

Le modèle numérique de pente « moyenne » choisi :

- Se base sur le MNT Lidar : par mesure de cohérence, pour ne pas réinventer la roue, et parce que la résolution actuelle (1m) semble suffisante pour les métiers utilisant le MNT, la donnée de base sera le couple mnt/mns tel que disponible actuellement
- Conserve les variations locales statistiquement significatives (fossés, talus, dépressions locales) avec un positionnement au « *pixel MNT LiDAR* » près : essentiellement, il s'agit de faire disparaître les sillons de labour, grâce à leur détection par analyse de la répétitivité sommet/vallée, suivie d'un lissage, puis réhabilitation éventuelle d'un « *sillon* » en « *fossé* » en cas d'existence d'un fossé en amont et/ou aval de la parcelle labourée ; dans le fichier résultat « brut », les pentes sont reprises en valeur réelle (variable flottante) ; lors de l'opération de classification, les classes de pentes pourront être limitées en nombre, à définir (p.e . 1/3/5/10/15 %, tous les 0.1%, ...)
- Lisse les fluctuations « *statistiques* » (bruit de mesure, sillons, ...) dans les parcelles : L'objectif du filtre est d'atténuer ou de faire disparaître les variations de mesure entre points voisins, pour autant que celles-ci puissent être considérées comme du bruit statistique inhérent à la méthode de reconstruction de l'image de départ (MNT)

Comparaison avec les données Erruissol

Avant la réalisation de cette carte, la seule évaluation globale disponible en matière de pentes en Région Wallonne provient de la carte dérivée du modèle numérique de terrain développé sur base d'un semis de points levés. La fréquence d'échantillonnage y est de un point à l'are.

Note : Les courbes de niveau ont été générées à partir de la carte d'élévation (MNT) lissée avec une entre-distance verticale de 1 mètre

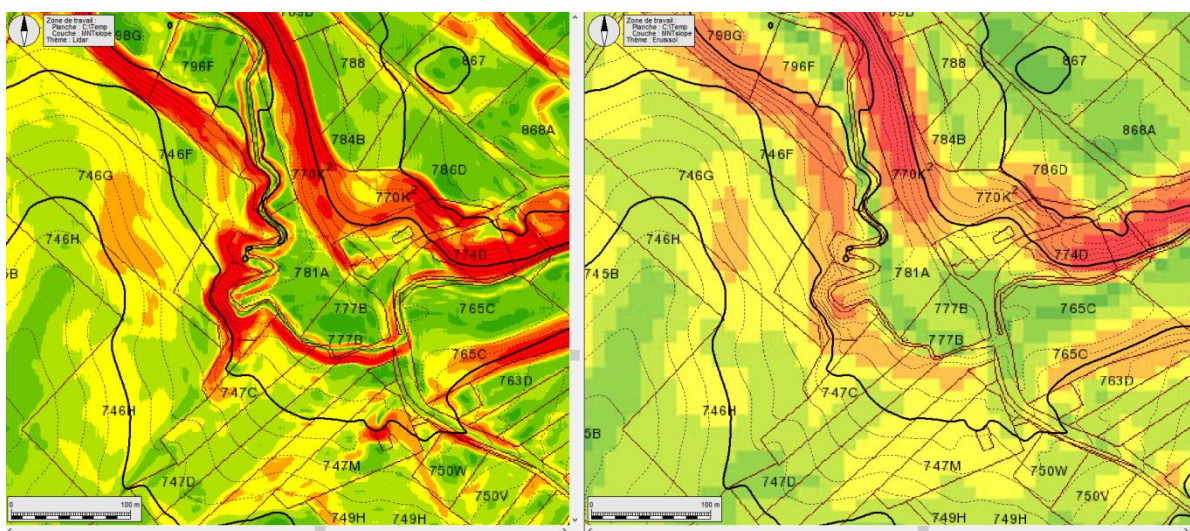


Figure 2 : comparaison du modèle de pentes (LiDAR - 1m) avec les données antérieures (Erruissol - 10m) ; les courbes de niveau ont été générées automatiquement à partir du MNT LiDAR lissé.



Définition de la pente

Modèle hydrologique (ou modèle classique)

Gradient maximum entre un point de mesure et ses quatre ou huit voisins ; la ligne de plus grande pente définit la trajectoire d'écoulement des eaux de ruissellement

Problèmes (connus) : la mesure dépend de la précision de l'échantillon : un sillon ou un fossé peut influencer fortement la trajectoire et ne pas apparaître sur les cartes à facteur d'échelle plus élevé

Modèle 'agricole' : classement de terre

La tolérance de pente pour l'utilisation d'équipements agricoles se base sur une mesure de gradient entre deux points distants de plusieurs mètres (correspondant à la largeur des machines) ;

Les « petites » fluctuations du niveau de sol (bruits de mesure, sillons, ...) ne devraient pas avoir d'impact sur le classement de la parcelle

La densité de sondage (5 m) des anciennes bases ERRUISSOL semble a priori bien calibrée pour l'estimation générale.

Problèmes :

Les limites de zones à déclasser sont plus floues (+/- 5 m) qu'espéré (+/- 1m) compte tenu de la densité de la cartographie (MNT LiDAR) de base

Les variations locales (talus, fossés, essentiellement) ne sont pas prises en compte car globalement atténuées

Modèle 'prairies inondables'

L'idée est de détecter (sur l'ensemble de la RW) toutes les parcelles de type prairie susceptibles d'être utilisées pour la rétention temporaire d'eau de ruissellement (« bassins d'orage naturels ») à l'aide de dispositifs de digue de faible hauteur (40 cm à 2 m)

La recherche de prairies inondables repose sur plusieurs critères :

- A partir de la classification SIGEC : code 61 (?)
- Traversées ou longées par un axe de ruissellement ERRUISSOL
- De faible pente (?) le long de l'axe d'écoulement : maximiser la longueur inondable par rapport à la hauteur de digue
- De différence de niveau significative entre les limites de parcelle et l'exutoire
- Longées par un talus (axe de route ?) au niveau de l'exutoire
- ...

Modèle 'champs à nu'

L'idée est de détecter, sur base des déclarations SIGEC, ou par interprétation des images SENTINEL, les risques de grandes zones quasi planes mises à nu en période de risque d'orage (champs labourés, pépinières ?, ...)

Les pentes sont estimées à partir de la géométrie de la parcelle de bord à bord dans toutes les directions

Le risque d'accumulation d'eau « stagnante » est évalué à partir de deux paramètres pour chaque direction : pente moyenne et longueur de bord à bord ; la superficie totale de la parcelle est aussi prise en compte



Choix de l'outil cartographique

Depuis 1991, la Direction de l'Agriculture de la Région Wallonne utilise la solution cartographique Geos (actuellement version 7, plus d'informations sur www.geos7.be). Cet outil présente de nombreux avantages dans le cadre de ce type d'étude :

- Entièrement développé en Belgique, l'intégralité des codes sources est aisément disponible et adaptable en fonction de nouveaux besoins spécifiques ; l'adjonction définitive de fonctionnalités peut être réalisée suivant un protocole de validation simplifié ;
- L'outil a été conçu dès l'origine dans l'idée de mixer les informations issues de différentes origines :
 - Image ou vecteur
 - graphiques (dessin, dxf, ...) ou topologiques (réseau, e00, ...)
 - avec ou sans base de données attachée
 - ...
- Il permet en outre de mixer directement des fonctions topographiques (calculs géométriques, lotissements, profils, ...) avec des procédures thématiques (croisements, statistiques, ...) appliquées indifféremment sur des données vectorielles ou matricielles ;
- Il dispose d'un outil simple de programmation pour réaliser des prototypes de procédures avant leur implémentation dans le code distribué ;
- Il dispose d'une structure d'accès aux données permettant de traiter dans son ensemble l'intégralité des bases de données cartographiques disponibles en Région Wallonne.

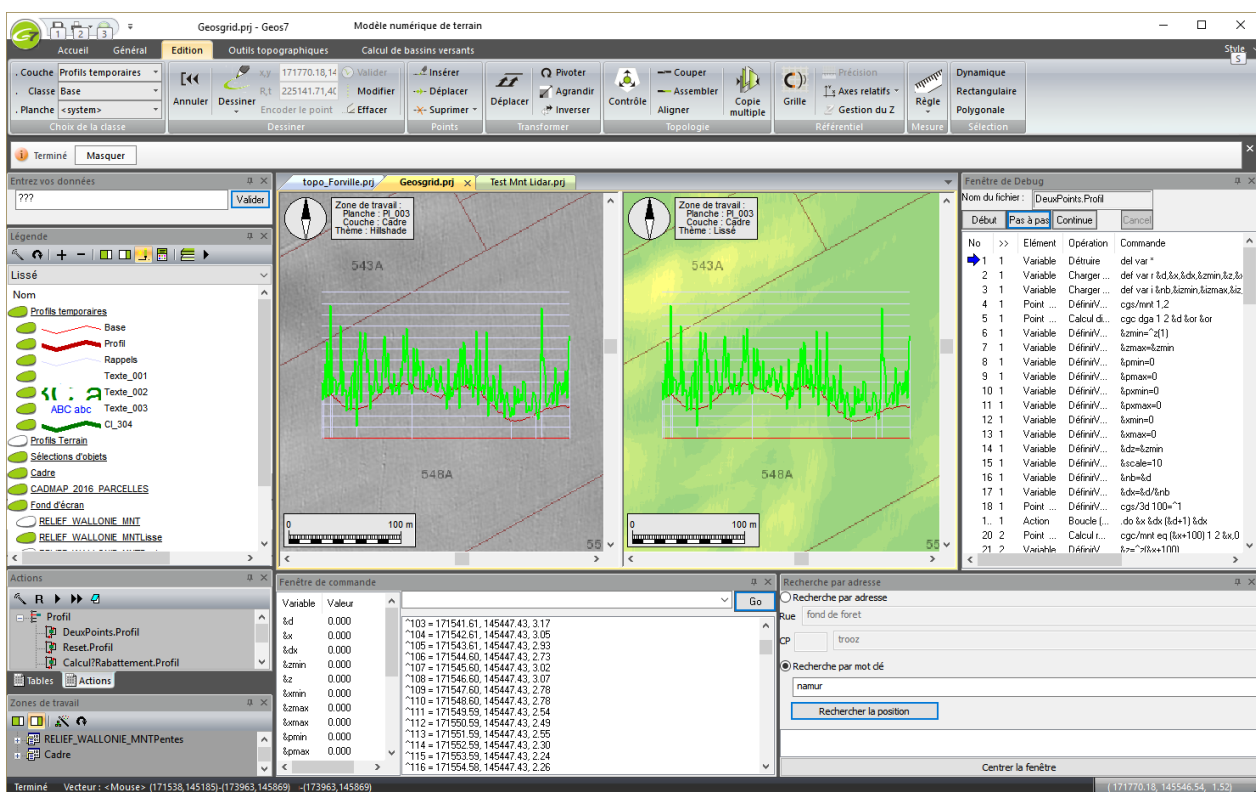


Figure 3 : Environnement de travail cartographique Geos7

Exploitation du modèle numérique à l'aide de Geos7

Structure du relief

Types de terres agricoles

Dans une même zone d'analyse, le type de couverture va influencer fortement le comportement du modèle numérique de terrain

Attention : photo et LiDAR ne sont pas pris en même temps

- Champ cultivé ou fraîchement hersé : le profil est régulier et proche de l'allure du terrain
- Champ labouré : les fluctuations sont beaucoup plus importantes
- Forêt : la mesure Lidar semble plus aléatoire



Figure 4 : Différents types de terres agricoles



Champ cultivé

Mesures de départ :

Photo aérienne et MNT : on perçoit un décrochement au tout début du profil (fossé entre cultures)

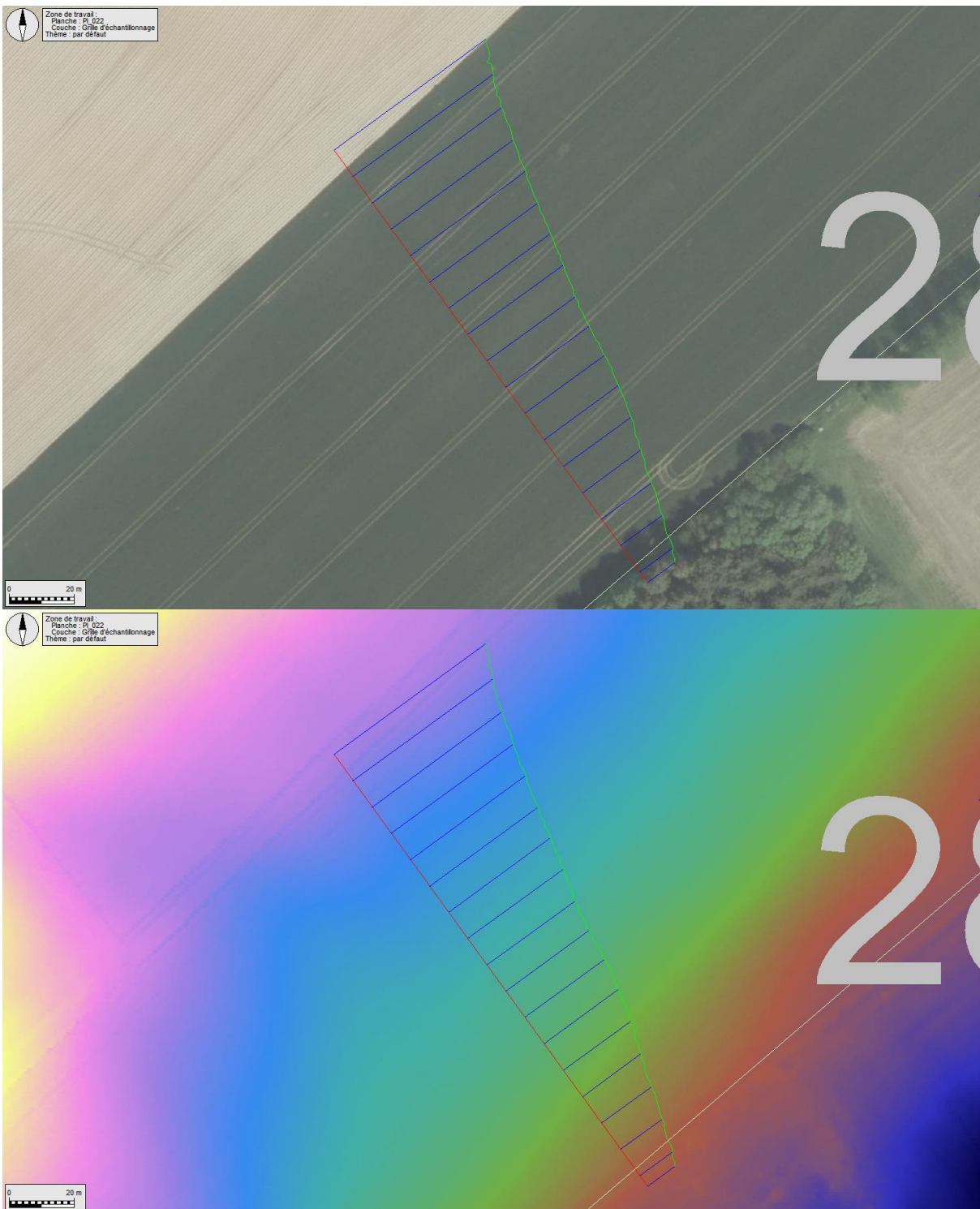


Figure 5 : Profil d'une terre cultivée

Carte des pentes

Les variations sont relativement faibles dans la parcelle ;

Les fossés/sillons entre cultures sont perceptibles (pente localement plus importante)

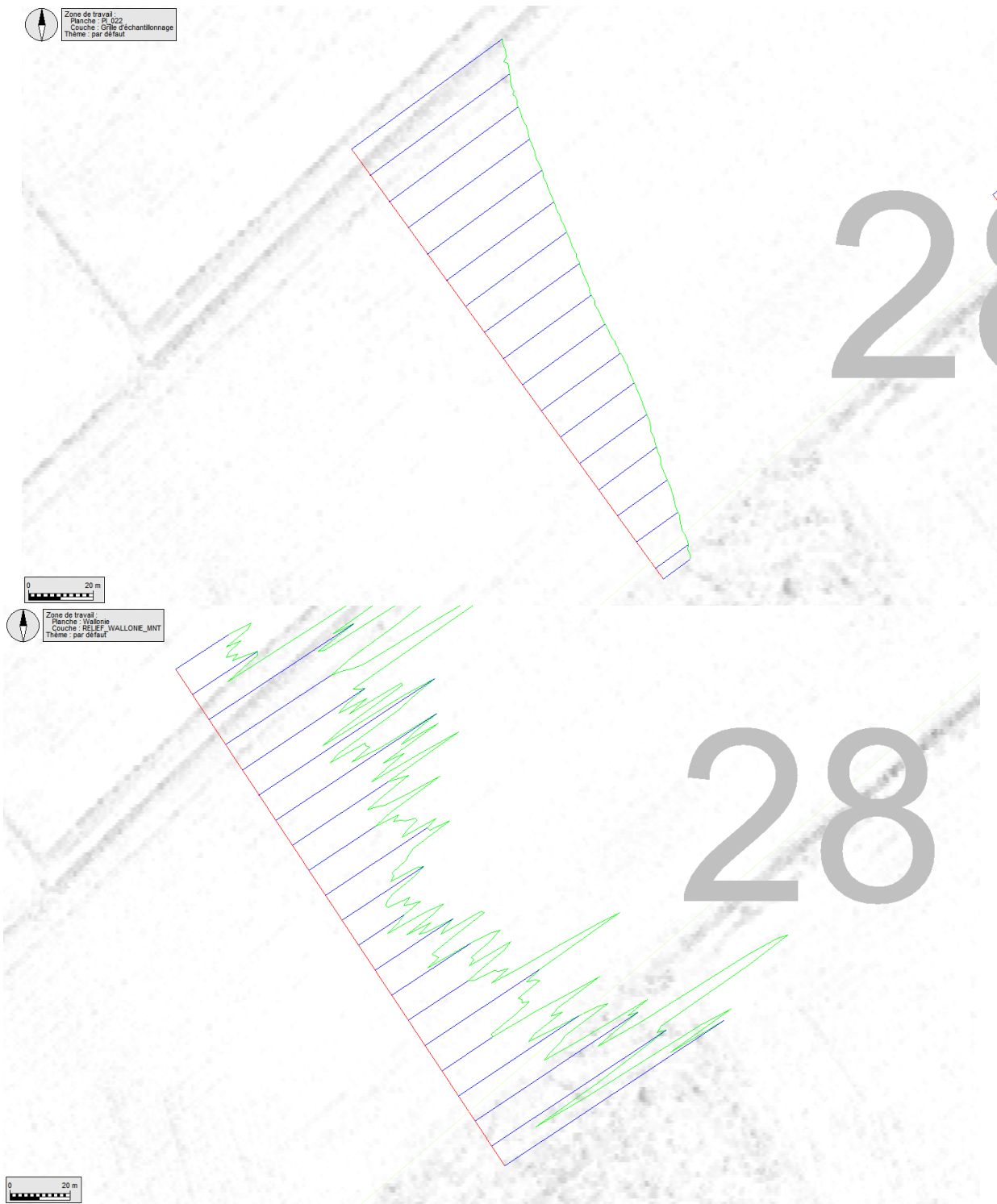


Figure 6 : Variabilité de l'information LiDAR

En analysant *simplement* la carte des pentes, les variations sont tellement importantes qu'il est impossible de distinguer le talus du « bruit » induit par les sillons

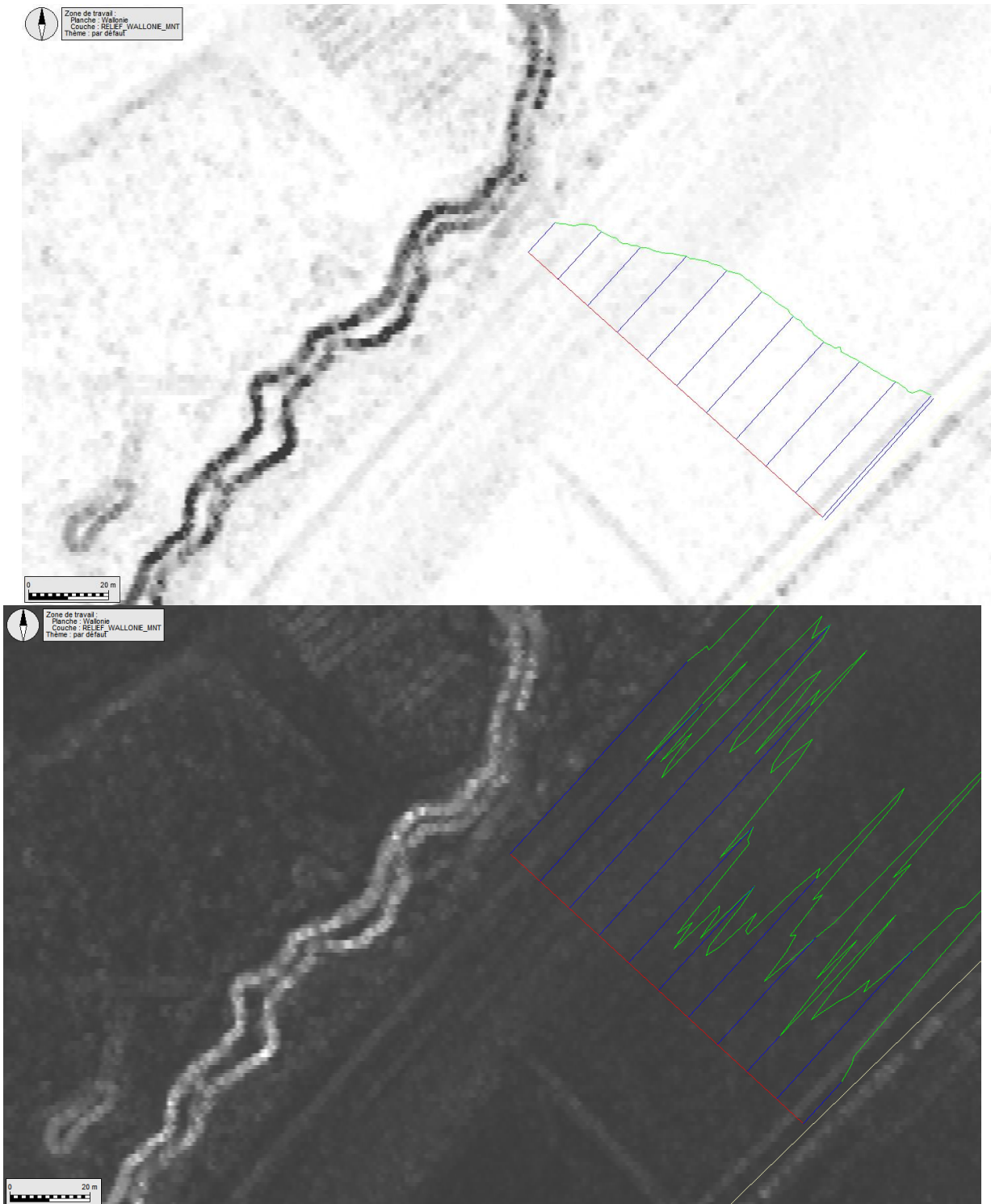


Figure 8 : Variabilité du signal LiDAR à travers les sillons

Zone forestière

Les fluctuations au sol sont très importantes, probablement à cause de :

- La faiblesse relative du signal LiDAR (une partie de l'écho est réfléchi par la canopée)
- La structure du sol en sous-bois (racines, défoncement, ...)

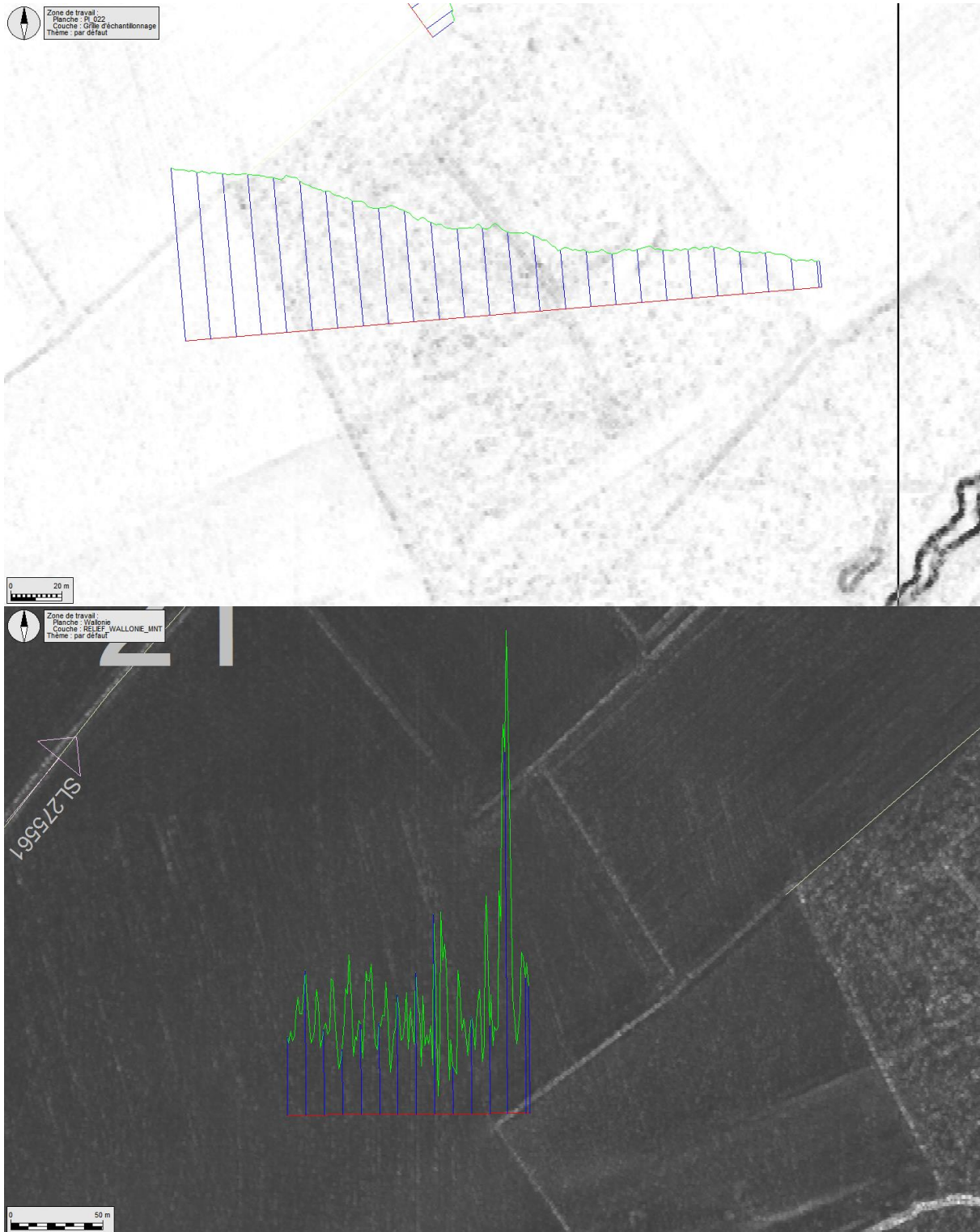


Figure 9 : Profil et variabilité de l'élévation en zone forestière



Butte inter-culture

Il arrive régulièrement que la séparation entre deux parcelles soit marquée par une variation de l'élévation du sol. Même si celle-ci est quasi imperceptible à partir des données brutes, une analyse plus fine des variations du profil permet de matérialiser la position de la transition

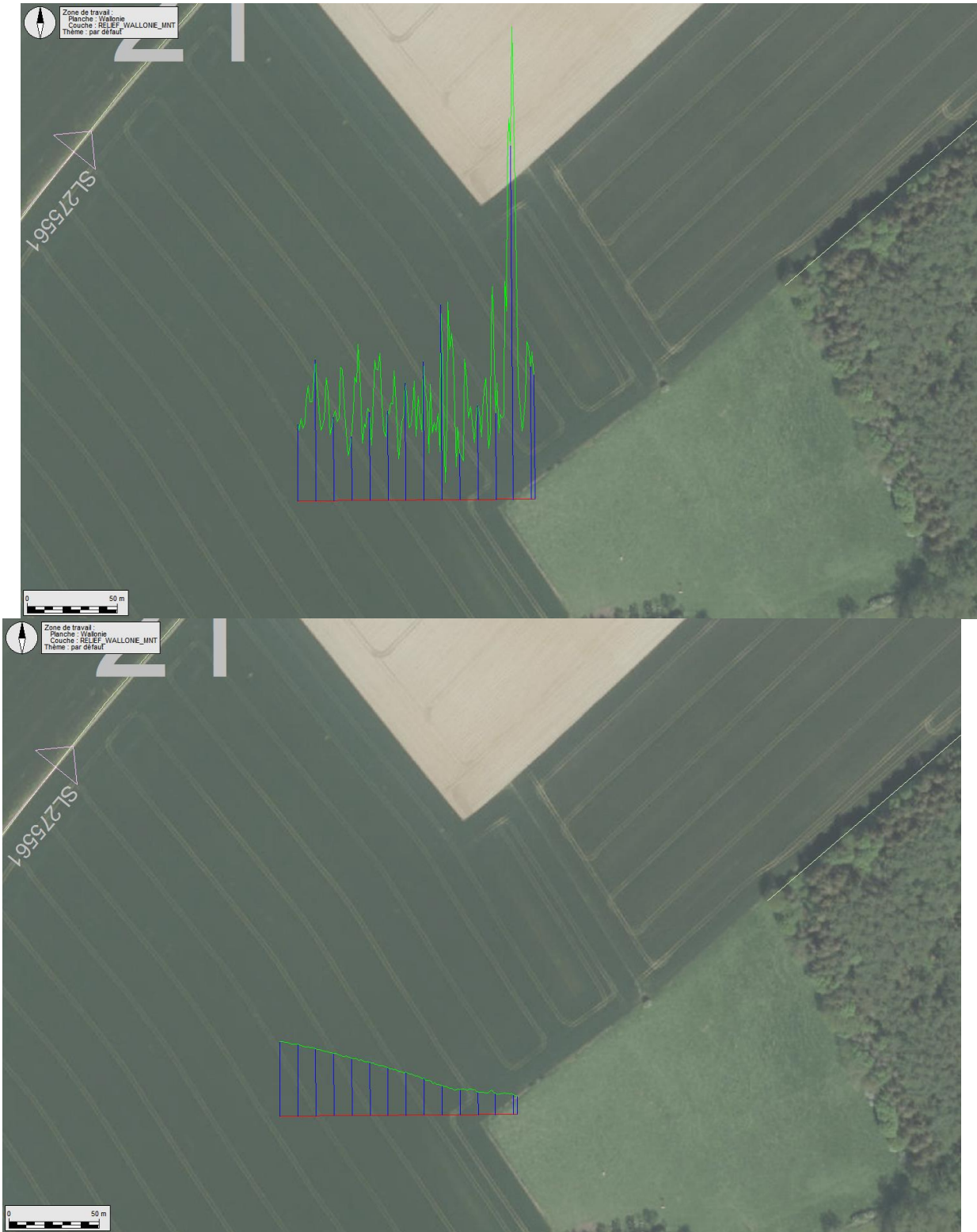


Figure 10 : Profil et mise en exergue d'un talus mitoyen



Les différentes phases de reconstruction

Le modèle numérique de hauteur :

La précision de la mesure Lidar est fortement liée au type de végétation rencontrée : au plus il y a de strates rencontrés, au moins l'écho sera puissant ; par ailleurs, à proximité directe des troncs, le sol est naturellement plus cabossé, ce qui peut induire des erreurs d'interprétation ; La première étape consiste donc en la classification de la couverture pour en extraire un paramètre d'erreur contextuel.

Le calcul reste fondamentalement le même pour toutes les classes, mais le lissage pourrait être plus ou moins « agressif » ; idéalement, il faudrait partir des mesures de départ (LAS) pour avoir en plus une idée de la densité de végétation, mais cela entraîne un temps et une complexité de calcul beaucoup plus élevé.

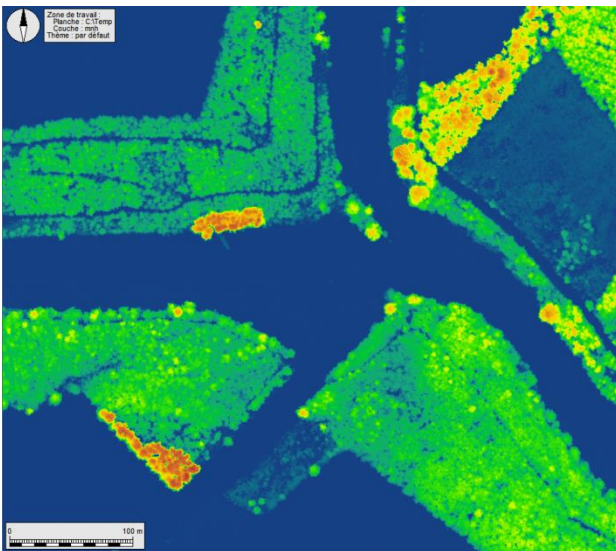


Figure 11 : Modèle Numérique de Hauteur (MNH - Extrait) : les zones bleues correspondent aux sols nus ou de basse végétation (cultures)

Pour distinguer les zones en fonction de leur occupation, la méthode la plus simple est de reconstituer, à partir des modèles de terrain et de surface, un Modèle Numérique de Hauteur (MNS - MNT), qui représente la hauteur hors sol de la végétation.

Note : les bâtiments étant masqués artificiellement lors de la constitution du MNT, la mesure résultante ne peut être considérée avec précision ; toutefois, comme l'étude porte essentiellement sur les zones agricoles, la question est hors sujet dans ce projet.

Le « *masque de calcul* » reprend différentes classes :

- Zones masquées (non traitées) : qui sont laissée « à blanc » dans les fichiers de départ
- Bois
- Rangées d'arbres
- Lignes HT
- Arbres isolés
- Sols cultivés
- Végétation rase

Un coefficient correspondant à la « *hauteur végétale* » est associé à chaque classe ; il permet d'affiner le calcul du niveau de bruit de mesure : plus il y a de la végétation ($H \gg$), moins la mesure au sol devient fiable ; en outre, dans les zones cultivées ou rases, d'autres filtres '*anthropiques*' pourront être appliqués pour tenir compte de dégradations locales temporaires (sillons, ornières, ...).

Les différents modèles de bruit pris en considération

La précision des mesures

Après analyse détaillée des données LiDAR, il apparaît que, pendant le processus de reconstruction des modèles, la mesure d'altitude a été arrondie au centimètre. Chaque point de la grille finale représente une moyenne de une à dix mesures : la discrimination numérique est donc de 1 cm.

Comme le calcul de la pente correspond à la variation de hauteur d'un point à l'autre de la grille, l'erreur numérique peut s'élever à 1 cm au m (dimension de la grille d'échantillonnage), soit 1%

Note : la discrimination inter-classe souhaitée au final est de 2% (1-3-5-7-10 et 15% de pente)

Les bruits de reconstruction

Comme on le verra plus tard (voir infra : L'exploitation de la densité des mesures LiDAR), la méthode de reconstruction de l'image à partir des données brutes entraîne une erreur systématique directement corrélée à la densité des mesures. Un algorithme de reconstruction plus précis ou mieux adapté pourrait à l'avenir réduire cette erreur, qui n'a pas été étudiée plus avant dans ce projet.

La précision du signal

Si on se réfère aux métadonnées associées aux données de base (MNT – MNS LiDAR : <http://geoportail.wallonie.be/catalogue/0bc90b40-74f9-43d6-9a18-468a65e6f048.html>), la précision altimétrique des données de relief est limitée à 12 cm, ce qui entraîne une erreur absolue potentielle de 24 cm par mètre (24%) entre deux points voisins. Il s'agit bien entendu d'une valeur maximale, mais attendu que les services techniques doivent au final pouvoir discriminer des pentes de 1 à 15 % par pas de 2%, cette erreur est largement excessive et fera l'objet d'un traitement particulier.

En effet, les filtres classiques (ré-échantillonnage, lissage passe-bas, ...) ne peuvent atteindre le seuil de 1 à 2 % qu'au détriment d'une perte équivalente de précision géométrique (réduire l'erreur en Z par 10 entraîne une réduction de résolution en XY de 3 à 10 m, en fonction du type de filtre).

Les ornières de passage

Le premier filtre anthropique développé permet d'éliminer de l'image résultante les traces de passage des machines agricoles. Ces traces sont repérées par analyse de profils en long périodiques (de 20 m de long tous les 20 m dans les quatre directions : N-S, E-O, NE-SO, NO-SE). Pendant la phase de reconstruction, les pixels d'altitude inférieure à la moyenne locale sont alors ignorés et remplacés par une valeur interpolée.

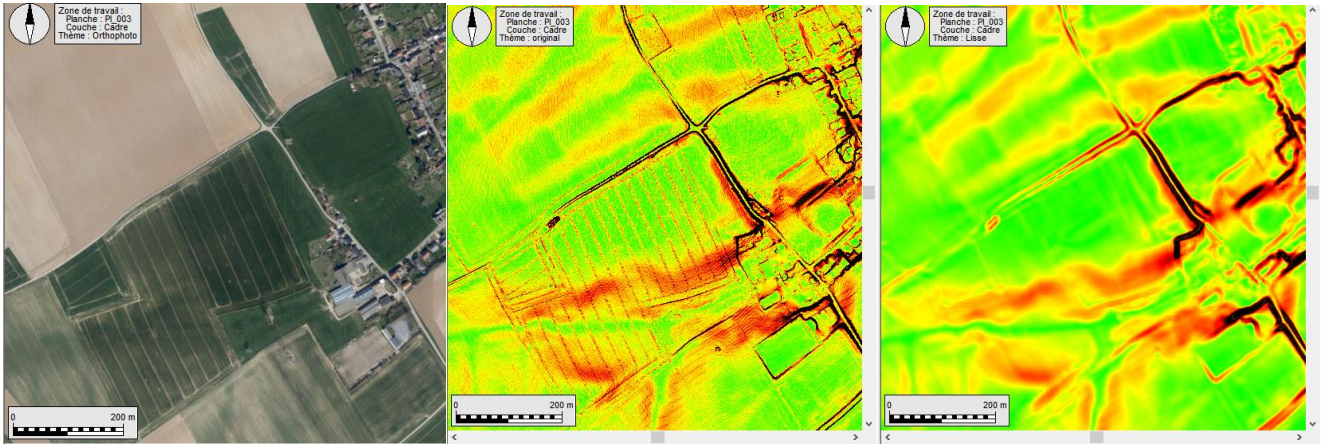


Figure 12 : Application du filtre 'ornières'

Le filtre s'applique dans les zones reconnues comme cultivées ou rases dans l'analyse précédente (MNH).

Les ornières n'interviennent plus dans le calcul de pente, sauf, parfois, à proximité des zones naturellement défoncées, où elles accentuent ou prolongent la zone plus pentue (près du chemin creux, à l'est de la parcelle)

Les fluctuations résiduelles de pente sont toutefois limitées à 1 % maximum dans ce cas de figure.

Les sillons profonds

Les parcelles cultivées par buttage constituent un problème plus délicat dans la mesure où les variations locales de relief sont beaucoup plus marquées et rapprochées que dans le cadre de l'atténuation des ornières.

Compte tenu de la profondeur des sillons (jusqu'à 30cm) et les imprécisions de mesure LiDAR (estimée à 12 cm) les variations de pentes dans l'image native peuvent atteindre les 40% en plus du relief naturel.

Le filtre appliqué ici part d'un profil calculé par régression linéaire sur 20 m en travers du cheminement des machines (à l'horizontal, dans le cas illustré). Le résultat est ensuite affiné itérativement pour laisser réapparaître d'éventuelles zones de dépression.

L'algorithme est interrompu lorsque les fluctuations résiduelles de pente entre buttes atteignent ou dépassent les 2%

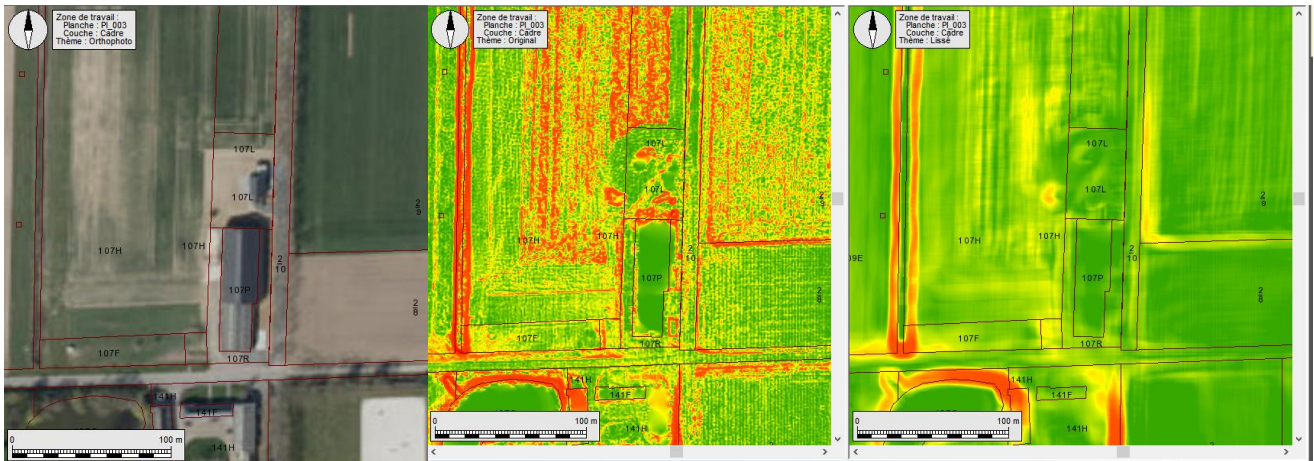


Figure 13 : Application du filtre 'lignes de buttage'

Les pépinières

Bien que les exploitations forestières sortent du domaine d'étude de ce projet, le *filtre de sillons* a été étendu aux pépinières.

Toutefois, compte tenu de la forte dégradation de la mesure 'sol' (MNT) d'une part, dûe à la présence des troncs et racines, et les inégalités de terrain propres au milieu forestier d'autre part, il n'est pas possible d'atteindre un résultat homogène sans autre prescription préalable.

L'image résultante nous semble toutefois suffisamment adoucie pour une exploitation visuelle

Dans les régions plus accidentées, il sera aussi opportun de compléter la gamme de classification (actuellement de 1 à 15%) avec des catégories supérieures pour tenir compte du relief naturel plus accidenté au sud du sillon Sambre/Meuse.

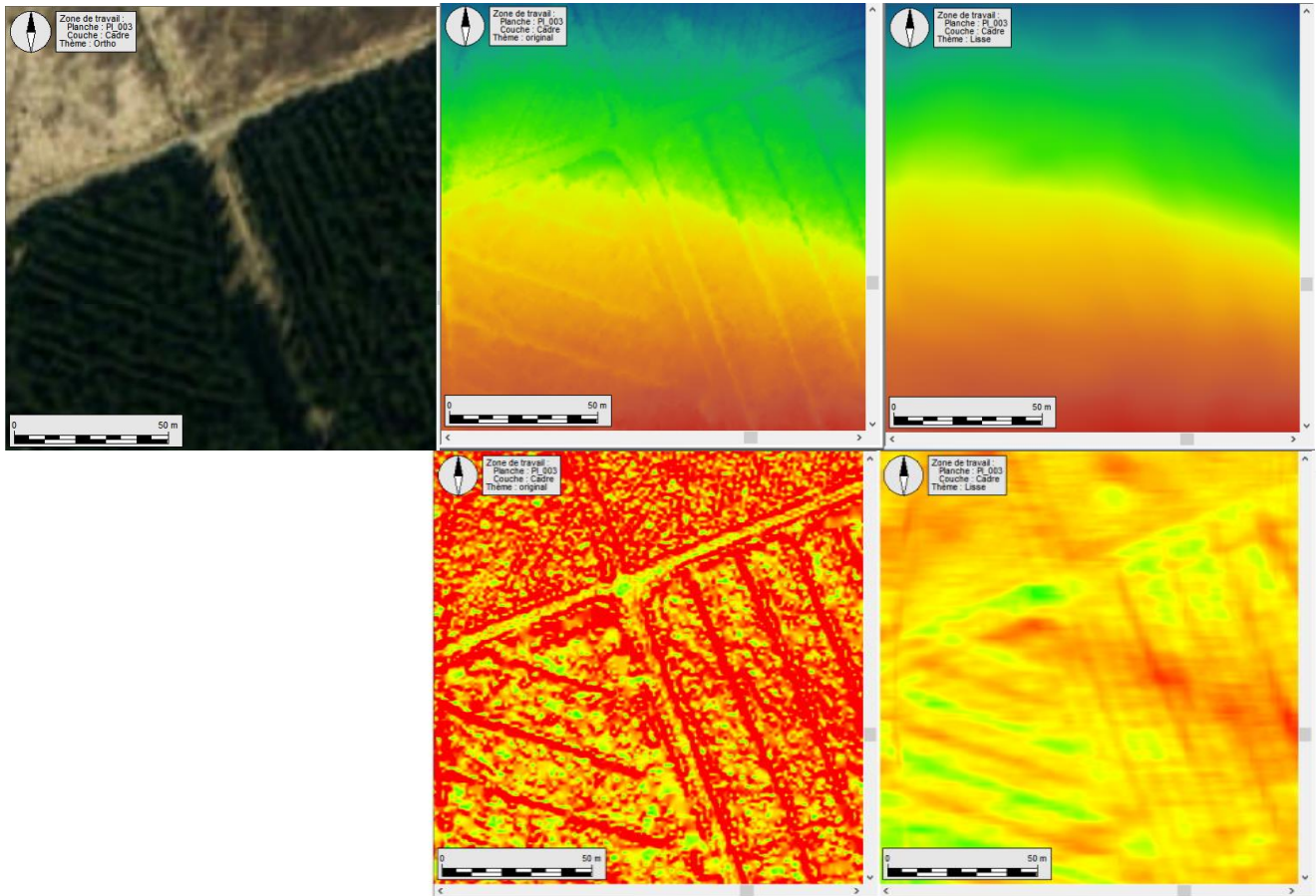


Figure 14 : Application du filtre 'pépinières'

Les profils périodiques systématiques

Le cœur du processus de reconstruction réside dans l'analyse systématique de profils de terrain en tout point du territoire. Ces profils sont calculés selon une grille de 10 m dans quatre directions (N-S, O-E, NO-SE, SO-NE) afin de qualifier le type filtre à appliquer.

L'impression visuelle première est sans doute que l'utilisation d'une image non traitée est à même de conduire à un positionnement plus précis des variations locales (berges, talus, et cetera). Toutefois, la très grande variabilité de la mesure le long de l'axe du chemin, cours d'eau, ... entraîne par contre une plus grande imprécision ; au final, le trait de berge ou la courbe de niveau sera dès lors beaucoup plus irrégulière que celle générée à partir du modèle filtré.

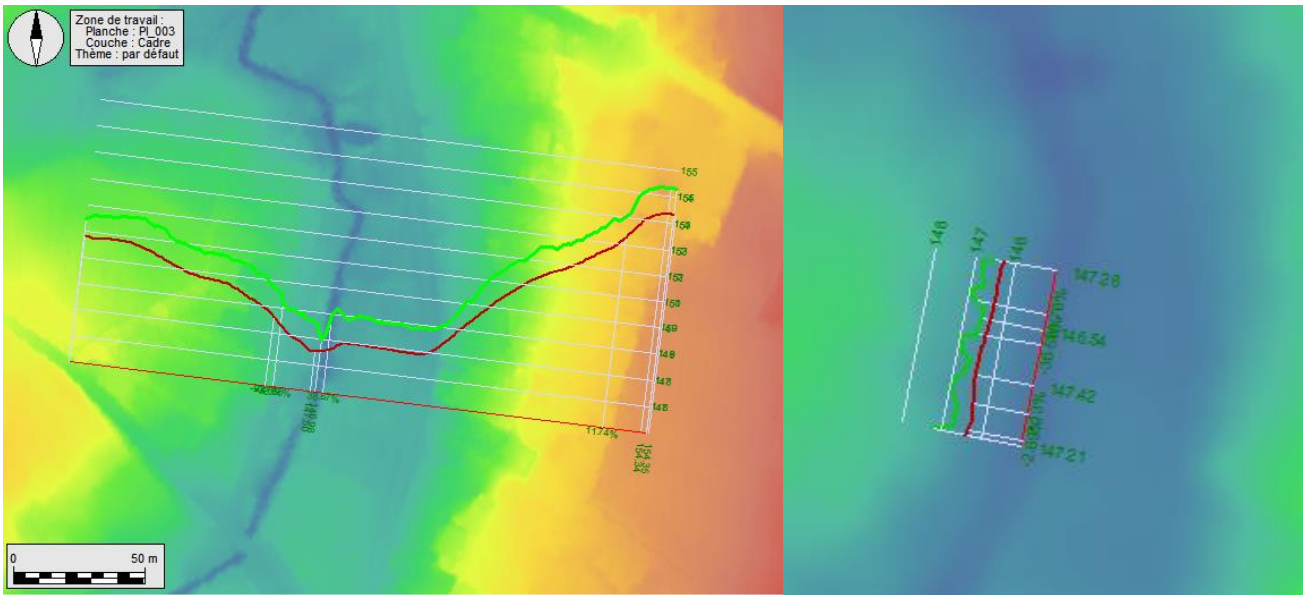


Figure 15 : Profils en travers et en long d'une vallée avant (vert) et après (rouge) traitement : la courbe rouge a été déplacée de 1m en vertical pour une meilleure lisibilité

Les zones de rupture de pente

Pour limiter au minimum l'impact du traitement sur la définition des berges et talus, une attention particulière doit être portée au niveau des variations de pentes. A partir de l'analyse des données LiDAR de base, une carte des *zones à risque* peut être rapidement composée ; un masque de traitement permet de décomposer la zone en plusieurs *masques* de travail (fond de vallée ou chemin / berge ou talus / relief de référence) reliés entre eux par des zones filaires (haut/bas talus). On appliquera un traitement multidirectionnel à l'intérieur de chacun des masques alors qu'un algorithme de régression linéaire sera appliqué le long des lignes de rupture. La phase est complétée par une homogénéisation des résultats pour éliminer les inévitables artefacts de reconstruction entre les différentes zones.

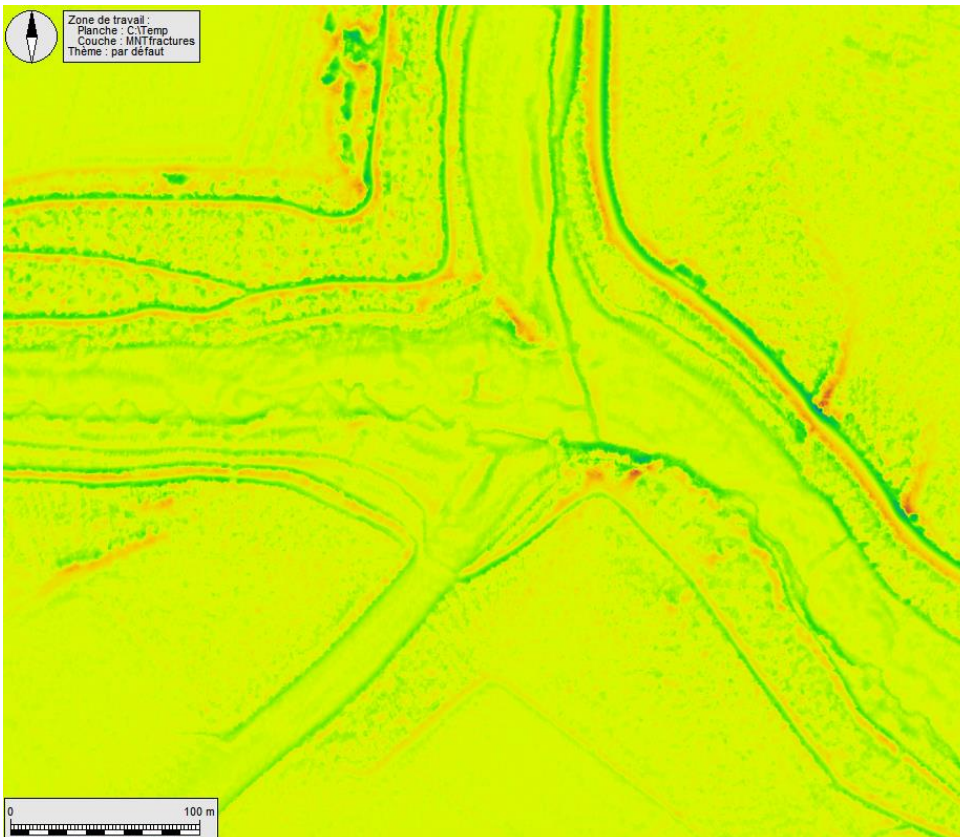


Figure 16 : Résultat graphique préliminaire des zones de rupture de pente (hauts talus en rouge - bas talus en vert)

Méthodologie de reconstruction

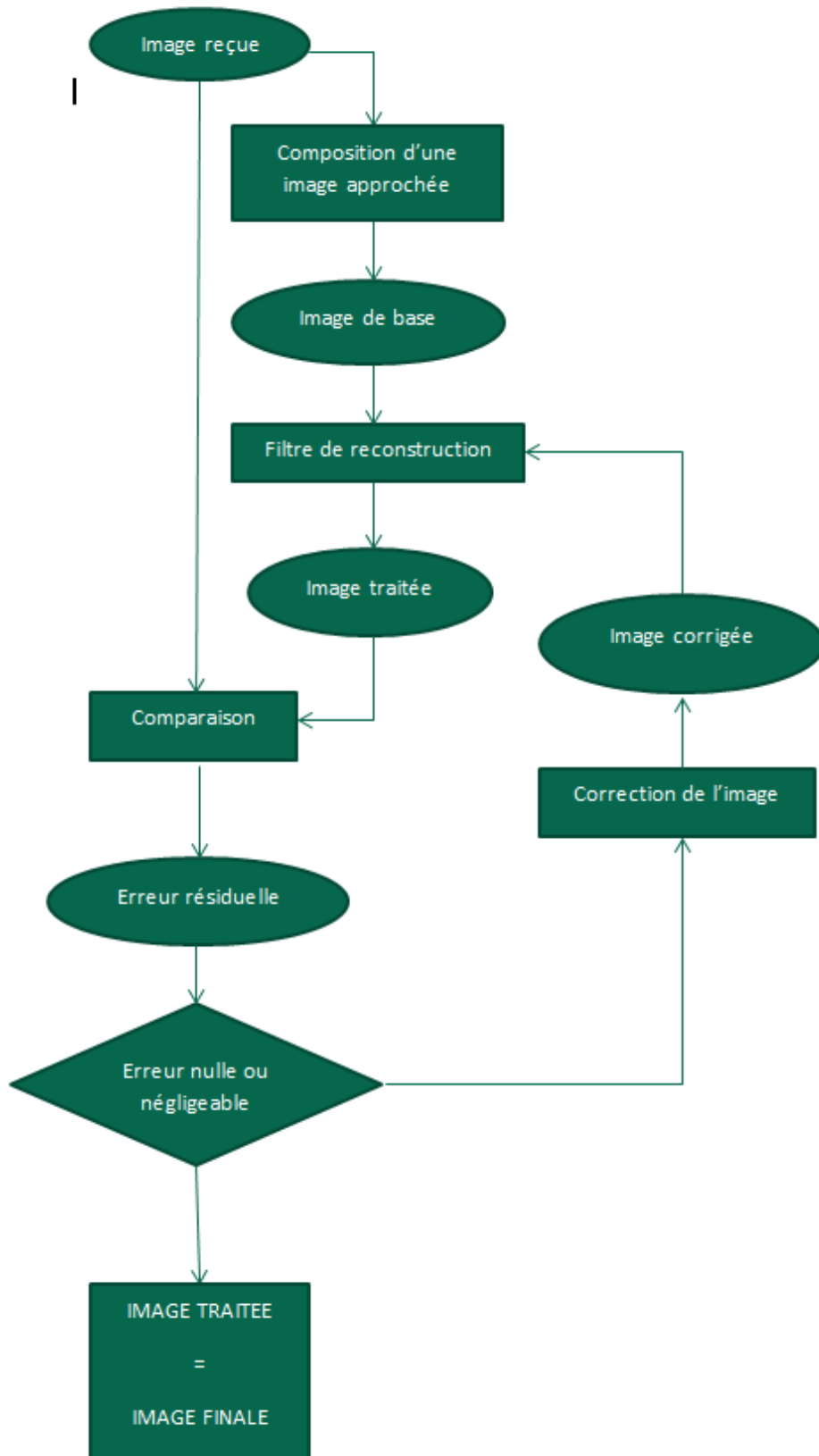


Figure 17 : Algorithme de reconstruction selon la méthode de Richardson-Lucy



La méthode générale de reconstruction utilisée est fortement inspirée de l'algorithme de dé-convolution développé par Richardson et Lucy (1972 – 1974).

Une description succincte de la méthode peut être consultée sur :

https://en.wikipedia.org/wiki/Richardson%E2%80%93Lucy_deconvolution

Les avantages de cette approche sont multiples dans le cadre de cette étude :

- La méthode a été initialement appliquée dans des domaines (imagerie médicale, astronomie) où la très faible quantité d'information ne permet pas d'appliquer des méthodes classiques (Transformation de Fourier discrète, essentiellement).
- Le caractère itératif du processus permet de maîtriser très finement les différentes facettes des bruits du signal d'origine (ici, LiDAR) de manière optimale en modulant l'interprétation de l'erreur en fonction du niveau de reconstruction.
- Il permet en outre de reconstruire l'image *idéale* par étape en ciblant à chaque fois sur l'impact des erreurs instrumentales et/ou des éléments perturbateurs (ornières, ...) en fonction de la phase de reconstruction

A chaque itération, le processus conduit à deux images intermédiaires :

- L'évolution vers l'image résultat idéale
- Un masque de tolérance déterminant les seuils d'*erreur admissible* pour les étapes suivantes

Au final, l'image reconstituée devra correspondre en tout point à l'image de départ dans les limites de ces seuils.

Conclusion : analyse des résultats

La méthode de reconstruction utilisée dans ce projet a permis de composer une carte des élévations lissée apte à fournir des informations cohérentes pour l'élaboration d'une carte des (allures de) pentes.

Les traitements successifs appliqués aux données de base permettent de réduire drastiquement l'impact des facteurs de bruit, non seulement instrumentaux (variabilité de la mesure) mais également les reflets de la situation réelle (ornières, ...) qui influencent négativement l'interprétation automatique des résultats.

A partir de données instrumentales entachées d'une erreur telle (0.12m /par pixel, soit potentiellement une surévaluation de 24%) que l'information de pente n'était ni réaliste, ni exploitable, le processus mis en place a conduit à un jeu de données beaucoup plus proche de la réalité puisque la variabilité de la mesure d'un pixel à l'autre a été réduite à moins de 0.2% maximum soit une réduction par 100 du coefficient d'erreur.

Cette amélioration n'aurait toutefois pas été possible sans une légère diminution de la résolution *apparente* des données disponibles (de 1 à 2m/pixel) bien que celle-ci puisse encore être compensée par l'application de méthodes d'analyse ciblées qui sortent du propos de cette étude.

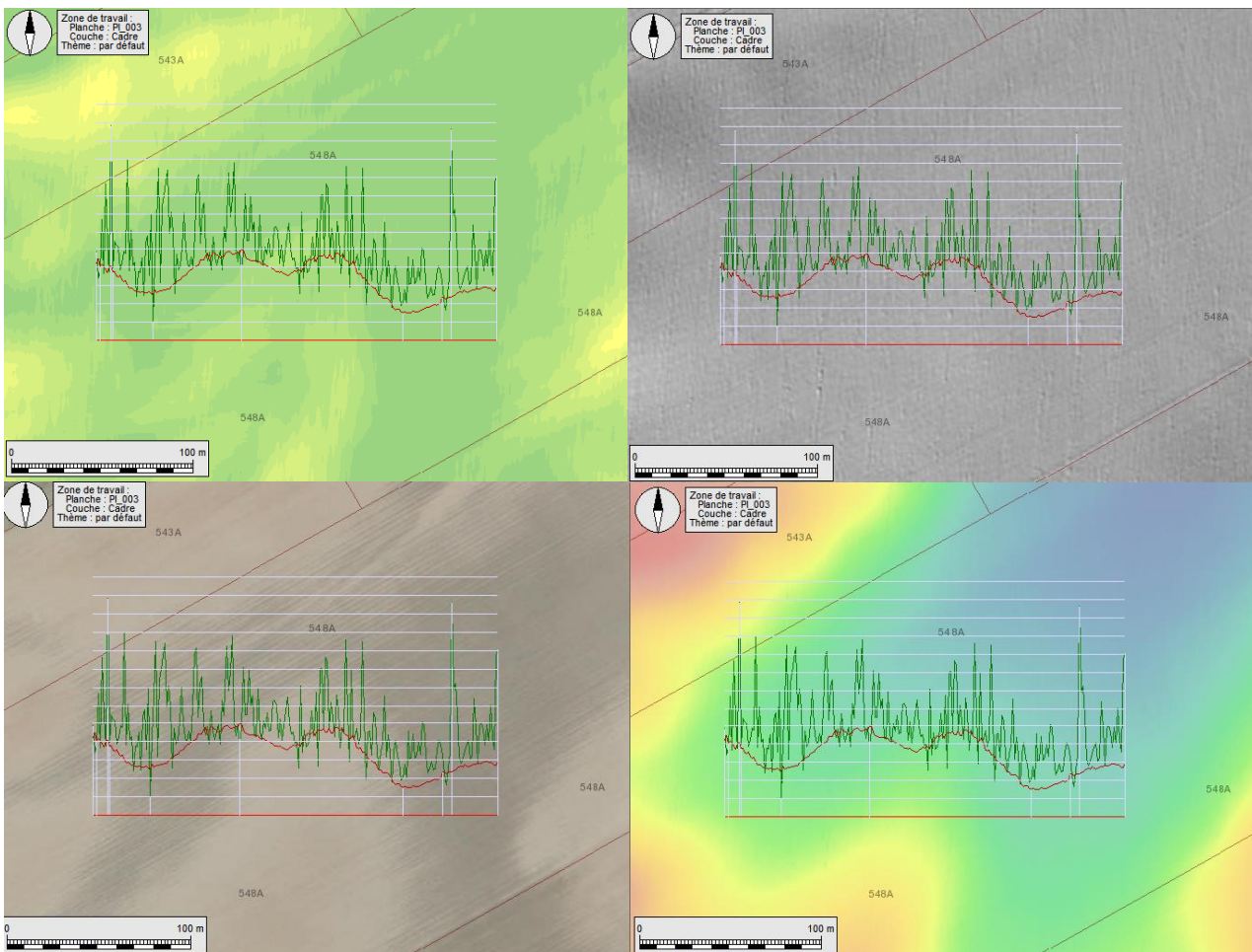


Figure 18 : profil de la carte des pentes (brut en vert, corrigé en rouge) : chaque graduation correspond à 1% de pente ; carte résultante - 'Hillshade' - orthophotoplan - modèle numérique de terrain

Outre les avantages certains de la carte des pentes dans un processus d'analyse général, ce nouveau document permet aussi de compléter l'information de tout un chacun par simple analyse visuelle.

L'introduction des données LiDAR, et plus spécifiquement leur interprétation *Hillshade*, dans la cartothèque régionale a été un premier pas vers la représentation du relief.

Malheureusement, cette méthode basée sur le principe des ombres peut induire de fausses conclusions dans la mesure où la représentation de chaque inclinaison dépend directement du choix initial de l'orientation de la source lumineuse. Celle-ci ayant en l'occurrence été positionnée au Nord-Est, les ondulations de terrain obliques (SO-NE) sont tout à fait escamotées.

Dans la pratique, les cartes de ce type (*Hillshade*) devraient idéalement être utilisées de manière dynamique en laissant à l'observateur la possibilité de déplacer à sa guise la source lumineuse...

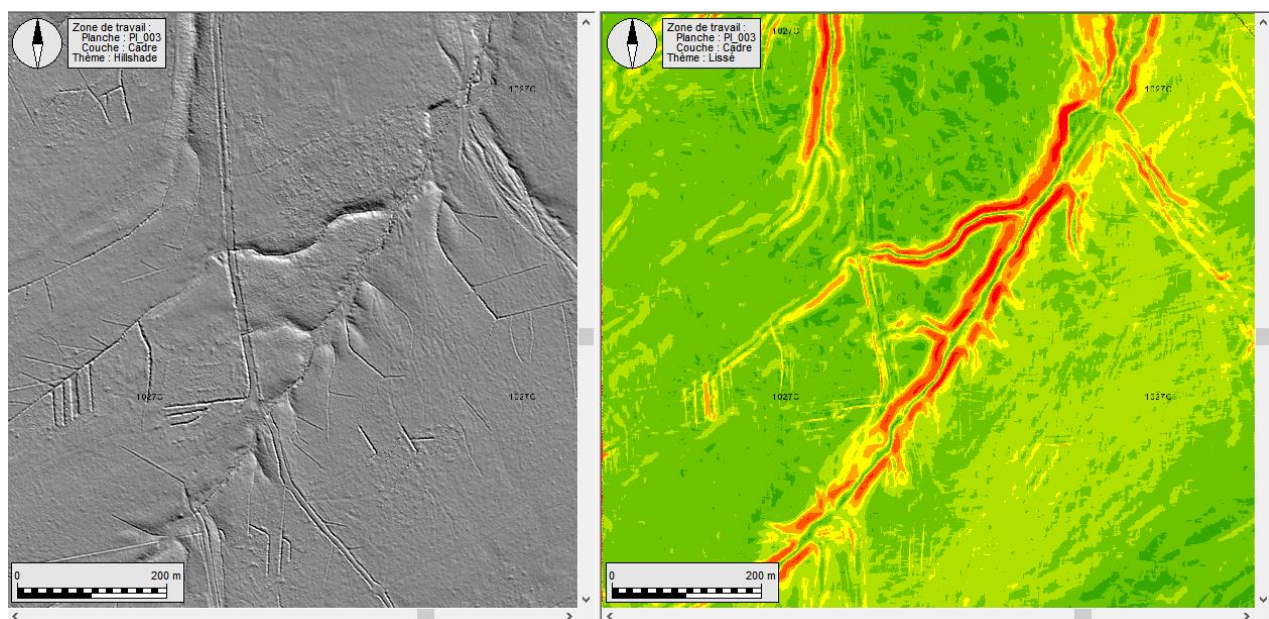


Figure 19 : Interprétation des résultats : texturale ('Hillshade') ou quantitative (carte des pentes) ; on notera l'estompement relatif des sillons SO-NE dans la représentation de type 'hillshade'



Figure 20 : Comparaison entre une présentation 'hillshade' et la carte de rupture de pentes ; les berges et ouvrages d'art sont plus objectivement représentés

Un autre artefact connu porte sur les *structures fantômes*. Classiquement, un chemin étroit à flanc de colline disparaît de l'image reconstruite (à gauche) par simple saturation de la table de couleur, la pente maximale prise en compte étant de 15% dans le domaine agricole. Une simple modification de cette table par l'adjonction de classes de pente complémentaires permet de le faire réapparaître, quoique dans une catégorie de pente supérieure.

A l'inverse, un talweg qui était totalement noyé dans le bruit au départ devient systématiquement visible après traitement.

La même procédure de récupération de talus permettra de rétablir le chemin dans sa classe d'origine.

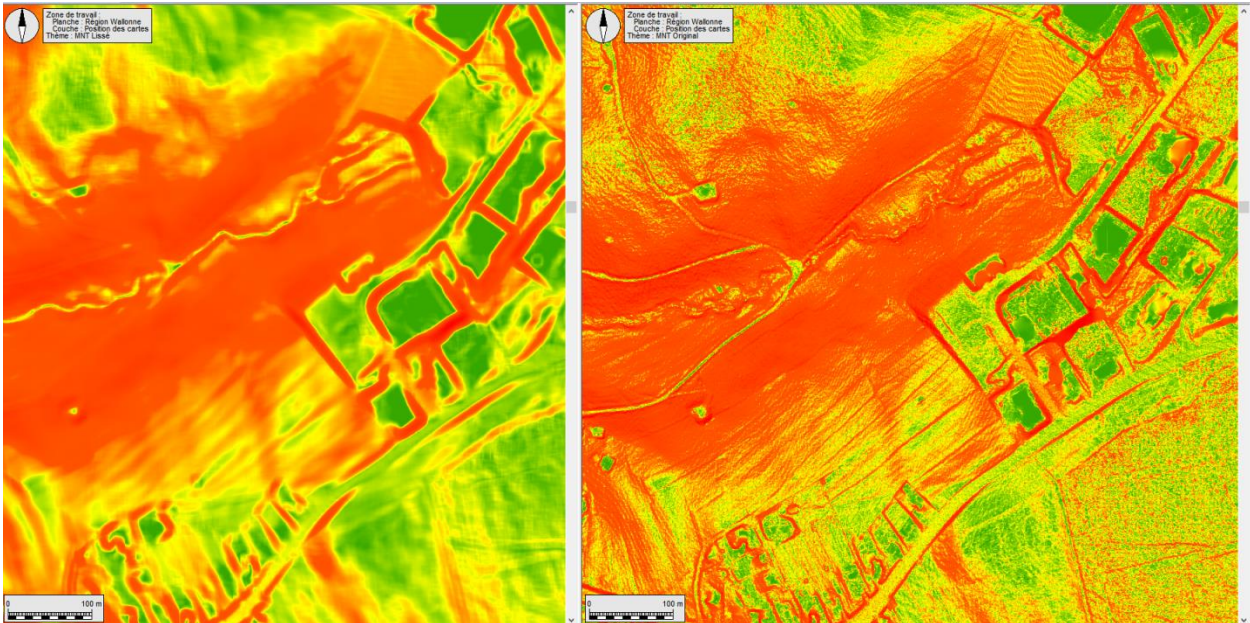


Figure 22 : L'application des filtres facilite la recherche des fonds de vallée ; par contre, les chemins à flanc de collines sont absorbés par l'environnement (rouge = >15%)

Carte des talus et fossés

En appliquant la même méthode point à point sur la carte des pentes au lieu de la carte d'élévation (MNT) d'origine ou lissée, on obtient une nouvelle source d'information : la carte des ruptures de pente.

Celle-ci peut s'avérer plus intéressante dans les zones ardennaises notamment où l'importance du relief entraîne un excès visuel d'information

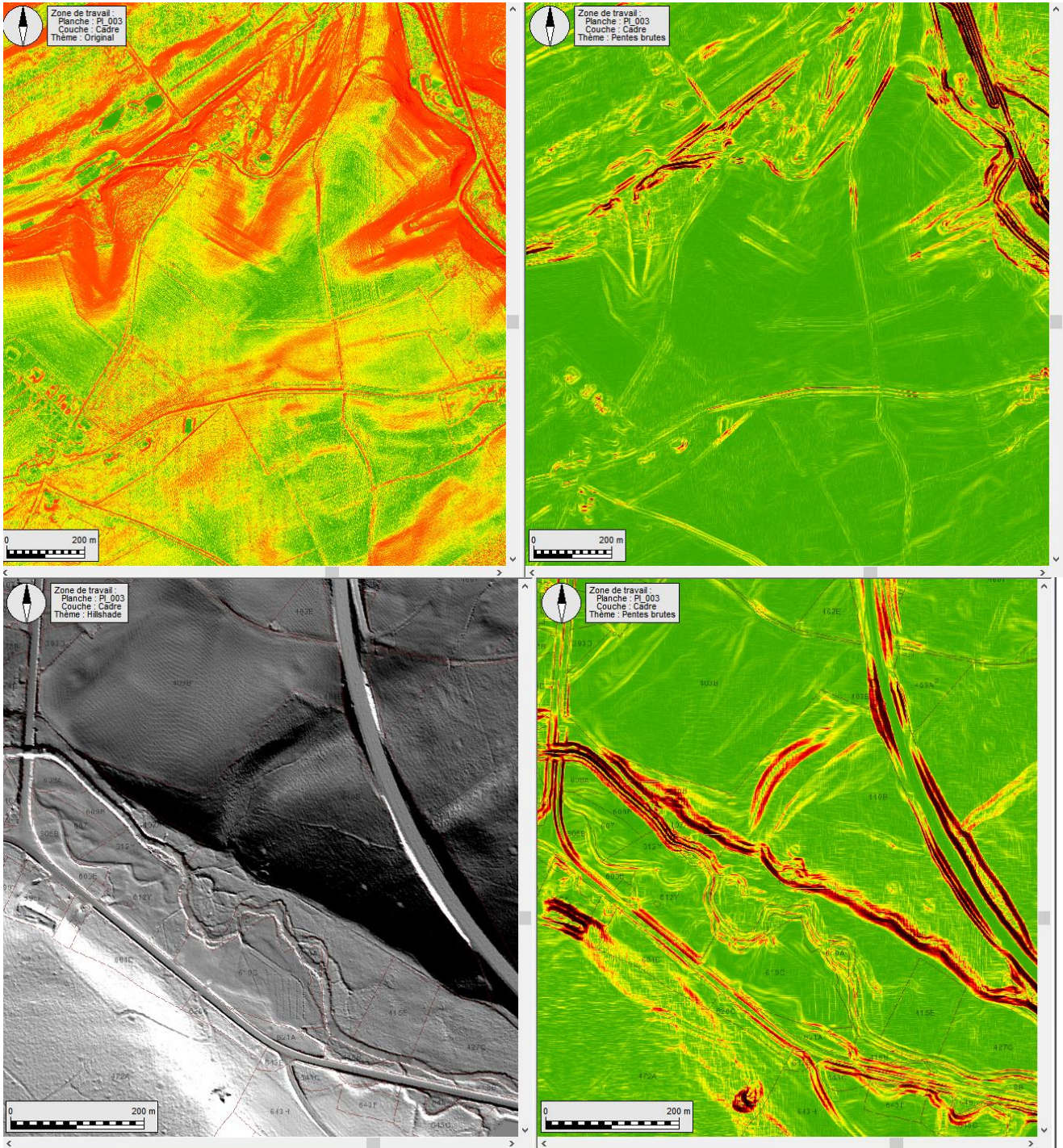


Figure 23 : L'application de la méthode en cascade permet de générer une carte des ruptures de pentes (haut/bas talus)



