



Prédiction de propriétés de sol à impact hydrologique à partir d'indicateurs de relief

Rémi BERGOT

Directeurs : Philippe LAGACHERIE et Stéphane FOLLAIN (UMR LISAH)

Master 2 Recherche Eau et Environnement (R2E)

Mention Biologie Géosciences Agroressources Environnement

Spécialité Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental

Juin 2010

Remerciements

Je tiens à remercier particulièrement Philippe Lagacherie et Stéphane Follain pour leur soutien et leur suivi tout au long du stage.

Un grand merci à toute l'équipe du Lisah pour son accueil et sa gentillesse.

Sommaire

Remerciements.....	2
Introduction.....	5
1.Contexte et problématiques de l'étude.....	7
1.1.Sol et relief : Concepts de base	7
1.2.La construction des MNT.....	8
1.2.1.Les différentes sources de données pour la construction du MNT.....	8
1.2.2.Quelle taille de pixel choisir pour une représentation optimale du terrain?...	10
1.3.Les données dérivées des MNT.....	11
1.3.1.Paramètres locaux.....	11
1.3.1.1.Dérivées Premières.....	11
1.3.1.2.Dérivée seconde.....	12
1.3.2.Paramètres régionaux	13
1.3.2.1.Aire contributive et Topographic Wetness Index.....	13
1.3.2.2.MrVBF : Multiresolution valley-bottom flatness index et le MrRTF : Multiresolution Ridge Top Flatness Index.....	13
1.4.Méthodes de construction de l'inférence spatiale intégrant la connaissance pédologique.....	13
1.4.1.Approche générale des modèles.....	14
1.4.2.Détermination de f.....	14
1.4.2.1.Arbres de régression et de classification.....	15
1.5.Les principales composantes de la zone d'étude : la Basse vallée de la Peyne (34).	15
1.5.1.Climat	15
1.5.2.Une forte variabilité géo-pédologique.....	15
1.6.Problématiques.....	17
2.Évaluation de la précision des MNT et des attributs de terrain.....	18
2.1.Données utilisées.....	18
2.1.1.MNT.....	18
2.1.2.Les relevés d'altitude.....	19
2.1.3.Calcul des attributs de terrain.....	19
2.1.3.1.Attributs calculés avec GRASS.....	20
2.1.3.2.Attribut calculé avec CLASS SPATIAL ANALYST.....	20
2.1.3.3.Attributs calculé avec SAGA GIS.....	20
2.2.Méthodes retenues.....	21
2.2.1.Définition et qualification d'un MNT de référence.....	21
2.2.2.Évaluation de la qualité des MNT.....	21
2.3.Résultats.....	22
2.3.1.Évaluation de la précision du Lidar.....	22
2.3.2.Évaluation de l'erreur des MNTs par rapport à la référence MNT0 (Lidar)	24
2.3.2.1.Évolutions des précisions de MNT à résolution constante.....	25

2.4.Conclusion préliminaire.....	29
3.Prédiction des profondeurs de sol et des grandes classes pédopaysagères.....	30
3.1.Données utilisées.....	30
3.1.1.Données de profondeur de sol.....	30
3.1.2.Données pédologiques.....	31
3.1.3.Zone d'étude et données de relief.....	31
3.2.Méthode.....	32
3.2.1.Discrétisation des profondeurs de sol.....	32
3.2.2.Unités de sol et Unités de sol regroupées : critères de regroupement.....	32
3.2.3.Approche de modélisation de la profondeur et des unités de sol : méthode CART.....	33
4.Résultats.....	34
4.1.1.Prédiction des profondeurs de sol.....	34
4.1.1.1.A type de MNT constant.....	36
4.1.1.2.A résolution d'étude constante	38
4.1.1.3.Modèles prenant en compte l'ensemble des attributs.....	39
4.1.2.Prédiction des unités de sol et des classes de sol.....	41
Conclusion et perspectives.....	43
Bibliographie.....	44

Index des illustrations

Illustration 1: Retour du signal Lidar sur un couvert végétal de type arboré ou arbustif (NOAA,2008).....	10
Illustration 2: Exemple d'un nuage de point Lidar indiquant le sommet des arbres (en jaune) et la surface du sol (en violet) (NOAA,2008).....	10
Illustration 3: Erreur quadratique moyenne entre les gradients calculés et théoriques sur une surface de référence de Morrison, pour un maillage de 101 par 101 points (Jones, 1998).....	13
Illustration 4: Coupe schématique ouest-est du bassin versant de Roujan (Andrieux et al., 1993).....	17
Illustration 5: Distribution de l'erreur entre Lidar et relevés du géomètre sur l'ensemble des relevés (soit 1689 points).....	24
Illustration 6: Répartition des différences d'altitudes entre le Lidar et les relevés du géomètre.....	25
Illustration 7: Comparaison des MNT1, MNT2, MNT3 (d'une résolution d'origine respectivement de 5, 10, et 30m) par rapport au MNT0 de référence (Lidar) dégradé à 30m.....	26
Illustration 8: Comparaison des MNT1, MNT2, MNT3, MNT4 (d'une résolution d'origine respectivement de 5, 10, 30 et 90m) par rapport au MNT0 de référence (Lidar) dégradé à 90m.....	27
Illustration 9: Comparaison des attributs topographiques des différents MNTs par rapport au Lidar.....	29
Illustration 10: Représentation schématique des différentes informations disponibles sous format raster.....	32
Illustration 11: Graphe Quantile-Quantile	33
Illustration 12: Histogramme des fréquences	33
Illustration 13: Comportement de l'évolution du taux de bon classement pour le TWI et l'altitude en fonction de la résolution d'étude et de précision verticale des MNT.....	36
Illustration 14: Évolution des taux de bons classement par attribut et par MNT avec un changement de résolution d'étude.....	37
Illustration 15: Évolution du taux de bon classement par attribut selon différents types de MNT à des résolutions d'étude de 30 et 90m.....	39

Index des tables

Tableau 1: Principales caractéristiques des sources de données pour la construction de MNT (d'après Nelson et al., 2009).....	12
Tableau 2: Principales caractéristiques des MNT utilisés dans l'étude.....	21
Tableau 3: Erreurs entre les altitudes mesurées par le Lidar et les altitudes relevées par le géomètre sur le Bassin Versant de Roujan (classées en RMSE croissante).....	24
Tableau 4: Sources des données de profondeur de sol.....	32
Tableau 5: Classes de sol regroupées.....	35
Tableau 6: Valeurs minimales et maximales des taux de classement pour chaque attribut de terrain.....	37
Tableau 7: Résultats des arbres de régression construits avec l'ensemble des attributs de terrain disponibles.....	41
Tableau 8: Fréquences d'apparition des variables selon leur niveau hiérarchique dans les arbres de classification	42
Tableau 9: Résultats des arbres de classification pour la prédiction des unités de sol à partir des attributs de terrain.....	43
Tableau 10: Résultats des arbres de classification pour la prédiction des unités de sol à partir des attributs de terrain (sans filtre appliqué sur les zones de transition).....	44

Introduction

Les sols sont les supports des activités humaines en particulier agricoles et du fonctionnement des écosystèmes (Soltner, 2005). La connaissance du sol et de ses propriétés, est fondamentale dans l'aide à la décision pour la gestion de cette ressource au niveau local comme au niveau global. Les enjeux environnementaux liés à la gestion de l'eau, au cycle du carbone, de l'azote, ou des polluants sont fortement liés au sol et à ses propriétés (Robert, 1996).

Le problème majeur concernant les données pédologiques est qu'elles sont en général peu abondantes et coûteuses à collecter. Il est donc nécessaire de combler ce manque de connaissance par l'utilisation de nouvelles méthodes de caractérisation et de cartographie des sols. En ce sens, les méthodes récentes de cartographie numérique des sols et de leurs propriétés sont prometteuses car elles permettent l'acquisition rapide et à moindre coût de cette connaissance pédologique. En effet ce domaine connaît un développement exponentiel depuis les années 1970 (McBratney et al., 2003; Lagacherie et al., 2007) lié essentiellement au progrès technologique (capacité de calcul, capteurs et techniques de mesure, géo-référencement, etc.).

Parmi les propriétés de sol, la connaissance des propriétés pédologiques à impact hydrologique sont d'une grande importance, car leur mesure ou estimation permet notamment de paramétrer les modélisations distribuées des flux d'eau et de matière à l'échelle des paysages. Lorsqu'il s'agit d'estimation des propriétés géométriques (profondeur) et hydrologiques, celle-ci passe dans la plupart des cas par l'utilisation d'indicateurs de relief issus des Modèles Numériques de Terrain (MNT) : 80% des études de cartographie numérique des sols font appel aux MNT.

On peut aisément expliquer ce recours massif au MNT pour l'estimation des propriétés de sol :

- i) les sols se forment par altération des matériaux parentaux (pédogenèse) et peuvent être redistribués (morphogénèse). Ces phénomènes de redistribution (érosion hydrique, érosion aratoire, etc.) sont largement sous le contrôle des paramètres topographiques (Birkeland, 1999). En particulier, la profondeur des sols est fortement en relation avec ces paramètres topographiques.
- ii) la donnée d'altimétrie est souvent la seule disponible de façon exhaustive sur un territoire. Par ailleurs, les données de relief ont un coût très inférieur et une disponibilité beaucoup plus élevée que les données de sol.

Ces deux points expliquent les corrélations souvent trouvées et exploitées entre les propriétés de sol et le relief.

Bien que l'usage des modèles numériques de terrain soit largement répandu, des questions méthodologiques demeurent quant à leur modalités d'utilisation pour prédire des propriétés de sol :

- i) quels indicateurs de relief sont les plus pertinents pour prédire une propriété de sol donnée ?
- ii) quel optimum de précision et de résolution de MNT permet de prédire une propriété de sol à moindre coût ?

Dans ce mémoire, nous avons traité ces questions en prenant pour exemple une propriété de sol à fort impact hydrologique, la profondeur. Le terrain d'étude se situe dans la basse

vallée de la Peyne et est représentatif des hydrosystèmes cultivés de la plaine viticole languedocienne.

L'étude est présentée en deux étapes, respectant ainsi les étapes de l'analyse menée : dans un premier temps nous avons cherché à évaluer la précision des modèles numériques de terrain disponibles ; dans un deuxième temps, nous avons étudié les relations entre les attributs de terrain et les caractéristiques du sol (profondeur et unités ou groupes de sol) sur notre zone d'étude.

1. Contexte et problématiques de l'étude

1.1. Sol et relief : Concepts de base

L'équation de Jenny (1941, 1961) (Eq.1) établit le rapport entre les caractéristiques chimiques, physiques et biologiques d'un sol en un lieu donné et l'environnement de ce sol. Le type de sol en une position donnée dépend d'un ensemble de facteurs de lapédogénèse (Soil Forming Factors ou SSF). Cela est traduit par l'équation suivante :

$$S = f(c, o, r, p, t) \quad (\text{Eq.1})$$

avec:

- S : le sol
- c : le climat
- r : le relief
- p : la roche mère (parent material)
- t : le temps

Ce formalisme de Jenny (1941, 1961) a été repris par McBratney et al. (2003) (Eq.2) qui y ajoutèrent la dimension spatiale et qui l'intégrèrent dans une logique de la démarche de prédiction des sols et de leurs propriétés. Ils expriment ainsi le lien entre les propriétés ou classes de sol et sa position topographique, et les propriétés des sols voisins. Par ailleurs, il s'agit ici de pouvoir *prédire* un type de sol ou une propriété de sol à partir de la connaissance d'un ensemble de variables, alors que Jenny décrit les facteurs de formation du sol.

$$S_c = f(s, c, o, r, p, a, n) \text{ or } S_a = f(s, c, o, r, p, a, n) \quad (\text{Eq.2})$$

avec

- S_a : la valeur estimée de l'attribut de sol
- S_c : la classe estimée du sol
- S : les propriétés du sol en un point,
- A : l'âge
- N : la position dans l'espace

De plus, le sol et son environnement sont à considérer sous plusieurs échelles spatiales, ce qui rend d'autant plus complexe la formalisation des relations sol – environnement (Dobos et al, 2009). Par ailleurs, à l'échelle locale (dans les cas où la roche mère et le climat peuvent être considérés comme homogènes), l'information sur relief peut être suffisante pour une cartographie efficace des sols. En revanche, aux échelles nationales et continentales, les facteurs considérés précédemment comme homogènes ne le sont plus.

Quoi qu'il en soit, le relief est un facteur déterminant intervenant dans les processus pédologiques, à l'échelle locale, comme à l'échelle d'une petite région agricole ou d'un

continent. De ce fait, la donnée de relief est utilisée dans 80% des études de cartographie numérique des sols listée par McBratney et al. (2003) et peut être considérée comme une variable prédictive fondamentale en science du sol.

1.2. La construction des MNT

L'information sur le relief utilisée en cartographie numérique est le Modèle Numérique de Terrain (MNT). Par définition, dans un MNT l'altitude est connue en tout point de l'espace. On distingue trois types de MNT : les MNT vectoriels (Triangular Irregular Networks basés sur la triangulation de Delaunay), les MNT basés sur la numérisation de courbes de niveau (de type vecteur ligne), et les MNT raster ou MNT réguliers. Ces derniers sont les plus utilisés car ils ont une structure simple qui facilite le traitement informatique des données (Hengl et Evans, 2009).

La première étape de la réalisation du MNT est la collecte des données d'altitude.

1.2.1. Les différentes sources de données pour la construction du MNT

Les données altimétriques peuvent être collectées sur le terrain en utilisant des méthodes classiques de planimétrie topographique via l'utilisation de théodolites ou des données GPS (différentiels ou non). Ce sont des mesures directement menées sur le terrain (Nelson et al., 2009), essentiellement utilisées sur des petites surfaces.

Une des premières techniques de production de MNT consiste en la *numérisation par un opérateur des courbes de niveau des cartes topographiques*. Bien que pouvant être en partie automatisée, cette méthode est de moins en moins utilisée au profit de techniques plus rapides et précises : les méthodes de télédétection. Ces dernières sont mieux adaptées à des zones d'études plus vastes (Nelson et al., 2009)

Apparu dans les années 1990, le *Lidar* (Light Detection and Ranging) permet d'obtenir les données topographiques par la mesure du temps de retour d'un signal Laser. En terme de précision, le Lidar est l'outil le plus performant du marché et connaît une utilisation de plus en plus intensive (Nelson et al., 2009 ; Kringer et al., 2009 ; Smith et al., 2005). Les données brutes du Lidar sont disponibles sous forme d'un nuage de points, chaque point représentant un retour du signal sur les objets de surface, l'altitude du point le plus bas étant considérée comme l'altitude du terrain. Pour construire le MNT, les points Lidar indiquant l'altitude du terrain sont sélectionnés parmi le nuage de point grâce à un filtre mathématique. Le maillage de point est souvent considéré comme assez dense pour échantillonner les altitudes du sol : lorsque le signal rencontre une zone arborée, une partie des signaux laser pourra atteindre le sol en passant par les trous de la canopée. Le dernier signal retour indiquera donc l'altitude du sol (cf. illustrations 1 et 2).

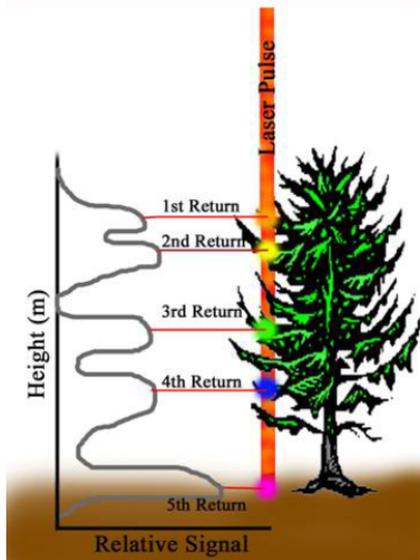


Illustration 1: Retour du signal Lidar sur un couvert végétal de type arboré ou arbustif (NOAA,2008)

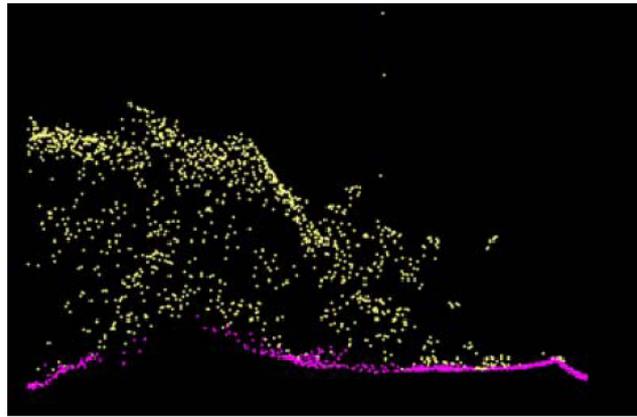


Illustration 2: Exemple d'un nuage de point Lidar indiquant le sommet des arbres (en jaune) et la surface du sol (en violet) (NOAA,2008).

La *photogrammétrie* est une technique éprouvée qui permet d'obtenir les données de relief à partir de photographies aériennes géo-référencées et reproduisant une vision stéréoscopique. Les résolutions obtenues peuvent être de l'ordre de 1 m (Nelson et al., 2009).

ASTER (Advanced Spaceborn Thermal Emission and Reflectance Radiometer) fournit des données à partir de signaux du proche infra rouge visible (VNIR longueur d'onde de $0.5\mu\text{m}$) à l'infrarouge thermique (TIR longueur d'onde de 8 à $12\mu\text{m}$) mais aussi des données d'altitude d'une résolution de 30 m avec une précision horizontale et verticale de 30 m (après géo-référencement, cette erreur est ramenée à 7 m). Les données sont disponibles à bas coût, et couvrent une grande partie du globe (83°N à 83°S) (NASA, 2009).

Les données *SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)* couvrent la totalité du globe et sont disponibles en accès libre à une résolution de 90 m. Il s'agit de données d'altitude de surface (Nelson et al., 2009) collectées avec la technologie Radar. Les caractéristiques des types de MNT utilisés pour l'étude sont synthétisées dans le tableau 1.

Tableau 1: Principales caractéristiques des sources de données pour la construction de MNT (d'après Nelson et al., 2009)

Source	Résolution (taille de pixel en mètre)	Précision	Footprint	Cout (€/km ²)
Photogrammétrie	> 1 m (5 m et 10 m pour l'étude)	Très haute précision horizontale et verticale (dépend de la résolution de l'ortho-photographie)		100 à 200 / km ² selon la précision voulue
Lidar	1 à 3 m	0,15 à 1 m en vertical 1 m en horizontal	30 à 50 km ² /h	25 à 50 selon la précision
SRTM	90 m	16 m en vertical 20 m en horizontal	60°N à 58°S	gratuit
ASTER	30 m	7 ou 50 m en vertical 7 ou 50 m en horizontal	3600 km ²	0,02 €/ km ²

1.2.2. Quelle taille de pixel choisir pour une représentation optimale du terrain?

La résolution du MNT influe directement sur le résultat des calculs de dérivées de terrain, ce qui peut perturber les analyses : Chaplot et al. (2000) ont montré que les changements de résolution perturbaient significativement les résultats de leur modèle de prévision de l'hydromorphie. L'étude montre qu'une augmentation de la résolution de 30 à 50 m augmentait considérablement les erreurs sur les attributs de terrains et donc sur les résultats du modèle.

Pour obtenir des attributs dérivés fiables et stables, la résolution doit correspondre à l'échelle des processus mis en jeu sur le terrain, et à la complexité de la géomorphologie du terrain étudié. Des résolutions grossières par exemple, conviendront à l'analyse de paysages au relief doux et régulier (Kienzle, 2004 ; Smith et al., 2006).

La résolution du MNT est aussi à mettre en rapport avec la précision verticale des données d'altitude. En effet, des erreurs d'analyse et des artefacts peuvent apparaître lorsque la résolution est très fine et l'erreur verticale importante (Hengl, 2006). Kienzle (2004) suggère un optimum de résolution compris entre 5 et 20 m selon la topographie de la zone d'étude pour obtenir des paramètres de terrain fiables alors que McBratney et al. (2000) proposent des résolutions d'étude dépendantes de l'échelle de cartographie des sols :

- > 2 km : échelle nationale globale
- de 2 km à 20 m : bassin versant, échelle paysagère
- < 20 m : échelle locale.

1.3. Les données dérivées des MNT

Les données dérivées des MNT sont des paramètres géomorphologiques que l'on peut ensuite rapprocher des propriétés de sol en les croisant ou non avec d'autres paramètres (données de spectrométrie par exemple). Dans un environnement méditerranéen caractérisé par la redistribution des sols (phénomène d'érosion - redéposition important), l'étude des caractéristiques géomorphologiques du terrain semble prometteuse.

1.3.1. Paramètres locaux

Les paramètres locaux, calculés sur des altitudes en format Raster, sont calculés en prenant en compte les valeurs de relief de leur voisinage immédiat (on considère généralement une fenêtre mobile de 3x3 pixels).

1.3.1.1. Dérivées Premières

Le gradient : on peut exprimer le vecteur gradient en dans un espace à 2 dimensions de la manière suivante :

$$\text{grad } Z = (dz/dx, dz/dy) \quad (\text{Eq.3})$$

On déduit de cet indicateur deux propriétés fondamentales utilisées en géomorphométrie : module et direction.

La pente et l'aspect sont des dérivées basiques très largement utilisées en cartographie des sols et leur calcul découle directement de l'équation 3.

$$\text{Pente} = \arctan (|\text{grad}Z|) \quad (\text{Eq.4})$$

$$\%Pente = \tan (\text{Pente}) * 100 \quad (\text{Eq.5})$$

Il existe plusieurs algorithmes de calcul de pente à partir de données raster dont l'algorithme d'Evans (1980), Horn (1981), Zevenbergen et Thorne (1987) étudiés par Kienzle (2004).

Les algorithmes les plus performants et les plus couramment utilisés sont celui de Horn (disponible dans la suite logicielle ArcGis®) et celui de Zevenbergen et Thorne. Kienzle (2004) compare les pentes obtenues en utilisant ces deux algorithmes sur la base de rasters à différentes résolutions et montre que ces deux méthodes de calculs fournissent des pentes équivalentes. Jones (1998) montre que ces deux algorithmes sont les plus performants parmi huit autres algorithmes souvent utilisés et listés sur l'illustration 3.

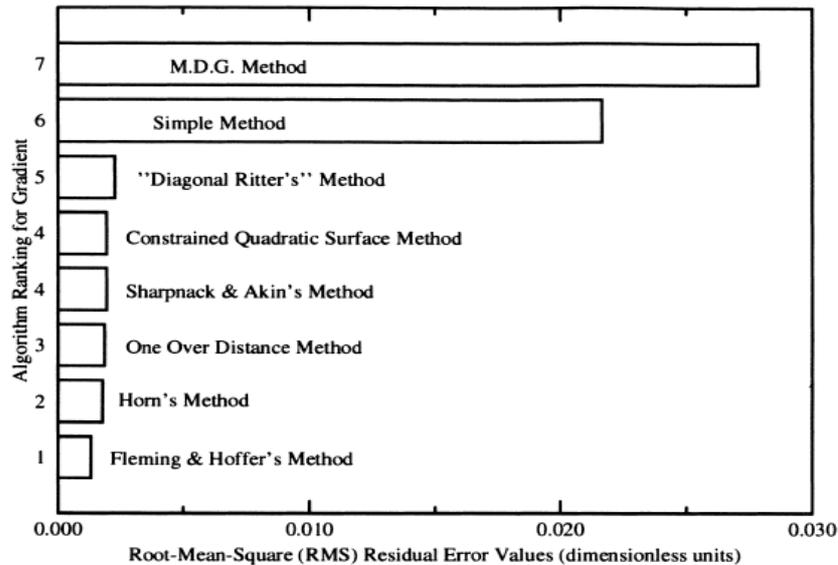


Illustration 3: Erreur quadratique moyenne entre les gradients calculés et théoriques sur une surface de référence de Morrison, pour un maillage de 101 par 101 points (Jones, 1998).

La pente calculée sur la base de ces algorithmes peut ensuite être mise en relation avec des propriétés de sol à impact hydrologique. Laurent et Rossignol (2003) mettent en évidence le lien entre le pourcentage de pente (calculé avec un MNT de résolution de 50m) et deux propriétés d'intérêt hydrologique : l'épaisseur du sol et l'épaisseur affectée par l'hydromorphie sur un bassin versant de 382 km².

D'autres caractéristiques du sol peuvent être aussi corrélées à la pente : Moore et al (1993) montrent l'influence de la pente sur le pH, l'épaisseur de l'horizon A, le taux de matière organique, le taux de phosphore ainsi que les teneurs en sable et en limon. Selon le modèle de Henderson et al. (2005), la pente est un des facteurs les plus discriminant pour évaluer l'azote total du sol.

L'orientation de la pente (ou « Aspect » en anglais) permet de définir : i) la direction des flux et ainsi de déterminer pour chaque pixel les aires amont drainée et ii) l'exposition des pixel vis à vis des points cardinaux et de déterminer ainsi l'insolation, paramètre important pour le calcul des flux évaporatoires. Cet indicateur a donc un intérêt tout particulier en hydrologie comme le montre une étude de Campling et al. (2002) qui utilisèrent entre autres la pente et l'orientation pour la détermination de classes de drainage du sol.

1.3.1.2. Dérivée seconde

Les fonctions de dérivée seconde caractérisent les courbures du relief. On en déduit la convexité ou la concavité sous deux dimensions (plane ou verticale) des surfaces étudiées. Ces deux dimensions (courbure verticale ou courbure tangentielle) sont exploitées pour connaître les mécanismes de convergence ou de divergence, de ralentissement ou d'accélération des écoulements. Ces données sont utilisées pour expliquer les phénomènes d'érosion et de dépôt. Les courbures sont utilisées pour établir des relations sol-paysage

(Lagacherie et Depraetere, 1989).

1.3.2. Paramètres régionaux

1.3.2.1. Aire contributive et Topographic Wetness Index

Les attributs de terrain régionaux prennent en compte les relations entre les pixels sur une étendue plus large que la fenêtre 3x3 utilisée pour les attributs locaux. Ces paramètres ont été développés pour traduire les phénomènes hydrologiques sur le terrain.

L'aire contributive (A) renseigne sur la surface qui contribue au ruissellement observé en un point. C'est un attribut morphométrique fondamental duquel on peut déduire le Topographic Wetness Index (TWI). Le TWI a été développé par Beven et Kirkby (1979) pour la réalisation du modèle hydrologique TOPMODEL. Le TWI décrit la tendance qu'à un point à accumuler de l'eau. Il est défini ainsi :

$$TWI = \ln (A/\tan \beta) \quad (\text{Eq.6})$$

avec A l'aire contributive et β l'angle de la pente au point considéré. Cet indice est en lien étroit avec les phénomènes d'érosion et de déposition en contexte méditerranéen. D'autre part, la pertinence de cet indice est largement tributaire de la qualité du MNT à partir duquel il est calculé (Kirkby, 1999).

1.3.2.2. MrVBF : Multiresolution valley-bottom flatness index et le MrRTF : Multiresolution Ridge Top Flatness Index

Le MrVBF (Gallant et Dowling, 2003) peut être interprété comme un indicateur de présence de dépôt sédimentaire. Il est calculé grâce à un algorithme appliqué sur un MNT à différentes échelles. Il permet d'identifier synthétiquement les zones de fond de vallées, c'est à dire les zones plates et de basse altitude par rapport à leur voisinage. Il permet de séparer les zones d'érosion et les zones de dépôt sédimentaire. On part donc de l'hypothèse que les fonds de vallée plats sont des zones de sédimentation privilégiée.

Par conséquent, cet indice est utilisé pour prédire l'épaisseur des sols en zone de dépôt tandis que le TWI est utilisé en zone d'érosion (McKenzie et Gallant, 2007). En zone de transition, les deux indices sont pondérés suivant l'importance de l'érosion ou du phénomène de dépôt (McKenzie et al., 2003; Murphy et al., 2005).

Le pendant du MrVBF est le MrRTF issu d'un algorithme similaire, qui permet d'identifier les zones de haut plateau.

1.4. Méthodes de construction de l'inférence spatiale intégrant la connaissance pédologique

Walter et al. (2007) soulignent la nécessité d'intégrer le savoir pédologique en cartographie des sols et plus largement dans les procédures de cartographie numérique. Quelque soit la méthode appliquée les mêmes étapes sont respectées :

- i. Calage à partir de données de terrain ;
- ii. extrapolation sur des zones plus larges où seules les données environnementales sont disponibles (relief, ...) ;
- iii. validation de la méthode en s'appuyant sur des données indépendantes des

données de calibration ;

iv. quantification des erreurs et ajustement des conditions de référence.

On peut s'appuyer sur deux types de lois :

Les relations sol-paysage, qu'il est possible de formaliser selon le modèle s,c,o,r,p,a,n (MNT, données géologiques...) pour la prédiction des classes de sol. Ces lois peuvent être traduites par un arbre de classification établi à partir d'une carte de référence. (Lagacherie, 1992).

Les lois de Toposéquence ou loi de voisinage pour lesquelles on considère que $s(x,y)=f(s(x+u,y+v))$, c'est à dire qu'une classe de sol ou une propriétés de sol en $s(x,y)$ peut être expliqué par ses coordonnées (x,y) et par les sols avoisinants (McBratney et al., 2003). Cette méthode introduite par Lagacherie et al. (1995) repose sur la prise en compte des séquences de sol et la dépendance des séquences avec la géomorphologie. Il s'agit d'évaluer la probabilité d'occurrence d'une classe de sol en un point donné, connaissant la classe de sol, la localisation géographique et l'altitude relative des points avoisinants. L'hypothèse émise est celle de la stationnarité des relations sols-paysage à l'échelle du site étudié. Comme précédemment, la calibration du modèle spatial se fait à partir d'une carte pédologique et du MNT sur une zone réduite dite « site de référence ». Appliquée aux classes de sol, cette technique peut potentiellement être appliquée à la cartographie de propriétés de sol (Lagacherie et Voltz, 2000).

Ces méthodes peuvent être appliquées sur des zones étendues, où les corrélations entre attributs de terrain et propriétés de sol ne sont pas linéaires ou inconnues.

1.4.1. Approche générale des modèles

On peut exprimer écrire $S = f(Q) + e$, avec S la classe ou la propriété de sol, Q une ou un ensemble de variables explicatives de S et e le résidu.

On part des observation de S sur le terrain à des positions x,y connues sur m points d'observation. On ajuste la fonction f aux données de Q (ces données étant généralement disponibles sous forme d'un raster de taille M) sur les données des m points d'observation. On étend les prédictions à l'espace M .

Pour que la méthode soit efficace, il faut que m soit très inférieur à M et que S soit plus difficile à mesurer que Q . Le succès de la méthode dépend d'un certain nombre de critères :

- i. avoir assez de variables observées (en tout point et en densités suffisamment importante) ;
- ii. avoir assez de données sol pour établir la relation ;
- iii. une fonction f assez souple pour établir des relations non linéaires ;
- iv. une forte relation sol-environnement (McBratney et al., 2003; Lagacherie et McBratney, 2007).

1.4.2. Détermination de f

Nous verrons ici quelques formes de la fonction f qui lie la variable S à prédire aux autres facteurs explicatifs (s,c,o,r,p,a,n). Nous nous intéresserons en particulier au formes de f utilisées pour la prédiction des propriétés de sol. Toutes les méthodes ne seront pas

détaillées ; nous nous intéresserons plus particulièrement à la méthode CART.

1.4.2.1. Arbres de régression et de classification

La structure de l'arbre est générée en divisant les données de manière itérative en différents groupes, chaque division étant choisie de façon à maximiser la différence dans la variable réponse entre les groupes. Les données manipulées peuvent être discrètes ou continues, on peut ainsi prédire des classes de sol ou des propriétés de sol continues. Pour la détermination de propriétés de sol continue, on parle d'arbre de régression. Un algorithme de décision établi à partir d'un jeu de données de référence permet une ramification automatique de l'arbre (McBratney et al., 2003 ; Cornillon et al., 2008).

Une des méthode de construction d'arbre répandue est la méthode CART. Cette méthode est utilisée par Selle et al. (2006) pour prédire la capacité de rétention d'eau du sol. Pachepsky et al. (2001) a également recours aux arbres de régression pour la détermination de la capacité de rétention en eau à partir d'attributs de terrain (pente, courbure). McKenzie et Ryan (1999) utilisent aussi les arbres de régression pour la cartographie de la profondeur de sol à partir d'un MNT et de données radiométriques gamma.

Une des limitations de cette technique est le manque de lissage des résultats, car chaque terminaison de l'arbre est discrète.

1.5. Les principales composantes de la zone d'étude : la Basse vallée de la Peyne (34)

La zone d'étude se situe dans la petite région naturelle « plaines de l'Orb et de l'Hérault ». Elle s'étend sur 55 km² (la taille totale du bassin de la Peyne ayant une superficie d'environ 125km²). La haute vallée est marquée par un relief accidentée avec une végétation de type garrigue où le chêne vert est prédominant. La Basse vallée est caractérisée par un relief plus doux et une anthropisation du milieu importante : on y rencontre un paysage viticole typique de la moyenne vallée de l'Hérault.

1.5.1. Climat

La basse vallée de la Peyne est soumise à un climat méditerranéen sub-humide caractérisé par une forte variabilité inter-annuelle et intra-annuelle du régime pluviométrique avec un alternance de courts épisodes pluvieux d'intensité importante avec de longues période de sécheresse. Les sols sont soumis à des contraintes hydrologiques importantes (érosion, sécheresse) (Andrieux et al., 1993).

1.5.2. Une forte variabilité géo-pédologique

On rencontre plusieurs types de sols au sein de la zone d'étude : sols développés sur alluvions, Sols développés sur molasse du Miocène, sols développés sur la transition Miocène-Pliocène, sols sur dépôts Plio-Villafranchiens et sols sur formation basaltiques (cf.

Annexe 1). Au niveau des profondeurs de sol, la variabilité est aussi importante, notamment à cause des aménagements en terrasses. La toposéquence présentée en figure 4 montre l'étagement des principales formation.

Cette variabilité géologique et pédologique entraîne une forte variabilité spatiale des réserves hydriques des sols, causée notamment par une variabilité importante des profondeurs de sol (Guix, 2005)

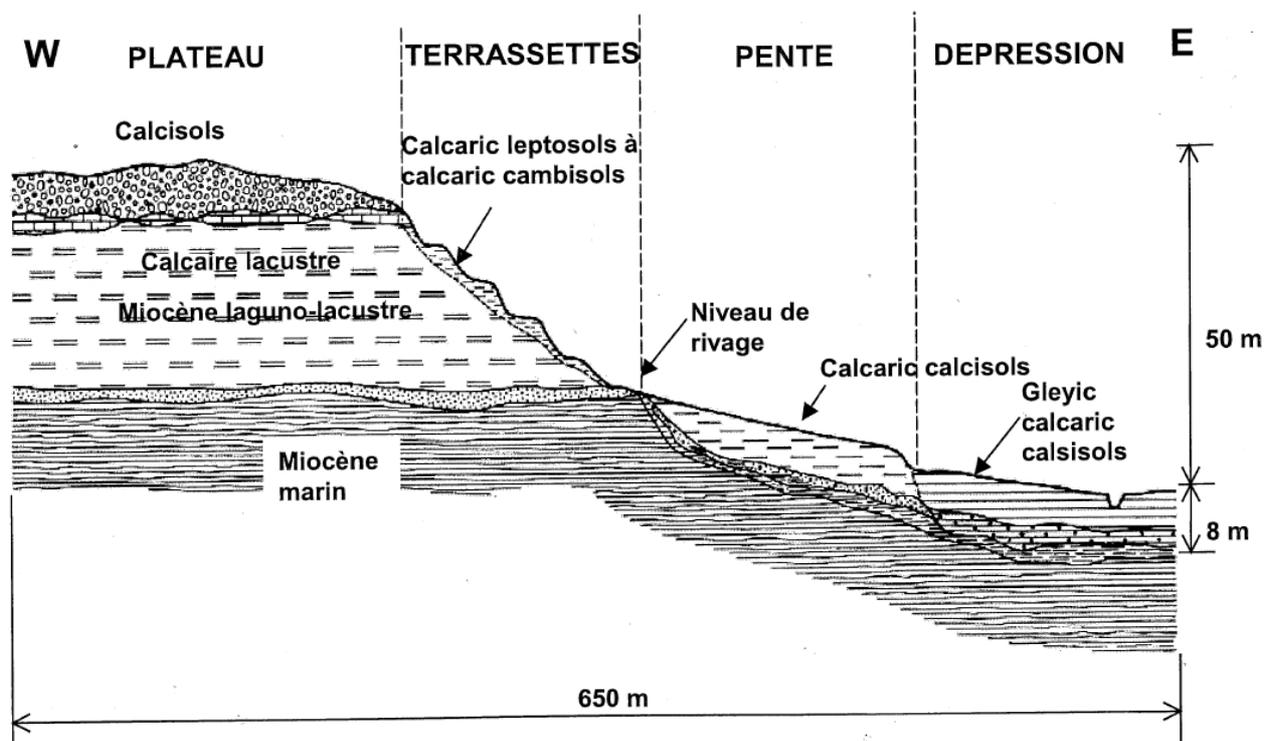


Illustration 4: Coupe schématique ouest-est du bassin versant de Roujan (Andrieux et al., 1993)

1.6. Problématiques

Compte tenu des coûts engendré par la collecte de données pédologiques et de la disponibilité des données de relief, il est intéressant d'étudier plus précisément les relations entre le sol et la géomorphologie. Cependant les MNT ont des disponibilités variables selon leur précision et leur résolution ; il est donc nécessaire de connaître à la fois l'impact de la résolution du MNT sur la performance attributs de terrain, mais aussi de savoir quels sont les attributs de terrain qui expliquent le mieux des propriétés de sol, compte tenu des processus de morphogénèse (redistribution des sols par érosion et dépôt par exemple).

Plus spécifiquement, dans un environnement méditerranéen, où l'on peut émettre l'hypothèse que les profondeurs de sol sont étroitement liées aux caractéristiques du relief, les principales problématiques sont les suivantes :

- Quels attributs de terrain sont les plus pertinents pour prédire les profondeurs de sol ?
- Quel est l'impact de la précision et de la résolution des MNT sur la performance des indicateurs?

La première phase de l'étude consiste à caractériser la précision des MNTs disponibles sur la zone, et de l'impact des différentes précisions sur les attributs de terrain dérivés des MNT.

La deuxième phase est consacrée à l'étude des relations sol-relief, à différentes précisions, et à différentes résolutions.

2. Évaluation de la précision des MNT et des attributs de terrain

Dans cette partie, notre objectif est d'évaluer la qualité des modèles numériques de terrain qui vont ultérieurement être utilisés pour prédire les propriétés de sols. Cette qualité s'évalue d'une part vis à vis de la donnée de base qu'ils délivrent, c'est à dire une altitude locale mais aussi vis à vis des différents attributs de terrains qu'ils permettent de dériver afin de caractériser les formes de relief en relation avec les sols et leurs propriétés. Trois étapes vont être distinguées :

- la définition et la qualification du MNT de référence auquel les différents MNT vont être comparés pour estimer leur précision
- l'évaluation de cette précision pour les différents MNT disponibles en considérant des résolutions constantes (30 mètres et 90 mètres)
- l'évaluation de l'effet de la résolution la précision des différents MNT ramenés à des résolutions homogènes (30 m et 90 m) afin d'éliminer l'effet de la résolution spatiale dans l'évaluation de la précision des MNT à précision initiale de MNT constante

En préalable à la présentation des résultats obtenus pour ces trois étapes, nous présentons les données que nous avons utilisées ainsi que les méthodes retenues.

2.1. Données utilisées

Dans cette section sont présentés successivement, les différents MNT testés, l'échantillon de points cotés servant à qualifier le MNT de référence, et les attributs de terrain dérivés des MNT et leurs modes de calcul.

2.1.1. MNT

Différents modèles numériques de terrain ont été rassemblés sur la zone d'étude (cf. tableau 2). Ils ont été produits selon des sources de données et des méthodes différentes.

Le MNT0 est construit à partir de données Lidar (voir 1.2.1.). Les données d'altitude sont obtenues par réflexion d'un signal Laser. Le diamètre des points d'impact du Laser au sol est compris entre 0,6 et 0,8 m : pour un même « pulse », le signal peut être reflété par des surfaces ayant des altitudes différentes. Pour ce MNT, les précisions verticales et horizontales évaluées par le bureau d'étude ayant réalisé ce MNT sont respectivement de 0,15 m et 0,05 m. Le Lidar se positionne donc a priori comme le MNT le plus précis.

Les MNT1 est construit à partir de stéréo-images de la surface du sol (ou MNT photogrammétrique dérivé de couples d'images aéroportée).

Le MNT2 est construit à partir des courbes de niveau tous les 5 m et des points cotés de la carte topographique au 1 :25 000 de l'IGN, mis à disposition par l'IGN dans la BD Topo. Ces données sont dans un premier temps utilisées pour construire un TIN (Triangular Irregular Network) reproduisant le relief et à partir duquel peuvent être

dérivés par interpolation les estimations d'altitude sur une maille régulière formant le MNT.

Les MNT 3 et 4 correspondent respectivement au MNT ASTER et SRTM (voir description au 1.2.1.).

Tableau 2: Principales caractéristiques des MNT utilisés dans l'étude

Nom du MNT	Emprise spatiale	Sources MNT	Résolution (m)	Précision verticale*	Date de collecte des données
MNT0	BV Roujan + BV Bourdic	Lidar BE Geolas Consulting	1	0.15 à 0.05 m	2002
MNT1	Sud Ouest du département de l'Hérault	Photogrammétrie BE Gaïa CG34	5	0.5 (zone dégagée) à 1m (zone couverte) Précision horizontale : 60 cm	2005
MNT2	Bassin Peyne	BDTopo IGN	10	-	1989
MNT3	Languedoc Roussillon	ASTER	30	7 à 50 m en vertical 7 à 50 m en horizontal	2000
MNT4	Languedoc Roussillon	SRTM	90	16 m en vertical 20 m en horizontal	2000

* Les données de précision fournies dans le tableau ci dessus sont celles délivrées par les entreprises ou organismes ayant produit le MNT.

2.1.2. Les relevés d'altitude

Il s'agit de 1822 relevés effectués au tachéomètre par un géomètre sur le bassin versant de Roujan en 1992. Ce sont les données d'altitude a priori les plus précises car ce sont les seules recueillies directement sur le terrain. Les points mesurés serviront de référence pour l'évaluation du MNT Lidar.

Une partie de ces points a été positionnée pour caractériser certains accidents topographiques locaux tels des fossés, ou des bords de talus ou éléments anthropiques; lorsqu'ils sont identifiés comme tels, ces points ont été éliminés de l'ensemble de test car l'identification de ces accidents ne correspond pas à l'objectif de ce travail.

Finalement le jeu final de points côtés comprend 1679 points d'altitude; seuls ces points seront pris en compte dans l'analyse qui suit.

2.1.3. Calcul des attributs de terrain

Pour le calcul des attributs de terrain, nous avons eu recours à différents Systèmes d'Information Géographique (SIG), les manipulations à effectuer sur les données étant plus ou moins aisées selon les différents SIG. Seuls des SIG libres ont été utilisés pour l'étude :

GRASS (version 6.4) est un SIG très puissant pour les traitements et les calculs sous format Raster. L'interface en ligne de commandes permet d'effectuer rapidement un grand nombre de manipulations.

SAGA (version 2.0.4) est un SIG polyvalent qui permet de nombreuses analyses de terrain (analyse hydrologique, morphologique...). Le calcul d'un certain nombre d'attributs de terrain comme MrVBF et le MrRTF est préprogrammé.

CLASS Spatial Analyst est un logiciel australien de modélisation environnementale. Il intègre un grand nombre de données environnementales australiennes (salinité des sols, réseaux hydrographiques...). Il permet le calcul du MrVBF.

Les attributs de terrain concernés par cette étude correspondent à ceux identifiés dans la littérature comme prédicteurs possibles de propriétés des sols. Ils ont été décrits plus haut (cf. Partie 1.3). Dans la suite nous détaillons les solutions techniques que nous avons appliquées pour les calculer :

2.1.3.1. Attributs calculés avec GRASS

GRASS permet de calculer la pente, l'orientation (aspect), les courbures plane et de profil (fonction `r.slope.aspect`) ainsi que le Topographic Wetness Index (fonction `r.topidx`). La fonction `r.slope.aspect` de GRASS utilise la formule de Horn (1981) pour le calcul des pentes et des courbures.

2.1.3.2. Attribut calculé avec CLASS SPATIAL ANALYST

CLASS permet de calculer le MrVBF, en prenant en compte automatiquement la résolution du MNT pour le calcul de cet indice.

2.1.3.3. Attributs calculé avec SAGA GIS

Le MrVBF et le MrRTF ont été calculés avec SAGA. A la différence de CLASS, l'utilisateur doit préciser les paramètres pour la calcul du MrVBF, notamment le seuil de pente à partir duquel l'algorithme considère le pixel de calcul comme zone plane ou pentue. Ce seuil est à ajuster en fonction de la résolution du MNT de base utilisé : un MNT de résolution grossière aura tendance à lisser la topographie.

Le seuil par défaut est de 16 degrés ; c'est un seuil identifié de manière empirique par Gallant et Dowling (2003) pour le calcul de leur indice. Or ce seuil est adapté aux MNT australiens dont la résolution est généralement de 25m. Ainsi, dans le calcul de l'indice, une pente inférieure à 16° sera considérée comme « plane ». Les auteurs précisent que ce seuil doit être multiplié par 2 lorsque la résolution est multipliée par 3. On peut donc déduire le seuil à appliquer pour un MNT de résolution donnée, sachant que le seuil de 16 degrés est valable pour une résolution de 25m (Eq. 7).

$$Seuil = \frac{16}{2^{\frac{1}{\ln(3)} \cdot \ln\left(\frac{résolution}{25}\right)}}$$

Eq. 7

2.2. Méthodes retenues

2.2.1. Définition et qualification d'un MNT de référence

Nous avons choisi de considérer le MNT Lidar comme le MNT de référence a priori pour deux raisons :

- D'après la littérature et les données fournies par son constructeur, c'est à priori le MNT avec la plus faible erreur de tous les MNT testés ;
- Sa résolution fine (1m) permet de limiter la distorsion de support géographique lorsque sont comparés un relevé d'altitude ponctuel issu du terrain et un pixel de MNT.

Il reste cependant à vérifier que les valeurs d'erreur réelles obtenues en comparant le MNT Lidar avec les points du géomètre sont effectivement faibles. Au delà de la valeur globale d'erreur, nous avons voulu tenir compte des situations de terrain susceptibles d'augmenter l'erreur du MNT Lidar : bords de routes, limites de parcelles, zones de forêt. Des masques ont été appliqués pour filtrer ces situations et obtenir des estimations d'erreurs les excluant. Au vu des résultats, nous pouvons être amenés à exclure une de ces situations de l'analyse.

2.2.2. Évaluation de la qualité des MNT

L'évaluation de la qualité des MNT est effectuée sur la base des différences entre le MNT de référence choisi à l'étape précédente et les MNT testés. Les différences sont calculées pour les valeurs d'altitudes et d'attributs de terrain. On compare les attributs de terrain d'un MNT d'une résolution donnée avec le MNT Lidar dégradé à la résolution correspondante. Les versions du MNT dégradées aux résolutions supérieures (10m, 30m et 90m) ont été produites en moyennant les altitudes des pixels à la résolution correspondante (fonction de GRASS `r.resamp.stats method=average`).

En outre, pour tester la précision des MNT à une résolution homogène, tous les MNT disponibles ont été dégradés à la résolution de 90m puis comparés avec le MNT Lidar à cette même résolution. De même, les MNT de résolution inférieure à 30m ont été dégradés à la résolution 30m pour une comparaison avec le MNT Lidar à cette résolution. Notons que le MNT4 (SRTM de résolution 90m) est exclu de ce dernier test. Nous pourrions identifier à l'issue de cette partie un MNT ayant une erreur faible par rapport à la référence Lidar. Nous utiliserons ce MNT dans à l'étape suivante (3ème partie).

Symétriquement, il est intéressant d'examiner comment évolue la qualité d'un MNT d'une précision donnée lorsqu'il est dégradé à des résolutions spatiales grossières. Pour cela, le MNT à erreur la plus faible identifié dans la première partie sera dégradé à différentes résolutions et comparé à la référence MNT0.

Les indicateurs permettant de quantifier la qualité des MNT sont la moyenne des erreurs (Mean Error, ME) et l'erreur quadratique moyenne (ou Root Mean Square Error, RMSE)

$$ME = \sum_{i=1}^n \frac{(\hat{X}_i - X_i)}{n} \quad \text{Eq. 8}$$

et

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{X}_i - X_i)^2}{n}} \quad \text{Eq. 9}$$

Avec \hat{X} la valeur estimée (altitude du MNT comparé), X la valeur effective (altitude du MNT de référence) et n le nombre d'individus (nombre de pixels).

2.3. Résultats

2.3.1. Évaluation de la précision du Lidar

Tableau 3: Erreurs entre les altitudes mesurées par le Lidar et les altitudes relevées par le géomètre sur le Bassin Versant de Roujan (classées en RMSE croissante)

Zone	Nbre de points	Moyenne des écarts (en valeur absolue (m))	ME (m)	RMSE (m)	Min (m)	Max (m)
Relevés hors forêt et à plus de 5m de la limite de parcelle	347	0,154	0,056	0,079	-1,436	1,615
Relevés hors forêt	1379	0,276	0,152	0,213	-2,635	2,811
Relevés sur la route à plus de 2m du bord de route	43	0,199	0,134	0,323	-0,174	1,043
Relevés sur la route	128	0,308	0,235	0,469	-1,048	1,281
Relevés sur parcelle à plus de 5m de la limite de parcelle	450	0,263	0,181	0,536	-1,290	3,145
Totalité des points	1679	0,350	0,226	0,613	-2,635	3,663

On constate que le Lidar fait peu d'erreurs sur les zones hors forêt et en milieu de parcelles. Les erreurs d'altitude observées sur le Lidar peuvent être expliquées par deux effets :

- l'effet « bordure » qui provoque des décalages dans les mesures : les micro-reliefs (de moins d'un mètre) se trouvant généralement en bordure de parcelle (talus ou fossés) ne peuvent pas toujours être bien définis avec le Lidar ;
- l'effet « végétation arborée » qui génère des erreurs dues au mode de prise de mesures du Lidar : les arbres dans les zones en friches ont tendance à fausser le signal laser répercuté. Bien que ce signal soit traité à posteriori (on retient les points d'altitude la plus basse), la donnée relief sur les zones à forte végétation

est légèrement bruitée.

On peut observer ces deux effets sur la carte (Illustration 4) : les pics d'erreurs sont bien localisés en zone de bordure et sur les parcelles en friche (c'est à dire couverte par une végétation arborée et arbustive). Ces deux sources d'erreur peuvent expliquer des décalages importants entre le Lidar et les relevés du géomètre, allant localement jusqu'à des maxima de 3,663 m ou 3,145 m.

On peut aussi expliquer ces décalages par le fait que le MNT0 issu du Lidar n'indique pas l'altitude en un point dans l'espace, mais celle d'un pixel d'un mètre carré. Cela peut expliquer l'erreur résiduelle en conditions « idéales » (hors zone de végétation arborée et hors bordures). Par ailleurs, on retrouve dans ces conditions les mêmes taux d'erreurs signalés par le bureau d'étude ($0,05\text{m} < \text{RMSE} = 0,079\text{m} < 0,15\text{m}$).

La figure 5 montre que l'erreur est globalement située autour de 0. Le Lidar aurait cependant tendance à légèrement surestimer l'altitude réelle de quelques centimètres. Globalement l'erreur est très faible et on peut considérer le Lidar comme un MNT de très bonne qualité.

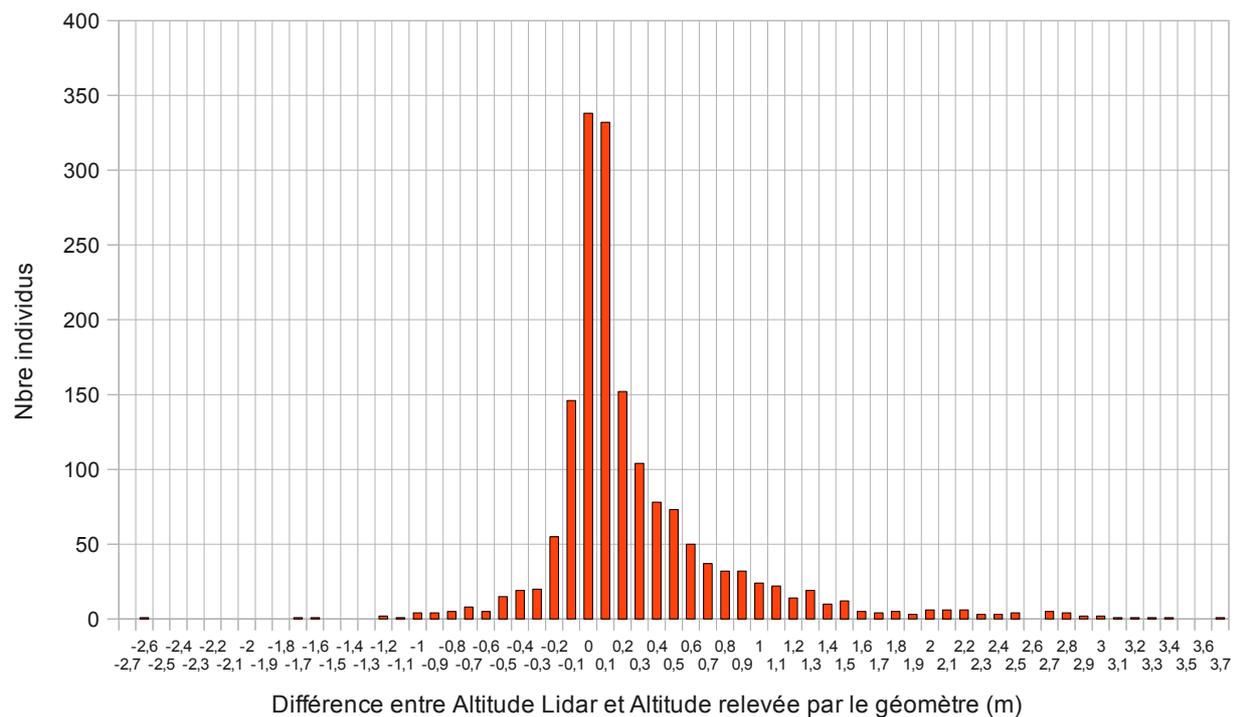


Illustration 5: Distribution de l'erreur entre Lidar et relevés du géomètre sur l'ensemble des relevés (soit 1689 points)

Pour la suite de l'étude, un compromis est à trouver entre précision du MNT de référence et superficie couverte. Au vu des résultats du tableau 3, nous choisissons de n'exclure de la zone de comparaison que les zones boisées qui augmentent significativement l'erreur

du MNT Lidar. D'autre part on ne peut exclure les limites de parcelles (talus, fossés) de la zone de comparaison, car le maillage de ces limites est trop dense : à résolution grossière, la zone de comparaison serait trop réduite (la majorité des pixels de 90 m ou 30 m se trouveraient à cheval sur une limite de parcelle).

La RMSE de 0.213 sera retenue comme une RMSE de « référence » à partir de laquelle on pourra estimer qu'un MNT est différent d'un autre sur l'altitude.

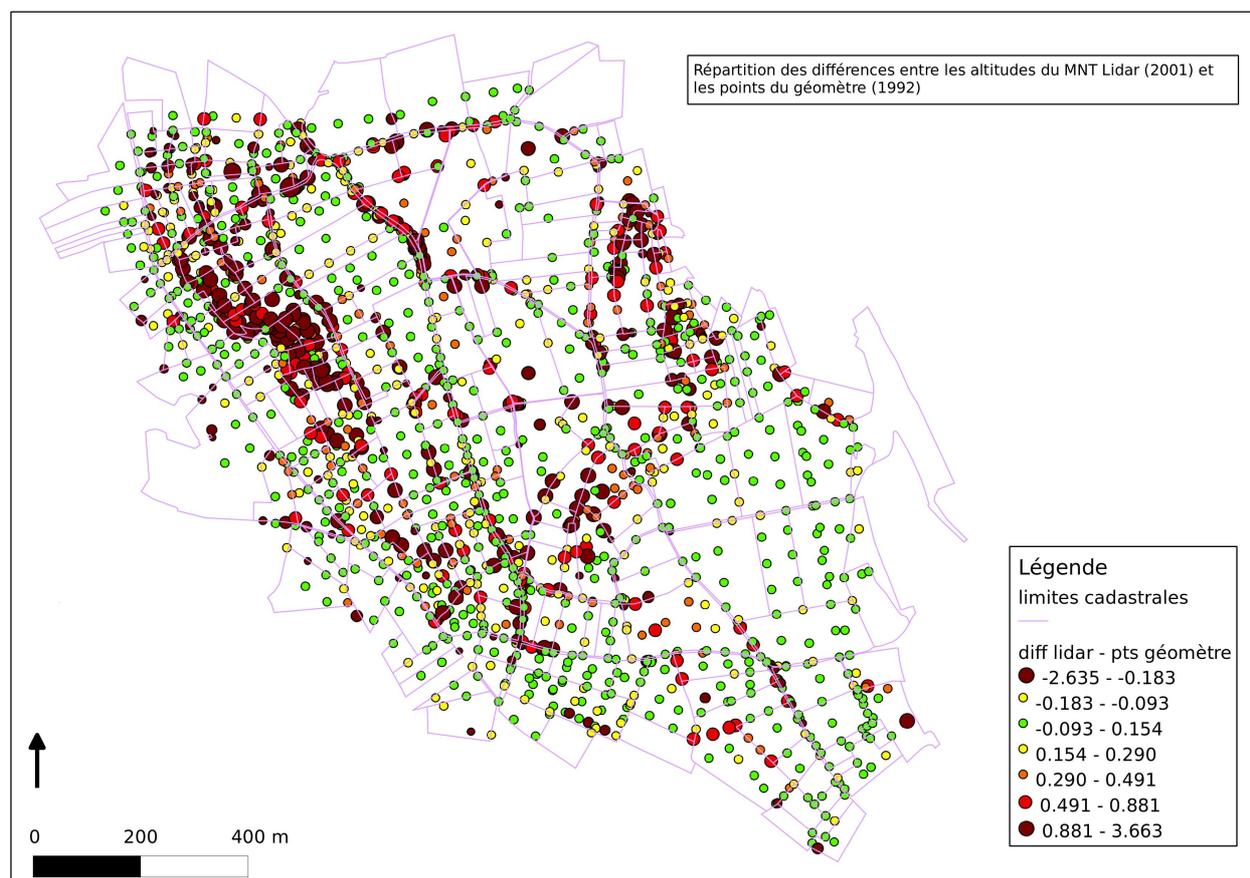


Illustration 6: Répartition des différences d'altitudes entre le Lidar et les relevés du géomètre

2.3.2. Évaluation de l'erreur des MNTs par rapport à la référence MNT0 (Lidar)

Les comparaisons ont été effectuées sur l'altitude, la pente, les courbures, le TWI et le MrVBF pour la zone couverte par le Lidar hors zones boisées, c'est à dire dans les conditions où le Lidar commet une erreur très faible par rapport à la réalité.

Les MNT1 à 3 ont été comparés à une résolution de 30m, puis les MNT1 à 4 ont été comparés à une résolution de 90m.

2.3.2.1. Évolutions des précisions de MNT à résolution constante

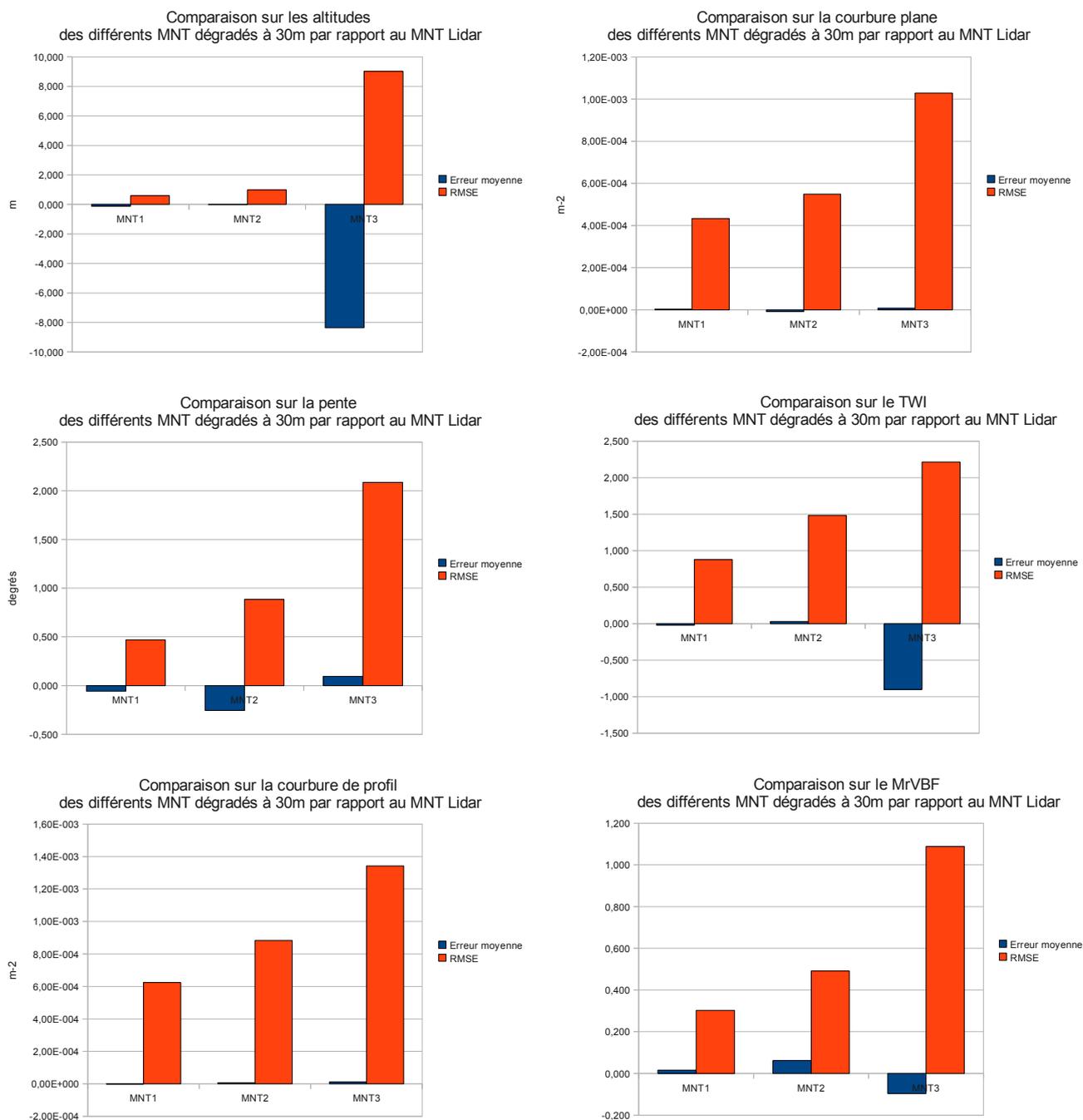
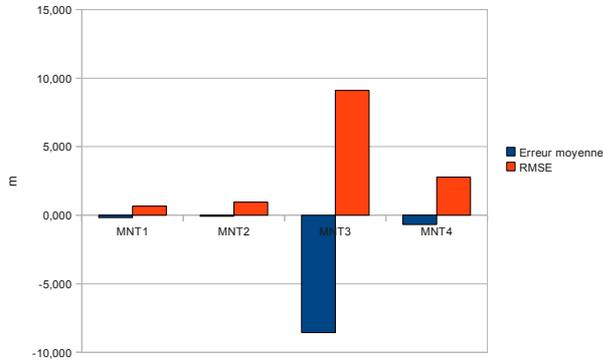
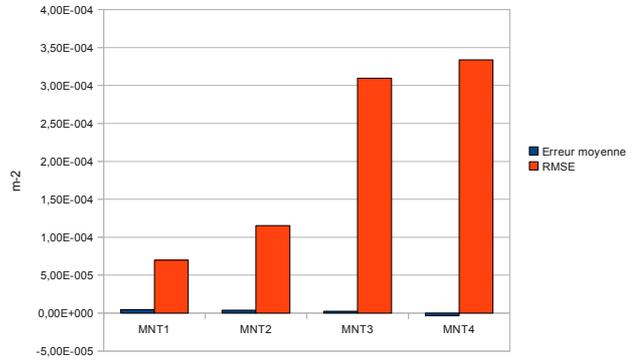


Illustration 7: Comparaison des MNT1, MNT2, MNT3 (d'une résolution d'origine respectivement de 5, 10, et 30m) par rapport au MNT0 de référence (Lidar) dégradé à 30m

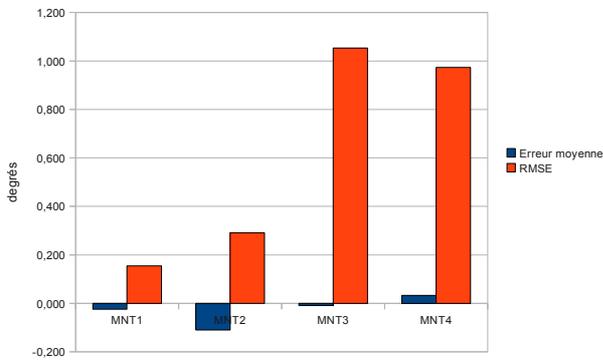
Comparaison sur les altitudes
des différents MNT dégradés à 90m par rapport au MNT Lidar



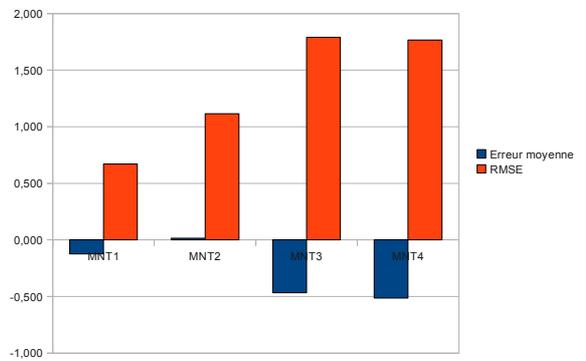
Comparaison sur les courbures planes
des MNT dégradés à 90m par rapport au MNT Lidar



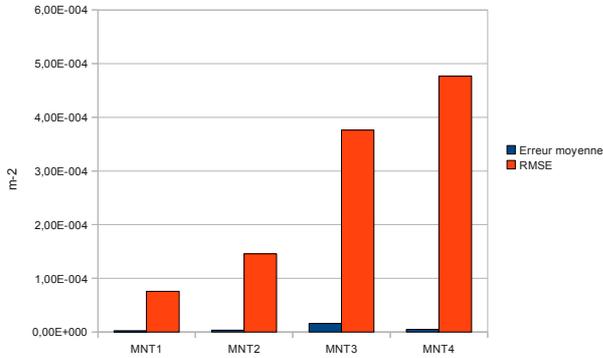
Comparaison sur les pentes
des différents MNT dégradés à 90m par rapport au MNT Lidar



Comparaison sur le TWI
des MNT dégradés à 90m par rapport au MNT Lidar



Comparaison sur les courbures de profil
des différents MNT dégradés à 90m par rapport au MNT Lidar



Comparaison sur le MrVBF
des MNT dégradés à 90m par rapport au MNT Lidar

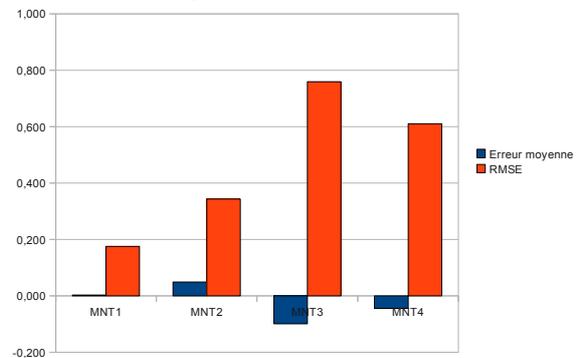


Illustration 8: Comparaison des MNT1, MNT2, MNT3, MNT4 (d'une résolution d'origine respectivement de 5, 10, 30 et 90m) par rapport au MNT0 de référence (Lidar) dégradé à 90m

On remarque que le MNT3 (issu d'Aster à 30m) a le taux d'erreur le plus important sur l'altitude et dans les 2 résolutions d'études considérées (30m et 90m). La dégradation à 90m du MNT3 ne réduit pas sensiblement sa RMSE. L'erreur sur l'altitude du MNT1 (d'une résolution d'origine de 5m) est la plus faible. L'erreur sur l'altitude augmente ensuite avec la résolution d'origine. On retrouve des taux d'erreurs comparables à ceux mentionnés dans le tableau 2 : le MNT3 (Aster à 30m) est le moins précis de tous les MNT et le MNT1 (5m) le plus précis, pour les autres MNT, la qualité se dégrade avec l'augmentation de la résolution.

Cette erreur se propage ensuite sur certains attributs de terrain (pente, TWI et MrVBF) en conservant l'ordre des précisions.

Sur les courbures, on remarque que le MNT4 fournit des indicateurs moins précis que le MNT3. On peut expliquer ce résultat par le fait que les variations de courbures sont très faibles sur des résolutions grossières, comme ici à 90m, et que des légères imprécisions dans le MNT peuvent faire varier les résultats. Il faut noter que les RMSE sur les courbures pour le MNT3 et le MNT4 sont relativement proches.

Globalement, les MNT les moins précis pour l'altitude (MNT3 et MNT4) fournissent ensuite des attributs de terrain avec des RMSE importantes par rapport aux MNT plus performants comme les MNT1 et MNT2. Cependant le calcul des attributs de terrain tend à homogénéiser le taux d'erreur pour les MNT les moins précis : alors qu'on a un écart de précision important au niveau de l'altitude pour les MNT3 et 4, cette différence a tendance à se lisser et n'est pas toujours identifiée par la suite dans le calcul des attributs de terrain.

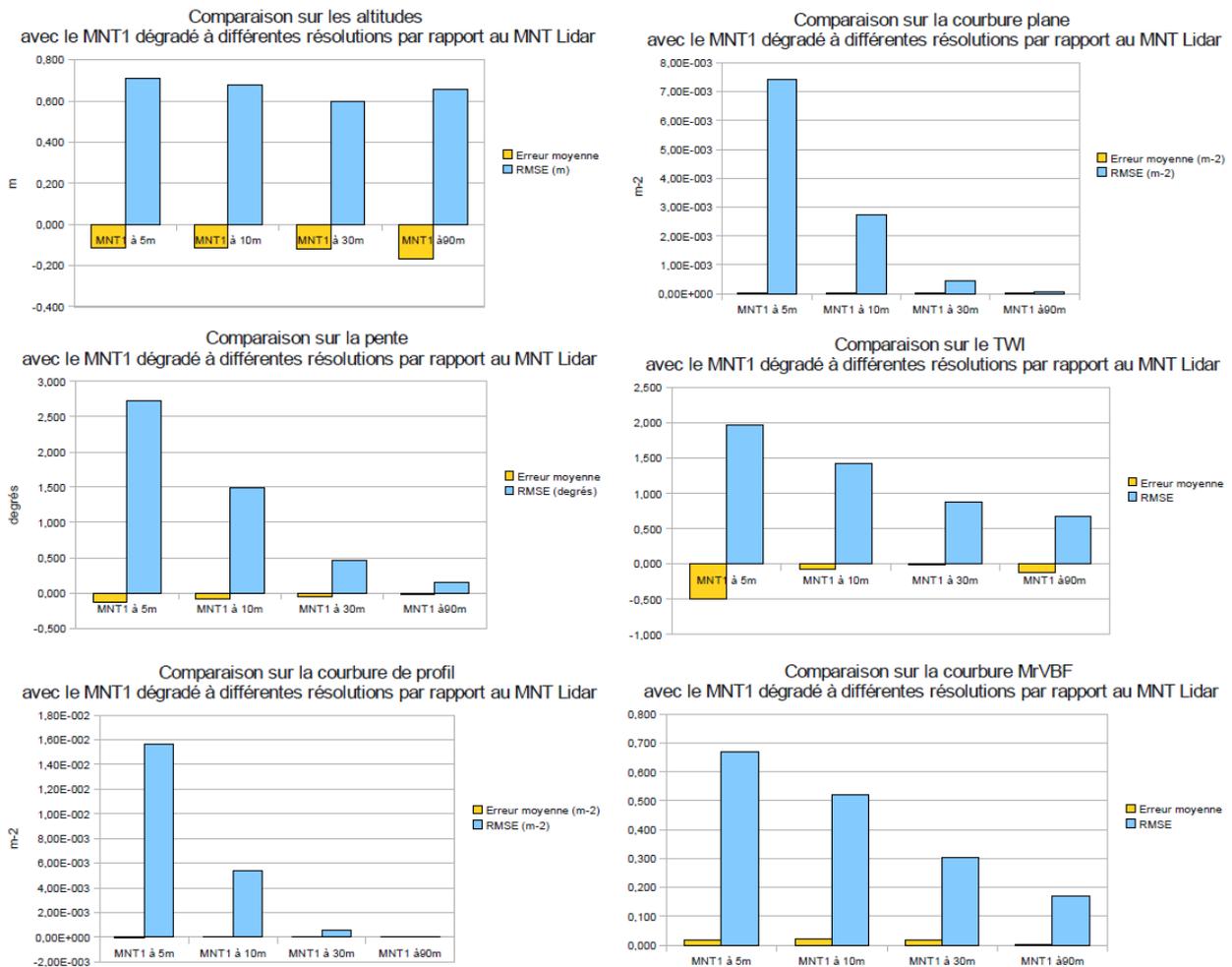


Illustration 9: Comparaison des attributs topographiques des différents MNTs par rapport au Lidar

On remarque tout d'abord que l'altitude est peu affectée par les changements de résolution : le niveau de RMSE reste identique.

Concernant les attributs de terrain, le MNT1 (MNT5m) fournit de meilleurs résultats lorsqu'il est dégradé qu'à une résolution fine. En effet la dégradation de la résolution d'un MNT tend à limiter les variations locales importantes apparaissant lorsqu'on travaille à une résolution fine. Le relief est lissé, et les erreurs de moindre intensité. On obtient des RMSE moindres lorsqu'on dégrade la résolution.

On peut aussi remarquer que les attributs de terrain les plus robustes sont les attributs régionaux (le MrVBF et le TWI). Pour le MrVBF, son mode de calcul pas à pas se faisant à chaque étape à une résolution supérieure, l'indice se comporte le mieux lors de la dégradation du MNT. De même, le TWI est moins sensible que les attributs de terrain locaux aux dégradations de la résolution car il intègre la surface contributive : les erreurs effectuées à résolution fine (5m ou 10m) sont donc réduites.

D'une façon générale, l'erreur est causée par les variations importantes du relief à une

échelle fine. En d'autres termes, la dégradation d'une résolution provoque un lissage du relief et atténue l'erreur.

2.4. Conclusion préliminaire

Ces résultats mettent aussi en évidence le comportement de l'erreur lors de la dégradation d'un MNT et l'importance de la précision verticale du MNT d'origine. Ainsi un MNT à haute résolution (le MNT5m par exemple) et ayant une faible erreur sur l'altitude délivrera des attributs de terrain exacts à basse résolution, mais inexacts à haute résolution. En effet les fortes résolutions atténuent les erreurs commises à petite échelle. C'est le lissage des altitudes qui provoque ensuite une atténuation de l'erreur dans le calcul des attributs de terrain.

La comparaison à résolution constante des MNT permet aussi de noter que l'erreur sur l'altitude joue un rôle prépondérant lors du calcul des attributs de terrain dérivés. En effet, un MNT ayant une erreur verticale importante fournira des attributs de terrain peu fiables, et cela même en dégradant ce MNT. Le MNT3 (Aster à 30m) peut donc être identifié comme de mauvaise qualité.

Une piste d'approfondissement de l'étude serait de s'intéresser aux méthodes de dégradation du MNT. Différentes méthodes de dégradation existent, et elles pourraient avoir une influence sur les erreurs commises sur les attributs de terrain.

En conclusion, on peut affirmer que le MNT5m fournit les résultats les plus performants. C'est donc celui qui marquera la référence pour la zone d'étude de la Basse vallée de la Peyne.

3. Prédiction des profondeurs de sol et des grandes classes pédopaysagères

L'objectif de cette phase de l'étude est double

- identifier les indicateurs et les plus pertinents pour la prédiction des sols et de leurs propriétés ;
- observer l'impact de la précision verticale (exactitude) et horizontale (résolution) des MNT sur les résultats de prédiction.

A titre d'exemple, cette étude porte sur les prédictions de deux caractéristiques des sols à fort impact pour l'hydrologie : d'une part leurs profondeurs et d'autre part leur type en référence à une classification en unités de sol d'une carte détaillée (1/25 000) qui intègre plusieurs caractéristiques hydrologiques (profondeur, rétention en eau, ...).

3.1. Données utilisées

3.1.1. Données de profondeur de sol

Différentes sources de données de profondeur de sol ont été exploitées.

Tableau 4: Sources des données de profondeur de sol

Zone	Nombre de relevés	Profondeur Estimée / Observées	Mode de relevé	Source
Bassin Peyne	1232	1048 / 184	Sondages tarière et profils	G. Coulouma Carto sol 1/5000 Carto sol 1/25000
Bassin Peyne	41	0 / 41	Profils	N. Guix

La collecte des données de profondeur de sol étant longue et onéreuse, une grande partie des données de profondeur disponibles pour cette étude est estimée. En effet, les équipes de terrain ont le plus souvent utilisé la tarière pour les sondages, outil avec lequel on peut sonder le sol jusqu'à une profondeur maximale d'environ 1m. Ces sondages ayant été faits pour établir une carte pédologique de la Basse vallée de la Peyne, l'objectif premier était de vérifier la cohérence des unités typologiques de sol au sein des unités cartographiques.

Dès lors, lorsque les sondages ont été effectués sur des sols d'une profondeur supérieure à 1m / 1,20m, la profondeur effective n'a pu être observée. Dans ce cas la profondeur du sol

est estimée par dire d'expert, mais la fiabilité de cette évaluation est très aléatoire. On remarquera que la majorité des profondeurs de sol sont estimées (82 %), ce qui indique que la majorité des sols ont une profondeur supérieure à 1m.

3.1.2. Données pédologiques

La cartographie pédologique de la Peyne à la résolution de 1/25000 a été finalisée en 2008, à la suite d'un long travail de prospection. Comme évoqué précédemment, la zone d'étude est caractérisée par une forte variabilité géo-pédologique. Les données d'unités de sol disponibles sous forme de polygone ont été converties en couche raster à la résolution correspondante.

On obtient ainsi les différentes couches d'informations au format raster. Chaque pixel est considéré comme un individu ayant des caractéristiques au niveau pédologique (unité de sol ou groupe d'unités de sol), et au niveau morphologique (altitude, pente, orientation, courbures, TWI, MrVBF, MrRTF).

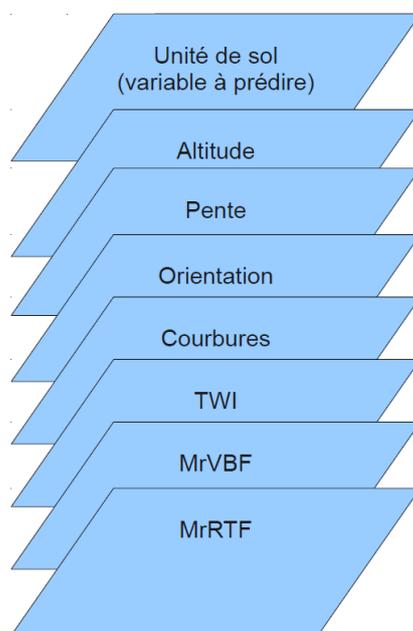


Illustration 10: Représentation schématique des différentes informations disponibles sous format raster

Les pixels des MNTs qui chevauchent les limites des polygones délimitant les unités de sol ont été enlevés de l'analyse. Ainsi, tous les pixels analysés ont 100% de leur emprise au sein d'une unité de sol. Sur des résolutions très grossières (30m ou 90m) cela conduit à enlever une partie importante des pixels de la carte, voire à éliminer des unités de sol entières.

3.1.3. Zone d'étude et données de relief

Elle s'étend sur toute la basse vallée de la Peyne. Seuls les MNT 1 à 4 (à 5, 10, 30 et

90m) sont disponibles sur cette emprise. Le MNT 5m, évalué dans la deuxième partie de ce mémoire comme le plus précis des MNT, sert de référence sur cette zone en terme de précision et de qualité.

3.2. Méthode

3.2.1. Discrétisation des profondeurs de sol

La matrice des corrélations effectuée lors de l'exploration des données ne montre aucune relation évidente entre les profondeurs de sol observées et les indicateurs topographiques associés, ce qui confirme bien le caractère aléatoire des estimations de profondeurs au delà de 1 m. La variable « Profondeur de sol » a donc été discrétisée.

La profondeur du sol sur la zone ne suit pas de loi normale comme le montrent le graphique Quantile-Quantile (Figures 11) et l'histogramme des fréquences Figure 12).

La valeur médiane des profondeurs de sol de la population d'individus est de 80cm. Le découpage en classes s'est fait selon la méthode des quantiles. La variable a donc été découpée en 2 classes : sol d'une profondeur inférieure ou égale à 80cm, et sol d'une profondeur supérieure à 80cm.

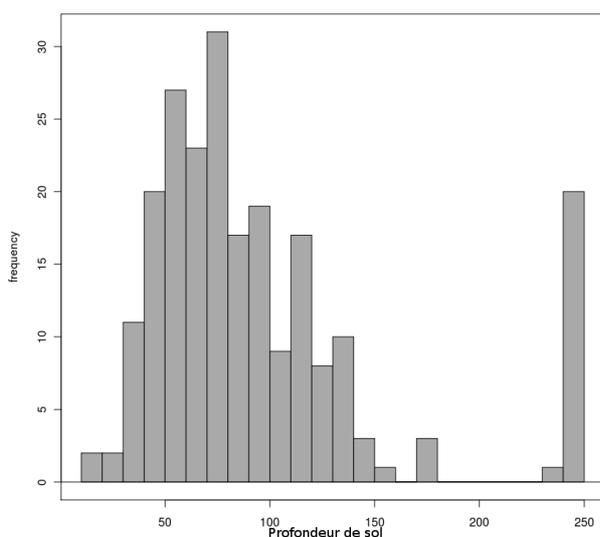


Illustration 12: Histogramme des fréquences

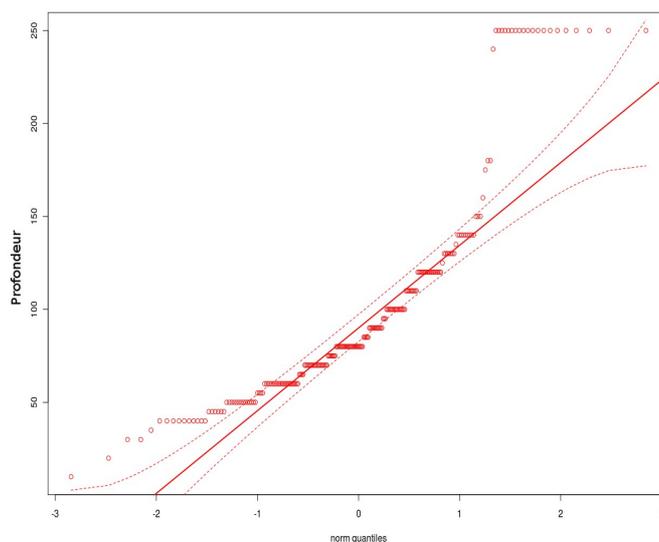


Illustration 11: Graphe Quantile-Quantile

3.2.2. Unités de sol et Unités de sol regroupées : critères de regroupement

Les tests de prédiction d'unités de sol ont porté à la fois sur la prédiction des 28 unités de sol présentes sur la basse vallée de la Payne, et aussi sur les unités de sol regroupées (cf. tableau 5). Le regroupement s'est effectué sur la base :

- de critères pédologiques et géomorphologiques
- des confusions observées dans les tableaux de contingences produits lors de la prédiction des unités de sol non regroupées.

Classes de sol	Description
1 à 7	Sols développés sur alluvions
8 + 10 + 11	Moyennes terrasses alluviales
9 + 13	Colluvions et glacis colluviaux sur molasse Miocène
12 + 19	Pentes sur molasses
14 + 15	Colluvions sur molasse Miocène
16 + 17	Dépressions mal drainées sur molasse Miocène
18 + 20 + 21 + 22 + 24 + 25	Sommets et revers de cuesta
23	Sols fersialitiques
26	Sols sur coulées basaltiques
27 + 28	Sols colluviaux du Quaternaire

Tableau 5: Classes de sol regroupées

3.2.3. Approche de modélisation de la profondeur et des unités de sol : méthode CART

Nous avons utilisé la méthode des arbres de classification. Cette méthode est répandue pour la prédiction de variables qualitatives. Les calculs ont été effectués sous R avec la fonction `rpart`. L'algorithme utilisé est basé sur CART (Breiman et al., 1984) et construit des groupes d'individus. Ces classes sont générées à partir des variables explicatives pour que les individus d'une même groupe soient les plus homogènes possibles par rapport à la variable à expliquer.

Les arbres construits avec la fonction `rpart` sont choisis par validation croisée. Ici le nombre de validations croisées est fixé à 10. La validation croisée est donc réalisée avec 10 échantillons de taille $n/10$ (n étant le nombre d'individus de l'échantillon). Ces paramètres restent fixes pour chaque construction d'arbre effectuée.

La performance de l'arbre et donc le pouvoir explicatif de ou des variables utilisées pour construire l'arbre peuvent être mesurés par le taux de mauvais classement.

2 indicateurs ont été ajoutés pour ces tests : l'orientation (aspect) et le Multiresolution Ridge Top Flatness index. Pour chaque attribut de terrain, à chaque résolution et pour chaque MNT un arbre de classification a été construit dans le but de connaître la performance individuelle des indicateurs.

Par la suite, pour chaque MNT et à chaque résolution, des arbres de classification ont été construits en utilisant l'ensemble de la gamme d'indicateurs topographiques disponibles. Ces arbres permettent de savoir quelle est la résolution d'étude optimale pour la prédiction de la propriété d'intérêt (unité de sol ou profondeur de sol). Par ailleurs l'étude de l'architecture des arbres permet d'observer la performance discriminante des

indicateurs : l'ordre d'apparition d'un indicateur traduit dans un arbre de régression traduit son degré de performance. Un indicateur apparaissant dès le premier niveau peut être considéré comme un indicateur très discriminant.

3.3. Résultats

Nous présentons les résultats successivement pour les deux objectifs de prédiction poursuivis dans cette étude : prédiction de profondeurs de sol et prédiction de propriétés des sols. Pour la prédiction des profondeurs de sol, sont d'abord examinées les attributs de relief un par un afin d'étudier ses performances individuelles et leurs sensibilités à la résolution et précision verticale. Ensuite, les prédictions utilisant l'ensemble des attributs disponibles sont présentées et analysées.

3.3.1. Prédiction des profondeurs de sol

On s'intéresse dans un premier temps aux performances individuelles des attributs de terrain.

On a pour chaque attribut de terrain, pour chaque MNT (MNT 1 à 4 représentant 4 niveaux de précision verticale) et pour chaque résolution (5, 10, 30, 90m), les résultats exprimés en « taux de bon classement ».

Le critère de comparaison qui permet de juger de la capacité prédictive de chaque attribut en fonction de la qualité du MNT de départ et de la résolution d'étude est le taux de bon classement. Tous les taux de bons classement se situent dans une gamme assez restreinte (de 62 à 74.5 %). Il n'y a donc pas de différence majeure entre les différents modèles.

Pour une représentation visuelle des résultats, on peut exprimer graphiquement en 3 dimensions le taux de bon classement des arbres de classification selon 3 manières :

- en fonction du type d'attribut et de la résolution d'étude (pour un niveau de précision verticale donné correspondant à un MNT) ;
- en fonction du type d'attribut et d'un niveau de précision verticale (pour chaque résolution de dégradation) ;
- en fonction d'un niveau de précision verticale du MNT d'origine et de la résolution d'étude (pour chaque attribut).

Par cette démarche, on tente d'identifier les paramètres pouvant expliquer le mieux les bons taux de classement. Les 3 paramètres sont les suivants :

- la précision du MNT d'origine,
- la résolution d'étude (ou résolution dégradée),
- le type d'attribut de terrain.

On cherche à répondre aux trois questions suivantes pour expliquer les différences de performances entre les attributs :

- Y-a-t-il des différences de performances de prédiction entre attribut ?
- Quelle est l'influence de la résolution spatiale ?
- Quelle est l'influence de la précision verticale?

Le développement des résultats et leur interprétation suivra l'ordre logique de ces questions.

Tableau 6: Valeurs minimales et maximales des taux de classement pour chaque attribut de terrain

Attribut	MNT	Résolution (m)	Bon classement
			(%) Min/Max
Altitude	3	90	62,1
	2	30	70,1
Courbure plane	1	5	66,1
	3	30	70,5
Courbure profil	1	5	62,9
	4	90	72,8
MrRTF	4	90	62,9
	3	30	72,3
MrVBF	1	90	66,5
	2	30	74,6
Orientation	3	90	67,0
	2	30	73,2
Pente	1	5	65,2
	2	30	71,0
TWI	1	10	65,6
	2	90	72,3

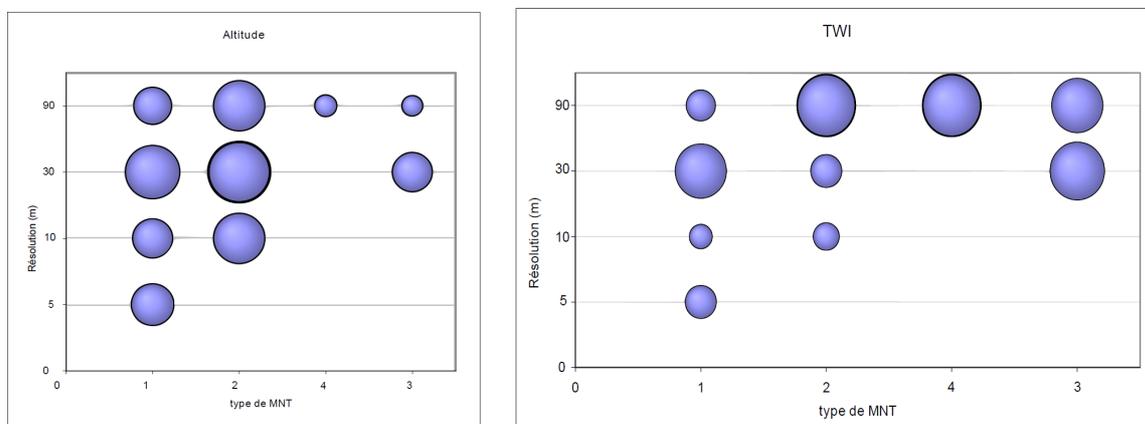


Illustration 13: Comportement de l'évolution du taux de bon classement pour le TWI et l'altitude en fonction de la résolution d'étude et de précision verticale des MNT

La taille des bulles est inversement proportionnelle au taux d'erreur du modèle correspondant, et l'échelle est logarithmique.

En comparant les taux de bon classement maximaux, on peut voir que les attributs de terrain n'ont pas les mêmes performances. Les attributs régionaux (MrVBF, MrRTF, et TWI) semblent plus performants. On remarque, sur la base des valeurs minimales, du taux de bon classement que cet ordre de performance change : les attributs réagissent

différemment aux changements de résolution et de précision. Par exemple, l'altitude est sensible à la précision du MNT, le TWI fournit de meilleurs résultats pour des résolutions grossières.

3.3.1.1. A type de MNT constant

La taille des bulles est inversement proportionnelle au taux d'erreur du modèle correspondant, et l'échelle est logarithmique.

Pour une précision de MNT constante, on cherche à identifier le paramètre ayant la plus grande influence sur le taux de bon classement : attribut de terrain et résolution d'étude (résolution dégradée). Pour les MNT1 et 2, on représente la performance de l'attribut de terrain en fonction de la résolution d'étude. Les MNT 3 et 4 n'ont pas été représentés car l'erreur sur le MNT3 est trop importante et le MNT4 n'a qu'une seule résolution (à 90m).

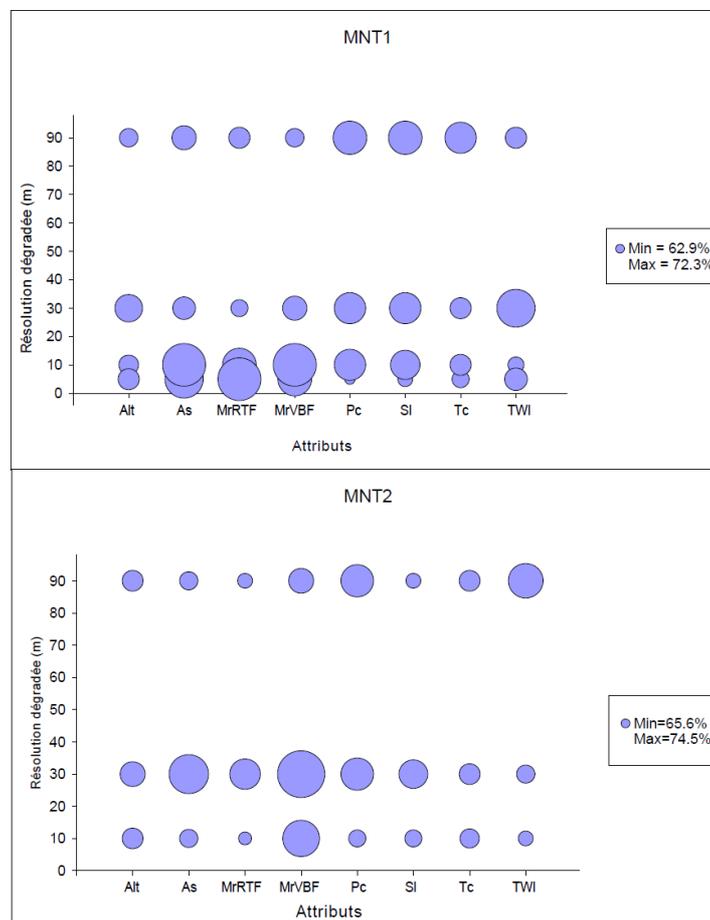


Illustration 14: Évolution des taux de bons classement par attribut et par MNT avec un changement de résolution d'étude

MNT1 :

On constate que certains attributs se comportent mieux à haute résolution (Aspect, MrRTF, MrVBF). La pente donne des résultats moyens (relativement aux autres taux de bons

classement) sans que les changements de résolution n'affectent ses performances. On remarque que le MNT1, qualifié dans la deuxième partie du mémoire comme le MNT le plus précis, ne fournit pas systématiquement les meilleurs résultats. Cela traduit l'aspect aléatoire des relations entre les profondeurs de sol et les attributs de terrain. L'ordre de performance des attributs de terrain varie fortement lorsqu'on dégrade la résolution du MNT.

MNT2 :

Pour le MNT2 c'est le MrVBF qui fournit les résultats les plus constants. Par ailleurs, la dégradation à 30m paraît être une résolution d'étude convenable pour ce MNT. Cela peut s'expliquer par le mode de construction de ce MNT à partir de courbes de niveaux issues de la BDTOPPO IGN : cette précision horizontale correspond à celle des courbes de niveau.

On ne retrouve pas les mêmes comportements des indicateurs avec les différents MNT. Par ailleurs la résolution d'étude est une variable qui semble faire varier la performances des attributs de terrain pour la prédiction des profondeurs de sol. Les indicateurs issus de différents MNT ne réagissent pas de la même manière à la dégradation qui peut dans certains cas accroître le taux de classement ou le faire baisser.

Il est difficile d'expliquer les réactions des attributs par rapport à la dégradation du MNT à partir duquel ils sont calculés.

3.3.1.2. A résolution d'étude constante

On va observer dans cette partie la performance des différents MNTs aux résolutions d'étude les plus grossières (30 et 90m). Ainsi on peut comparer l'effet de la précision verticale du MNT d'origine utilisé sur la performance des attributs.

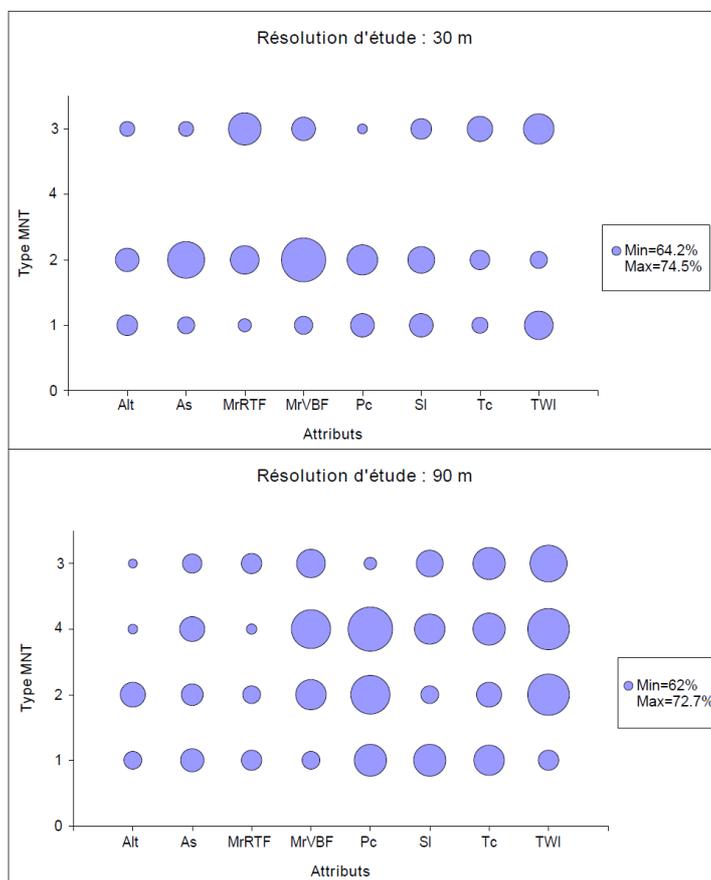


Illustration 15: Évolution du taux de bon classement par attribut selon différents types de MNT à des résolutions d'étude de 30 et 90m

Pour la résolution d'étude à 90m, au niveau des attributs de terrain, c'est le TWI qui globalement donne les meilleurs résultats (sauf pour le MNT1). La courbure plane, la pente, le MrVBF et le MrRTF produisent des résultats corrects.

De manière générale et au vu des résultats obtenus avec les résolutions grossières (30m et 90m), on ne remarque pas d'amélioration des taux de bon classement lorsqu'on utilise des MNT précis.

Par ailleurs, les écarts de performance (taux de bon classement maximal et minimal) entre les différentes résolutions d'étude sont similaires.

3.3.1.3. Modèles prenant en compte l'ensemble des attributs

On construit des arbres de classification avec l'ensemble des attributs de terrain issus de 10 MNT différents, correspondant aux 4 MNT d'origine (MNT1, MNT2, MNT3 et MNT4) et de 6 MNT obtenus par dégradation des MNT d'origine (par exemple un MNT à 90 m de résolution obtenu en dégradant le MNT initial de 5 m)

Tableau 7: Résultats des arbres de régression construits avec l'ensemble des attributs de terrain disponibles

MNT	Résolution Dégradation (m)	Taux de bon classement	Nombre de feuilles
MNT4	90	80,4%	13
MNT1	5	79,5%	14
MNT1	10	79,5%	12
MNT2	10	79,0%	11
MNT1	90	78,6%	10
MNT1	30	77,7%	11
MNT2	90	76,8%	10
MNT3	30	76,3%	11
MNT3	90	76,3%	12
MNT2	30	74,6%	7

Les arbres de classification quelque soit la résolution d'étude ou la précision du MNT prévoient la classe de profondeur du sol à partir des variables de relief pour 80 à 74% des individus de l'échantillon. Ces taux de mauvais classement sont les taux extraits pour une validation croisée avec un échantillon égal à 1/10 de la taille totale de l'échantillon.

Les meilleurs résultats sont obtenus avec le MNT4 à 90m, le MNT1 à 5m et à 10m. D'une façon générale, les performances ne s'ordonnent pas ni selon la résolution spatiale, ni selon la précision verticale. Les deux premiers arbres affichent un nombre de feuilles plus grand, c'est à dire qu'ils sont plus ramifiés. Cependant le nombre de feuilles reste compris entre 10 et 14, ce qui indique une certaine homogénéité des arbres au niveau du nombre de feuilles.

On peut en revanche connaître le taux prédictif des variables explicatives (attributs de terrain) en observant le niveau d'apparition de cette variable dans la construction des arbres. Une variable apparaissant en amont dans un arbre de régression sera plus discriminante que les variables apparaissant en aval.

Le tableau 8 décrit les fréquences d'apparition des variables au 3 premiers niveaux de tous les arbres de classification construits précédemment.

Tableau 8: Fréquences d'apparition des variables selon leur niveau hiérarchique dans les arbres de classification

Attribut de terrain	Rang1	Rang2	Rang3
MrVBF	0,7	0,143	0,31
TWI	0,2	0,214	0
Courbure plane	0,1	0,000	0,25
Courbure de profil	-	0,143	-
Altitude	-	0,286	0,06
Orientation	-	0,143	0,31
MrRTF	-	0,071	0,06

On constate que le MrVBF est la variable qui apparaît de façon la plus fréquente et la plus en amont dans les arbres de classification. On la retrouve dans la plupart des cas en première position, cela indique que cette variable permet de partager l'échantillon test en deux sous groupe distincts. On retrouve le MrVBF plus en aval dans les arbres, ce qui souligne son fort pouvoir discriminant. En effet, en prenant en compte les fonds de vallée à différentes résolutions (c'est à dire à différentes échelles d'observations), le MrVBF peut identifier des zones de déposition où les profondeurs de sol sont probablement importantes.

Le TWI et la courbure plane sont également des variables intéressantes. On a vu dans la première partie du mémoire que ces variables pouvaient être de bons indicateurs des profondeurs de sol, notamment en prenant en compte les processus d'érosion et de déposition.

3.3.2. Prédiction des unités de sol et des classes de sol

Pour la prédiction des unités de sol, des arbres de classification ont été construits avec la totalité des attributs de terrain disponibles.

Tableau 9: Résultats des arbres de classification pour la prédiction des unités de sol à partir des attributs de terrain

MNT	Résolution	Tx de mauvais classement sans regroupement	Taux de mauvais classement avec regroupement	Nbre de classes à estimer sans regroupement - avec regroupement	Nbre de feuilles sans regroupement - avec regroupement	Superficie couverte par la prédiction (ha)
MNT 1	5	0,78	0,59	28 – 10	8 – 7	4005
MNT 1	10	0,72	0,53	28 – 10	10 – 7	3557
MNT 1	30	0,64	0,45	28 – 10	11 – 10	2106
MNT 1	90	0,21	0,20	20 – 7	19 – 15	393
MNT 2	10	0,72	0,54	28 – 10	10 – 9	3556
MNT 2	30	0,64	0,46	28 – 10	12 – 10	2107
MNT 2	90	0,26	0,18	20 – 7	15 – 17	401
MNT 3	30	0,69	0,53	28 – 10	9 – 6	2113
MNT 3	90	0,23	0,26	21 – 7	18 – 11	384
MNT 4	90	0,27	0,22	22 – 7	16 – 8	388

Les arbres ont été construits sur deux jeux de données distincts, qui correspondent au jeu de données « sans regroupement » et « avec regroupement » des unités de sol.

Les pixels se situant à cheval sur des unités de sol différentes ont été supprimés des jeux de données. Cela explique que certaines unités de sol ou regroupements d'unités de sol aient été éliminés pour les résolutions grossières (30m et 90m).

Le taux de classement est amélioré lorsque la résolution diminue avec en particulier une forte amélioration entre 30 mètres et 90 m. À résolution équivalente, c'est la précision du MNT qui améliore les résultats.

A haute résolution on a une grande variabilité du relief au sein des unités de sol. On a donc un taux de mauvais classement plus important des unités de sol en résolutions fines.

Lors de la dégradation, on limite des variations du relief dans les unités de sol. Dans ce cas, la classification effectuée par les arbres est moins aléatoire. On a donc de meilleurs résultats avec des résolutions grossières.

Ces meilleurs résultats peuvent s'expliquer par le traitement appliqué aux données. En enlevant les pixels chevauchant les limites de sol, on restreint les zones d'apprentissage aux zones centrales des unités de sol. Plus la résolution est grossière, moins on a de pixels en limite d'unités de sol. On limite alors l'étude aux zones centrales des unités de sol. On a donc choisit sans le test suivant de travailler avec un jeu de données où l'on conserve les pixels à cheval sur les limites de sol (dans ce cas, le pixel retient la valeur de l'unité de sol majoritaire qui est majoritaire en terme de superficie dans le pixel). On a limité les tests au MNT1 dégradé à plusieurs résolutions, car c'est le MNT qui fournit les meilleurs résultats et qui peut être dégradé à toutes les résolutions (5, 10, 30, 90 m).

Tableau 10: Résultats des arbres de classification pour la prédiction des unités de sol à partir des attributs de terrain (sans filtre appliqué sur les zones de transition).

MNT	Résolution	Tx de mauvais classement sans regroupement	Taux de mauvais classement avec regroupement	Nbre de feuilles sans regroupement – avec regroupement	Superficie couverte par la prédiction (ha)
MNT 1	5	0,74	0,52	10 – 10	4481
MNT 1	10	0,76	0,55	9 – 6	4481
MNT 1	30	0,77	0,53	7 – 7	4482
MNT 1	90	0,70	0,52	12 – 7	4487

La tendance est très différente par rapport aux tests précédents : les taux de mauvais classement restent stables, malgré la dégradation de la résolution. Ces résultats indiquent que les zones de transition entre les unités de sol provoquent les erreurs. Les critères géomorphologiques ne permettent pas de distinguer les unités de sol au niveau des zones de transition.

Conclusion et perspectives

L'objectif principal de l'étude a été d'identifier des indicateurs de relief permettant de prévoir une propriété du sol : sa profondeur. Différentes phases de travail ont été nécessaires pour prendre en compte plusieurs éléments intervenant dans la relation entre la profondeur de sol et les caractéristiques du relief. Nous nous sommes dans un premier temps attachés à évaluer la précision des MNT en définissant dans un premier temps un MNT de référence à partir duquel les autres MNT disponibles ont pu être comparés. L'intérêt de cette phase est de connaître la sensibilité des attributs de terrain aux variations de précision verticale des MNT. Nous avons par la suite cherché à savoir quels étaient les attributs de terrain les plus performants pour la prédiction des profondeurs de sol, en partant de l'hypothèse que la performance des attributs de terrain dépend principalement de deux facteurs : la précision verticale du MNT à partir duquel ils sont calculés et la précision horizontale (résolution). Le lien entre unité de sol et attributs de terrain a également été exploré.

Les données de relief ne semblent pas suffisantes pour discriminer complètement les profondeurs de sol. En effet, si les flux d'eau et de matière en milieu méditerranéen sont largement conditionnés par le relief, d'autres paramètres sont à prendre en compte pour modéliser les profondeurs de sol. Les aménagements anthropiques très présents sur le bassin (en particulier les terrasses) peuvent influencer localement d'une façon importante sur les épaisseurs de sol. Cette variabilité est difficile à capturer avec des dérivées de relief issues des MNT. Il serait intéressant de compléter l'analyse en prenant aussi en compte des linéaires paysagers, ou la prise en compte de données de télédétection (notamment les indices liés à la végétation comme le NDVI, TAYLOR et al., 2010). Les résolutions grossières permettent de capturer les caractéristiques globales du relief et de discriminer des différentes grandes unités de sol avec toutefois des erreurs importantes sur les zones de transition. Cette approche peut permettre de discriminer des grandes entités de sol dans un paysage complexe, ce qui rejoint dans une certaine mesure la démarche de Oballos & Lagacherie (2003).

Cependant, d'une manière générale, l'étude montre que les données de relief apportent une information utile : à partir d'un taux d'erreur de base de 50 % sur la prévision de la classe de profondeur, l'utilisation des attributs de terrain permet de baisser ce taux de 20 à 30 % selon les attributs utilisés. Les tests effectués et la méthode adoptée (Arbres de classification) nous ont permis d'identifier des attributs de terrain ayant un fort pouvoir prédictif, comme le MrVBF et le TWI. En revanche, l'influence de la précision verticale et horizontale ne semble pas déterminante quant à performance des attributs de terrain. Ce constat indique qu'il n'est pas nécessaire d'avoir une représentation très fine du relief sur une zone d'étude, lorsqu'on cherche à modéliser les profondeurs de sol. Cela offre des perspectives intéressantes pour la cartographie numérique des sols au niveau mondial. L'information de relief dont nous disposons aujourd'hui (avec par exemple les données quasi exhaustives issues du SRTM) peut être suffisamment fiable pour la cartographie numérique des sols.

Bibliographie

- Andrieux, P., Bouzigues, R., Joseph, C., Voltz, M., Lagacherie, P., Bourlet, M., 1993. Le bassin versant de Roujan - Caractéristiques générales du milieu. Rapport interne, UMR LISAH - INRA Montpellier, 34p.
- Beven, K., Kirkby, N., 1979. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Science Bulletin* 24, 43-69.
- Shary, P.A., Sharaya, L.S., Mitusov, A.V., 2002. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma* 107, 1-32.
- Birkeland, P. W., 1999. *Soils and Geomorphology*. Oxford University Press, New York., 3rd edition, 430p.
- Campling, P., Gobin, A., Feyen, J., 2002. Logistic modeling to spatially predict the probability of soil drainage classes. *Soil Science Society of America Journal* 66, 1390-1401.
- Chaplot, V., Walter, C., Curmi, P., 2000. Improving soil hydromorphy prediction according to DEM resolution and available pedological data. *Geoderma* 97, 405-422.
- Cornillon, P.-A., Guyader, A., Husson, F., Jégou, N., Josse, J., Kloareg, M., 2008. *Statistiques avec R*. Rennes : Presse Universitaire de Rennes, 257p.
- Coulouma, G., 2008. Carte des sols de la basse vallée de la Peyne. Notice. INRA, IRD, SupAgro, 27p.
- Dobos, E., Hengl, T., 2009. Soil Mapping Applications. In: Hengl T and Reuter HI (eds), *Geomorphometry-Concepts, Software, Applications*. Developments in Soil Science, vol. 33, Elsevier, Amsterdam, 461-479.
- Evans, I., 1980. An integrated system of terrain analysis and slope mapping. In *Zeitschrift fur Geomorphologie* 36, 274-295.
- Gallant, J.C., Dowling, T.I., 2003. A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. *Water Resources Research* 39, 1347-1359.
- Guix, N., 2005. Prise en compte des nappes superficielles pour spatialiser le bilan hydrique à l'échelle sub-régionale - Cas de la vigne en basse vallée de la Peyne, Hérault, France. *Doctorat "Sciences de l'Eau dans l'environnement continental"*. Université de Montpellier II, Montpellier.
- Henderson B.L., Bui E.N., Moran C.J., Simon D.A.P. , 2005. Australia-wide predictions of soil properties using decision trees. *Geoderma* 124, 383-398.
- Hengl, T., 2006. Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences* 32, 1283-1298.
- Hengl, T., Evans, I.S., 2009. Mathematical and digital model of the landsurface. In: Hengl T and Reuter HI (eds), *Geomorphometry-Concepts, Software, Applications*. Developments in Soil Science, vol. 33, Elsevier, Amsterdam, 31-63.
- Horn, B.K.P., 1981. Hillshading and the reflectance map. *Proceedings IEEE* 69, 14-47.
- Jenny, H., 1941. *Factors on soil formation. A system of quantitative pedology*. Dover Publications, New York.
- Jenny, H., 1961. Derivation of state factor equations of soils and ecosystems. *Soil Science Society of America Proceedings* 25, 385-388.
- Jones, K.H., 1998. A Comparison of Two Approaches to Ranking Algorithms Used to Compute Hill Slopes. *Geoinformatica* 3, 235-256.
- Kienzle, S., 2004. The effect of DEM raster resolution on first order, second order and compound terrain derivatives. *Transactions in GIS* 8, 83-111.
- Kirkby, M.J., 1999. Translating models from hillslope (1ha) to catchment (1000 km²) scales. In *Regionalization in Hydrology*, (ed B. Diekkrüger, M.J. Kirkby & U. Schröder). IAHS Publication 254, 1-12.
- Kringer, K., Tusch, M., Geitner, C., Rutzinger, M., 2009. Geomorphometric analyses of LiDAR digital terrain models as input for digital soil mapping. In: *Proceedings of geomorphometry*, 31 August - 2 September , 2009, Zürich, Switzerland, 74-81.
- Lagacherie, P., 1992. Formalisation des lois de distribution des sols pour automatiser la cartographie pédologique à

- partir d'un secteur pris comme référence. Cas de la petite région naturelle « Moyenne vallée de l'Hérault ». Th. Doct. ENSA-INRA Montpellier.
- Lagacherie, P., and Voltz, M. (2000). Predicting soil properties over a region using sample information from a mapped reference area and digital elevation data: a conditional probability approach. *Geoderma* 97, 187-208.
- Lagacherie, P., Depraetere, C., 1989. Analyse des relations sol-paysage au sein d'un secteur de référence en vue d'un zonage pédologique semi-automatisé d'une petite région naturelle. Le zonage agropédoclimatique, séminaire Paris, 23 et 24 mars 1989, 116-138.
- Lagacherie, P., Legros, J.P., Burrough, P., 1995. A soil survey procedure using the knowledge of soil pattern established on a previously mapped reference area. *Geoderma* 65, 283-301.
- Lagacherie, P., McBratney, A.B., 2007. Spatial Soil Information Systems and Spatial Soil Inference Systems: Perspectives for Digital Soil Mapping Developments in Soil Science. In *Digital Soil Mapping An Introductory Perspective*, Lagacherie, P., McBratney, A.B. and Voltz, M. (ed.). Elsevier Science Publication. 3-24.
- Laurent, F., Rossignol, J.P., 2003. Cartographie des propriétés hydriques des sols à partir de la lithologie et des pentes : application au bassin versant de la Moine (Maine et Loire, France). *Etude et Gestion des Sols* 10, 155-172.
- McBratney, A.B., Mendonça Santos, M.L., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117, 3-52.
- McBratney, A.B., Odeh, I.O.A., Bishop, T.F.A., Dunbar, M.S., Shatar, M., 2000. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma* 97, 293-328.
- McKenzie, N., Gallant, J., 2007. Digital soil mapping with improved environmental predictors and models of pedogenesis. In *Digital Soil Mapping An Introductory Perspective*, Lagacherie, P., McBratney, A.B. and Voltz, M. (ed.). Elsevier Science Publication. 327-352.
- McKenzie, N.J., Ryan, P.J., 1999. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. *Geoderma* 89, 67-94.
- Moore, I.D., Gessler, P.E., Nielsen, G.A., Peterson, G.A., 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis - *Soil Science Society of America Journal* 57, 443-452.
- Murphy, B., Vaze, J., Teng, J., Tuteja, N.K., Gallant, J., Summerell, G., Young J., Wild, J., 2005. Modelling landscapes using terrain analysis to delineate landforms and predict soil depths — examples from catchments in NSW. *Proceedings of MODSIM05 International Congress on Modelling and Simulation*, Melbourne, Australia, 12-15 December 2005 (eds A. Zenger and R.M. Argent), Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand. 1423-1429.
- Nasa (page consultée le 01/12/2009), http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03_data/01_Data_Products/DEM.PDF.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Coastal Services Center, 2008. *Lidar 101: An Introduction Lidar Technology, Data, and Applications*. Charleston, SC: NOAA Coastal Services Center.
- Nelson, A., Reuter, H.I., Gessler, P., 2009. Chapter 3 DEM Production Methods and Sources. In: Hengl T and Reuter HI (eds), *Geomorphometry-Concepts, Software, Applications*. *Developments in Soil Science*, vol. 33, Elsevier, Amsterdam, 65-85.
- Pachepsky, Y. A., Timlin, D. J., Rawls, W. J., 2001. Soil water retention as related to topographic variables. *Soil Science Society of America Journal* 65, 1787-1795.
- Selle, B., Morgen, R., Huwe, B., 2006. Regionalising the available water capacity from readily available data. *Geoderma* 132, 391-405.
- Smith, M.P., Zhu, A.-X., Burt, J.E., Stiles, C., 2006. The effects of DEM resolution and neighborhood size on digital soil survey. *Geoderma* 137, 58-69.
- Smith, S. L., Holland, D. A. and Longley, P. A., 2005. Quantifying interpolation errors in urban airborne laser scanning models. *Geographic Analysis* 37, 200-224.
- Soltner, D., 2005. *Les Bases de la Production Végétale, Tome I, Le Sol*. Sciences et Techniques Agricoles, 24^{ème} édition, 472p.
- Walter, C., Lagacherie, P., Follain, S., 2007. Integrating pedological knowledge into digital soil mapping. In: Lagacherie P., McBratney A., Voltz M. (Eds). *Digital Soil Mapping. An introductory perspective*. *Developments in Soil Science Series*, vol 31. Elsevier, 289-310.
- Zevenbergen, L.W., Thorne, C.R., 1987. Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms* 12, 47-56.

ANNEXE 1 :

Carte pédologique de la basse vallée de la Peyne

Carte pédologique Basse vallée de la Peyne

Echelle 1/25000
Lambert Zone III

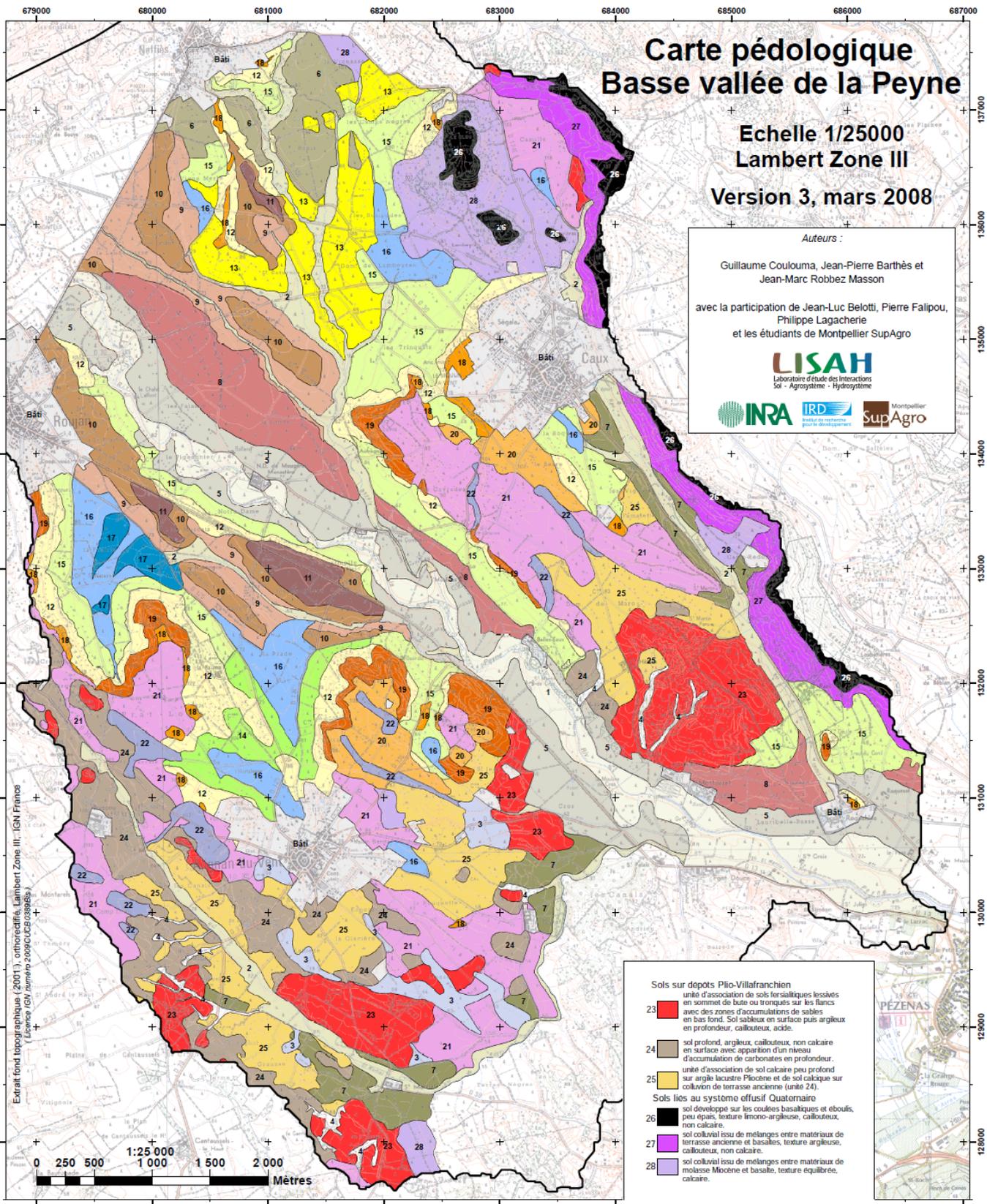
Version 3, mars 2008

Auteurs :

Guillaume Coulouma, Jean-Pierre Barthès et
Jean-Marc Robbez Masson

avec la participation de Jean-Luc Belotti, Pierre Falipou,
Philippe Lagacherie
et les étudiants de Montpellier SupAgro

LISAH
Laboratoire d'étude des Interactions
Sol - Agrosystème - Hydrosystème



Sols sur dépôts Plio-Villafranchien

- 23 unité d'association de sols fersialtiques lessivés en sommet de butte ou tronqués sur les flancs avec des zones d'accumulations de sables en bas fond. Sol sableux en surface puis argileux en profondeur, caillouteux, acide.
- 24 sol profond, argileux, caillouteux, non calcaire en surface avec apparition d'un niveau d'accumulation de carbonates en profondeur.
- 25 unité d'association de sol calcaire peu profond sur argile lacustre Pliocène et de sol calcaire sur colluvion de terrasse ancienne (unité 24).

Sols liés au système effusif Quaternaire

- 26 sol développé sur les coulées basaltiques et éboulis, peu épais, texture limono-argileuse, caillouteux, non calcaire.
- 27 sol colluvial issu de mélanges entre matériaux de terrasse ancienne et basales, texture argileuse, caillouteux, non calcaire.
- 28 sol colluvial issu de mélanges entre matériaux de molasse Miocène et basalte, texture équilibrée, calcaire.

Sols développés sur alluvions

- Alluvions actuelles de la Peyne et de ses affluents
- 1 lit majeur de la Peyne, sol alluvial très profond de texture grossière, calcaire.
 - 2 lit majeur des affluents, sol alluvial profond de texture équilibrée puis argileuse en profondeur, calcaire ou non calcaire en fonction de l'impluvium.
 - 3 sol alluvio-colluvial de bas fond avec ou sans drain naturel, profond, texture sableuse puis argileuse vers 80/100 cm, hydromorphie marquée en profondeur, non calcaire.
 - 4 ravins importants, sol peu profond sur les pentes s'apportant en fond de ravin.
- Alluvions récentes de la Peyne
- 5 sol profond à très profond, texture s'alourdisant en profondeur, irrégulièrement caillouteux, irrégulièrement calcaire.

Alluvions anciennes de la Peyne et des affluents

- 6 sol alluvio-colluvial développé sur cône de déjection enroulé, argileux, caillouteux et irrégulièrement calcaire en surface
- 7 sol profond, texture argileuse, caillouteux, généralement non calcaire, terrasses anciennes du Saint Martial et du Riéutor.
- 8 sol profond lessivé, caillouteux (quartz majoritaire), hydromorphie importante, non calcaire.
- 9 association de sol peu profond développé sur molasse miocène en sommet de parcelle et de sol argileux, irrégulièrement caillouteux sur colluvion de terrasses anciennes. Nombreux talus, pente parfois importante.
- 10 sol moyennement profond, de texture variable s'alourdisant en profondeur, caillouteux, irrégulièrement calcaire.
- 11 sol profond, de texture équilibrée s'alourdisant en profondeur, caillouteux, non calcaire.

Sols développés sur la molasse Miocène

- Front de Cuesta
- 12 sol de profondeur variable développé sur des pentes en front de cuesta. Peu profond à profond, texture grossière sur molasse altérée en amont de parcelle puis s'approfondissant à proximité des talus, très calcaire.
- Glacis colluviaux
- 13 sol moyennement profond sur molasse, texture équilibrée, non caillouteux, approfondissement en bas de parcelle, calcaire.
 - 14 sol profond à très profond sur molasse, texture équilibrée puis plus argileuse en profondeur, calcaire.
 - 15 sol profond à très profond sur molasse, texture équilibrée à argileuse, irrégulièrement caillouteux, calcaire.
- Depressions mal drainées
- 16 sol très profond sur molasse, en fond de glacis, texture limono-argileuse s'alourdisant en profondeur, peu caillouteux, hydromorphie très marquée, calcaire.
 - 17 sol très profond sur molasse, au centre de dépressions, texture limono-argileuse puis argileuse en profondeur, hydromorphie présente dès la surface, calcaire.

Sols développés sur la transition Mio-Pliocène

- Sommets de Cuesta
- 18 sol peu profond développé directement sur calcaire lacustre, texture équilibrée, caillouteux, calcaire.
 - 19 Association de sol calcaire peu profond sur calcaire ou éboulis de calcaire et de sol calcaire profond à très profond développé sur de puissants éboulis de mélanges de matériaux. Fortes pentes souvent non cultivées.
- Revers de Cuesta
- 20 sol moyennement profond à profond, texture argileuse, caillouteux, calcaire.
 - 21 sol de profondeur irrégulière, texture moyenne à lourde, irrégulièrement caillouteux, irrégulièrement calcaire. Forte variabilité spatiale (profondeur, texture, couleur, pierrosité).
 - 22 sol profond à très profond, texture variable, irrégulièrement caillouteux, hydromorphie marquée, généralement non calcaire en surface.

Traitements et composition cartographique (S.I.G. ArcGIS 9.2) : Christian Fleure UMR Lisah INRA Montpellier

Extrait fond topographique (2001), orthorectifié, Lambert Zone III - IGN France (Licence IGH Numéros 2009/CU/0309/03)

Résumé

La prédiction de la profondeur du sol nécessite une prise en compte des processus pédologiques : en milieu méditerranéen, compte tenu des conditions climatiques, on considère que les sols sont soumis prioritairement par des processus de redistribution. Ces processus de redistribution (érosion et dépôt) sont directement dépendant de la morphologie, c'est à dire des propriétés du relief. Ainsi, on peut établir des corrélations entre indicateurs de relief et caractéristiques de sol, l'avantage étant que les données de relief sont disponibles sur de grandes surface et à bas coût. L'objectif principal de l'étude a été d'identifier des indicateurs de relief (ou attributs de terrain) permettant de prévoir la profondeur du sol et de distinguer des unités de sol homogènes. Pour mettre en lien attributs de terrain et profondeur de sol, des arbres de classification ont été utilisés (CART, Breiman et al., 1984). L'étude permis d'identifier des attributs de terrain ayant un fort pouvoir prédictif, comme le MrVBF et le TWI. L'influence de la précision verticale et horizontale ne semble pas déterminante quant à performance des attributs de terrain. Ce constat indique qu'il n'est pas nécessaire d'avoir une représentation très fine du relief sur une zone d'étude, lorsqu'on cherche à modéliser les profondeurs de sol. Cela indique d'autre part que les données de relief d'ores et déjà disponibles au niveau mondial sont fonctionnelles pour la cartographie numérique des sols.