés), la restitution relève d'une interprétation de l'opérateur et le positionnement peut varier de 1 à 2 pixels, soit 0,5 à 1 m, selon l'opérateur (reproductibilité) ou pour un même opérateur à différents moments (répétabilité). La forme de l'objet, l'orientation des limites (objets allongés) et le contraste de part et d'autre de celles-ci peuvent aussi influencer la qualité du travail de restitution. Si l'on tient compte de la combinaison de ces facteurs sur la qualité géométrique de la restitution par interprétation de l'orthoimage, la norme de « précision » du cahier de charge s'avère particulièrement sévère et difficile à vérifier.

III.2.2. Résultats et discussion

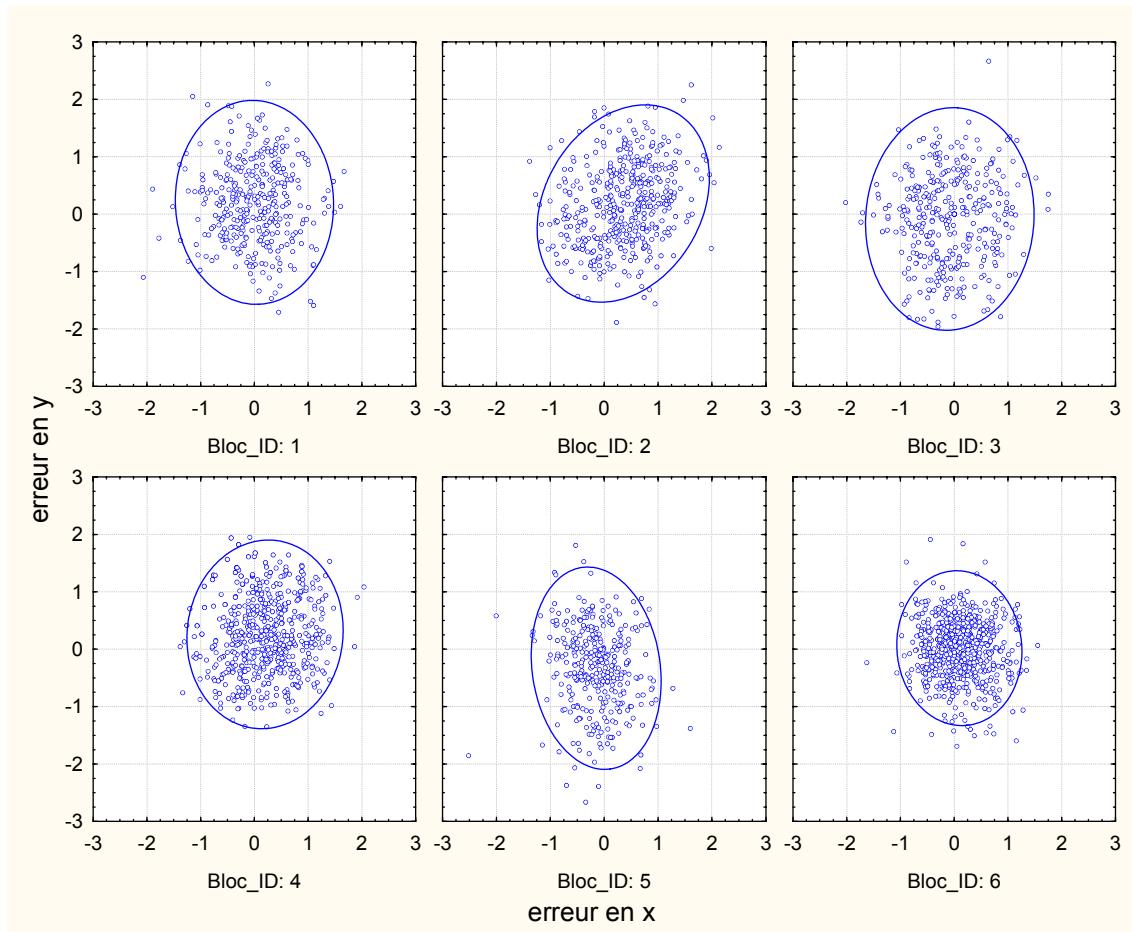
Si l'on agrège les données par bloc, les figures suivantes montrent que l'ensemble des blocs présente une *RMSE (incertitude)* planimétrique toujours acceptable (<1.5 m) avec une valeur nettement plus faible pour le bloc 6.



Variation spatiale de la RMSE (incertitude) planimétrique estimée sur l'orthoimage

En ce qui concerne le biais (inexactitude) mis en évidence par le vecteur-erreur moyen (inexactitude – biais ; position moyenne du nuage de points correspondant à l'ensemble des vecteurs-erreur de chaque maille ou bloc contrôlé), on constate qu'à l'échelle des blocs, il est toujours relativement faible.

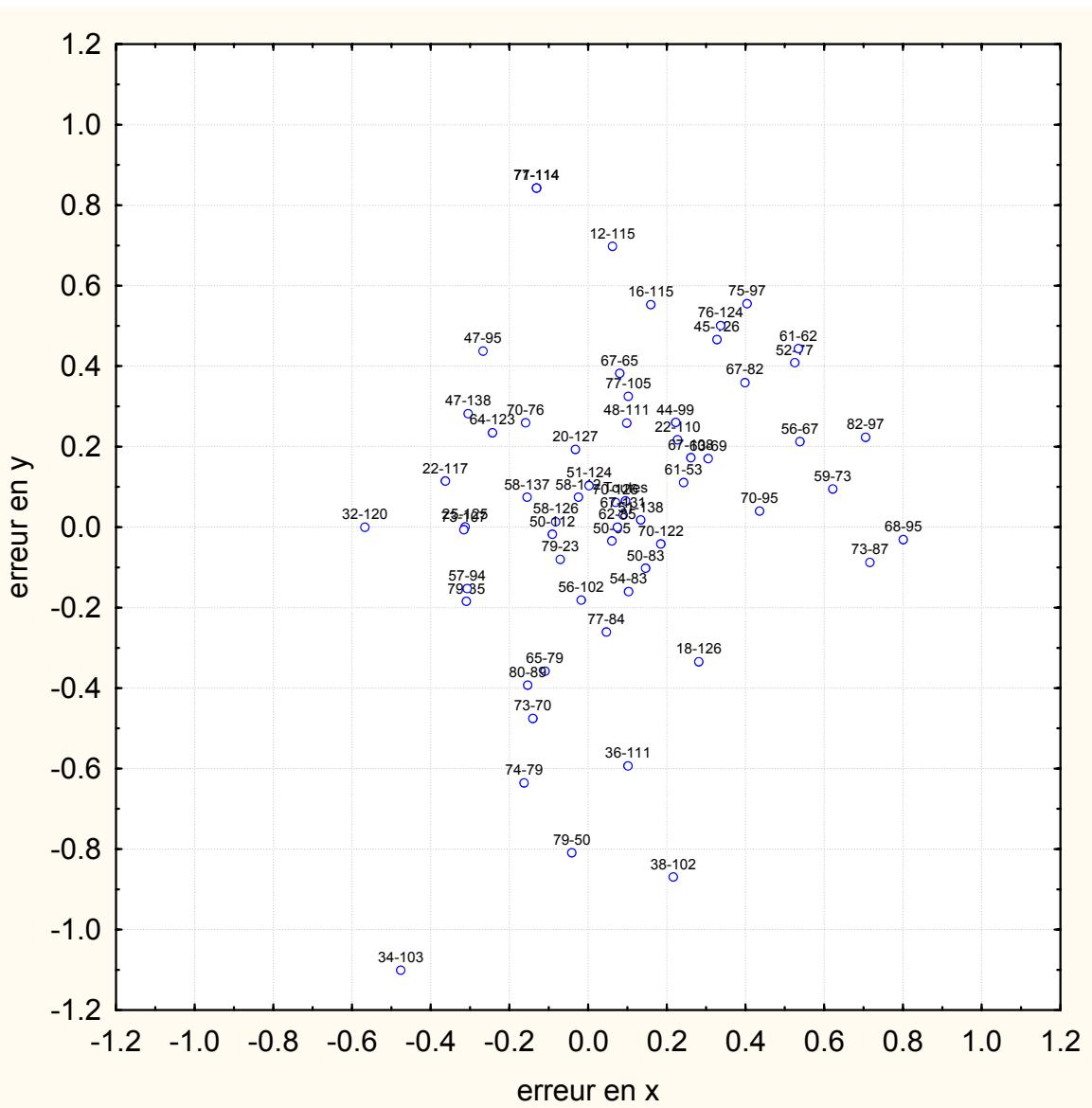
On constate aussi que, pour tous les blocs, les vecteurs-erreur se distribuent de façon quasi isotrope, sauf pour le bloc 5. Ceci signifie que, sauf pour ce bloc, on peut représenter l'imprécision par un cercle de dispersion car il y a indépendance des deux composantes horizontales de l'erreur. De ce point de vue, le bloc 6 montre à nouveau une grande qualité se traduisant par un biais (inexactitude) négligeable et par une très faible dispersion isotrope. Ces constatations illustrées par la figure suivante permettent d'affirmer que la *RMSE* (incertitude) planimétrique est donc assez bien représentative de l'erreur planimétrique dans toutes les directions pour tous les blocs.



Qualité planimétrique : position moyenne (biais - inexactitude) et dispersion (imprécision) des vecteurs-erreur de tous les points de contrôle par bloc. On remarque la qualité exceptionnelle du bloc 6.

Si l'on agrège les données par maille, on remarque que la plupart des mailles présentent une *RMSE* (incertitude) planimétrique satisfaisante, mais l'inexactitude varie d'une maille à l'autre et on constate de façon assez systématique une asymétrie de la dispersion (imprécision) des vecteurs-erreur avec une orientation préférentielle de l'axe de dispersion maximale. A cette échelle d'agrégation spatiale, la *RMSE* (incertitude) planimétrique n'est donc pas représentative de l'erreur dans toutes les directions. Il faut aussi signaler que la maille 34-103 du bloc 3 présente une forte valeur de *RMSE* (incertitude) planimétrique qui s'explique principalement par un biais important et négatif selon l'axe Y.

En ce qui concerne les longueurs individuelles des vecteurs-erreur, aucun point localisable avec une fiabilité satisfaisante ne dépasse la tolérance maximale de 3 m.



Qualité planimétrique : vecteur-erreur moyen de chaque maille (exactitude – biais)

III.3. L'ALTIMETRIE DU MNS

III.3.1. Matériel et méthode

Le contrôle altimétrique du MNS a été réalisé en comparant les altitudes repérées sur le MNS, à celles d'une référence (voir ci-dessous). L'erreur altimétrique signée prise en compte dans ce document, est calculée de la façon suivante :

$$e = Z_{ref} - Z_{MNS}$$

Avec

Z_{ref} = altitude d'un point donné de la référence

Z_{MNS} = interpolation bilinéaire sur le MNS soumis à la validation aux coordonnées du point PICC ou GPS considéré

Une valeur positive de cette erreur correspond donc à une sous-estimation de l'altitude par le MNS et une valeur négative à une surestimation.

Dans ce document de synthèse, nous ne présenterons que les résultats relatifs aux contrôles réalisés à l'aide des références suivantes : le PICC et les points levés par GPS.

1. Points de niveau du PICC (TYPE = 185) : 109191 points du PICC ont été sélectionnés dans les zones dégagées (champs, prairies), sur toutes les parties de blocs couvertes par le PICC. Les valeurs d'inexactitude, d'imprécision, d'incertitude (*RMSE*) et des 5^{ème} et 95^{ème} centiles de l'erreur signée présentées ci-dessous concernent donc toujours des espaces ouverts.
2. Levés GPS de profils topographiques : 1115 points caractérisant différents profils topographiques ont été levés par GPS dans les zones non couvertes par le PICC, c'est-à-dire sur les blocs 3 et 6. Les différents profils présentent des orientations variées et sont localisés en travers de vallées caractéristiques des mailles considérées.

Le tableau 2 montre que les classes de pentes jusque 15% et même au-delà sont très bien représentées dans l'échantillon des points de niveau du PICC. Pour les pentes non-nulles, toutes les classes d'orientation sont aussi très bien prises en compte.

Tableau 2 : Distribution des valeurs de pente et d'orientation pour l'ensemble des blocs contrôlés à l'aide du PICC.

Classes de pente	n
Horizontal	3084
0 - 5% (1)	62282
5 - 10% (2)	29046
10 - 15% (3)	9128
> 15% (4)	5651
Total	109191

Classes d'orientation des pentes non-nulles	n
0-45° (1)	14969
45-90° (2)	12292
90-135° (3)	12690
135-180° (4)	15254
180-225° (5)	10822
225-270° (6)	8874
270-315° (7)	12697
315-360° (8)	18509
Total	106107

Un contrôle à l'aide du LIDAR (cfr lexique) a aussi été réalisé sur certaines mailles, mais nous considérons ce contrôle peu représentatif de la totalité de chacune de ces mailles. En effet, seuls les fonds de vallée peu accidentés et les bas de versants souvent boisés sont représentés par le LIDAR. Un exemple de ce type de contrôle est néanmoins présenté et discuté pour donner une idée des anomalies, types d'erreur et nature de l'information ressortant de la comparaison des deux surfaces, celle du MNS et celle du LIDAR (1^{er} écho).

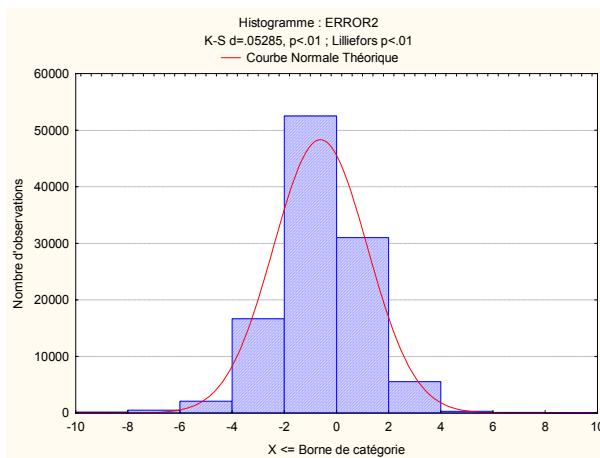
Nous rapportons ci-dessous les résultats de l'analyse de la qualité altimétrique en 4 paragraphes distincts. Le premier est consacré à l'analyse des points de niveau du PICC ; le second, à celle de l'analyse des points GPS et le troisième, à l'analyse comparée de profils topographiques MNS et LIDAR. Le dernier paragraphe concerne quant à lui un complément d'analyse de la qualité, destiné à évaluer l'effet de la pente et de son orientation sur l'exactitude altimétrique.

III.3.2. Qualité altimétrique du MNS sur base du PICC : résultats et discussion

Globalement sur l'ensemble des blocs, on peut constater que le MNS est très précis. Le tableau 3 et la figure qui suit montrent que l'écart-type de l'erreur altimétrique signée ou imprécision vaut 1.80 m. En moyenne, on constate une légère surestimation de l'altitude. La moyenne de cette erreur signée ou inexactitude vaut en effet -0.62 m. La RMSE (incertitude) résultant de ces valeurs d'imprécision et d'inexactitude vaut 1.91 m. Cette valeur respecte la norme de précision la plus sévère applicable aux terrains plats en espace ouvert alors que les pentes supérieures à 10 % représentent 14 % de l'échantillon de points utilisés.

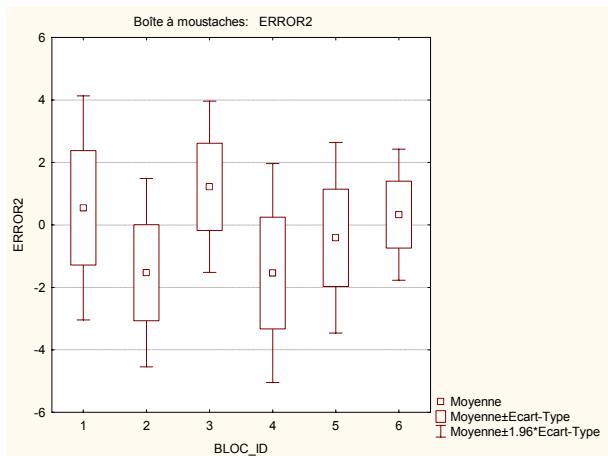
Tableau 3 : Statistiques descriptives de l'erreur altimétrique signée calculée sur les points de niveau du PICC

Erreur altimétrique signée exprimée en m.	Nombre de points	Moyenne (inexactitude - biais)	Minimum	Maximum	Centile 5%	Centile 95%	Ecart-type (imprécision)
	109191	-0.616	-30.453	56.956	-3.351	2.095	1.803



Histogramme des valeurs de l'erreur signée altimétrique sur les points de niveau du PICC

Les valeurs extrêmes (minimum et maximum du tableau 3) de l'erreur signée ont fait l'objet d'un repérage sur les mailles contrôlées car elles sont importantes par rapport à la tolérance de $3 \times RMSE$ (3×2 ou 5 m, selon le contexte). Il s'agit toujours de points situés dans un contexte défavorable : à proximité d'une lisière forestière, d'un arbre isolé, d'une haie, d'un alignement d'arbres, d'un bâtiment, d'un pylône à haute tension, d'un chemin creux très incisé, etc... Ceci est la conséquence de la procédure d'interpolation bilinéaire exploitée pour extraire l'altitude sur le MNS et d'un effet combiné de la méthode d'extraction des altitudes par corrélation d'image et de généralisation du MNS à la résolution de 5 m qui ne permet pas de représenter les très hautes fréquences spatiales (fortes variations d'altitude sur de faibles distances relativement à cette résolution). Deux profils présentés dans le § III.3.3., réalisés sur le MNS et le LIDAR illustrent cette constatation. On remarque aussi que les 5^{ème} et 95^{ème} centiles qui valent respectivement -3.35 et 2.10 m attestent de la faible fréquence de ces *outliers*.



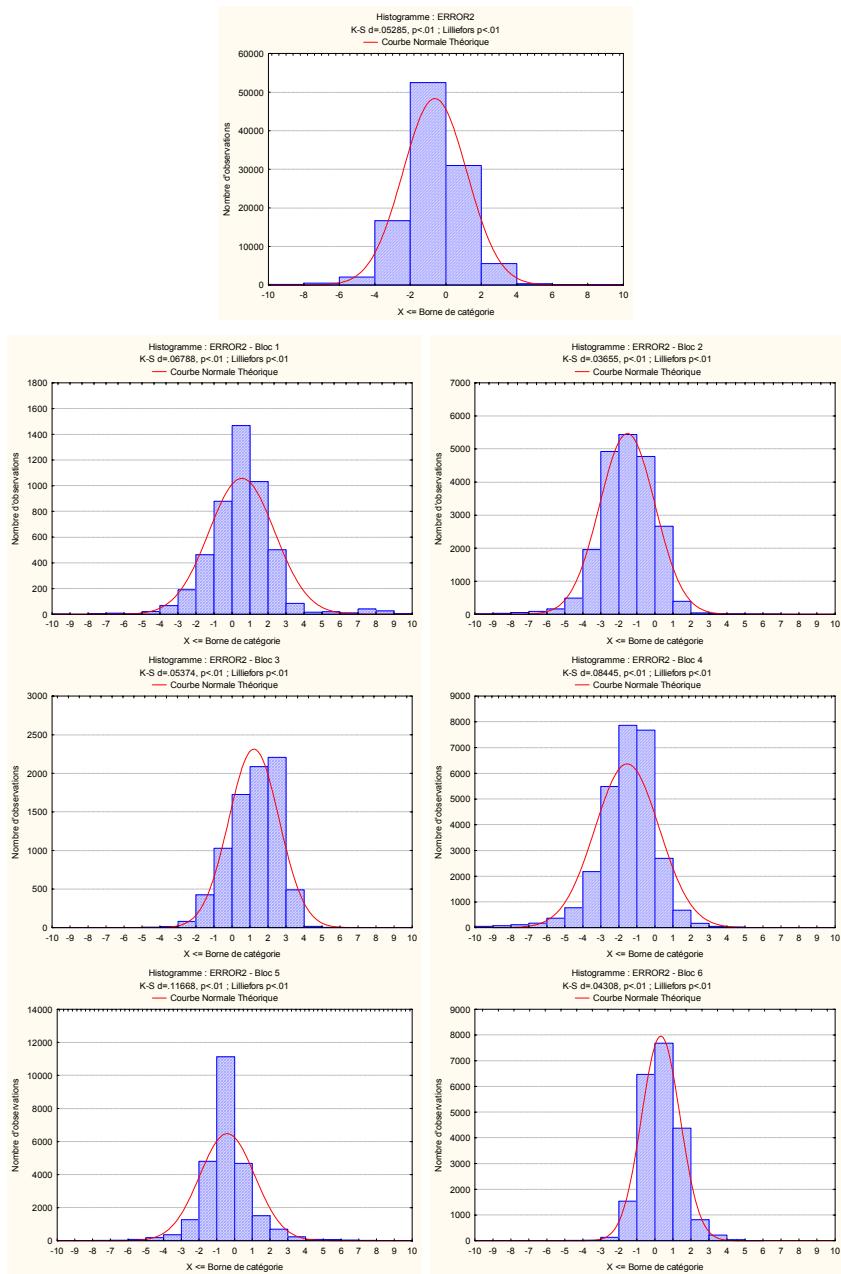
Comparaison de l'exactitude altimétrique (moyenne de l'erreur altimétrique signée) et de la précision (écart-type de l'erreur altimétrique signée) des 6 blocs contrôlés à l'aide des points de niveau du PICC (erreur exprimée en mètres)

Sur la figure qui précède, les points correspondent à l'erreur altimétrique moyenne pour chaque bloc. Il s'agit d'une mesure de l'inexactitude. Les intervalles montrent l'importance de l'imprécision sur l'altitude au sein de chaque bloc : la « boîte » correspond à la « moyenne \pm écart-type » et les « moustaches » correspondent à la « moyenne $\pm 1.96 \times$ écart-type ». Cette figure permet la comparaison des différents blocs. Elle montre que le bloc 6 est nettement le plus précis et le plus exact. Les 5 autres blocs révèlent des précisions moindres et comparables ; les blocs 1 et 4 étant les plus imprécis. L'inexactitude altimétrique (moyenne de l'erreur altimétrique signée) est assez variable d'un bloc à l'autre. Ainsi, sur les blocs 2 et 4, le MNS surestime l'altitude de façon assez importante (erreur moyenne très nettement inférieure à 0). Par contre, sur le bloc 3, l'altitude est assez fortement sous-estimée (erreur moyenne supérieure à 0). Le MNS des blocs 1 et 5 sous-estime et surestime respectivement et légèrement cette altitude (erreur moyenne proche de 0).

Les histogrammes de l'erreur signée présentés ci-dessous montrent aussi des situations assez variables d'un bloc à l'autre avec des distributions assez proches de la normalité pour les blocs 1, 2, 5 et 6. Les classes modales y confirment les inexactitudes mises en évidence par la moyenne de l'erreur signée. Par contre, pour les blocs 3 et 4, la distribution est plutôt asymétrique avec un mode moins prononcé et supérieur. Ces décalages correspondent à une sous-estimation pour le bloc 3 et à une surestimation pour le bloc 4.

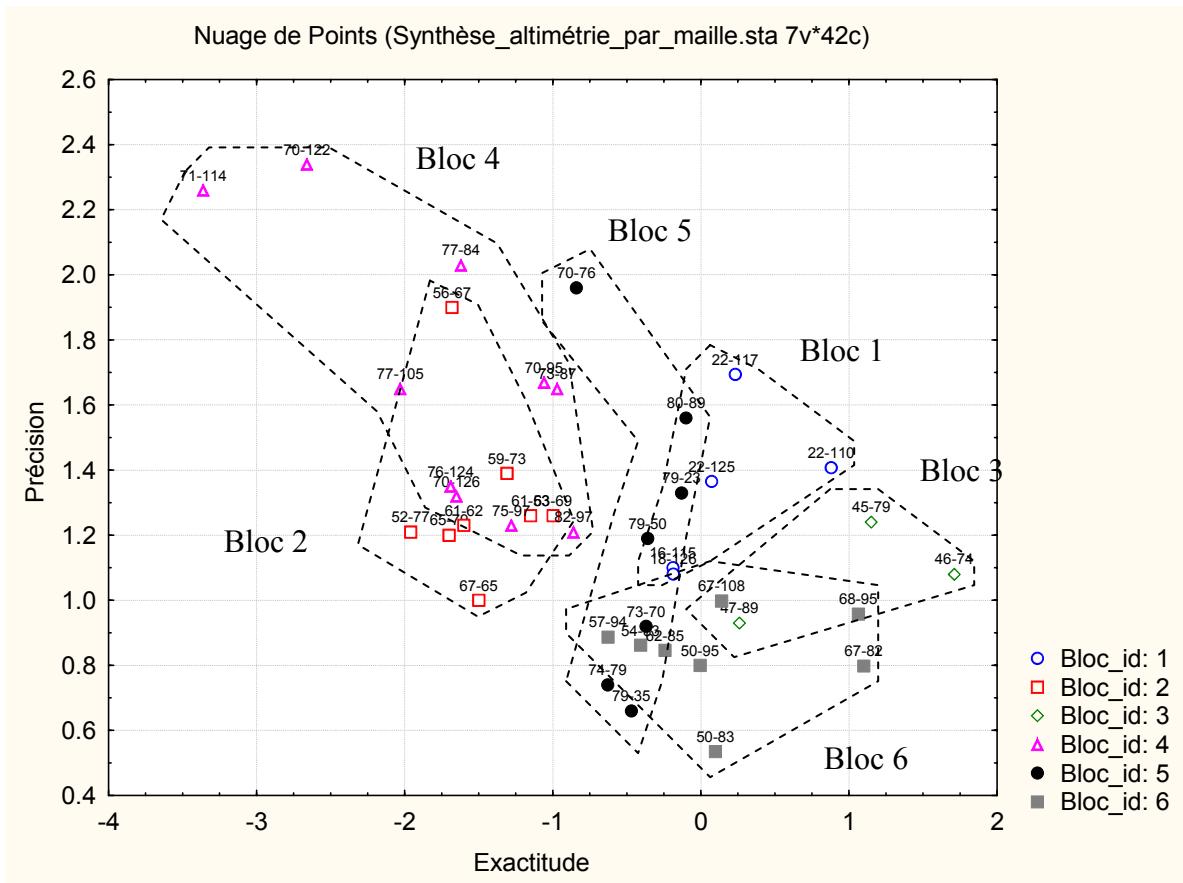
Tableau 4 : Valeurs de l'inexactitude (moyenne), l' imprécision (écart-type, l'incertitude (RMSE) altimétriques et des 5^{ème} et 95^{ème} centiles de l'erreur altimétrique signée pour tous les blocs contrôlés à l'aide des points de niveau du PICC

Erreur altimétrique signée						
Bloc_id	n	Inexactitude (moyenne)	Imprécision (écart-type)	Incertainitude (RMSE)	Centile 5%	Centile 95%
tous	109191	-0.616	1.803	1.905	-3.351	2.095
1	4852	0.545	1.831	1.910	-2.163	2.870
2	21095	-1.531	1.539	2.171	-3.823	0.628
3	8108	1.219	1.398	1.855	-1.230	3.085
4	28520	-1.542	1.787	2.360	-4.237	0.658
5	25278	-0.413	1.557	1.611	-2.420	1.937
6	21338	0.327	1.070	1.118	-1.205	2.015



Histogrammes de l'erreur altimétrique signée pour l'ensemble des blocs et par bloc contrôlés à l'aide des points de niveau du PICC

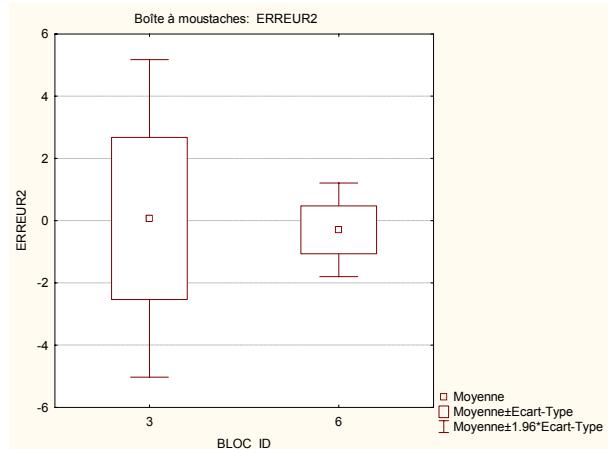
Une analyse plus détaillée portant sur la comparaison de l'inexactitude et de l'imprécision des différentes mailles est illustrée par la figure suivante qui met en évidence l'homogénéité spatiale inter-mailles au sein des blocs 1, 2 (sauf pour une maille) et 6 pour les deux paramètres (inexactitude et imprécision). Pour le bloc 4, l'hétérogénéité spatiale est forte pour les deux paramètres. Le bloc 5 montre une forte hétérogénéité spatiale de l'imprécision, mais une forte homogénéité de l'inexactitude (valeurs proches de 0). C'est plus difficile de se prononcer pour le bloc 3 pour lequel seules 3 mailles ont été contrôlées à l'aide de données du PICC.



Imprécision et inexactitude par maille et bloc. En étiquette, l'identifiant des mailles. En tireté, dispersion des mailles de chaque bloc.

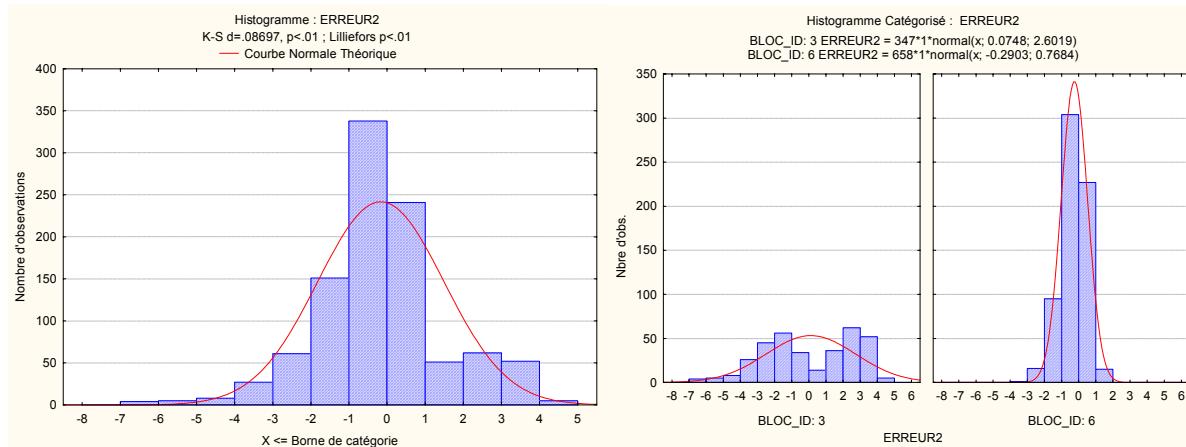
III.3.3. Qualité altimétrique du MNS sur base de levés GPS : résultats et discussion

En ce qui concerne les contrôles réalisés à l'aide des levés de profils par GPS, les paramètres d'imprécision, d'inexactitude et d'incertitude (*RMSE*) par bloc traduisent une très bonne qualité altimétrique avec des inexactitudes (moyenne de l'erreur altimétrique signée) de 0.075 m pour le bloc 3 et -0.290 m pour le bloc 6 (voir figure ci-dessous). Par contre, on constate une meilleure précision (écart-type de l'erreur altimétrique signée) pour le bloc 6 que pour le bloc 3.



Comparaison de l'exactitude et de la précision des blocs 3 et 6 contrôlés à l'aide des profils levés par GPS

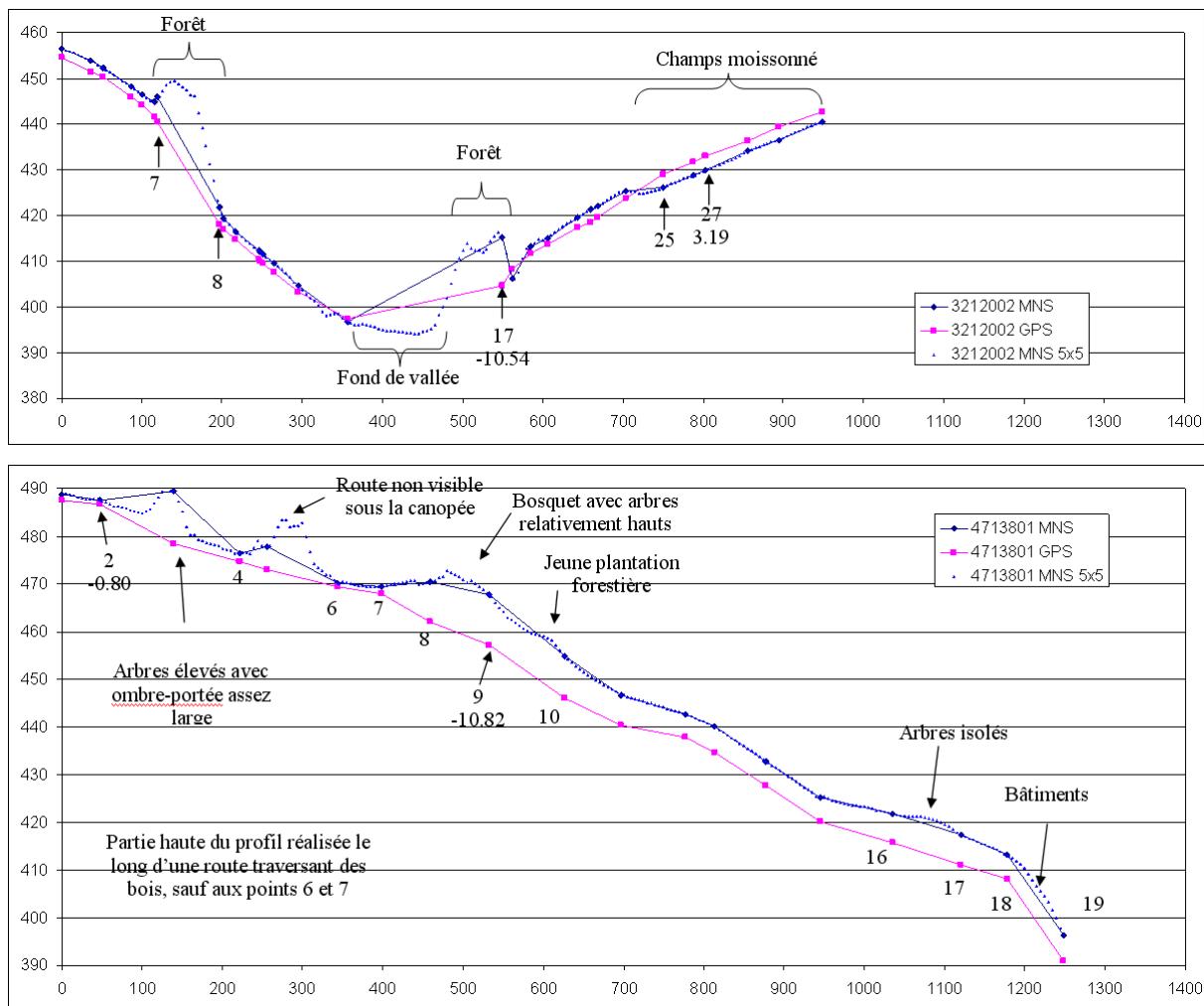
Cette différence de précision est due à une distribution nettement bimodale pour les valeurs d'erreur signée du bloc 3 résultant d'un groupe de profils montrant une surestimation systématique de l'altitude par le MNS et, un autre groupe, montrant plutôt une sous-estimation systématique (voir figure suivante). Le premier groupe correspond au mode d'erreur signée < 0. Ces profils ont une pente préférentiellement orientée vers les secteurs septentrionaux. Le second groupe correspond au mode d'erreur signée > 0 apparaissant plutôt sur des profils en pente vers le Sud et le Sud-Est. Cette constatation met en évidence un effet probable de la pente et de son orientation sur l'erreur altimétrique (voir § III.3.5).



A gauche : histogramme de l'erreur altimétrique signée de l'ensemble des 2 blocs contrôlés à l'aide des profils levés par GPS – A droite : histogrammes de l'erreur altimétrique signée par bloc contrôlé à l'aide de ces profils.

Au sein de chacun de ces 2 groupes de profils, les figures suivantes montrent cependant que la surface est restituée avec une grande précision. Les profils levés par GPS et les profils extraits du MNS sont conformes sauf dans les contextes de fortes variations d'altitude : à proximité de limites forestières, bâtiments, chemins creux ou en remblai.

Signalons néanmoins que sur chaque profil levé dans un contexte topographique en pente relativement forte, la *RMSE* respecte toujours la norme de 5 m spécifiée au Cahier Spécial des Charges avec des erreurs individuelles ne dépassant pas, en valeur absolue, 3 fois cette valeur.



Deux comparaisons de profils extraits du MNS selon les points levés par GPS (courbe et points de couleur bleue) et de profils restitués à l'aide des altitudes levées par GPS en ces points (courbe et points de couleur fuchsia). Le profil extrait sur le MNS par pas de 5 m, la résolution du MNS (pointillé de couleur bleue), montre la représentativité des points levés.

Enfin, l'analyse de ces profils montre la grande sensibilité du MNS à des différences d'altitude parfois faibles, liées, par exemple, à l'existence d'une végétation haute sur un champ cultivé, comme cela est illustré par les 2 figures suivantes.

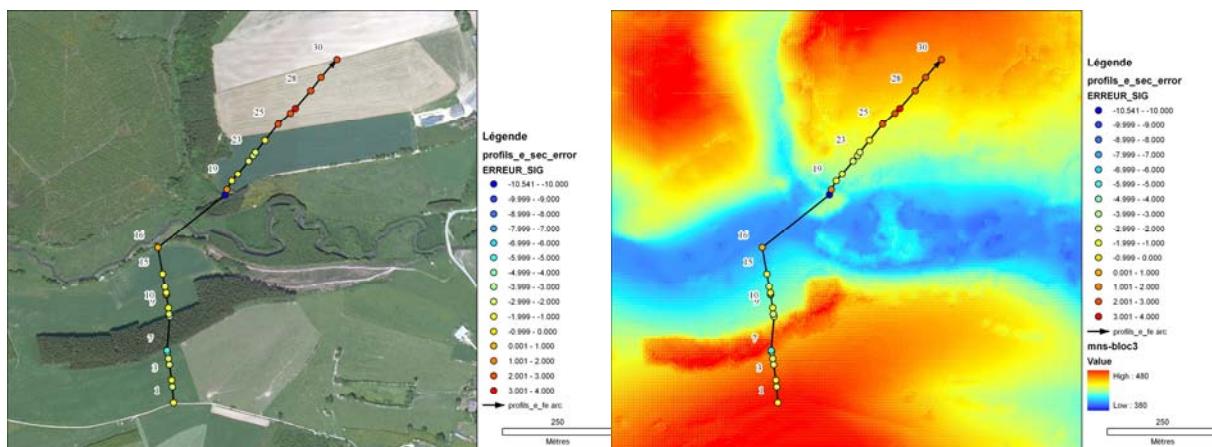
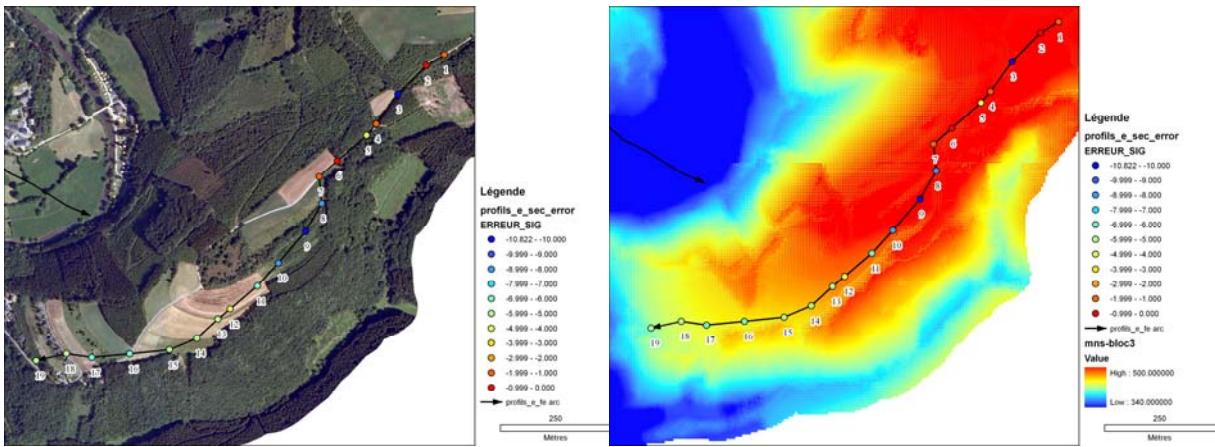


Illustration de l'effet de différents facteurs locaux influençant l'exactitude sur les profils topographiques levés par GPS : effet de la hauteur de la végétation sur les champs cultivés et effet de la proximité de la forêt. Cette illustration permet aussi de montrer la représentativité des points levés.

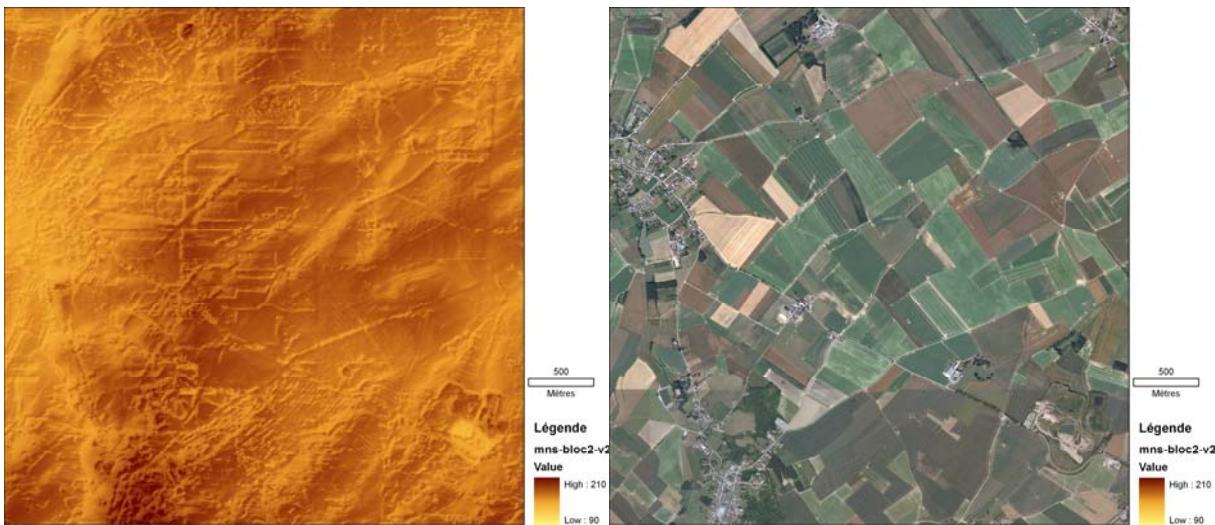
Bloc 3 - Partie Est - Maille 32-120 - profil topographique 3212002



Autre illustration par un profil topographique levé par GPS montrant, d'une part, la bonne précision de la surface restituée (conformité des deux profils) et, d'autre part, l'inexactitude (surestimation) systématique qui ne remet cependant pas en cause la qualité du MNS. Les effets d'une route, d'arbres, de leur ombre portée et d'un bosquet sont aussi illustrés par ce profil.

Bloc 3 - Partie Est – Maille 47-138 - profil topographique 4713801

Par ailleurs, le MNS estompé (cfr lexique) reproduit ci-après montre une série de structures caractérisées par des variations d'altitude brutales mais d'amplitude relativement faible vis-à-vis des normes de précision exigées. Ces structures résultent probablement de différents effets. On peut ainsi citer l'effet probable des structures cycliques liées aux labours perturbant parfois la recherche de points homologues. Il y a cependant d'autres structures régulières dont l'origine est différente et inexplicable par la morphologie ou les variations de couleur, liées à la nature de la couverture du sol. Parfois, elles sont en relation avec les raccords entre prises de vue mosaïquées et ne sont pas directement explicable par les structures régulières au sein des images exploitées pour réaliser le MNS. Elles sont probablement liées à la procédure de production du MNS.



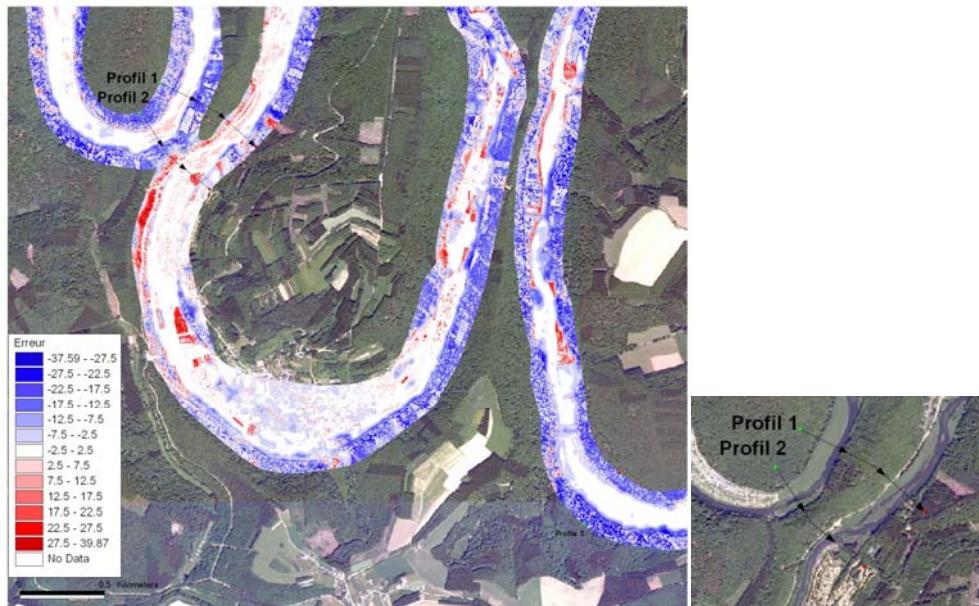
MNS estompé (exagération de l'altitude 1x) et orthoimage illustrant différents types de structure apparaissant sur le MNS et caractérisées par des variations d'altitude brutales mais d'amplitude relativement faible.. Dans certains champs, elles sont liées aux structures cycliques des labours influençant probablement la recherche de points homologues ou en relation avec les limites de parcelles et le réseau de routes et chemins.

III.3.4. Qualité altimétrique du MNS sur base de profils LIDAR : résultats et discussion

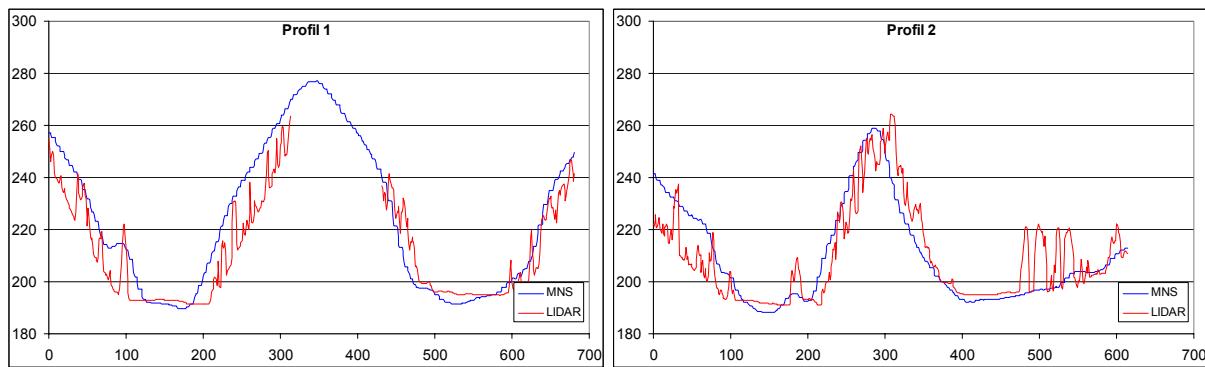
L'analyse des images (cartes) d'erreur calculée à partir de la référence LIDAR et la comparaison de profils LIDAR aux profils extraits du MNS, confirment certains effets déjà présentés et montrent d'autres effets qui mettent en évidence la sensibilité du MNS aux coupes à blanc, aux replantations forestières, à la croissance de la végétation forestière, par exemple.

Sur les documents qui suivent, on peut aussi observer un effet de bordure en lisières forestières qui sont mal définies sur le MNS, par exemple. En forêt, le MNS représente la surface enveloppe du modèle LIDAR. Les caractéristiques géométriques de cette surface semblent aussi être dépendantes de la nature du couvert forestier (essence, densité, hétérogénéité). Comme nous l'avons déjà évoqué, nous constatons sur les profils présentés ci-dessous que l'erreur altimétrique sur les pentes fortes est aussi probablement influencée par l'erreur planimétrique. L'analyse de l'effet de la pente et de son orientation sur la précision altimétrique faisant l'objet du § III.3.5. est donc justifiée. Cependant, il faut rappeler que la géométrie du modèle LIDAR servant ici de référence n'a été validée qu'en plaine alluviale et que sa précision sur les versants n'a pas été certifiée.

Concernant la procédure de validation à l'aide du LIDAR, rappelons enfin qu'elle n'a plus été utilisée à partir du bloc 4 car le modèle LIDAR des fonds de vallée et des pieds des versants n'a pas été considéré suffisamment représentatif de l'ensemble de la maille.



Maille 27-97 du bloc 1 : image d'erreur altimétrique signée (différence entre l'altitude du LIDAR-1^{er} écho et l'altitude du MNS ; ce calcul a été réalisé à la résolution du LIDAR ; le MNS a donc été rééchantillonné au plus proche voisin à la résolution de 1 m). Les deux profils présentés ci-dessous sont localisés dans le Nord-Ouest de cette maille .



Deux profils illustrant l'effet probable d'une inexactitude planimétrique combinée à la pente et à son orientation sur l'inexactitude altimétrique du MNS. Ces profils montrent aussi l'effet de lissage des limites (lisière) sur le MNS à 5m de résolution. Au dessus des forêts, la surface représentée par le MNS correspond assez fidèlement (en faisant abstraction de l'inexactitude) à une surface enveloppe du sommet des arbres en raison d'un effet de généralisation spatiale lié à la méthode de production du MNS et à sa résolution de 5 m. Il semble aussi que l'essence forestière influence la qualité de l'information altimétrique du MNS (voir image d'errur de la figure précédente). On peut aussi observer sur le profil 2 à l'abscisse 500 m l'influence de la modification du paysage : coupes forestières et replantations. L'effet de la croissance des arbres entre le moment du vol LIDAR et du vol destiné à la production du MNS est aussi visible ailleurs sur la figure précédente...

III.3.5. L'erreur altimétrique en fonction de la pente et de l'orientation : résultats et discussion

Les données utilisées sont des points de niveau (TYPE = 185) du PICC sélectionnés dans les zones dégagées (champs, prairies). Sur l'ensemble du territoire wallon, 109191 observations ont ainsi été traitées.

La méthode utilisée est une analyse de variance à un et deux facteurs. La variable sur laquelle porte cette analyse de variance est l'erreur signée (définition au paragraphe III.3.1.), soit la variable à expliquer. Les variables explicatives catégorielles sont la pente et l'orientation.

La pente est le résultat de l'application de la fonction SLOPE (en %) de ArcMap au MNS filtré et l'orientation est celui de l'application de la fonction ASPECT à ce même MNS filtré. Ce dernier est le résultat d'un filtrage focal médian du MNS faisant l'objet de la validation en utilisant une fenêtre circulaire de 11 pixels de diamètre. Cette opération a pour but d'éliminer les hautes fréquences.

Les classes de pente et d'orientation sont définies dans le paragraphe III.3.1. Leur distribution y est aussi présentée.

Deux niveaux d'agrégation spatiale ont été étudiés : un premier niveau, global, pour lequel tous les blocs ont été pris en compte dans une même analyse et un second niveau où une analyse a été menée sur chaque bloc individuellement. Seuls les résultats concernant l'analyse sur l'ensemble des blocs seront présentés dans ce document. Néanmoins, quelques constatations résultant de l'analyse par bloc seront formulées..

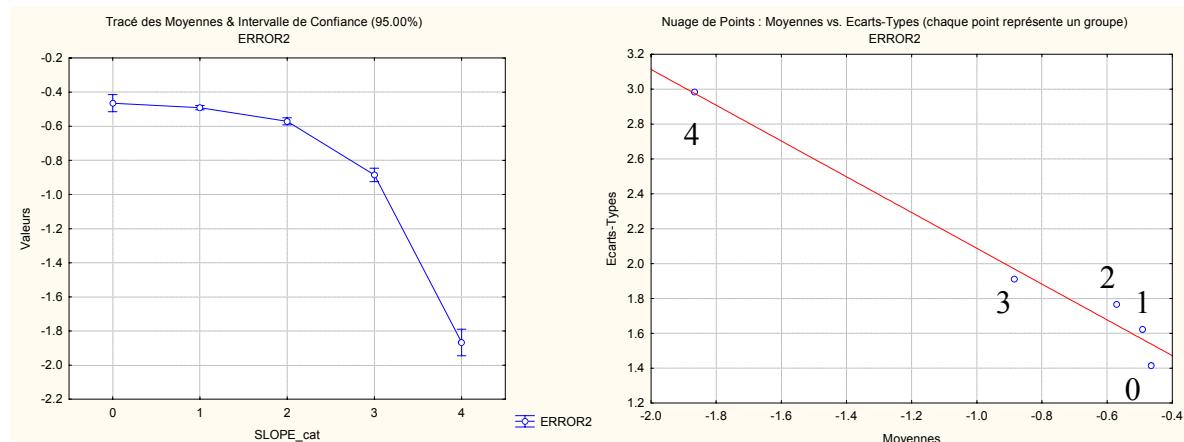
III.3.5.1. Analyse de variance à 1 facteur explicatif, la PENTE : résultats

Les résultats de cette analyse de variance sont reportés dans le tableau ci-dessous, alors que la figure qui suit montre l'effet de la pente sur l'erreur signée et la façon dont varie la précision (écart-type) en fonction de l'exactitude (moyenne) ; toutes deux étant estimées par classe de pente.

Tableau 5 : Résultats de l'analyse de variance à 1 facteur explicatif, la pente, sur l'ensemble des blocs.

Somme des carrés effet	dl effet	Carré moyen effet	Somme des carrés erreur	dl erreur	Carré moyen erreur	F	p
10608.15	4	2652.037	344228.4	109186	3.152679	841.2013	0.00

Les résultats de l'analyse de variance font ressortir que la pente influence significativement l'erreur signée sur l'ensemble des blocs ($p << 5\%$). La figure ci-dessous à gauche montre que l'accroissement de pente produit un accroissement de l'inexactitude en valeur absolue. Elle est toujours négative si on tient compte du signe. En moyenne, il y a donc toujours une surestimation de l'altitude par le MNS. Elle est faiblement négative pour les classes 0, 1 et 2, soit pour les pentes inférieures à 10%, et devient nettement, puis très nettement, négative pour les classes 3 et 4, soit les pentes supérieures à 10%. La figure ci-dessous à droite montre, par ailleurs, que l'imprécision estimée par classe de pente, varie quasi-linéairement en fonction de l'inexactitude estimée aussi par classe de pente. Pour les pentes très fortes, l'imprécision et l'inexactitude sont très importantes. Pour les pentes plus faibles, l'imprécision diminue et l'inexactitude aussi.



*Effet de la pente sur l'erreur altimétrique signée pour l'ensemble des blocs.
Sur le graphique de gauche, l'intervalle de confiance est défini au niveau 95%.
Les étiquettes du graphique à droite correspondent aux codes des classes de pente.*

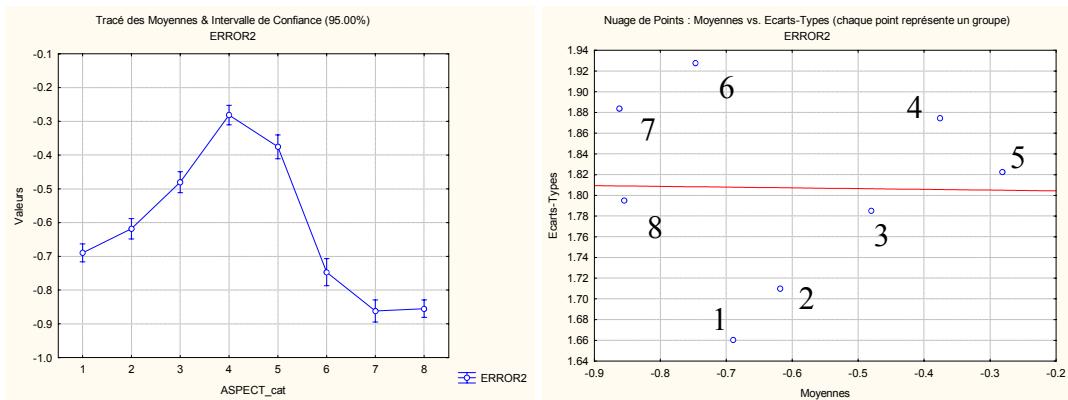
III.3.5.2. Analyse de variance à 1 facteur explicatif, l'ORIENTATION : résultats

Les résultats de cette analyse de variance sont exprimés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 6 Résultats de l'analyse de variance à 1 facteur explicatif, l'orientation

Somme des carrés effet	dl effet	Carré moyen effet	Somme des carrés erreur	dl erreur	Carré moyen erreur	F	p
4621.320	7	660.1885	343975.7	106099	3.242026	203.6346	0.00

Cette analyse de variance fait ressortir que l'orientation des pentes influence significativement l'erreur signée sur l'ensemble des blocs ($p << 5\%$ - tableau 6). La figure suivante montre que le MNS est de meilleure qualité pour les orientations méridionales. On observe également que la précision ne varie pas linéairement en fonction de l'exactitude.



Effet de l'orientation sur l'erreur altimétrique signée pour l'ensemble des blocs.

Sur le graphique de gauche, l'intervalle de confiance est défini au niveau 95%.

Les étiquettes du graphique à droite correspondent aux codes des classes d'orientation.

III.3.5.3. Analyse de variance à 2 facteurs explicatifs, la PENTE et l'ORIENTATION : résultats

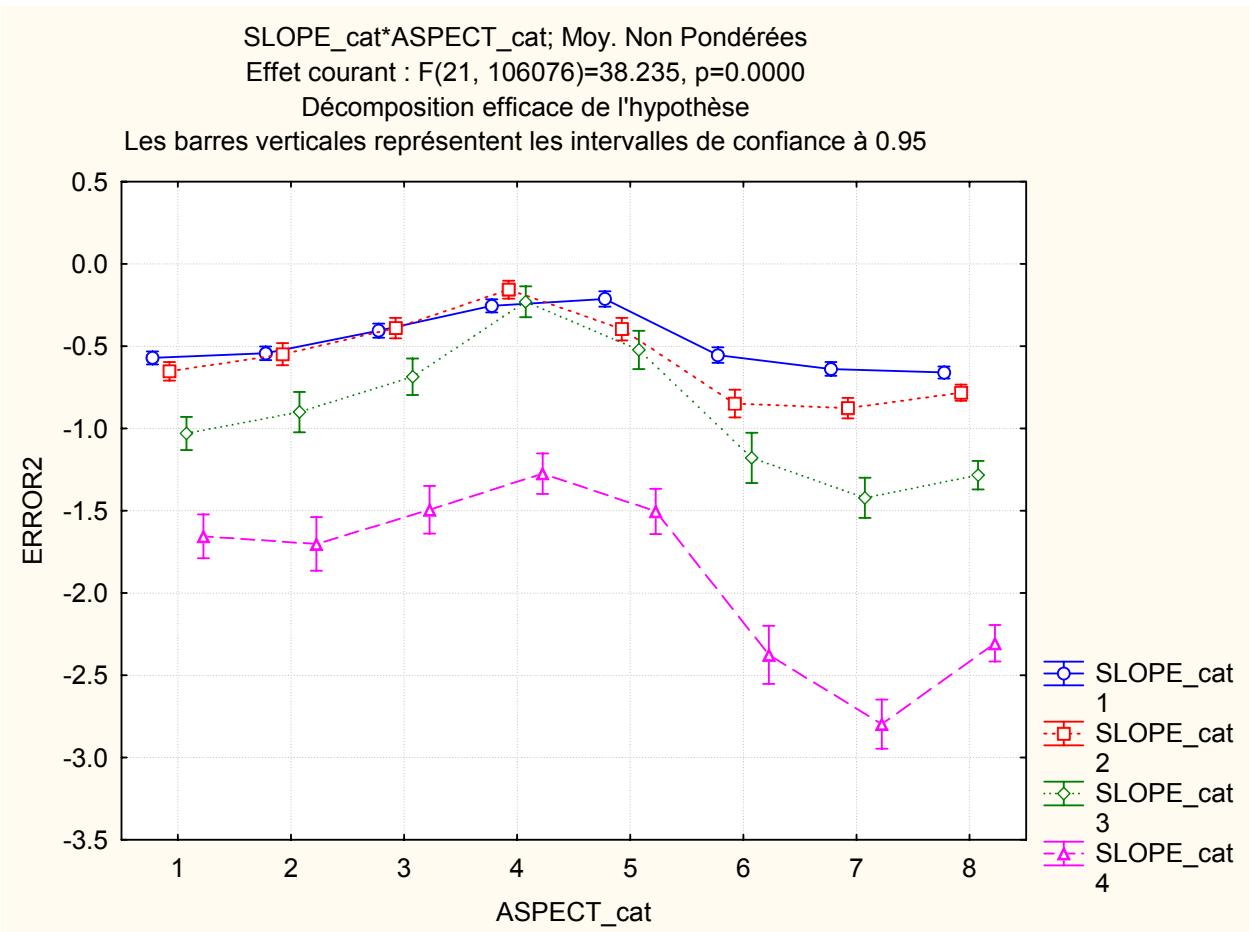
Les résultats de cette analyse de variance sont présentés dans le tableau ci-dessous. Bien entendu, cette analyse ne porte que sur 106107 points d'observation où la pente n'est pas nulle.

Tableau 7 : Résultats de l'analyse de variance à 2 facteurs explicatifs, la pente et l'orientation, sur l'ensemble des blocs.

	Somme des carrés	dl	carré moyen	F	p	Eta-deux partiel
Pente	7846.6	3	2615.542	745.0674	0.00	0.020637
Orientation	6967.6	7	995.366	283.5414	0.00	0.018367
Pente et orientation,	2818.7	21	134.222	38.2347	0.00	0.007513
Erreur	372377.3	106076	3.510			

Le tableau 7 montre que les effets de la pente, de l'orientation et de leur interaction sur l'erreur altimétrique signée sont significatifs pour l'ensemble des blocs ($p > 5\%$). Toutefois, ces résultats montrent aussi que l'effet de la pente est dominant (Eta-deux partiel $\sim 2\%$) par rapport à l'effet de l'orientation (Eta-deux partiel $\sim 1.8\%$) ou de la combinaison des deux facteurs (Eta-deux partiel $\sim 0.7\%$).

La figure suivante montre que l'erreur évolue selon un modèle similaire en fonction de l'orientation des pentes, quelque soit la classe de pente. Seule l'amplitude diffère en fonction des classes de pente. Plus les pentes deviennent importantes, plus on observe une différence significative d'inexactitude, en particulier pour les pentes $> 15\%$. L'effet de l'orientation sur l'inexactitude pour les deux classes de pentes $< 10\%$ est comparable pour les classes d'orientation 1, 2, 3, 4 et 8, soit les pentes orientées vers le NNE, ENE, ESE, SSE et NNW. Par contre, pour les classes 5, 6 et 7 soit les pentes orientées vers le SSW, WSW et WNW, on observe une légère différence significative entre ces deux classes de pentes.



Effets de la pente et de l'orientation sur l'erreur altimétrique signée pour l'ensemble des blocs. L'analyse de variance à deux facteurs n'a porté que sur les pentes non-nulles. Le nombre d'observations pris en compte est donc réduit à 106107. Les intervalles de confiance sont définis au niveau 95%.

III.3.5.4. Discussion

L'analyse de variance fait ressortir de façon évidente que la pente et son orientation influencent significativement la valeur de l'erreur signée. L'interaction entre ces deux facteurs joue aussi un rôle significatif. **La pente a toutefois un effet dominant** sur l'erreur par rapport aux autres facteurs. La signification de ces effets est bien-entendu clairement liée au grand nombre d'observations prises en compte. Il détermine en effet des erreurs-standard très faibles, mais l'imprécision par classe de pente, classe d'orientation et classe de pente-orientation est relativement importante vis-à-vis des différences d'inexactitude constatées.

L'analyse de variance à un facteur, la pente, montre également qu'il existe une relation entre l'imprécision et l'inexactitude, chacune étant estimée par classe de pente. Plus la pente augmente, plus le MNS est imprécis et plus l'inexactitude devient fortement négative. Le MNS surestime donc d'autant plus l'altitude que la pente croît.

Néanmoins, il est à noter que la façon dont ces facteurs influencent l'erreur varie d'un bloc à l'autre. Il est donc impossible de fournir un modèle unique représentatif de l'ensemble du territoire. En effet, un facteur n'a pas été pris en considération dans cette analyse. Il s'agit de la variation spatiale de l'erreur indépendamment de la pente et de son orientation. Le passage d'une prise de vue à l'autre induit très probablement une variabilité de la longueur et de l'orientation de la composante horizontale de l'erreur géométrique. L'effet de l'orientation peut donc varier en fonction de la position des raccords affectés par cette erreur planimétrique. Cette variation spatiale de l'erreur n'a pas été prise en compte dans l'analyse car elle nécessiterait un échantillonnage spatialement plus représentatif de la zone étudiée qui n'était pas envisageable. Il ne faut donc pas se fier aux modèles de variation de l'erreur en fonction de l'orientation tels qu'ils ont été calculés dans ce paragraphe.

IV. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Au cours des années 2006-2007, la Direction Générale de l’Agriculture (IG2) a renouvelé les orthoimages numériques aériennes (ex-PPNC) et a produit un Modèle Numérique de Surface (MNS) par aérorphotogrammétrie sur l’ensemble du territoire wallon. Un contrôle de la qualité a été effectué sous la responsabilité de Y. Cornet à l’Unité de Géomatique de l’Université de Liège, lequel a porté sur trois critères principaux : la radiométrie, la planimétrie et l’altimétrie.

Le découpage du territoire wallon en blocs pour l’étude du contrôle qualité est présentée au § I et la description générale des produits (techniques de production, format, etc...), au § II.

IV.1. LA RADIOMETRIE DE L’ORTHOIMAGE

Le contrôle de la qualité radiométrique a porté sur une sélection de 60 mosaïques de 9 mailles de 2km sur 2 km, centrées sur une maille de référence. Le choix des mailles de référence a été réalisé en respectant la représentativité spatiale de l’échantillon. Par ailleurs, chaque maille a été caractérisée par l’occupation prédominante du sol (sols urbanisés – cultures et prairies – forêts – pas de prédominance) et l’énergie du relief. Les mailles ont donc aussi été sélectionnées afin d’assurer au mieux la représentativité de l’échantillon vis-à-vis de la diversité des contextes d’occupation du sol et de relief au sein des différents blocs.

Le contrôle a été effectué selon deux méthodes distinctes exposées dans les § III.1.2. et III.1.3. : une approche quantitative (statistiques mono et bivariées, histogramme) ainsi qu’une approche qualitative et semi-quantitative (détection du flou, d’anomalies, du bruit, etc.). Ces deux méthodes ont été appliquées à l’échantillon de 60 mailles de référence sur l’ensemble du territoire wallon.

L’étude montre qu’une dynamique importante dans les 4 canaux, un taux de saturation nettement inférieur à 1%, le flou, le bruit et le voile atmosphérique négligeables, ainsi que la bonne perception des détails dans les ombres, sont autant d’éléments qui permettent de qualifier de « **très bonne** » à « **excellente** » la **qualité radiométrique de l’orthoimage**. L’ensemble de l’échantillon contrôlé répond aux normes de qualité du Cahier Spécial des charges définies pour une utilisation destinée à la Direction Générale de l’Agriculture (exploitation visuelle pour l’encodage du parcellaire agricole, impression de photoplans, etc.). A noter que la qualité radiométrique des vols 2007 est supérieure à celle des vols 2006.

Sur l’orthoimage des vols de 2006, la perception de raccords entre prises de vue peut constituer un facteur gênant pour certaines utilisations car ils se manifestent par une altération des couleurs et de légers décalages planimétriques. Il semble que cette perturbation soit d’autant plus prononcée dans des contextes d’occupation du sol diversifiée et affecte plus particulièrement des surfaces de nature marginale (champs très réflectifs, plans d’eau). Toutefois, la procédure adoptée lors du mosaïquage dans des prises de vue des vols 2007 (égalisation radiométrique progressive, lissage et découpage irrégulier) rend les raccords beaucoup moins perceptibles.

Les déformations locales présentes sur certaines mailles analysées peuvent constituer un autre facteur contraignant. Celles-ci apparaissent au niveau de structures linéaires dans des contextes de forte variabilité spatiale d’altitude. Ces déformations sont visibles au niveau de routes qui traversent des zones forestières, de routes en déblais ou de ponts. Ce type de déformations affecte probablement aussi les zones dégagées en lisière forestière mais sont bien entendu difficilement observables.

L’étude réalisée permet de conclure que l’analyse visuelle est permise sur l’ensemble du territoire wallon et que le contraste local de part et d’autre des raccords est suffisant pour réaliser une photo-interprétation assistée par ordinateur, du parcellaire agricole, forestier ou de l’occupation du sol en général. Il s’agit en effet de documents numériques et les altérations radiométriques décrites ci-dessus et relatives à ces images de 2006 peuvent, par exemple, être compensées par des techniques d’accentuation de contraste adéquates. L’exploitation visuelle des vols 2007 est très nettement améliorée par rapport aux vols 2006 car ces précautions ne sont pas nécessaires. Rappelons ici qu’il

s'agit de documents numériques et qu'il est donc localement possible (mais pas recommandable globalement) d'adapter la palette de couleur pour percevoir les structures du côté du raccord le plus affecté.

L'analyse montre également que l'altération des teintes, de la saturation et de l'intensité de part et d'autre des raccords est importante et empêche une exploitation numérique de l'orthoimage dans son état actuel sur l'ensemble du territoire wallon pour les vols 2006 en particulier (réalisation de classifications, par exemple). Malgré la nette amélioration de qualité radiométrique entre les vols 2006 et 2007, nous ne pouvons pas nous prononcer en faveur de l'exploitation numérique de ces derniers. Toutefois, une exploitation numérique locale est envisageable si l'on tient compte des limites des prises de vues mosaïquées.

A noter également les dates de vol à des saisons différentes : juin, juillet, septembre en 2006 et avril en 2007. Cette différence peut avoir un impact pour un usage forestier notamment (stades phénologiques différents).

IV.2. LA PLANIMETRIE

Le contrôle planimétrique a été réalisé en comparant les coordonnées planimétriques repérées sur l'orthoimage, à celles d'une référence. La référence est soit le PICC, soit des points remarquables levés par GPS. Les erreurs résultant de la comparaison des coordonnées repérées sur l'orthoimage à celles de référence (PICC+GPS) ont été analysées globalement.

Le contrôle de la planimétrie a porté sur 64 mailles de 2 km x 2 km sur l'ensemble des blocs, ce qui représente 2687 points. Le choix des mailles a été réalisé en respectant la représentativité spatiale de l'échantillon ainsi que celle des différents contextes caractérisés par l'énergie du relief, surtout, et l'occupation du sol, dans une moindre mesure.

L'étude montre que l'ensemble des blocs contrôlés présente une **RMSE planimétrique toujours inférieure à 1.5 m** avec des valeurs nettement plus faibles pour le **bloc 6 (RMSE < 1 m)** (voir figure §III.2.2). Pour tous les blocs, les extrémités des vecteurs-erreur se distribuent de façon quasi isotrope autour du vecteur-erreur moyen. La dispersion pour le bloc 6 est particulièrement faible. Dans tous les cas, l'erreur moyenne (inexactitude – biais) est très faible ; la RMSE peut donc être considérée comme indicative de l'incertitude ou de l'imprécision à l'échelle des blocs. Cette dispersion isotrope permet aussi de conclure à une indépendance des deux composantes de l'erreur planimétrique.

Au sein de chaque maille, des incohérences géométriques de part et d'autre de raccords entre prises de vue sont observables au niveau de routes ou de limites. Leur ordre de grandeur de 1 à 2m, constitue un argument défavorable pour la qualité planimétrique, mais aucun point de contrôle ne présente une RMSE individuelle supérieure à 3 fois la norme maximale de 1 m, comme exigé dans les normes de qualité du Cahier Spécial des charges. Cette variabilité spatiale de l'erreur planimétrique se traduit, à une échelle d'agrégation plus fine que le bloc, soit celle de la maille, par les deux conséquences suivantes :

- l'erreur-moyenne (biais ou inexactitude) au sein de la maille peut être plus importante que celle constatée à l'échelle du bloc,
- l'anisotropie de la distribution des extrémités des vecteurs-erreur individuels autour de l'extrémité du vecteur-erreur moyen.

Ce type d'anomalie est observable localement et ne met pas en doute la qualité planimétrique globale de l'orthoimage.

IV.3. L'ALTIMETRIE DU MNS

Le contrôle altimétrique du MNS a été réalisé en comparant les altitudes repérées sur le MNS, à celles d'une référence. L'erreur altimétrique signée est définie de la façon suivante :

$$e = Z_{ref} - Z_{MNS}$$

Avec Z_{ref} = altitude d'un point donné du PICC ou du levé GPS
 Z_{MNS} = interpolation bilinéaire sur le MNS soumis à la validation aux coordonnées du point PICC ou GPS considéré

Les données de référence sont des points de niveau du PICC ou des points de profils levés par GPS.

1. Points de niveau du PICC (TYPE = 185) : 109191 points du PICC ont été sélectionnés dans les zones dégagées (champs, prairies), sur toutes les parties de blocs couvertes par le PICC. Les résultats concernent donc toujours des espaces ouverts.
2. Levés GPS de profils topographiques : 1115 points de profils levés GPS ont été mesurés dans les zones non couvertes par le PICC.

L'étude montre que la qualité altimétrique du MNS est **excellente** et respecte les normes exigées dans le Cahier Spécial des Charges sur l'ensemble des mailles contrôlées, à savoir une *RMSE* maximum de 2 m dans les zones dégagées et en plaine, et une *RMSE* maximum de 5 m ailleurs.

La *RMSE* moyenne ou incertitude sur l'ensemble des points contrôlés à l'aide du PICC est de 1.91 m avec une faible surestimation moyenne de l'ordre de 0.62 m. L'imprécision est de l'ordre de 1.80 m.

L'analyse montre également que la qualité altimétrique du bloc 6 est nettement supérieure aux autres avec une très petite inexactitude (erreur signée moyenne = 0.30 m) et une imprécision de l'ordre de 1m. Ces valeurs d'inexactitude et d'imprécision impliquent une incertitude ou *RMSE* pour le bloc 6 qui est du même ordre de grandeur que l'imprécision, soit 1.10 m. Sur les blocs 2 et 4, le MNS a tendance à surestimer l'altitude de 1.50 m, tandis que, sur les blocs 1 et 3, il la sous-estime respectivement de 0.50 et 1.20 m. La *RMSE* est toutefois toujours inférieure à 2 m.

Une analyse de variance fait également ressortir, à l'échelle de la totalité du territoire wallon, que la pente influence significativement l'inexactitude du MNS. Plus la pente est importante, plus le MNS surestime de façon évidente l'altitude et ceci, plus particulièrement pour les classes de pentes supérieures à 10%. L'imprécision augmente aussi de façon significative quand cette pente augmente.

Une remarque générale s'impose enfin. L'utilisateur potentiel du MNS devra être critique sur l'information altitudinale en fonction de son utilisation. En effet, le MNS est la surface enveloppe du territoire (sol + sursol). Cette définition signifie que les altitudes fournies englobent la surface terrestre ainsi que les éléments visibles tels que les bâtiments, ouvrages d'art, les arbres (sommet de la canopée) ou les cultures en place. Le voisinage de lisières, de rangées d'arbre, d'arbres isolés ou de bâtiments, par exemple, peut être affecté d'un effet de limite et de généralisation produisant une incertitude sur l'altitude liée au lissage des variations brutales de cette altitude.

Pour les cultures, par exemple, la composante temporelle est également importante car elle influence la nature de l'information altitudinale en fonction de la couverture du sol (ex : maturité du maïs en septembre, sol nu en hiver, coupe à blanc, etc...).

V. LEXIQUE ET ACRONYMES

ACP : Analyse en Composantes Principales

Brillance (ou intensité) moyenne d'une image : pour une image monogénique (1 canal), il s'agit du niveau de gris moyen, soit la moyenne des valeurs numériques de tous les pixels de l'image. Pour une image polygénique (plus d'un canal), il s'agit du vecteur des moyennes calculées sur chaque canal.

Bruit : variabilité du signal due à des causes différentes de la nature et des caractéristiques biophysiques de la surface du sol ou de sa couverture.

BSQ : *Band Sequential* : format de fichier dans lequel l'information numérique est stockée de façon séquentielle par canal.

DGA-IG2 : Direction Générale de l'Agriculture – Inspection Générale n°2

Dynamique ou contraste d'une image : pour une image monogénique, on mesure le contraste ou la dynamique par l'écart-type des valeurs numériques de tous les pixels de l'image.

Entropie : en analyse d'images numériques, il s'agit d'une mesure de la quantité d'information fournie par un canal ou un ensemble de canaux. On peut ainsi calculer une entropie monospectrale (canal par canal) ou multispectrale (4 canaux, dans le cas de l'orthoimage analysée dans ce rapport). Le calcul de l'entropie est basé sur l'histogramme mono- (1 canal) ou multi-varié (plusieurs canaux). Bien que l'entropie n'ait pas été calculée dans cette étude, nous rappelons ci-dessous les formules de calcul dans les deux cas.

$$\text{Cas mono-varié (1 canal)} : \text{Entropie} = \sum_{i=0}^{255} - p_i \log_2 p_i$$

$$\text{Cas multi-varié (4 canaux)} : \text{Entropie} = \sum_{i=0}^{256^4 - 1} - p_i \log_2 p_i$$

Dans ces formules, p représente la fréquence relative

Pour des données codées sur 8 bits et dans le cas mono-varié, la valeur maximale de l'entropie est 8 et elle est atteinte pour une distribution uniforme (même fréquence relative pour chaque valeur). Pour des données codées sur 8 bits et dans le cas multi-varié à 4 canaux, la valeur maximale est de 4×8 , soit 32, et elle est aussi atteinte pour une distribution uniforme (même fréquence pour chaque combinaison de valeurs – il y en a 256^4).

GPS : *Global Positioning System*

IGN : Institut Géographique National belge

INS : *Inertial Navigation System*

LIDAR : *Light Detection And Ranging*

MNS : Modèle Numérique de Surface

MNS estompés : MNS éventuellement affiché en niveaux de gris ou en dégradé de couleurs avec modification de l'intensité en fonction du cosinus de l'angle d'incidence sur la surface représentée par ce MNS d'une illumination virtuelle généralement placée au NW (gisement de 315°) et à une hauteur angulaire de 45° au-dessus du plan de référence altimétrique. L'estompage (*shading*) ainsi réalisé permet de mieux percevoir le relief.

PICC : Projet Informatique de Cartographie Continue (Ministère de l'Équipement et des Transports)

PIR : Proche infra-rouge

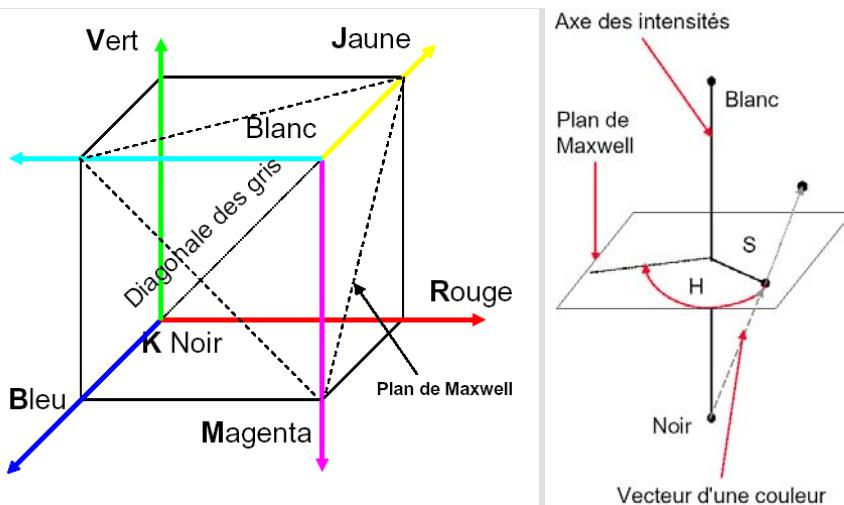
Réflectance : en télédétection passive, dans la gamme des longueurs d'onde du Visible à l'Infra-Rouge Moyen, la réflectance d'une surface correspond au rapport entre l'énergie solaire réfléchie dans la totalité de l'hémisphère par une surface donnée et celle reçue en rayonnement direct ou diffus. Dans le cas de l'Infra-rouge thermique, on ne parlera pas de réflectance car il s'agit d'une partie du spectre d'émission de la surface terrestre et l'énergie solaire reçue par cette surface est négligeable. En télédétection, on fait généralement l'hypothèse, parfois abusive, que les surfaces naturelles sont lambertiennes et donc que l'on peut estimer la réflectance en mesurant la luminance dans une des directions de cette hémisphère au dessus de la surface considérée. Un capteur numérique comme les caméras utilisées pour réaliser l'orthophoto et le MNS qui font l'objet de ce rapport enregistre cette luminance. Celle-ci a été enregistrée, d'une part, par un capteur panchromatique à très haute résolution spatiale qui intègre la luminance sur du Visible au Proche Infra-Rouge et, d'autre part, par un capteur à plus faible résolution spatiale qui enregistre séparément la luminance dans 4 canaux spectraux, trois dans le Visible et un dans le Proche Infra-Rouge. La luminance est généralement codée en entiers non-signés sur 8 bits (c'est le cas des images considérées dans ce rapport) ou 16 bits (capteurs satellitaires à haute résolution radiométrique comme AVHRR des satellites NOAA ou les capteurs-imageurs montés à bord du satellite IKONOS, par exemple).

RMSE : Root Mean Square Error (voir définition au § I)

Rs, Vs, Bs ou PIRs et Rm, Vm, Bm ou PIRm : canaux Rouge, Vert, Bleu et Proche Infra-Rouge. L'indice « s » signifie écart-type (*standard-deviation*). Il s'agit d'une mesure de la dynamique ou contraste. L'indice « m » signifie moyenne (*mean*). Il s'agit de la brillance ou intensité moyenne.

SETHY : Service d'études hydrologiques (Ministère de l'Equipement et des Transports – D212)

Teinte (H=Hue), saturation (S) et intensité : description d'une couleur dans le système colorimétrique perceptuel, par opposition à la description dans le système colorimétrique des 3 couleurs fondamentales, le rouge, le vert et le bleu (RVB). La conversion d'une composition en vraie ou fausse couleur, par exemple, d'un système à l'autre et vice-versa est possible. L'axe de l'intensité est la diagonale des gris du système RVB ($R=V=B$). La teinte et la saturation sont calculées dans un plan perpendiculaire à cette diagonale. Dans ce plan, il s'agit en fait des coordonnées polaires du point de percée du vecteur couleur (ou de son prolongement) ; la teinte étant l'angle variant de 0 à 360° avec une direction de référence qui est parallèle à l'axe du rouge ou du bleu du système RVB et la saturation étant le rayon.



Source : Cours de télédétection, Yves CORNET, ULG.