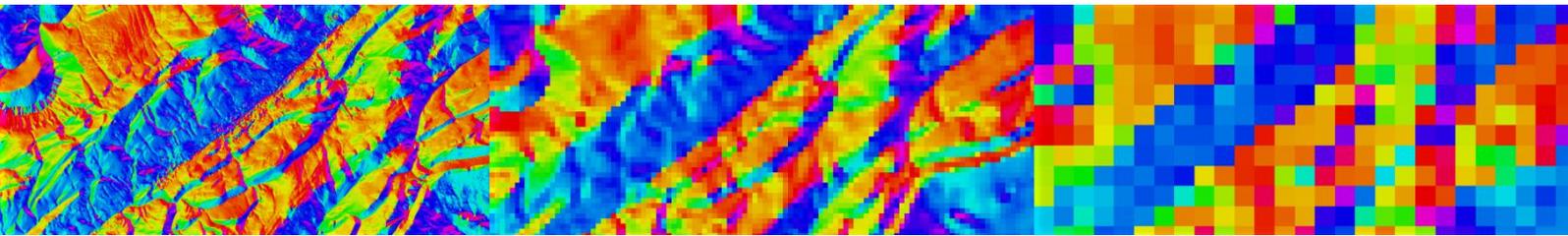


Gestion dynamique des échelles de données raster dans un environnement interactif



Benoit Le Bocey

Faculté	Environnement Naturel, Architectural et Construit (ENAC)
Section	Sciences et Ingénierie de l'Environnement (SIE)
Laboratoire	Laboratoire de Systèmes d'Information Géographique (LaSIG)
Professeur	François Golay
Expert	Abram Pointet
Encadrants	Stéphane Joost Michael Kalbermatten

Remerciements

Au terme de ce travail de master mettant un point final à cinq années d'études à l'EPFL, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué à son bon déroulement :

Merci au professeur François Golay pour avoir accepté de superviser cette recherche et m'avoir intégré dans son laboratoire. Merci également pour le petit tour en avion qui m'a permis de prendre un peu de hauteur sur les problématiques.

Merci à Stéphane Joost pour l'encadrement global de ce travail de master ainsi que pour les discussions fructueuses autour de certains concepts.

Merci à Michael Kalbermatten et Jens Ingensand qui, malgré la fin de leur doctorat, ont toujours trouvé le temps de répondre à mes interrogations, même les plus philosophiques. Merci également pour leur ponctualité digne de l'horlogerie suisse dans le domaine de la *pause café*.

Merci à Abram Pointet pour ses très judicieuses remarques qui ont orienté cette recherche tout au long de ce semestre. Une grande admiration pour sa légendaire *esthétique objective* dont je commence à percer le secret.

Merci à tous les autres collaborateurs du LaSIG avec qui nous avons partagé de très bons moments tout au long de ce semestre : Nicolas (notre très cher *Tabernacle*), Giona (pour qui les vaches n'ont plus de secrets), Sylvie (la relève des doctorants du labo), Bang, Claudio, Véronique, ainsi que Cédric et Sophia qui ont réalisé leur travail de master en même temps que moi.

Merci encore à Stéphane Joost, Michael Kalbermatten et Abram Pointet pour le temps passé à la relecture de ce rapport, et leur remarques constructives.

Merci aussi à mes colocataires qui tous les soirs m'ont fait oublier le réveil du lendemain.

Finalement, un grand merci à mes parents pour m'avoir soutenu durant toute la durée de mes études à l'EPFL.

Tous les documents, images, et interface concernant ce travail de master sont disponibles en version numérique sur un CD annexe à ce rapport. L'interface interactive est également consultable en ligne sur : www.delienn.ch/MasterBenoit

Résumé

L'échelle et la résolution sont depuis longtemps des problématiques clés de la géographie. Le rapide développement des Systèmes d'Information Géographiques (SIG) de bureau ou sur Internet ces dernières années a contraint une prise en compte plus précise de ces notions. Cette recherche s'intéresse alors à l'adaptation de la résolution de données raster, morphologiques et thématiques, à l'échelle choisie pour les représenter dans un SIG. Des méthodes d'agrégation de référence, en fonction du type de donnée, sont alors proposées afin d'adapter au mieux cette résolution. Dans le cas des données morphologiques, cette méthode de référence est comparée visuellement et statistiquement à deux autres méthodes alternatives potentiellement utilisées dans certaines interfaces existantes. La faisabilité des concepts de cette recherche est ensuite testée dans une interface interactive créée à cet effet. Ce travail démontre alors qu'il est nécessaire d'adapter soigneusement la résolution des données raster à l'échelle de visualisation choisie par l'utilisateur.

Abstract

Scale and resolution have long been key issues of geography. In recent years, the rapid development of desktop or Internet Geographic Information Systems (GIS) has forced a more precise consideration of these concepts. This research focuses on fitting the resolution of morphologic and thematic raster data, to the scale chosen to represent them in a GIS. To better adapt this resolution, reference aggregation methods based on the type of data are proposed. In the case of morphological raster data, this reference method is visually and statistically compared with two other alternative methods potentially used in existing interfaces. The feasibility of this research's concepts has been tested with an interactive web interface created for this purpose. This work demonstrates that it is necessary to adjust carefully the resolution of raster data to the display scale chosen by the user.

Cadre de recherche

Ce projet a été réalisé en collaboration avec le Laboratoire de Systèmes d'Information Géographique (LaSIG) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) et la société MicroGIS (Société de conseil et développement en analyse et statistique spatiale, géomarketing et cartographie dans de nombreux domaines liés au territoire). Ce travail a été supervisé par François Golay (LaSIG), Stéphane Joost (LaSIG), Michael Kalbermatten (LaSIG) et Abram Pointet (MicroGIS).

Table des matières

1. INTRODUCTION	9
2. PROBLEMATIQUE	11
2.1. BUT	11
2.2. OBJECTIFS.....	11
3. DONNÉES RASTER	13
3.1. QU'EST-CE QU'UNE DONNEE RASTER	13
3.2. TYPES DE DONNEES RASTER.....	13
3.3. DONNÉES UTILISÉES.....	16
4. ETAT DE L'ART SUR LA MANIPULATION DE DONNEES RASTER	19
4.1. LA RESOLUTION SPATIALE	19
4.2. LA NOTION D'ECHELLE.....	19
4.3. MODIFIABLE AREAL UNIT PROBLEM (MAUP)	23
4.4. RESOLUTION DES DONNEES SUR UN ECRAN	24
5. METHODOLOGIE.....	27
5.1. AGREGATION DES DONNEES MORPHOLOGIQUES.....	27
5.2. AGREGATION DES DONNEES THEMATIQUES.....	30
5.3. INTERFACE WEB	32
6. ANALYSES COMPARATIVES : DONNEES MORPHOLOGIQUES	35
6.1. ANALYSES VISUELLES DES DIFFERENTES METHODES	35
6.2. ANALYSES STATISTIQUES SUR LES VALEURS.....	38
6.3. ANALYSE STATISTIQUE SUR LES COULEURS	42
6.4. SYNTHESE DES ANALYSES COMPARATIVES	45
7. IMPLEMENTATION DES DONNEES DANS L'INTERFACE	47
7.1. CALCUL DES DONNEES.....	47
7.2. TRANSFERT DES DONNEES.....	48
7.3. SOLUTION ENVISAGEABLE ACTUELLEMENT	49
8. CONCLUSION : UNE ANALYSE PLUS EFFICACE	51
9. BIBLIOGRAPHIE	52
10. ANNEXES AU RAPPORT	55

1

Introduction

Ces dernières années, les Systèmes d'Information Géographique (SIG) de bureau ou sur Internet sont devenus de plus en plus courants. Ces systèmes laissent à l'utilisateur la liberté de choisir l'échelle (niveau de zoom) à laquelle il désire visualiser des données. Ce concept d'échelle est tout à fait artificiel. Il n'existe pas dans la réalité où les phénomènes sont tous imbriqués les uns dans les autres pour constituer un continuum très complexe. Le concept d'échelle permet alors de décrire ces phénomènes dans un système abstrait de domaines discrets qui montrent à l'utilisateur une certaine étendue de territoire composée d'unités de base d'une certaine taille (la résolution). Et à chaque échelle correspond une résolution spécifique.

Le problème qui se pose actuellement avec les SIG, est que cette résolution n'est que rarement adaptée à l'échelle choisie par l'utilisateur pour l'analyse et la représentation de données raster (grilles régulières formées de pixels). Ces données raster sont proposées avec une résolution unique pour toutes les échelles. Seule la taille des images diminue et les valeurs des pixels sont le plus souvent modifiées par interpolation des couleurs indépendamment de la thématique représentée par la donnée (altitude, orientation, statistiques de superficie,...). Une analyse de phénomènes au travers de plusieurs échelles est donc faussée par une représentation non-conforme.

Afin que les données raster représentées dans une interface soient cohérentes avec l'échelle choisie pour les visualiser, il faut que la résolution de ces données soit judicieusement adaptée en fonction de leur type. Cette recherche propose alors des méthodes d'agrégation de référence pour les données morphologiques et thématiques. Ces méthodes sont ensuite testées et comparées des méthodes alternatives dans une interface cartographique interactive développée spécialement à cet effet.

2

Problématique

Dans le cadre de l'utilisation de données raster par les utilisateurs d'une interface cartographique interactive, cette recherche aborde la problématique de la mise à disposition de données à une résolution (échelle d'observation) ajustée pour l'analyse, grâce à l'adaptation dynamique de la résolution spatiale notamment. En effet, l'échelle d'observation et d'analyse d'un phénomène doit coïncider avec l'échelle de représentation choisie par l'utilisateur (Torun *et al.*, 2000 ; Pointet, 2007).

2.1. But

Développer un module d'exploitation de données raster pour faire coïncider l'échelle d'observation et d'analyse (résolution de la donnée) à l'échelle de représentation (rapport carte/terrain) et conserver l'intégrité des données d'une échelle à l'autre. Pour y parvenir, des processus d'agrégation sont alors utilisés et leur efficacité comparée.

2.2. Objectifs

- Dresser un inventaire exhaustif des différentes classes de données raster existantes ainsi que des exemples de données associées à chacune de ces classes ;
- Identifier les liens de cause à effet et les contraintes qui régissent le concept général de la représentation pertinente des données ;
- Proposer des méthodes d'agrégation pour les données étudiées dans cette recherche ;
- Qualifier et quantifier les différences entre les méthodes d'agrégation proposées pour les données morphologiques ;
- Identifier les processus d'échange, d'encodage et d'affichage qui vont permettre un transfert rapide des données à l'utilisateur.

Ce travail va chercher à répondre aux questions suivantes :

- Quelles sont les principales méthodes d'agrégation applicables aux données morphologiques et thématiques ?
- Quelle est la méthode d'agrégation la plus adaptée aux données morphologiques ?
- Quelles sont les différences visuelles et numériques entre les méthodes d'agrégation pour les données morphologiques ?
- Quelle est la résolution (échelle d'observation et d'analyse) la plus adaptée à l'échelle de représentation choisie pour un type de donnée précis ?

3

Données raster

3.1. Qu'est-ce qu'une donnée raster

Une donnée de type raster représente les informations géographiques sous forme d'une grille régulière. Chaque cellule, plus communément appelée pixel, de cette grille a exactement la même taille et est référencée dans l'espace géographique. En effet, en connaissant uniquement les coordonnées géographiques x/y du pixel en bas à gauche ainsi que la taille des pixels (résolution de la donnée), la position dans l'espace de tous les autres pixels est connue. Chacun de ces pixels contient une unique valeur qui sera alors, soit directement exploitée par un SIG (comme dans le cas de valeurs de luminances ou d'altitudes), soit interprétée par l'intermédiaire d'une table de correspondance (comme dans le cas de données sur l'occupation du sol où la valeur de chaque pixel est associée à un nom de classe stocké dans une table).

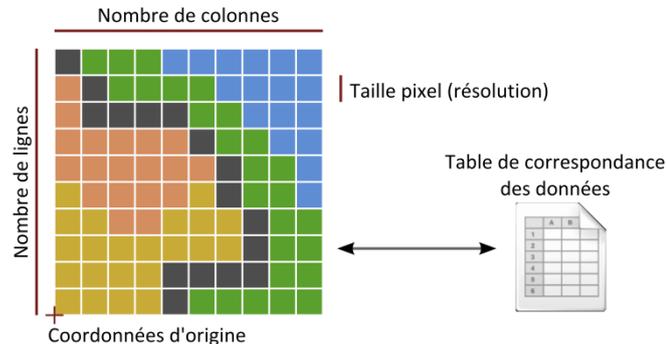


Figure 1 : Les éléments de base de la structure d'une donnée raster. Schéma adapté de *Cultural Land use Analysis Methodologie*, Pointet et al., 2004

3.2. Types de données raster

Il existe une multitude de types de données raster pouvant être représentées dans un espace géographique. Ces types peuvent être regroupés dans des classes et des sous-classes (Figure 2). Une première différence peut être faite entre les données continues (information quantitative) et discrètes (information qualitative). Les données continues sont cardinales alors que les données discrètes peuvent être ordinales ou nominales (Chrisman, 2002).

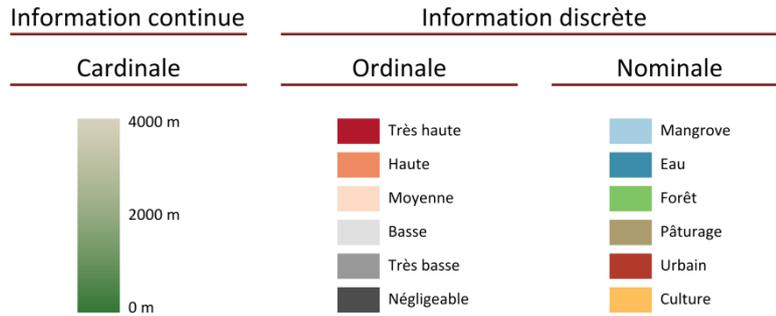


Figure 2 : Classification des différents types d'information. Schéma adapté de *Cultural Land use Analysis Methodologie, Pointet et al., 2004*

Pour chaque grand type de classification (cardinal, ordinal ou nominal), il existe différentes catégories et sous-catégories de données ayant chacune une caractéristique spécifique. La Figure 3 présente des exemples de données associées à chacune des classes.

	Données	Caractéristiques
Cardinale	Luminance	[a , b]
	Orthophoto	
	Relief ombré	
	Altitude] -∞ , +∞ [
	Pente	[a , b]
	Courbure	[a , b]
Ordinal	Orientation	[0 , 2π [
	Paramètres physico-chimiques	[a , +∞ [
	Température	
	Concentration	
Nominale	Thèmes ordonnés	a < b < c
	Bruit	
	Protection des eaux	
	Degré de risque au Radon	
Nominale	Thèmes non ordonnés	a , b , c
	Statistique de superficie	
	Géologie	
	Faune et Flore	

Figure 3 : Définition des principales données selon leur type (cardinal, ordinal et nominal), leur catégorie (luminance, altitude, paramètres physico-chimiques,...) et leur caractéristique (borné, ouvert, cyclique,...).

3.2.1. Luminance

Une donnée raster basée sur la luminance associe à chaque pixel une intensité de luminosité généralement encodée entre 0 (intensité lumineuse nulle correspondant au noir) et 255 (intensité lumineuse maximale correspondant au blanc). Le rendu visuel (image) de cette donnée est donc monochrome. La visualisation d'une image en couleur, par exemple de type RGB (Red, Green, Blue), est le résultat de la combinaison de trois bandes de couleurs. Chaque bande correspond à une plage de longueurs du spectre visible (bleu, vert et rouge), proche infrarouge, infrarouge moyen et infrarouge thermique. Le choix de combinaison pour ces différentes bandes permet de mettre en évidence diverses informations. Avec les intensités lumineuses de différentes bandes il est également possible de calculer des indices, comme par exemple l'indice de densité de végétation (NDVI).

3.2.2. Altitude

Dans le domaine de la cartographie classique (format papier), les données d'altitude sont représentées sous forme de lignes de niveaux ainsi que certains points de références comme les sommets et les cols en montagne. De plus, un effet d'ombrage est ajouté afin de faciliter la perception du relief par l'utilisateur. Dans les SIG, les données d'altitude peuvent être formatées selon différents maillages tels que triangulaire, hexagonale ou carré selon les besoins de l'étude. Dans le cas de données raster le maillage est carré avec une valeur unique d'altitude par pixel.

Il existe trois différentes définitions bien distinctes pour un modèle numérique d'altitude, le MNS, le MNT et le MNH (Swisstopo, octobre 2007 ; Li *et al.*, 2005). Le Modèle Numérique de Surface (MNS) reproduit la surface terrestre et intègre les éléments permanents et visibles tels que les forêts, les bâtiments et les ouvrages d'art. Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) décrit la surface du terrain nu, sans bâti ni végétation et permet alors le calcul de données dérivées telles que les pentes, les orientations et les trois principales courbures (moyennes, en plan et en profil). Le Modèle Numérique de Hauteur (MNH) est la différence entre le MNS et le MNT qui permet d'extraire la hauteur des éléments du territoire tels que les arbres et les bâtiments.

3.2.3. Paramètres physico-chimiques

De nombreux paramètres environnementaux physiques et chimiques peuvent être localisées et mesurées dans un territoire. Ces informations sont souvent continues (thématiquement et spatialement) et sont donc mesurables en tout point. La résolution de ces données dépend notamment de la densité d'instruments de mesure qui ont été utilisés pour leurs acquisitions. Mais cette densité d'instruments est souvent limitée pour des raisons pratiques et de coûts. Le recours à des méthodes d'interpolation (méthodes de krigeage) va alors permettre d'affiner la résolution de ces données avec des valeurs estimées et non mesurées pour chaque pixel.

3.2.4. Thématique

Dans le cas de données thématiques, les valeurs des pixels de la donnée raster sont en correspondance directe avec une table. Cela permet de mettre en relation chaque cellule avec une série de valeurs alphanumériques. Par conséquent, les données raster de type thématique permettent de représenter des sujets très variés. Ces informations qualitatives sur les pixels peuvent se classer par ordre d'importance (donnée ordinale) ou n'avoir aucune hiérarchie possible entre elles (donnée nominale). Dans cette étude, la variable de la densité de population est une information cardinale qui est transformée en information ordinale grâce à la création de classes de densité. Il n'y a alors plus de notion de valeurs de densité mais de classes de densité.

3.3. Données utilisées

Les diverses analyses réalisées dans le cadre de cette étude devaient être effectuées sur des données réelles. Le choix s'est alors porté sur deux types de données raster avec des caractéristiques bien différentes : d'une part des données thématiques (densité de population et statistique de superficie) et d'autre part des données morphologiques (Modèle Numérique de Terrain, pentes, courbures et orientations). Ces données sont illustrées par la Figure 4. Le MNT est produit par la mensuration officielle (MNT-MO) et distribué par l'Office fédéral de topographie (swisstopo), et les données thématiques sont produites et distribuées par l'Office fédérale de la statistique (OFS). Le choix de ces données raster est judicieux car en raison du fort développement des interfaces interactives ces dernières années, elles sont souvent disponibles en ligne, mais la plupart du temps à une résolution unique. Il est donc nécessaire de comprendre comment la résolution de ces données, essentielles pour décrire un territoire, peut correctement être ajustée pour une représentation optimale sur un écran.

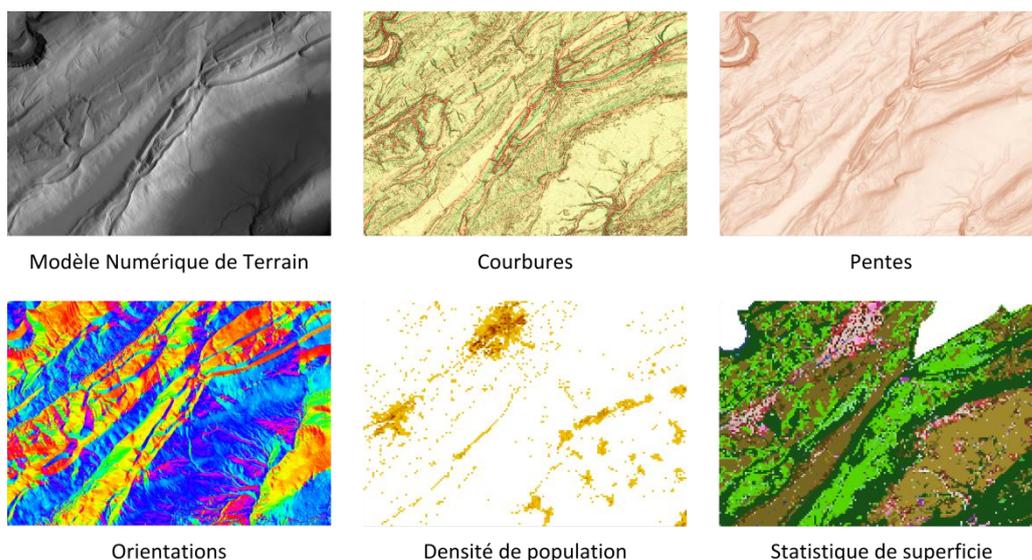


Figure 4 : Présentation de toutes les données utilisées dans cette recherche. Les courbures, les pentes et les orientations ont été calculées à partir du MNT.

Le volume très important des données morphologiques à de fines résolutions a contraint la taille de la zone d'étude pour l'interface de test. Par conséquent, une zone au Nord du canton de Neuchâtel (Suisse) a été choisie pour ses caractéristiques intéressantes (en rouge sur Figure 5). En effet une grande variété de morphologies de terrains est présente dans cette zone : vallons, crêtes, surfaces planes, surfaces accidentées et zones urbanisées. La résolution minimale des données thématiques est de 100 mètres, ce qui permet de travailler sur tout le canton de Neuchâtel (en vert sur la Figure 5).

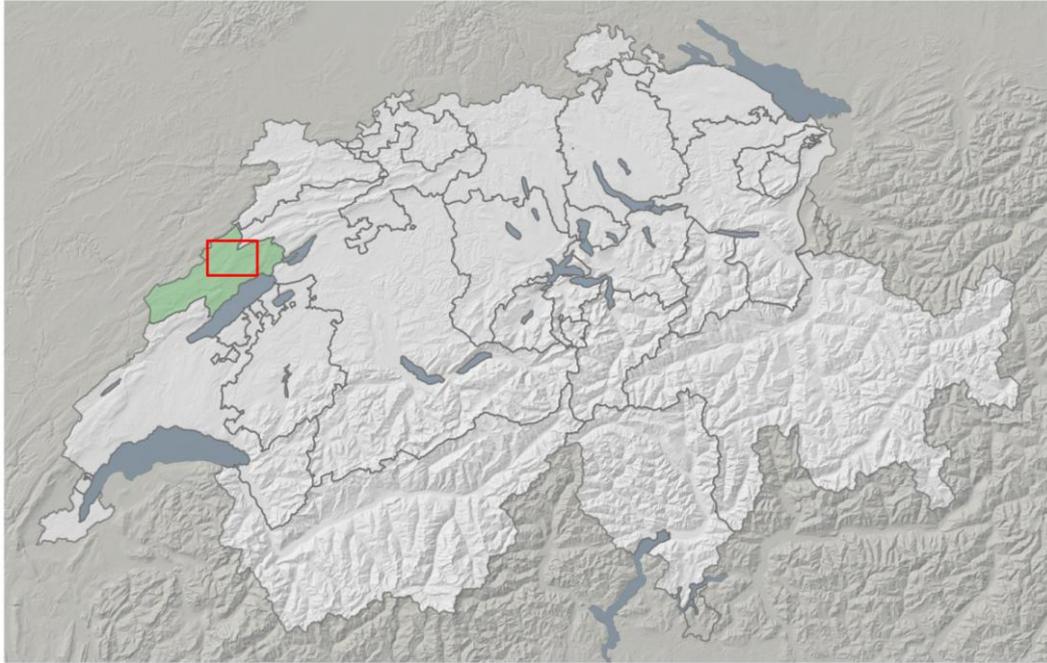


Figure 5 : Localisation de la zone d'étude. En vert le canton de Neuchâtel, zone d'étude des données thématiques et en rouge la limite de la zone d'étude des données morphologiques.

4

Etat de l'art sur la manipulation de données raster

4.1. La résolution spatiale

Comme vu précédemment, les données raster permettent de décrire un territoire grâce à de nombreuses informations. Mais la surface terrestre est infiniment complexe, plus on s'en rapproche, plus il est possible de l'observer en détail. La limite côtière est un bon exemple permettant de comprendre ce phénomène se rapprochant de la théorie des fractales (Lam et Quattrochi, 1992). En effet, la côte doit-elle être représentée par une ligne décrivant les anses, ou tous les blocs rocheux, ou encore tous les grains de sable. On peut augmenter le niveau de détail d'une représentation quasiment jusqu'à l'infini. Mais cela a-t-il toujours un sens ? Dans la réalité, il faut alors choisir à quel niveau de détail une donnée doit être représentée, c'est-à-dire, choisir sa résolution spatiale.

La résolution spatiale se rapporte à la taille de la plus petite unité différenciable des données (Tobler, 1987), comme le pixel dans le cas de l'imagerie satellite ou les intervalles d'échantillonnage pour une étude en écologie par exemple. Dans le cas de données de type raster, la résolution spatiale ne se réfère qu'à la surface réelle que représente un pixel sur le terrain. Par exemple, si la surface couverte par un pixel est de 100 m² (10 mètres par 10 mètres), alors la résolution de la donnée est de 10 mètres. Plus la surface représentée par un pixel est petite, plus le niveau de détail (des caractéristiques, des phénomènes) est important.

Depuis la naissance de la cartographie, ce niveau de détail des données est intimement relié à l'échelle de représentation (rapport entre la distance sur le terrain et celle sur la carte). Pour des représentations à des grandes échelles (par exemple, 1 cm sur une carte représente 250 m sur le terrain), le niveau de détail est important, alors que pour de plus petites échelles (par exemple, 1 cm sur une carte représente 10 km sur le terrain) les données sont généralisées, le niveau de détail est plus faible. Le développement de la cartographie numérique a complexifié les relations entre la résolution des données et l'échelle de représentation.

4.2. La notion d'échelle

L'échelle est une des propriétés primaires de la description de données géographiques (Lam et Quattrochi, 1992). Le terme "échelle" peut être utilisé dans des situations diverses telles que les échelles spatiales, temporelles et thématiques. Mais dans ce cas, cela sera plus plutôt défini comme les dimensions de l'information spatiale. Dans le

domaine géographique, la dimension spatiale semble la plus évidente pour caractériser des phénomènes. "Dans un sens général, l'échelle fait référence à la dimension spatiale à laquelle les entités, les schémas et les processus peuvent être observés et caractérisés" (D. J. Marceau, 1999). Mais en réalité, chaque information spatiale (Figure 6) est caractérisée par des dimensions (spatiale, temporelle et thématique) auxquelles sont associées des unités puis des échelles. Et il existe quatre types d'échelles différentes : échelle de représentation, de mesure, d'observation et opérationnelle.

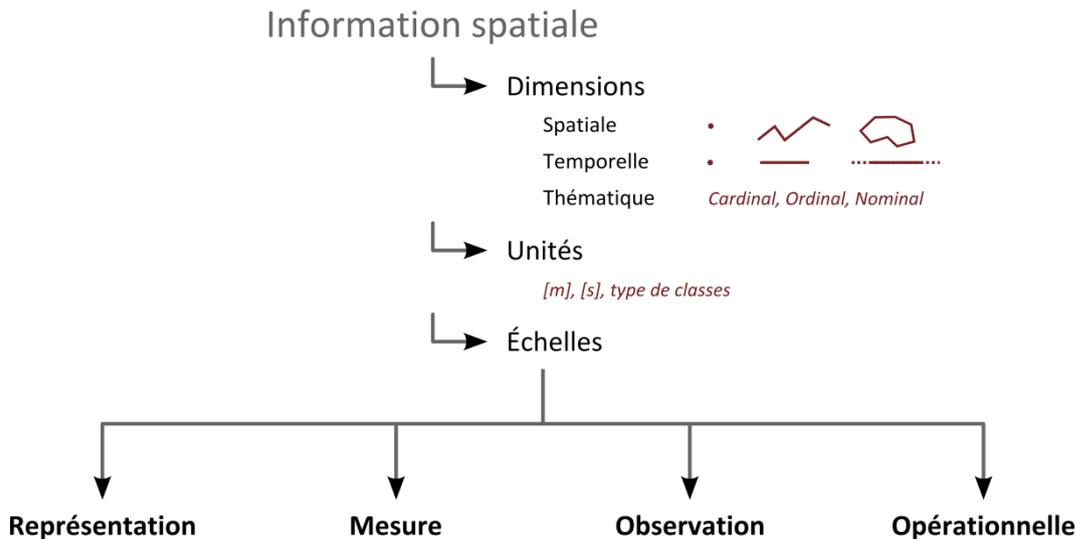


Figure 6 : Les caractéristiques d'une information spatiale. Cette information à des dimensions et des unités qui s'expriment à des échelles de différents types.

L'échelle de représentation (ou cartographique) correspond au rapport entre une distance sur la carte (ou autre média de diffusion) et une distance sur le terrain. Une carte à grande échelle couvre une petite zone généralement avec plus de détails qu'une carte à petite échelle qui, elle, couvre une grande zone. La taille de la zone de représentation est bien sûr uniquement contrainte par la taille et les caractéristiques du média de diffusion. Ces deux paramètres vont contraindre une résolution (échelle de mesure) minimale des données.

L'échelle de mesure, comme vu dans la partie 4.1, se rapporte à la taille de la plus petite unité différenciable d'une donnée. C'est donc la résolution de la donnée. Cette échelle est corrélée à l'échelle de représentation car elle va définir le niveau de détail de la donnée à afficher.

L'échelle peut également désigner la taille ou l'étendue spatiale d'une étude, c'est l'échelle d'observation. Une étude à grande échelle couvre une grande superficie alors qu'inversement, une étude à petite échelle couvre une petite superficie. L'étendue de

phénomènes fait référence à l'échelle opérationnelle alors que l'étendue de données (échelle de mesure) fait référence à l'échelle de représentation.

L'échelle peut désigner l'échelle de visibilité d'un phénomène particulier, c'est l'échelle opérationnelle. Trouver l'échelle opérationnelle d'un phénomène est une étape importante afin de déterminer l'échelle d'observation. En effet, un phénomène observé à telle échelle n'est plus visible, ne peut plus être mis en évidence à une autre. Mais il existe de nombreux cas où un phénomène peut être décrit par plusieurs échelles ou encore, plusieurs échelles peuvent mettre en évidence plusieurs phénomènes. D'où le fort intérêt pour l'interactivité et la navigation entre les échelles rendus possible grâce au développement des interfaces cartographiques interactives. Par exemple, pour étudier la migration de la population du centre-ville vers les banlieues, l'échelle de la ville doit être choisie car au niveau de la région ou du pays, d'autres migrations peuvent alors devenir dominantes.

Les variations de ces différentes échelles sont illustrées par la figure suivante :

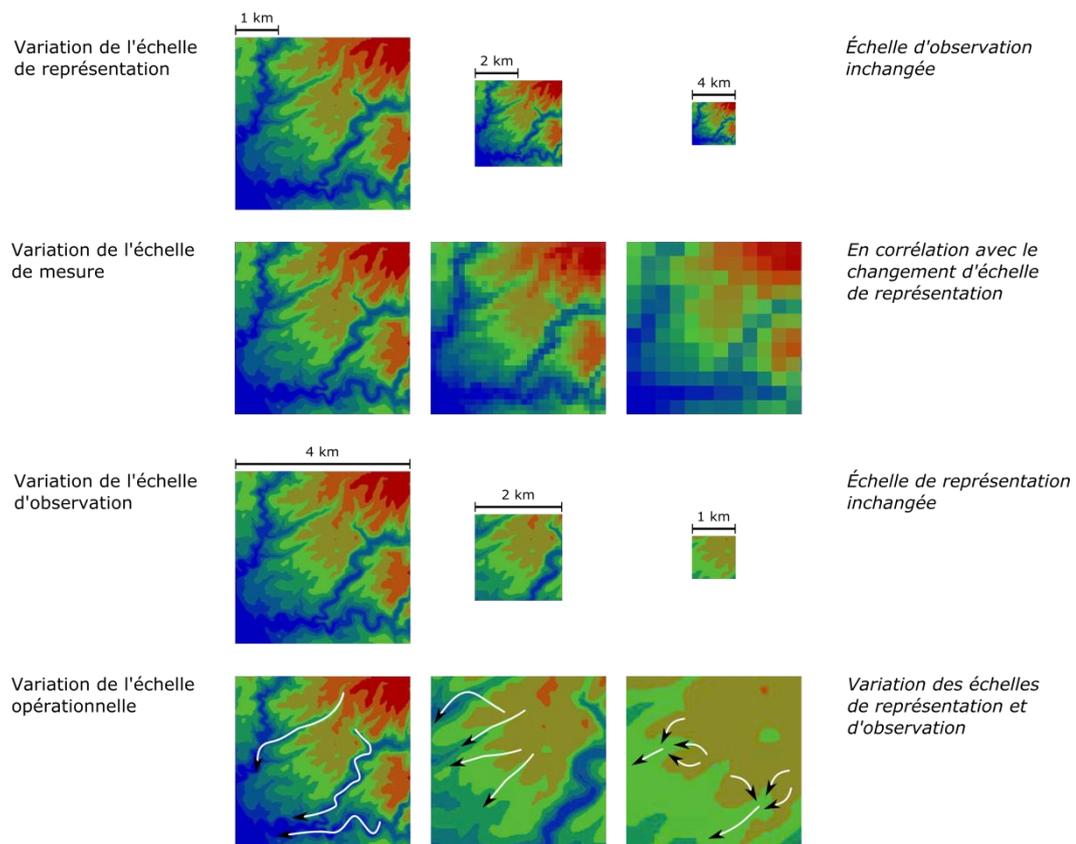


Figure 7 : Mise en évidence des variations des différentes échelles. La première ligne de figures illustre le changement d'échelle de représentation qui modifie le rapport entre carte/réalité. La deuxième illustre la variation de l'échelle de mesure, de la résolution qui fait varier le niveau de détail des données. La troisième montre la variation de la surface d'étude et donc de l'échelle d'observation. Et enfin, la quatrième met en évidence les différents niveaux de perceptions des phénomènes selon l'échelle (de représentation et d'observation) choisie.

Dans le cas de cette étude, l'échelle opérationnelle est volontairement laissée de côté. En effet, il est encore rare que l'échelle d'observation des données (résolution d'acquisition) soit déterminée en fonction de l'échelle opérationnelle. Des données acquises dans un but particulier peuvent être utiles pour d'autres études à des résolutions identiques ou plus grossières. La finalité et la (les) résolution(s) d'utilisation sont alors déterminées par la suite, suivant les besoins de l'utilisateur. Il existe néanmoins des relations bien spécifiques entre l'échelle des données et l'échelle de représentation, qui sont illustrées par la Figure 8. On distingue deux approches dans la manière dont ces échelles interagissent : l'approche classique et l'approche interactive.

Dans l'approche classique, c'est l'échelle des données qui définit l'échelle de représentation en passant par la contrainte d'un média de diffusion adopté. Par contre, dans l'approche interactive, l'utilisateur peut choisir l'échelle de représentation qu'il désire sur son écran. Cette requête est envoyée au serveur contenant les informations afin que celui-ci renvoie les différentes données. Par contre, dans la plupart des cas, ces données sont envoyées avec une résolution indépendante de l'échelle demandée. Le processus que ce projet va mettre en place est le réajustement de l'échelle des données du serveur à l'échelle demandée par l'utilisateur en passant à travers un processus d'agrégation (en rouge sur la Figure 8).

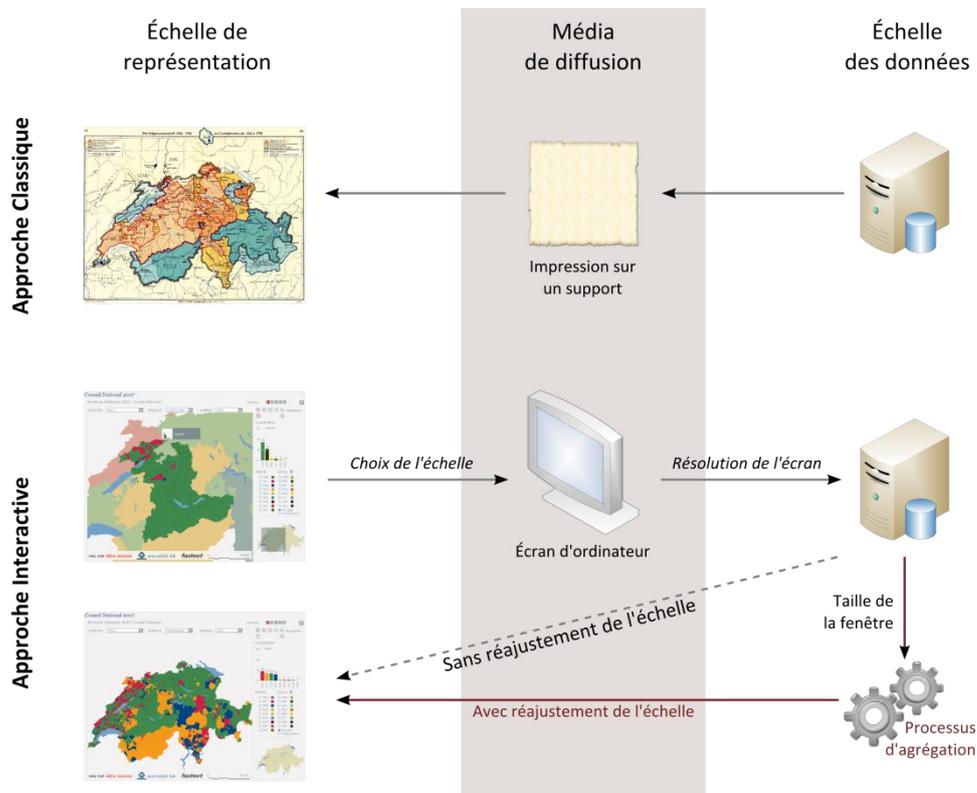


Figure 8 : Différence entre l'approche classique et l'approche interactive. L'approche interactive engendre un problème encore peut traiter actuellement : le problème du réajustement de l'échelle des données à l'échelle d'affichage.

4.3. Modifiable Areal Unit Problem (MAUP)

Le thème même de cette étude est la représentation de données raster à des échelles différentes. Et comme constaté dans le chapitre précédent (4.2), il existe un lien entre l'échelle et la perception des phénomènes étudiés. Ceci est connu dans le domaine de l'analyse spatiale et est nommé le MAUP (Modifiable Areal Unit Problem) illustré par la Figure 9.

Selon Openshaw (1984), le MAUP est une combinaison de deux problèmes séparés mais proches :

- Le problème de l'échelle (ou de la résolution) est une variation de l'information engendrée lorsqu'un jeu d'unités spatiales est agrégé afin de former des unités moins nombreuses et plus grandes pour les besoins d'une analyse. Ce problème se pose car il existe une incertitude sur la perte de richesse de l'information de base.
- Le problème de l'agrégation est une variation de l'information engendrée par les différents schémas d'agrégation possibles à une échelle (ou résolution) similaire. Ce problème se pose car il existe une incertitude sur la manière d'agréger les données pour atteindre un résultat cohérent et pertinent.

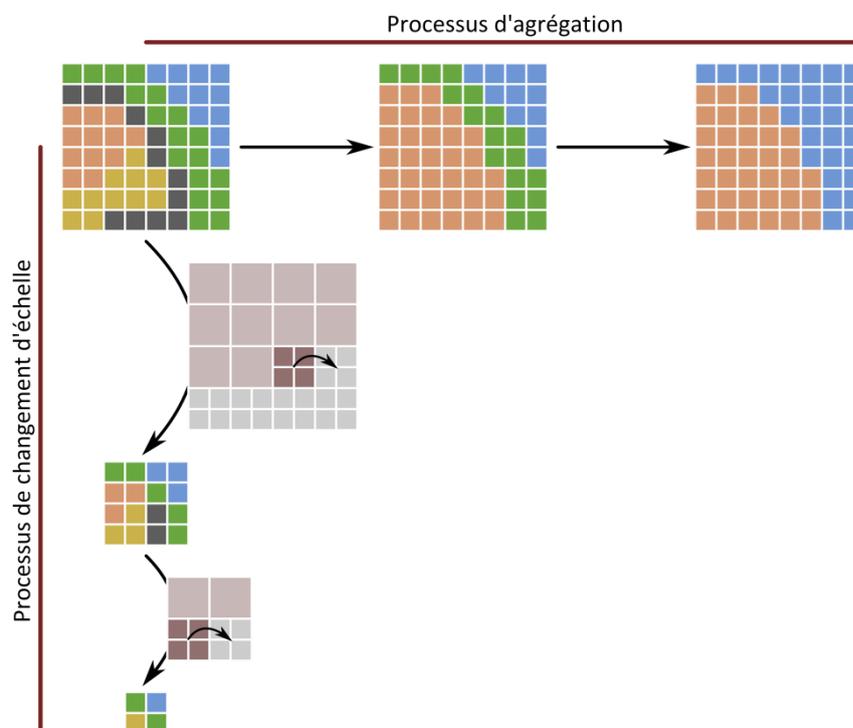


Figure 9 : Illustration des deux phénomènes impliqués dans le MAUP. Le phénomène d'agrégation est engendré par un changement dans la diversité de l'information. Le phénomène d'échelle est engendré par une modification de la résolution des données.

Dans cette étude, le problème lié au phénomène d'agrégation peut uniquement être rencontré lors de l'exploration des données sur la statistique de superficie. À savoir quelles classes doivent être regroupées dans telle classe du niveau supérieur. Mais ce problème a été contourné en utilisant la classification déjà existante de l'Office Fédéral de la Statistique (OFS) en Annexe 10.1 (p.55) pour la statistique de superficie. Par contre un choix à dû être fait pour les classes de densité de population. Pour les données cardinales du Modèle Numérique de Terrain et de ses données dérivées, le phénomène d'agrégation n'existe pas. Seul le phénomène d'échelle engendré par le changement de résolution est présent. L'incertitude sur la perte de l'information de base est plus ou moins amplifiée selon la méthode (mathématique ou conceptuelle) d'agrégation utilisée pour passer à la résolution supérieure.

4.4. Résolution des données sur un écran

Une donnée raster quelconque a une résolution minimale bien connue qui est souvent définie par l'échelle à laquelle s'est faite son acquisition. Mais son affichage sur un écran d'ordinateur va être limité par la taille et la résolution de ce dernier. A une échelle de représentation donnée, la taille de l'écran va uniquement contraindre la surface de la donnée visible sur l'écran. Ce problème est partiellement résolu par la possibilité de déplacer de manière interactive la zone de visibilité des données. La résolution de l'écran, par contre, va limiter l'affichage d'une donnée. Il existe alors une résolution minimale d'affichage [m/px] et une échelle à l'écran [m/cm]. Pour diminuer cette résolution minimale, il faut diminuer la surface représentée, autrement dit zoomer sur la donnée.

Formules de calcul de la résolution minimale et de l'échelle correspondante :

$$\text{Résolution minimale [m/px]} : \frac{\text{étendue affichée [m]}}{\text{taille fenêtre [px]}}$$

$$\text{Échelle à l'écran [m/cm]} : \frac{\text{résolution écran [px]}}{0.0254 [m]} \times \text{résolution [m/px]}$$

Cette résolution minimale, fonction de la surface représentée dans la fenêtre de visualisation, permet de calculer la distance sur le terrain correspondante à la largeur d'un pixel (résolution d'un pixel). La barre d'échelle étant la relation entre une distance en pixels à l'écran et une distance sur le terrain, une simple multiplication de la résolution d'un pixel permet alors d'obtenir cette distance représentée. Afin de pouvoir transmettre l'échelle cartographique (dite "échelle à l'écran" dans les formules) à l'utilisateur, il est nécessaire de connaître le DPI (Dot Per Inch) de son écran. Par conséquent, lors du chargement de l'interface, une fonction JavaScript permet de calculer ce DPI. Ainsi, quelque soit l'écran utilisé par le client, l'échelle cartographique qui lui est transmise est correcte et la relation entre une distance sur l'écran (en centimètres) et une distance sur le terrain est toujours connue. La Figure 10 illustre ces relations entre les différentes notions.

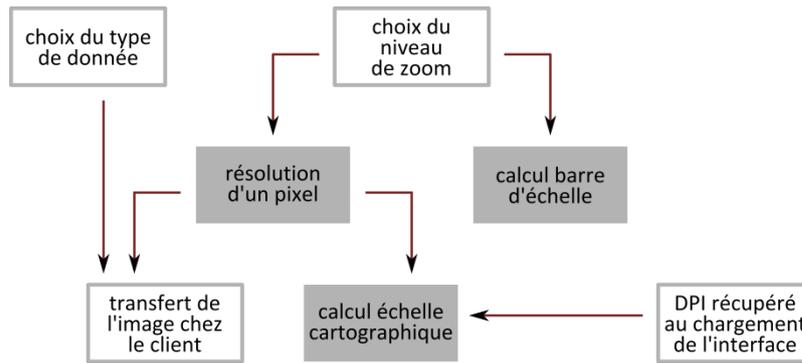
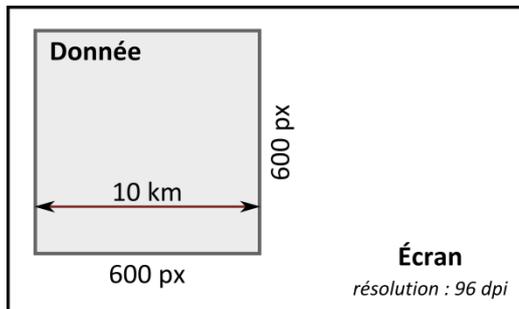


Figure 10 : Schéma des processus permettant le transfert de la bonne donnée au client ainsi que le calcul de plusieurs informations liées à l'échelle de la représentation.

Un exemple de calcul est présenté ci-dessous avec une résolution d'écran standard de 96 DPI, soit 96 pixels pour 2,54 cm.



$$1 [px] = \frac{10 [km]}{600 [px]} = 16.67 [m]$$

$$\text{Résolution minimale} = 16.67 [m/px]$$

$$1 [cm] = \frac{96 [px]}{2,54 [cm]} \times \frac{10 [km]}{600 [px]} = 629.92 [m]$$

$$\text{Échelle à l'écran} = 629.92 [m/cm]$$

5 Méthodologie

Pour transformer une donnée à une certaine résolution, il existe de nombreuses possibilités d'agrégation qui dépendent en partie du type de donnée. Pour ce qui est des données morphologiques telles que le Modèle Numérique de Terrain et ses données dérivées (les pentes, les courbures et les orientations) trois méthodes d'agrégation sont réalisées. Deux approches classiques, c'est-à-dire plus évidentes pour le concepteur d'une interface interactive, sont comparées visuellement et statistiquement à une approche dite de référence. Par contre, pour les données thématiques (ordinales et nominales) les possibilités d'agrégation sont beaucoup plus restreintes. Par conséquent une seule approche est présentée pour chaque type mais elles ne sont pas développées plus en détail dans cette recherche.

Afin de faciliter la compréhension des différents processus d'agrégation, la sémiologie illustrée par la figure ci-dessous est utilisée dans toutes les figures explicatives.



Figure 11 : Sémiologie pour les processus d'agrégation.

5.1. Agrégation des données morphologiques

Pour toutes les données morphologiques, la donnée de base pour les agrégations est le fichier ASCII grid du Modèle Numérique de Terrain à une résolution de 4 mètres. C'est à partir de ce fichier que sont calculées les données dérivées et les images aux différentes résolutions.

La méthode de référence est réalisée par deux calculs successifs : tout d'abord une agrégation par interpolation de type B-Spline cubique (Kalbermatten, 2009) du Modèle Numérique de Terrain à la résolution voulue, puis le calcul des données dérivées (Li *et al.*, 2005) pour cette résolution (Figure 12). Par exemple, si l'on désire obtenir les pentes à une résolution de 64 mètres, il faut alors agréger le MNT à la résolution de 64 mètres puis calculer les pentes sur cette nouvelle base. Pour le relief ombré (représentation graphique du MNT) seule l'agrégation est réalisée.

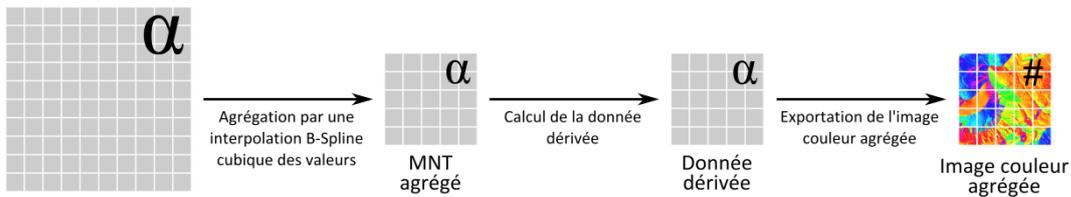


Figure 12 : Processus d'agrégation de la méthode de référence.

Cette méthode de référence est alors comparée à deux autres méthodes basées sur la moyenne. La première méthode est une agrégation par la moyenne des valeurs des données dérivées (pentes, orientations,...). La donnée de base est le fichier ASCII grid de la donnée étudiée à la résolution de 4 mètres. Les valeurs sont alors moyennées 4 pixels par 4 pixels puis l'image agrégée est calculée sur la base de ces nouvelles valeurs (Figure 13). Par exemple, pour calculer les pentes à une résolution de 64 mètres, le fichier ASCII grid des pentes à 4 mètres est agrégé par la moyenne des valeurs jusqu'à la résolution de 64 mètres.

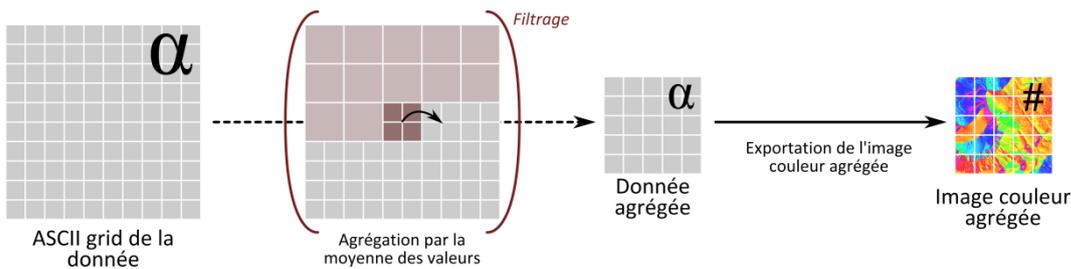


Figure 13 : Processus d'agrégation pour la méthode sur la moyenne des valeurs.

La deuxième méthode est une agrégation par la moyenne des couleurs des données dérivées (pentes, orientations,...). La donnée de base est l'image de la donnée étudiée à la résolution de 4 mètres. Les trois bandes Rouge, Verte et Bleue de l'image sont d'abord séparées, les luminances de chaque bande sont moyennées en utilisant la même méthode que la moyenne des valeurs, puis les 3 bandes sont recombinaison afin de former la nouvelle image couleur agrégée (Figure 14). Par exemple, pour calculer les pentes à une résolution de 64 mètres, les luminances des 3 bandes de l'image des pentes à 4 mètres sont moyennées séparément jusqu'à la résolution de 64 mètres. Leur recombinaison crée alors l'image couleurs des pentes à la résolution de 64 mètres.

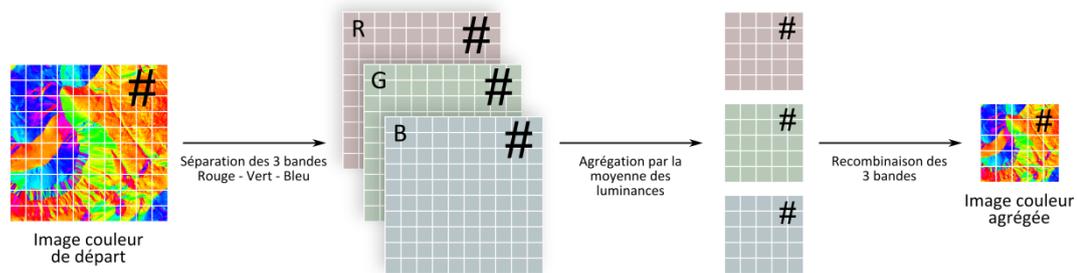


Figure 14 : Processus d'agrégation pour la méthode sur la moyenne des couleurs.

Il existe bien sûr encore de nombreuses autres méthodes d'agrégation. Mais ce qui est principalement comparé dans cette étude est la différence entre le fait de réaliser une agrégation passant par une interpolation du Modèle Numérique de Terrain (méthode de référence) ou non. L'utilisation d'une autre méthode que la moyenne, telle que l'agrégation bilinéaire, bicubique ou par le plus proche voisin n'aura pour effet que de changer légèrement l'aspect des données. Le résultat peut être un peu plus proche de la méthode de référence, mais conceptuellement, les différences resteront les mêmes.

Le rendu visuel de l'agrégation par le navigateur Internet est également observé mais n'est pas étudiée plus en détail. Dans le cas de cette agrégation, l'image de base (à une résolution de 4 mètres) est la seule utilisée et ce sont uniquement les dimensions de cette dernière qui sont modifiées lors du changement de l'échelle. Cela permet de comparer visuellement les méthodes d'agrégation décrites précédemment à une solution sans adaptation de l'échelle des données dans une interface SVG. Mais chaque navigateur Internet a sa propre méthode (plus proche voisin, bilinéaire, bicubique,...) pour agréger les couleurs d'une image et afficher cette dernière à une taille inférieure. Ces méthodes ne sont pas toujours communiquées pour les logiciels propriétaires (Internet Explorer, Safari), mais il est possible de les trouver pour les libres tel que Firefox qui utilise par défaut la méthode du plus proche voisin. Il n'existe donc aucun contrôle sur la méthode d'agrégation pour le développeur car cela dépend totalement du choix du navigateur Internet de l'utilisateur.

Les trois différentes méthodes d'agrégation pour les données morphologiques sont résumées par le schéma suivant. Sur la dimension horizontale sont représentées les procédures de calcul ne modifiant pas la résolution de la donnée et sur la dimension verticale les procédures d'agrégation modifiant la résolution de la donnée. La méthode de référence est la procédure ① alors que les méthodes par la moyenne sont les procédures ② et ③.

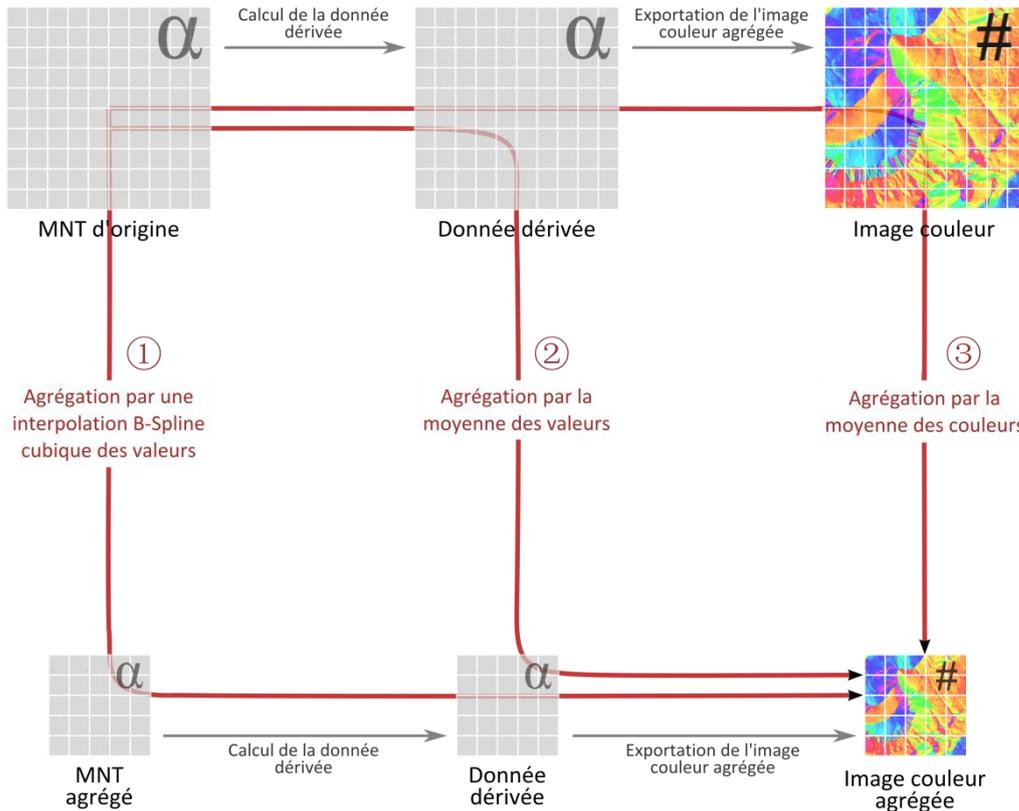


Figure 15 : Schéma récapitulatif des procédures de calcul des trois méthodes d'agrégation des données morphologiques étudiées dans ce rapport.

5.2. Agrégation des données thématiques

Les données thématiques se divisent en deux classes : les données ordinales (densité de population) et les données nominales (statistique de superficie). Pour chacun de ces deux types une méthode d'agrégation est proposée afin de montrer des possibilités d'agrégation autres que celles associées aux données morphologiques. Mais ces méthodes ne sont pas étudiées plus en détail. Le principal défi de l'agrégation de données thématique est qu'il est souvent nécessaire de réaliser une double agrégation. En effet, en plus de transformer la donnée à une résolution plus grossière (agrégation spatiale), il est nécessaire de réduire le nombre de classes représentés (agrégation thématique) afin que l'échelle de mesure (ici le nombre de classes) soit cohérente avec l'échelle de représentation. Il n'existe pas de règles sur le choix de cette agrégation thématique et l'on se retrouve alors confronté au phénomène d'agrégation du MAUP (cf. 4.3). Afin que l'agrégation spatiale ne soit pas biaisée, l'agrégation thématique, si elle doit avoir lieu, doit être réalisée en amont.

5.2.1. Donnée nominale - statistique de superficie

Contrairement aux données ordinales, il n'est pas possible de trier par ordre croissant ou décroissant des données nominales telles que la statistique de superficie. Par conséquent, le numéro attribué à chaque classe afin de les différencier n'a aucune

relation avec l'importance de la classe. Une nouvelle méthode d'agrégation est alors nécessaire pour ce type de données, l'agrégation par la classe dominante (Figure 16). La classe du pixel agrégé va donc être celle qui sera la plus représentée dans la fenêtre d'agrégation (Li *et al.*, 2001). En cas d'égalité, deux pixels par classe ou quatre pixels différents, la zone d'analyse doit être agrandie. Les classes à égalité sont alors départagées en cherchant celle qui est dominante dans les pixels autour de la fenêtre d'agrégation. Tant que l'égalité persiste, la zone de recherche est agrandie jusqu'à que les classes puissent être départagées.

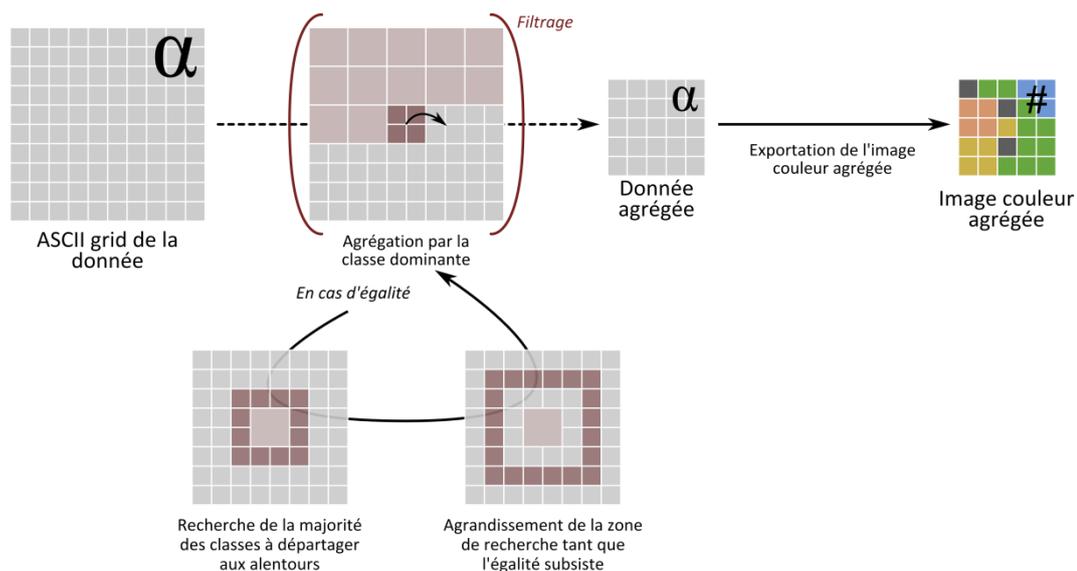


Figure 16 : Processus d'agrégation par la classe dominante pour une donnée de type nominale telle que la statistique de superficie.

Avec une donnée nominale, si aucune agrégation thématique n'est réalisée au cours des multiples agrégations spatiales la totalité des pixels vont tendre vers les classes les plus représentées. Par contre une classe moins présente mais très compacte dans l'espace aura plus de chance d'être représentée à de plus grande résolution qu'une classe dispersée. L'agrégation thématique permet également de garder une certaine cohérence des classes affichées avec l'échelle de représentation. Par exemple la classe *autoroute* sera regroupée dans *surfaces de transport* à une résolution plus grande. Dans le cas de la statistique de superficie Suisse, une table de classification réalisée par l'Office Fédérale de la Statistique (OFS) existe déjà (Annexe 10.1, p.55) comprenant 4 niveaux d'agrégation différents : 72, 27, 17 et 4 classes.

5.2.2. Donnée ordinale - classes de population

Dans le cas de données ordinales telle que la densité de population, les classes ont une importance différentes, il est donc possible de les ordonner entre elles. Par conséquent, les classes sont numérotées de 1 jusqu'au nombre maximum de classes, de la moins importante à la plus importante. Il est maintenant possible d'utiliser une moyenne selon

les numéros des classes comme méthode d'agrégation spatiale. La formule de calcul est donc la suivante :

$$\text{classe du pixel agrégé} = \text{round} \left[\frac{\sum_1^i (\text{classe du pixel } i)}{4} \right]$$

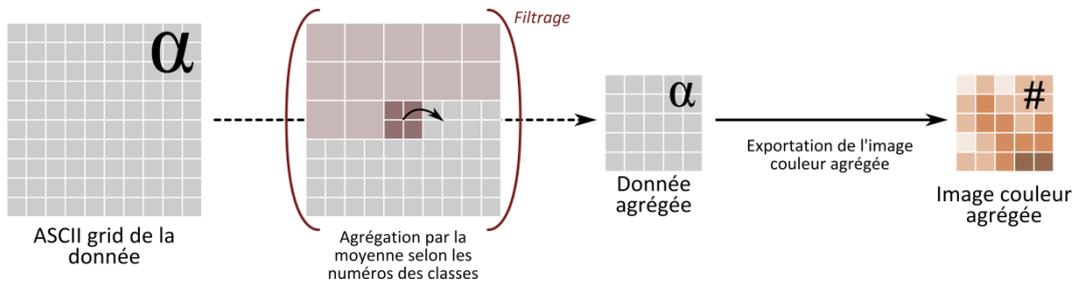


Figure 17 : Processus d'agrégation pour une donnée de type ordinale telle que les classes de densité de population.

Avec une donnée ordinale, si aucune agrégation thématique n'est réalisée au cours des multiples agrégations spatiales, la totalité des pixels vont tendre vers la classe proche de la moyenne globale de la zone d'étude. Des agrégations thématiques s'imposent donc de temps en temps afin de réajuster la distribution des classes. Dans l'exemple de la densité de population, trois niveaux d'agrégation thématique ont été définies : 10, 5 et 3 classes.

5.3. Interface Web

Un aspect particulier de cette étude est que l'on s'intéresse essentiellement aux informations visuelles diffusées par les données raster à des échelles différentes. Par conséquent, le premier moyen permettant de comparer les méthodes d'agrégation utilisées est uniquement visuel. Pour cela, un site Internet a été mis en place afin de pouvoir accéder à toutes les images des données sur un écran d'ordinateur. Une page de comparaison est alors réalisée pour chaque type de donnée (Figure 18) avec les différentes méthodes d'agrégations (référence, moyenne sur les valeurs, moyenne sur les couleurs et agrégation du navigateur Internet) pour des résolutions allant de 8 à 128 mètres. Il s'agit de pouvoir comparer l'évolution de la représentation des données à travers les méthodes d'agrégation et les résolutions. Comme décrit dans la partie suivante, l'interface interactive finale est basée sur du SVG (Scalable Vector Graphics) pour le rendu graphique, ce même format de données est alors utilisé pour coder ces pages de comparaison.

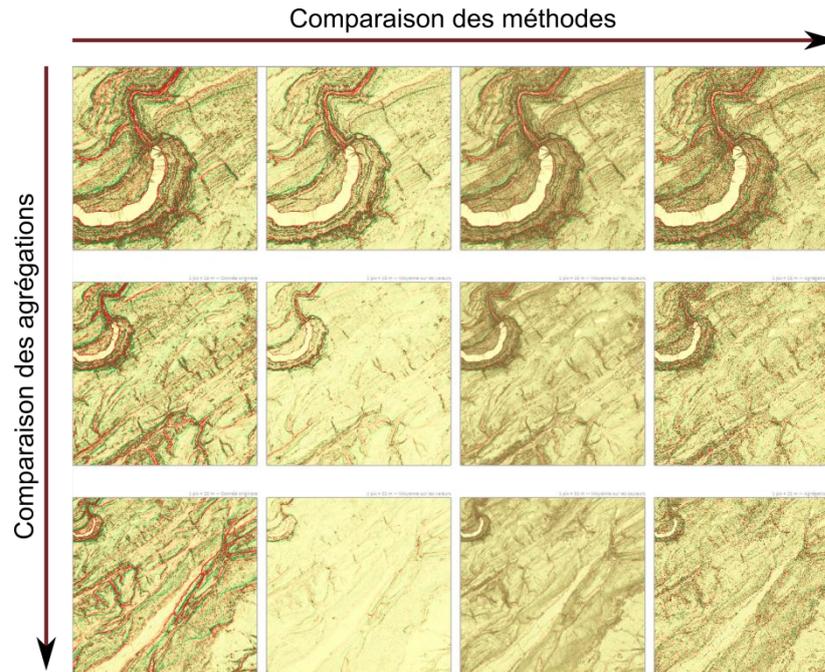


Figure 18 : Une des pages de test (courbures en profil) du site Internet permettant la comparaison visuelle des méthodes d'agrégation (dimension horizontale) à travers les différentes résolutions (dimension verticale). Dans cet exemple, de gauche à droite sont affichés la méthode de référence, la moyenne sur les valeurs, la moyenne sur les couleurs et l'agrégation du navigateur Internet, et de haut en bas les résolutions à 8 m, 16 m et 32 m.

Le module final d'exploitation des données doit permettre la mise en place des éléments théoriques évoqués précédemment, soit une échelle des données en totale cohérence avec l'échelle choisie par l'utilisateur de l'interface. Ce module est alors développé en utilisant la technologie mapIntera qui permet de réaliser une interface vectorielle (Scalable Vector Graphic, SVG) et interactive (JavaScript). Afin d'apprécier les différences entre les méthodes d'agrégation et que l'utilisateur ait la possibilité de les comparer directement au travers d'une interface interactive, le choix de la double fenêtre de visualisation a été fait (Figure 19). La navigation est alors identique dans les deux fenêtres, mais seules les données affichées sont différentes. Dans la fenêtre de gauche est affiché la méthode d'agrégation de référence et dans celle de droite une des trois autres méthodes au choix.

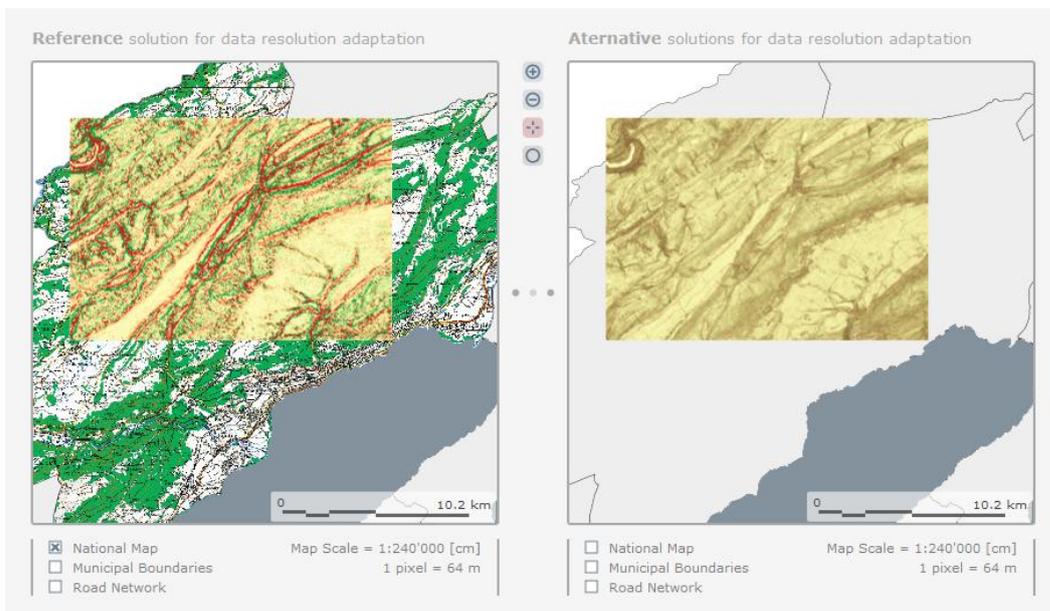


Figure 19 : Interface interactive à double fenêtre permettant la comparaison des méthodes d'agrégation. Basée sur la technologie mapIntera.

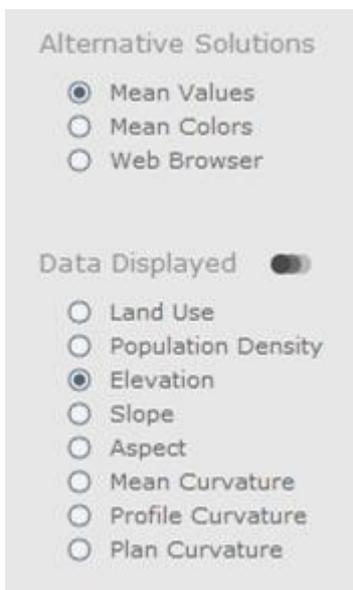


Figure 20 : Choix de la méthode d'agrégation alternative et de la donnée à afficher.

Le menu sur la droite de l'interface (Figure ci-contre) permet à l'utilisateur de choisir l'une des trois méthodes d'agrégation alternative associée aux données morphologiques ainsi que le type de donnée à afficher. Les couches de base (carte nationale, limites communales et réseau routier) peuvent être choisies indépendamment dans chaque fenêtre de visualisation. C'est pour cette raison qu'elles figurent au bas de chaque fenêtre.

6

Analyses comparatives : données morphologiques

Comme présenté précédemment (5.1), trois méthodes d'agrégation différentes ont été utilisées pour grossir la résolution des données morphologiques (MNT, pentes, courbures et orientations). Il s'agit donc dans cette partie d'analyser pourquoi l'utilisation de la méthode de référence est préférable à la moyenne des valeurs et la moyenne des couleurs. Pour cela, ces méthodes alternatives sont comparées visuellement et statistiquement (valeurs et couleurs) à la méthode de référence.

6.1. Analyses visuelles des différentes méthodes

Cette partie permet de mettre en évidence les différences visuelles entre les méthodes et de comprendre en quoi la méthode de référence est la plus appropriée. Cette analyse est seulement qualitative et ne mesure pas les différences. Elle est néanmoins très importante car l'image de la donnée transmise par une interface est le premier message à être interprété par l'utilisateur. Il faut donc que ce message visuel soit cohérent avec l'échelle de représentation. Des extraits d'images sont proposés pour chaque partie mais toutes les images à toutes les résolutions sont disponibles dans l'interface et sur le CD annexe à ce rapport.

6.1.1. Le Modèle Numérique de Terrain

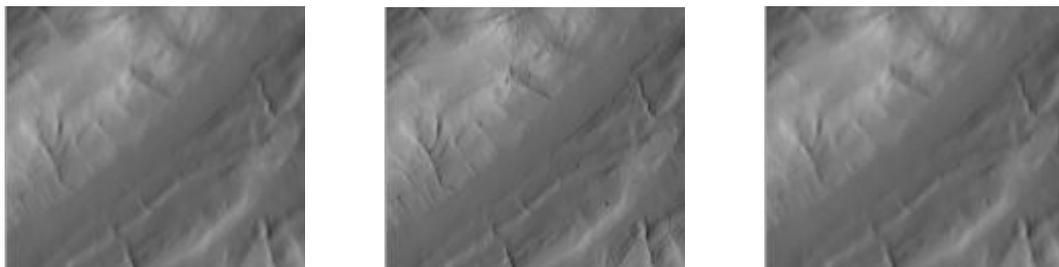


Figure 21 : Extraits du Modèle Numérique de Terrain à une résolution de 32m avec de gauche à droite, la méthode de référence, la moyenne des couleurs et la moyenne des valeurs.

Moyenne sur les couleurs

Il y a peu de différence avec la référence. Il est possible de remarquer un lissage moins important qui a pour conséquence de conserver quelques détails du relief à de grandes résolutions. Mais la conservation de ces détails à de grandes résolutions ne coïncide pas avec l'échelle de visualisation. Il est beaucoup plus juste que le niveau de détail diminue avec la diminution de l'échelle.

Moyenne sur les valeurs

La différence entre la référence et la moyenne sur les couleurs est quasiment imperceptible. Mais il est tout à fait logique d'obtenir quelque chose de très semblable étant donné que la différence entre une interpolation par la moyenne et une B-Spline cubique ne diffèrent pas beaucoup. De plus, à la différence de toutes ses données dérivées, la représentation graphique du MNT se fait très rarement selon les valeurs numériques qui composent la grille (valeurs d'altitude dans ce cas) mais sous la forme de relief ombré afin de donner une impression de relief. Cela a pour effet d'estomper les petites différences entre les méthodes d'agrégation.

6.1.2. Les pentes



Figure 22 : Extraits des pentes à une résolution de 32m avec de gauche à droite, la méthode de référence, la moyenne des couleurs et la moyenne des valeurs.

Moyenne sur les couleurs

Les différences avec la référence ne sont pas évidentes. Il est néanmoins possible de remarquer que la moyenne sur les couleurs conserve un peu plus les détails, mis en évidence par les luminosités plus faibles et donc les fortes pentes.

Moyenne sur les valeurs

Les remarques faites pour la méthode de la moyenne des couleurs sont valables pour la méthode de la moyenne des valeurs. On observe les mêmes différences avec la référence.

6.1.3. Les orientations

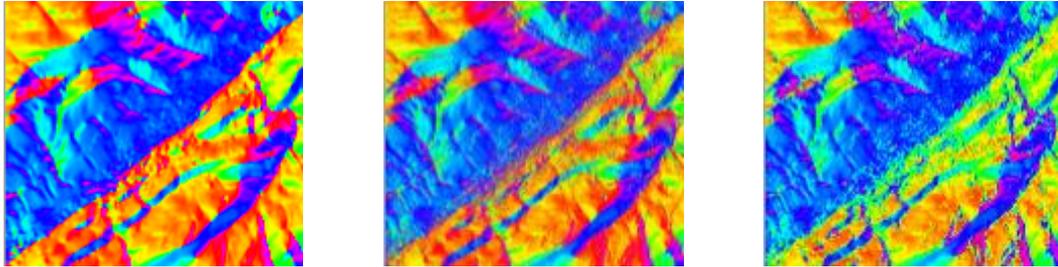


Figure 23 : Extraits des orientations à une résolution de 32m avec de gauche à droite, la méthode de référence, la moyenne des couleurs et la moyenne des valeurs.

Moyenne sur les couleurs

La représentation des orientations utilise tout le spectre (teinte) des couleurs. La teinte et l'orientation sont toutes deux des variables cycliques qui varient de 0 à 360 degrés. Par conséquent, une orientation de 30 degrés sera représentée graphiquement par une teinte égale à 30. Dans les zones d'orientation homogènes, le calcul de la moyenne des couleurs reste cohérent. Par contre, dans les zones hétérogènes, le calcul de la moyenne des couleurs va donc prendre en compte de nombreuses couleurs différentes. Cela a pour effet de griser les zones les plus bruitées telles que les villes.

Moyenne sur les valeurs

Moyenner des orientations est conceptuellement incorrect. En effet, en moyennant deux orientations différentes, on obtient une autre orientation sans rapport avec les deux autres. Cela génère de l'information qui n'existe pas. Par exemple la moyenne d'une pente *Est* et d'une pente *Ouest* va donner une pente *Sud*. Un bruit est alors introduit dans les images agrégées par la moyenne des valeurs. Au fur et à mesure des agrégations, des zones apparaissent avec des couleurs totalement différentes de la référence. L'information n'est correctement conservée que dans les zones parfaitement homogènes.

6.1.4. Les courbures



Figure 24 : Extraits des courbures moyennes à une résolution de 32m avec de gauche à droite, la méthode de référence, la moyenne des couleurs et la moyenne des valeurs.

Moyenne sur les couleurs

Une image représentant des courbures utilise très souvent une palette avec deux couleurs opposées pour mettre en évidence les courbures négatives (zones concave, en rouge sur les images) et les courbures positives (zones convexes, en vert sur les images) et une couleur neutre pour les zones planes (en jaune sur les images). Agréger les images par la moyenne des couleurs va alors créer des images avec des teintes se rapprochant du marron et du gris, qui n'ont alors plus aucune correspondance avec l'échelle de couleurs de départ. Seules les grandes zones planes ressortent encore en jaune.

Moyenne sur les valeurs

On remarque que les images deviennent progressivement de plus en plus jaune, la couleur représentant les zones planes. Cela s'explique par le fait que les valeurs des courbures sont comprises entre -1 et 1 avec la valeur nulle pour les zones planes. Par conséquent, en réalisant des agrégations par la moyenne des valeurs, les courbures vont progressivement se rapprocher de la valeur zéro. Cela a pour effet de faire disparaître des images les couleurs rouge (valeurs proches de -1) et verte (valeurs proches de 1), et donc d'éliminer toutes informations concernant les courbures.

6.2. Analyses statistiques sur les valeurs

Contrairement à une méthode utilisant une agrégation sur les couleurs, avec une agrégation sur les valeurs il est toujours possible de savoir la valeur de chaque pixel. Cela est alors très intéressant si l'on veut laisser la possibilité à l'utilisateur d'une interface de pouvoir explorer les données numériques de l'image affichée. La méthode de référence ainsi que celle de l'agrégation par la moyenne des valeurs permettent ceci. Ces deux méthodes vont alors pouvoir être comparées statistiquement sur la base des valeurs afin de confirmer ou d'infirmer ce qui a été constaté avec l'analyse visuelle. Cette partie permet donc d'évaluer numériquement les différences entre les méthodes, de les quantifier. Pour cela, une comparaison de la distribution des valeurs est utilisée à l'aide des histogrammes des occurrences des valeurs ainsi que la différence normalisée entre ces histogrammes des deux méthodes d'agrégation. Et pour chiffrer l'évolution de cette dispersion des valeurs, les quantiles sont également étudiés. En effet, ces indicateurs sont robustes et moins sensibles aux valeurs extrêmes (contrairement au minimum et au maximum par exemple) et permettent de bien caractériser la répartition des valeurs grâce à l'utilisation de plusieurs seuils (ici 0.05, 0.25, 0.50, 0.75 et 0.95).

6.2.1. Le Modèle Numérique de Terrain

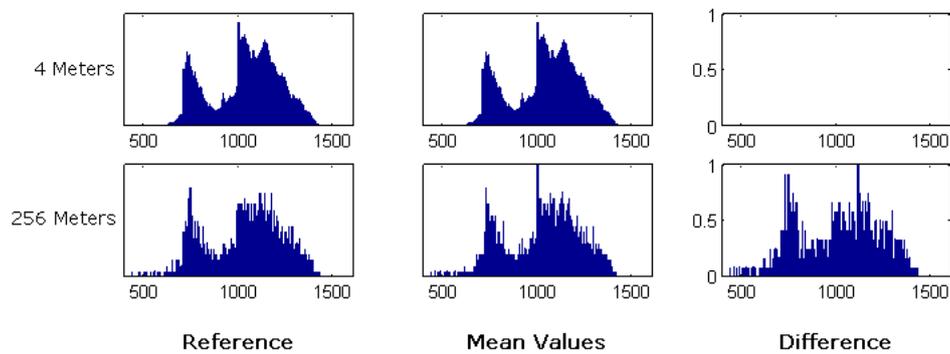


Figure 25 : Histogrammes de la répartition des valeurs d'altitude pour la résolution de base de 4 mètres (les données sont alors identiques) et la résolution la plus grossière étudiée (256 mètres).

Les histogrammes des deux méthodes sont quasiment identiques (Annexe 10.2, p.56). La différence des histogrammes permet de mettre en évidence que plus le nombre d'occurrences est important, plus la différence entre les deux méthodes est importante. On peut donc en déduire que la moyenne des valeurs induit un petit biais plus ou moins constant dans les valeurs. Le graphique des quantiles (Annexe 10.3, p.57) soutient le peu de sensibilité de la donnée à la méthode d'agrégation. Les deux graphiques sont quasiment identiques, avec des valeurs de quantiles très stables.

6.2.2. Les pentes

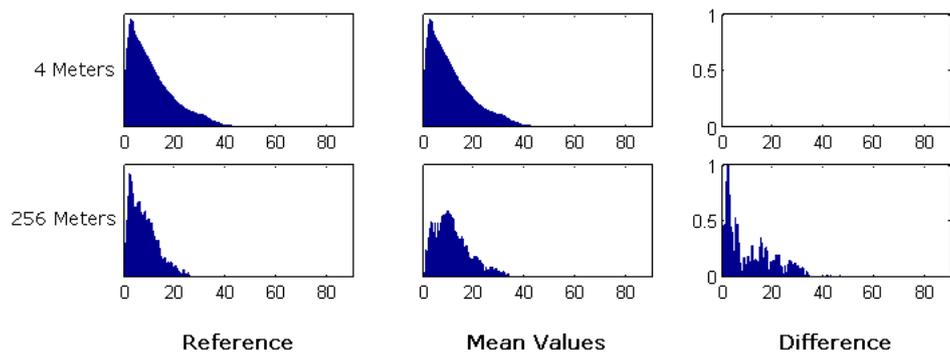


Figure 26 : Histogrammes de la répartition des valeurs des pentes pour la résolution de base de 4 mètres (les données sont alors identiques) et la résolution la plus grossière étudiée (256 mètres).

On constate que dans le cas de la moyenne des valeurs, les pentes situées aux extrêmes (zéro et maximum) disparaissent progressivement avec l'agrégation (Annexe 10.4, p.58). Le resserrement du maximum, également bien visible avec les graphiques des quantiles (Annexe 10.5, p.59), est logique car avec une plus grande résolution, il existe moins de fortes pentes, c'est un effet de lissage de la donnée. Ce phénomène est d'ailleurs observé avec les deux méthodes. Par contre sur le graphique des quantiles de la

moyenne des valeurs, le fait que les valeurs situées en dessous de la moyenne se rapprochent de cette dernière n'est pas justifiable. Avec une augmentation de la résolution, les valeurs doivent plutôt se rapprocher progressivement d'une valeur proche de quelques degrés au dessus de zéro, comme observé dans la référence. Cela peut être illustré par la Figure 27.

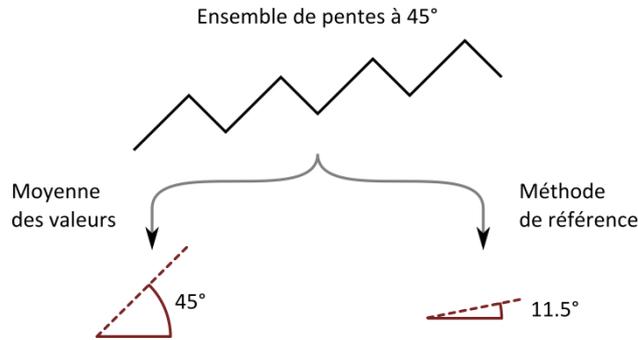


Figure 27 : Illustration de la différence entre la méthode de référence et la moyenne des valeurs pour les pentes

6.2.3. Les orientations

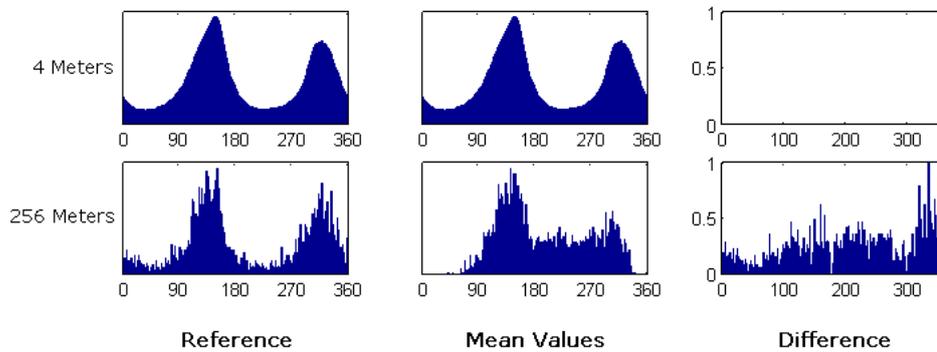


Figure 28 : Histogrammes de la répartition des valeurs des orientations pour la résolution de base de 4 mètres (les données sont alors identiques) et la résolution la plus grossière étudiée (256 mètres).

Comme illustré par la Figure 29, le principal problème engendré par la moyenne des orientations est que ce type de calcul va en produire de nouvelles qui n'existent pas forcément dans la zone d'étude considéré.

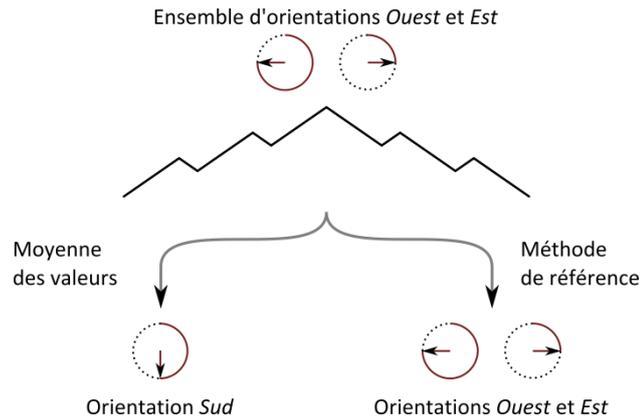


Figure 29 : Illustration de la différence entre la méthode de référence et la moyenne des valeurs pour les orientations

Cela a pour conséquence, comme observé sur les histogrammes (Annexe 10.6, p.60), de produire de nouveaux modes, inexistant dans la méthode de référence. Au fil des agrégations, ces modes se mélangent pour en former de nouveaux, jusqu'à disparaître petit à petit. Alors que la méthode de référence conserve une bonne distribution de valeurs (très important dans le cas de données cycliques), la moyenne des valeurs concentre les orientations vers la moyenne des données (histogrammes et graphiques des quantiles – Annexe 10.7, p.61). Cela a pour effet de faire disparaître toutes orientations du secteur *Nord*. En plus de ce resserrement vers la moyenne, les valeurs sont progressivement être égalisées. Les deux modes principaux bien visibles dans toutes les étapes d'agrégation de la méthode de référence s'aplanissent peu à peu. Ce lissage des valeurs est très bien visible avec les histogrammes des différences entre les deux méthodes. Dans les premières étapes d'agrégation, les différences sont bien localisées. Puis, progressivement, ces différences se remélangent.

6.2.4. Les courbures

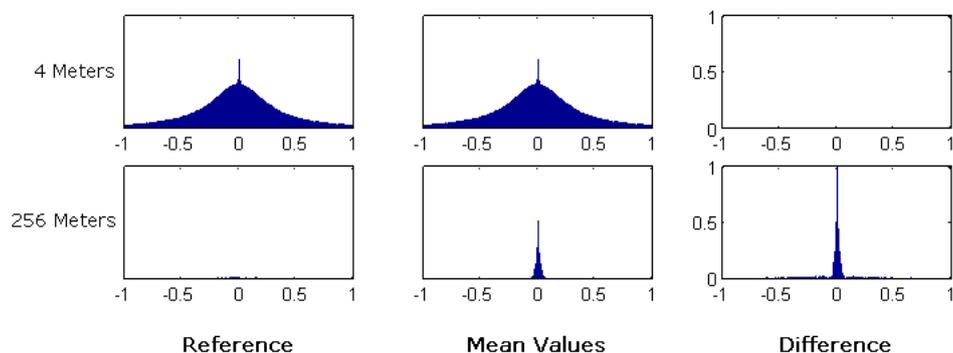


Figure 30 : Histogrammes de la répartition des valeurs des courbures pour la résolution de base de 4 mètres (les données sont alors identiques) et la résolution la plus grossière étudiée (256 mètres).

Les trois types de courbures (en plan, en profil et moyenne) donnent des résultats similaires (Annexes 10.8 à 10.13, p.62 à 67). Cela vient du fait que leurs distributions de valeurs de départ sont quasiment identiques. Alors que la méthode de référence conserve une bonne distribution des courbures, la méthode par la moyenne des valeurs concentre les valeurs des courbures autour de zéro au fur et à mesure des étapes d'agrégation. Cet effet est également bien visible sur les graphiques des quantiles. Alors que les quantiles de la méthode de référence sont constants, voir divergent légèrement, les quantiles de la moyenne des valeurs convergent progressivement vers la valeur nulle. En effet, les valeurs des courbures sont comprises dans un intervalle centré en zéro entre -1 et 1. Donc au fur et à mesure des étapes d'agrégation, les moyennes vont donner des résultats de plus en plus proches de zéro.

6.3. Analyse statistique sur les couleurs

Une image couleurs est composée de trois bandes représentant chacune une couleur différente. Les images produites pour cette étude sont de type RGB (RVB en français), c'est-à-dire que les trois bandes composant les images sont les trois couleurs primaires : rouge, vert et bleu. Une couleur est donc définie selon trois coordonnées d'un système tridimensionnel : $C = x \cdot R + y \cdot G + z \cdot B$.

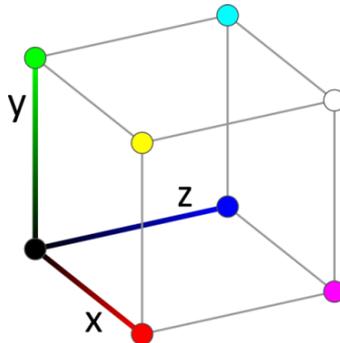


Figure 31 : Système tridimensionnel de l'espace couleur.

Comme l'information finale est véhiculée par trois composantes, cela complexifie fortement l'analyse statistique. En effet, il faudrait comparer statistiquement trois composantes à travers les différentes résolutions et les trois méthodes d'agrégation. La quantité d'informations est telle qu'il serait alors très difficile de mettre en évidence certains phénomènes.

Pour palier à ce problème, plusieurs analyses complémentaires sont alors utilisées, chacune permettant de mettre en évidence un phénomène particulier. Une première analyse consiste à étudier les histogrammes de distribution des couleurs. Pour chaque image, 100 couleurs représentant au mieux la palette globale sont définies, puis chaque pixel est assigné à la couleur la plus proche. Cela donne donc un aperçu (visuel) des classes de couleurs et de leur importance. Une deuxième analyse compare l'évolution

de l'entropie. Cela permet de quantifier le degré d'ordre des images et donc de savoir si la méthode d'agrégation lisse les classes de couleurs (l'entropie diminue), si elle amplifie les extrêmes (entropie augmente) ou si le degré d'ordre reste constant (entropie constante). La dernière analyse compare l'évolution des coordonnées des couleurs dans un espace à deux dimensions. Seuls deux bandes sont alors prises en compte, et malgré le manque d'information par l'absence de la troisième bande, les effets sur les coordonnées des couleurs des méthodes d'agrégation sont bien mis en évidence.

6.3.1. Les orientations

L'histogramme des classes de couleurs (Annexe 10.31, p.86) permet de faire les premières constatations. La méthode de référence conserve bien toutes les classes de couleurs d'origine avec une entropie constante (Annexe 10.32, p.87) à travers les degrés d'agrégations. Par contre, malgré une entropie constante, la méthode sur la moyenne des valeurs ressert l'intervalle de couleur vers le centre. Les teintes proches du rouge (représentant l'orientation *Nord*) disparaissent un peu plus à chaque agrégation. C'est exactement ce qui avait été constaté avec l'analyse sur les valeurs. La méthode sur la moyenne des couleurs, quant à elle, crée de nouvelles classes de couleurs qui n'existent pas dans l'histogramme de base. L'entropie augmente fortement et les couleurs ne correspondent plus à celles de départ. Ces premières constatations confortent les observations uniquement visuelles des images.

L'analyse des coordonnées des couleurs (Annexes 10.17 à 10.19, p.71 à 73) permet d'expliquer les phénomènes engendrés par les agrégations. Comme les couleurs de base sont des couleurs du spectre lumineux avec une luminance et une saturation constante, leurs coordonnées se situent sur les arrêtes du cube de la Figure 31. C'est pour cette raison qu'avec la résolution initiale de 4 mètres, les coordonnées se situent tout autour du graphique. On constate alors que la méthode sur la moyenne des valeurs élimine peu à peu certains points. Ces points sont, en analogie avec les histogrammes, ceux dont la teinte est proche du rouge. Ce système de représentation graphique permet de mieux comprendre ce qui se passe lors de la méthode sur la moyenne des couleurs. En effet, on constate que de nombreux points sont dispersés au centre du graphique. Toutes ces nouvelles coordonnées sont donc de l'information qui a été créée et qui n'existait pas avant. On observe alors de nouvelles couleurs sur les images sans relation avec celle de départ.

6.3.2. Les pentes

Comme constaté auparavant, les différences visuelles sont très faibles (Annexe 10.29, p.84), et cela se traduit dans les analyses sur les couleurs. On observe bien un resserrement de l'étendue des couleurs vers une couleur plus centrale. De plus, pour les deux méthodes alternatives à celle de référence, on remarque bien que le mode se déplace vers les couleurs plus foncées, et donc les valeurs les plus élevées.

Hormis ces différences, le reste des analyses confirme le fait que la méthode d'agrégation choisie n'influence que peu le rendu visuel. L'entropie de la méthode de référence (Annexe 10.30, p.85) diminue beaucoup plus rapidement que les deux autres, mais l'ordre de grandeur étant très faible (l'entropie passe de 6.55 à 6.15 pour la méthode de référence) on peut considérer les trois entropies constantes. L'analyse des coordonnées des couleurs (Annexes 10.14 à 10.16, p.68 à 70) n'apporte pas non plus d'élément supplémentaire afin de différencier les méthodes.

6.3.3. Les courbures

Les courbures sont les plus sensibles à la méthode d'agrégation choisie. Cela est encore confirmé par l'analyse sur les couleurs. La représentation sous forme d'histogrammes (Annexe 10.8 à 10.13, p.62 à 67) permet de bien observer les phénomènes engendrés par les méthodes d'agrégation. Pour la moyenne sur les valeurs, la plupart des classes deviennent insignifiantes et une seule, proche de la couleur neutre, devient prédominante. Par conséquent, on observe une forte diminution de l'entropie. Cela est bien sûr le résultat du resserrement des valeurs autour de la valeur nulle. Pour la moyenne sur les couleurs, on constate bien que les couleurs de base n'existent plus à de plus grandes résolutions et que de nouvelles sont créées.

Les graphiques représentant les coordonnées des couleurs (Annexes 10.20 à 10.28, p.74 à 82) permettent de bien comprendre ce qui se passe lors des différentes agrégations. La donnée de base présente deux axes principaux se rejoignant vers les coordonnées de la couleur jaune. L'un de ces axes représente le dégradé du vert au jaune et l'autre représente celui du rouge au jaune. Pour ce qui est de la moyenne des valeurs, on constate bien qu'au fil des agrégations, la structure reste la même mais que la diversité diminue fortement. Il y a une disparition du vert et du rouge et une conservation du jaune. Par contre, la moyenne des couleurs ne conserve pas du tout la structure de base. Dès la première agrégation les couleurs sont dispersées entre les deux axes de la structure de départ (création d'une multitude de nouvelles couleurs). Par la suite, la diversité diminue progressivement en resserrant les coordonnées des couleurs autour d'un axe moyen situé entre les deux axes principaux de départ.

6.3.4. Le Modèle Numérique de Terrain

Le Modèle Numérique de Terrain n'est pas représenté en couleurs mais en tons de gris. Par conséquent une analyse sur l'évolution des couleurs à travers les agrégations n'est pas adaptée. De plus, le fait que le mode de représentation soit un relief ombré, et donc que l'intensité de la luminance n'ait aucun rapport avec l'altitude, rend l'analyse des luminances inappropriée. Mais comme vu précédemment, ces paramètres font que visuellement, la méthode d'agrégation choisie n'influence que très peu l'aspect visuel de cette donnée.

6.4. Synthèse des analyses comparatives

Tout d'abord, les analyses visuelles ont permis d'observer les conséquences du choix de la méthode d'agrégation sur le rendu des images, de la résolution de base à 4 mètres (où toutes les images sont identiques) à la résolution la plus grossière considérée dans cette étude, 256 mètres. On constate que la sensibilité au choix de la méthode d'agrégation est différente selon la donnée considérée. Certaines sont très sensibles à ce choix, telles que les orientations ou les courbures, et d'autres beaucoup moins, telles que le Modèle Numérique de Terrain ou les pentes. L'analyse visuelle permet de montrer que la méthode de référence garantit une bonne adaptation des données affichées à travers les différentes résolutions. Par contre les deux méthodes alternatives engendrent des incohérences de plus en plus importantes à chaque niveau d'agrégation.

Les analyses statistiques sur les valeurs et les couleurs confirment les observations visuelles. Une méthode d'agrégation inadaptée, telle que la moyenne des valeurs ou des couleurs, peut transmettre une information visuelle et numérique erronée. L'interprétation précise et cohérente de ces données n'est alors pas possible, que ce soit à une échelle déterminée ou au travers de plusieurs échelles.

7

Implémentation des données dans l'interface

Cette recherche ne serait pas complète sans la programmation d'une interface cartographique interactive utilisant les concepts qui y sont définies. Cela permet de confronter la théorie à une utilisation réelle. En effet, de nouvelles questions apparaissent dès qu'il s'agit de mettre en place une telle interface. Quand et où réaliser les calculs d'agrégation ? Comment transférer efficacement toutes les informations à l'utilisateur ? De plus, cette interface offre la possibilité de comparer les méthodes d'agrégation de références à celles utilisées couramment dans la plupart des interfaces existantes.

7.1. Calcul des données

Pour la mise en œuvre de l'interface, toutes les images pour chaque donnée, à toutes les résolutions et selon toutes les méthodes d'agrégation, ont été calculées en amont. Ce choix a été fait mais le calcul en temps réel d'agrégation des données ainsi que celui des données dérivées du MNT (pentes, orientations et courbures) peut également être envisagé que ce soit du côté serveur où chez le client (Figure 32). Cela permettrait de stocker un minimum de données sur le serveur, seulement les données de base. La lenteur de ces processus d'agrégation en temps réel (qui peut certes fortement diminuer avec les avancées technologiques) serait la principale limite à ce choix. Mais même mise à part cette lenteur de calcul, son utilité n'est pas si évidente. En effet, les données étudiées dans cette recherche sont très peu variables dans le temps. Par conséquent, les processus d'agrégation ne seraient réalisés que lors de la mise à jour des données, soit environ tous les 5 ans pour la statistique de superficie (car basée sur le renouvellement des images aériennes), tous les 10 ans pour la densité de population (car basée sur le recensement fédéral) et une durée indéterminée (supérieure à 10 ans) pour le Modèle Numérique de Terrain. Il n'est donc pas forcément judicieux d'envisager un calcul d'agrégation en temps réel pour ce type de données.

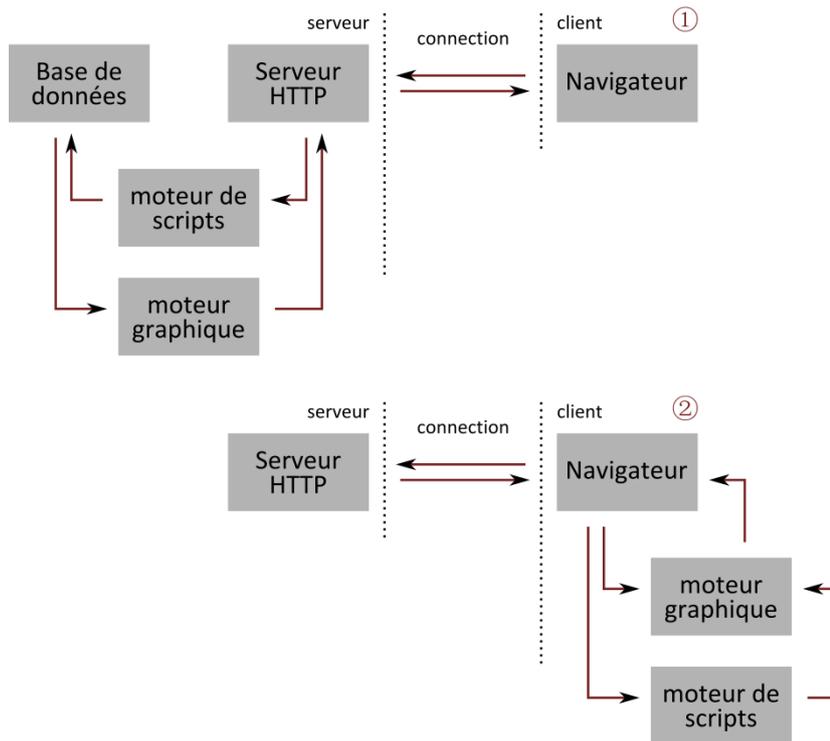


Figure 32 : Calcul en temps réel de l'agrégation des données. En ①, le calcul se fait côté serveur, plus rapide mais fortement ralenti si plusieurs demandes arrivent simultanément. En ②, le calcul se fait côté client, de plus en plus envisageable avec les prochaines avancées technologiques. (Pointet, 2007)

7.2. Transfert des données

Le choix de calculer toutes les données en amont a été fait afin d'optimiser le temps de réaction de l'interface car dès que la donnée et l'échelle de représentation sont choisies, l'image correspondante peut être chargée (Figure 33).

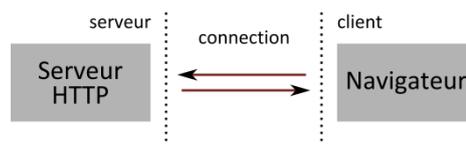


Figure 33 : Réseau simple client-serveur. Le client envoie une requête au serveur (type de donnée, coordonnées du centre de la représentation, échelle de représentation) et le serveur lui renvoie l'image correspondante. (Pointet, 2007)

Mais malgré cette rapidité de réponse, les images des résolutions les plus fines mettent un certain temps à se charger (transfert de l'image du serveur au client). Bien sûr, ce temps dépend fortement de la performance (vitesse) de la connexion Internet du client. Une solution pour optimiser ce problème serait de diviser les images en tuiles (*tiles* en anglais) et de ne transférer que ceux correspondant au champ de vision de l'utilisateur. Ainsi, ce qui n'est pas visible n'est pas transféré. Le volume de données à transférer, et donc le temps de chargement, serait alors quasiment identique à chaque requête. Il

dépendra uniquement de la surface de la fenêtre de visualisation de l'interface. Toutefois cela implique de recharger de nouvelles tuiles lorsque l'utilisateur déplace la zone de visibilité. Mais la petite taille (poids en octets) des tuiles devrait permettre un chargement rapide. Un travail rigoureux de création et d'indexation des tuiles et par contre nécessaire afin que les informations puissent être sélectionnées, transférée puis recomposées correctement.

7.3. Solution envisageable actuellement

Les différentes options présentées précédemment pour le calcul et le transfert des données mettent en évidence une solution adaptée aux technologies actuelles. Le temps de traitements en temps réel des données ainsi que leur faible fréquence de mise à jour préconise un calcul en amont de toutes les données. Les capacités de stockage des serveurs permettent le choix de cette solution. Pour ce qui est du transfert, l'utilisation de tuiles semble la solution la plus efficace. Malheureusement pas testée dans cette interface mais son efficacité peut être constatée lors du chargement des images satellites de *Google Maps* (www.maps.google.com).

8

Conclusion : Une analyse plus pertinente

Ce travail a bien mis en évidence qu'il existe différentes procédures mathématiques qui permettent l'agrégation de données raster, mais que toutes ne sont pas adaptées. Par conséquent, une méthode de référence respectant les concepts édictés dans cette recherche est proposée pour chaque type de donnée (MNT, pentes, orientations, courbures, nominales et ordinales). Il a également été défini quels sont les calculs permettant de trouver la résolution d'une donnée la mieux adaptée à l'échelle de représentation. Et finalement, une proposition d'une solution technique pour une implémentation efficace de ces principes dans une interface réelle.

Ces interfaces cartographiques interactives sont souvent utilisées pour parcourir les données disponibles. Le but premier d'utilisation est donc exploratoire. Les utilisateurs naviguent dans l'espace géographique (latitude, longitude) et à travers les différents niveaux de zooms, puis interprètent les informations qui leurs sont envoyées. Il est donc important que ces informations soient cohérentes avec l'échelle de représentation : les processus d'agrégation ne doivent pas fausser les données non seulement visuellement mais aussi numériquement. Car si le rendu visuel est important dans un premier temps, la possibilité de transmettre les valeurs numériques des images est également nécessaire pour une analyse plus complète.

Il faut également souligner qu'aucun SIG de bureau ne laisse la possibilité d'adapter "automatiquement" la résolution de données raster à l'échelle de représentation. Or le but premier de ces logiciels est bien l'analyse et l'exploration de données spatiales. Il faudrait que l'utilisateur soit guidé dans le choix des résolutions des données. Pour telle échelle de représentation finale, correspond telle résolution.

En conclusion, un SIG respectant la relation entre l'échelle de représentation et la résolution des données en utilisant les méthodes d'agrégation de référence présentées dans cette recherche permet une exploration et une analyse pertinente de données raster.

9 Bibliographie

Cao, C., & Lam, N. S.-N. (1997). Understanding the Scale and Resolution Effects in Remote Sensing and GIS. *Scale in Remote Sensing and GIS* .

Chrisman, N. (2002). *Exploring Geographic Information Systems*. John Wiley & Sons.

Joao, E. M. (1998). *Causes and consequences of map generalisation*. Taylor & Francis Ltd.

Kalbermatten, M. (2009). *Multiscale analysis of high resolution digital elevation models using the wavelet transform*. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).

Lam, N. S.-N., & Quattrochi, D. A. (1992). On the Issues of Scale, Resolution, and Fractal Analysis in the Mapping Sciences. *The Professional Geographer* .

Li, B., Wilkinson, G. G., & Khaddaj, S. (2001). Cell-based Model For GIS Generalisation. *Sixth International Conference on GeoComputation* .

Li, Z., Zhu, Q., & Gold, C. (2005). *Digital terrain modeling : principles and methodology*. CRC Press.

Marceau, D. J. (1999). The scale issue in social and natural sciences. *Canadian Journal of Remote Sensing* .

Marceau, D. J., & Hay, G. J. (1999). Remote sensing contributions to the scale issue. *Canadian Journal of Remote Sensing* .

McMaster, R. B., & Veregin, H. (1997). Visualizing Cartographic Generalization. *Proceedings AutoCarto 13* .

Openshaw, S. (1984). *The Modifiable Areal Unit Problem*. (CATMOG, Éd.) Geo Books, Norwich.

Pointet, A. (2007). *Rencontre de la science de l'information géographique et de l'anthropologie culturelle : Modélisation spatiale et représentation de phénomènes culturels*. École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).

Pointet, A., Perafan, C., Caloz, R., Dolci, C., & Geiger, S. (2004). *Cultural Land use Analysis Methodologie*. Inter-American Development Bank, Washington and Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne.

Quattrochi, D. A., & Goodchild, M. F. (1997). *Scale in Remote Sensing and GIS*. CRC Press.

Sheppard, E., & McMaster, R. B. (2004). *Scale and Geographic Inquiry*. Blackwell Publishing.

Smith, M., Goodchild, M., & Longley, P. (2007). *Geospatial Analysis*. Matador.

Swisstopo. (2007). *geodata-news 14*. Office Fédéral de Topographie.

Tobler, W. (1987). Measuring Spatial Resolution. *International Workshop on Geographic Information System* .

Tobler, W. (1988). Resolution, Resampling, and all that. *International Geographical Union Global Database Planing Project* .

Torun, A., Köbben, B., & Lemmens, R. (2000). Processing spatial data on the Internet. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* .

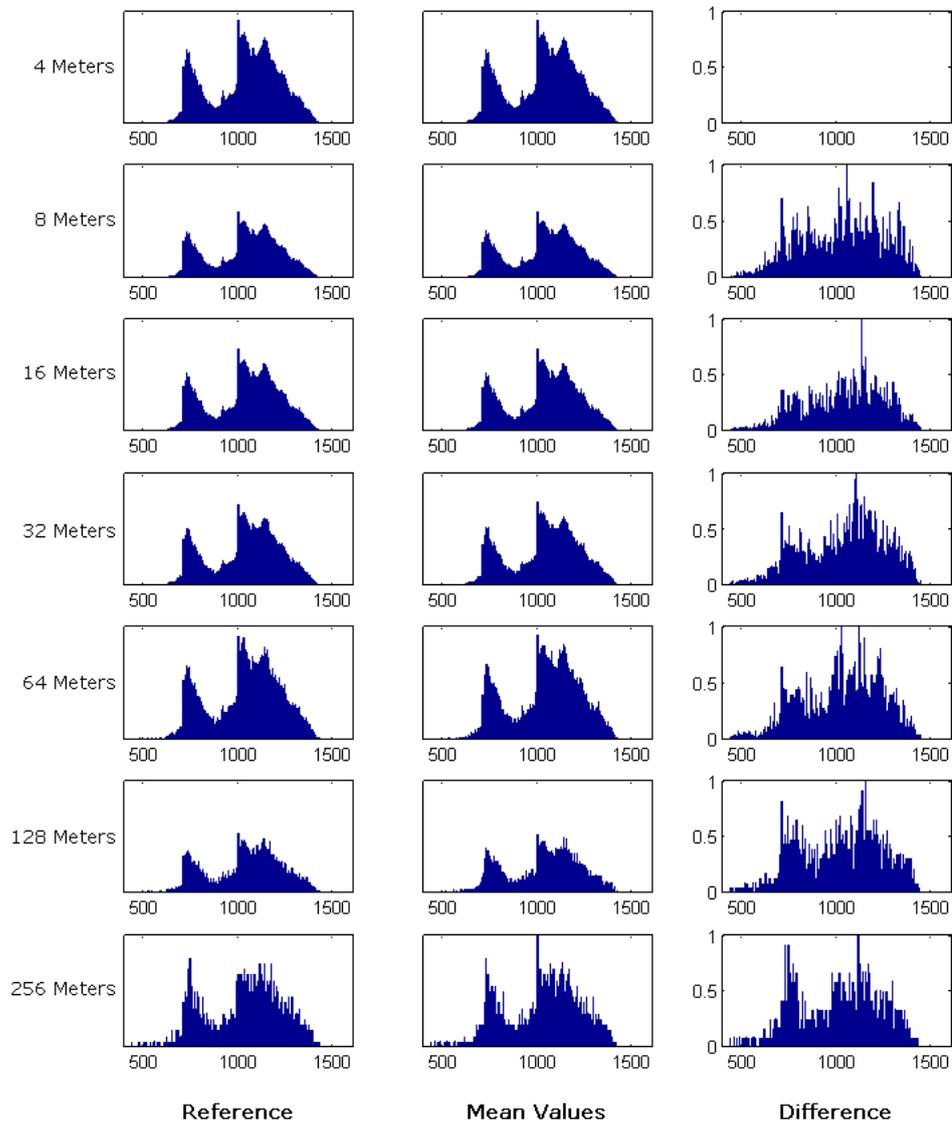
10 Annexes au rapport

10.1. Nomenclature Standard NOAS04

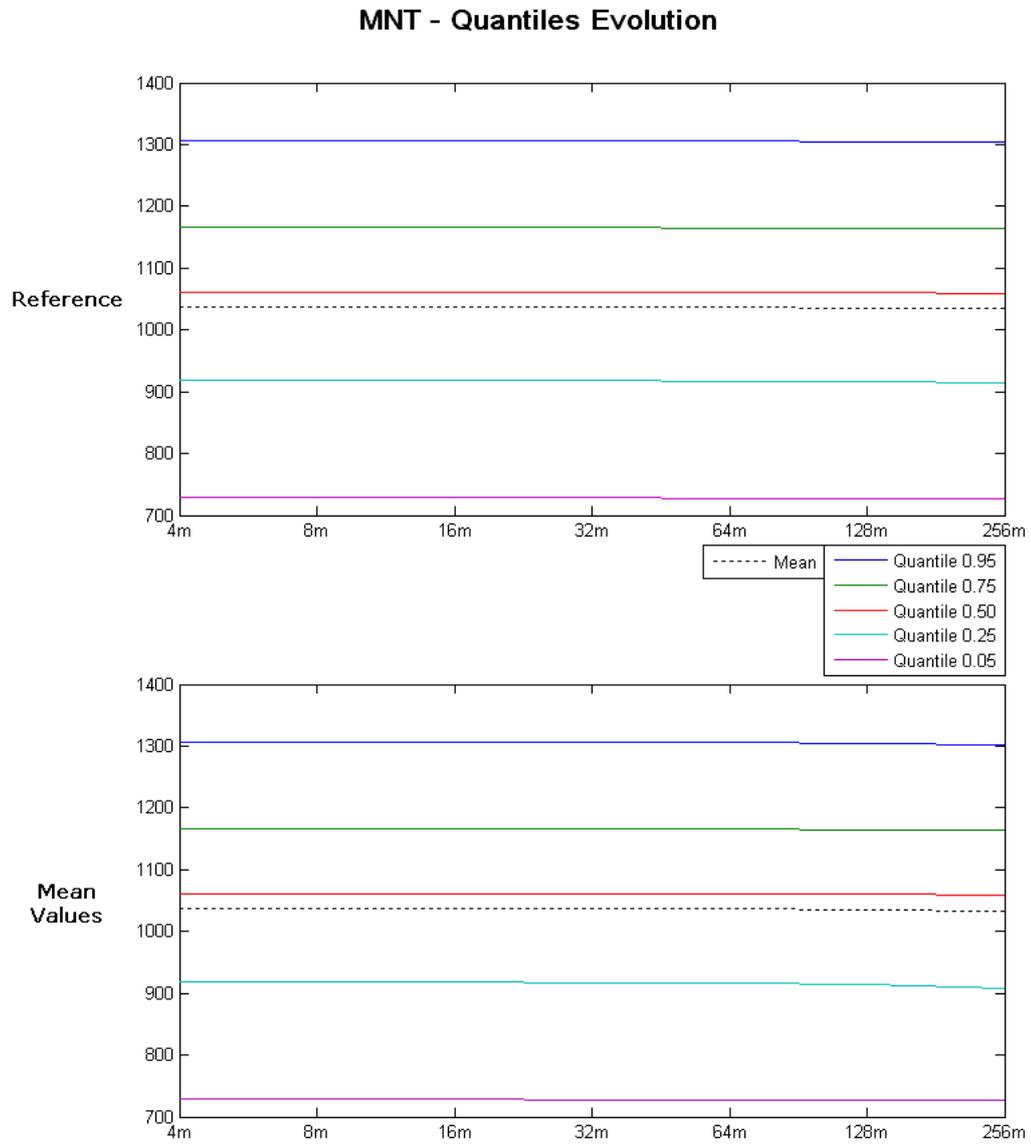
Surfaces d'habitat et d'infrastructure		Surfaces agricoles	
1	Aires industrielles et artisanales	6	Agriculture fourragère, viticulture, horticulture
2	Aires de bâtiments	7	Terres arables
3	Surfaces de transport	8	Prairies naturelles, pâturages locaux
4	Surfaces d'infrastructure spéciale	9	Alpages
5	Espaces verts et lieux de détente	10	Forêt (sans forêt boissonnante)
		11	Forêt boissonnante
		12	Autres surfaces boisées
		13	Forêt clairsemée
		14	Forêt clairsemée
		15	Forêt clairsemée (sur surfaces agricoles)
		16	Forêt clairsemée (sur surfaces improductives)
		17	Forêt clairsemée (sur surfaces improductives)
		18	Forêt clairsemée (sur surfaces improductives)
		19	Forêt normale
		20	Forêt normale
		21	Forêt normale
		22	Forêt normale
		23	Forêt normale
		24	Forêt normale
		25	Forêt normale
		26	Forêt normale
		27	Forêt normale
		28	Forêt normale
		29	Forêt normale
		30	Forêt normale
		31	Forêt normale
		32	Forêt normale
		33	Forêt normale
		34	Forêt normale
		35	Forêt normale
		36	Forêt normale
		37	Forêt normale
		38	Forêt normale
		39	Forêt normale
		40	Forêt normale
		41	Forêt normale
		42	Forêt normale
		43	Forêt normale
		44	Forêt normale
		45	Forêt normale
		46	Forêt normale
		47	Forêt normale
		48	Forêt normale
		49	Forêt normale
		50	Forêt normale
		51	Forêt normale
		52	Forêt normale
		53	Forêt normale
		54	Forêt normale
		55	Forêt normale
		56	Forêt normale
		57	Forêt normale
		58	Forêt normale
		59	Forêt normale
		60	Forêt normale
		61	Forêt normale
		62	Forêt normale
		63	Forêt normale
		64	Forêt normale
		65	Forêt normale
		66	Forêt normale
		67	Forêt normale
		68	Forêt normale
		69	Forêt normale
		70	Forêt normale
		71	Forêt normale
		72	Forêt normale
		73	Forêt normale
		74	Forêt normale
		75	Forêt normale
		76	Forêt normale
		77	Forêt normale
		78	Forêt normale
		79	Forêt normale
		80	Forêt normale
		81	Forêt normale
		82	Forêt normale
		83	Forêt normale
		84	Forêt normale
		85	Forêt normale
		86	Forêt normale
		87	Forêt normale
		88	Forêt normale
		89	Forêt normale
		90	Forêt normale
		91	Forêt normale
		92	Forêt normale
		93	Forêt normale
		94	Forêt normale
		95	Forêt normale
		96	Forêt normale
		97	Forêt normale
		98	Forêt normale
		99	Forêt normale
		100	Forêt normale

10.2. Histogrammes de distribution des valeurs du MNT

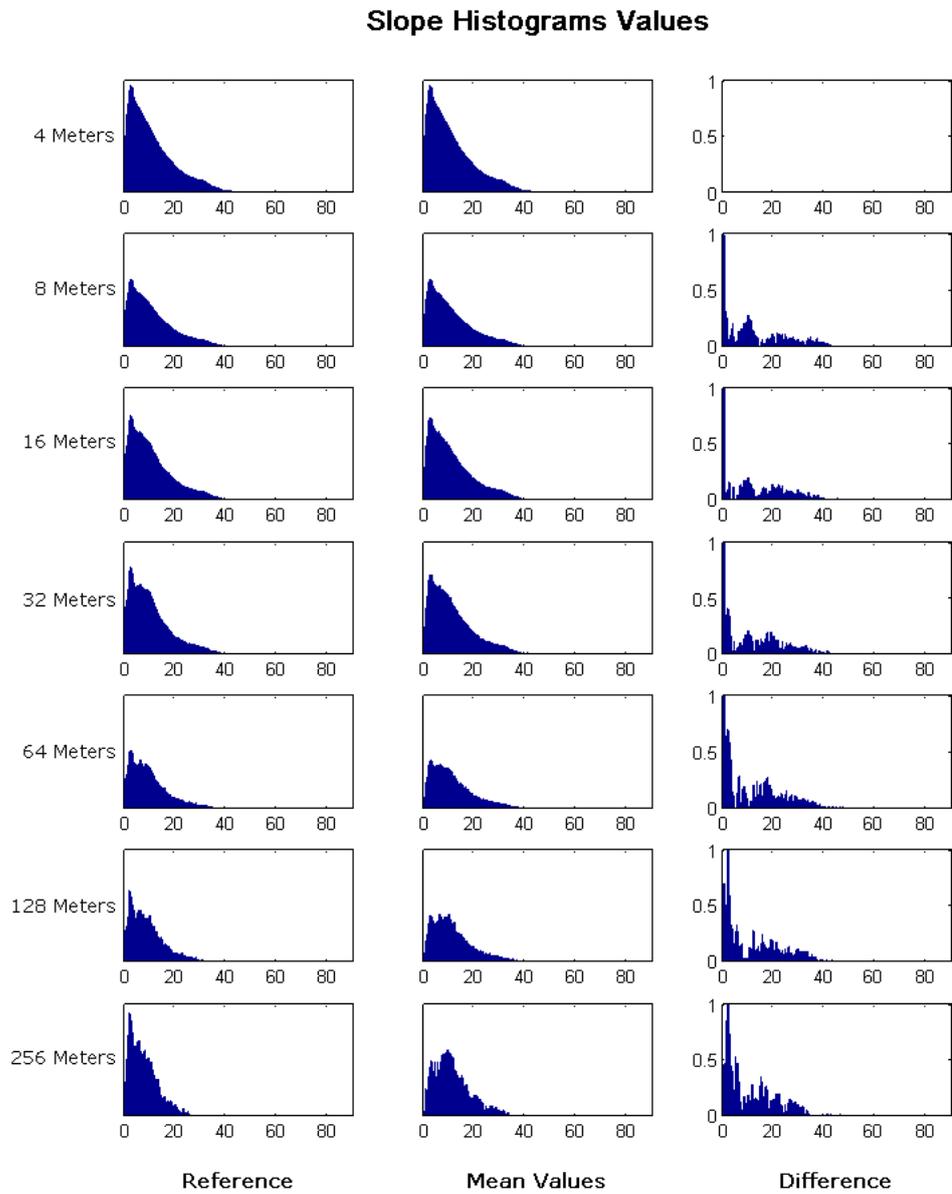
MNT Histograms Values



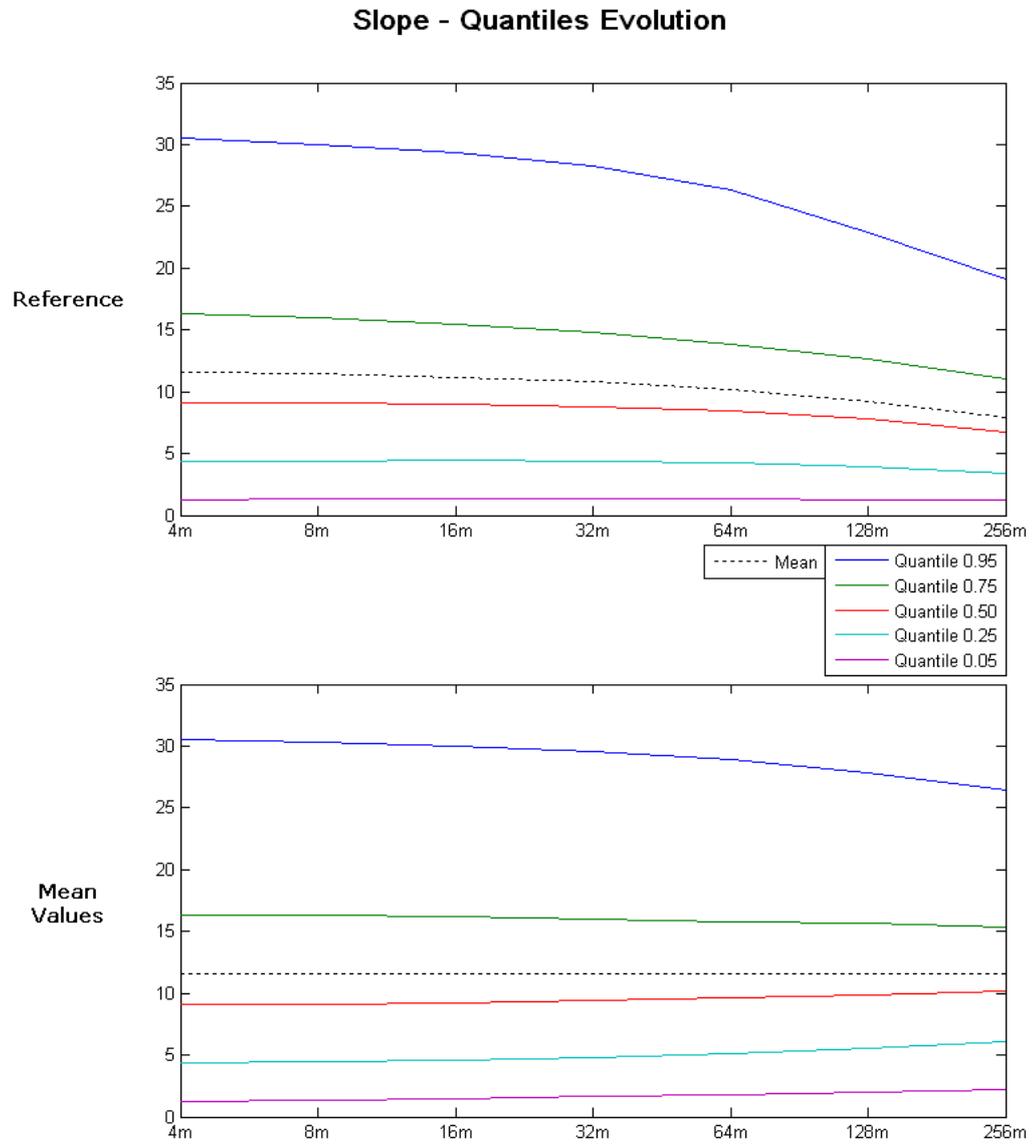
10.3. MNT : graphiques de l'évolution des quantiles



10.4. Histogrammes de distribution des valeurs des pentes

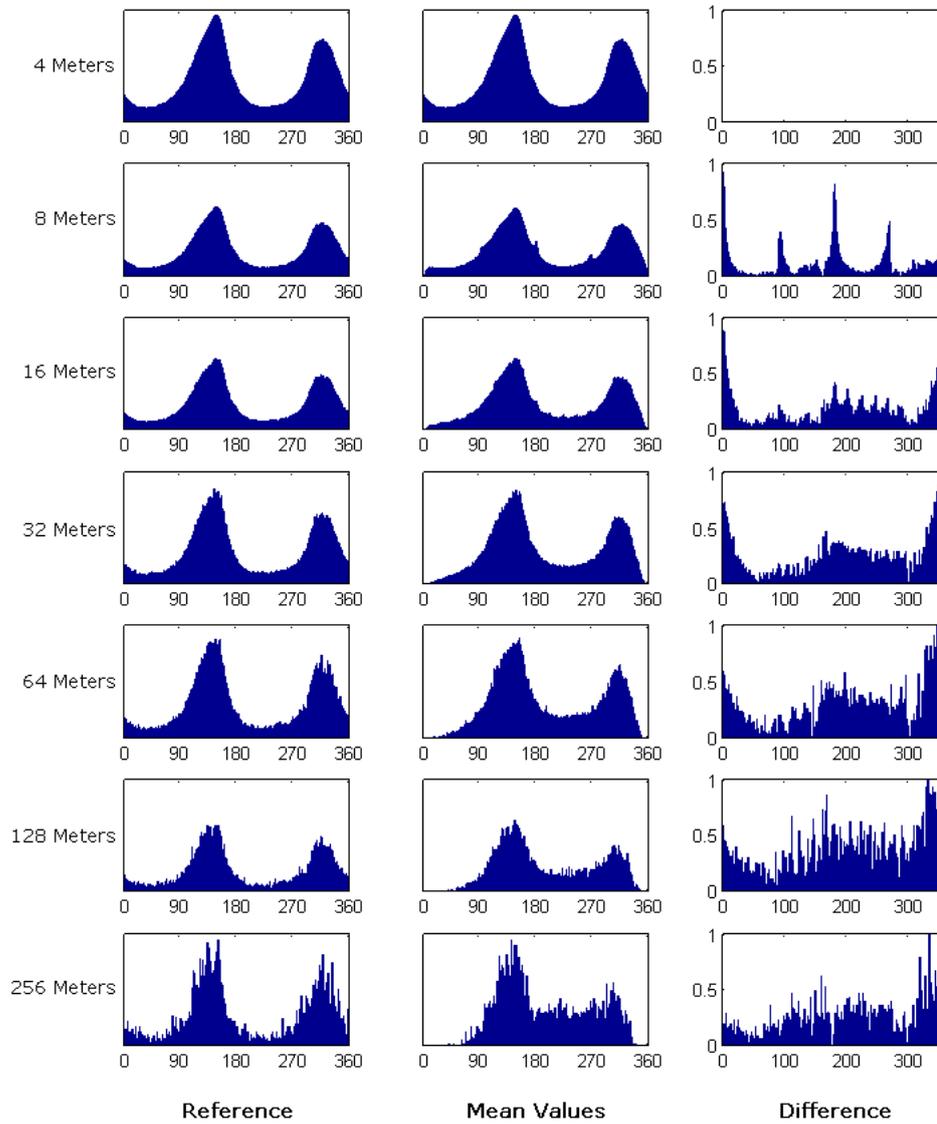


10.5. Pentes : graphiques de l'évolution des quantiles

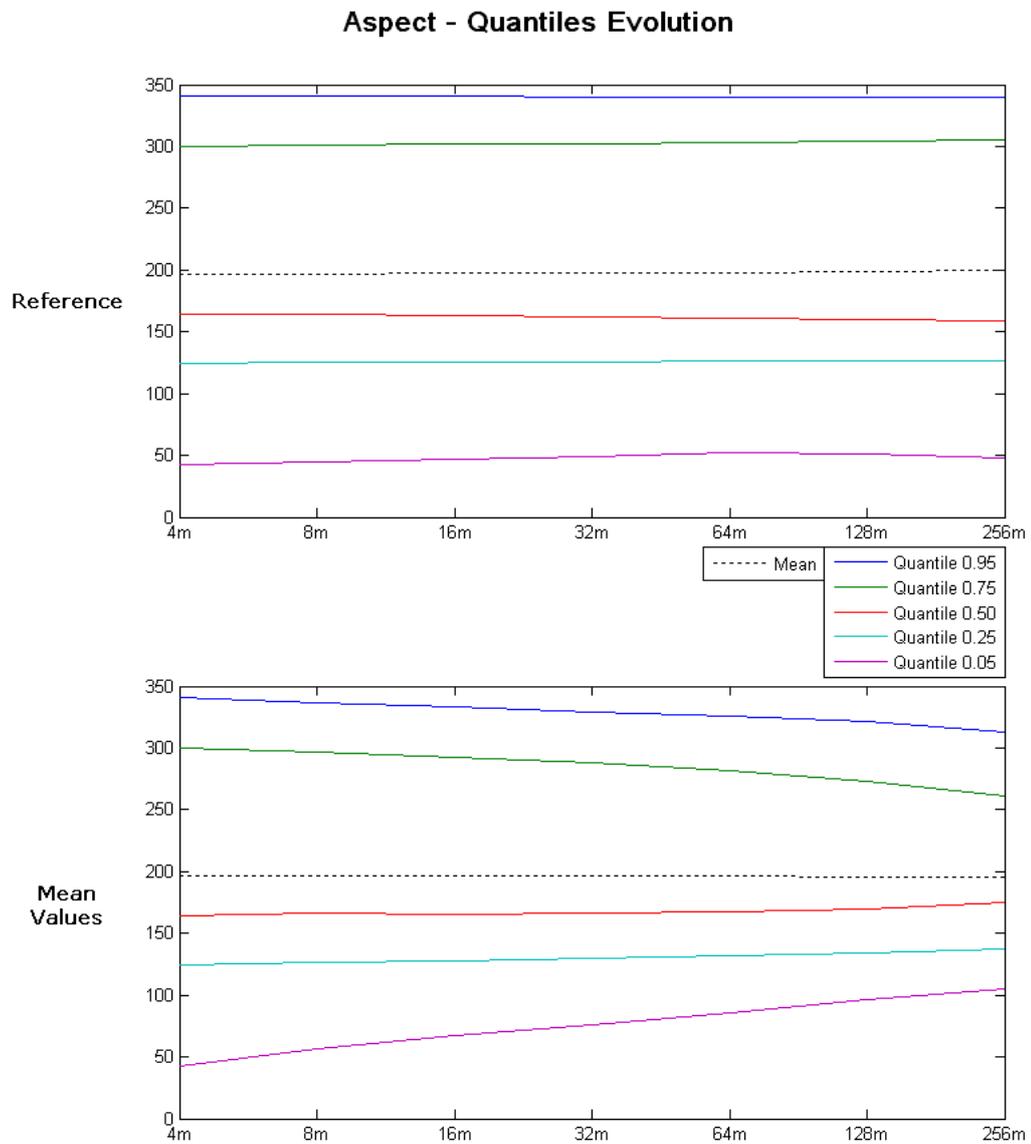


10.6. Histogrammes de distribution des valeurs d'orientation

Aspect Histograms Values

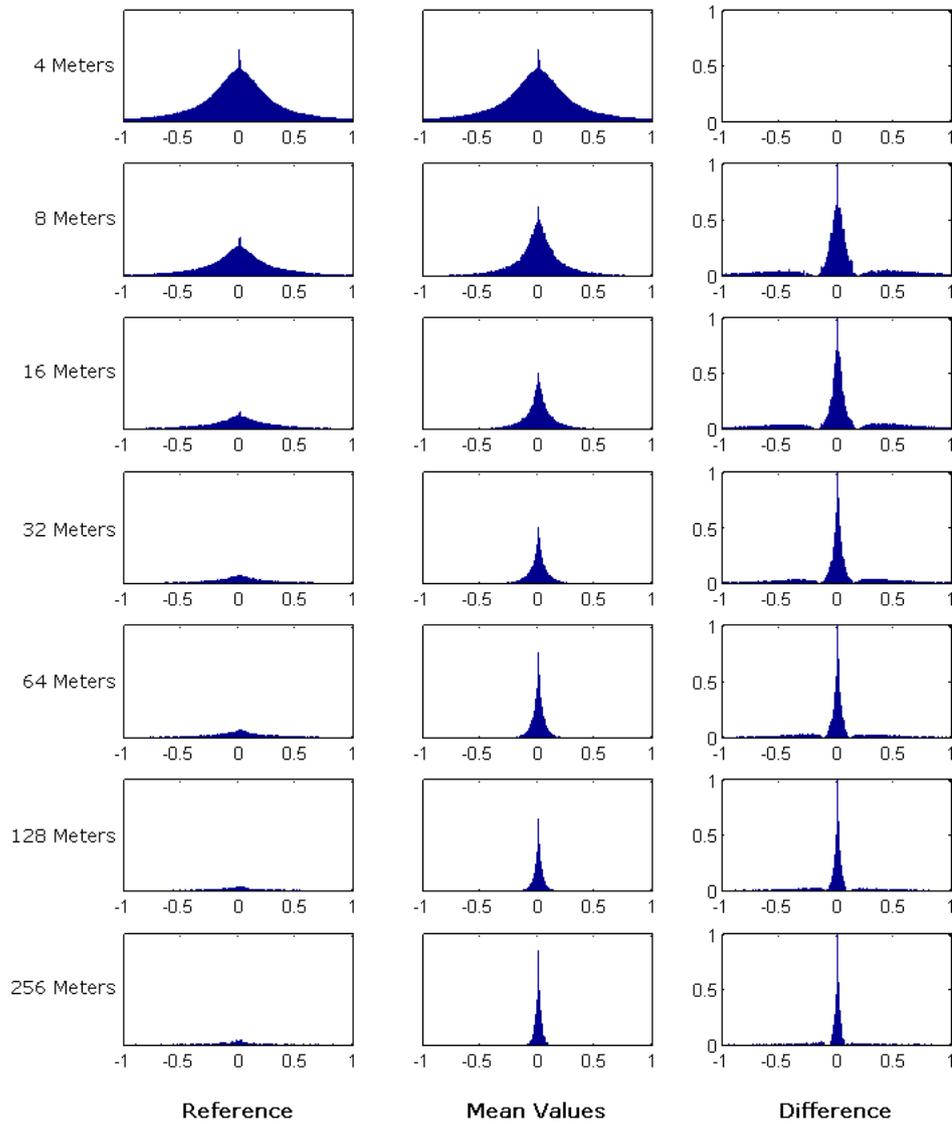


10.7. Orientations : graphiques de l'évolution des quantiles

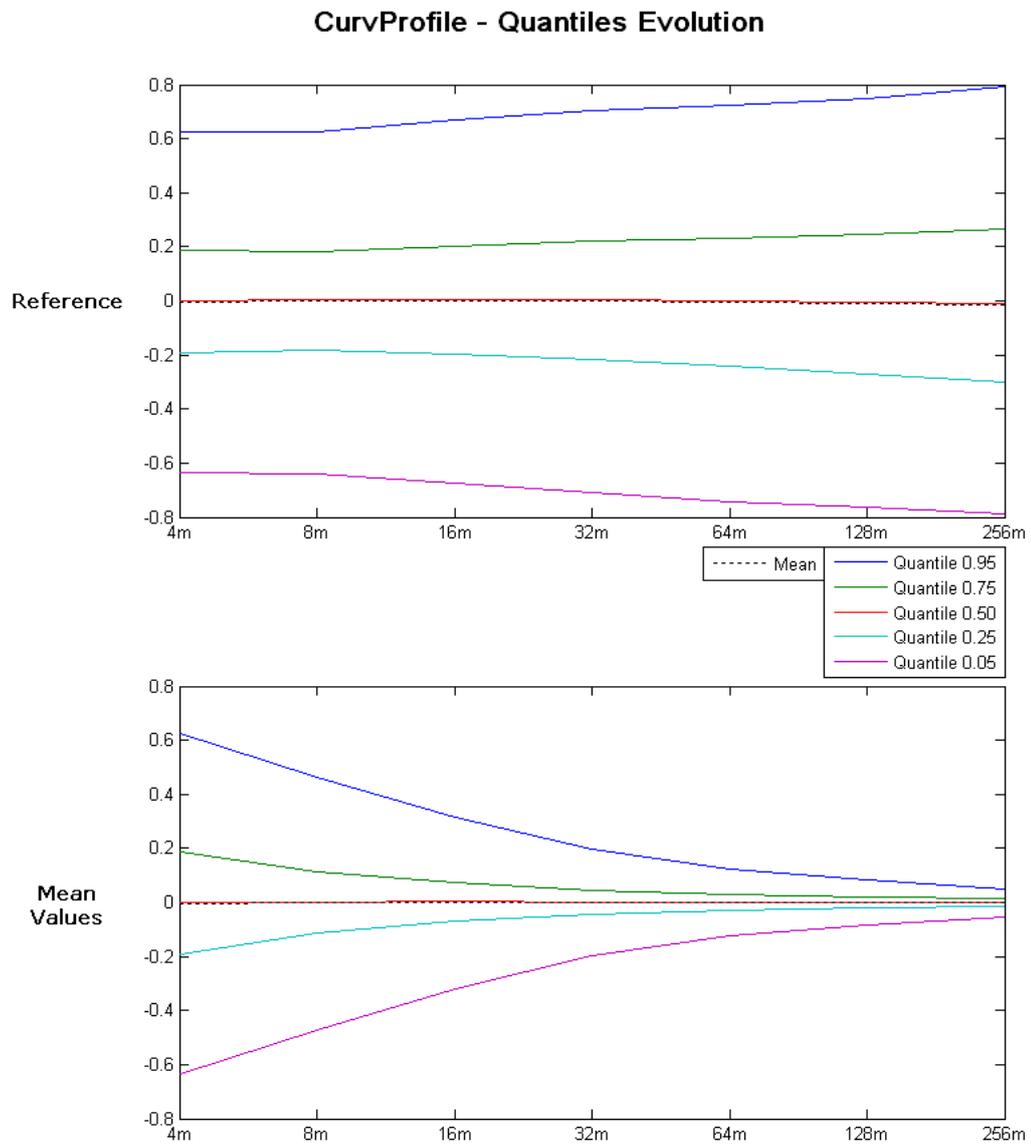


10.8. Histogrammes de distribution des valeurs des courbures en profil

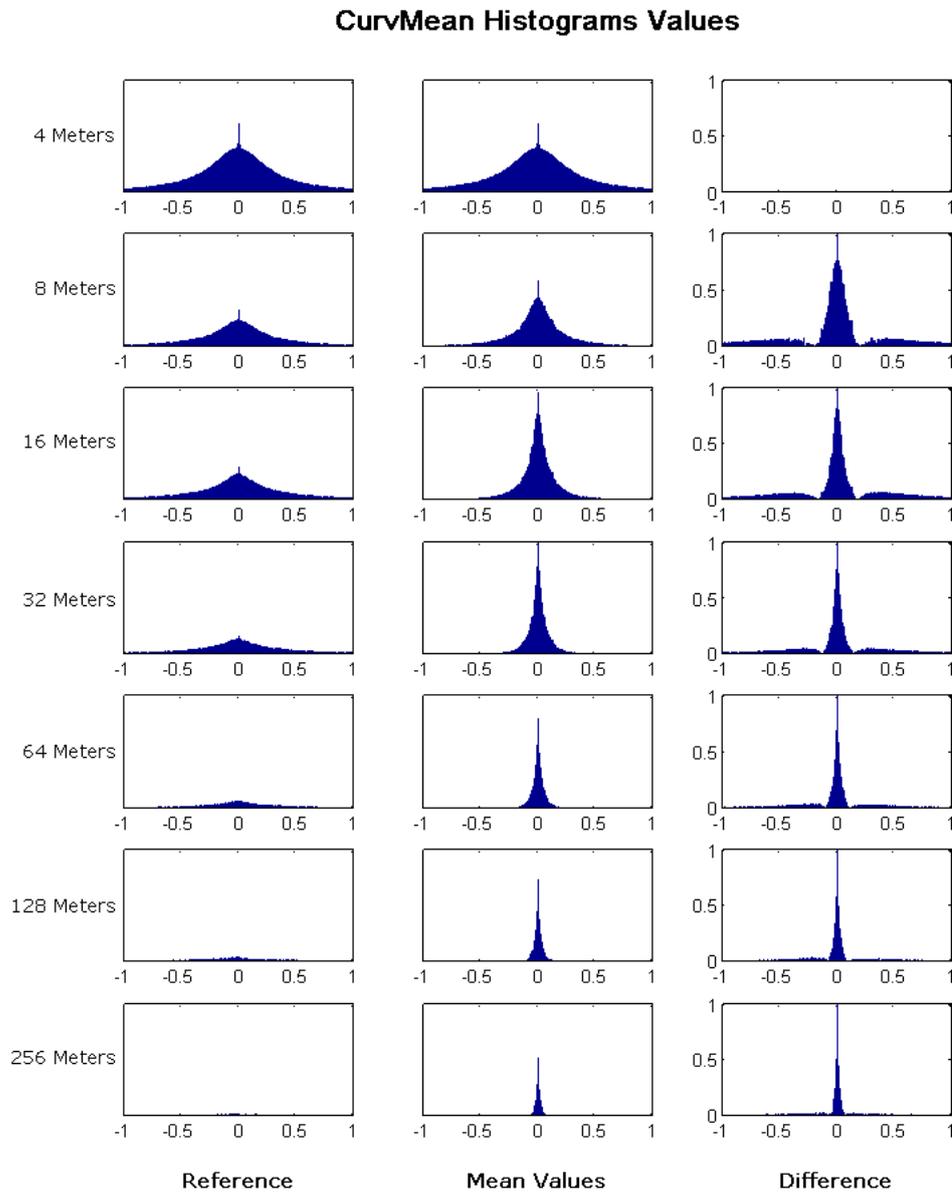
CurvProfile Histograms Values



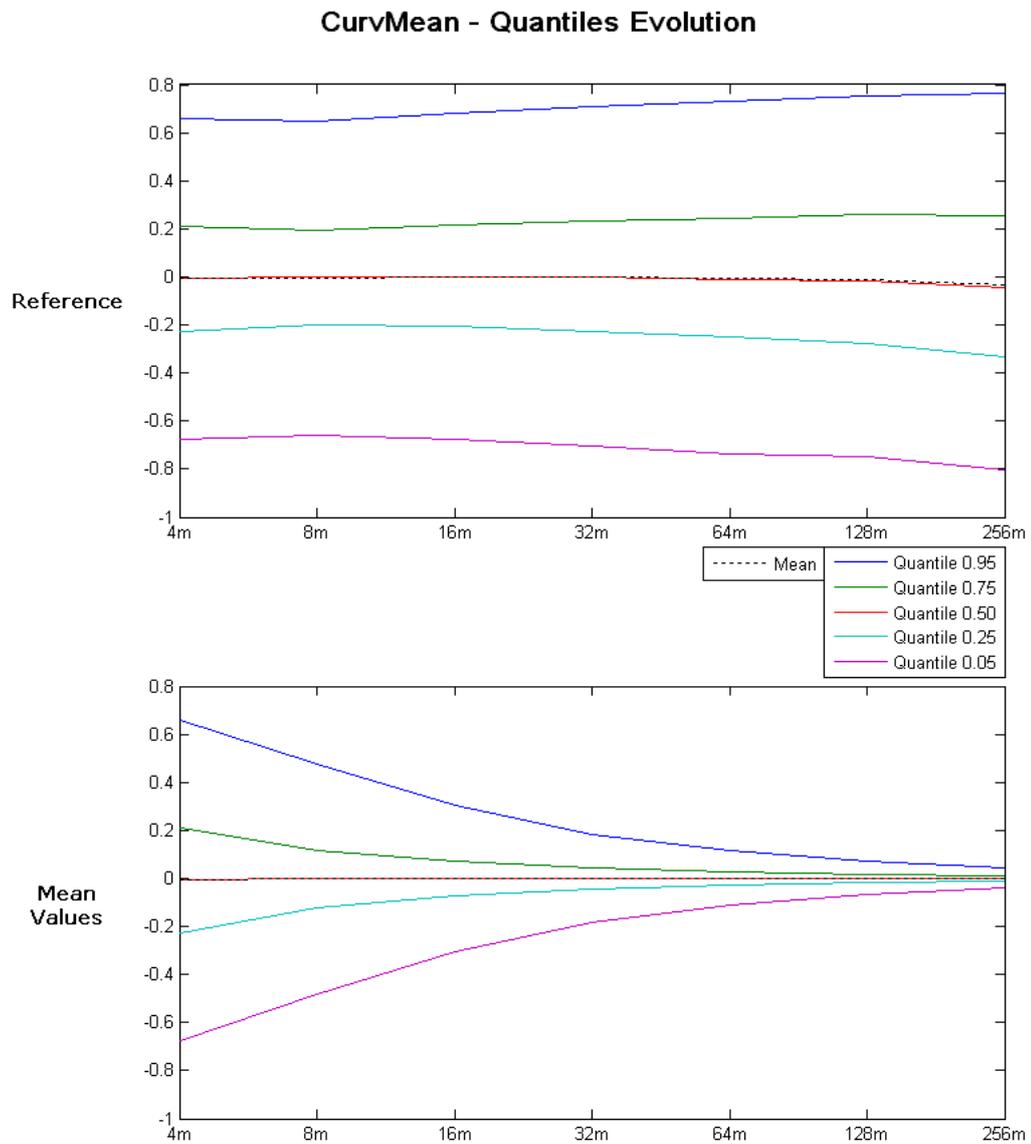
10.9. Courbures en profil : graphiques de l'évolution des quantiles



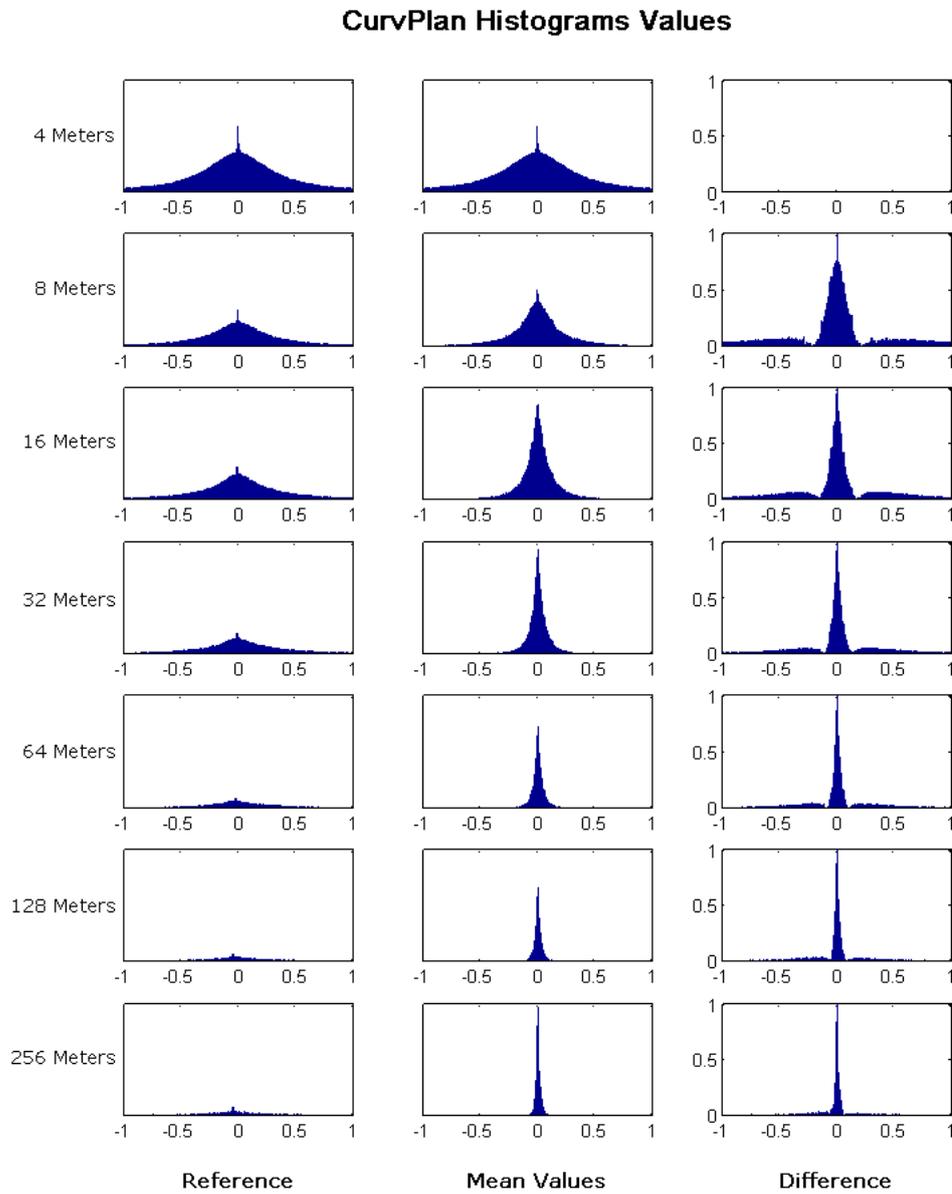
10.10. Histogrammes de distribution des valeurs des courbures moyennes



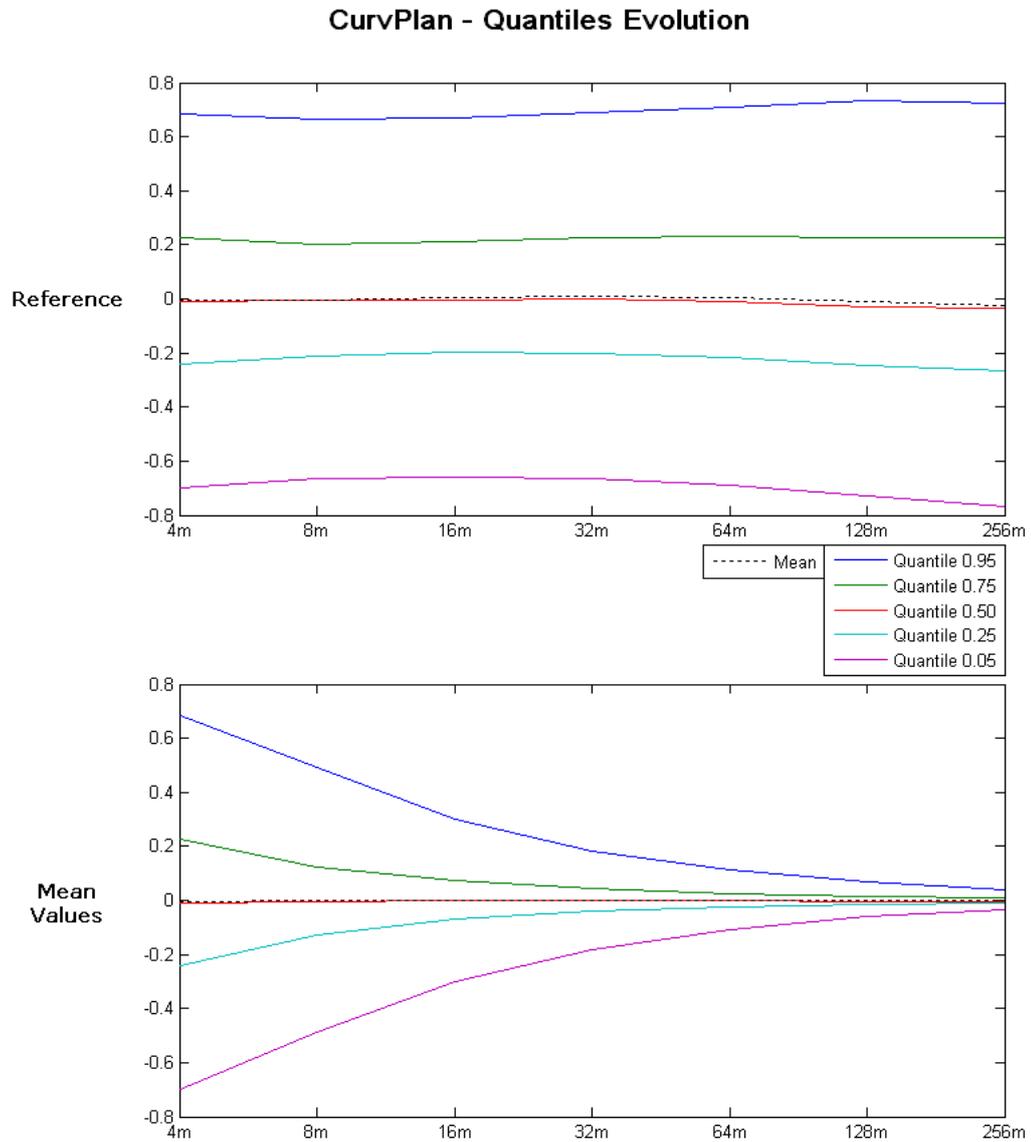
10.11. Courbures moyennes : graphiques de l'évolution des quantiles



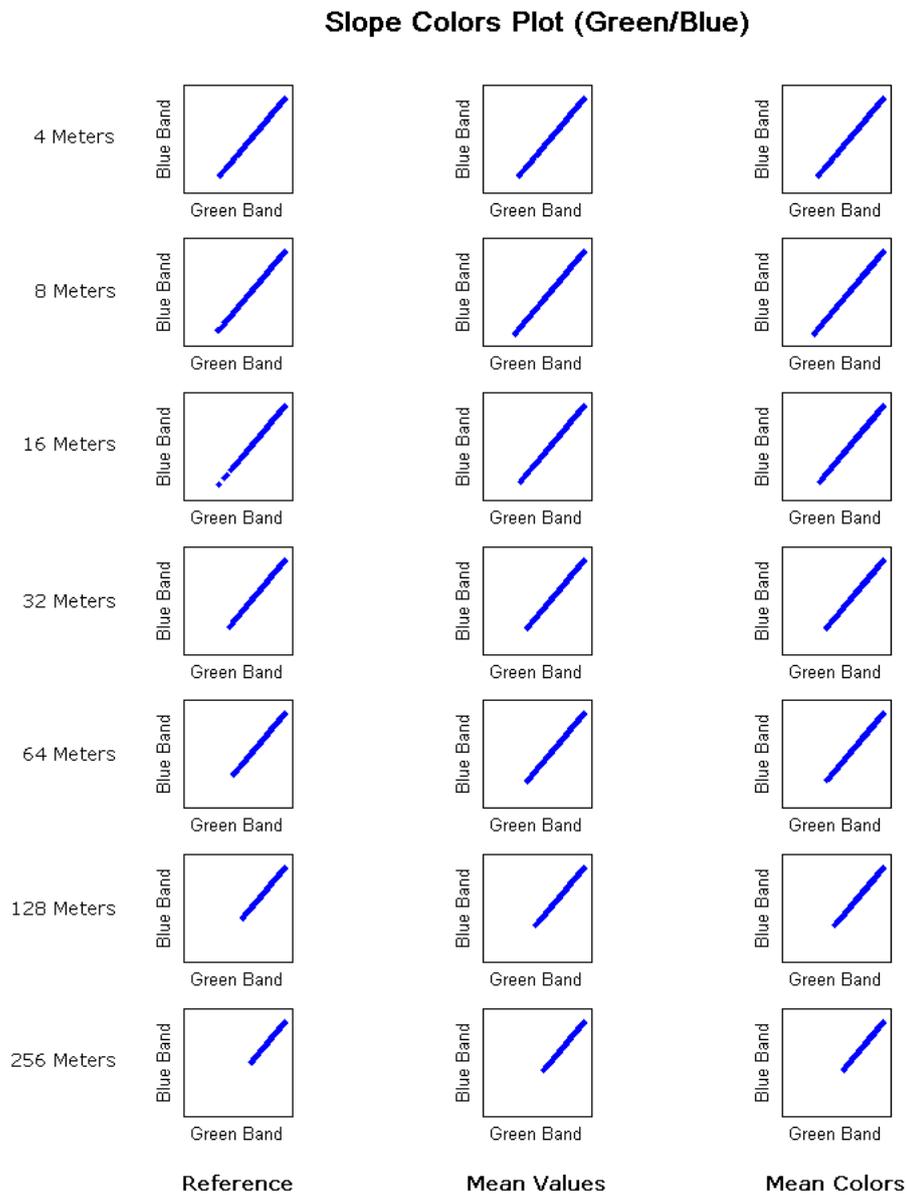
10.12. Histogrammes de distribution des valeurs des courbures en plan



10.13. Courbures en plan : graphiques de l'évolution des quantiles

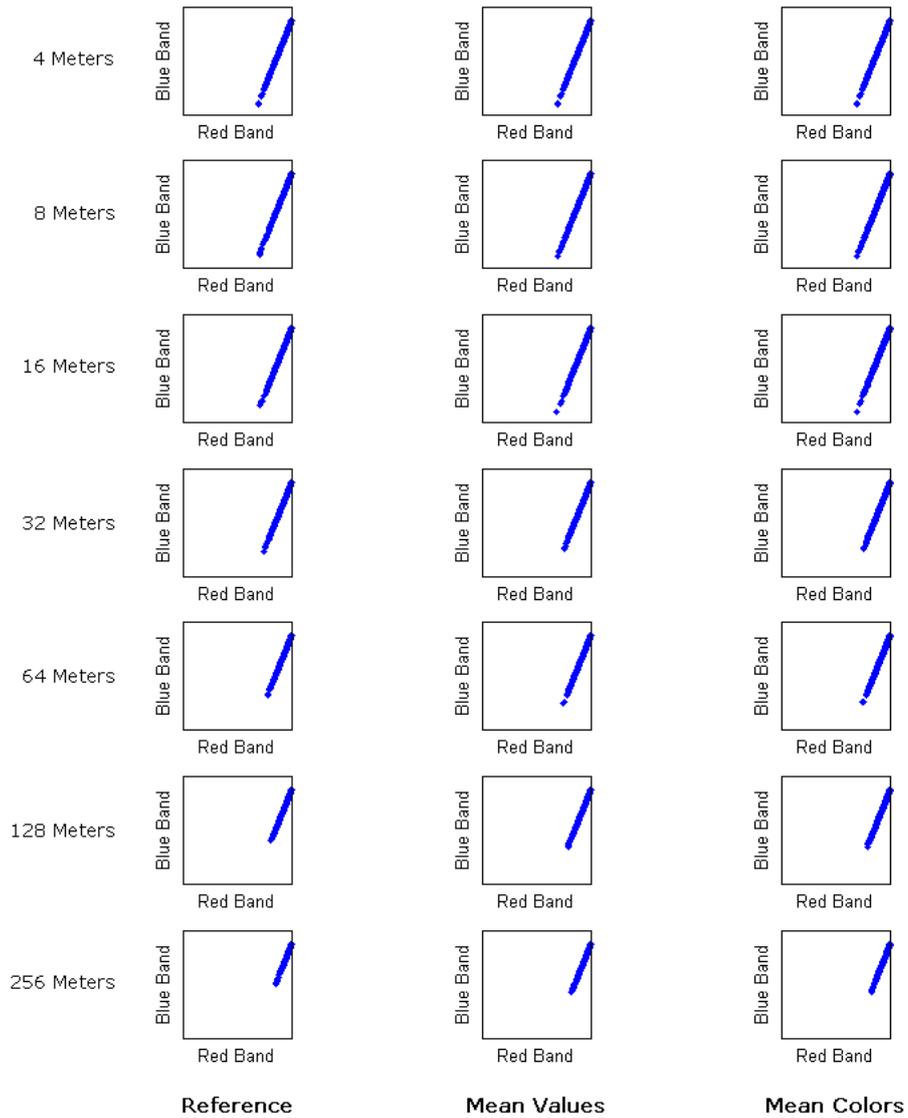


10.14. Pentes : graphiques de la distribution des pixels dans l'espace couleur Vert/Bleu

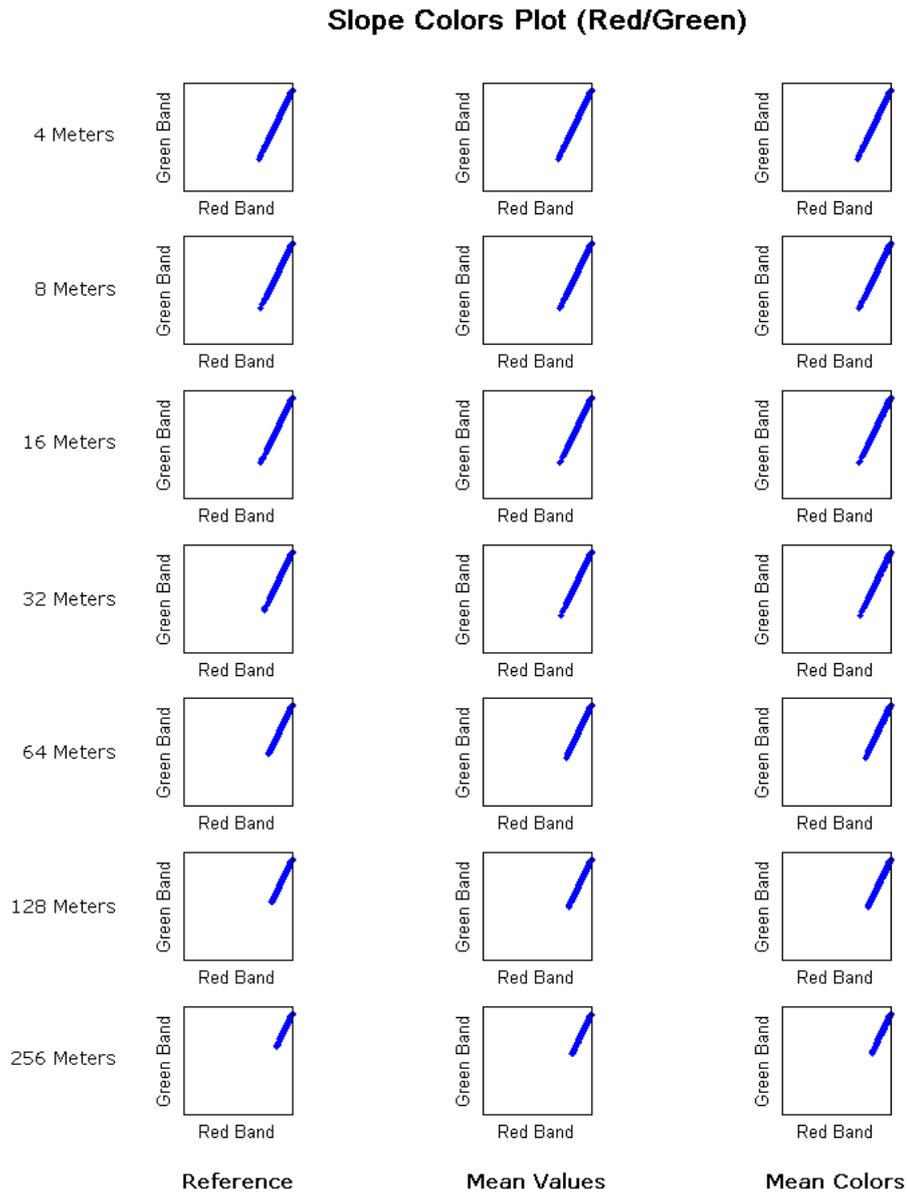


10.15. Pentes : graphiques de la distribution des pixels dans l'espace couleur Rouge/Bleu

Slope Colors Plot (Red/Blue)

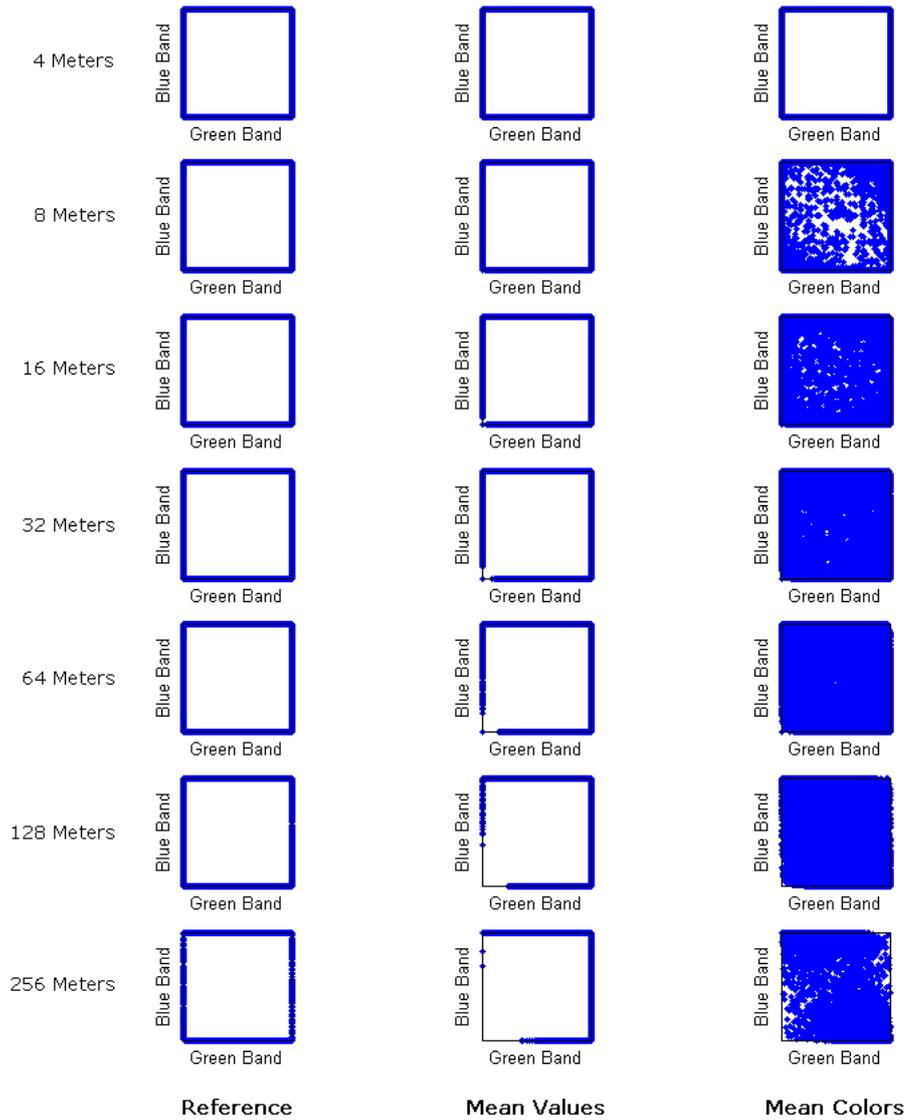


10.16. Pentes : graphiques de la distribution des pixels dans l'espace couleur Rouge/Vert

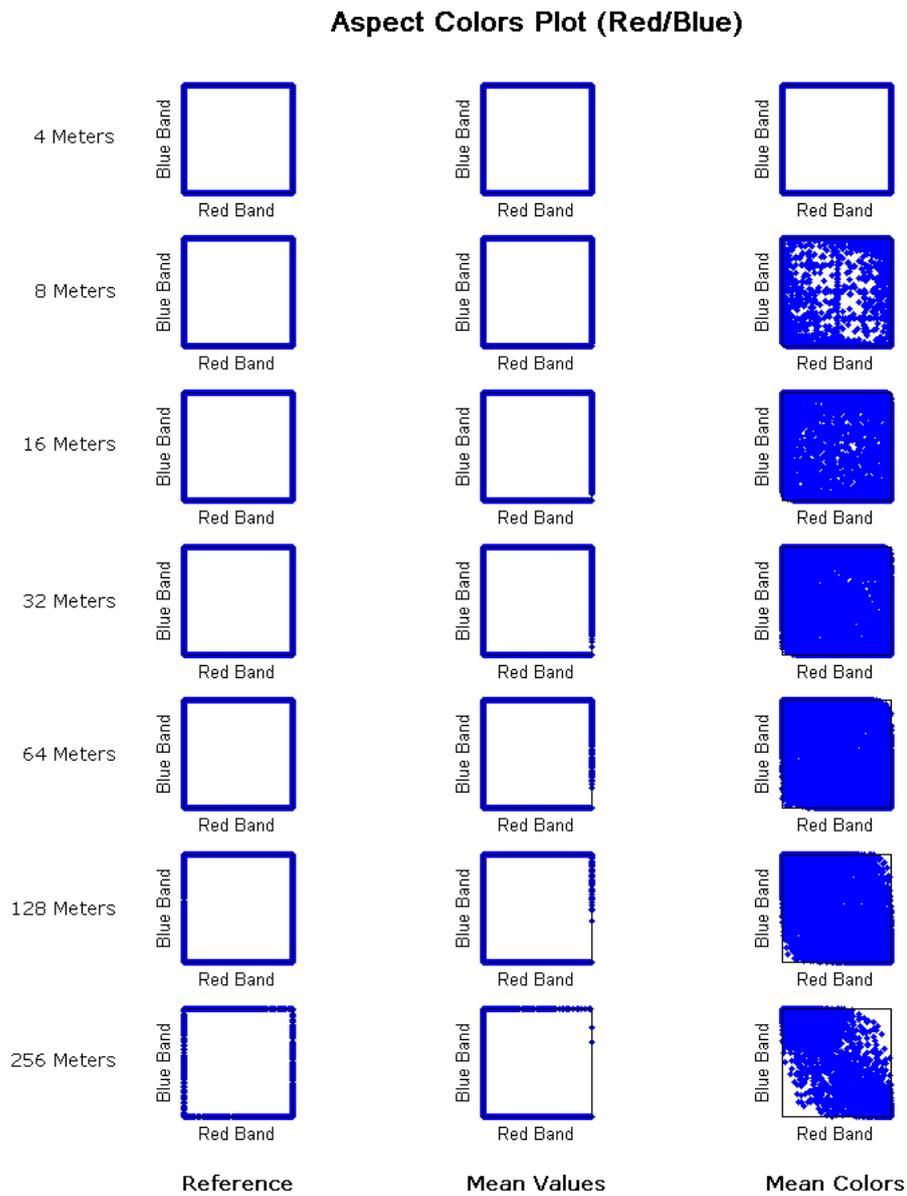


10.17. Orientations : graphiques de la distribution des pixels dans l'espace couleur Vert/Bleu

Aspect Colors Plot (Green/Blue)

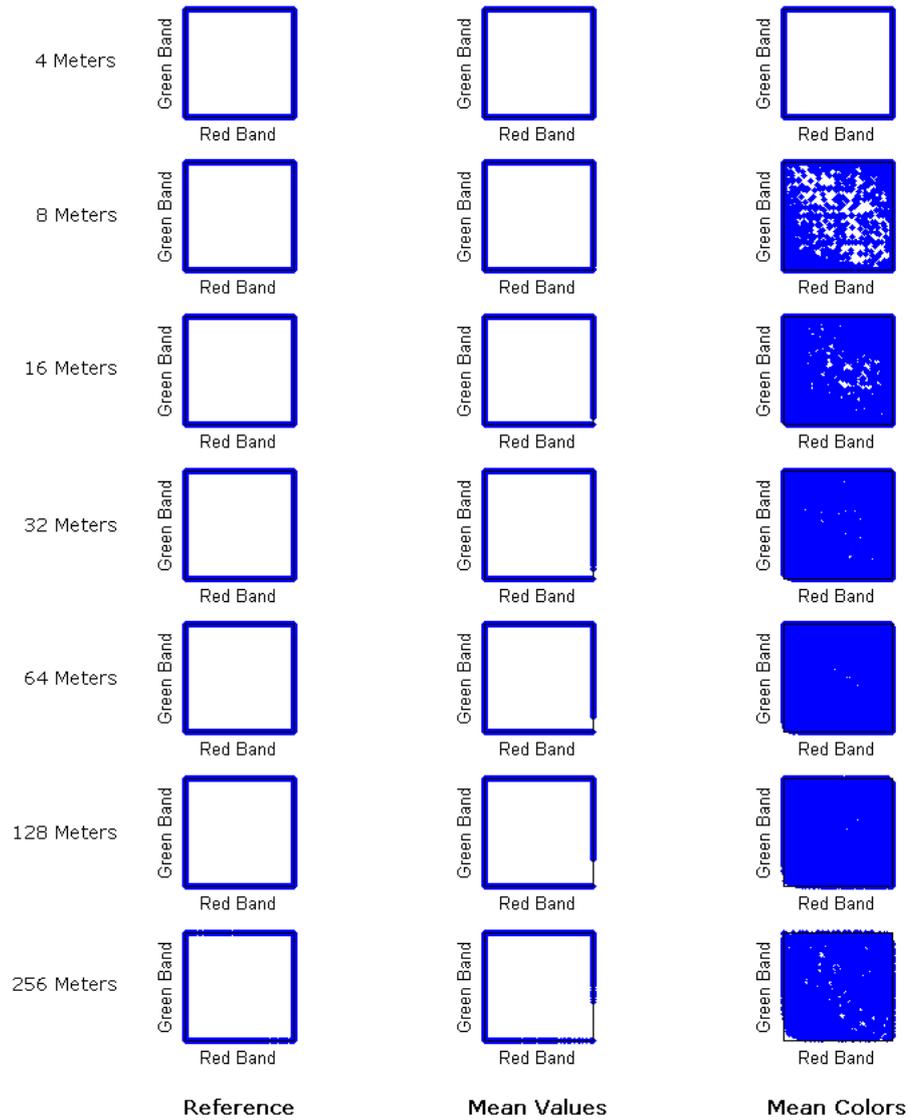


10.18. Orientations : graphiques de la distribution des pixels dans l'espace couleur Rouge/Bleu

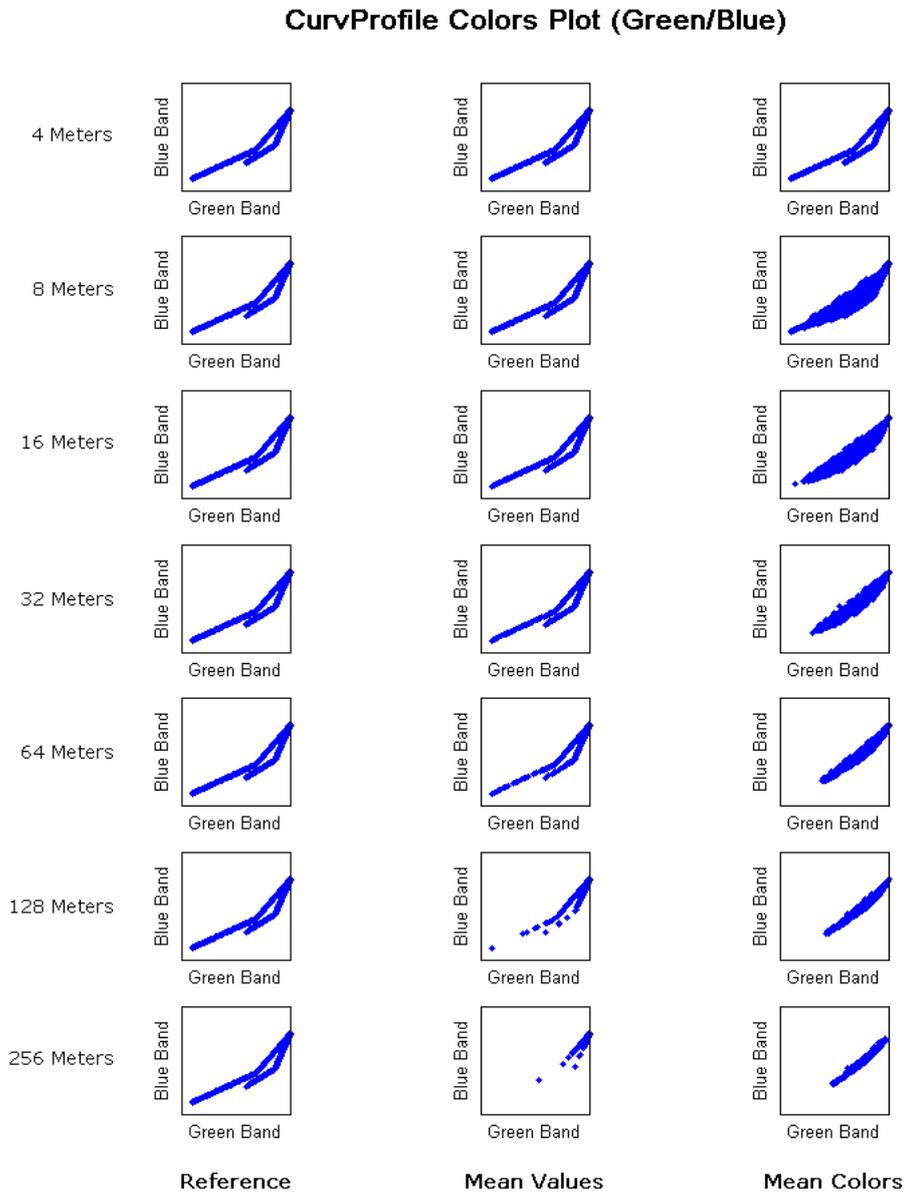


10.19. Orientations : graphiques de la distribution des pixels dans l'espace couleur Rouge/Vert

Aspect Colors Plot (Red/Green)

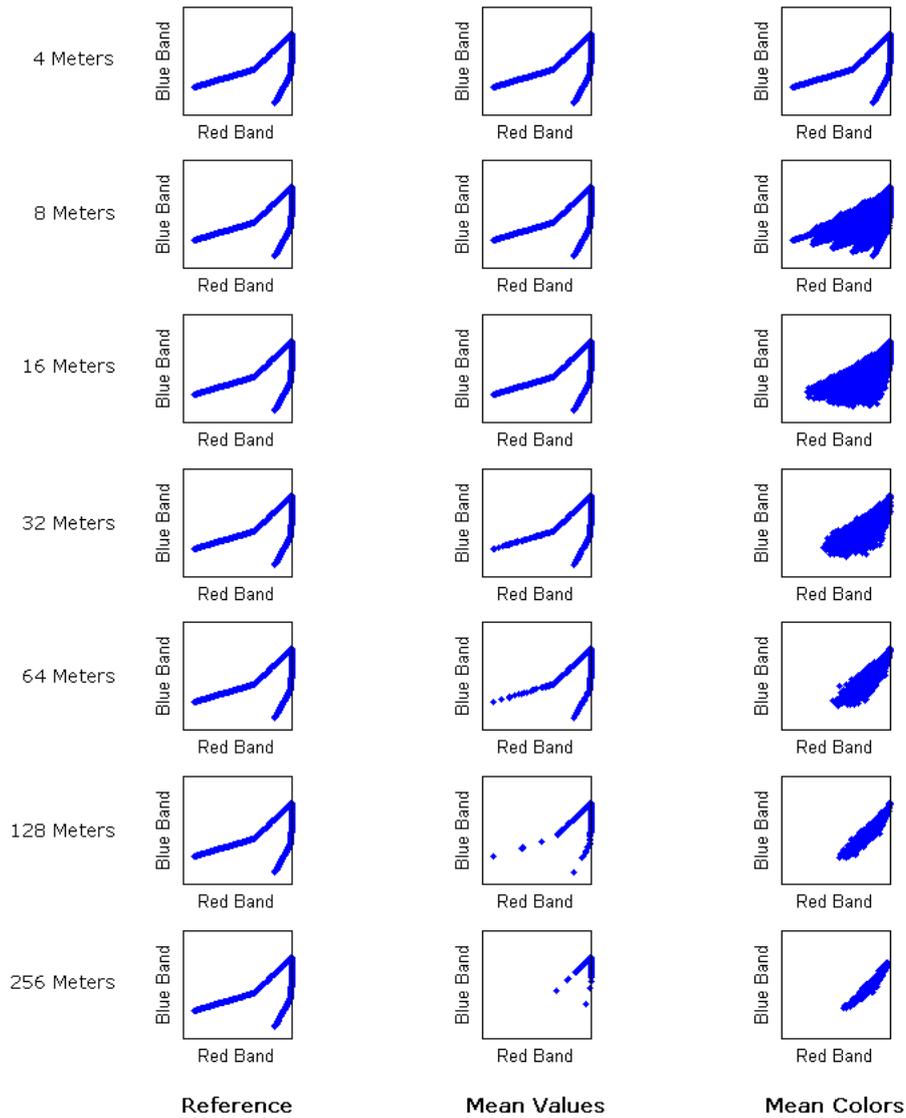


10.20. Courbures en profil : graphiques de la distribution des pixels dans l'espace couleur Vert/Bleu



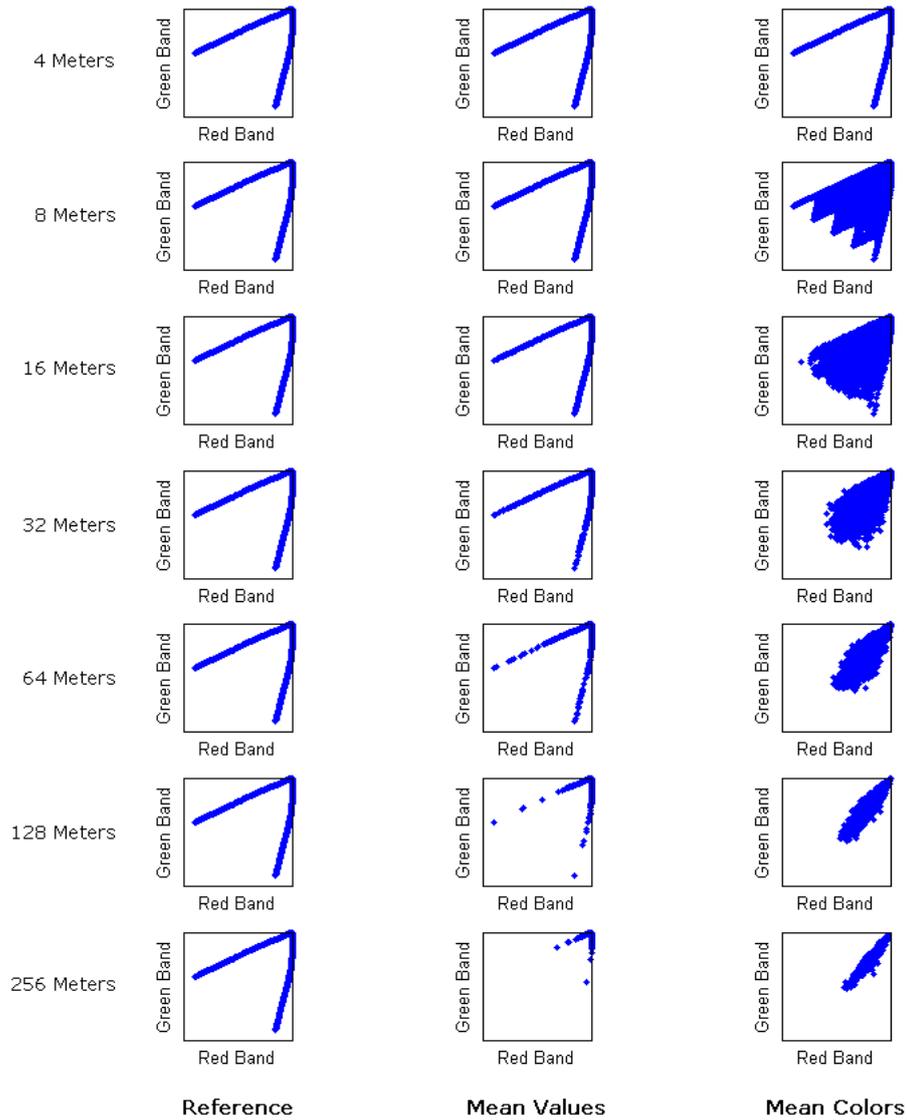
10.21. Courbures en profil : graphiques de la distribution des pixels dans l'espace couleur Rouge/Bleu

CurvProfile Colors Plot (Red/Blue)

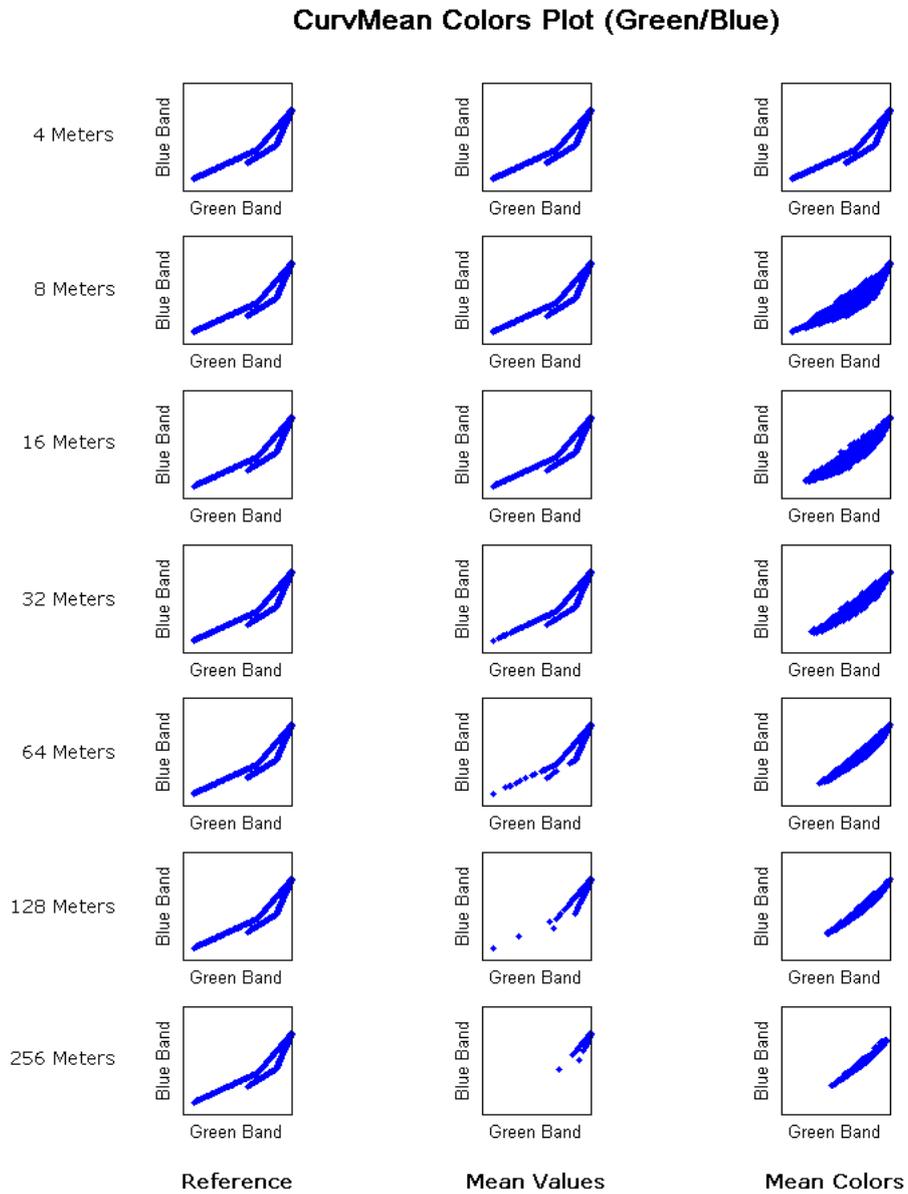


10.22. Courbures en profil : graphiques de la distribution des pixels dans l'espace couleur Rouge/Vert

CurvProfile Colors Plot (Red/Green)

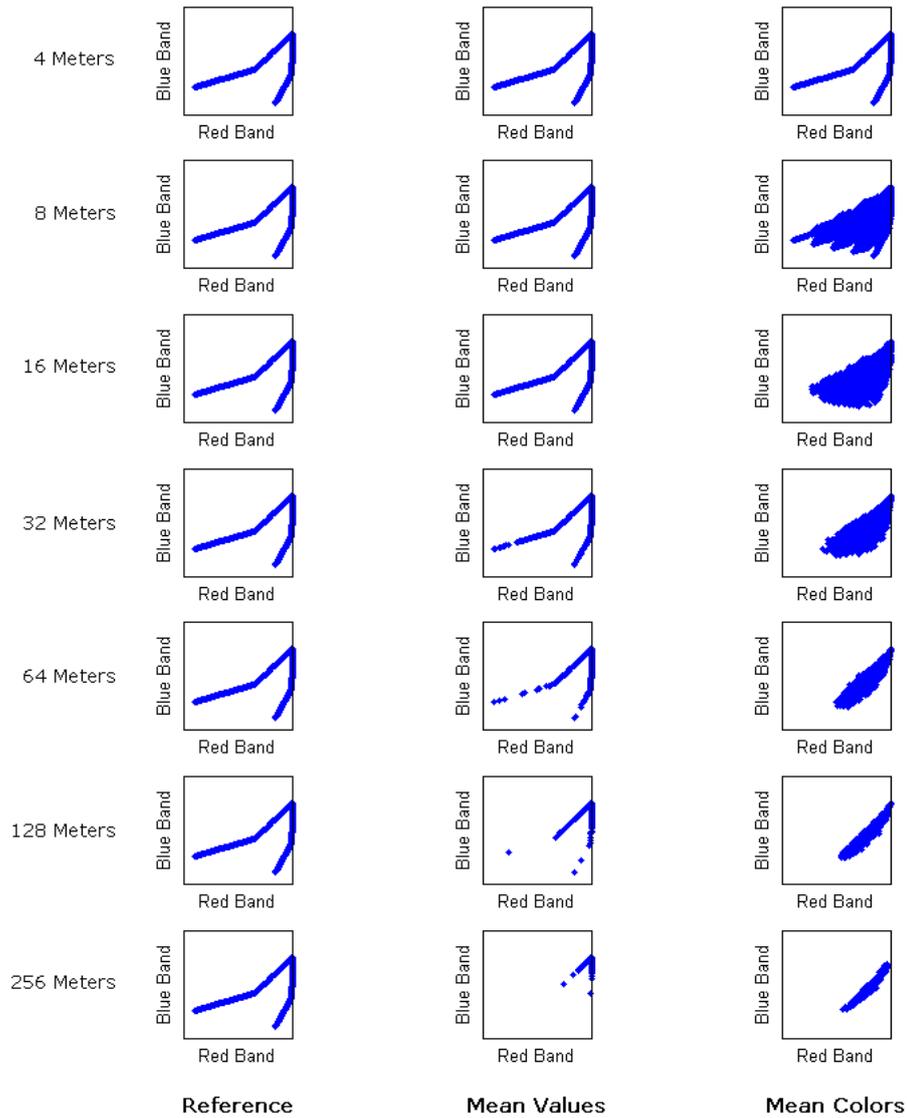


10.23. Courbures moyennes : graphiques de la distribution des pixels dans l'espace couleur Vert/Bleu

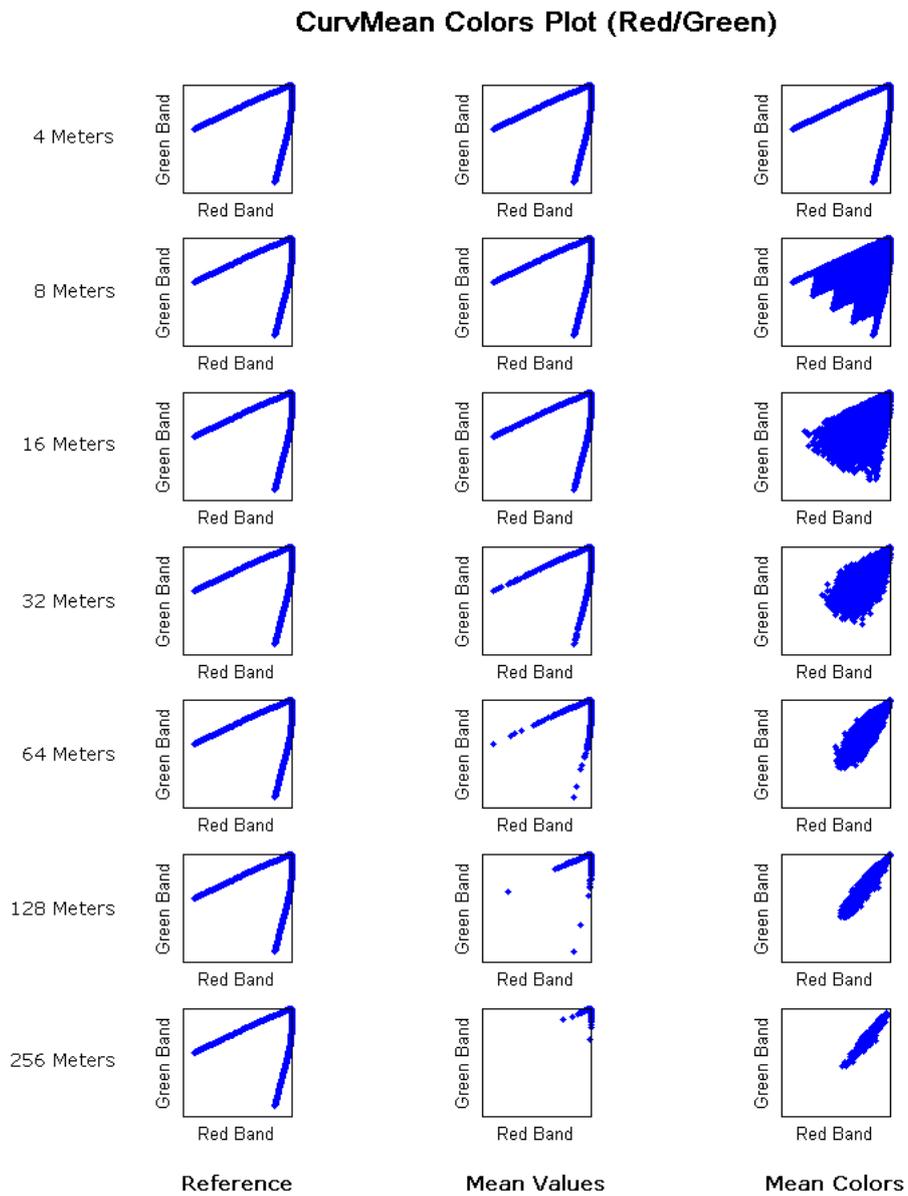


10.24. Courbures moyennes : graphiques de la distribution des pixels dans l'espace couleur Rouge/Bleu

CurvMean Colors Plot (Red/Blue)

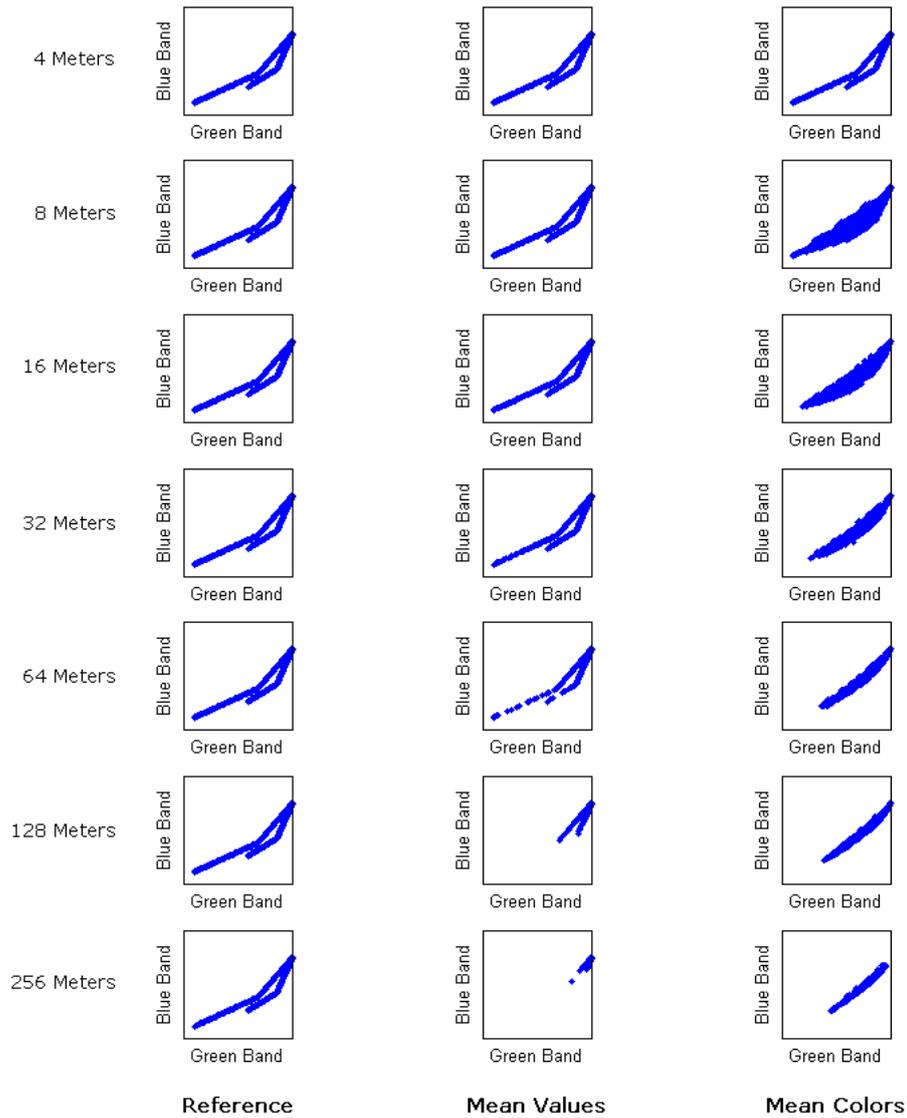


10.25. Courbures moyennes : graphiques de la distribution des pixels dans l'espace couleur Rouge/Vert



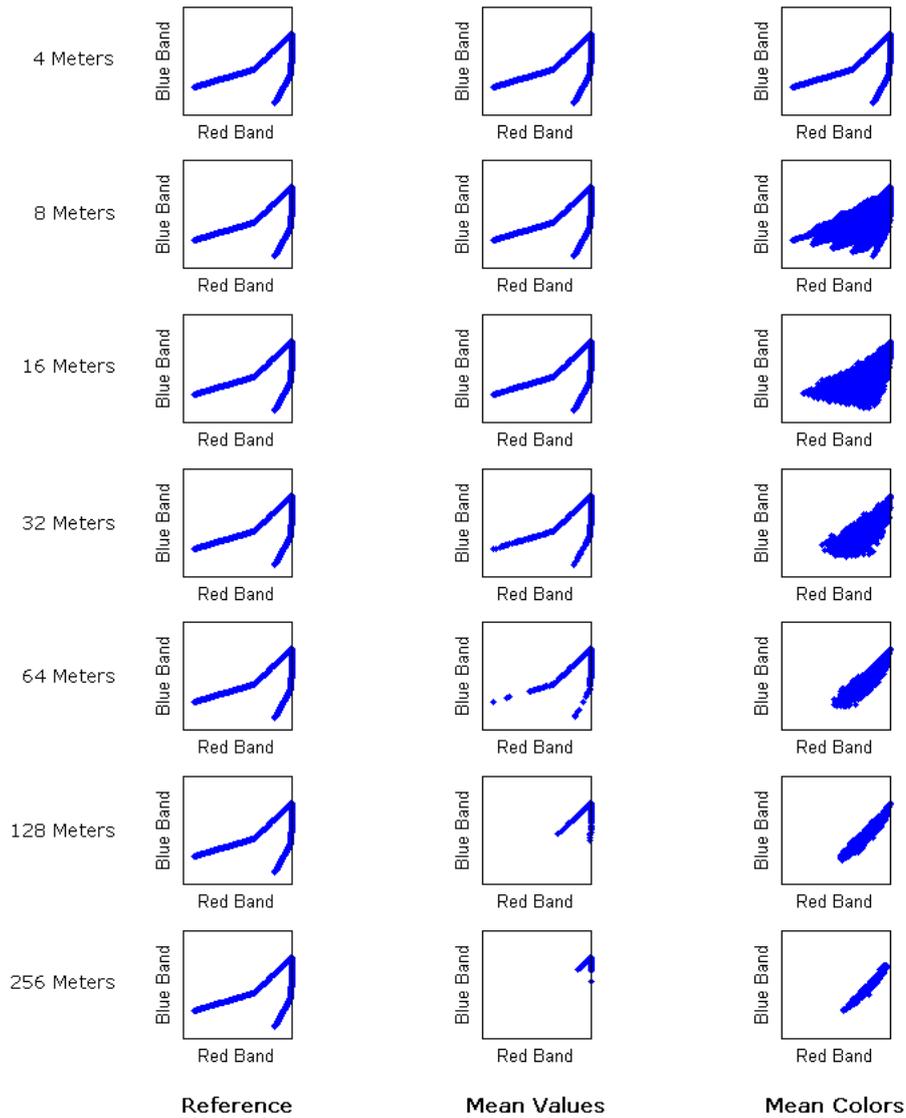
10.26. Courbures en plan : graphiques de la distribution des pixels dans l'espace couleur Vert/Bleu

CurvPlan Colors Plot (Green/Blue)



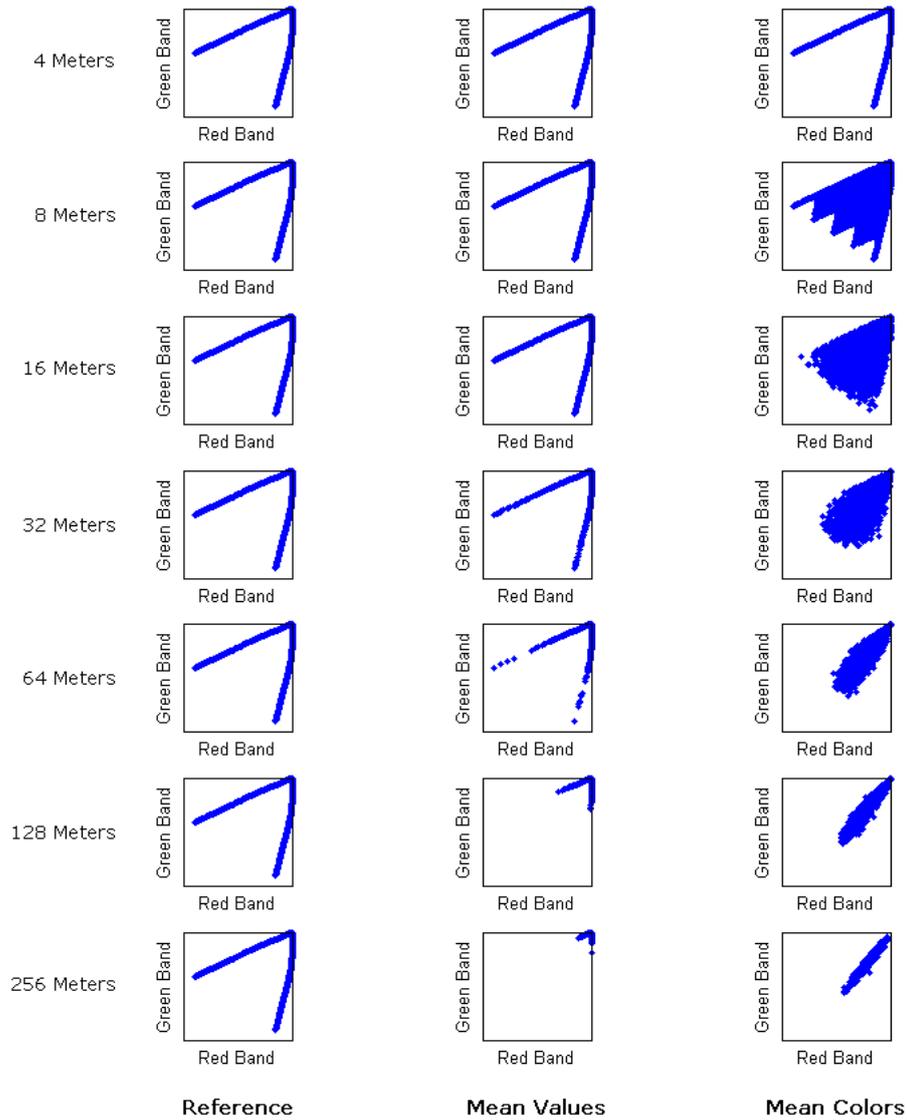
10.27. Courbures en plan : graphiques de la distribution des pixels dans l'espace couleur Rouge/Bleu

CurvPlan Colors Plot (Red/Blue)

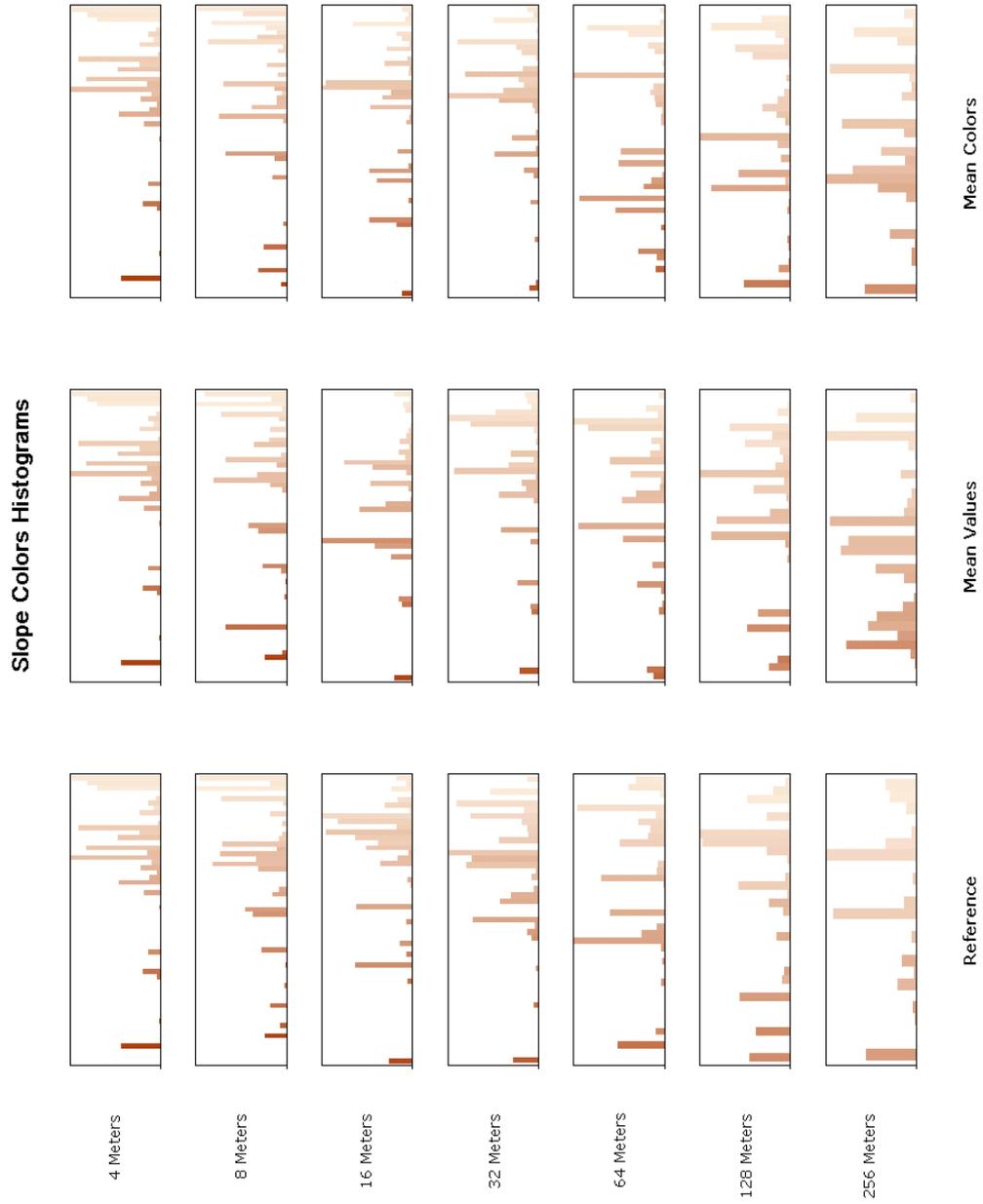


10.28. Courbures en plan : graphiques de la distribution des pixels dans l'espace couleur Rouge/Vert

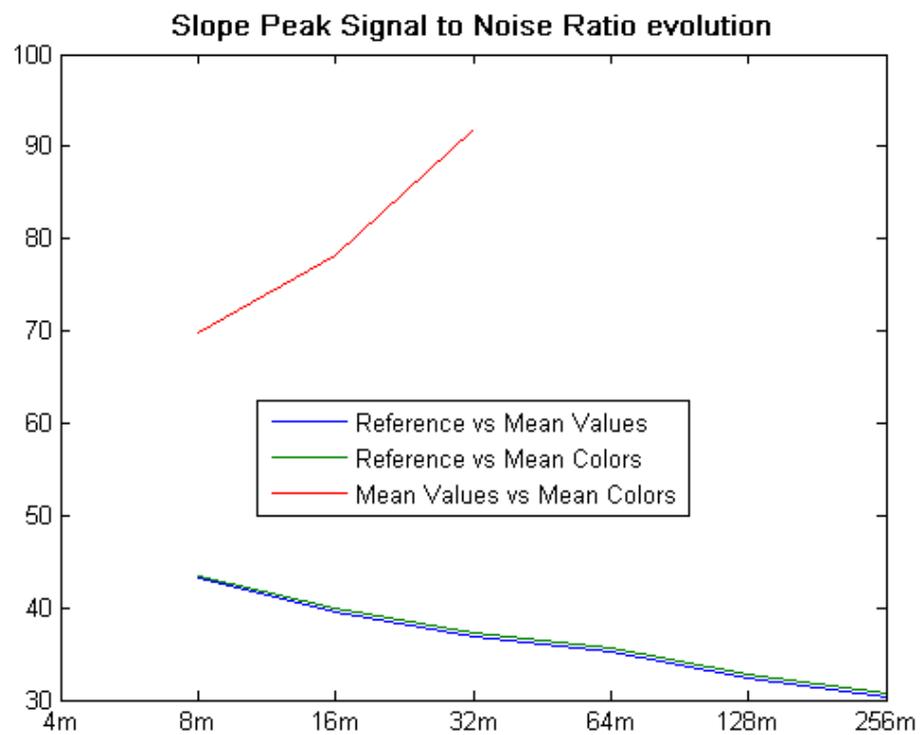
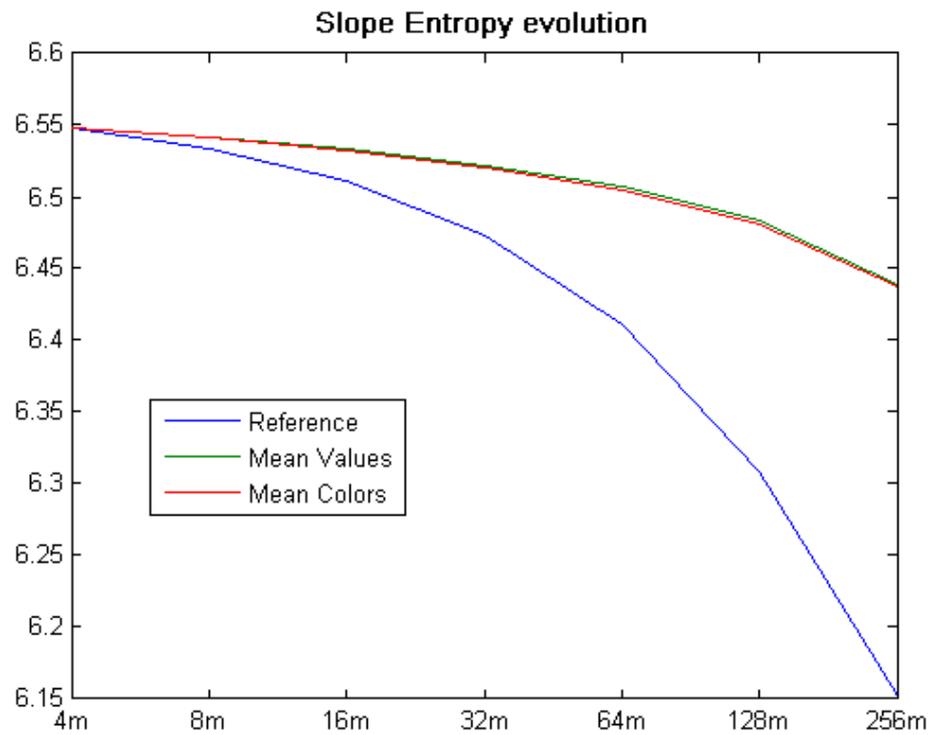
CurvPlan Colors Plot (Red/Green)



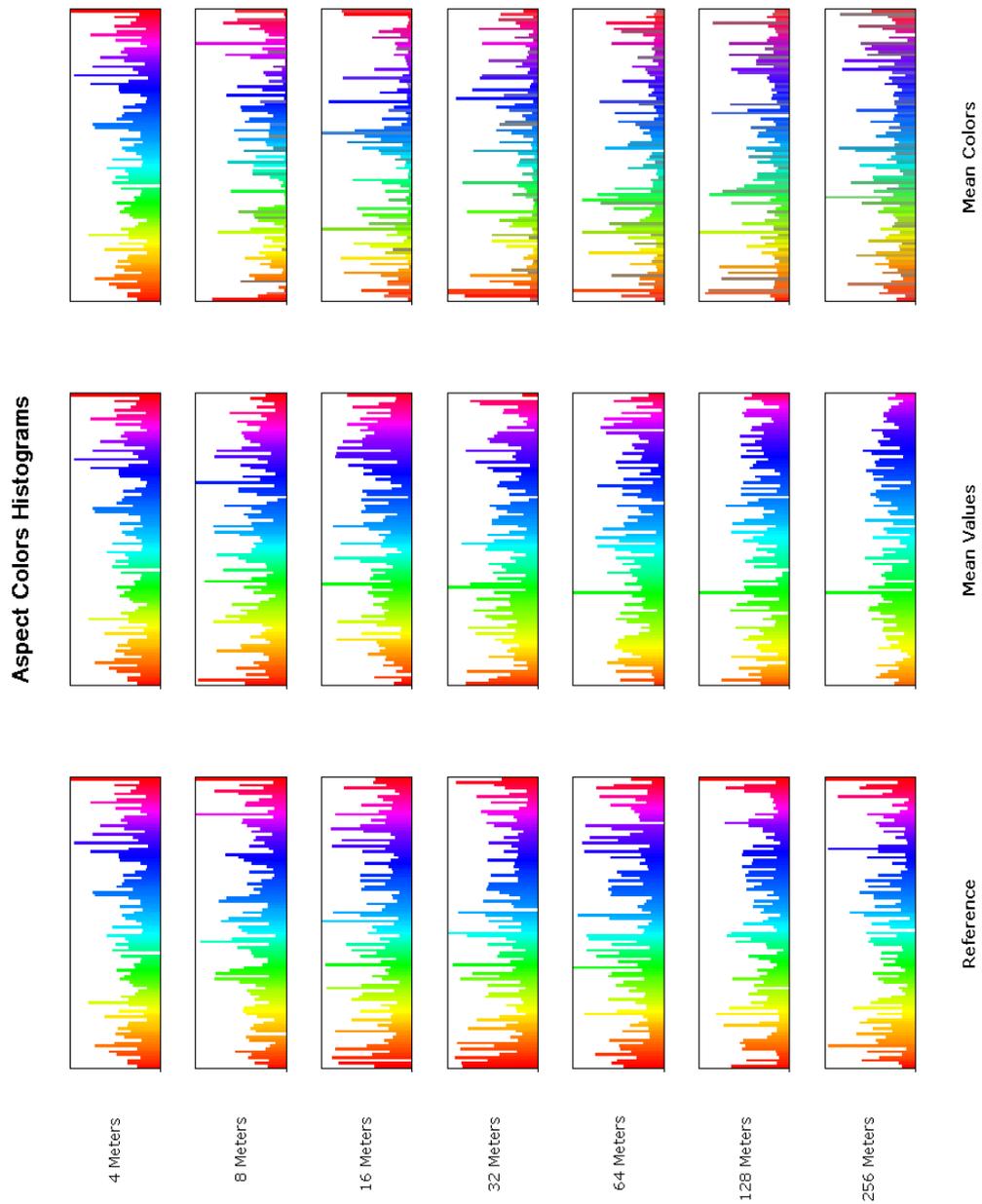
10.29. Histogrammes de la distribution des couleurs des pentes



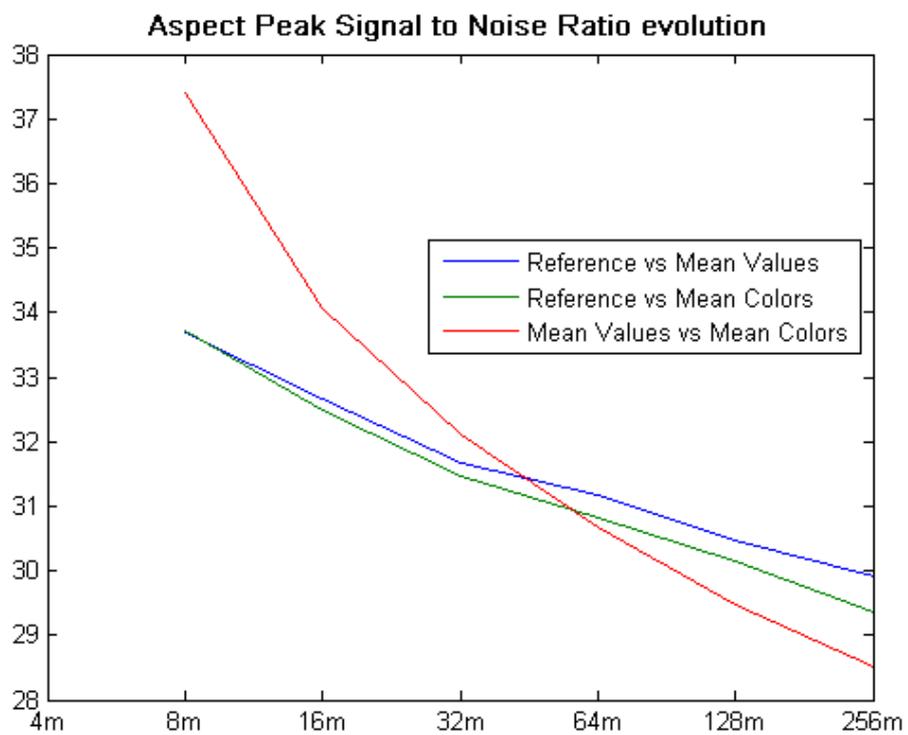
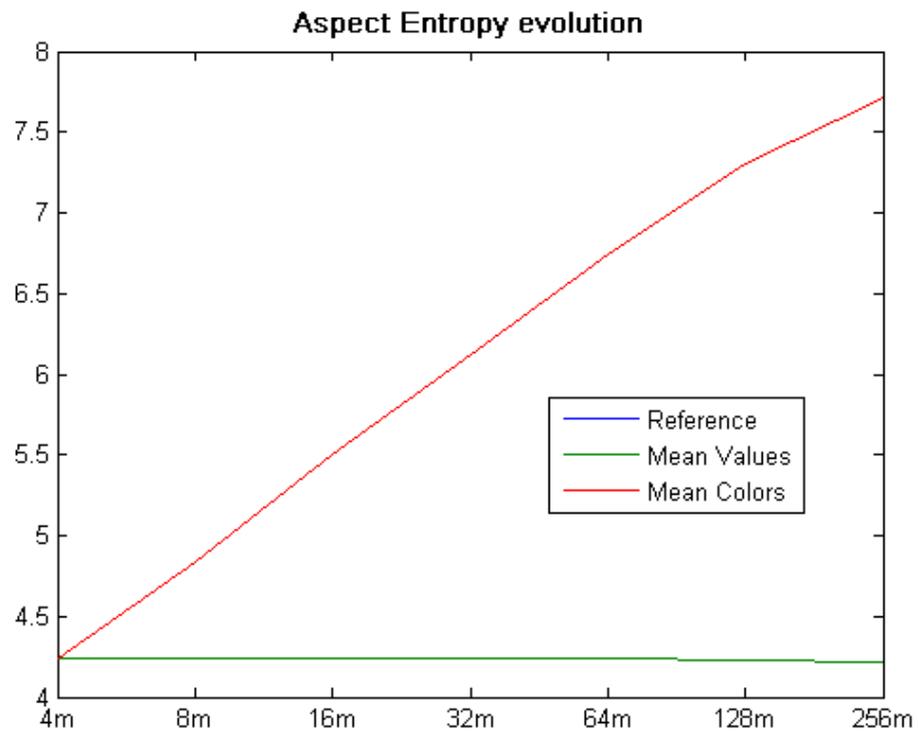
10.30. Graphiques de l'évolution de l'entropie et du SNR des pentes



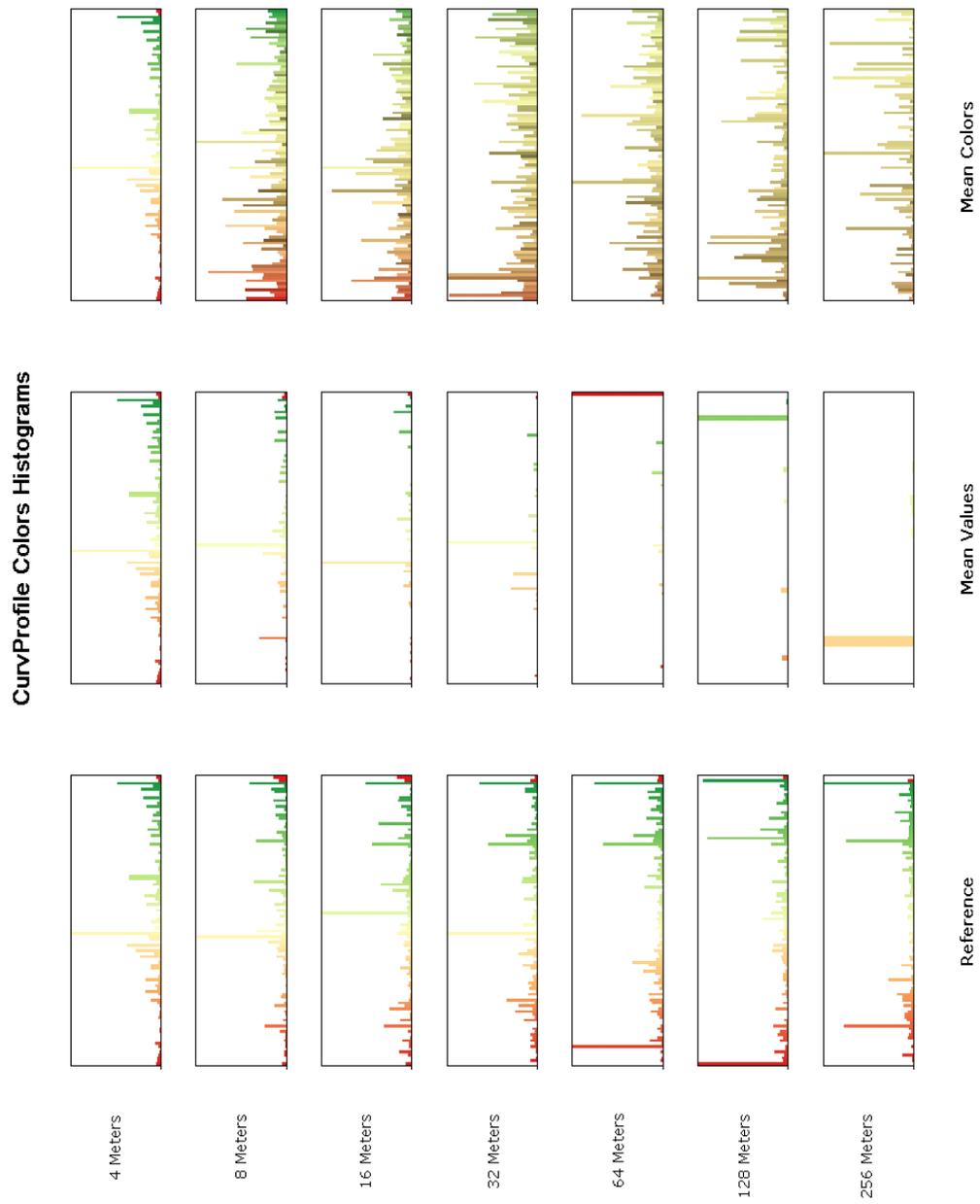
10.31. Histogrammes de la distribution des couleurs des orientations



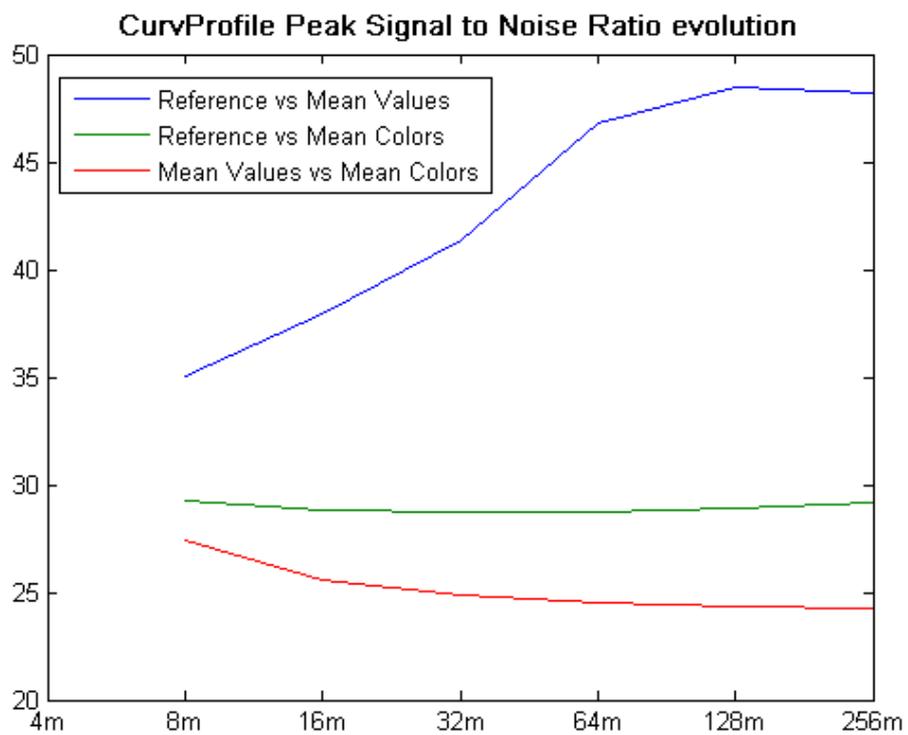
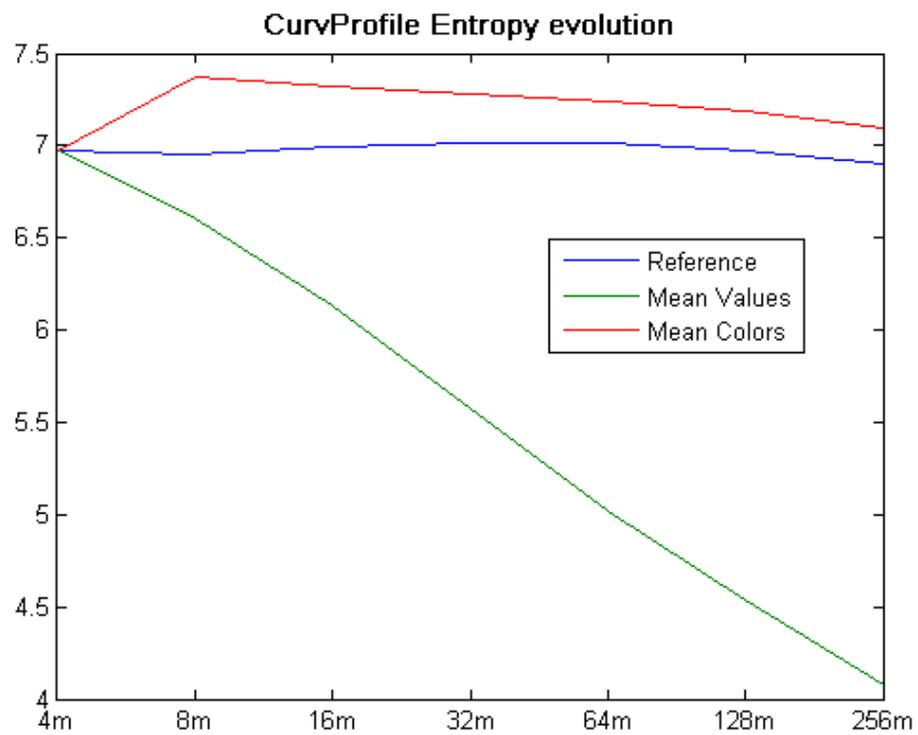
10.32. Graphiques de l'évolution de l'entropie et du SNR des orientations



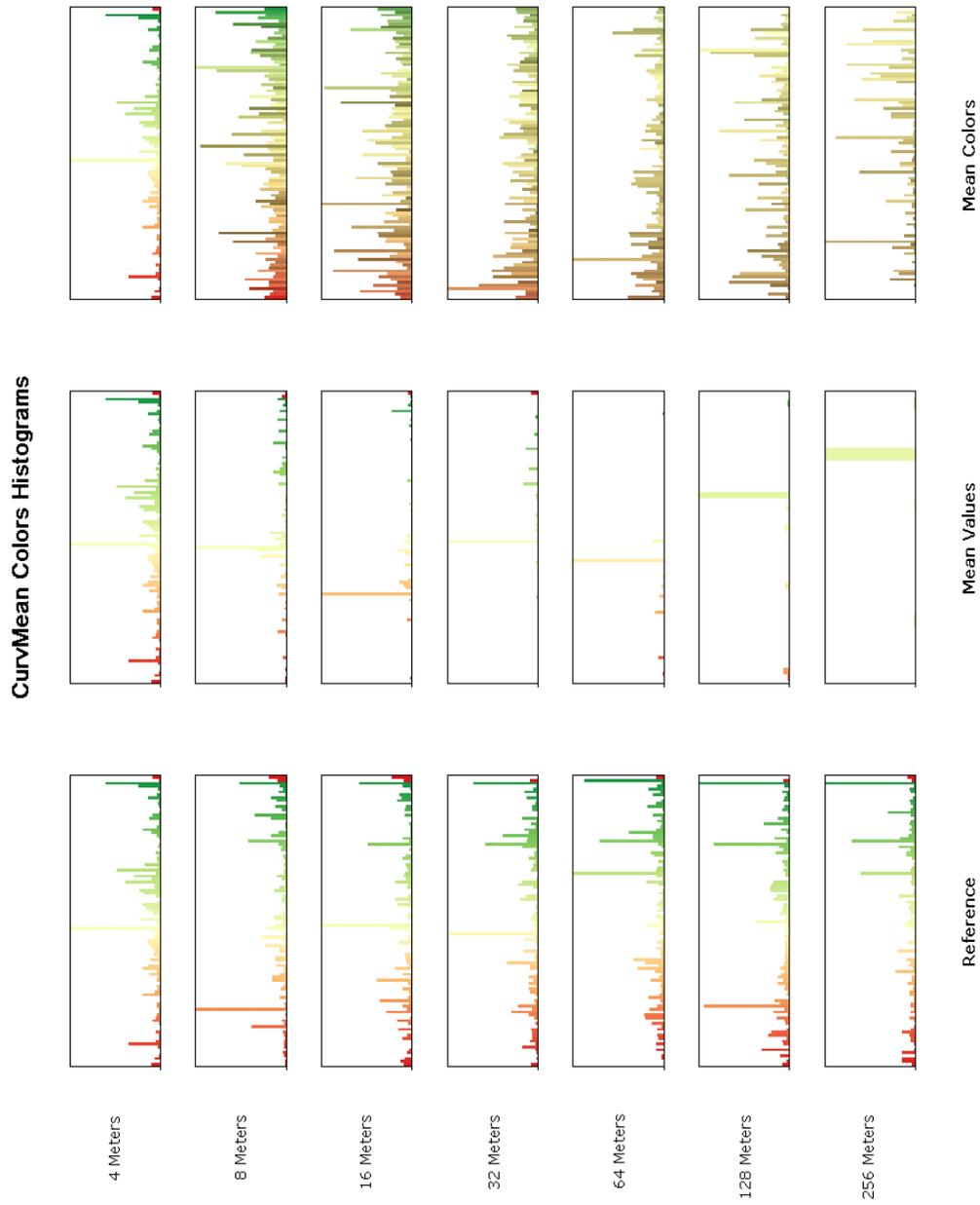
10.33. Histogrammes de la distribution des couleurs des courbures en profil



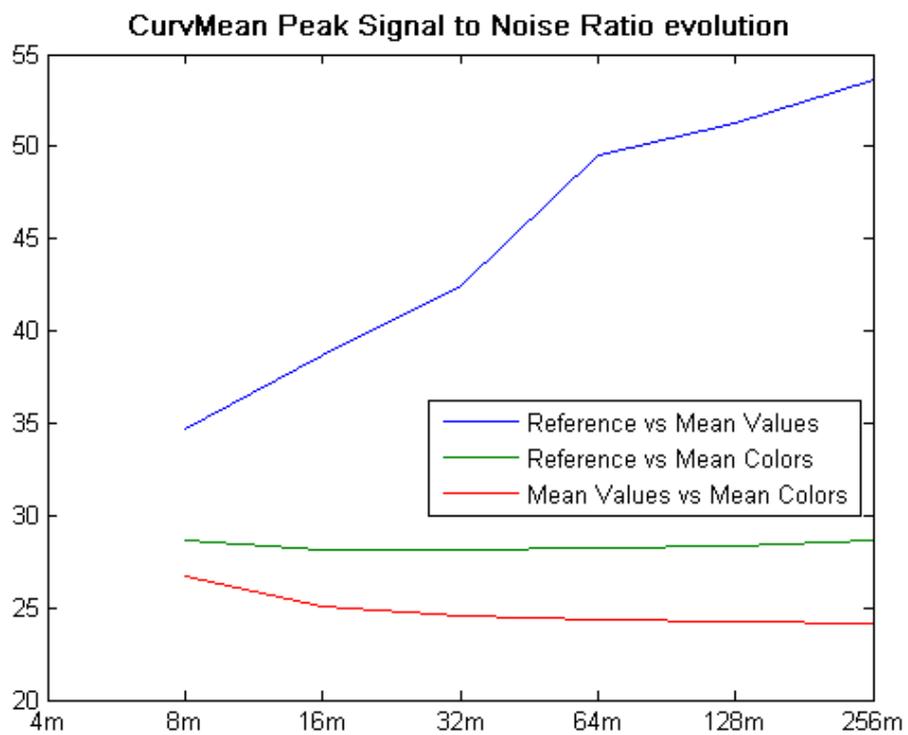
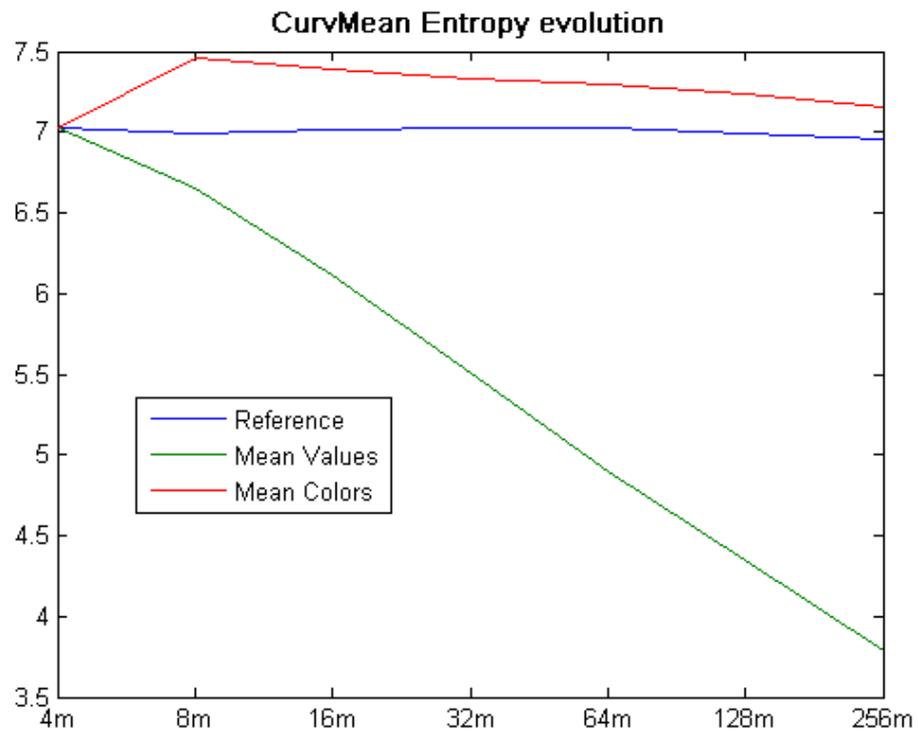
10.34. Graphiques de l'évolution de l'entropie et du SNR des courbures en profil



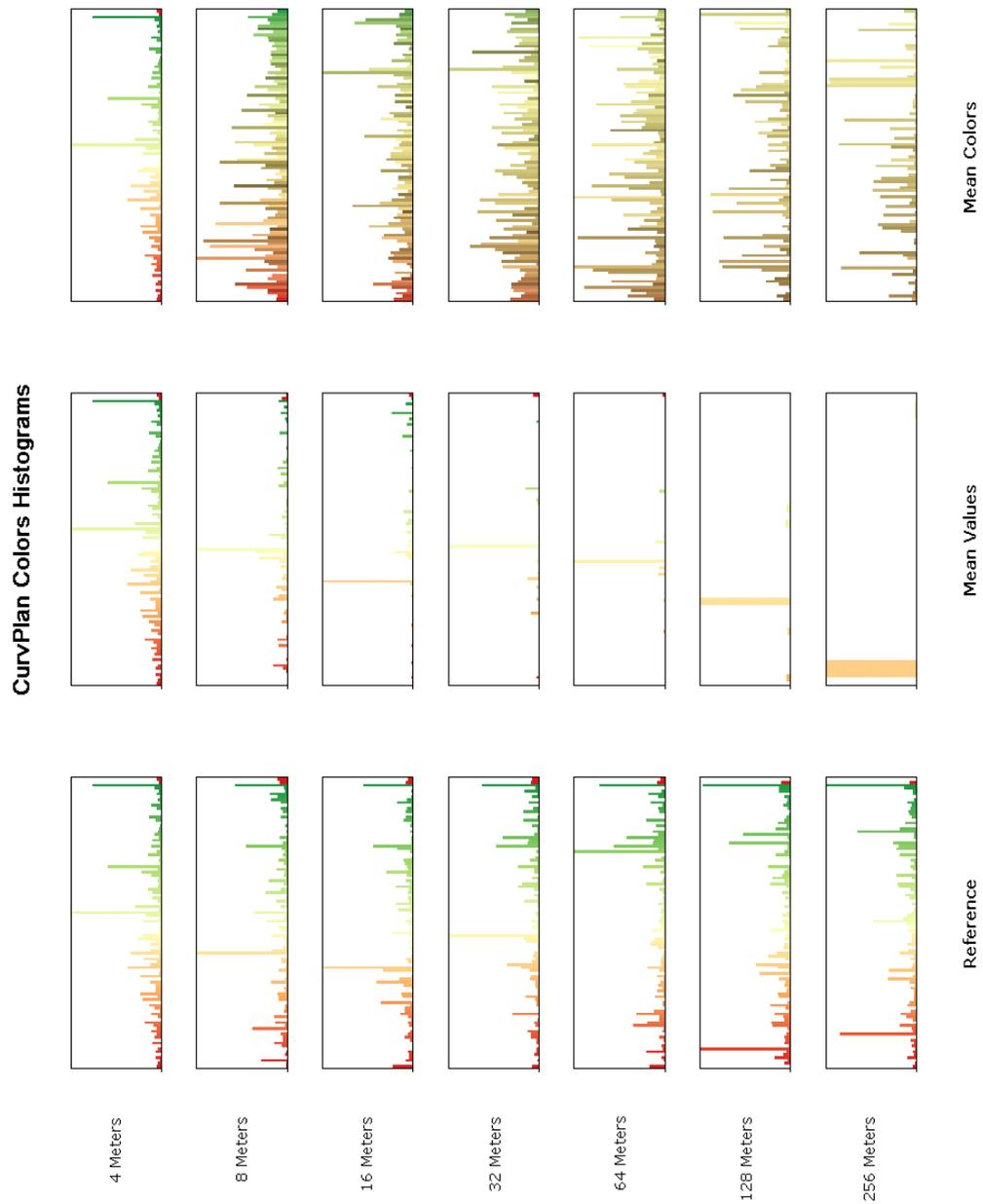
10.35. Histogrammes de la distribution des couleurs des courbures moyennes



10.36. Graphiques de l'évolution de l'entropie et du SNR des courbures moyennes



10.37. Histogrammes de la distribution des couleurs des courbures en plan



10.38. Graphiques de l'évolution de l'entropie et du SNR des courbures en plan

