

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Conservatoire National des Arts et Métiers
École Supérieure des Géomètres et Topographes
1 Boulevard Pythagore - 72000 Le Mans



le cnam
École supérieure
des géomètres et topographes esgt



Mémoire de travail de fin d'études
présenté en vue de l'obtention du
Diplôme d'ingénieur de l'ESGT

Utilisation et traitement des données MNT LiDAR pour la modélisation hydraulique et l'étude hydrogéomorphologique dans le cadre de la Directive Européenne 2007/60/CE relative aux risques d'inondation



Mémoire soutenu par :
Arnaud ALVAREZ
le 10 juillet 2012

Membres du jury :
Président : M. José CALI
Maître de stage : M. Frédéric PONS
Professeur référent : M. Mathieu BONNEFOND

Table des matières

Remerciements.....	4
Introduction.....	5
Partie I :Cartographie de zones inondables.....	8
1.Élaboration des cartes de surfaces inondables.....	8
1.1.L'hydrogéomorphologie.....	8
1.1.1.Les principes.....	8
1.1.2.La mise en œuvre d'une étude hydrogéomorphologique.....	9
1.1.3.Le rendu.....	10
1.1.4.Apport de la méthode de détection des ruptures de pente.....	10
1.2.La modélisation hydraulique.....	11
1.2.1.Les principes.....	11
1.2.2.La mise en œuvre de la modélisation.....	11
1.2.3.Apport de la méthode de détection des ruptures de pente.....	11
1.3.L'élaboration des cartes de zones inondables.....	12
2.Le LiDAR.....	13
2.1.Les principes.....	13
2.2.La campagne de levés pour la Directive Inondation.....	14
2.3.La fourniture des données.....	14
3.État de l'art.....	14
3.1.Simplification du nuage de points.....	14
3.2.Topographic Position Index.....	15
3.2.1.Présentation.....	15
3.2.2.Principes.....	15
4.Conclusion.....	16
Partie II :Élaboration d'une méthode de traitement des données LiDAR	17
1.Méthodes mises en place à partir d'un MNT théorique.....	18
1.1.Calcul de la courbure.....	19
1.1.1.Étape 1 : calcul sur MNT pur.....	19
1.1.2.Étape 2 : calcul sur MNT bruité.....	20
1.1.3.Étape 3 : Étude de l'application d'un filtre sur le MNT	21
1.1.3.Étape 3 : Transcription sous QGIS-GRASS	21
1.2.Calcul de la variation de pente.....	24
1.3.Calcul de l'écart-type.....	27
2.Méthodes mises en place à partir d'une dalle LiDAR.....	30
2.1.Calcul de la courbure.....	30
2.2.Calcul de la variation de pente.....	32
2.3.Calcul de l'écart-type.....	33
3.Conclusion.....	33
Partie III :Résultats.....	34
1.Compatibilité et validité des méthodes pour l'étude hydrogéomorphologique.....	34
1.1.Calcul de la courbure.....	34
1.2.Calcul de la variation de pente.....	36
1.3.Calcul de l'écart-type.....	38

2.Compatibilité et validité des méthodes pour la modélisation hydraulique.....	39
2.1.Calcul de la variation de pente.....	40
2.2.Calcul de l'écart-type.....	42
3.Conclusion.....	43
Conclusion.....	44
Bibliographie.....	46
Table des illustrations.....	47

Remerciements

Premièrement, je tiens à remercier Frédéric Pons pour m'avoir permis de réaliser mon travail de fin d'études au sein du CETE Méditerranée, pour sa disponibilité, ses conseils et pour m'avoir guidé dans le déroulement de mes recherches.

Plus largement, je remercie tous les agents du Service Risques Inondations Littorales et Hydrauliques, avec qui j'ai partagé le quotidien professionnel pendant ces 20 semaines, pour leur accueil et leur disponibilité.

Je remercie également M. Bonnefond pour m'avoir aidé dans les orientations de mes recherches et pour avoir supervisé ce TFE.

Introduction

Le risque majeur est « la menace sur l'homme et son environnement direct, sur ses installations, la menace dont la gravité est telle que la société se trouve absolument dépassée par l'immensité du désastre » d'après Haroun Tazieff, célèbre volcanologue. Depuis des années, la prévention des risques est une préoccupation importante pour l'État et les collectivités afin de limiter les conséquences sur la population, l'économie ou encore l'environnement. Nous pouvons donc dire que le risque majeur est la confrontation entre un aléa et différents enjeux.

Les catastrophes naturelles font partie des risques majeurs. En France, deux-tiers des communes sont concernées par au moins un risque naturel dont 15000 exposées aux inondations. Les derniers événements en date comme la tempête Xynthia de 2010 qui a engendré une montée des eaux en Charente-Maritime et en Vendée ainsi que les crues dans le Var en 2011, démontrent de la violence de ces événements et leurs conséquences. Même si les phénomènes à l'origine de ces risques naturels ne peuvent être maîtrisés, l'objectif est de les déterminer au mieux afin de limiter les conséquences. Cet objectif est une des priorités de l'État.

Tout comme la France, le reste de l'Europe n'est pas épargné par les catastrophes naturelles et notamment les inondations. C'est pour quoi, la Commission Européenne a décidé, en 2007 d'adopter la directive 2007/60/CE relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation, appelée directive inondations. Elle met en place une méthode de travail pour permettre aux territoires exposés aux risques d'inondation de travailler à réduire les conséquences négatives. Pour le type d'inondation, il peut s'agir de débordements de cours d'eau, de submersions marines, de remontées de nappes ou de ruissellements. En droit français, cela se traduit par une obligation de réduire les conséquences pour la santé humaine, l'environnement, le patrimoine culturel et l'activité économique. Cette directive constitue une opportunité de mettre en place une hiérarchie des actions pour répartir les moyens sur le territoire.

Cette directive européenne a eu pour conséquence la mise en place d'un groupe de suivi national afin de décider de la méthode de travail à employer à travers le décret n°2011-227 du 2 mars 2011 relatif à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation. Ce groupe a été créé par la DGPR¹ et est constitué de la DGPR, des DREAL² de bassin, des DDT³ et des organismes qui l'assistent (IRSTEA⁴, CETE Méditerranée ...). Le CETE Méditerranée assure un rôle d'assistance auprès de la DGPR pour la mise en œuvre de la Directive Inondation. Il participe aux groupes de travail et teste les méthodes proposées avant le déploiement auprès des structures en charge des travaux, les DREAL.

Au niveau local, la Directive Inondation se décompose en cinq étapes :

- EPRI (évaluation préliminaire des risques d'inondation) avant le 22 décembre 2011.
- choix des TRI (territoires à risque d'inondation) pour septembre 2012.
- élaboration des cartes des surfaces inondables et des cartes des risques d'inondation dans les TRI pour les types d'aléas auxquels ils sont exposés et 3 périodicités (événements fréquent, moyen et extrême) pour le 22 décembre 2013.
- élaboration des PGRI (plans de gestion du risque inondation) pour chaque district: à

1 Direction Générale de la Prévention des Risques

2 Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

3 Direction Départementale des Territoires

4 Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

- achever pour le 22 décembre 2015.
- mise en œuvre des stratégies locales.

Ce Travail de Fin d'Études (TFE) entre donc dans le cadre de la troisième étape du programme, c'est-à-dire la cartographie des zones inondables. Pour cela, des campagnes d'acquisition de données LiDAR ont été lancées par la DGPR du Ministère de l'Écologie du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE) auprès de l'IGN pour obtenir le MNT des territoires à cartographier.

Une zone inondable peut être définie par différentes méthodes. Il y a l'étude des crues historiques, l'étude hydrogéomorphologique et la modélisation hydraulique. Elles correspondent à des manières différentes d'aborder le risque d'inondation et ont leurs atouts et leurs limites. La combinaison de ces trois méthodes permet une meilleure connaissance des risques de crue.

Ce mémoire se décompose en trois parties. Dans un premier temps, les thèmes constituant le cadre du TFE, la modélisation hydraulique, l'hydrogéomorphologie, le système LiDAR, vont être exposés dans leurs généralités. Ensuite, les différentes méthodes mises en place pour la détection des lignes de rupture de pente vont être présentées et détaillées. Et pour finir, une analyse des résultats sera faite sur des cas déjà étudiés pour juger de la qualité de ces méthodes.

Partie I : Cartographie de zones inondables

Les zones inondables peuvent être déterminées par différentes approches complémentaires.

- Une étude des crues historiques permet de connaître les plus hautes eaux associées à un événement caractérisé par une période de retour et les limites de zones inondées.
- Une étude hydrogéomorphologique est une approche plus naturaliste basée sur la détection des limites des unités hydrogéomorphologiques permettant de définir les limites hydrogéomorphologiques de zones inondables (*cf. illustration 1*).
- La modélisation hydraulique offre une approche plus mathématique pour connaître les hauteurs d'eau en fonction des débits d'un tronçon d'eau pour une situation donnée.

Ces trois approches permettent de définir des zones à risques.

La technologie LiDAR permet d'acquérir les données altimétriques et planimétriques d'un terrain naturel. En traitant ces données, nous pourrions extraire les différentes caractéristiques du terrain nécessaires aux méthodes d'hydrogéomorphologie et de modélisation qui sont présentées dans ce chapitre.

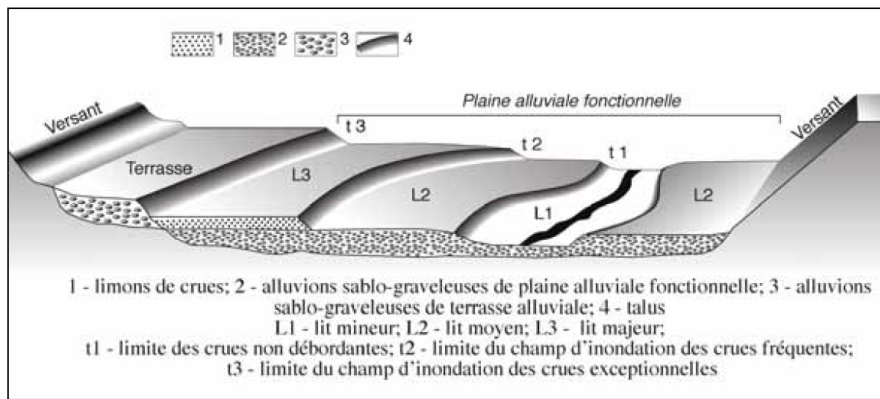
1. Élaboration des cartes de surfaces inondables

1.1. *L'hydrogéomorphologie*

1.1.1. Les principes

L'étude hydrogéomorphologique est une approche naturaliste qui étudie le fonctionnement naturel des cours d'eau en analysant la structure des vallées. Cette approche a été mise en place dans les années 1980 et étudiée par Ballais J-L et al. (2011). Elle permet de diagnostiquer des zones inondables d'un cours d'eau.

Cette technique est basée sur l'observation et l'interprétation du terrain naturel. Au fil des siècles et des crues, une plaine alluviale est façonnée par le cours d'eau entraînant la formation de structures géomorphologiques : les lits (*cf. illustration 1*). Ce sont des unités hydrogéomorphologiques encadrées par des unités encaissantes. Ils correspondent au résultat de la combinaison de deux phénomènes que sont l'accumulation et l'érosion des sédiments. L'érosion constitue la marque de la limite entre deux lits sous forme de talus. Fondée sur une approche naturaliste, cette étude permet donc de mettre en évidence ces deux types d'unités remarquables façonnées par l'eau qui marquent les limites d'une crue. Elle fournit des éléments qualitatifs alors que les éléments quantitatifs peuvent être fournis par une modélisation hydraulique.



*Illustration 1: les différentes unités géomorphologiques
 [source : J.L. Ballais et al., 2005]*

1.1.2. La mise en œuvre d'une étude hydrogéomorphologique

Cette méthode est basée sur la science de l'observation ce qui implique le choix des données sur lesquelles les observations vont se baser et sur les échelles les plus adaptées. L'hydrogéomorphologie présente ses résultats les plus significatifs et intéressants à l'échelle de la plaine alluviale.

Ce type d'étude est généralement réalisé sur un bassin versant dont une étude des crues historiques est prise en compte. Elle se décompose en deux phases :

- une analyse comprenant deux approches complémentaires que sont l'interprétation (avec la cartographie hydrogéomorphologique), et l'exploitation des données historiques.
- une synthèse pour évaluer et cartographier les zones inondables en fonction du degré de risque.

Ensuite, l'étude se réduit à l'échelle de la plaine alluviale, sur laquelle l'étude hydrogéomorphologique est la plus pertinente. Ainsi, nous déterminons les unités hydrogéomorphologiques et les unités encaissantes.

a) Les unités hydrogéomorphologiques

Nous pouvons compter trois unités :

- le lit mineur constitue le chenal principal du cours d'eau. Il correspond aux limites de ce cours d'eau lors des crues annuelles et fréquentes. Il contient généralement un chenal d'étiage. Ici, les éléments cartographiés seront les limites du lit, les éléments du modelé souvent tourmenté à cause de la dynamique des crues, les points de rupture de berges ou encore des départs de chenaux de crue.
- Le lit moyen se situe à proximité du lit mineur. Il se caractérise par une surface bosselée formée de creux, de monticules et par la présence de ripisylve, c'est-à-dire une surface boisée, buissonnante ou herbacée. Le lit moyen contient les crues fréquentes et moyennement fréquentes.
- Le lit majeur correspond à une surface topographique plane constitué de sédiments très fins appelés limons. Cette unité est occupée par les crues dites rares voire

exceptionnelles. Il se peut que ce lit soit dominé par un lit majeur exceptionnel.

b) Les unités encaissantes

Il en existe différents types :

- le versant correspond à la roche en place. Il peut être visible ou masqué par un sol.
- les terrasses sont des formes topographiques situées au-dessus de la plaine d'inondation. Elles sont le fruit de l'accumulation de matériaux apportés par les cours d'eau lors des dernières périodes glaciaires.
- les colluvions qui correspondent à divers matériaux provenant de l'érosion des versants des montagnes ou collines qui se déplacent le long des pentes et qui s'accumulent sur le pied des versants.

c) Les moyens d'étude

Différents outils sont utilisés pour l'hydrogéomorphologie. Il existe les cartes (IGN), les images satellitaires, qui fournissent des informations de plus en plus précises avec les images à très hautes résolutions spatiales, et également les ortho-photographies aériennes. Ce dernier outil est le plus répandu pour répondre aux besoins de l'hydrogéomorphologie.

La base de l'étude est la photo-interprétation stéréoscopique de ces photographies aériennes. Elle permet la vision du relief et la distinction des unités géomorphologiques aux altitudes différentes. Ces observations sont reportées sur des cartographies « minutes », c'est-à-dire dessinées à la main. Des missions sur le terrain sont souvent nécessaires pour confirmer, corriger et valider ces cartographies. Ces différentes observations peuvent être combinées avec la documentation relative à la géologie du secteur. Des cartes géologiques peuvent également apporter des informations importantes tout comme les photos aériennes pour des observations diachroniques.

Le rendu se présente sous la forme d'un rapport de présentation et de documents graphiques. Sur ces documents graphiques apparaissent les différentes unités présentes sur le cours d'eau.

1.1.3. Le rendu

L'étude hydrogéomorphologique est réalisée à partir de photographies aériennes dont l'échelle est généralement le 1/25000, voire le 1/10000. La détection des lignes de rupture de pente se réalisant à la main, la précision sur leur position est de l'ordre de plusieurs mètres (12 m pour une photographie au 1/25000 et 5 m pour une photographie au 1/10000).

1.1.4. Apport de la méthode de détection des ruptures de pente

Pour ce type d'approche, il faudra donc que la méthode de détection des lignes de rupture de pente permette d'obtenir des linéaires correspondants aux limites des unités hydrogéomorphologiques. L'exigence vis-à-vis du MNT n'est pas très forte étant donnée la précision décimétrique des limites.

1.2. La modélisation hydraulique

1.2.1. Les principes

La modélisation hydraulique est maintenant un outil très, voire systématiquement utilisé dans le cadre d'études hydrauliques. Elle permet de connaître les paramètres hydrauliques (hauteur, côte, vitesse) d'un cours d'eau (ou tronçon de cours d'eau) en fonction d'une situation hydrologique donnée (DGUIHC, 2007). Elle est mise en place suivant différents critères :

- le choix du modèle
- la construction du modèle
- le calage du modèle
- le rendu

Le modèle peut être plus ou moins complexe, selon le nombre de données d'entrée. Nous distinguons par exemple le modèle filaire (1D) en régime permanent. C'est le modèle le plus simple à utiliser. Il y a le modèle filaire ramifié, le modèle filaire en régime non permanent qui permet d'étudier l'influence d'un ouvrage (barrage par exemple). Il existe également le modèle filaire à casiers permettant de mettre en évidence des zones de stockage bien identifiées. Il y a également le modèle 2D utilisé lorsque l'écoulement n'est plus considéré comme mono-directionnel dû à des obstacles type gravières, écoulement secondaire sur lit majeur très large, plaine en toit, lit perché ou modifié de manière importante par l'action de l'Homme.

La construction du modèle correspond à l'emprise du modèle. Soit elle est définie à l'avance par des limites amont et aval, soit elle est définie à posteriori.

Le calage est une phase très importante car cette étape permet de s'assurer de la fiabilité du modèle en comparant les hauteurs d'eau calculées avec des laisses de crues (marques durables, informations historiques, photographies, etc...) observées lors d'événements.

1.2.2. La mise en œuvre de la modélisation

Afin de mettre en place une modélisation hydraulique, il faut disposer, au préalable, de données topographiques et hydrologiques.

Les conditions limites du modèle sont des débits d'entrée et d'apport ainsi que des lois hydrauliques (loi de tarage, loi de régime critique par exemple) et de lois de fonctionnement d'ouvrage.

1.2.3. Apport de la méthode de détection des ruptures de pente

La détection des lignes de rupture de pente va permettre de connaître les limites naturelles ou anthropiques autour d'un cours d'eau conditionnant le modèle hydraulique. Selon le type de modèle utilisé, la détection jouera un rôle différent.

Pour un modèle filaire, les ruptures de pente permettront de connaître les limites entre différentes entités comme le lit mineur. Une fois ces limites connues, en fonction du logiciel utilisé, des critères de frottement pourront être différenciés (Mascaret comprend un Strickler lit mineur et majeur s'appuyant sur les berges par exemple, sachant que d'autres outils permettent de mettre un

plus grand nombre de zones). L'exigence de précision est moyenne, quelques mètres en fonction de la largeur de la zone inondable.

Pour un modèle 1D casier, les lignes de rupture de pente peuvent correspondre à l'emprise d'une zone de stockage, ce qui permettra, par exemple, de dimensionner les casiers de manière plus précise et de fournir les traces pour la réalisation des lois entre casiers. L'exigence de précision n'est pas sur l'emprise du casier mais sur la trace qui sera utilisée pour la loi d'échange entre casier.

Pour une modélisation 2D, les lignes de ruptures de pente seront synonymes de lignes de contraintes qui permettront d'appliquer des contraintes de maillage différentes en fonction des zones (lit mineur, ouvrages linéaires). La précision sera forte autour des ouvrages.

1.3. L'élaboration des cartes de zones inondables

Pour la mise en œuvre de la Directive Inondation, le travail va consister à élaborer des cartes pour trois niveaux de phénomènes en se basant, au départ, sur les études et données existantes sur les différents types d'inondation.

Type d'inondations	Submersion marine	Débordements de cours d'eau	Ruissellement	Eaux souterraines	Prise en compte de l'effet des ouvrages de protection ?
Forte probabilité (fréquent)	Obligatoire , sauf en cas d'absence de débordements dans la gamme ci-dessous $10 < T < 30$ ans ou $0,033 < Pan < 0,1$ Premiers dommages significatifs Par exemple événement historique				Oui, mais seulement si défaillance ou dysfonctionnement peu probables dans la gamme [10 – 30 ans]
Probabilité Moyenne	$0,0033 < Pan < 0,01$ ou $100 < T < 300$ ans Par exemple événement historique Par défaut 100 ans pour un événement modélisé				Non, dans la majorité des cas (sauf cas particuliers où il est démontré que les défaillances sont très improbables)
Faible probabilité (ou événement extrême)	$T > \sim 1000$ ans ou $Pan < 0,001$ Et met en défaut tout système de protection autres approches possibles (type RFS, HGM, plaine littorale fonctionnelle ...)			plaine alluviale fonctionnelle (lit majeur) si elle existe	Non (sauf éventuellement en cas d'impossibilité physique de ne pas prendre en compte les aménagements)

T = période de retour théorique - Pan = probabilité annuelle de dépassement de l'évènement

Illustration 2: tableau récapitulatif des différentes cartographies à réaliser pour la Directive Inondation

Dans le cadre de cette directive, il est apparu opportun au Ministère de lancer avec l'IGN le volet « zones inondables » du programme RGE Alti qui rejoint les objectifs des politiques publiques du MEDDE en matière de prévention du risque inondation. L'acquisition de ces données doit faciliter la réalisation de modélisations, de cartes hydrogéomorphologiques, de restitution de résultats de calculs et apporter un référentiel commun aux différents services.

2. Le LiDAR

2.1. *Les principes*

Le LiDAR est une technologie relativement récente qui ne cesse de se développer et de concurrencer la photogrammétrie. Cela signifie Light Detection And Ranging. Un système LiDAR est basé sur le principe de mesure du temps de vol d'une onde lumineuse entre son émission et sa réception (cf. *illustration 3*). Ce temps définit la distance entre émetteur et réflecteur qui, combinée à la connaissance de la position absolue de l'émetteur, permet d'obtenir le géoréférencement du réflecteur. Ainsi, la forme de la surface terrestre est levée.

Il existe trois catégories de LiDAR : le LiDAR terrestre, le LiDAR spatial et le LiDAR aéroporté. Ils se différencient par leur résolution, et leur échelle de travail. Dans le cadre de ce TFE, nous allons décrire le LiDAR aéroporté car c'est ce système d'acquisition qui a été utilisé pour l'obtention des MNT liés à la Directive Inondation.

Le LiDAR aéroporté signifie que le système émetteur de l'onde lumineuse est embarqué sur un hélicoptère, un drone ou un avion. La combinaison d'un GPS, qui réalise les mesures différentielles avec une station au sol, et d'une centrale inertielle installée à bord, qui permet de connaître la trajectoire de l'appareil, permet de calculer la position de ce dernier. Ensuite, la mesure du $\frac{1}{2}$ temps mis par l'onde pour revenir à l'émetteur permet de connaître les coordonnées des points au sol. Durant le vol, le système LiDAR réalise un balayage de la surface terrestre.

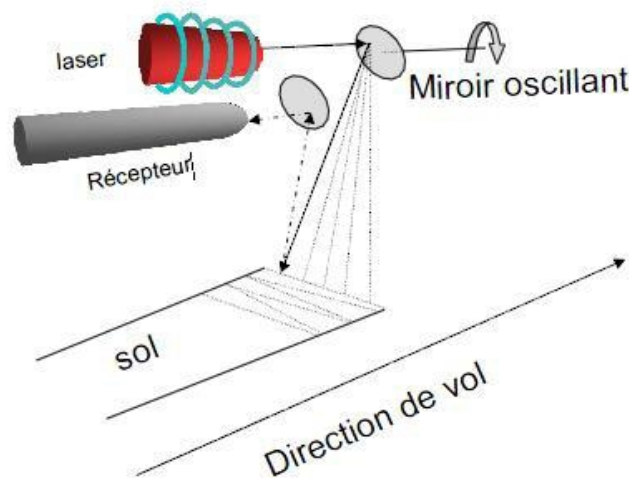


Illustration 3: fonctionnement d'un système LiDAR
source : F. Bretar, 2006

Concernant la précision des points, elle dépend de divers facteurs :

- facteurs internes : positionnement ins/gps, mesures de distances, montage. Ces facteurs peuvent provoquer des déformations des bandes.
- facteurs externes : hauteur de vol, morphologie du terrain, réflectivité des matériaux. Cela provoque l'apparition de bruit local.

En général, une fois ces erreurs corrigées, la précision des points levés est de 20 cm en altimétrie et 50 cm en planimétrie.

2.2. La campagne de levés pour la Directive Inondation

Concernant la mise en place de Directive Inondation, l'IGN a lancé une campagne d'acquisition LiDAR à travers le territoire français. Cette campagne fait partie du programme appelé « RGE Alti », volet « zones inondables » permettant une réfection de l'altimétrie sur le territoire français. Les caractéristiques des données obtenues sont les suivantes :

- ~2 impulsions/m²
- précision : 20cm en altimétrie et 50cm en planimétrie

L'IGN pilote le traitement en réalisant une classification automatique pour ne garder que les points situés au sol. Deux couches maillées sont alors disponibles, dans lesquelles, à chaque nœud est attribué des numéros de ligne et de colonne (c,l), les coordonnées bidimensionnelles (X,Y) et l'altitude (Z). Ensuite, une interpolation des nœuds de la grille régulière dans le semis de points est réalisée. Cette interpolation est faite au pas de 1m mais ne représente pas toujours strictement la réalité dans les zones où les données sont peu denses.

2.3. La fourniture des données

Les données fournies par l'IGN sont :

- un semis de point
- une grille au pas de 1m
- une grille de qualité (non disponible dans le cadre du TFE)

Ces données LiDAR ne fournissent pas les données bathymétriques des cours d'eau.

3. État de l'art

3.1. Simplification du nuage de points

Les données issues d'un levé LiDAR sont volumineuses et peuvent être source de ralentissement du traitement. C'est pourquoi, depuis 1980, la volonté d'optimiser le stockage des données relatives aux modèles numériques de terrain a permis le développement de différentes méthodes d'allègement étudiées par Mattenberg Y. (2006). Mais la réduction de points n'est pas forcément un critère majeur dans l'optique d'obtenir un nuage de points caractéristique du terrain naturel. Il faut également prendre soin de garder les éléments naturels permettant de définir un modèle hydrogéomorphologique ou hydraulique.

Les algorithmes de simplification sont regroupés en deux catégories : les méthodes d'affinement et les méthodes de simplification.

La méthode d'affinement consiste à réaliser une triangulation selon une hiérarchie en se basant sur le moins de points possibles. Le nombre de points intégrés au nuage dépend du nombre d'étapes introduites dans la construction du maillage et des critères utilisés.

La méthode de simplification est basée sur le nuage de points complet sur lequel est appliqué un algorithme de suppression de points en fonction de différents critères. La suppression peut

s'appliquer sur des nœuds, des arêtes ou des triangles selon l'algorithme mis en place.

Mais la simplification ou l'affinement de nuages de points n'est pas la seule solution pour pouvoir traiter des données issues d'un levé LiDAR. Ces méthodes nécessitent de nouvelles triangulations pour densifier ou simplifier le nuage de points. Ce travail a un intérêt sur le semis de points et non sur la grille où une nouvelle interpolation sur les points dégraderaient les données. En effet, la grille au pas de 1m est le résultat d'une interpolation réalisée suivant des critères avec une vérification humaine sur les zones sensibles (ouvrages par exemple). Dans le cadre de ce TFE, le choix s'est porté sur le traitement de grilles car il apparaît plus léger à traiter, avec de nombreux outils disponibles et un traitement se rapprochant des algorithmes d'imagerie.

3.2. Topographic Position Index

3.2.1. Présentation

Topographic Position Index (TPI) est un indice permettant de déterminer la forme d'un terrain naturel. Cet indice a été mis en place et présenté par Andrew Weiss à la Conférence Internationale des Utilisateurs ESRI en 2001. L'utilisation de ce TPI, combiné à la pente, permet de classer un paysage en différentes catégories : sommet de crête, fond de vallée, canyon, plaine.

3.2.2. Principes

Le TPI correspond à la différence entre l'élévation d'une cellule et l'élévation moyenne de son voisinage. Un TPI positif signifie que la cellule est plus élevée que son voisinage et inversement. Dans le cas d'un TPI nul, cela peut traduire une zone plane mais également un point de mi-pente. Pour différencier les deux situations, il faut regarder la valeur de la pente en ce point. Une pente forte signifiera un point de mi-pente tandis qu'une pente nulle ou presque sera synonyme de zone plane.

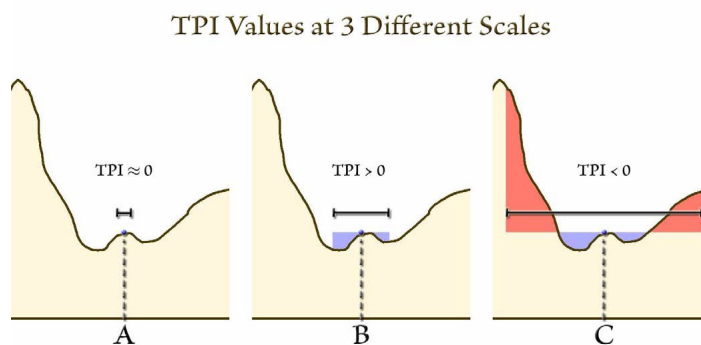


Illustration 4 : influence de la taille du voisinage sur la valeur du TPI

L'indice est très dépendant de la taille du voisinage qui va être choisi pour son calcul. En effet, un point de crête sur un voisinage restreint peut devenir un point de talweg avec un voisinage plus élargi (cf. *illustration 4*).

Les TPI peuvent également être classés par catégories de pente basées sur la valeur de

l'indice suivant le voisinage et la valeur de la pente en ce point (*cf. illustration 5*). Il existent deux méthodes. La plus simple est de définir des seuils de classification: un indice supérieur à ce seuil signifiera que le point est un sommet de crête et un fond de vallée s'il est inférieur. Une autre méthode, plus avancée et mise en place par Andrew Weiss, consiste à créer des seuils en fonction de l'écart-type sur l'élévation.

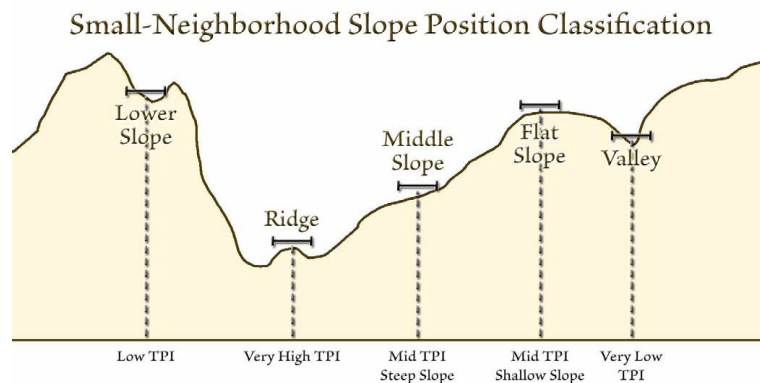


Illustration 5: détermination de points caractéristiques par combinaison valeur TPI/valeur de pente

4. Conclusion

A travers cette première partie, nous avons pu voir que des algorithmes de simplification de semis de points existent mais le besoin en risque d'inondation est la détermination des lignes de rupture de pente définissant les unités géomorphologiques d'un lit majeur. Cette détection est primordiale, tant pour l'étude hydrogéomorphologique que pour la modélisation hydraulique. Ces deux approches diffèrent par leur façon de déterminer les zones à risques, et les exigences vis-à-vis de la précision de ces lignes sont différentes. Pour une étude hydrogéomorphologique, la précision de la position des lignes de rupture de pente attendue est de l'ordre de plusieurs mètres. Concernant la modélisation hydraulique, les méthodes mises en place devront être plus précises pour pouvoir déterminer les limites de lit mineur avec une précision de 1 ou 2m en planimétrie. Au niveau altimétrique, la précision attendue peut être différente selon la zone sur laquelle les calculs seront réalisés. Une précision de 20cm est convenable pour des zones planes et larges alors que la précision des points autour d'ouvrages doit être de quelques centimètres maximum.

Partie II : Élaboration d'une méthode de traitement des données LiDAR

A travers cette seconde partie, nous allons exposer les différentes méthodes de détections des lignes de rupture de pente. La mise en place de ces méthodes a été réalisée dans le souci de respect des contraintes liées à l'hydrogéomorphologie ou à la modélisation hydraulique.

Logiciels QGIS et GRASS

Au sein du service, comme dans les différents établissements publics travaillant sur la Directive Inondation, la suite logiciel de SIG majoritairement utilisée est MapInfo. La suite logiciel ArcGis est présente dans certains services. La politique du CETE Méditerranée ainsi que du Ministère est de s'orienter vers des logiciels libres. Le travail à réaliser dans les services pour la Directive Inondation a poussé à s'orienter vers l'utilisation d'un outil gratuit et performant. Le logiciel QGIS, déjà soutenu par le Ministère a semblé approprié car il peut être associé à GRASS dans des formes d'utilisations allant du grand public aux spécialistes. C'est pour cela que des formations sur le logiciel QGIS ont été mises en place. Par conséquent, la méthode de détection de lignes de rupture de pente recherchée s'est réalisée sur ce logiciel.

Cette partie consiste donc à présenter le logiciel Qgis ainsi que GRASS qui est un autre logiciel de SIG utilisable via l'interface de QGIS.

QGIS

Également appelé Quantum GIS, QGIS est un logiciel SIG publié sous licence GPL. Il fait partie des projets officiels de la fondation Open Source Geospatial (OSGeo). Il fonctionne sous Linux, Unix, Mac OS X, et Windows. Il prend en charge les formats vectoriels et matriciels (raster).

Il permet d'utiliser des fichiers vecteurs issus d'autres logiciels SIG, comme les fichiers shape (arcinfo), tab (mapinfo).

L'avantage important de ce logiciel pour ce TFE est que QGIS peut être utilisé comme interface graphique d'un autre logiciel SIG, plus puissant, appelé GRASS.

GRASS

GRASS est donc un logiciel de SIG. Comme Qgis, il est libre, publié sous licence GPL, utilisable sous Linux, Unix, Mac OS X, et Windows et est le fruit d'un projet de la fondation OSGeo.

GRASS a été initialement développé par le laboratoire de recherche en ingénierie de la construction de l'armée américaine depuis 1982, pour la gestion des terres et la planification environnementale. Depuis, son développement lui a permis de s'ouvrir à différents domaines de la recherche scientifique.

Le logiciel est disponible sur l'interface QGIS sous forme d'extension. Ce logiciel est de conception modulaire, c'est-à-dire que chacune de ses fonctions se trouve sous forme de module qui s'exécute uniquement lorsque l'utilisateur souhaite l'utiliser. Un module peut s'exécuter de deux manières :

- soit via une arborescence relativement intuitive qui classe les modules en fonction de leur domaine et leur utilité (*cf. illustration 6*).
- soit via une console appelée « shell » qui permet de lancer les modules par lignes de commande (*cf. illustration 7*).

Un module lancé depuis la console permet d'avoir plus de choix dans les options de la fonction, alors qu'en utilisant l'arborescence, certaines options sont mises par défaut sans possibilité de les modifier.

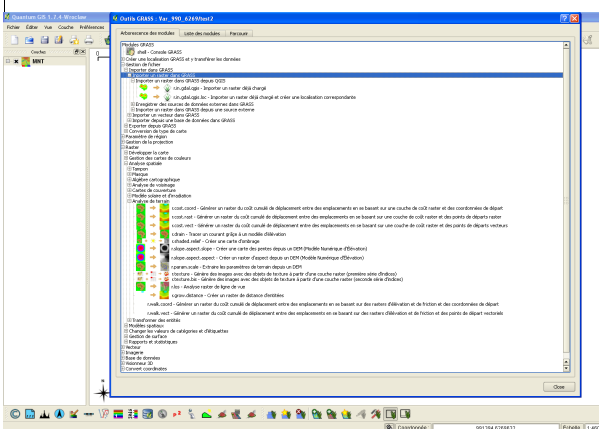


Illustration 6: lancement de fonctions GRASS via l'arborescence

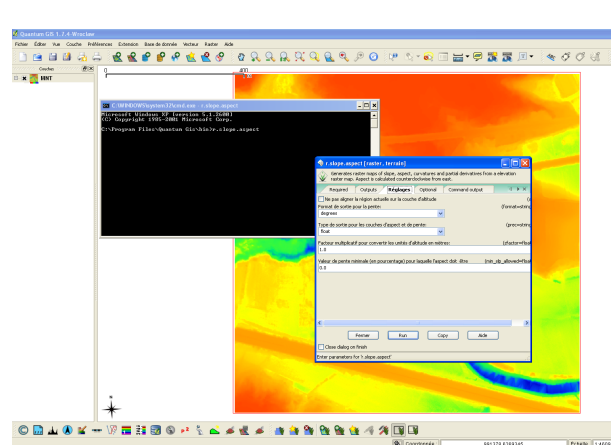


Illustration 7: lancement de fonctions GRASS via la console Shell

Compte-tenu de la complexité d'un terrain naturel, il est difficile de comprendre réellement ce que fait le logiciel et de donner un avis sur la qualité des résultats obtenus. C'est pour cela que la mise en place des méthodes recherchées s'est déroulée en deux étapes. Dans un premier temps, un MNT « théorique » a été créé avec Calc sur lequel les tests ont été appliqués. Ensuite, une fois les méthodes analysées et jugées pertinentes, elles ont été appliquées sur une dalle LiDAR, en format ascii à l'aide des outils informatiques à disposition.

1. Méthodes mises en place à partir d'un MNT théorique

Sous OpenOffice-Calc, un profil en travers d'un cours d'eau relativement théorique a été créé (*cf. illustration 8*), avec la présence d'un remblai important (route par exemple), d'une digue et des différents éléments qui peuvent constituer un cours d'eau (lits mineur, moyen et majeur, terrasses, versants).

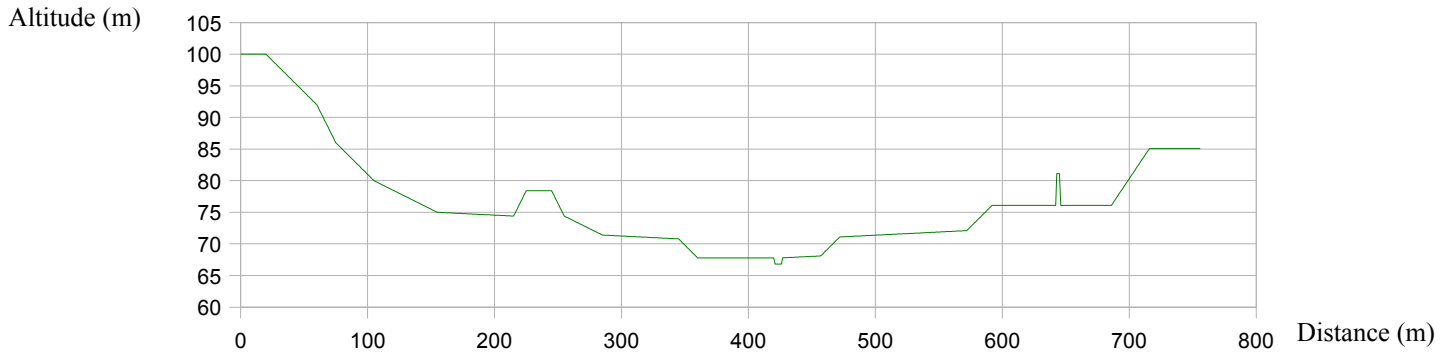


Illustration 8: Profil en travers du lit majeur créé sous Calc

1.1. Calcul de la courbure

Une ligne de rupture de pente est un changement important de pente en un point du terrain. En mathématiques, cela se traduit par une courbure importante. La courbure est en réalité la dérivée seconde en un point du terrain naturel (la dérivée donne la pente, et la dérivée de cette dérivée correspond à un différentiel de pente, donc à la courbure). Le but est donc de réaliser les calculs suivants :

$$\begin{array}{ll} \text{pente :} & p = \Delta y / \Delta x \\ \text{courbure :} & c = \Delta p / \Delta x \end{array}$$

1.1.1. Étape 1 : calcul sur MNT pur

En réalisant une double dérivée, nous obtenons les courbures le long du profil en travers représentées sur l'illustration 9.

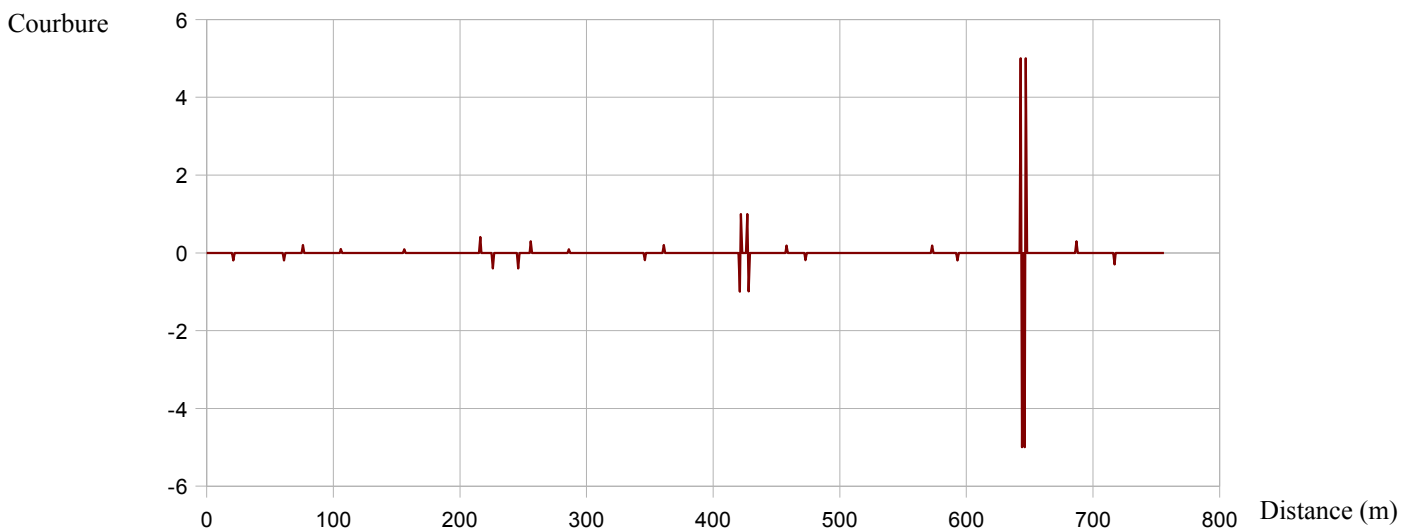


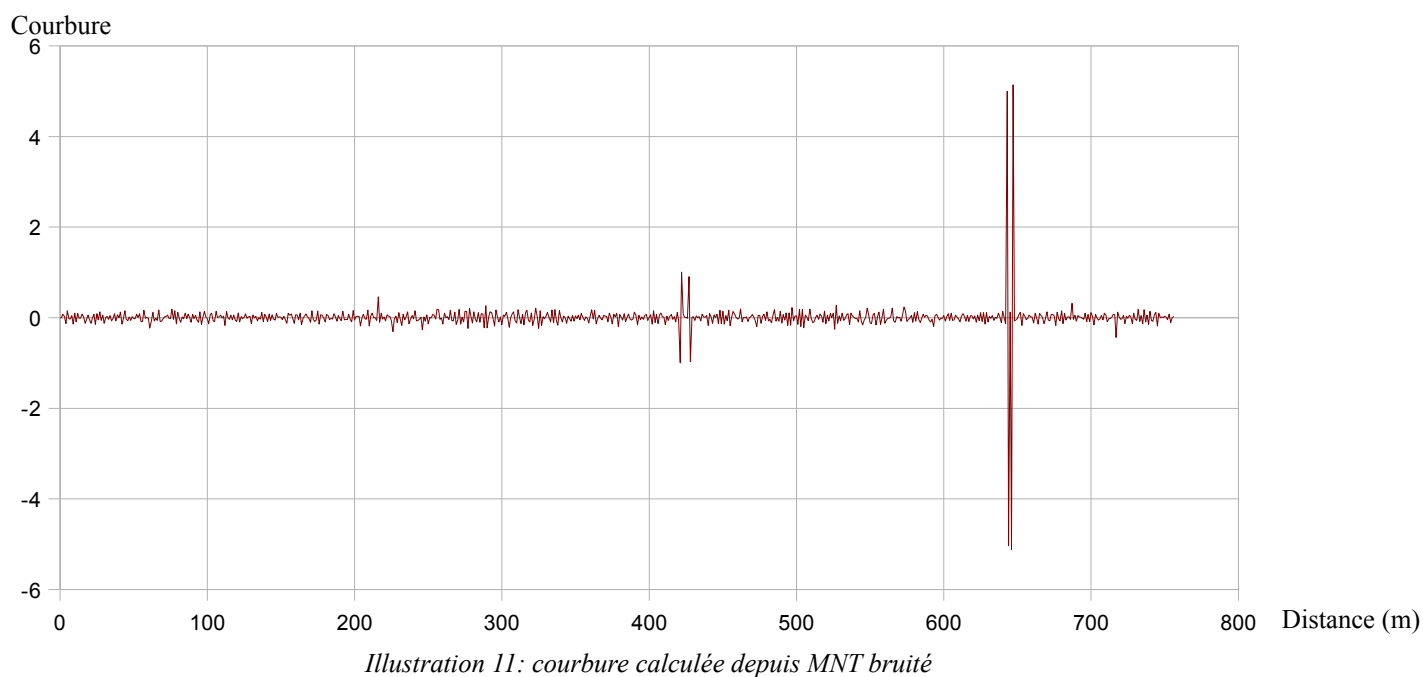
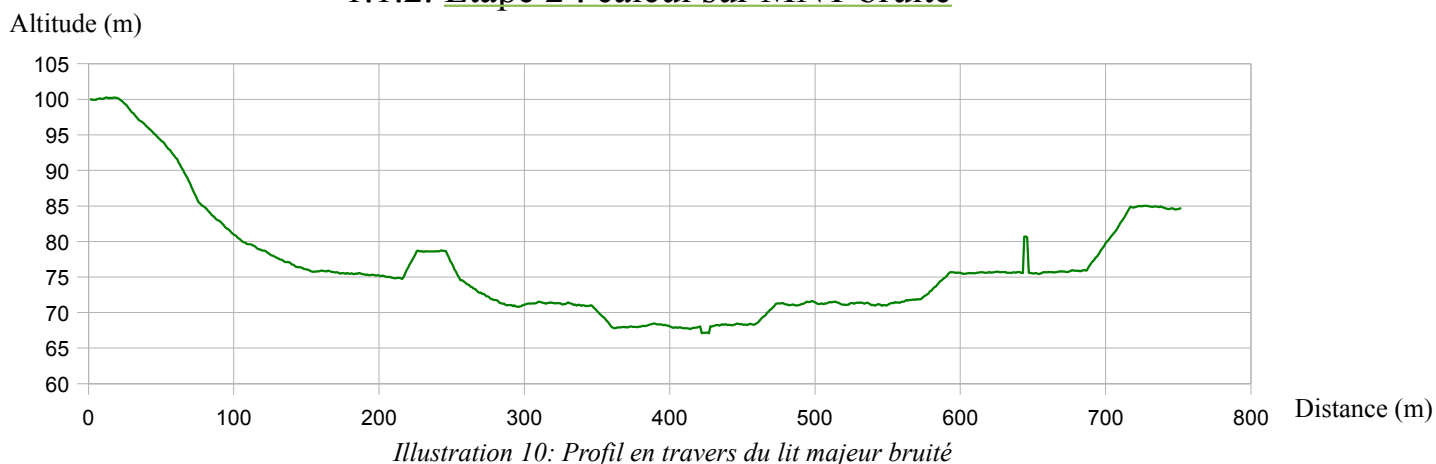
Illustration 9: courbure calculé depuis le profil créé

Nous pouvons remarquer que les courbures calculées en dérivant la pente du terrain correspondent

bien aux points de changement de pente sur le profil.

Cependant, le profil utilisé est trop théorique car en réalité, un terrain naturel n'est jamais régulier mais plutôt bosselé voire accidenté. Pour essayer de faire correspondre le profil sous Calc avec la réalité, du bruit a été rajouté sur les altitudes (*cf. illustration 10*). Par conséquent, le test suivant va consister à trouver une solution pour réduire ce bruit tout en gardant les changements de pente remarquables.

1.1.2. Étape 2 : calcul sur MNT bruité



Sur l'illustration 11, les ruptures de pente très importantes sont encore visibles mais les autres sont « noyées » dans le bruit. Il faut donc mettre en place un filtre permettant de diminuer ce bruit. Le filtre passe-bas permet de le réduire et va tout d'abord être appliqué sur les altitudes. Afin d'étudier l'influence de la taille d'un filtre de ce type sur les résultats, nous avons utilisé un filtre 3x3 et un filtre 9x9.

1.1.3. Étape 3 : Étude de l'application d'un filtre sur le MNT

Tout d'abord, nous allons voir l'influence du filtre sur la MNT. Pour cela, un zoom est effectué afin de mieux remarquer les effets (*cf. illustration 12*). La zone représentée est située au niveau de la digue pour faire apparaître une rupture de pente très forte ainsi qu'une zone relativement plane.

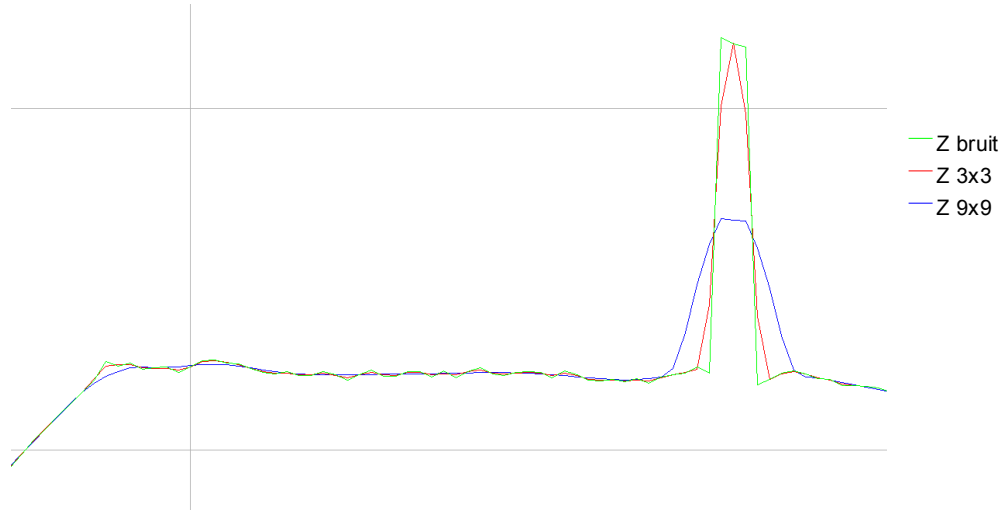


Illustration 12: Influence des filtres sur le MNT

Nous remarquons que sur la zone plane, le bruit est diminué. Concernant la zone de détail, la forme de la digue est adoucie par le filtre mais reste tout de même remarquable par rapport au terrain naturel.

Mais l'application du filtre ne doit pas entraîner une variation de l'altitude du profil trop importante sous peine d'obtenir des résultats trop approximatifs pour des calculs hydrauliques par la suite.

Nous allons quantifier cet écart entre le MNT brut et le MNT filtré par le filtre 9x9, en calculant la moyenne des écarts d'altitude :

$$\text{écart moy} = 7\text{cm}$$

A partir de ces différents MNT, nous calculons à nouveau la courbure.
c: courbure ; nxn: filtre de taille n colonnes et n lignes

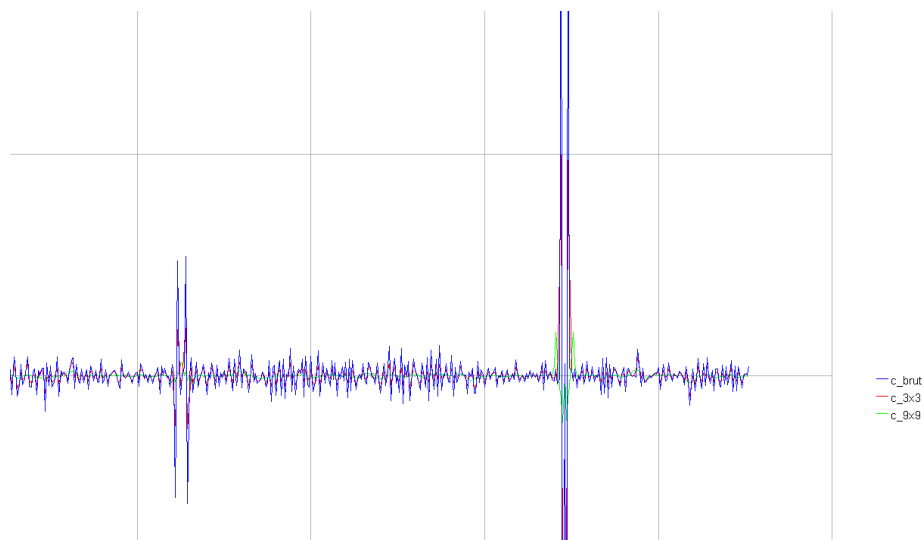


Illustration 13: courbures en fonction de la taille du filtre

L'illustration 13 montre que l'application d'un filtre passe-bas réduit le bruit mais également la tailles des pics correspondant aux ruptures de pente. Le plus important n'est pas la réduction du bruit mais la réduction du rapport signal/bruit. Pour cela, une normalisation des courbes liées aux ruptures de pente va être réalisée pour qu'elles soient à la même « échelle » (cf. illustration 14). La normalisation a été réalisée comme suit :

exemple pour la courbure sur le MNT filtré par le filtre de taille 3x3 :

$$\text{norm } c_{3 \times 3} = c_{(3 \times 3)} * [\text{MAX}(c) / \text{MAX}(c_{3 \times 3})]$$

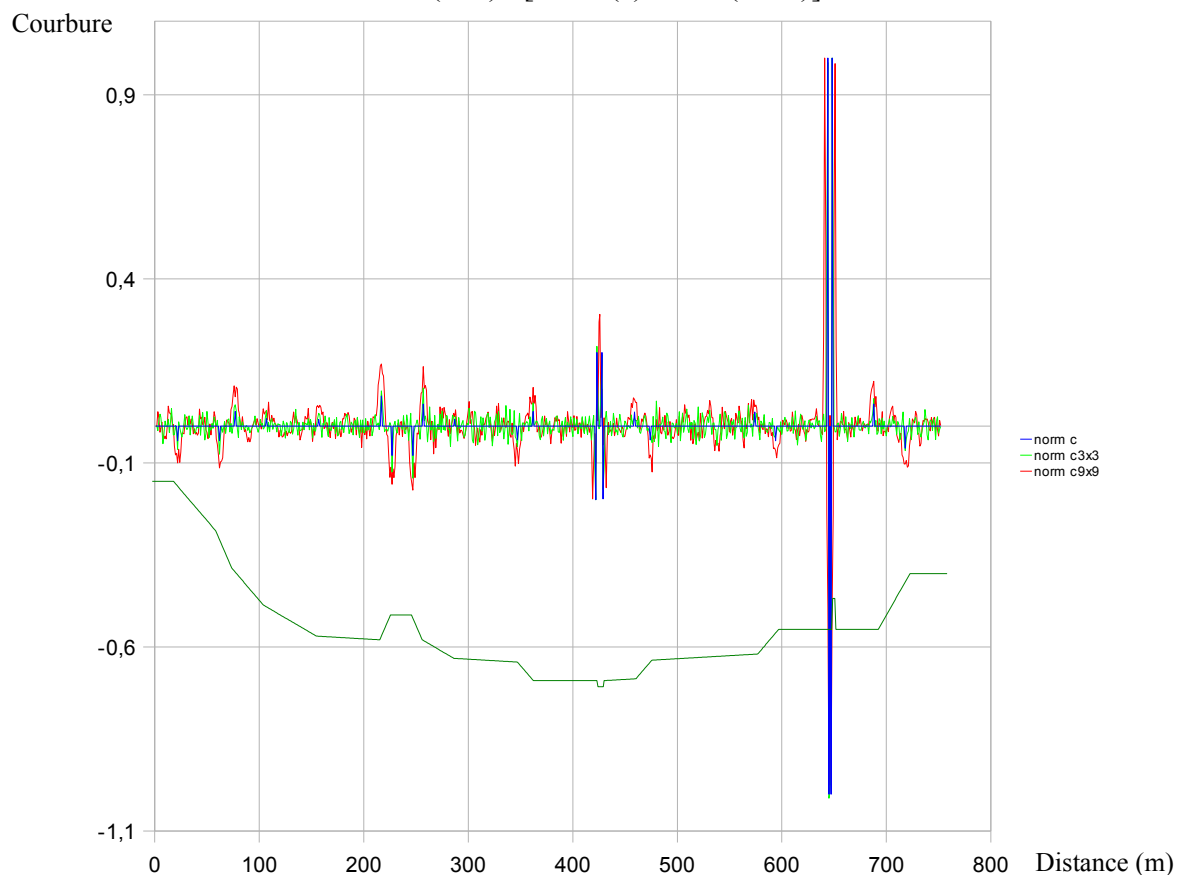


Illustration 14: Comparaison des courbures en fonction de la taille des filtres

Ce graphique montre que le rapport signal/bruit diminue avec l'application du filtre. Les ruptures de pente deviennent plus visibles par rapport aux disparités du terrain.

1.1.4. Transcription sous QGIS-GRASS

Nous allons maintenant appliquer cette méthode à l'aide de QGIS-GRASS. Pour cela, un fichier raster au format ASCII a été créé en dupliquant la colonne des valeurs d'altitude du profil en travers créé sur plusieurs lignes.

Une fois le raster créé, il faut appliquer le filtre passe-bas sur le MNT. Une fonction permet de réaliser des calculs sur un voisinage, appelée « *r.neighbors* ».

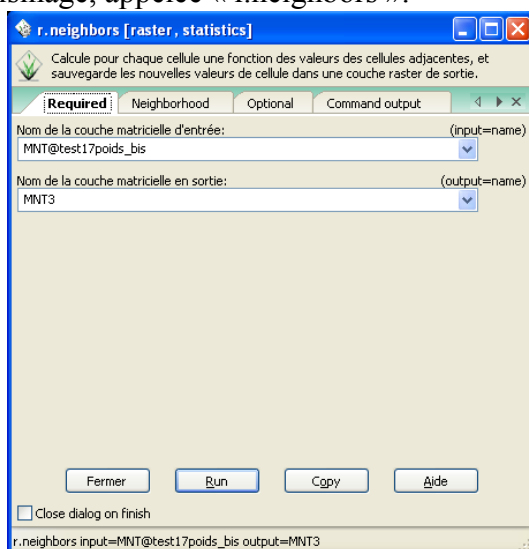


Illustration 15: Interface de lancement de la fonction r.neighbors

Dans cette fenêtre, il faut indiquer le raster à filtrer (MNT) et le nom du fichier résultat (MNT3), puis l'opération à effectuer sur le voisinage (average) et la taille de celui-ci (3, 9 etc...) dans l'onglet « neighborhood » et enfin, dans l'onglet « optional » sélectionner un fichier « .txt » correspondant aux poids à appliquer sur le voisinage. Ce fichier se présente simplement sous la forme suivante (exemple du filtre 3x3) :

```
0 1 0
1 3 1
0 1 0
```

Ensuite, le calcul de courbure va être réalisé. Le logiciel propose un module appelé *r.param.scale* qui permet d'extraire plusieurs paramètres à partir d'un MNT et notamment la courbure (paramètre appelé « longc » dans l'interface). Les principes de calcul de ce module sont basés sur les principes évoqués dans la thèse de Jo Wood (1996). Le paramètre « longc » correspond alors à la courbure du modèle dans le sens de la plus grande pente.

Le calcul est appliqué sur les MNT filtrés et un profil en travers est créé pour observer les résultats (cf. illustrations 16, 17 et 18).

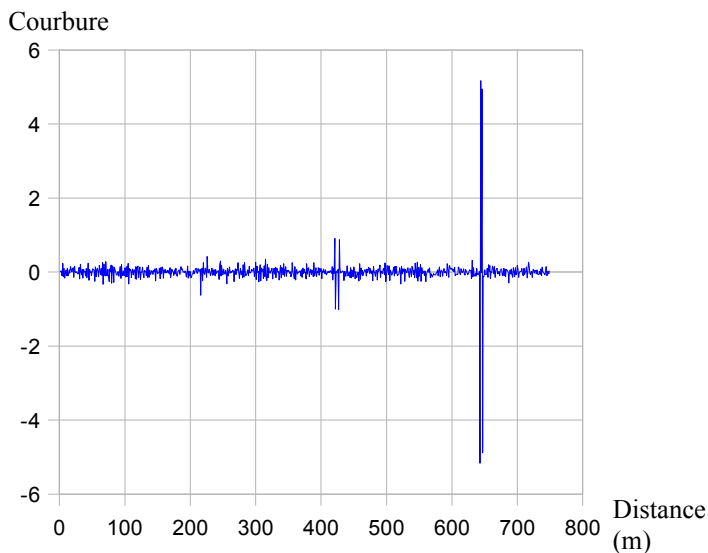


Illustration 16: valeurs de courbure calculées depuis MNT non filtré

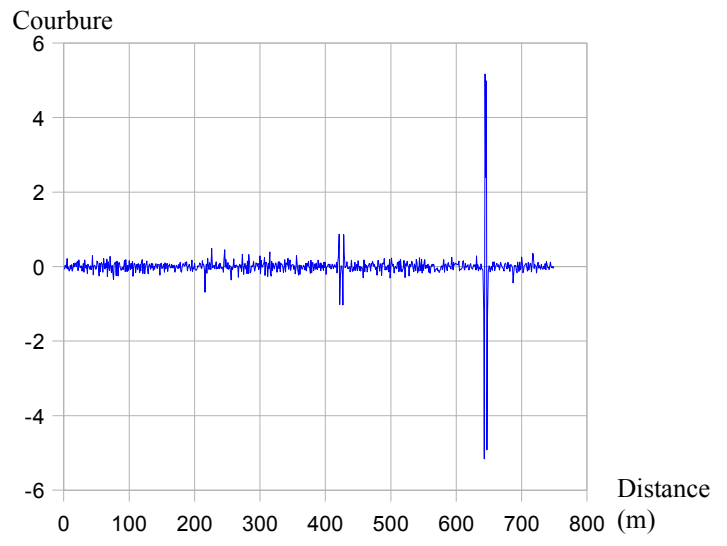


Illustration 17: valeurs de courbure calculées depuis MNT filtré sur un voisinage 3x3

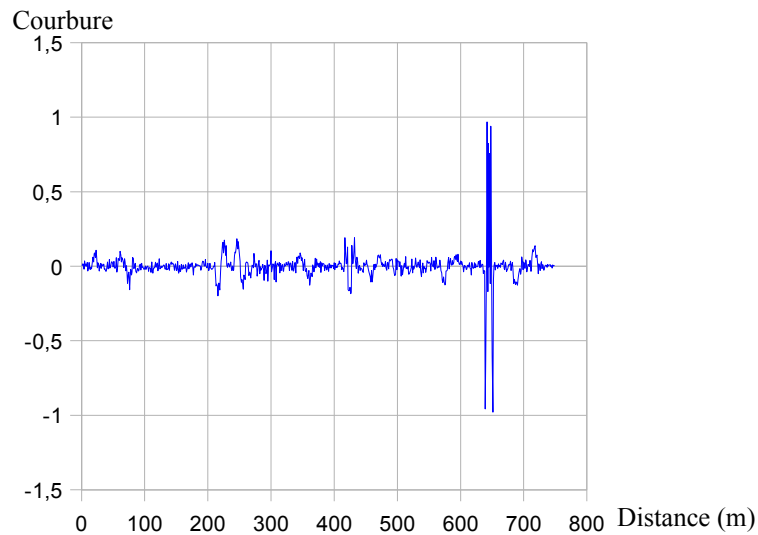


Illustration 18: valeurs de courbure calculées depuis MNT filtré sur un voisinage 11x11

Nous remarquons que plus la taille du filtre est importante, plus les pics correspondant à des ruptures de pente sont remarquables. Tous les détails sont repérés, même les plus fins comme la digue de 1m de large.

1.2. Calcul de la variation de pente

La seconde manière d'obtenir les lignes de rupture de pente, est de calculer la variation de pente entre un point et un autre point situé dans son voisinage. Si la différence de pente entre ces deux points est supérieure à un seuil, nous pouvons considérer que le point central est un point de rupture de pente.

Dans un premier temps, il va donc falloir calculer le raster de pente du MNT. Pour cela, nous allons

utiliser le module vu précédemment qui permet de calculer des paramètres d'un MNT, `r.param.scale`. Nous calculons la pente des MNT filtrés à 3x3 et 11x11. Comme pour la courbure, ce module permet d'obtenir la plus grande valeur de pente en un point.

GRASS propose un outil de calcul permettant d'effectuer des opérations sur des rasters, appelé `r.mapcalc`. Ici, il faut donc parcourir le voisinage d'un point et calculer l'angle correspondant à la différence de pente entre ce point et les points qui l'entourent. Le module `r.mapcalc` ne s'exécute que dans la console shell (*cf illustration 19*). En appliquant ce calcul sur un voisinage 3x3, la ligne de commande à exécuter est la suivante :

```

C:\windows\system32\cmd.exe
Microsoft Windows [version 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. Tous droits réservés.

C:\Program Files (x86)\Quantum GIS Wroclaw>r.mapcalc "rupture_ps3=if(abs(ps3-ps3[-1,-1]>5);abs(ps3-ps3[-1,0]>5);abs(ps3-ps3[-1,1]>5);abs(ps3-ps3[0,1]>5);abs(ps3-ps3[1,1]>5);abs(ps3-ps3[1,0]>5);abs(ps3-ps3[1,-1]>5);abs(ps3-ps3[0,-1]>5);1,0)"
  
```

Illustration 19: ligne de calcul dans la console shell de GRASS

avec : `rupture_ps3` = raster en sortie du calcul

`ps3` = raster de pente calculé avec `r.param.scale` depuis le MNT filtré à 3x3

Cette ligne de commande permet d'affecter la valeur 1 à la cellule dont la différence de pente avec un point de son voisinage est supérieure à 5° et la valeur 0 sinon. Des tests supplémentaires sur la valeur seuil de différence d'angle entre deux points, et la valeur 5° est celle qui permet de bien détecter toutes les ruptures de pente remarquables. Plus la taille du filtre est grande, moins les détails sont détectés, mais un filtre trop bas va laisser apparaître le bruit. Le filtre de taille 3x3 a été retenu au vu des comparaisons réalisées sur le profil en travers (*cf. illustration 20*).

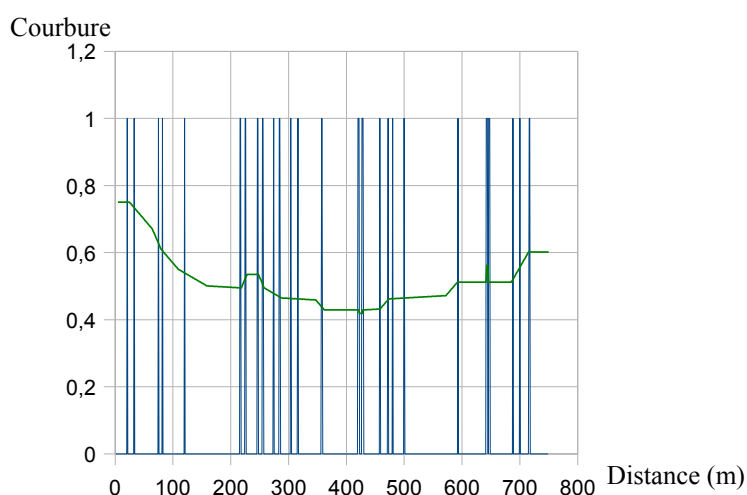


Illustration 20: profil en travers réalisé sur le raster de variations de pente (calculé sur MNT filtré sur voisinage 3x3)

En visualisant le raster en 3D sur l'illustration 21, nous pouvons bien voir les lignes de rupture de pente qui apparaissent sous forme de succession de pics.

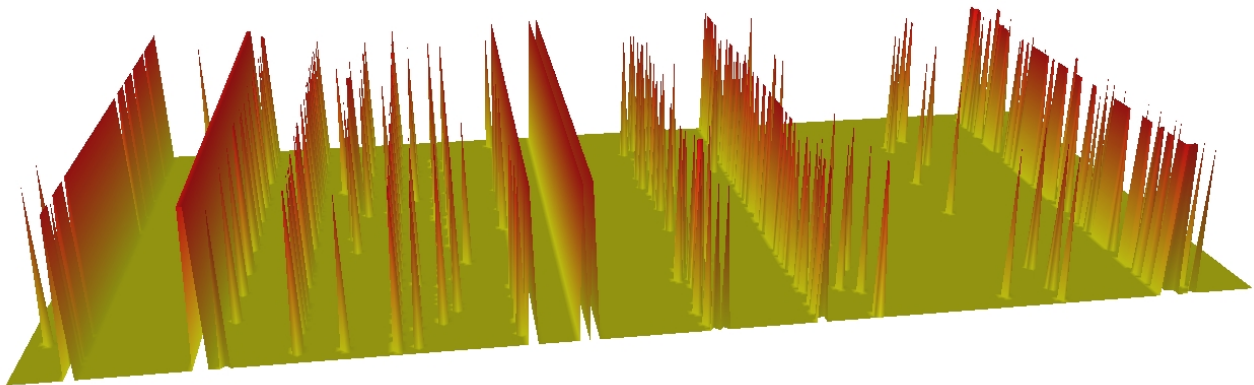


Illustration 21: Visualisation 3D du raster filtré à 3x3 représentant les variations de pente supérieures à 5°

A l'aide du module « r.to.vect » qui permet de vectoriser un raster, nous allons faire apparaître les lignes de rupture de pente :

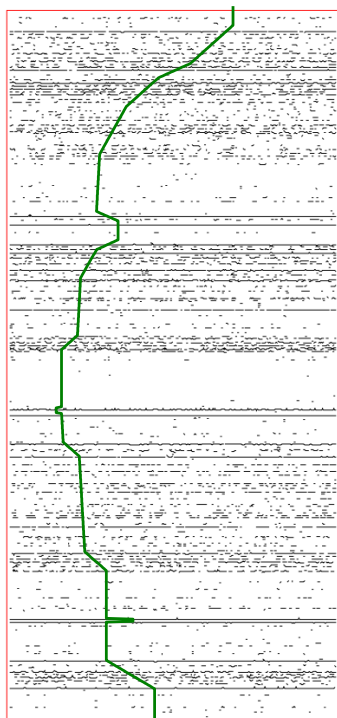


Illustration 22: Variations de pente supérieure à 5° depuis MNT non filtré

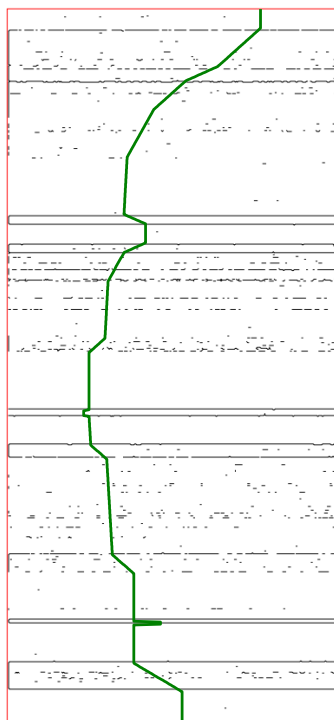


Illustration 23: Variations de pente supérieure à 5° depuis MNT filtré par un filtre 3x3

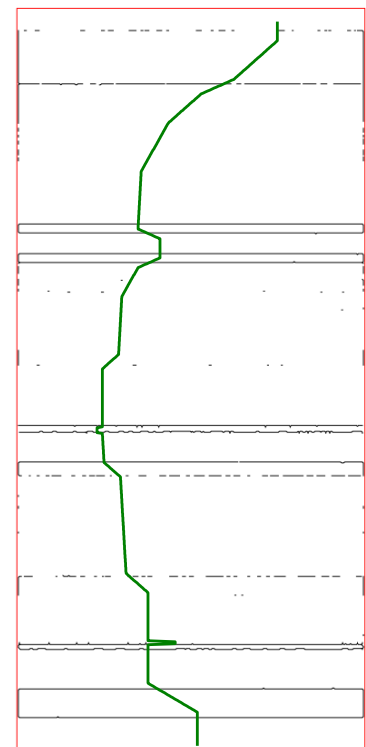


Illustration 24: Variations de pente supérieure à 5° depuis MNT filtré par un filtre 5x5

Sur les illustrations 22, 23 et 24, nous pouvons remarquer que les lignes de rupture de pente apparaissent de manière différente en fonction de la taille du filtre. Si le calcul est réalisé sur le MNT non filtré (cf. illustration 22), les lignes de rupture de pente ne sont pas assez visibles par rapport aux variations dues aux disparités du terrain. En appliquant un filtre de taille 5x5 certaines

ruptures de pente ne sont pas détectées (*cf. illustration 23*). Nous pouvons voir qu'en utilisant le filtre de taille 3x3, la majorité de ces changements de pente sont visibles (*cf. illustration 24*).

1.3. Calcul de l'écart-type

Cette méthode est basée sur le principe de la méthode TPI, utilisée par le logiciel Arcgis. Comme vu précédemment, la méthode TPI étudie la valeur de l'indice à différentes échelles pour connaître la nature d'un point (talweg, crête, point de mi-pente). Dans cette méthode, les échelles prises sont très importantes (plusieurs centaines de mètres). Dans notre cas, nous allons utiliser des échelles plus petites afin de ne pas perdre d'informations lors des calculs.

Sur une série de valeurs, l'écart-type illustre la dispersion des données autour de la moyenne. Plus l'écart-type est faible, plus les valeurs se concentrent autour de la valeur de la moyenne. En revanche, un écart-type important signifiera que la valeur en un point diffère de manière importante.

En calculant l'écart-type en un point entre le raster brut et les rasters filtrés à différentes tailles, nous allons obtenir la dispersion de l'altitude autour de l'altitude moyenne. Plus la taille du filtre est importante, plus les détails vont être « aplatis » et l'écart-type y sera plus important. Donc le principe de cette méthode est de calculer plusieurs écarts-types.

En calculant l'écart-type avec la valeurs d'altitude brutes et celles issues d'un filtrage sur un voisinage 3x3, nous allons obtenir les ruptures de pente des éléments structurant de petites tailles. Idéalement, plus les tailles de filtres augmentent, plus les éléments structurant de plus grandes tailles seront tour à tour détectés avec leur rupture de pente.



Illustration 25: visualisation 3D du raster écart-type

Nous pouvons voir, sur l'illustration 25, que les valeurs d'écart-type élevées correspondent aux points de rupture de pente. Maintenant, l'objectif est de ne garder que les sommets des pics et les cols, ainsi nous obtiendrons toutes les lignes de rupture de pente, c'est-à-dire les crêtes. Mais toutes ces crêtes ne sont pas à garder car certains sont dues au bruit. Il faut donc, au préalable, mettre en place un seuil sur ces valeurs.

En considérant le raster « écart-type » obtenu comme un MNT, nous pouvons assimiler les crêtes comme des points sur lesquels aucun écoulement ne peut s'effectuer.

Pour chaque raster « écart-type » seuillé, la méthode D8 classique est utilisée. Un raster correspondant à la pente entre un point du voisinage (3x3) et le point central dans les 8 directions (nord, nord-est, est, sud-est, sud, sud-ouest, ouest et nord-ouest) est créé. Ce calcul est réalisé avec le module `r.mapcalc` ce qui donne, pour le raster « écart-type » calculé depuis le MNT filtré à (3x3) les lignes de codes suivantes :

```
r.mapcalc "pente3NN=(stdev3_seuil-stdev3_seuil[-1,0])"
r.mapcalc "pente3NE=(stdev3_seuil-stdev3_seuil[-1,1])/sqrt(2)"
r.mapcalc "pente3EE=(stdev3_seuil-stdev3_seuil[0,1])"
r.mapcalc "pente3SE=(stdev3_seuil-stdev3_seuil[1,1])/sqrt(2)"
r.mapcalc "pente3SS=(stdev3_seuil-stdev3_seuil[1,0])"
r.mapcalc "pente3SW=(stdev3_seuil-stdev3_seuil[1,-1])/sqrt(2)"
r.mapcalc "pente3WW=(stdev3_seuil-stdev3_seuil[0,-1])"
r.mapcalc "pente3NW=(stdev3_seuil-stdev3_seuil[-1,-1])/sqrt(2)"
```

Maintenant, il faut connaître la direction suivant laquelle la pente est la plus forte. Il faut donc calculer la valeur maximale parmi les valeurs obtenues avec la formule ci-dessus :

```
r.mapcalc "pente3_max=max(pente3NN,pente3NE,pente3EE,pente3SE,pente3SS,
pente3SW, pente3WW, pente3NW)"
```

Ensuite, les valeurs vont être classées dans deux catégories. La valeur 1 va être affectée au point du voisinage vers lequel l'écoulement s'effectue et la valeur 0 aux autres points. Mais il faut faire attention aux points correspondants à des fonds de « cuvette ». En effet, si un point se situe dans un trou, toutes les pentes en direction de ce point seront négatives. Il ne faut garder que les pentes maximales positives. Les lignes de codes correspondantes à ce calcul sont les suivantes :

```
r.mapcalc "dir3_NN=if(pente3NN==pente3_min&& pente3_max>0,1,0)"
r.mapcalc "dir3_NE=if(pente3NE==pente3_min&& pente3_max>0,1,0)"
r.mapcalc "dir3_EE=if(pente3EE==pente3_min&& pente3_max>0,1,0)"
r.mapcalc "dir3_SE=if(pente3SE==pente3_min&& pente3_max>0,1,0)"
r.mapcalc "dir3_SS=if(pente3SS==pente3_min&& pente3_max>0,1,0)"
r.mapcalc "dir3_SW=if(pente3SW==pente3_min&& pente3_max>0,1,0)"
r.mapcalc "dir3_WW=if(pente3WW==pente3_min&& pente3_max>0,1,0)"
r.mapcalc "dir3_NW=if(pente3NW==pente3_min&& pente3_max>0,1,0)"
```

Désormais, sont disponibles huit matrices de direction dans lesquelles les pixels qui ont la valeur 1 correspondent à des points où l'eau s'écoule. Huit matrices d'écoulement sont créées et vont permettre d'affecter cette valeur 1 au pixel en amont du pixel où l'eau s'écoule.

```
r.mapcalc "ec3_NN=dir3_NN[-1,0]"
r.mapcalc "ec3_NE=dir3_NE[-1,1]"
r.mapcalc "ec3_EE=dir3_EE[0,1]"
r.mapcalc "ec3_SE=dir3_SE[1,1]"
r.mapcalc "ec3_SS=dir3_SS[1,0]"
r.mapcalc "ec3_SW=dir3_SW[1,-1]"
r.mapcalc "ec3_WW=dir3_WW[0,-1]"
r.mapcalc "ec3_NW=dir3_NW[-1,-1]"
```

En créant une nouvelle matrice résultant du maximum de ces 8 matrices, un raster est créé où les pixels ayant une valeur différente de 0 sont des points sur lesquels l'eau s'écoule, donc des points bas. En inversant cette matrice, les points correspondant aux sommets des pics symbolisant les ruptures de pente apparaissent.

Le processus de calcul est schématisé ci-dessus

2	4	6	7	10
1	3	5	10	8
7	8	10	5	4
10	10	7	2	1
8	5	4	3	2

Illustration 26: grille

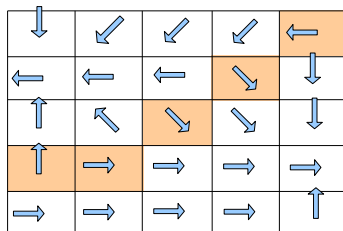


Illustration 27: directions d'écoulement

0	0	0	0	1
0	0	0	1	0
0	0	1	0	0
1	1	0	0	0
0	0	0	0	0

Illustration 28: points d'écoulement nul

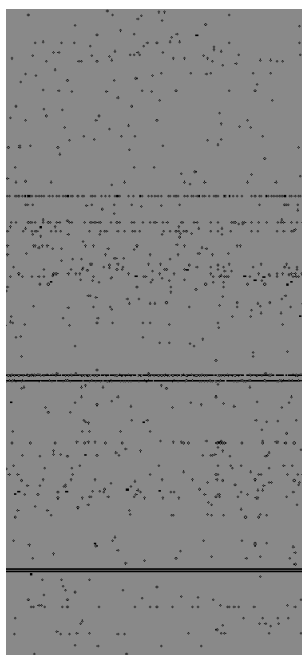


Illustration 29: raster de non écoulement (calculé à partir de l'écart-type entre MNT brut et MNT filtré sur 3x3)

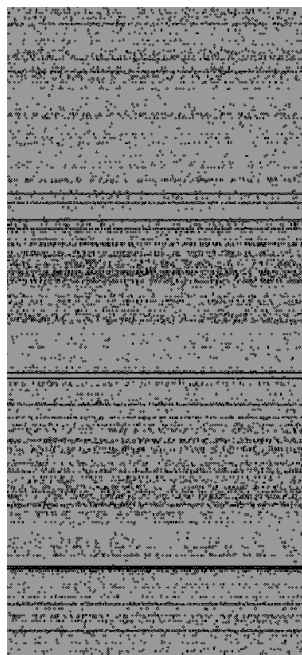


Illustration 30: raster de non écoulement (calculé à partir de l'écart-type entre MNT brut et MNT filtrés sur 3x3, 5x5 et 7x7)

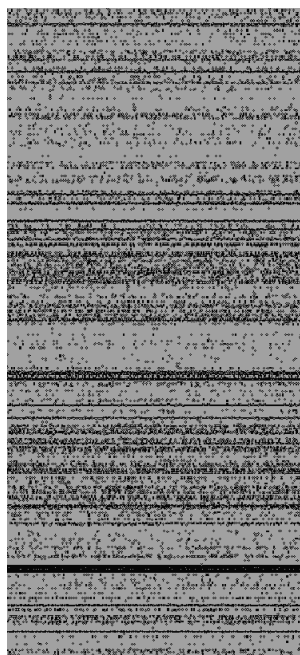


Illustration 31: raster de non écoulement (calculé à partir de l'écart-type entre MNT brut et MNT filtrés sur voisinage de 3, 5, 7, 9 et 11)

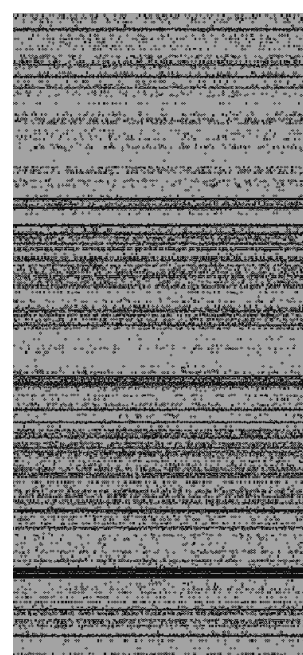


Illustration 32: raster de non écoulement (calculé à partir de l'écart-type entre MNT brut et MNT filtrés sur voisinage de 3, 5, 7, 9, 11, 13 et 15)

Nous pouvons voir que les lignes de rupture de pente sont repérées au fur et à mesure de l'augmentation de la taille du filtre. En effet le raster « rupture3 » (cf. illustration 29) détecte de manière très distincte la digue qui est très étroite (2m) et détecte l'étiage. Le raster « rupture7 » (cf. illustration 30) fait apparaître de manière plus précise l'étiage et d'autres lignes de rupture sont détectées mais très légèrement. Ces dernières sont alors affinées sur le raster « rupture11 » (cf. illustration 31) alors que la digue est plus difficilement remarquable. Ce phénomène se répète avec les autres rasters, c'est-à-dire que le raster suivant, issu d'un filtrage plus large, va détecter des ruptures de pente non détectées auparavant mais va dégrader celles déjà détectées. Il faudrait alors trouver une solution pour garder, pour chaque raster, uniquement les ruptures de pentes qui apparaissent de manière très nette.

2. Méthodes mises en place à partir d'une dalle LiDAR

Maintenant que les tests ont été analysés et que l'on connaît le fonctionnement des différents modules utilisés, nous allons les appliquer sur une dalle LiDAR afin de juger de la pertinence des méthodes sur un support réel.



Illustration 33: Photo aérienne de la zone test

La dalle que nous allons utiliser représente une superficie de 1km². Elle est issue d'une campagne de levés du département du Var suite aux inondations de juin 2010. Elle représente une zone non loin de la commune du Muy (*cf. illustration 33*). La densité de la dalle est de 1pt/m².

Dans ce chapitre, tous les tests sont donc réalisés à l'aide du logiciel QGIS-GRASS et à partir d'un fichier ASCII issu d'un levé aéroporté. Cette partie consiste à rééditer les méthodes vues dans la partie précédente.

2.1. Calcul de courbure

Le calcul de courbure est appliqué avec la fonction `r.param.scale` sur le raster représentant le MNT ce qui permet d'obtenir les rasters suivants :



Illustration 34: courbure sur MNT brut



Illustration 35: courbure sur MNT filtré (3x3)

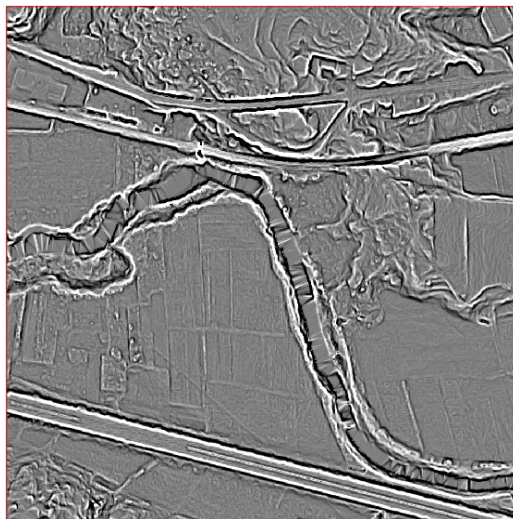


Illustration 36: courbure sur MNT filtré (11x11)

En comparant ces trois raster de courbure, nous pouvons voir que les lignes de rupture correspondant aux limites du lit mineur (berges du cours d'eau), du lit moyen ainsi que celles du lit majeur (bas de colline au sud ouest du raster) apparaissent de plus en plus avec l'augmentation de la taille du filtre. De plus, en augmentant la taille du filtre, nous remarquons que les courbures dues aux disparités du terrain sur la plaine alluviale disparaissent également.

2.2. Calcul de la variation de pente

En appliquant la ligne de commande vue précédemment pour obtenir les points de rupture de pente en calculant la variation de pente entre le point central et les points de son voisinage, nous obtenons les rasters suivants :

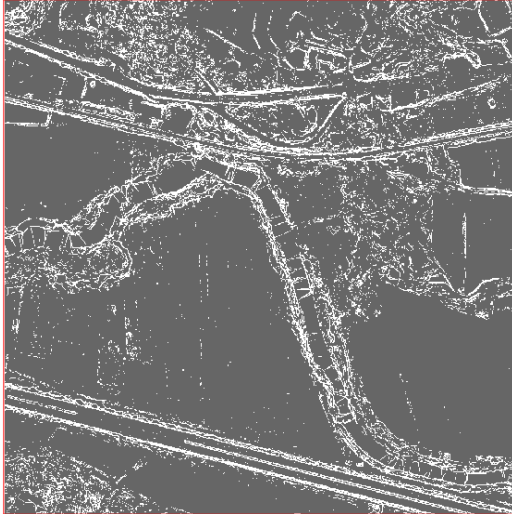


Illustration 37: variations de pente supérieures à 5° depuis MNT non filtré

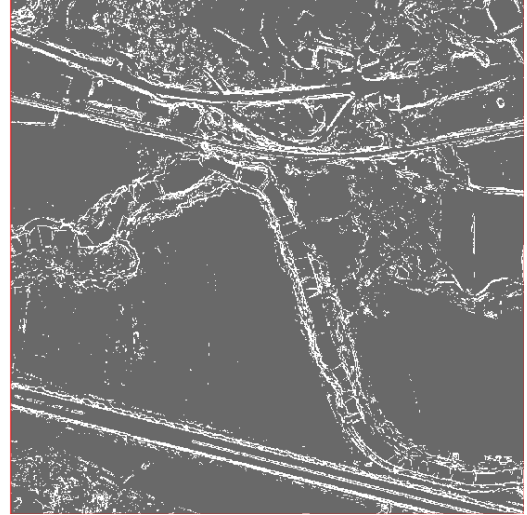


Illustration 38: variations de pente supérieures à 5° depuis MNT filtré sur un voisinage 3x3

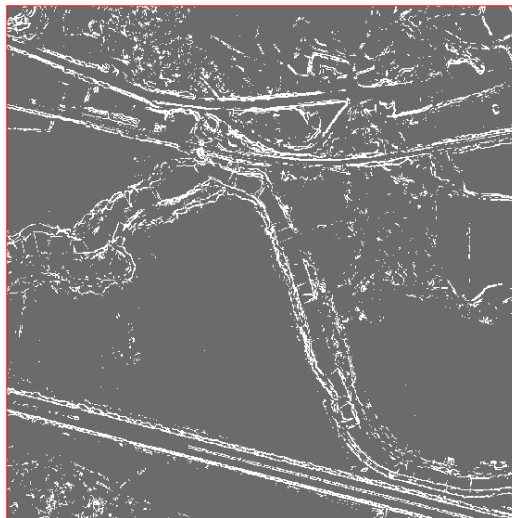


Illustration 39: variations de pente supérieures à 5° depuis MNT filtré sur un voisinage 7x7

Nous remarquons que les lignes de rupture de pente apparaissent plus nettement lorsque le MNT de base est filtré. Les disparités sur la plaine alluviale disparaissent également.

2.3. Calcul de l'écart-type

Nous appliquons au MNT la même méthode vue précédemment. En visualisant en 3D le raster écart-type (cf. *illustration 40*), nous remarquons que les rangées de pics définissent bien les limites géomorphologiques.

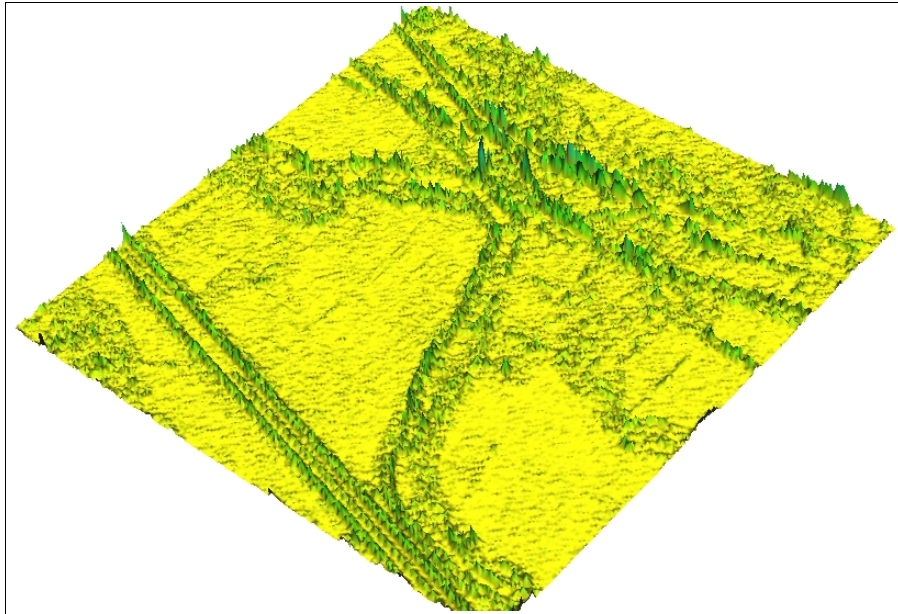


Illustration 40: Raster "écart-type"

3. Conclusion

A travers cette série de tests, nous avons pu voir que l'application d'un filtre passe-bas permet de réduire les disparités du terrain naturel sur les zones planes tout en gardant les zones de détails et les ruptures de pente importantes. Visuellement, les méthodes exposées présentent des résultats satisfaisants.

Maintenant, nous allons analyser ces méthodes, leur compatibilité avec l'hydrogéomorphologie ou la modélisation hydraulique et leur validité.

Partie III : Résultats

Cette troisième et dernière partie, permet d'exposer et d'analyser les résultats pour savoir quelles méthodes peuvent être utiles à une étude hydrogéomorphologique et quelles sont celles compatibles à une modélisation hydraulique en fonction des exigences de ces deux méthodes d'analyse de cours d'eau.

Afin de pouvoir comparer et juger de la qualité des méthodes vues précédemment, les zones choisies sont des zones sur lesquelles une étude hydrogéomorphologique ou une modélisation hydraulique a déjà été réalisée.

1. Compatibilité et validité des méthodes pour l'étude hydrogéomorphologique

La zone utilisée pour juger de la compatibilité des méthodes est une zone de 4km² située sur la commune du Muy, au sud-est de Draguignan dans le Var. Une étude hydrogéomorphologique a été réalisée par la DREAL PACA à partir de laquelle les comparaisons des limites des unités géomorphologiques vont être faites. Les images ayant servi à cette étude sont des ortho-images au 1/25000. Cette notion d'échelle est importante concernant la précision des limites.

1.1. Calcul de la courbure

En réalisant le calcul de courbure, nous obtenons la courbure maximale en un point du raster. Sur les illustrations 41 et 42, je superpose les limites géomorphologiques obtenues par la DREAL (jaune, bleu clair et bleu foncé) :

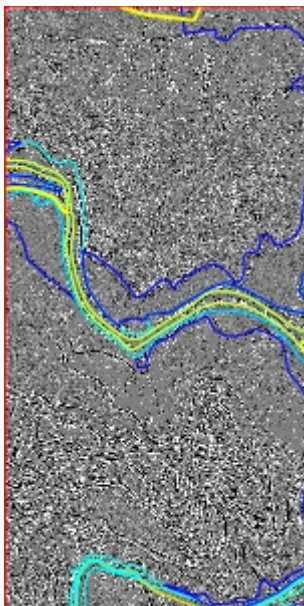


Illustration 41: courbures calculées à partir du MNT non filtré (extrait au 1/25000)

*Jaune : lit mineur
Bleu clair : lit moyen
Bleu foncé : lit majeur*

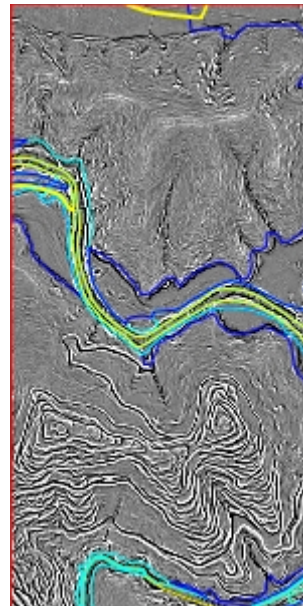


Illustration 42: courbures calculées à partir du MNT filtré sur un voisinage 11x11 (extrait au 1/25000)

A l'échelle du 1/25000, les limites des unités géomorphologiques obtenues par la DREAL correspondent aux lignes noires du raster « courbure » synonymes de courbures importantes. Mais lorsque l'échelle se réduit, certaines différences vont apparaître :

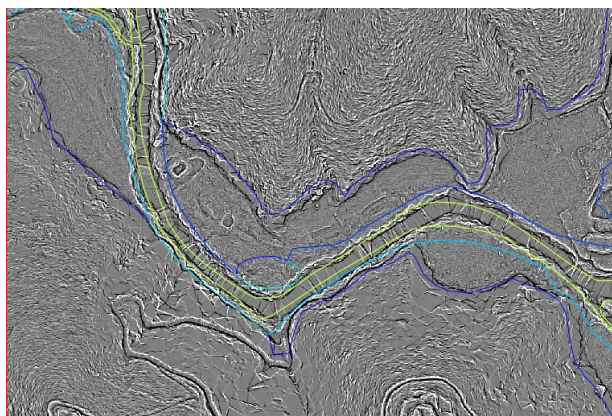


Illustration 43: illustration 41 au 1/5000

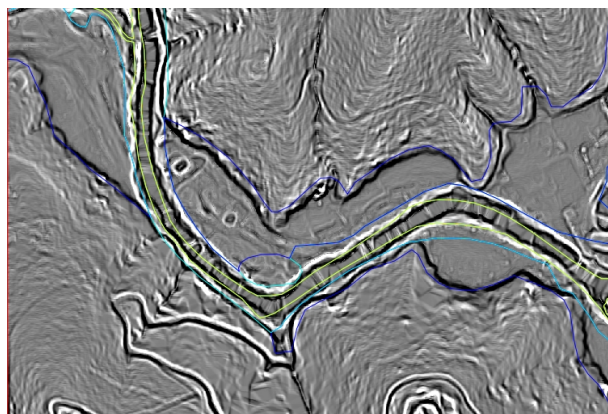


Illustration 44: illustration 42 au 1/5000

Nous remarquons que l'augmentation de la taille du filtre réduit l'apparition des détails, et permet d'obtenir des limites plus « grossières » (cf. illustration 44). Le choix du raster final se fera en fonction de la volonté de l'utilisateur de faire apparaître les ruptures de pente avec plus ou moins de finesse. Par exemple, sur l'illustration 44, l'épaisseur des traits représentant les limites des différents lits du cours d'eau correspond à une distance terrain de 5m. Sachant que la précision planimétrique de la détection de rupture de pente en étude hydrogéomorphologique est de l'ordre de plusieurs mètres, le résultat est satisfaisant.

De plus, à cette échelle, les limites ne sont plus confondues comme précédemment, à l'échelle du 1/25000. Pour savoir quel est le résultat se rapprochant le plus de la réalité terrain une superposition des limites géomorphologiques de la DREAL sur l'ortho-image est réalisée (cf. illustration 45).

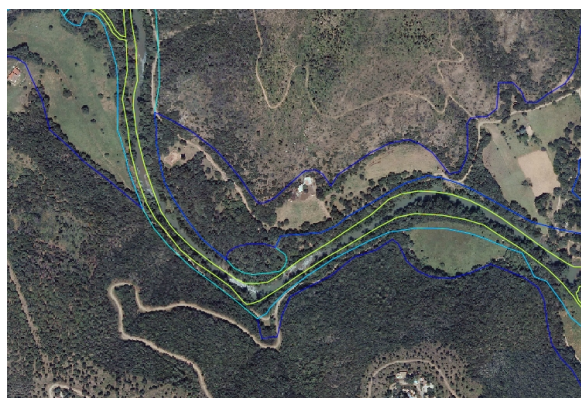


Illustration 45: superposition des limites géomorphologiques sur l'ortho-image

Nous remarquons que les limites réelles sur l'ortho-image sont décalées par rapport aux limites géomorphologiques de la DREAL. Ce décalage est le même que celui entre le travail de la DREAL et les résultats obtenus par la méthode de calcul de courbure mise en place.

Pour cette méthode, la vectorisation du raster ne donne pas un résultat satisfaisant. Un traitement supplémentaire au niveau vectoriel sera nécessaire pour obtenir des polygones nettes.

1.2. Calcul de la variation de pente

En appliquant la méthode de calcul de variation de pente, seules les ruptures de pente supérieures à 5° sont gardées. Le résultat est le suivant :

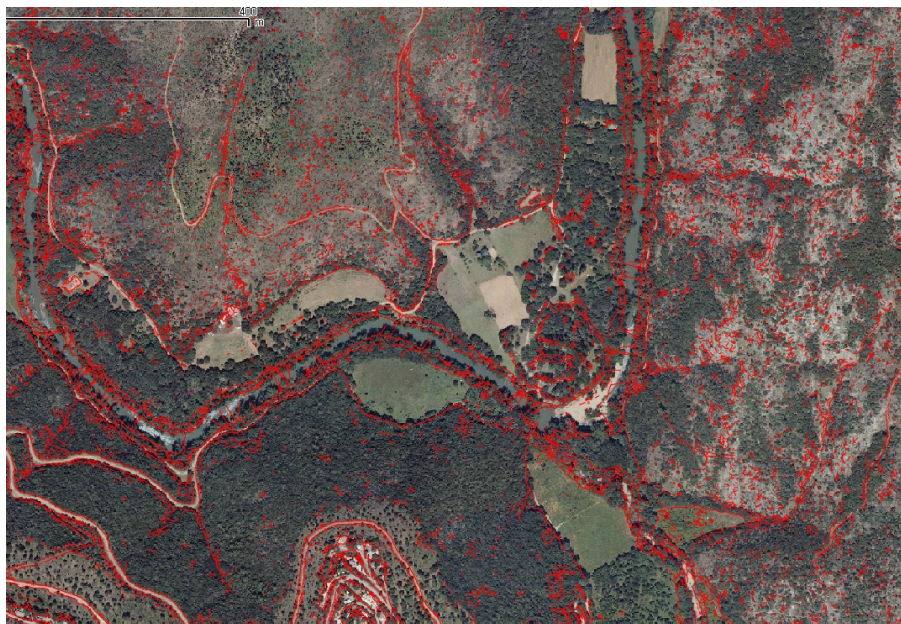


Illustration 46: superposition des vecteurs de rupture de pente ($>5^\circ$) sur l'ortho-image (à partir du MNT filtré sur un voisinage 7x7)

Nous pouvons voir que les berges du cours d'eau correspondant aux limites du lit mineur sont bien détectées. Malgré une vectorisation laissant apparaître quelques segments isolés, les limites du lit moyen, correspondant à une fine bande parallèle au lit mineur, sont visibles ainsi que le lit majeur (cf. illustration 46).

En réalisant un zoom sur une partie de la zone, nous pouvons voir les limites des trois unités géomorphologiques.



Illustration 47: variation de pente supérieure à 5° calculée sur MNT filtré (7x7)

La comparaison est donc réalisée avec les limites issues de l'étude hydrogéomorphologique (cf. *illustration 48*).

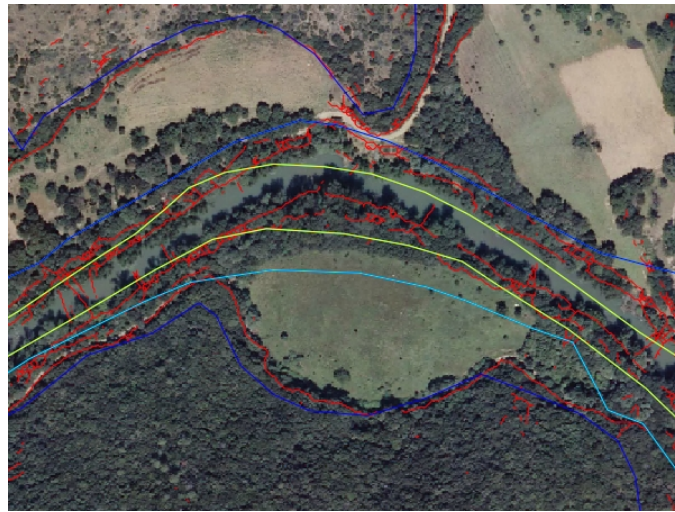


Illustration 48: superposition des résultats obtenus avec les résultats de la méthode classique

Nous pouvons voir que les limites issues de la méthode actuelle (jaune, bleu clair et bleu foncé) sont également en léger décalage par rapport aux limites réelles du cours d'eau. Les lignes de rupture de pente obtenues avec cette méthode sont plus précises et définissent mieux la topographie du terrain, surtout à une échelle plus restreinte.

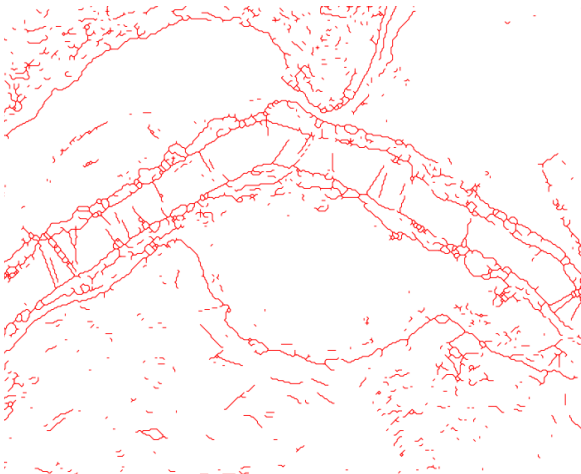


Illustration 49: variation de pente calculée depuis MNT filtré sur un voisinage 3x3

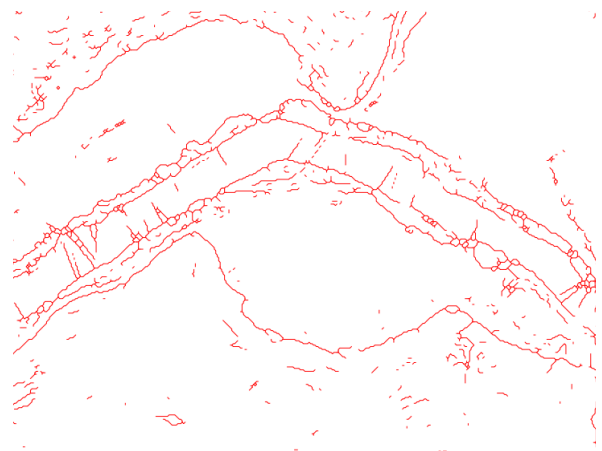


Illustration 50: variation de pente calculée depuis MNT filtré sur un voisinage 5x5

En fonction de la taille de filtre utilisée, certaines informations apparaissent sans être des limites d'unités hydrogéomorphologiques. Le filtrage par filtre de taille 7x7 (cf. *illustrations 46 et 47*) est le plus approprié car il supprime suffisamment de bruit et de ruptures de pente isolées sans perdre de l'information sur les lignes de rupture de pente importantes.

1.3. Calcul de l'écart-type

En combinant le calcul de l'écart-type puis celui des points de non-écoulement, nous obtenons le résultat suivant :

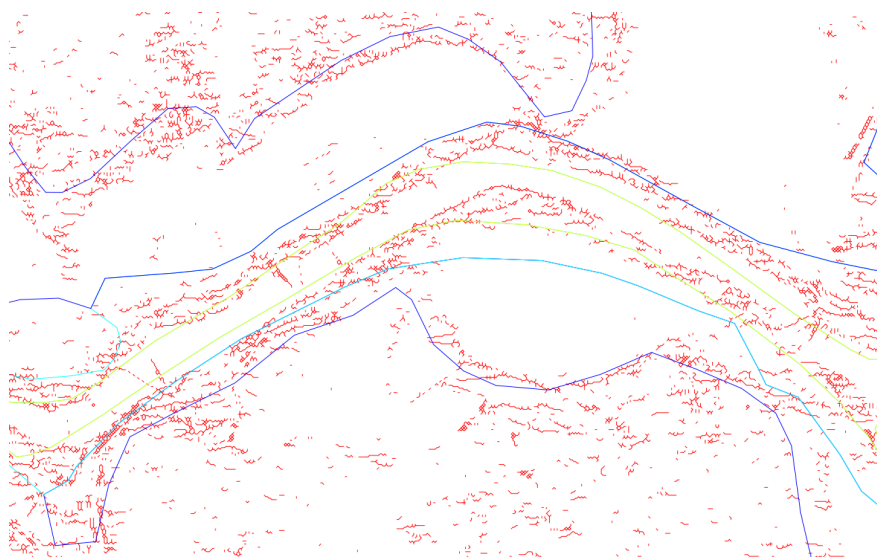


Illustration 51: vectorisation des points de non-écoulement suite au calcul de l'écart-type

Dans ce cas, nous voyons que la vectorisation ne permet pas d'obtenir un résultat satisfaisant car les vecteurs obtenus ne traduisent pas de lignes significatives. Le problème ne vient pas de la méthode de calcul mais de la manière de vectoriser. En effet, en étudiant le raster écart-type (cf. illustration 52), dont le résultat est une succession de crêtes le long des ruptures de pente, fait apparaître des lignes correspondantes aux limites des différents lits du cours d'eau, mais la détection de ces pics n'est pas significative.

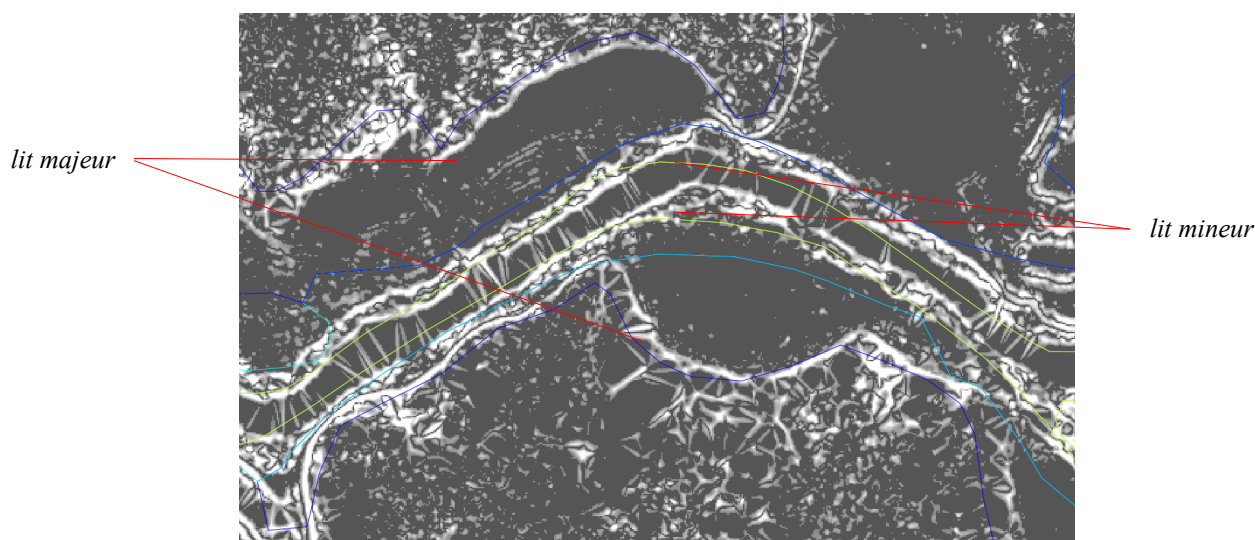


Illustration 52: raster "écart-type" calculé sur MNT filtré par un filtre 11x11

Ici, sur le raster « écart-type » nous pouvons voir que les lignes blanches traduisent bien les limites des unités géomorphologiques du cours d'eau (cf. illustration 52). Nous pouvons noter également le décalage entre les limites obtenues avec la méthode actuelle et ces limites.

Le problème de vectorisation peut être dû au calcul des points de non écoulement. En effet, lorsque l'algorithme recherche les points du raster « écart-type » sur lesquels aucun écoulement ne s'effectue (cf. illustration 53), les lignes de crêtes ne sont pas nettes et continues même si elles décrivent les limites géomorphologiques :

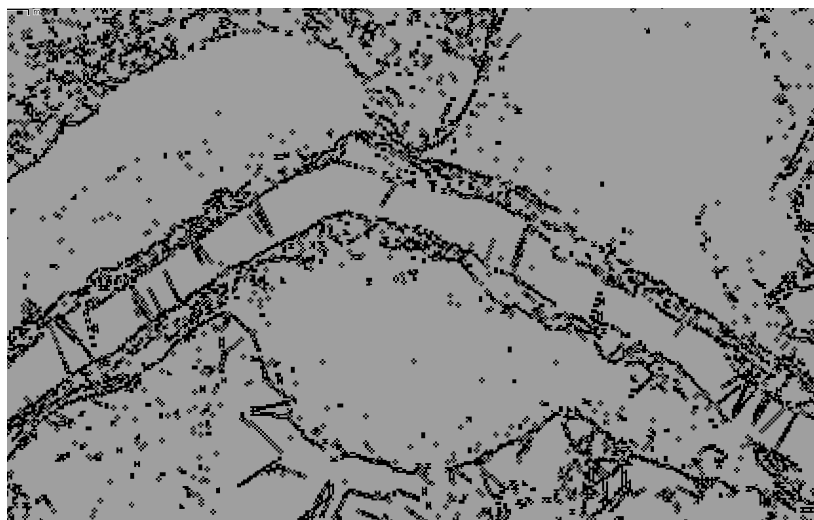


Illustration 53: raster représentant les points d'écoulement nul

2. Compatibilité et validité des méthodes pour la modélisation hydraulique

Pour juger de la compatibilité des méthodes pour une modélisation hydraulique, nous allons comparer des profils en travers le long d'un cours d'eau. En effet, les profils en travers sont majoritairement utilisés dans les logiciels de modélisation et leur précision est très influente sur les résultats des calculs. Dans cette partie, seules les méthodes basées sur le calcul de variation de pente et d'écart-type seront étudiées car pour la méthode de calcul de la courbure, il a été difficile de trouver une solution pour extraire les valeurs maximales qui déterminaient les ruptures de pente.

Des profils en travers ont été réalisés par un cabinet de Géomètre-Expert le long du Vistre, fleuve situé sur le département du Gard (cf. illustration 54). Le principe est d'obtenir un profil en travers depuis les rasters résultats des méthodes mises en place et de le comparer avec le profil du géomètre.

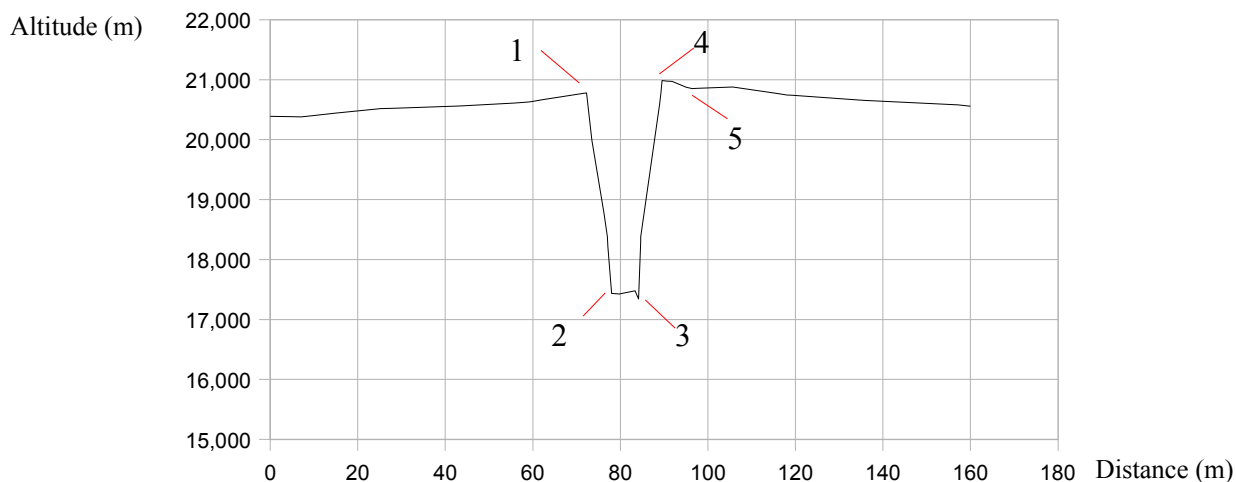


Illustration 54: profil en travers du Vistre réalisé par le Géomètre

Sur ce profil en travers se trouvent cinq points de rupture de pente dont nous allons analyser les résultats au niveau altimétrique. Dans l'analyse des résultats pour l'hydrogéomorphologie, nous avons jugé les méthodes sur la précision planimétrique des lignes de rupture. Dans les différents tests qui vont suivre, l'analyse se fera donc à partir des rasters ayant donné satisfaction en terme de planimétrie.

2.1. Calcul de la variation de pente

L'algorithme permettant de calculer la variation de pente affecte la valeur 1 aux points sur lesquels la variation de pente est supérieure à 5° . En leur affectant la valeur de l'élévation du MNT, nous allons pouvoir apprécier la différence d'altitude entre les points du profil du géomètre et ceux issus de la méthode (cf. illustration 55).

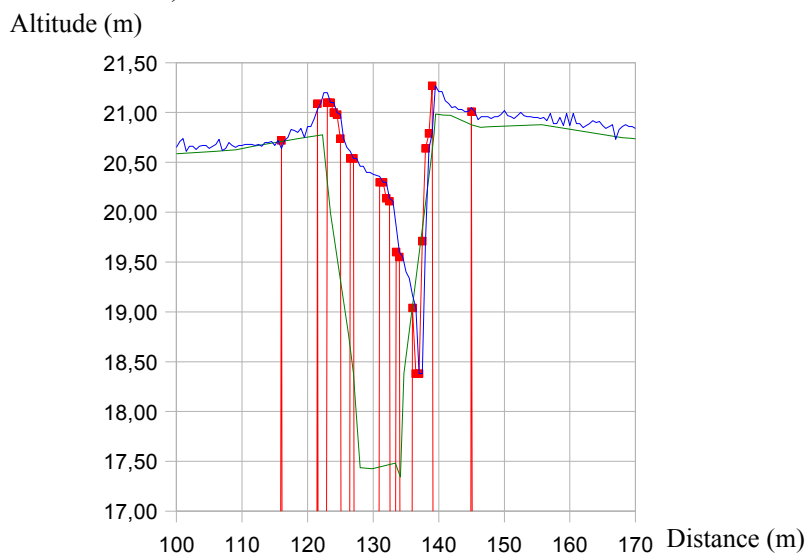


Illustration 55: variation de pente supérieure à 5° depuis le MNT non filtré

Sur ce profil apparaissent en vert le terrain naturel levé par le géomètre et en bleu le MNT issu du levé LiDAR. Les carrés rouges symbolisent les pics correspondant aux variations de pente supérieures à 5°.

Tout d'abord, il faut remarquer que les deux profils ne sont pas identiques. Cette différence est due d'une part à la précision des points LiDAR qui est de l'ordre de 50cm en planimétrie et 20cm en altimétrie. De plus, le levé du géomètre décrit précisément le terrain naturel du lit mineur alors que le fond du lit mineur est mal détecté par le LiDAR. De ce fait, les points 2 et 3 ne peuvent pas être comparés.

Cependant, les points de rupture 1 et 4 définissent bien les limites de berge correspondant au lit mineur. L'altitude du point 1 est de 21,10 m et celle du point 4 est de 21,27 m. D'après le profil réalisé par le géomètre, l'altitude de ces points est respectivement de 20,78 m et 20,99 m. L'écart altimétrique est de 32 cm sur le point 1 et 2 cm sur le point 4. Concernant la planimétrie, la différence de position le long du profil est de 1,22 m pour le point 1 et 0,54 m pour le point 4. Quant au point 5, l'écart en planimétrie est de 1,4 m et 0,42 m en altimétrie. Ces écarts sont raisonnables pour la modélisation hydraulique.

Dans l'analyse des résultats pour l'hydrogéomorphologie, nous avons vu que le filtre de taille 7x7 donne les meilleurs résultats. Nous allons donc analyser les résultats avec ces paramètres de calcul (*cf. illustration 56*).

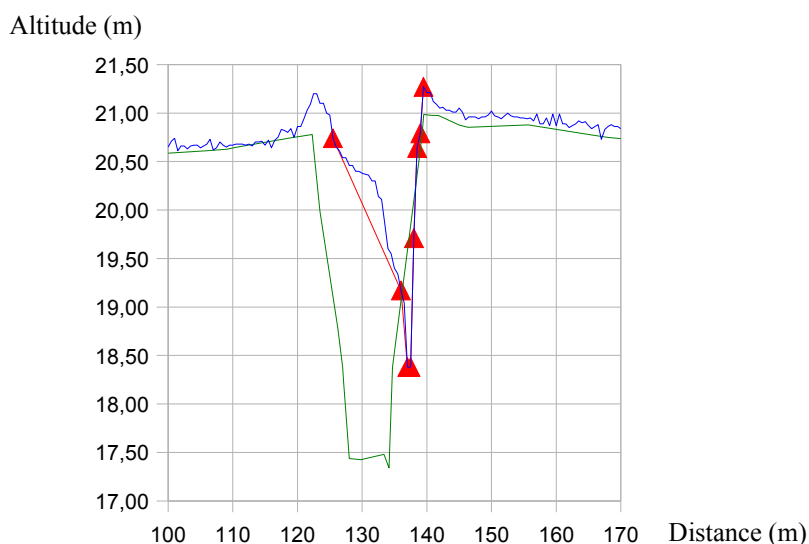


Illustration 56: variation de pente supérieure à 5° depuis le MNT filtré sur un voisinage 7x7

Ici, nous remarquons que le point 5 n'est plus détecté car le filtre a adouci la pente sur cette zone. Mais les limites de la berge sont définies. Pour le point 1, il y a un écart de 3,2 m en planimétrie et 4 cm en altimétrie. Le point 4 présente des écarts de 4 cm en planimétrie et 28 cm en altimétrie.

2.2. Calcul de l'écart-type

Maintenant, nous allons étudier la position des points de limites de berge après calcul de l'écart-type. Lors de l'analyse hydrogéomorphologique, nous avons vu que la taille du filtre influe sur la précision de la position des lignes de rupture de pente tout en ayant des résultats satisfaisants. Nous allons donc étudier les résultats du calcul des écart-types réalisés à partir des MNT filtrés sur différents voisinage.

Altitude (m)

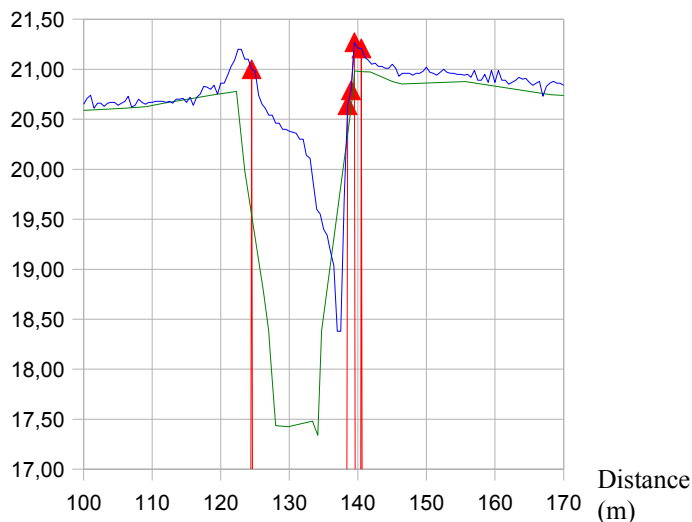


Illustration 57: ruptures de pente calculées depuis MNT filtré sur un voisinage 5x5

Altitude (m)

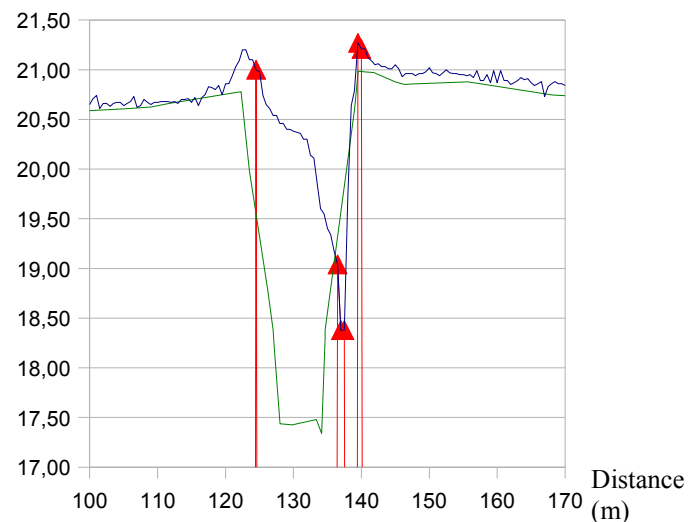


Illustration 58: ruptures de pente calculées depuis MNT filtré sur un voisinage 11x11

Altitude (m)

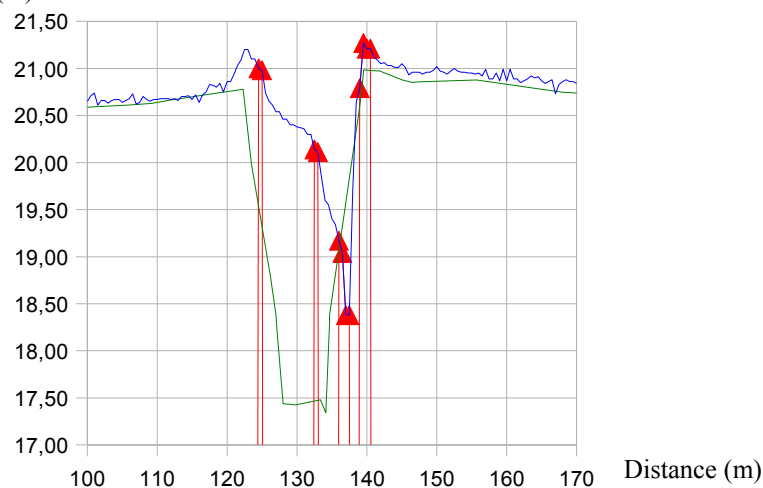


Illustration 59: ruptures de pente calculées depuis MNT filtré sur un voisinage 15x15

Sur ces différents profils, la différence en planimétrie des limites de berge est d'environ 2 m pour le point 1 et de 4 cm pour le point 4. Au niveau des altitudes, la différence entre les altitudes obtenues par le géomètre et celles obtenues après application de la méthode est de 22 cm pour le point 1 et de 30 cm pour le point 4.

3. Conclusion

Ces comparaisons montrent que les méthodes sont compatibles avec une analyse hydrogéomorphologique car elles permettent d'obtenir de meilleurs résultats qu'avec la méthode actuelle c'est-à-dire par analyse stéréoscopique de photographies aériennes. Ces résultats s'expliquent par les données de base utilisées. En effet, les photographies aériennes au 1/25000 ou même au 1/10000 ne permettent pas d'obtenir une précision inférieure à quelques mètres, alors que les méthodes mises en place sont basées sur des données au pas de 1m qui permettent d'avoir une meilleure connaissance du terrain à échelle plus restreinte. Les trois méthodes donnent satisfaction au vu de la précision attendue.

Concernant la modélisation hydraulique, nous avons pu voir que pour les deux méthodes étudiées, la différence planimétrique entre l'« altitude géomètre » et l'altitude obtenue ne dépasse pas 30cm. Sachant que la précision de la donnée LiDAR en altimétrie est de l'ordre de 20cm, ces résultats sont cohérents par rapport aux données de base. Concernant la planimétrie, l'écart peut atteindre 3m. Cet écart est plus important mais n'a pas de conséquence sur les calculs qui seront réalisés dans le cadre d'une modélisation hydraulique. En revanche, le problème important à relever sur cette phase de tests est la mauvaise détection des zones subaquatiques par le système LiDAR utilisé lors du survol de la zone du Vistre. La méthode du calcul de l'écart-type est la méthode qui présente les meilleurs résultats. L'ajout de MNT filtré sur des voisinages de plus en plus grands permet d'obtenir des résultats de plus en plus précis ce qui n'est pas le cas avec la méthode du calcul de variation de pente.

Mais l'imprécision des données LiDAR constitue une limite pour les méthodes concernant la compatibilité avec la modélisation hydraulique. La précision planimétrique ne permet pas d'obtenir un maillage précis à proximité des ouvrages hydrauliques. Mais sur des zones planes, le maillage devenant plus lâche, la précision est suffisante. Quant à la précision altimétrique, elle limite l'apport de ces méthodes concernant la cartographies des zones inondables lors de crues fréquentes et décennales car l'altitude limite entre débordement et non-débordement doit être connue avec plus de précision que celle obtenue. Cependant, pour des crues plus importantes, les données historiques ou les écoulements maximums ne sont pas connus avec précision donc un écart d'une vingtaine de centimètres n'a pas d'incidence particulière sur les hauteurs à partir desquelles les débordements vont s'effectuer.

Conclusion

La directive 2007/60/CE, dite directive inondation, oblige l'État à cartographier les zones inondables sur les territoires à risques importants. Pour cela, différentes approches sont à leur disposition.

L'étude hydrogéomorphologique permet de déterminer les limites des unités hydrogéomorphologiques par analyse du relief grâce à la vision stéréoscopique des photographies aériennes. L'échelle de ces images, combinée à l'erreur due à la retranscription des limites sur papier puis sur ordinateur, ne permet pas d'obtenir une précision des limites géomorphologiques inférieure à quelques mètres. A travers ce travail, nous avons pu voir que les méthodes mises en place améliorent cette précision. En effet, ces méthodes sont mises en œuvre à partir de levé LiDAR traduit en une grille au pas de 1m ce qui permet d'obtenir des limites plus précises.

Ces méthodes présentent un autre avantage car elles sont basées sur un modèle numérique de terrain ne tenant pas compte du sur-sol (forêt par exemple) ce qui n'est pas le cas lors d'une analyse de photographies. Les calculs se font uniquement sur les altitudes des points « sol » alors qu'une restitution manuelle ne permet pas d'obtenir des lignes de rupture de pente situées dans des zones boisées par exemple.

Enfin, le dernier avantage de ces méthodes par rapport à l'étude hydrogéomorphologique « classique » est le facteur temps. En effet, une analyse de photographies est un travail fastidieux d'autant plus qu'à chaque rupture de pente décelée, il faut la reporter manuellement sur un plan puis revenir sur les photographies et une fois ce travail fini, les dessiner numériquement. Dans notre cas, un simple lancement de l'algorithme dans la console du logiciel GRASS permet d'automatiser tous ces calculs. Cependant, le traitement des MNT (application d'un filtre de grande taille par exemple) peut vite devenir long si l'on utilise plusieurs dalles LiDAR simultanément. Un travail d'automatisation dalle à dalle avec recouvrement sera nécessaire.

Les trois approches permettent d'obtenir des rasters sur lesquels s'appuyer pour numériser les formes géomorphologiques ou encaissantes. Par contre, la vectorisation est délicate, voire non efficace.

Au vu des résultats et des avantages des méthodes pour l'étude hydrogéomorphologique, la recommandation est d'utiliser les données LiDAR comme support de restitution des limites des unités géomorphologiques, avec la photographie aérienne en complément.

La modélisation hydraulique présente une contrainte supplémentaire étant donné que le facteur hauteur est important dans les calculs. Il faut donc avoir une bonne description du terrain tant en planimétrie qu'en altimétrie. Nous avons pu constater que la précision altimétrique des ruptures de pente peut atteindre 30cm, ce qui sera difficilement améliorable puisque cela correspond à la précision du système LiDAR aéroporté. Ces valeurs peuvent être acceptables dans certains cas, c'est-à-dire pour les modélisations très débordantes, mais pas suffisantes pour les premiers débordements.

Afin que les méthodes exposées soient compatibles avec la modélisation hydraulique, un autre problème est à prendre en compte, celui des caractéristiques du système LiDAR utilisé. En effet, les

systèmes LiDAR utilisés dans ce marché ne peuvent pas détecter avec précision les points situés sous l'eau. La description du lit mineur est donc impossible ce qui limite l'apport de ces méthodes dans le cadre de la modélisation hydraulique précise. L'utilisation d'un système LiDAR bathymétrique serait alors nécessaire pour combler ce manque de données. La précision obtenue n'est donc pas suffisante pour des calculs de modélisation hydraulique, surtout au niveau d'ouvrages hydrauliques.

Cependant, la méthode basée sur le calcul de l'écart-type présente de bons résultats mais est limitée par la précision des données utilisées. C'est la méthode avec laquelle l'augmentation du filtrage montre le moins de dégradation de l'information. Au contraire le résultat s'améliore pour les cas testés lorsque les filtres augmentent et sont rajoutés dans le calcul de l'écart-type.

Pour aller plus loin, il semble qu'un processus itératif permettant de garder les petites formes détectées par un raster filtré sur un petit voisinage puis les plus grandes formes qui apparaissent au fur et à mesure de l'augmentation de la taille du filtre soit nécessaire pour obtenir un résultat raster plus net et une vectorisation plus aboutie.

Bibliographie

Ouvrages et articles

Direction Départementale de l'Équipement de l'Oise, Les Feuilles de l'Oise n°183, 2008, *L'hydrogéomorphologie*

Garry G., Ballais J.L., Masson M., *La place de l'hydrogéomorphologie dans les études d'inondation en France méditerranéenne / The contribution of hydrogeomorphology in flood hazard assessment: a review of the situation in southern*

France. In: Géomorphologie : relief, processus, environnement. Janvier-mars, vol. 8, n°1. pp. 5-15.

Ballais J-L., Chave S., Dupont N., Masson E. et Penven M-J., 2011, *La méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables*. Physio-Géo (www.physio-geo.fr), collection "Ouvrages", 168 p

Ministère des Transports, de l'Équipement, du Tourisme et de la Mer (Direction Générale de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la Construction), 2007, *Guide méthodologique pour le pilotage des études hydrauliques*

F. Bretar, 2006, Les systèmes Lidar aéroportés : Géo-référencement et Précision

Mattenberg Y., 2006, Laboratoire des Systèmes d'Information Géographique, *Algorithme de simplification de modèles – Cas appliqué au MNA*

Weiss, A., 2001, *Topographic Position and Landforms Analysis*, Poster presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA.

Wood, J.D., 1996, *The geomorphological characterisation of digital elevation models*, PhD Thesis, University of Leicester, UK.

Liens internet

Méthode « Topographic Position Index » : <http://www.jennessent.com/arcview/tpi.htm>

Description des modules GRASS : http://grass.fbk.eu/gdp/html_grass64/

Portail SIG : <http://www.portalsig.org/>

Tables des illustrations

<i>Illustration 1: les différentes unités géomorphologiques.....</i>	<i>7</i>
<i>Illustration 2: tableau récapitulatif des différentes cartographies à réaliser pour la Directive Inondation.....</i>	<i>10</i>
<i>Illustration 3: fonctionnement d'un système LiDAR.....</i>	<i>11</i>
<i>Illustration 4 : Influence de la taille du voisinage sur la valeur du TPI.....</i>	<i>13</i>
<i>Illustration 5: détermination de points caractéristiques par combinaison valeur TPI/valeur de pente.....</i>	<i>14</i>
<i>Illustration 6: Lancement de fonctions GRASS via l'arborescence.....</i>	<i>16</i>
<i>Illustration 7: Lancement de fonctions GRASS via la console Shell.....</i>	<i>16</i>
<i>Illustration 8: Profil en travers du lit majeur créé sous Calc.....</i>	<i>17</i>
<i>Illustration 9: courbure calculé depuis le profil créé.....</i>	<i>17</i>
<i>Illustration 10: Profil en travers du lit majeur bruité.....</i>	<i>18</i>
<i>Illustration 11: courbure calculée depuis MNT bruité.....</i>	<i>18</i>
<i>Illustration 12: Influence des filtres sur le MNT.....</i>	<i>19</i>
<i>Illustration 13: courbures en fonction de la taille du filtre.....</i>	<i>20</i>
<i>Illustration 14: Comparaison des courbures en fonction de la taille des filtres.....</i>	<i>20</i>
<i>Illustration 15: Interface de lancement de la fonction r.param.scale.....</i>	<i>21</i>
<i>Illustration 16: valeurs de courbure calculées depuis MNT non filtré.....</i>	<i>22</i>
<i>Illustration 17: valeurs de courbure calculées depuis MNT filtré sur un voisinage 3x3.....</i>	<i>22</i>
<i>Illustration 18: valeurs de courbure calculées depuis MNT filtré sur un voisinage 11x11.....</i>	<i>22</i>
<i>Illustration 19: ligne de calcul dans la console shell de GRASS.....</i>	<i>23</i>
<i>Illustration 20: profil en travers réalisé sur le raster de variation de pente (calculé sur MNT filtré sur voisinage 3x3).....</i>	<i>23</i>
<i>Illustration 21: Visualisation 3D du raster filtré à 3x3 représentant les variations de pente supérieures à 5°.....</i>	<i>24</i>
<i>Illustration 22: Variations de pente supérieure à 5° depuis MNT bruité et non filtré.....</i>	<i>24</i>
<i>Illustration 23: Variations de pente supérieure à 5° depuis MNT bruité filtré par un filtre 3x3.....</i>	<i>24</i>
<i>Illustration 24: Variations de pente supérieure à 5° depuis MNT bruité filtré par un filtre 5x5.....</i>	<i>24</i>
<i>Illustration 25: visualisation 3D du raster écart-type</i>	<i>25</i>
<i>Illustration 26: grille MNT.....</i>	<i>27</i>
<i>Illustration 27: directions d'écoulement.....</i>	<i>27</i>
<i>Illustration 28: points d'écoulement nul.....</i>	<i>27</i>
<i>Illustration 29: raster de non écoulement (calculé à partir de l'écart-type entre MNT brut et MNT filtré sur 3x3).....</i>	<i>27</i>
<i>Illustration 30: raster de non écoulement (calculé à partir de l'écart-type entre MNT brut et MNT filtrés sur 3x3, 5x5 et 7x7).....</i>	<i>27</i>
<i>Illustration 31: raster de non écoulement (calculé à partir de l'écart-type entre MNT brut et MNT filtrés sur voisinage de 3, 5, 7, 9 et 11).....</i>	<i>27</i>
<i>Illustration 32: raster de non écoulement (calculé à partir de l'écart-type entre MNT brut et MNT filtrés sur voisinage de 3, 5, 7, 9, 11, 13 et 15).....</i>	<i>27</i>
<i>Illustration 33: Photo aérienne de la zone test.....</i>	<i>28</i>
<i>Illustration 34: courbure sur MNT brut.....</i>	<i>29</i>
<i>Illustration 35: courbure sur MNT filtré (3x3).....</i>	<i>29</i>
<i>Illustration 36: courbure sur MNT filtré (11x11).....</i>	<i>29</i>
<i>Illustration 37: variations de pente supérieures à 5° depuis MNT non filtré.....</i>	<i>30</i>
<i>Illustration 38: variations de pente supérieures à 5° depuis MNT filtré sur un voisinage 3x3.....</i>	<i>30</i>
<i>Illustration 39: variations de pente supérieures à 5° depuis MNT filtré sur un voisinage 7x7.....</i>	<i>30</i>
<i>Illustration 40: Raster "écart-type"</i>	<i>31</i>
<i>Illustration 41: courbures calculées à partir du MNT non filtré (extrait au 1/25000).....</i>	<i>32</i>
<i>Illustration 42: courbures calculées à partir du MNT filtré sur un voisinage 11x11 (extrait au 1/25000).....</i>	<i>32</i>
<i>Illustration 43: illustration 41 au 1/5000.....</i>	<i>33</i>
<i>Illustration 44: illustration 42 au 1/5000.....</i>	<i>33</i>
<i>Illustration 45: superposition des limites géomorphologiques sur l'ortho-image.....</i>	<i>33</i>
<i>Illustration 46: superposition des vecteurs de rupture de pente (>5°) sur l'ortho-image (à partir du MNT filtré sur un voisinage 7x7).....</i>	<i>34</i>
<i>Illustration 47: variation de pente supérieure à 5° calculée sur MNT filtré (7x7).....</i>	<i>34</i>
<i>Illustration 48: superposition des résultats obtenus avec les résultats de la méthode classique.....</i>	<i>35</i>
<i>Illustration 49: variation de pente calculée depuis MNT filtré sur un voisinage 3x3.....</i>	<i>35</i>
<i>Illustration 50: variation de pente calculée depuis MNT filtré sur un voisinage 5x5.....</i>	<i>35</i>
<i>Illustration 51: vectorisation des points de non-écoulement suite au calcul de l'écart-type.....</i>	<i>36</i>
<i>Illustration 52: raster "écart-type" calculé sur MNT filtré par un filtre 11x11.....</i>	<i>36</i>

<i>Illustration 53: raster représentant les points d'écoulement nul.....</i>	<i>37</i>
<i>Illustration 54: profil en travers du Vistre.....</i>	<i>38</i>
<i>Illustration 55: variation de pente supérieure à 5° depuis le MNT non filtré.....</i>	<i>38</i>
<i>Illustration 56: variation de pente calculée à partir du MNT filtré par un filtre 7x7.....</i>	<i>39</i>
<i>Illustration 57: ruptures de pente calculées depuis MNT filtré sur un voisinage 5x5.....</i>	<i>40</i>
<i>Illustration 58: ruptures de pente calculées depuis MNT filtré sur un voisinage 11x11.....</i>	<i>40</i>
<i>Illustration 59: ruptures de pente calculées depuis MNT filtré sur un voisinage 15x15.....</i>	<i>40</i>

Résumé

La Directive Européenne 2007/60/CE a été adoptée en 2007 pour permettre de réduire les conséquences négatives des inondations sur les territoires à risque. Pour cela, une campagne de levés LiDAR a été réalisée sur le territoire national. Les méthodes recherchées ont donc utilisé ces nouvelles données pour permettre de cartographier les zones inondables. Après un filtrage passe-bas permettant de réduire le bruit dû aux disparités des terrains naturels, la méthode basée sur le calcul de l'écart-type en chaque point du MNT est apparue comme la méthode permettant de réaliser les calculs de manière homogène et indépendante de la topographie du terrain et de la taille des filtres utilisée. Par rapport à la détection des lignes de rupture de pente avec l'étude hydrogéomorphologique, la détection des unités géomorphologiques présente une meilleure précision avec la méthode de l'écart-type. Les rasters obtenus peuvent donc être utilisés pour la numérisation de ces limites. Concernant la modélisation hydraulique, les précisions obtenues avec cette méthode basée sur l'écart-type permettent d'obtenir des résultats satisfaisants pour le calcul des grands débordements mais ces précisions ne seront pas suffisantes pour les premiers débordements. La précision pour ce type d'approche est limitée par la précision du LiDAR (20 cm en altimétrie et 50 cm en planimétrie) et par les caractéristiques du système LiDAR (détection sub-aquatique possible ou pas).

Abstract

European Directive 2007/60/CE was adopted in 2007 to reduce the negative impacts of floods on the territory at risk. For this, a campaign LiDAR survey was carried out on national territory. The methods sought used these new datas to allow mapping of flood areas. After a low-pass filtering to reduce noise due to differences in naturel terrain, the method based on calculating the standad deviation at each point of DEM has emerged as the method for performing calculations in a homogeneous and independent of the topography and the size of the filters used. Compared to the detection of lines of slope failure with the study hydrogeomorphological units has better accuracy with the method of standard deviation. Rasters obtained can be used for scanning these limits. On hydraulic modeling, the precision obtained with this method based on the standard deviation used to obtain satisfactory results for the calculation of large excesses but these details will not be needed for first overflow. The accuracy for this type of approach is limited by the accuracy of LiDAR (20 cm and 50 cm in altimetry in planimetry) and by the characteristics of LiDAR system (underwater detection possible or not).