



HAL
open science

Analyse spatiale de réseaux de ravines hiérarchisées à partir de MNT à différentes résolutions : application aux badlands de Draix (Alpes de Haute-Provence)

N. Thommeret

► To cite this version:

N. Thommeret. Analyse spatiale de réseaux de ravines hiérarchisées à partir de MNT à différentes résolutions : application aux badlands de Draix (Alpes de Haute-Provence). Sciences de l'environnement. Doctorat en géographie, 2012. Français. NNT : . tel-02597375

HAL Id: tel-02597375

<https://hal.inrae.fr/tel-02597375>

Submitted on 15 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

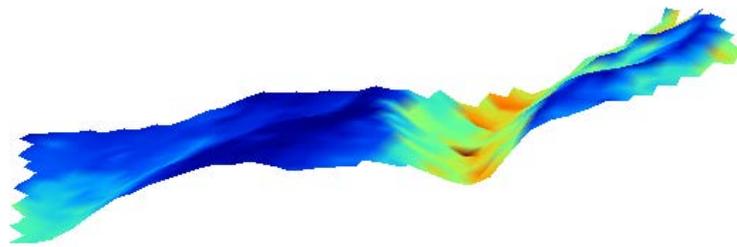


UNIVERSITE PARIS 1 PANTHEON-SORBONNE
ECOLE DOCTORALE DE GEOGRAPHIE DE PARIS

THESE DE DOCTORAT EN GEOGRAPHIE

**ANALYSE SPATIALE DE RESEAUX DE RAVINES HIERARCHISEES A PARTIR DE
MNT A DIFFERENTES RESOLUTIONS**

APPLICATION AUX BADLANDS DE DRAIX (ALPES DE HAUTE-PROVENCE)



NATHALIE THOMMERET

THESE DIRIGEE PAR BRIGITTE KAISER ET CHRISTIAN PUECH

SOUTENUE LE 4 AVRIL 2012 DEVANT LE JURY COMPOSE DE :

BRIGITTE KAISER, PROFESSEUR (UNIVERSITE PARIS 1)

CHRISTIAN PUECH, DIRECTEUR DE RECHERCHE (IRSTEA)

JEAN-STEPHANE BAILLY, ICFEP (AGROPARISTECH)

LAURENT POLIDORI, PROFESSEUR (CNAM-ESGT)

ERIC VERRECCHIA, PROFESSEUR (UNIVERSITE DE LAUSANNE)

JEAN-MARC BARDET, PROFESSEUR (UNIVERSITE PARIS 1)

PIERRE FRANKHAUSER, PROFESSEUR (IUF, UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE)

FREDERIC LIEBAULT, CHARGE DE RECHERCHE (IRSTEA)

DIRECTEUR DE THESE

DIRECTEUR DE THESE

CO-ENCADRANT

RAPPORTEUR

RAPPORTEUR

EXAMINATEUR

EXAMINATEUR

EXAMINATEUR

THESE PRESENTEE ET SOUTENUE PUBLIQUEMENT LE 4 AVRIL 2012 PAR :

NATHALIE THOMMERET

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR EN GEOGRAPHIE DE
L'UNIVERSITE PARIS 1 PANTHEON-SORBONNE

**ANALYSE SPATIALE DE RESEAUX DE RAVINES HIERARCHISEES A
PARTIR DE MNT A DIFFERENTES RESOLUTIONS**

APPLICATION AUX BADLANDS DE DRAIX (ALPES DE HAUTE-PROVENCE)

DEVANT LE JURY COMPOSE DE :

BRIGITTE KAISER , PROFESSEUR (UNIVERSITE PARIS 1)	DIRECTEUR DE THESE
CHRISTIAN PUECH , DIRECTEUR DE RECHERCHE (IRSTEA)	DIRECTEUR DE THESE
JEAN-STEPHANE BAILLY , ICPEF (AGROPARISTECH)	CO-ENCADRANT
LAURENT POLIDORI , PROFESSEUR (CNAM-ESGT)	RAPPORTEUR
ERIC VERRECCHIA , PROFESSEUR (UNIVERSITE DE LAUSANNE)	RAPPORTEUR
JEAN-MARC BARDET , PROFESSEUR (UNIVERSITE PARIS 1)	EXAMINATEUR
PIERRE FRANKHAUSER , PROFESSEUR (IUF, UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE)	EXAMINATEUR
FREDERIC LIEBAULT , CHARGE DE RECHERCHE (IRSTEA)	EXAMINATEUR

Table des matières

TABLE DES MATIERES	5
REMERCIEMENTS	9
INTRODUCTION GENERALE	11
PARTIE 1 : CADRAGE THEMATIQUE	13
CHAPITRE 1 : MORPHOLOGIE DES <i>BADLANDS</i>	15
1.1. <i>Définition, caractéristiques et localisation</i>	16
1.2. <i>Processus élémentaires et bilans d'ablation</i>	22
1.3. <i>Les modèles morphologiques</i>	34
1.4. <i>En résumé : questions actuelles et objectifs du GIS Draix</i>	40
CHAPITRE 2 : EXTRACTION DES RESEAUX DE RAVINES PAR TELEDETECTION	43
2.1. <i>L'approche image</i>	43
2.2. <i>L'approche MNT</i>	46
2.3. <i>Effet de la résolution</i>	58
CHAPITRE 3 : LA DESCRIPTION QUANTITATIVE DES RESEAUX DE TALWEGS	61
3.1. <i>De la morphométrie classique à la géomorphométrie moderne</i>	61
3.2. <i>Descriptions topologiques des réseaux</i>	64
3.3. <i>Descriptions de la géométrie des réseaux</i>	70
3.4. <i>Approche fractale des réseaux de talwegs</i>	75
CHAPITRE 4 : DE L'IMPORTANCE DES ECHELLES SPATIALES	83
4.1. <i>Echelles, résolution, étendue</i>	83
4.2. <i>Structuration du paysage morphologique</i>	85
4.3. <i>Les questions posées par l'échelle : choix d'échelle d'étude et transfert d'échelle</i>	86

PARTIE 2 : OBJECTIFS ET TERRAIN DE THESE	89
CHAPITRE 5 : LES OBJECTIFS DE LA THESE.....	91
5.1. <i>Problématique</i>	91
5.2. <i>Les objectifs</i>	92
5.3. <i>Hypothèses</i>	95
5.4. <i>Plan de thèse</i>	96
CHAPITRE 6 : SITES RETENUS ET DONNEES DISPONIBLES.....	99
6.1. <i>Les bassins versants expérimentaux de Draix</i>	99
6.2. <i>Morphologie des badlands de Draix</i>	103
6.3. <i>Climat méditerranéen d'altitude et crues rapides</i>	108
6.4. <i>Végétation</i>	111
6.5. <i>Données de télédétection disponibles et sites choisis</i>	114
6.6. <i>Constitution d'un référentiel terrain</i>	117
PARTIE 3 : EXTRACTION DE RESEAU DE TALWEGS A PARTIR DES CONCAVITES DU MNT ET VALIDATION	119
CHAPITRE 7 : EXTRACTION DE RESEAU DE TALWEGS A PARTIR DES CONCAVITES DU MNT	121
7.1. <i>Matériels</i>	122
7.2. <i>Méthode</i>	123
7.3. <i>Résultats</i>	128
7.4. <i>Discussion et conclusion</i>	133
7.5. <i>Liste des réseaux obtenus par la méthode CI sur les bassins de Draix</i>	134
CHAPITRE 8 : VALIDATION. PROPOSITION D'UNE METHODE DE COMPARAISON PAR APPARIEMENT HIERARCHIQUE DE RESEAUX.....	137
8.1. <i>Qu'est-ce que valider un réseau ?</i>	138
8.2. <i>Evaluation globale par la méthode des buffers</i>	140
8.3. <i>Mise au point d'une méthode de comparaison par appariement hiérarchique de réseaux</i>	146
8.4. <i>Discussion et conclusion</i>	156
RESUME DE LA PARTIE 3	157

PARTIE 4 : DESCRIPTEURS NUMERIQUES LOCAUX DE RESEAUX : OBTENTION, ANALYSE HIERARCHISEE ET PASSAGE A DES DESCRIPTEURS THEMATIQUES	159
CHAPITRE 9 : OBTENTION DES DESCRIPTEURS NUMERIQUES DE RESEAUX	161
9.1. <i>Eléments de support et contraintes pour la description des réseaux</i>	161
9.2. <i>Choix et méthodes d'extraction de descripteurs</i>	170
9.3. <i>Présentation et analyse des résultats</i>	176
9.4. <i>Conclusion</i>	193
CHAPITRE 10 : DES DESCRIPTEURS NUMERIQUES AUX OBJETS MORPHOLOGIQUES.....	195
10.1. <i>Les données terrain de référence</i>	195
10.2. <i>Méthode</i>	196
10.3. <i>Résultats</i>	198
10.4. <i>Discussion</i>	203
RESUME DE LA PARTIE 4	205
PARTIE 5 : DESCRIPTION GLOBALE DES RESEAUX A PARTIR DE LA DIMENSION FRACTALE.....	207
CHAPITRE 11 : LES DIMENSIONS FRACTALES DE RESEAUX VECTORIELS : SIGNIFICATION, ESTIMATION ET ROBUSTESSE DES RESULTATS.....	209
11.1. <i>Concepts de la géométrie fractale et méthodes d'estimation des dimensions</i>	211
11.2. <i>Les réseaux simulés</i>	219
11.3. <i>Estimation de dimension fractale par comptage de boîtes sur réseaux simulés et précision des estimations</i>	221
11.4. <i>Estimation par comptage de boîte pour un cas réel « type »</i>	231
11.5. <i>Conclusion</i>	232
CHAPITRE 12 : APPLICATION AUX CAS REELS – COMPARAISON ET INTERPRETATION DES DIMENSIONS	235
12.1. <i>Présentation des résultats de dimensions fractales pour les bassins de Draix à différentes résolution</i>	235
12.2. <i>Analyse des résultats : les comparaisons possibles ?</i>	240
12.3. <i>Discussion</i>	245
RESUME DE LA PARTIE 5	250
CONCLUSION GENERALE.....	251
BIBLIOGRAPHIE	257
ANNEXES	271

Remerciements

La vie du « doctorant » est une aventure, faite de moments de joies mais aussi, et surtout en cette période de fin de rédaction, de doutes. Il est clair que ce projet n'aurait pas pu aboutir sans l'aide et le soutien, scientifique et personnel, de nombreuses personnes. Il me paraît difficile de n'oublier personne ! Ecrire cette page de remerciements ne me paraissait pas compliqué, mais maintenant qu'il faut le faire, je ne suis plus sûre de trouver les mots justes pour exprimer ma reconnaissance envers toutes ces personnes.

Mes premières pensées vont à mes deux directeurs de thèse Brigitte Kaiser et Christian Puech qui m'ont permis de mener à bien ce projet. Je les remercie pour tout ce qu'ils m'ont appris, chacun à leur manière, sur le plan scientifique comme sur le plan humain. Ils ont su m'apporter leur soutien et leur confiance, et je me rends compte chaque jour de l'expérience que j'ai acquise à leur côté.

Un grand merci à Jean-Stéphane Bailly, qui a également encadré ce travail, de manière constante et toujours positive.

Je souhaite sincèrement remercier les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail de thèse.

J'ai pu, durant la thèse, recevoir des conseils avisés de chercheurs venant d'autres laboratoires voire d'autres disciplines. Le travail en particulier avec Jean-Marc Bardet sur les dimensions fractales d'objets réels que sont les réseaux de talwegs a été aussi agréable que productif. Je tiens à remercier chaleureusement les membres du GIS Draix et plus particulièrement Nicolle Mathys qui a suivi ce travail, notamment à travers le comité de pilotage et les réunions du GIS. Je souhaite également mentionner Marianne Cohen qui m'a accordé sa confiance au début de la thèse à travers le programme de recherche « Dynamique des paysages, érosion et développement durable dans les montagnes méditerranéennes ». Enfin, j'ai une pensée pour les membres du Laboratoire Matière et Systèmes Complexes qui ont su me faire profiter de leur expérience de physiciens sur les fractales.

Je tiens à remercier l'ensemble des membres du LGP qui savent faire de ce bâtiment un endroit où il fait bon travailler mais aussi manger du tiramisu ! Merci à vous pour vos encouragements, notamment en cette fin de thèse. Je remercie, en particulier, Delphine et Daniel qui ont su m'apporter leurs idées notamment sur les fractales, ainsi que Marie, ex-doctorante, pour nos longues discussions. Evidemment, je ne peux pas fermer ce paragraphe sans penser aux différentes « générations » de doctorants du labo. Je ne citerai pas de nom de peur d'en oublier mais je pense à vous tous !

Durant ces années, j'ai pu apprécier l'enthousiasme et la bonne humeur des membres de la Maison de la Télédétection, qui ont rendu mes nombreux passages à Montpellier très agréables.

Ces années ont été consacrées à la recherche mais aussi l'enseignement. Ainsi, j'ai une pensée pour les enseignants de Paris 1, notamment pour les autres « non-titulaires » et jeunes MCF avec qui j'ai pu partager les aventures de l'enseignement.

Enfin, merci à mes parents et à mon frère pour leurs encouragements et leur présence même à distance, avec en passant un petit merci à ma box pour la gratuité des appels téléphoniques vers l'Argentine. Et bien sûr merci à Benoit d'avoir partagé, avec sérénité, le quotidien d'une doctorante (un peu) angoissée !

Introduction générale

Présents dans de nombreuses régions du monde, les *badlands* suscitent l'intérêt de la communauté scientifique depuis des décennies. Ce sont des terrains où les processus d'érosion sont actifs et l'évolution des formes relativement rapide. Ce qui permet l'observation simultanée entre forme et processus (Shumm, 1956a). En outre, les *badlands* sont des objets morphologiques originaux caractérisés par leur forte dissection et des exportations de matière importantes.

L'étude de ces secteurs présente un enjeu de connaissance théorique et un enjeu appliqué pour la gestion des sédiments. Les dynamiques de gestion diffèrent selon les contextes géographiques. On note une opposition entre volontés de restaurer ou du moins maîtriser ces secteurs en raison des risques engendrés à l'aval et volontés de conservation et de mise en valeur pour des raisons d'attrait touristique. Dans ce dernier cas, les *badlands* sont considérés comme éléments du patrimoine géomorphologique (Parc National des *Badlands*, Dakota du Sud ; Bardenas Reales, Navarre). Dans les secteurs marneux des bassins de la Durance, la stratégie dominante est celle de la lutte contre l'érosion (Richard et Mathys, 1999 ; Cohen et Rey, 2005). Les organismes de recherche se posent la question des moyens de cette lutte pour prévenir les crues, laves torrentielles et à un autre niveau le comblement des retenues hydroélectriques sur la Durance et l'envasement de l'étang de Berre (Brochot, 1999). Cet enjeu appliqué est intimement lié à l'enjeu théorique de connaissance générale de genèse et d'évolution des *badlands*. En effet, nous postulons qu'il est nécessaire de bien connaître le fonctionnement d'un système pour pouvoir définir un ou des modes de gestion adaptés.

Les *badlands* possèdent d'une part, une morphologie particulière, composées de ravines denses et hiérarchisées, organisées en réseaux et d'autre part, un fonctionnement spasmodique avec une ablation importante. Nous considérons que la forme de ces réseaux en roche homogène est le résultat d'une combinaison de processus d'érosion à différentes échelles spatiales et temporelles et qu'elle conditionne le fonctionnement actuel. Ainsi, un des défis est de caractériser le lien entre la forme des réseaux de ravines et leur fonctionnement érosif (actuel et passé). Pour ce faire, il paraît nécessaire de connaître précisément la forme des réseaux. Le présent document s'attachera donc à la question suivante : comment décrire les domaines de relief et modelés de forme complexe que sont les *badlands* ? D'autres interrogations suivent : comment les représenter, à quelles échelles ? quels descripteurs spatiaux retenir ? Comment les comparer ?

Dans ce travail de thèse qui porte sur des terrains difficiles à parcourir, nous nous intéressons à l'apport des approches spatiales numériques pour la connaissance de la forme des réseaux de ravines. Cette question s'intègre au champ de la géomorphométrie, définie comme la science de l'analyse quantitative de la surface terrestre. Cette discipline, connue en France depuis les travaux

de Péguy (1942) et Tricart (1947), se développe aujourd'hui à travers la société internationale de géomorphométrie (*International Society for Geomorphometry*, @geomorphometry). Cette discipline a bien évolué depuis les premières observations du début du XIX^{ème} siècle qui se fondaient essentiellement les courbes de niveau des cartes topographiques (Pike *et al.*, 2008). Elle se situe aujourd'hui à la jonction de plusieurs domaines – les géosciences, les mathématiques et plus récemment la science informatique – et prend sa place en géographie. La géomorphométrie a pour ambition d'extraire des descripteurs et des objets de la surface terrestre à partir des représentations numériques du relief (Pike, 2000). Les méthodes s'appuient essentiellement sur les modèles numériques de terrain (MNT).

Ainsi, ce travail porte sur la description de la forme des réseaux de ravines à partir de MNT à différentes résolutions. Avant d'aborder les développements réalisés dans cette thèse, nous proposons en partie 1 une approche bibliographique des grands thèmes de ce travail : morphologie, MNT, description quantitative de réseaux. On trouvera les objectifs de la thèse et la présentation des bassins de Draix, sites choisis comme terrain d'étude, en partie 2.

Partie 1

Cadrage thématique

Cette première partie présente le cadre thématique de la thèse. Elle comporte quatre chapitres : le premier chapitre présente l'état des connaissances et les questions contemporaines de la morphologie des *badlands*, les chapitres 2 et 3 présentent les concepts et méthodes de la géomorphométrie, concernant l'extraction des réseaux de ravines et les outils de description quantitative des réseaux ; enfin le dernier chapitre s'intéresse à l'importance des échelles spatiales pour la description morphologique.

Chapitre 1 : Morphologie des *badlands*

Les *badlands* sont des paysages particuliers, fortement disséqués et peu végétalisés, où l'érosion est ou a été très active. L'érosion regroupe « l'ensemble des phénomènes externes qui, à la surface du sol ou à faible profondeur, enlèvent tout ou partie des terrains existants et modifient ainsi le relief » (Foucault et Raoult, 2001). Au sens large, ce terme recouvre l'ensemble des processus d'ablation, de transport et de dépôt. On désigne par formes d'érosion et formes d'accumulation, que l'on peut observer dans le paysage, les résultats de l'action de ces processus. L'érosion fait intervenir des agents tels que l'eau liquide, l'eau solide, le vent, etc. Les phénomènes d'érosion résultent d'une interaction entre facteurs naturels (climatiques, lithologiques, ...) et anthropiques (cultures intensives, déforestation, ...).

On distingue le relief et le modelé de la notion de paysage. Le paysage est une notion vaste et complexe, qui fait référence à une apparence et une représentation : un arrangement d'objets visibles perçu par un sujet à travers ses propres filtres (Brunet *et al.*, 1992). Le relief désigne les inégalités d'une surface topographique comprenant aussi bien des creux que des saillies. Assez proche du relief, le terme de modelé est employé pour désigner les formes qui résultent de l'action de l'érosion en roche homogène ou dans un contexte morphoclimatique donné (ainsi pour modelé aride, modelé nival, etc.). Relief et modelé peuvent être tous deux regroupés en anglais sous l'appellation *landform*. Nous considérons ici, dans le cas des *badlands*, que relief et modelé se distinguent par leur échelle : le relief étant de plus grande envergure que le modelé ; et le paysage plus encore, incorporant en outre des éléments biogéographiques et des marques d'occupation humaine. Ces divers termes, modelé, relief, paysage, peuvent être accolés aux *badlands*.

L'érosion par ravinement est associée à la production de matériaux, en quantité importante, qui sont mobilisés, transportés, déposés, repris et redéposés. On retrouvera ensuite ces matériaux déposés dans les cours d'eau à l'aval, souvent dans les lacs ou les retenus d'eau des barrages (Rey, 2002 ; Valentin *et al.*, 2005). Le thème de l'érosion linéaire et du fonctionnement des ravines est de ce fait souvent lié à celui de la gestion des sédiments.

1.1. Définition, caractéristiques et localisation

1.1.1. Qu'est-ce que les *badlands* ?

Nous donnons ici une définition simple du terme *badlands*, choisie parmi les nombreux dictionnaires : « terrain où la faible végétation et le ruissellement important ont contribué à la formation de profondes ravines. Ce phénomène affecte des pentes de roches meubles (argiles, marnes, gypse) en pays subdésertique, ou en pays plus humide, souvent par suite de la destruction par l'homme du couvert végétal » (Foucault et Raoult, 2001). Toutefois, les *badlands* se caractérisent plus qu'ils ne se définissent. Ils se caractérisent en premier lieu par leur topographie remarquable : résultat d'une forte dissection par l'action de l'eau courante, elle laisse apparaître des ravines nombreuses, densément réparties et hiérarchisées ; ce que les géographes classiques ont appelé la fine ciselure du relief ou, pour les *bad lands* du Dakota (*sic*) la sculpture d'un « dédale de ravines et de crêtes instables » (de Martonne, 1951, planche XVII). Ces domaines présentent une faible couverture végétale, des pentes fortes, une densité de drainage élevée, un manteau d'altération (ou régolithe) mince, voire inexistant et des taux d'ablation élevés (Howard, 2009). Ils sont localisés dans des secteurs où les pluies sont irrégulières et violentes et les terrains peu végétalisés tels que dans les milieux méditerranéens ou arides et semi-arides (Bryan et Yair, 1982). Ils constituent des modelés de méso-échelle spatiale (entre 0,25 et 10² km² essentiellement, Summerfield, 1991) alors même que le secteur éponyme du Dakota du Sud recouvre plus d'un millier de km².

L'ouvrage de référence sur la géomorphologie des *badlands* et les problématiques associées reste *Badland geomorphology and piping*, dirigé par Bryan et Yair (1982). L'intérêt pour ces terrains n'est pas épuisé comme le montrent des articles récents à visée fondamentale, tel celui de Faulkner (2008), *Connectivity as a crucial determinant of badland morphology and evolution*, ou d'autres qui se focalisent sur la dégradation des terres et sur la restauration écologique du paysage (Liberti *et al.*, 2009).

D'un point de vue historique, le terme *badlands* est originaire du Dakota, Etats-Unis. Le modelé que nous connaissons sous le nom de *badlands* est en réalité une traduction du français « mauvaises terres ». Ce sont les pionniers français arrivés dans le Dakota du Sud qui ont nommé ces terres en raison de leur inaptitude à être productives et de la difficulté à les traverser. Nous pouvons situer l'apparition de ce terme vers la fin du XVIIIe siècle et le début du XIXe siècle. Ces *badlands* sont développés dans des formations où alternent sables, limons, argiles et retombées de projections volcaniques à grain fin (@NPS). Ce terme fut ensuite utilisé comme terme générique pour toutes les régions du monde présentant des caractéristiques de forte dissection associées à des fortes pentes.

Ce que l'on appelle *badlands* regroupe, en réalité, diverses situations et topographies de forte dissection : on distingue les dissections organisées en bassins versants dans des dépressions d'échelle régionale (sud-est de l'Espagne ou roubines provençales) et les simples escarpements sculptés par le ruissellement qui bordent des plateaux ou des crêtes. Cette distinction est intéressante à faire car il n'est pas évident, compte tenu des superficies et des connectivités, que ces deux types de topographie aient les mêmes types de réponses hydrologiques ou érosives. Les modelés eux-mêmes (très aigus ou arrondis) ne sont pas uniformes ; ils varient avec la lithologie ou les conditions bioclimatiques.

De plus, nous distinguons les *badlands* du simple relief de ravinement (*gully system* des auteurs anglo-saxons). En milieu agricole, par exemple, on observe la création de ravines isolées, puis conquérantes, contre lesquelles les agriculteurs luttent (Le Bissonais *et al.*, 2001 ; Poesen *et al.*, 2003 ; Valentin *et al.*, 2005). L'érosion en ravines intervient dans ce cas en réaction à une perturbation locale de la couverture végétale (ou de la surface nue) suite à des pluies agressives, des feux, ou des changements d'occupation du sol (Howard, 2009). Plus généralement les *badlands* sont souvent considérés comme le stade avancé de l'érosion en ravines qui se serait propagée (Howard, 2009). Ce qui pose indirectement la question controversée du rôle respectif des facteurs naturels et anthropiques dans la genèse et l'entretien des *badlands*.

1.1.2. Les secteurs de *badlands* dans le monde

De nombreuses régions du monde possèdent des secteurs de *badlands* dont la variété est illustrée Figure 1.1. Sans en faire de liste exhaustive, on trouve des *badlands* dans les régions suivantes :

- En Amérique du Nord : aux Etats-Unis, dans le Dakota du Sud (Schumm, 1956b), l'Utah (Gilbert, 1877 ; Howard, 1997), le New Jersey (Schumm, 1956a) et au Canada, en Alberta (Hodges et Bryan, 1982). Ils se situent dans des secteurs de climats semi-arides à tempérés.
- Sur le pourtour méditerranéen : dans le désert du Néguev en Israël (Yair *et al.*, 1980 ; Kuhn *et al.*, 2004), en Espagne dans le sud-est semi-aride, le bassin de l'Ebre et les Pyrénées centrales et orientales (Bull et Kirkby, 2000 ; Oostwoud Wijdenes *et al.*, 2000 ; Martínez-Casasnovas, 2003 ; Pardini *et al.*, 2004 ; Regüés et Gallart, 2004 ; Nadal-Romero *et al.*, 2007), dans la région de Volterra en Toscane (Alexander, 1982 ; Battaglia *et al.*, 2011), dans le Basilicate (De Santis *et al.*, 2010), ou encore dans les Alpes du Sud (Brochot et Meunier, 1995 ; Lecompte *et al.*, 1998 ; Descroix et Olivry, 2002).

- Et dans d'autres régions du monde caractérisées par des climats méditerranéen ou semi-aride : les régions nord-ouest en Argentine, le bassin de Fars à l'ouest du Zagros en Iran, le plateau des loëss en Chine (Zhu *et al.*, 1997 ; Fu *et al.*, 2005). Dans ce dernier cas, nous nous autorisons une utilisation du terme, inhabituel pour cette région, compte tenu de la forte dissection des rebords du très vaste plateau (superficie exprimée en 10^5 km²).

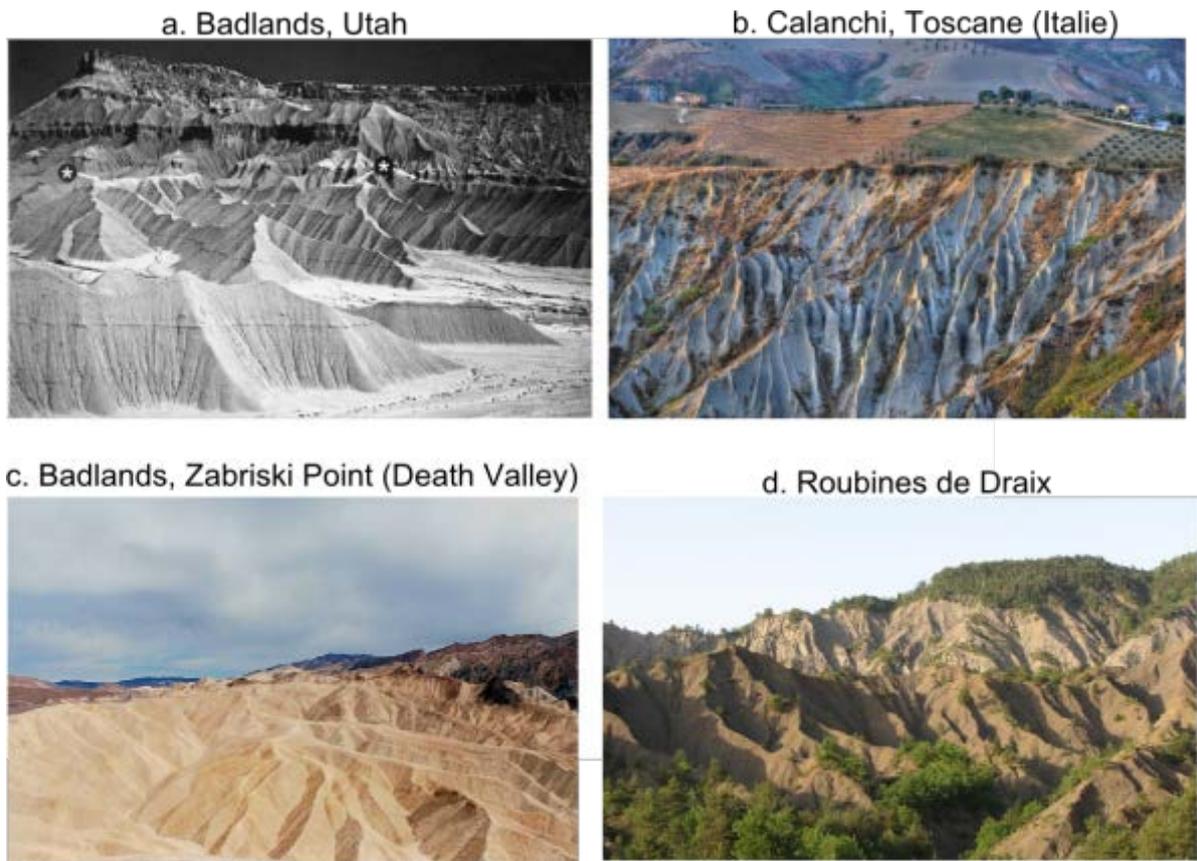


Figure 1.1. La variété des paysages de badlands : a. Badlands sculptés dans des schistes argileux, USA (Cliché extrait de Howard, 1997) ; b. Détail de calanchi, qui désigne badlands en italien, sculptés dans des argiles (Cliché : @reservacalanchidiarti) ; c. Badlands de Zabriskie point, dans la Vallée de la Mort (USA), inscrits dans des siltites ou mudstone (Cliché : L. Thommeret) ; d. Roubines, qui désigne badlands en provençal, façonnés dans des marnes (Cliché : C. Puech).

1.1.3. Comment les décrire ?

Pour décrire les *badlands*, les valeurs de pentes, de dénivelés, d'encaissement de cours d'eau, de commandement de talus lorsqu'ils se développent seulement sur un rebord de plateau sont

pertinentes. Ces caractéristiques sont liées à la situation géographique des secteurs érodés (intégrant les variables descriptives usuelles : lithologie, climat, végétation, ...). Les célèbres *badlands* des Henry Moutains (Gilbert, 1877 ; Howard, 2009), façonnés dans des schistes argileux, s'encaissent de 50 à 60 m avec une pente moyenne de versants de 40°. En leur sein, dans la formation des Mancos Shale l'uniformité lithologique se traduit par une homogénéité morphologique marquée, outre par les versants raides au profil subrectiligne, par des crêtes arrondies étroites (entre 0.5 et 2 m). Les *badlands* de Perth Amboy (Schumm, 1956a), façonnés dans des formations argileuses, s'encaissent d'environ 30 m avec une pente de versant atteignant les 50°. Ces caractéristiques et d'autres observations in situ indiquent une conservation des pentes raides dans des terrains réputés à faible résistance. Cela nous place à première vue face à un paradoxe apparent. L'énigme serait levée en considérant une évolution des versants parallèlement à eux-mêmes (1.3.1.1).

Les *badlands* sont également caractérisés par d'importantes exportations de matière (souvent des valeurs supérieures à 10.000 t.km⁻².an⁻¹, comparables à celles de bassins versants du plateau des loëss, mais à une tout autre échelle...). Le calcul de taux de dégradation spécifique (t.km⁻².an⁻¹) et des taux d'ablation moyen correspondants (mm.an⁻¹) nécessite une délimitation spatiale claire des secteurs de *badlands* par rapport aux ensembles de relief avoisinant, lambeaux de plateaux ou reliefs structuraux sommitaux. Ce zonage qui influence la superficie du domaine est fortement dépendant de l'échelle.

La morphologie des *badlands* a souvent été abordée par le biais de son réseau de talwegs ; ce dernier possédant des caractéristiques remarquables (Schumm, 1956a). Les densités de drainage sont élevées mais très variables selon les lieux et surtout selon les échelles cartographiques (environ 100 km.km⁻² pour les Henry Mountains, à partir d'une carte au 1/12000 ; environ 370 km.km⁻² pour les *badlands* de Perth Amboy, à partir d'une carte au 1/120). L'arrangement original entre crêtes et talwegs, provoquant la répétition d'un motif est parfois mis en avant, car c'est un caractère qui semble propre au *badlands*. Cet arrangement traduit une complémentarité entre lignes de crêtes et lignes de drainage qui fut décrite par Gilbert au XIXe siècle (Figure 1.2) ; celui-ci a souligné l'allure en « zig-zag » de la ligne de crêtes principale ponctuée de maxima locaux aux intersections avec les crêtes secondaires.

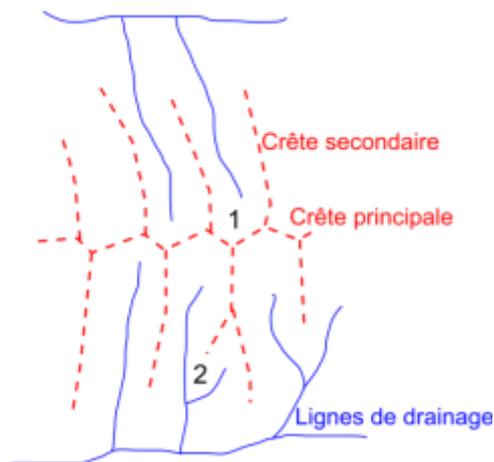


Figure 1.2. Schéma synthétique, en plan, de l'organisation des lignes de crêtes. 1 : forme en entonnoir (creux relatif par rapport aux maxima locaux résultant de la jonction des lignes de crêtes principale et secondaire) ; 2 : forme en entonnoir en tête de vallon secondaire (Gilbert, 1877, d'après Anderson, 1988).

1.1.4. Les *badlands* : réseaux de ravines

Pour nous, le relief de *badlands* est un objet morphologique composé de ravines organisées en un réseau dense et ramifié. Ces réseaux de ravines sont constitués de réseaux de talwegs, de réseaux de crêtes et de versants raides (Figure 1.3 ; Figure 1.4). Le talweg est défini comme la ligne joignant les points les plus bas de la vallée ; deux lignes de crête, ou lignes d'interfluve, bordent cette ligne latéralement. Ces termes au départ définis pour des unités drainantes sont encore valables quand la vallée est une ravine drainée de manière temporaire.

On distingue le champ sémantique de la géomorphologie de celui de l'hydrologique. Le talweg est associé à la morphologie alors que la rivière ou le torrent sont des objets hydrologiques. De même, on différencie le réseau de talwegs du réseau hydrographique. Le réseau hydrographique fait référence à l'écoulement, permanent ou temporaire, dans les chenaux ou lits fluviaux alors que le talweg est un objet topographique linéaire, qui marque souvent la ligne de fond du chenal. Si ces deux objets sont liés, ils sont de nature différente.



Figure 1.3. Les badlands, réseaux de ravines : réseaux de talwegs et de crêtes (Source : SIG Draix). Les seules lignes de crêtes représentées ici sont les limites des principaux sous bassins.

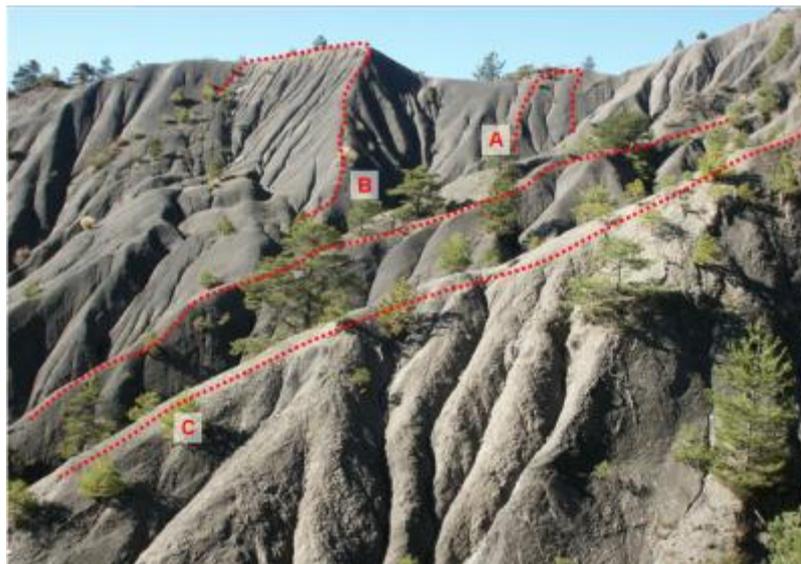


Figure 1.4. Badlands dans les « Terres Noires » de Draix – Alpes méridionales françaises : A) Deux rigoles qui s'élargissent en ravines élémentaires à l'aval ; B) Ensemble de ravines élémentaires ; C) Ravine. Sa limite amont est rendue complexe par la coalescence de ravines adjacentes. (Puech et al., 2009)

1.1.5. Age des *badlands* : facteurs anthropiques vs facteurs naturels

« How old are the *badlands*? » Cette question posée par Wise *et al.* (1982) revient souvent. Plus largement la morphogenèse et la dynamique érosive des *badlands* posent deux questions principales auxquelles des réponses partielles ont été apportées : 1) comment et quand se sont-ils formés ; 2) sont-ils aujourd'hui le siège d'une érosion active ? S'il est certain que les contextes d'abaissement relatif du niveau de base local ou régional favorisent le ravinement, la formation des *badlands* est sujette à une divergence d'interprétation quant à l'importance des différents facteurs : le facteur dominant est-il d'origine naturelle ou anthropique ?

Des études de paléo-environnements et paléotopographies ont permis de reconstituer l'évolution de certains reliefs de *badlands*. Dans les marnes des Alpes de Provence, Miramont (1998, étudiant le bassin du Saignon en particulier), Miramont *et al.* (2000) datent l'érosion en ravines de la fin du Postglaciaire et du début de l'Holocène en s'appuyant sur les datations de troncs subfossiles (*Pinus silvestris* L.) enfouis dans les sédiments torrentiels grossiers du « Remblaiement postglaciaire principal » (12000- 7000 BP environ). Howard (1997), dans son étude sur l'évolution des *badlands* des Henry Mountains de l'Utah relève la dissection d'une surface pléistocène avec une incision de 60 m environ. Dans certains secteurs géographiques (désert du Néguev, et autres *badlands* du pourtour méditerranéen), l'estimation de l'âge des *badlands* exclut souvent l'homme comme facteur principal (Warren, 1984 ; De Ploey et Schmidt, 1992). Ces résultats s'opposent à l'hypothèse, souvent avancée, d'un développement rapide des *badlands* dans les temps historiques souvent imputé à une déforestation massive et une diminution de l'épaisseur des sols depuis l'époque romaine ; du moins, ne faut-il pas généraliser cette interprétation.

1.2. Processus élémentaires et bilans d'ablation

L'érosion dans les *badlands* est favorisée par la réunion de deux facteurs : l'érosivité des pluies et l'érodabilité du terrain. Cette dernière comprend la sensibilité du substrat lui-même, la couverture végétale et les paramètres environnementaux locaux d'un versant initial ou d'une surface initiale (longueur, pente, exposition, ...) (d'après Brochot, 1999).

Comme pour d'autres reliefs, l'érosion peut y être décrite en faisant appel à deux grands types de processus : la déstructuration de la roche qui aboutit à la production de matériaux meubles ; et la mobilisation et le transport de ces matériaux sur les versants puis dans les chenaux. Dans ces derniers, il convient d'ajouter une érosion épisodique verticale (incision) ou latérale (sapement) aux

dépend de la roche en place. L'ensemble détermine la réponse hydrologique et érosive des bassins aux événements pluvieux et assure le transfert sédimentaire de l'amont vers l'aval.

1.2.1. Les processus de désagrégation

Les formations dans lesquelles sont érodées les *badlands* (marnes, argiles, siltites) sont, en général, très sensibles à la météorisation qui agissant sous ses deux formes, l'altération chimique et la désagrégation mécanique, aboutit à la formation d'un régolithe (Figure 1.6). De nombreuses recherches ont porté sur les processus de désagrégation (Hodges et Bryan, 1982 ; Oostwoud Wijdenes et Ergenzinger, 1998 ; Regües et Gallart, 2004 ; Kasanin-Grubin et Bryan, 2007).

L'épaisseur du régolithe, qui résulte des processus de météorisation, varie dans le temps et l'espace (Nadal-Romero *et al.*, 2007) ; il peut atteindre localement 50 cm dans les terrains marneux (Descroix et Mathys, 2003). La structure apparente du régolithe varie elle-même, sur les premiers centimètres, selon la capacité de retrait-gonflement de la formation (capacité liée à la proportion d'argile et à la nature des argiles dans la roche) : lorsque cette capacité est faible, le régolithe prend l'apparence de « crêpes » polygonales alors que lorsqu'elle est forte, il présente une structure en « pop-corn » (Howard, 2009 ; Figure 1.5).

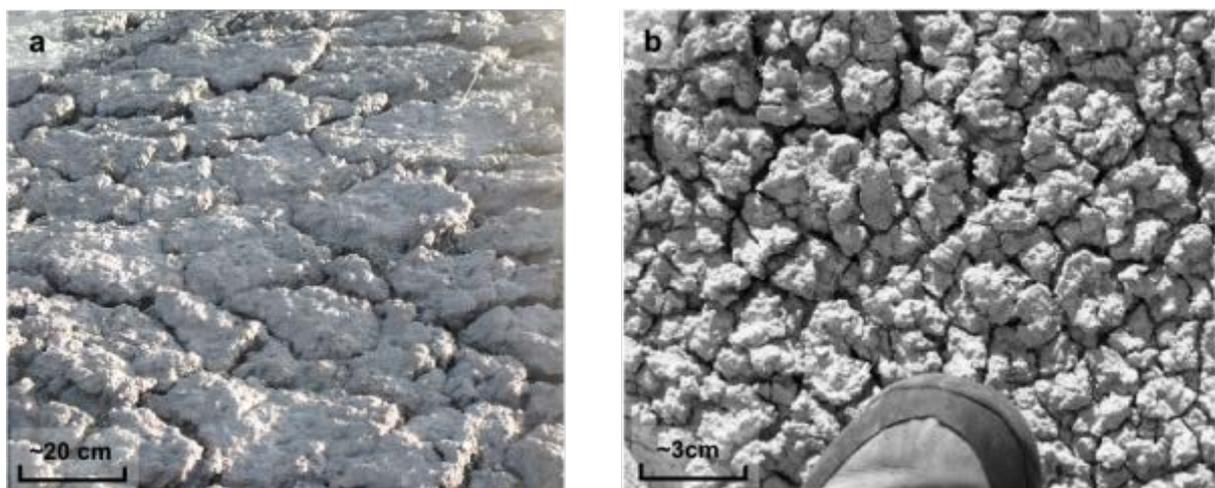
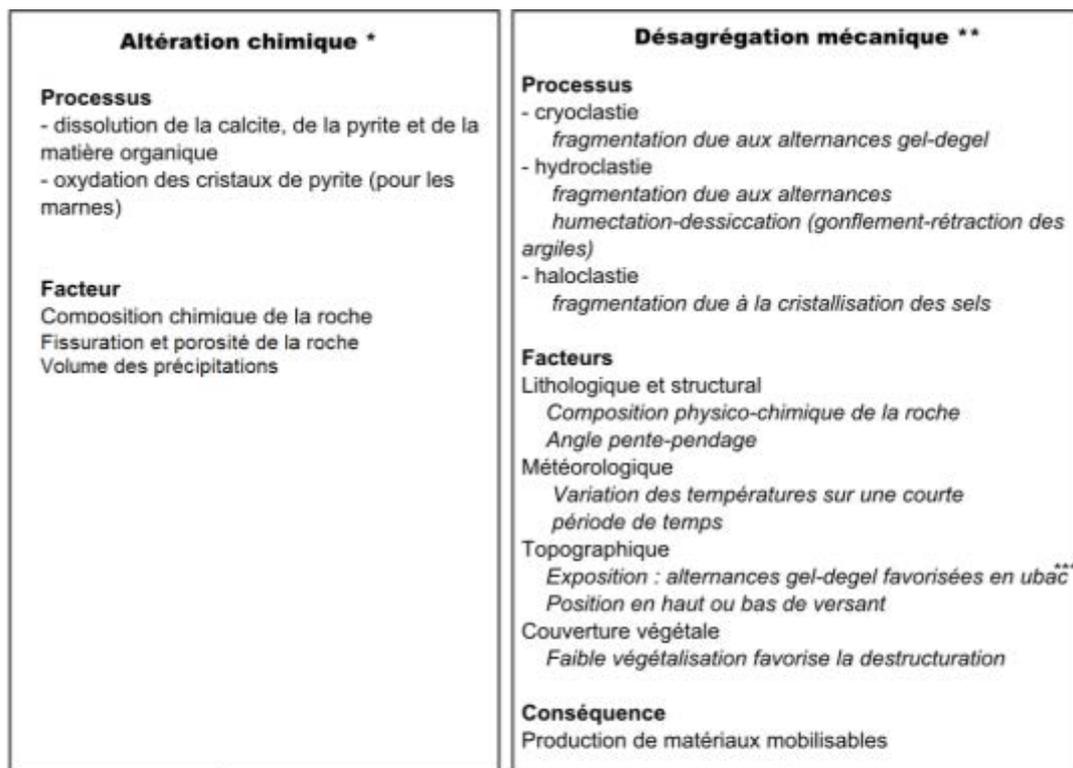


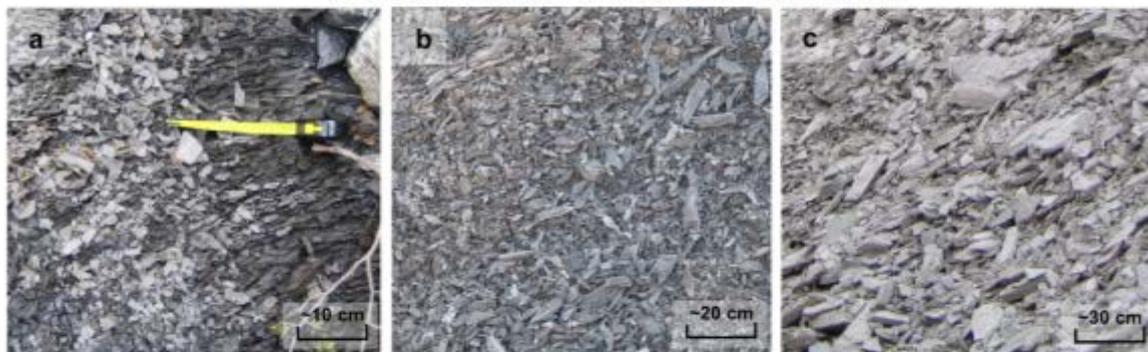
Figure 1.5. Structure du régolithe : a. en polygone régulier (Cliché : B. Kaiser, juin 2009) ; b. en « pop-corn » (Cliché extrait de Howard, 2009). Dans les deux cas il s'agit de régolithe marneux induré par la dessiccation.

La variabilité spatiale et temporelle de la désagrégation dépend des données climatiques et topographiques (exposition des versants), du taux de couverture végétale et, pour l'essentiel, des propriétés physico-chimiques du matériau. La désagrégation varie en fonction de la porosité et des

discontinuités de la roche, du taux d'argile, de la nature gonflante ou non des minéraux argileux, de la présence d'ions sodium et du taux de carbonates (pour les marnes du sud-est pyrénéen: 38% Regües *et al.*, 2000). Dans les Baronnies (Drôme, Préalpes du sud), la désagrégation peut libérer en une saison des débris marneux de différentes tailles qui s'accumulent temporairement sur le versant avant de glisser à sec ou d'être entraînés par l'eau dans le fond des ravines (Chodzko et Lecompte, 1992 ; Lecompte *et al.*, 1998). Les marnes callovo-oxfordiennes des « Terres Noires » se désagrègent particulièrement vite en plaques, plaquettes, aiguillettes et paillettes (Coulmeau, 1987, Lhénaff *et al.*, 1993).



Matériaux destructurés et débris mobilisables



Différentes formes et épaisseurs de débris issus de marnes callovo-oxfordiennes ayant perdu leur cohésion : a. paillettes ; b. aiguillettes ; c. plaques et plaquettes (Clichés: N. Thommeret, mai 2006 et 2009)

* Bufalo, 1989 ; Simonet *et al.*, 1995 ; Antoine *et al.*, 1995

** Coulmeau, 1987 ; Brochot et Meunier, 1995 ; Richard *et al.*, 2000 ; Descroix et Mathys, 2003 ; Nadal-Romero *et al.*, 2007

*** Résultat pour des sites de moyennes altitudes (<1500 m)

Figure 1.6. Les principaux processus de désagrégation, facteurs et conséquences

1.2.2. Les processus de transport

En ce qui concerne la mobilisation et le transport, il existe dans les modélisations numériques une dichotomie entre les processus de versants, dominés par les processus dits de diffusion, et les processus de chenaux, dominés par les processus dits d'advection (Montgomery et Fournier-Georgiou, 1993 ; Dietrich et Perron, 2006). Tout en sachant que le modèle de diffusion vaut essentiellement pour les processus lents tels que la reptation (*creep*), nous gardons cette présentation en deux ensembles : versants et chenaux.

La compétition entre ces deux catégories de processus contrôle la topographie et aboutit à la création des lignes caractéristiques du relief : crêtes (plus ou moins aiguës) et talwegs reliés par des versants plus ou moins pentus. Toutefois, si la segmentation théorique entre ces espaces est pertinente, elle est difficile en pratique puisque sur le terrain et ses représentations (image ou MNT) la limite matérialisant le passage entre versant et chenal est floue ; et ce, tant dans le sens longitudinal, pour le repérage des têtes de ravines (Montgomery et Dietrich, 1992), que dans le sens transversal, pour la délimitation des chenaux de petite taille.

1.2.2.1. Sur les versants

A. Ruissellement diffus et concentré

Le ruissellement constitue le principal agent du ravinement. Un ruissellement apparaît, soit lorsque l'intensité de la pluie dépasse la vitesse d'infiltration dans la couche superficielle du sol, soit lorsque le sol est saturé par les écoulements hypodermiques, ce qui peut donner naissance à un écoulement de surface dans les secteurs où la nappe est affleurante, appelé écoulement de saturation (Borges, 1993 ; Bertran (dir.), 2004). Le ruissellement diffus en micro-filets d'eau s'observe facilement sur le terrain. Lorsque la durée et l'intensité de la pluie est suffisante il est suivi d'un ruissellement concentré issu de la convergence des micro-filets.

L'action érosive du ruissellement diffus est faible. Il opère un décapage du sol de ses matériaux les plus fins et peut transporter les particules détachées par l'impact de la pluie (*effet splash*). Le ruissellement concentré, qui correspond à un écoulement linéaire, avec une plus grande hauteur d'eau, possède une force tractrice suffisante pour creuser le support (Coque, 1977). Son action morphogène donne naissance à deux types de formes plus ou moins profondes nées de l'incision du matériau : les rigoles et les ravines.

B. Le piping

Le *piping* désigne les mécanismes d'érosion dus à des écoulements de sub-surface (Harvey, 1982 ; Gutiérrez *et al.*, 1997 ; Wilson *et al.*, 2009). L'écoulement a lieu dans les macro-pores de la roche ou des tunnels de sub-surface (soil pipes). D'après Bertan *et al.* (2004), il constitue l'un des principaux facteurs de ravinement sur roche-mère argileuse du fait des tassements engendrés par l'effondrement des galeries qui favorisent la concentration du ruissellement.

C. Les mouvements de masse

Les mouvements de masse correspondent à des déplacements lents ou rapides de volumes importants de matériaux. Leurs caractères (épaisseur, vitesse, distance parcourue) et leurs comportements rhéologiques ont donné lieu à diverses classifications (Letourneur et Michel, 1971 ; Voight, 1978 ; Pierson et Costa, 1987). Divers et variés, de la reptation très lente (quelques centimètres par an) à l'écroulement quasi instantané en passant par la solifluxion et les divers glissements de terrain, ils font appel à la mécanique des roches et des sols autant qu'à la géologie, l'hydrogéologie et la géomorphologie (Figure 1.9). Dans certains cas tels que les versants des *badlands* dans les schistes argileux de l'Utah (Godfrey *et al.*, 2008), ils constituent les processus d'érosion dominants. Ils sont très importants également dans les argiles pliocènes d'origine marine du Basilicate.

Pour les *badlands*, roches et formes (pentes fortes mais relief modéré), on retient deux types principaux de mouvements de masse : les glissements de terrain et les éboulements. Les premiers peuvent se produire avec une fréquence saisonnière à la faveur de précipitations qui modifient la pression interstitielle de l'eau et la résistance au cisaillement du matériau ; ils peuvent être superficiels, affectant une tranche de moins de un mètre d'épaisseur dans le matériau (souvent la roche altérée) qui sous-tend le versant, ou profonds et ils sont alors sporadiques. Les marnes et argiles sodiques sont particulièrement affectées. Les éboulements (appelés aussi écroulements) sont plus rares, ils affectent les crêtes elles-mêmes sans que les causes ne soient claires : fatigue de la roche, séisme non enregistré par ailleurs ? Ces interrogations ont prévalu lors d'un écroulement de la crête de rive gauche du Laval (bassin de Draix).

Même si leurs traces morphologiques fraîches, cicatrices d'arrachement à l'amont, intumescence à l'aval, s'estompent rapidement dans les terrains qui se délitent facilement comme les marnes, les glissements de terrain jouent un rôle important dans les courbures de la surface topographique. Celles-ci peuvent favoriser la concentration du ruissellement et participer à l'initialisation ou à l'entretien du ravinement. Glissements et écroulements peuvent être prolongés à l'aval par des coulées de débris dont la teneur en eau volumique est plus élevée et qui atteignent plus fréquemment le bas du versant. La solifluxion, déformation et déplacement d'une masse boueuse plastique sur pente modérée (5° à 30° selon Birot, 1981), est souvent décrite dans les terrains

marneux (Descroix et Mathys, 2003). La reptation (*creep*), s'exerçant sur des pentes qui peuvent être encore plus faibles, jouerait un rôle efficace dans le déplacement grain à grain de matériaux fins et la réalisation de profils convexes en haut de versant, y compris dans certains *badlands* (ainsi dans les schistes argileux ou les argilites du South Dakota National Monument (Schumm, 1956b).

Le *creep* a été modélisé mathématiquement très tôt (Culling, 1963) par une équation de diffusivité liant la variation d'altitude dans le temps et la variation d'altitude dans l'espace (variation dans la direction de la plus grande pente). L'équation aux dérivées partielles est celle de la diffusion de la chaleur (Biot, 1981, p. 307). Biot rapporte qu'il faudrait un million d'années pour abaisser de 40 mètres le sommet d'une surface plane inclinée de 50% (sous certaines hypothèses plus ou moins réalistes). Autant les vitesses de la reptation sont mesurables, autant le rôle proprement morphologique de ce processus est difficile à vérifier aux échelles de temps court.

Transport sur les versants

Processus

- Effet splash
- Ruissellements diffus et concentré
- Piping
Entraînement dans les conduits de subsurface et affaissement
- Mouvement de masse: reptation, solifluxion, glissement de terrain et éboulements
Déplacements lents ou rapides de matériaux soumis à des contraintes

Facteurs

Topographique

Effet de la pente sur les vitesses de ruissellement et les processus gravitaires

Météorologique

Rôle majeur des précipitation sur le déclenchement et l'intensité des phénomènes (effet sur la teneur en eau des sols et la pression interstitielle de l'eau)

Couverture végétale

Effet splash, reptation et ruissellement diffus favorisés par l'absence de végétation

Structural

Glissements de terrain favorisés par un pendage conforme à la pente

Conséquence

Déplacement puis accumulation éventuelle de matériaux en bas de versants

Production de matériaux mobilisables par les cours d'eau



Ruissellement pendant une averse d'été sur un versant du Moulin : ruissellement diffus non visible sur les versants et de ruissellement concentré dans les chenaux préexistants



Accumulation de débris suite à un éboulement de la crête marneuse. Les blocs visibles ont subi un amincissement par météorisation postérieure au dépôt.

Coulmeau, 1987 ; Borges, 1993 ; Malet *et al.*, 2000 ; Rey, 2002 ; Descroix et Mathys, 2003 ; Bertran (dir.), 2004 ; Wilson *et al.*, 2009

* Clichés: N. Thommeret, a bassin du Moulin, juin 2008 ; b bassin du Laval, avril 2006

Figure 1.7. Les principaux processus de transport sur les versants

1.2.2.2. Dans les chenaux

Les matériaux qui atteignent le bas des versants, ou bien sont entraînés immédiatement dans les chenaux lorsque la durée et l'intensité des précipitations sont suffisantes pour assurer un écoulement des cours d'eau éphémères (voire une crue dans le cours d'eau principal), ou bien sont déposés et pris en charge ultérieurement (Mathys, 2006 ; Godfrey *et al.*, 2008). Le transport solide est fonction de la taille des particules à transporter, de la pente longitudinale du chenal et du débit liquide (Figure 1.8). Une érosion linéaire peut advenir sur le fond si, en raison notamment de vitesse et hauteur d'eau élevées, la contrainte de cisaillement au fond dépasse une valeur critique.

Il existe une forte saisonnalité des processus fluviaux. Dans les *badlands* de l'Utah, 95% des matériaux accumulés en bas de versants sont évacués durant l'été ou au début de l'automne (Godfrey *et al.*, 2008). Les *badlands* méditerranéens connaissent le même type de saisonnalité, avec une succession de dépôt-reprise dans les chenaux (Lecompte *et al.*, 1998 ; Mathys, 2006).

Transport dans les chenaux

Processus

Dépavage éventuel
Suspension
Charriage
Écoulement hyperconcentré
Lave torrentielle

Facteurs

Météorologique
Durée et intensité des précipitation
Volume liquide total écoulé et valeur de la pointe de crue
Géométrique
Pente longitudinale et largeur du chenal
Matériaux disponibles
Quantité de matériaux disponibles
Granulométrie des matériaux

Conséquence

Déplacement des matériaux vers l'exutoire, avec des mécanismes de dépôt-reprise

Meunier, 1989 ; Descroix et Mathys, 2003 ; Liébault, 2003 ; Mathys, 2006

* Clichés: N. Thommeret, c bassin du Moulin, juin 2008 ; d bassin du Laval, avril 2006



Écoulement chargé lors d'une averse d'été



Blocs de calcaire dans le chenal principal susceptibles d'être repris. Ces blocs proviennent des affleurements rocheux calcaires dominant les *badlands* marneux

Figure 1.8. Les principaux processus de transport dans les chenaux

Le transport des matériaux dans les chenaux se fait à la fois par transport en suspension des éléments les plus fins (argiles, limons, sables) et par charriage des éléments les plus grossiers sur le fond. Selon le taux de concentration des matières en suspension, on passe des écoulements peu chargés aux écoulements concentrés, hyperconcentrés et jusqu'aux laves torrentielles (Figure 1.9) : des valeurs de 500 g par litre et même exceptionnellement de 800 g par litre (concentration d'une lave torrentielle) ont été mesurées à la station de mesure Cemagref du Laval (bassin expérimental marneux de Draix, Alpes de Haute-Provence).

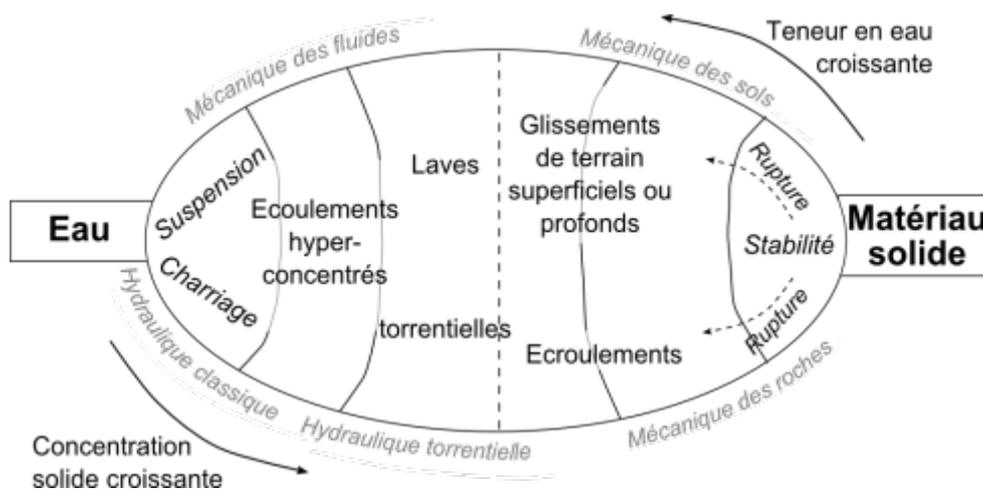


Figure 1.9. Ecoulements et mouvements de masse. Les disciplines concernées (d'après Meunier, 1991, fig. 4.3 et 4.4, p.62 et 63)

1.2.2.3. Connectivité versant/chenal

Le concept de connectivité décrit l'interconnexion entre les composantes du paysage par lesquelles transitent les flux d'eau et de matière à travers le bassin versant et vers l'exutoire (Godfrey *et al.*, 2008 ; Cantòn *et al.*, 2011). Au cours d'un événement pluvieux (notamment intense), une forte connectivité permet le transfert de l'eau et des matériaux mobilisés, des versants vers les chenaux (Fuller et Marden, 2011). Dans les *badlands*, le creusement des rigoles au cours d'une pluie favorise la connectivité dans le bassin en reliant directement versants et chenaux (sous réserve que les rigoles aboutissent à une ravine). Toutefois, les dépôts et cônes sédimentaires de bas de versant réduisent, temporairement ou durablement, la connectivité du système (Faulkner *et al.*, 2008 ; Cantòn *et al.*, 2011). Le degré de connectivité varie dans le temps : au cours de l'année, avec les cycles de remblaiement - déblaiement des chenaux et au cours des événements pluvieux intenses (Mathys, 2006). Un couplage a également été décrit entre les conduites de sub-surface (*pipes*) et les chenaux secondaires (Faulkner *et al.*, 2008).

1.2.3. Les bilans d'ablation

La contribution respective des divers processus à la production et au transport des matériaux n'est pas aisée à établir ; et elle dépend, ainsi que les facteurs dominants, de l'échelle d'observation (Descroix et Mathys, 2003 ; de Vente et Poesen, 2005 ; Cantòn *et al.*, 2011 ; Vanmaercke *et al.*, 2011). Les bilans d'ablation, à différentes échelles, intègrent les différents processus à travers leurs effets cumulés. Dans les *badlands*, ils ont donné lieu à de nombreuses mesures *in situ* : sur parcelle ou à l'exutoire des bassins ; ils concernent des superficies et des intervalles de temps donnés (comptant

plusieurs années pour être significatifs). Dans les *badlands* marneux du domaine ouest méditerranéen (Italie, France), un consensus fixe la valeur d'ablation autour de 1 cm.an^{-1} .

1.2.3.1. A l'échelle de la parcelle

A l'échelle de la parcelle (ou d'une portion de versant non fermée de façon à maintenir le transport de haut en bas du versant), on reste proche de la mesure des processus élémentaires. Ainsi, les valeurs d'ablation peuvent être influencées par l'exposition des versants ou par l'angle entre la pente du versant et le pendage. Descroix et Olivry (2002) rappellent que dans les marnes noires des Baronnies l'ablation sur les versants exposés au nord (environ 11.6 mm.an^{-1}) est plus importante que pour les versants exposés au sud (3.8 à 6.5 mm.an^{-1}). Ils soulignent que les valeurs sont trois fois plus élevées lorsque la pente est perpendiculaire au pendage (9.3 mm.an^{-1}) que lorsqu'ils sont parallèles (3.3 mm.an^{-1}).

Dans les Baronnies encore (val de Méouge et combe de Séderon), Lecompte *et al.* (1998) analysent statistiquement le résultat de huit années de mesures effectuées à l'aide d'un réseau de piquets implantés en diverses positions dans les ravines (crêtes, haut de versant, bas de versant, lit de chenal secondaire). Autant que des valeurs moyennes d'ablation différentes selon les marnes à l'affleurement, oxfordiennes, gargasiennes, cénomaniennes (allant de 3 cm.an^{-1} pour les premières à $0,8 \text{ cm.an}^{-1}$ pour les dernières d'avril 1990 à avril 1995), c'est l'absence de différence statistique significative entre les 191 piquets implantés qui retient l'attention. Ce résultat important conduit les auteurs à considérer que la vitesse d'érosion est indépendante de la position topographique. Les erreurs-types ne montrant pas de comportement chaotique, « les roubines évolueraient donc parallèlement à elles-mêmes en conservant leurs formes vives ».

Rovera *et al.* (1999, cités par Descroix et Mathys, 2003) ont mesuré dans le bassin marneux du Saignon (Alpes du Sud) une ablation entre 3 et 10 mm.an^{-1} selon les années et les localisations des parcelles. Les mesures conduites de 2002 à 2008 (Corona *et al.*, 2011) sur des versants et des interfluves du bassin du Moulin près de Draix aboutissent à une ablation moyenne de peu supérieure à 6 mm.an^{-1} sur versant dénudé ($2,8 \text{ mm}$ à $11,5 \text{ mm.an}^{-1}$ et avec un écart-type de $2,2 \text{ mm.an}^{-1}$ sur 37 piquets) et de 4 mm.an^{-1} (de $2,6$ à $5,1 \text{ mm.an}^{-1}$) sur les dix interfluves retenus ; ces derniers ayant tous une pente inférieure à 16° alors que celle des versants n'excède pas 41° (les versants les plus pentus sont exclus du protocole, contrairement à celui de Méouge-Séderon). Une confrontation satisfaisante est faite avec les déchaussements de racines et la mesure dendrogéomorphologique.

Par comparaison, l'ablation moyenne obtenue sur six ans (1997-2003) par la méthode des piquets dans les argiles plio-pléistocènes du Basilicate sur des versants de *calanchi* et de *biancane* (ces derniers plus érodables) se situe respectivement dans la fourchette 7 - 10 mm.an^{-1} et 9 - 19 mm.an^{-1} (Clark et Rendel, 2006). Dans le domaine aride du sud-ouest américain, l'ablation est plus faible.

Avec le même type de technique Godfroy *et al.* (2008) rapportent pour les *Gilbert Badlands* schisteux de l'Utah $3,2 \text{ mm.an}^{-1}$ à mi versant et $1,2 \text{ mm.an}^{-1}$ en bas de versant, en valeur moyenne sur quarante ans ; à quelques kilomètres de là, sur onze sites très particuliers (en bordure de glissement de plaques de terrain) l'abaissement moyen de la surface en vingt ans irait de nul à 8.4 mm.an^{-1} . « *The result of these measurements is a 3.5 mm/yr average* » (*sic*) (op.cit. p. 248). Cette assertion ne manque de laisser interrogatif sur ce type de moyenne (la moyenne sur des données spatiales) et sa représentativité.

Sur parcelles expérimentales, on retient également les simulations de pluies ayant pour but l'observation et la mesure des processus élémentaires, voire la mise en évidence de seuil de déclenchement des mouvements de masse (Descroix et Mathys, 2003). Les expérimentations d'Oostwoud Wijdenes et Ergenzinger (1998) ont permis sur des parcelles longues de 5 à 11 m de déterminer des conditions pluviométriques (intensité-durée) d'apparition des mini-coulées de débris dans un sous bassin du Laval (Draix). Ce sont les fortes concentrations mesurées (de 550 à 1440 g.l^{-1}) qui justifient l'appellation de coulées (ici des mini *debris-flow*).

1.2.3.2. A l'échelle de la ravine ou du bassin-versant

A l'échelle de la ravine toute entière, considérée comme un petit bassin versant ou à l'échelle du bassin versant drainé par un cours d'eau permanent, il est possible de mesurer ou de reconstituer le tonnage de matériaux évacués à l'exutoire. On obtient alors une mesure globale, complémentaire à la mesure sur parcelle ; en l'absence de traceurs, elle ne permet pas de savoir d'où viennent les matériaux ni de séparer l'influence des variables spatialisées locales. Les résultats intègrent de façon plus ou moins aléatoire l'effet des processus de désagrégation sur les versants, de transport solide, et aussi d'érosion dans les chenaux.

Pour obtenir une lame d'ablation, les données de base sont les charges solides totales (suspension et charriage) mesurées au cours de l'année (Olivry et Hoorelbeck, 1990 ; Liébault, 2003). Leur somme annuelle (leur masse) moyennée sur plusieurs années et rapportée à la superficie du bassin (ou d'une surface considérée comme zone source des débris) fournit la dégradation spécifique ($\text{t.km}^{-2}.\text{an}^{-1}$), elle-même convertible en hauteur d'ablation en prenant en compte la masse volumique du matériau qui est érodé : roche en place ou altérite. Le régolithe marneux, par exemple, est quasiment deux fois moins dense que la marne cohérente. Valeurs de dégradation spécifique et hauteur d'ablation dépendent aussi de la surface de référence. D'où l'importance de la délimitation du bassin. Certains souhaitent ne considérer que la taille de la surface d'érosion active, ce qui pose de nombreux problèmes méthodologiques, mais peut s'avérer utile.

Olivry et Hoorelbeck (1990) rapportent des résultats de bilans d'ablation conduits pendant trois ans (1985-1988) pour deux bassins Savournon I (8ha) et Savournon II (75 ha) en secteur marneux («

Terres Noires ») des Alpes du Sud. La moyenne des exportations annuelles totales (suspension et charriage) est d'environ 540 tonnes pour le petit bassin et de 2 720 tonnes pour le grand. En considérant uniquement la surface d'érosion active, à savoir les roubines nues, la lame d'ablation est équivalente pour les deux bassins (8.3 mm.an⁻¹ pour le petit bassin et 8.1 mm.an⁻¹ pour le grand ; Descroix et Olivry, 2002) alors qu'elle serait dans un rapport de 1 à 1,8 en considérant la superficie totale qui comporte aussi des *badlands* couverts de pelouse ou d'arbres. Notons que cette référence à la superficie des seules marnes nues a permis de livrer des valeurs conformes à celles proposées habituellement pour les *badlands* de Provence, autour de 10 000 t.km².an⁻¹, mais ce faisant, en altérant la notion d'unité fonctionnelle d'un bassin versant.

Rappelons que pour estimer une lame d'ablation le volume de matériaux sédimentés dans les retenues de barrages est également informatif (Descroix et Mathys, 2003). Ainsi en va-t-il pour la retenue du Saignon (vallée de la Sasse) colmatée en dix-huit ans et conduisant à une valeur d'ablation moyenne de 6,8 mm.an⁻¹ pour quelque 144 ha de *badlands* du bassin versant (soit une dégradation spécifique de près de 12 000 t.km².an⁻¹).

De manière générale, les travaux de mesure d'ablation sur les terrains marneux des Alpes du Sud s'accordent sur des valeurs allant de 6 à 12 mm.an⁻¹ (Descroix et Mathys, 2003). Encore faut-il bien préciser les méthodes et les surfaces de référence. Des comparaisons non seulement en valeur moyenne annuelle, mais lors des épisodes pluvieux individuels de forte ou faible fréquence, habituels ou paroxysmiques, permettraient de saisir quels sont les degrés comparés de réactivité des versants, des chenaux et des bassins tout entiers.

1.3. Les modèles morphologiques

Les formes et modelés représentent le résultat d'une intégration spatiale et temporelle des processus. Sans faire de liste exhaustive des modèles de *badlands*, nous nous intéressons ici à trois types de modèles morphologiques ; deux concernent les interactions entre formes et processus. Les processus d'érosion façonnent des formes et celles-ci conditionnent l'érosion, par leur agencement spatial et leurs valeurs de pente, notamment. Il existe, selon certaines représentations, un réajustement constant entre forme et processus pour tendre vers un état d'équilibre. En raison de leur vitesse d'érosion, les *badlands* constituent des terrains privilégiés pour l'observation simultanée des formes et des processus (Schumm, 1956 ; Howard, 2009). Deux questions nous semblent primordiales : 1) quels liens, qualitatifs et quantitatifs, peut-on établir entre formes et processus ? 2) en quoi les variables morphologiques permettent-elles une analyse de l'espace et des processus potentiels qui y agissent ?

1.3.1. Un modèle qualitatif global

En géomorphologie classique, les *badlands* sont représentés comme un système fonctionnel dont les éléments sont clairement liés les uns aux autres et interagissent sur une échelle de temps courte (quelques années, une année ou « l'instant » des pluies intenses et des crues concomitantes). Cette échelle de temps est compatible avec les observations et les mesures des naturalistes ou des ingénieurs, fondement du modèle. Parmi les ensembles d'éléments en interaction, il faut considérer en priorité le couple versant-chenal : plus concrètement l'aptitude du cours d'eau à mettre en mouvement et à transporter les débris produits tout au long du versant et qui atteignent sa base.

Pour différents types de relief et de roches, des réflexions nombreuses (Young, 1972 ; Ahnert, 1976 ; Birot, 1981) ont tenté de lier l'allure des profils de versant – rectilignes, convexes, concaves – avec le volume et la taille des débris en transit, puis évacués ou non en bas de versant. Il en est résulté une représentation selon deux modes principaux d'évolution des versants au cours du temps : 1) recul des versants avec diminution de la pente moyenne du versant ; 2) recul des versants raides parallèlement à eux-mêmes. Les *badlands* correspondraient au second cas d'une façon particulière qui associe versants raides (>35°) et roches tendres (meubles).

Pour comprendre cela, il faut faire intervenir les variables lithologiques et environnementales des *badlands* :

- Roches meubles ou altérables fournissant habituellement des débris peu grossiers susceptibles d'être pris en charge et entraînés lors des écoulements ordinaires (*i.e.* fréquents, au débit modéré) ;
- Climat et hydrologie marqués par des contrastes saisonniers et des événements « extrêmes » : averses intenses, crues soudaines et violentes ; ces dernières se chargent de masses importantes accumulées au cours des saisons (ou des années) précédentes, avec d'éventuels gros blocs allochtones (Figure 1.8) ;
- Une végétation rare qui assure la quasi simultanée des ruissellements concentrés les plus érosifs sur versant, et des écoulements à haute énergie dans les chenaux préexistants : la connexion versant-chenal s'établissant alors sur le temps court ;
- Une partie de l'énergie des cours d'eau permettant, épisodiquement, l'incision verticale de la roche en place ou du régolithe au fond des chenaux. Cette érosion verticale a pour conséquence, dans les vallons étroits un raidissement des versants, plus ou moins vite corrigé par des glissements de terrain, même minces. Dans les chenaux larges, c'est le sapement latéral par le cours d'eau en crue qui vient déstabiliser le versant avec le même type de résultat : un rééquilibrage mécanique après un raidissement de la base (voire un

surplomb) et une fourniture abondante de débris par glissement de terrain ou glissement-coulée sur le versant. Ces débris, qu'ils jonchent le versant ou qu'ils viennent encombrer le lit, seront vite amenuisés par la météorisation et à nouveau susceptibles d'être entraînés facilement.

Les *badlands* les plus caractéristiques semblent donc s'organiser en un système de rajeunissement toujours recommencé, traduisant un certain équilibre des formes sur un laps de temps donné. Les versants sont raides, mais les propriétés mécaniques des roches (tendres) empêchent qu'ils n'atteignent un fort commandement (*i.e.* un fort dénivelé). Le corollaire du fonctionnement interne ainsi décrit est une exportation importante de matière.

Il existe des variantes selon les contextes lithologiques et climatiques. En domaine aride ou semi-aride, des pédiments (surface sub-planes à pente très faible 1 à 2°) vont se développer au pied des versants raides et la connexion versant-chenal principal ne sera assurée que lors des rares épisodes de pluies intenses aboutissant à des écoulements en nappe sur le pédiment (écoulements de plus ou moins grande hauteur d'eau). Lambeaux de crêtes et sommets « ruiniformes » (ainsi les pinacles du *Badlands National Park*) peuvent apparaître, traduisant une déconnexion durable des éléments hauts et bas.

Le modèle et ses variantes décrivent un fonctionnement pour des formes déjà créées. Il est plus délicat de comprendre comment se créent les formes ; comment naît et s'étend le réseau des ravines hiérarchisées constitutives des *badlands*. Qualitativement, on retrouve la notion d'érodabilité du matériau (si une ravine se crée, deux aussi bien...) que vient compléter la notion d'instabilité utilisée en sciences physiques : une petite perturbation peut modifier de façon irréversible une topographie, une ligne d'écoulement. Dans cette voie, Kirkby et Bull (2000) ont évoqué (et modélisé numériquement) la propagation d'une perturbation sur une surface initiale.

La notion d'extension, de propagation, s'inscrit dans la dualité érosion régressive – érosion progressive, ou encore « *bottom-up* » – « *top-down* » *manner(s)* (Faulkner *et al.*, 2008). Les processus concrets qui leur correspondent n'interviennent pas sur les mêmes échelles de temps, ni en réponse aux mêmes sollicitations (tectoniques, climatiques, anthropiques). Notons que, pour être le plus nommé dans la littérature, le développement par érosion régressive n'est pas pour autant le seul qui soit décrit sur le terrain (« *forward* » *versus* « *regressive* » *erosion* ; Moyersons, 1991) ni observé lors des expérimentations sur modèles réduits (Parker, 1977 ; Parker et Schumm, 1982, cités dans Bryan et Yair, 1982).

1.3.2. Modèles quantitatifs partiels reliant variables morphologiques et processus d'érosion

Certains chercheurs s'attachent à caractériser l'espace des bassins versant en termes de processus à partir des variables morphologiques et à prédire l'érosion. Autrement dit, ils cherchent à déduire l'activité potentielle des différents processus à partir des variables morphologiques. Les informations peuvent concerner des relations simples telle celle entre exposition des versants et gélifraction ou être plus élaborées ; ainsi pour les modèles mathématiques à base physique de l'érosion (Kirkby, 1971, 2003 ; Howard, 1997 ; Roering *et al.*, 2007), même s'ils ne sont que partiels comme dans le cas retenu ici.

Montgomery et Dietrich (1994) proposent un modèle théorique divisant l'espace en régimes de processus en fonction de deux variables dites morphologiques : la pente locale (S) en n'importe quel point du versant et la surface amont drainée (A) (Figure 1.10). Le régime correspond au type de mécanisme d'érosion qui domine sur un espace donné en fonction du logarithme de la pente locale et du logarithme de la surface amont drainée. Ce modèle représente des seuils d'initiation des processus (déterminés à partir des logarithmes de ces deux mêmes variables) et, entre différents seuils, des domaines dévolus à des types de processus.

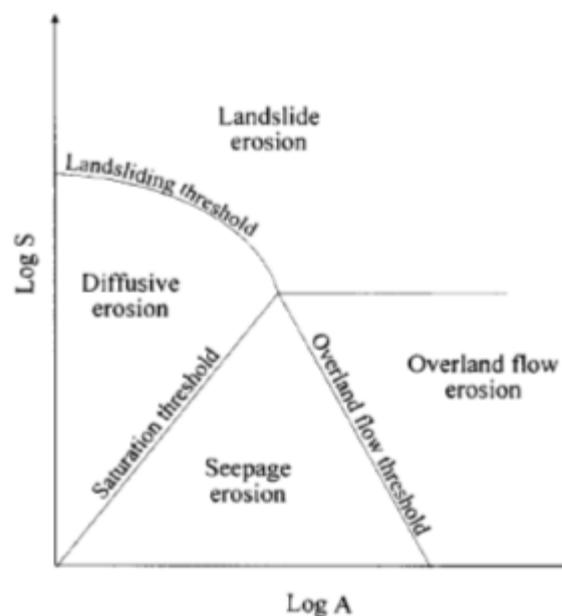


Figure 1.10. Répartition des différents processus en fonction des variables morphologiques de pente locale et de surface amont drainée exprimées par leur logarithme (Extrait de Vandekerckhove *et al.*, 2000 ; repris de Montgomery et Dietrich, 1994). Seepage erosion fait référence aux processus d'écoulement de sub-surface et de soutirage ; diffusive erosion aux processus de migration lente représentés par un modèle de diffusion.

D'après ce modèle, la relation non linéaire A-S (relation Log-Log) permet de caractériser la potentialité d'une zone à activer un processus donné (Raclot *et al.*, 2005). De nombreux travaux se sont intéressés à cette relation dans le but de déterminer les seuils d'initiation des processus puis de localiser des secteurs potentiellement sensibles au ravinement (Vandaele *et al.*, 1996 ; Desmet *et al.*, 1999 ; Vandekerckhove *et al.*, 2000 ; Martinez-Casasnovas, 2003 ; Morgan et Mngomezulub, 2003). Cette relation n'est pas établie spécifiquement pour les *badlands*. La position des seuils dans ce modèle varie avec les conditions climatiques, de couverture végétale et la nature des sols (Vandekerckhove *et al.*, 2000) et doit être confrontée aux mesures de terrain. Les premières observations de terrain de Montgomery et Dietrich – doublées de la construction d'un MNT à partir de photographies à grande échelle – avaient porté sur un petit bassin de 1,2 km² du comté de Marin en Californie. Le succès de ce modèle lui vaut d'être utilisé aussi pour montrer le caractère réaliste ou raisonnable des modèles physiques miniatures obtenus en laboratoire sous pluie artificielle, ainsi au laboratoire des géosciences de Rennes (Bonnet et Crave, 2006).

1.3.3. Modèles relatifs à l'effet d'échelle et la non linéarité

Il est possible de construire des modèles conceptuels traduisant la dépendance des phénomènes à l'échelle à partir de mesures d'érosion. De Vente et Poesen (2005) proposent un modèle conceptuel, établi à partir de résultats de mesure d'érosion dans des terrains ravinés du pourtour méditerranéen (qui ne sont pas des *badlands* caractérisés). Ce modèle (Figure 1.11) exprime, dans un schéma en échelle logarithmique, la variété des relations entre la dégradation spécifique ou charge sédimentaire spécifique (*area-specific sediment yield*) et la surface de drainage ; cette charge dépendant des sources et puits sédimentaires. Il indique pour différentes surfaces drainées, les mécanismes conduisant à des « sources sédimentaires » (*splash erosion, sheet erosion,...*) et complémentirement, à des « puits sédimentaires » (*depression storage, ...*).

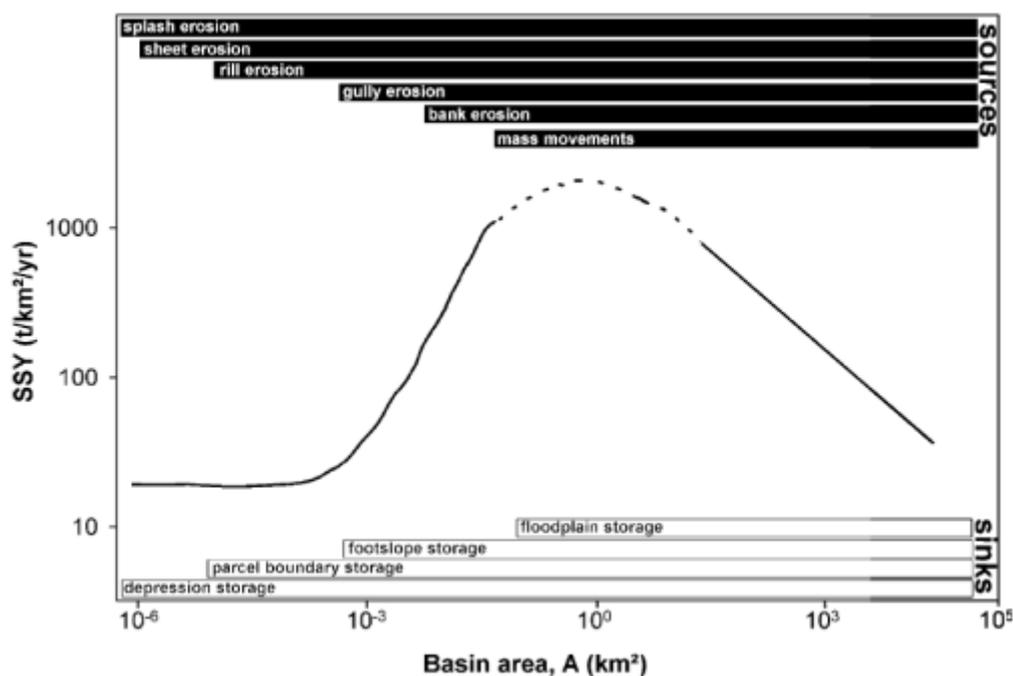


Figure 1.11. Modèle conceptuel de charge solide spécifique (Specific Sediment Yield) à différentes échelles et contribution des sources et puits (Extrait de de Vente et Poesen, 2005)

On retient que les mesures effectuées à une échelle donnée ne peuvent pas être simplement extrapolées à une échelle plus globale (Parsons *et al.*, 2006). D'où les questions : comment passer d'une échelle à l'autre ? Quelles sont les connections et interactions entre les échelles ? Deux approches complémentaires sont proposées dans la littérature : la première est de multiplier les mesures à différentes échelles et de les comparer ; la seconde est de rechercher des modèles d'agrégation (upscaling) permettant de passer de mesures locales à des prédictions à des échelles globales (Parsons *et al.*, 2006). Les modèles d'agrégation s'appuient souvent sur la caractérisation de la non-linéarité du système (Roering *et al.*, 1999) et/ou l'approche par la formalisation des systèmes complexes (Crave et Davy, 2000 ; Phillips, 2003).

Les concepts et formalismes de la non-linéarité sont discutés dans de nombreux travaux. On retient deux sources de non-linéarité parmi celles citées par Phillips (2003), les seuils et l'auto-organisation.

Un seuil est défini comme un état à partir duquel le système change de comportement (par exemple, le seuil de mise en mouvement des particules). De nombreux travaux portent sur la recherche des seuils en géomorphologie et en particulier pour l'étude du ravinement : (Bull et Kirkby, 1997 ; Vandekerckhove *et al.*, 1998 ; Morgan et Mngomezulu, 2003).

L'auto-organisation désigne « *la capacité des éléments d'un système à produire et maintenir une structure à l'échelle du système sans que cette structure apparaisse au niveau des composantes et sans qu'elle résulte de l'intervention d'un agent extérieur* » (@hypergeo). Il existe de nombreuses variantes de l'auto-organisation liée à la non-linéarité incluant : l'auto-organisation par dissipation de l'énergie (*i.e.* les systèmes maintiennent leur structure en dissipant l'énergie) et l'auto-organisation critique (*i.e.* les systèmes évoluent vers un état critique). Ce que l'on appelle les systèmes auto-organisés critiques (*self-organized critically*) deviennent non-linéaires lorsque le système évolue vers l'état critique. Huggett (1988 cité par Phillips, 2003) suggère que l'auto-organisation par dissipation de l'énergie dans les systèmes qui ne sont pas à l'équilibre thermodynamique puisse être une approche prometteuse en géomorphologie. Une variété de travaux, reposant notamment sur des modèles d'évolution des réseaux hydrographiques, ont exploré cette idée. L'hypothèse la plus commune est que les systèmes géomorphologiques évoluent en maximisant la dissipation de l'énergie (ou minimisant l'effort), tout en cherchant à équilibrer les dépenses d'énergie dans le système (Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997). Des physiciens, tel Vincent Fleury se montrent sceptiques vis-à-vis d'affirmations qui ne feraient que reprendre cette hypothèse (Fleury, information orale ; Meakin *et al*, 2001).

1.4. En résumé : questions actuelles et objectifs du GIS Draix

En résumé, les questions de recherches actuelles pour l'étude de l'érosion dans les paysages particulier de *badlands* portent principalement sur :

- L'estimation de la production sédimentaire, sa variabilité spatiale et temporelle et l'influence des facteurs climatiques et biogéographiques. Cette question est associée à une problématique de gestion des sédiments voire de lutte contre l'érosion par la restauration des terrains densément ravinés.
- Les effets d'échelle et la non-linéarité des réponses hydrologiques et érosives des bassins versants : on cherche à évaluer et modéliser les variations de l'érosion avec les échelles spatiales et temporelles et caractériser la non-linéarité du transport à travers le réseau des ravines en réponse aux précipitations.
- Les relations entre forme et érosion à partir de variables morphologiques : on cherche à avoir une meilleure compréhension des relations entre topographie et transport de matériaux en caractérisant la distribution spatiale des variables contrôlant les processus d'érosion et en réalisant des comparaisons significatives entre sites (Kirkby, 2010).

Dans le cadre des questions de recherche de la communauté scientifique internationale, l'objectif de l'ORE Draix est de « *caractériser les réponses hydrologiques et sédimentaires des hydrosystèmes méditerranéens de montagne aux aléas météorologiques* ».

« *De l'échelle locale à celle du petit bassin versant (de quelques m² à quelques km²), l'enjeu porte sur l'amélioration des connaissances et la compréhension des processus élémentaires et de leurs interactions. Il s'agit de mieux prédire ces réponses très fortement non linéaires.*

A l'échelle du grand bassin versant (quelques dizaines à quelques centaines de km²), l'enjeu concerne les conditions du transfert des flux liquides, solides et dissous. Il s'agit notamment d'identifier les facteurs déterminants dans les réponses, en particulier aux phénomènes extrêmes... L'importance des couplages entre les processus étudiés nécessite une approche pluridisciplinaire de ces questions afin d'envisager une modélisation du comportement des bassins versants. » (@ORE Draix)

Chapitre 2 : Extraction des réseaux de ravines par télédétection

Cartographier des ravines multiples et profondes est un défi. Les *badlands* sont par définition difficiles à parcourir principalement du fait des pentes fortes qu'ils connaissent (Gilbert, 1877 ; Bryan et Yair, 1982 ; Howard, 1971). Et pourtant, leur représentation cartographique à différentes échelles est nécessaire pour comprendre et suivre l'érosion et proposer des aménagements adéquats. Depuis quelques années l'évolution combinée des techniques d'acquisition d'informations par télédétection et celles des traitements de données volumineuses (logiciels de SIG) rend possible une cartographie détaillée et systématique de ces secteurs (Puech *et al.*, 2009).

La représentation des *badlands* n'est pas immédiate et des choix doivent être faits. Que cherche-t-on à représenter : la limite de la zone érodée, les talwegs, les crêtes, les versants, l'écoulement ? Selon l'objet que l'on choisit de représenter, les données d'observation de la Terre et les méthodes envisageables varient. Une des manières d'aborder les réseaux de ravines est de considérer le réseau des talwegs qui en est un des éléments constitutifs. Selon les types de données de télédétection (image ou modèle numérique de terrain), les objets visibles diffèrent. On distingue dans cette partie l'approche image (aérienne et satellite) et l'approche MNT qui impliquent des logiques de détection des objets très différentes.

2.1. L'approche image

L'image numérique est une matrice de valeurs numériques associant à chaque pixel une grandeur appelée radiométrie (Lier *et al.* (dir), 2008). Cette dernière est proportionnelle à la valeur de la réflectance de la surface (*i.e.* la proportion d'énergie réfléchi par la surface à une longueur d'onde donnée). Ainsi les objets sur images se repèrent grâce à leur variabilité radiométrique.

2.1.1. Extractions manuelles par photo-interprétation

Souvent utilisée, la photo-interprétation est un des moyens de détection à partir d'image parmi les plus opérationnels. Cette technique repose sur une interprétation visuelle des objets de l'image et leur délimitation par un opérateur. L'œil humain est très performant pour effectuer des

discriminations sur image. Les objets, et en particulier les talwegs, sont déterminés grâce aux contrastes internes de l'image.

Par photo-interprétation, il est possible de détecter de nombreux objets, aussi bien surfaciques que linéaires : des zones érodées peuvent être délimitées (Dwivedi et Ramana, 2003; Sujatha *et al.*, 2000 cités par Vrieling, 2006), des réseaux de talwegs et crêtes continus peuvent être tracés. Ces extractions sont très efficaces et, quand il s'agit de petites surfaces, souvent plus rapides que les techniques automatiques qui nécessitent une longue phase de mise au point d'un algorithme spécifique. On aboutit à des représentations claires de la réalité mais qui ne sont pas homogènes. Pour les réseaux de talwegs en particulier, les éléments perpendiculaires au rayonnement solaire sont bien détectés mais pas ceux qui sont parallèles. L'image nous donne donc une information non uniforme, partielle et selon une orientation préférentielle, et dont l'hétérogénéité est difficile à quantifier.

De plus, le résultat est sensible à l'opérateur et sa qualité difficilement chiffrable. Ce qui pose des problèmes de stabilité et de signification des résultats. Il apparaît donc nécessaire d'établir une méthode la plus reproductible possible d'un opérateur à l'autre. En outre, cette méthode est difficilement généralisable à des grands domaines car très chronophage.

Finalement, on peut extraire des images une information riche, qui correspond à des réalités de ravines. On peut assurer que les éléments détectés sont bien des ravines, mais certaines ravines ne sont pas détectées. Ainsi, la vision obtenue est incomplète et non homogène. Efficace pour des petits domaines, l'interprétation visuelle est surtout intéressante comme étude préliminaire dans le cadre de la cartographie des *badlands* (Liberti *et al.*, 2009).

2.1.2. Les cartographies automatiques

Les méthodes automatiques à partir d'images optiques permettent de traiter de larges domaines. Vrieling (2006) recense et examine les solutions possibles de détection de l'érosion hydrique et de ses conséquences à partir d'imagerie satellite optique. La détection directe peut être réalisée à travers l'identification de grandes formes d'érosion et la délimitation des zones érodées. Les effets repérables sur image sont les dégâts matériels liés aux événements d'érosion majeurs et l'accumulation de sédiments dans les réservoirs. Il souligne que la plupart des études de télédétection sur l'érosion se concentre sur l'évaluation des facteurs contrôlant l'érosion, et plus particulièrement sur les caractéristiques des sols et de la végétation.

Nous retenons deux approches possibles de la cartographie automatique des *badlands* : surfacique ou linéaire.

2.1.2.1. Approche surfacique

En ce qui concerne l'approche surfacique, la cartographie la plus simple des surfaces érodées sépare zones nues et végétalisées. Il est possible de délimiter les zones nues à l'aide d'un indice de végétation tel que le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) pour cerner les domaines de *badlands* ou du moins sensibles au ravinement (Vrieling, 2006).

Les techniques de classification de l'image pixel par pixel peuvent apporter des résultats intéressants, mais leur efficacité est souvent dépendante du site d'étude (Vrieling, 2006). La classification peut être non supervisée c'est-à-dire qu'elle correspond à une procédure automatique qui ne demande pas de connaissance du terrain *a priori*. La classification supervisée intègre la connaissance du terrain par l'opérateur ; elle repose sur l'analyse du comportement spectral des ensembles de pixels échantillons qui représentent les différents objets à classifier. La qualité de la classification est directement liée à la séparabilité des échantillons. Si les échantillons présentent des comportements spectraux bien distincts alors la classification est performante.

Liberti *et al.* (2009) soulignent l'insuffisance de l'image satellite seule pour cartographier de manière automatique les *badlands*. Selon lui, les classifications non-supervisées peuvent fournir des résultats préliminaires intéressants mais leur performance effective est faible (Dang *et al.*, 2003 ; Servenay et Prat, 2003 cité par Liberti *et al.*, 2009). Les classifications supervisées fournissent des résultats plus satisfaisants pour l'analyse quantitative des secteurs érodés en général – *badlands* ou non *badlands*. Toutefois, la sélection des échantillons de pixels nécessite une connaissance précise du terrain et une analyse soignée de la séparabilité des signatures spectrales, indispensable pour réussir la classification. Cette nécessité peut engendrer de sérieuses difficultés lorsque les signatures spectrales des différents éléments du paysages ne sont pas distinguables aisément. Ce qui est le cas pour les *badlands* où la confusion des signatures spectrales des différents objets (par exemple, entre les secteurs nus non disséqués et les secteurs disséqués) est fréquente.

Ces auteurs testent, à partir d'images Landsat TM et ETM, différentes classifications possibles et propose une méthode qui repose sur une classification supervisée dans laquelle des caractères morphologiques sont intégrés. La distinction spectrale des chenaux et des versants est très délicate voir quasiment impossible avec les techniques actuelles. L'intégration de variables morphologiques permet d'obtenir des résultats plus convaincants mais dont la performance n'est pas quantifiée.

2.1.2.2. Approche linéaire

Du point de vue des éléments linéaires, Lacoste (2004) réalise un panorama des méthodes d'extraction automatique de réseaux quelconques (routier, hydrographique, et autres) à partir de photographies aériennes et images satellites et propose une approche originale basé sur des

processus stochastiques. Toutefois, ces méthodes ne s'appliqueraient que difficilement aux cas des *badlands* du fait de la faible différence de comportement spectral entre les talwegs (ou fonds de ravine) et les versants.

Les surfaces en eau correspondant au réseau hydrographique permanent peuvent être repérées et délimitées automatiquement à partir des bandes spectrales correspondant aux longueurs d'onde du proche infrarouge (Muller *et al.*, 1993). L'eau possédant une forte capacité d'absorption du rayonnement proche infrarouge, les pixels-eau sont facilement séparables des autres. Cette méthode peut être appliquée aux ravins et vallées dont l'écoulement est permanent. Mais dans les domaines de *badlands* où la plupart des ravines présentent un écoulement épisodique, les résultats ne sont pas satisfaisants.

En conclusion, les réseaux extraits à partir d'image restent souvent incomplets et les procédures automatiques semblent exiger des phases de vérification et de correction importantes.

2.2. L'approche MNT

Le modèle numérique de terrain est une représentation numérique spatialisée de l'altitude ; en cela, il permet de mettre en évidence les variations du relief. Ce document est tout à fait pertinent pour la représentation d'éléments topographiques constitutifs du relief tels que les talwegs mais leur extraction n'est pas immédiate. Les méthodes tentent de se rapprocher de la cartographie classique des talwegs qui consiste à joindre les points les plus bas matérialisés sur les courbes de niveau.

2.2.1. Constitution des MNT et paramètres

2.2.1.1. Acquisition des données d'altitude

Trois sources de données sont utilisées : les cartes topographiques, les relevés terrains et la télédétection (Polidori, 1995 ; Charleux-Demargne, 2001). La première source est la digitalisation des courbes de niveaux des cartes topographiques (elles-mêmes provenant la plupart du temps de la télédétection). Cependant, le travail est rapidement limité par la disponibilité et la qualité des cartes. D'autres données d'altitudes peuvent être acquises par campagne de terrain à l'aide d'un GPS (*Global Positioning System*) (Wilson et Gallant, 2000). Cette source est intéressante pour de petites surfaces : la collecte des données est facile mais limitée dans l'espace en raison des difficultés et du temps de parcours dans les *badlands* et parce que la précision peut être très mauvaise dans certains secteurs tels que les fonds de ravines où le signal des satellites est faible (Jacome, 2009). Les

données issues de la télédétection présentent de nombreux avantages : reproductibilité dans le temps et l'espace, large couverture spatiale, possibilité de commande de données,...

Depuis leurs débuts, la majorité des MNT est issue de la photogrammétrie. Leur production repose sur l'interprétation stéréoscopique manuelle ou automatique de photographies aériennes ou images satellites (Wilson et Gallant, 2000). Toutefois, certaines conditions météorologiques (présence de nuages) ou climatiques (couvert nuageux permanent dans la zone équatoriale ou faible ensoleillement aux hautes latitudes) représentent une contrainte non négligeable (Charleux-Demargne, 2001). Une partie des recherches actuelles porte sur le développement des systèmes d'acquisition d'image à basse altitude à partir de moyen léger (essentiellement drone et ULM) pour la production de MNT très haute résolution (Asseline *et al.*, 2000 ; Ries et Marzloff, 2003). Ces moyens légers sont utilisés en domaine de *badlands* (Raclot *et al.*, 2005 ; Jacome, 2009).

On assiste, aujourd'hui, à un développement notable de la télédétection à capteur actif telle que l'interférométrie radar (*radar detection and ranging*) et le LiDAR (*light detection and ranging*). Ces deux systèmes reposent sur un principe similaire basé sur l'émission-réception d'un signal électromagnétique pour mesurer la distance à la surface. Le signal est analysé en termes de temps d'aller-retour de l'onde entre l'émetteur et la cible visée. A la différence que le LiDAR utilise un signal lumineux au lieu d'ondes radio pour le radar.

L'interférométrie radar est un outil puissant pour la construction de modèle numérique de surface (*i.e.* modèle numérique comprenant les éléments du sur-sol tels que le bâti et le couvert végétal). Son principal avantage réside dans sa capacité à pouvoir évaluer les déplacements et déformations terrestres à l'échelle du centimètre (Bürgman *et al.*, 2000 ; Smith, 2002). Le LiDAR offre la possibilité de construire des MNT (*i.e.* des modèles numériques de terrain, sans le sursol) et rend ainsi possible la restitution du relief sous couvert forestier, et cela avec des résolutions spatiales plus hautes et des précisions altimétriques améliorées par rapport aux autres techniques.

Le système LiDAR crée des nuages de points référencés dans l'espace 3D (xyz). Les nuages de points sont denses et l'intervalle entre les points est irrégulier (James *et al.*, 2006). La densité de points au sol est généralement de l'ordre de 0,1 à 5 points par m² (De Joinville *et al.*, 2002). L'appareil peut récupérer un retour multiple. Dans ce cas, le premier retour (premier écho) restitue habituellement le toit de la canopée et le dernier retour (dernier écho) renvoie une image de la surface terrestre. La séparation des *points sols*, nécessaires pour la construction du MNT, des autres points est réalisée à partir d'une combinaison de techniques de filtrages automatiques et de sélection manuelle et constitue un domaine de recherche en soi (Petzold *et al.*, 1999 ; Axelsson, 1999 cités par James *et al.*, 2006).

Plusieurs vecteurs sont possibles pour acquérir ces nuages de points. La densité et la régularité du nuage de points, conditionnant la résolution finale du MNT et sa précision, sont dépendantes du vecteur choisi. Le LiDAR aérien couvre des étendues importantes, le long d'un axe de vol, avec une

fauchée et un nombre de points par unité de surface qui dépendent de l'altitude. On peut, par exemple, obtenir une couverture avec une densité de plusieurs dizaines de mesures par mètre carré.

Les résolutions spatiales obtenues sont de l'ordre du mètre et les précisions d'ordre centimétrique en terrain plat (Ackermann, 1999 ; Hodgson et Bresnahan, 2004). Dans les terrains à fortes pentes (supérieures à 40°) des erreurs apparaissent, provenant des effets de masque qui affectent les versants ou d'échos multiples et des incertitudes de localisation en plan (Puech *et al.*, 2009).

Le LiDAR terrestre procède à partir de positions fixes au sol. Le nombre de points analysés par unité de surface est alors très important, dépendant de la distance au secteur visé et du réglage du déplacement du faisceau laser. La partie couverte est limitée à la zone visible depuis la position de mesure, ce qui conduit à des vues locales, dépendantes des obstacles. Ainsi les prises de vue doivent être multipliées pour obtenir une cartographie continue, en sachant que l'association cohérente des nuages de points n'est pas évidente (Hsiao *et al.*, 2004 ; Puech *et al.*, 2009). On atteint les résolutions centimétriques et des précisions altimétriques millimétriques avec les systèmes terrestres (Jacome, 2009).

En résumé, le système LiDAR constitue un outil puissant qui contribue de manière significative à une meilleure représentation de la morphologie terrestre, et notamment des secteurs ravinés, par la production d'un grand nombre de données à haute résolution et haute précision altimétrique (James *et al.*, 2006 ; Cavalli, 2009 ; Perroy *et al.*, 2010).

2.2.1.2. Des données d'altitude discrètes au MNT

Les données d'altitudes sont de nature discrète. Pour les données acquises par LiDAR, comme pour toutes les autres données acquises par télédétection, le passage d'un ensemble de points à une surface continue nécessite de choisir une méthode d'interpolation adaptée.

Les deux formats de MNT les plus usuels sont : le format raster et le format TIN (*Triangulated Irregular Network*). Le format raster est une matrice ou grille régulière de valeurs d'altitude dont l'unité élémentaire est la cellule (équivalente au pixel de l'image numérique). Alors qu'en TIN, le relief est composé de facettes irrégulières.

Il existe une variété de méthodes d'interpolation dont les plus courantes sont détaillées dans Burrough et Mc Donnell (1998). En mode raster, on distingue les méthodes déterministes telles que l'IDW (*Inverse distance weighted*) ou le *spline*, et les méthodes géostatistiques, tels que le krigeage, basées sur une approche probabiliste du relief. Parmi ces méthodes, celles basées sur un schéma d'interpolation global (*spline*) sont difficilement applicables à des grands ensembles de données

comme ceux obtenus par LiDAR. Dans ce cas, les schémas locaux (IDW, krigeage) sont plus performants et donc privilégiés (Wilson et Gallant, 2000).

L'interpolation constitue une source d'erreur potentielle et peut affecter la qualité du MNT final (Wilson et Gallant, 2000). Ainsi, la question de la méthode la plus appropriée dans différents contextes est centrale et a motivé de nombreuses études comparatives sur l'incertitude liée à l'interpolation (Zimmerman *et al.*, 1999 ; Chaplot *et al.*, 2006).

2.2.1.3. Paramètres d'erreur et incertitude des MNT

Au vu du nombre important de sources de données, de méthodes, de format de MNT, il apparaît légitime de vouloir en quantifier la qualité. Toutefois, Polidori (1995) signale que « la qualité d'un MNT n'est pas un concept absolu mais fondamentalement lié au besoin particulier d'un utilisateur ». La plupart du temps, on utilise un critère d'erreur facile à mettre en oeuvre et à comprendre.

On définit l'erreur (ϵ) en un point donné comme la différence entre l'altitude mesurée (\hat{z}) et l'altitude vraie (z). On distingue ensuite le biais, qui correspond à la moyenne des erreurs ($\bar{\epsilon}$) et qui rend compte de la fidélité, et leur dispersion statistique ($\text{Var}(\epsilon)$), qui rend compte de la justesse. Le biais correspond à l'erreur systématique, qui conduit à toujours surestimer ou sous-estimer la valeur réelle. La dispersion statistique correspond à l'erreur aléatoire, provenant du caractère aléatoire de la mesure. La Figure 2.1 représente le rôle respectif de l'erreur systématique et de la dispersion statistique. On suppose que la valeur vraie de la grandeur à mesurer est le centre de la cible : a) toutes les flèches sont proches du centre : faible erreur systématique et dispersion (mesure fidèle et juste) ; b) les flèches sont dispersées mais centrées : faible erreur systématique mais forte dispersion (mesure fidèle mais non juste) ; c) flèches regroupées mais pas centrées : forte erreur systématique mais faible dispersion (mesure non fidèle et non juste). Le calcul d'incertitude consiste à estimer, modéliser l'erreur faite sur un résultat numérique et associer un intervalle de confiance au résultat.

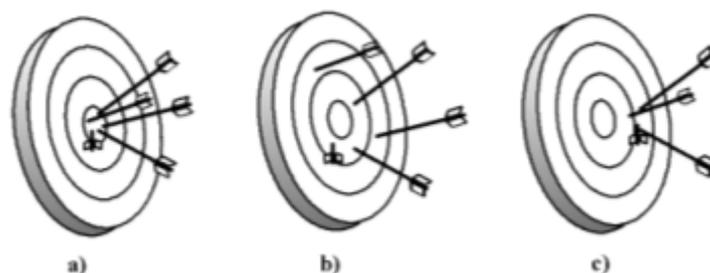


Figure 2.1. Erreur systématique et dispersion statistique à travers trois configurations (@wikipedia)

Pour caractériser l'incertitude des données d'altitude, on distingue les descripteurs relatifs à la distribution de l'erreur de ceux relatifs à sa structure spatiale. Le descripteur statistique le plus

classique pour la qualification des MNT (Wood, 1996 ; Papasaïka et Baltasvias, 2010) est la RMSE (*root mean square error* ; éq. 1.1).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (\hat{z}_i - z_i)^2}{n}} \quad (1.1)$$

avec \hat{z}_i les valeurs estimées ou mesurées, z_i les valeurs vraies, et n le nombre d'observations.

Cette mesure est souvent considérée comme une quantification de l'incertitude pour l'un ou les deux ensembles de données (Wood, 1996). Cependant, elle mélange erreur systématique et dispersion, qui ont des conséquences très différentes, et deux distributions d'erreurs très différentes peuvent avoir la même RMSE. Selon Papasaïka et Baltasvias (2010), un effort doit être fait vers la définition de paramètres de qualité locaux. D'après plusieurs auteurs, la distribution des erreurs des MNT présente une structure spatiale donnée (Wood, 1996 ; Panissod *et al.*, 2010). La modélisation de la distribution spatiale de l'incertitude des MNT et sa propagation dans les chaînes de traitement est un des défis de ces dernières années (Wood, 1996 ; Hengl *et al.*, 2010 ; Bailly *et al.*, 2011).

Au moins deux types d'incertitude affectent le MNT : erreurs de mesure sur les points xyz acquis, erreurs d'interpolation ailleurs (Saint-Geours *et al.*, 2011). Pour rendre compte des incertitudes sur les variables spatialisées telles que l'altitude, on fait appel à des modèles d'erreur, géostatistiques ou autres, qui permettent de générer un nombre fini de réalisations aléatoires de ces variables (Bretar *et al.*, 2009 ; Panissod *et al.*, 2010). Ceci s'applique aux MNT et aux divers plans dérivés. Ces derniers sont sensibles aux paramètres du MNT lui-même et aux méthodes de dérivation des informations. Le calcul d'indices topographiques à partir d'un MNT amplifie l'erreur qui existe sur les données de base (Wilson et Gallant, 2000). La question de la propagation de l'erreur du MNT dans l'extraction des paramètres morphométriques (Oksanen et Sarjakoski, 2005), des réseaux de talwegs (Hengl *et al.*, 2010) et limites de bassins (Poggio et Soille, 2010) est de plus en plus prise en compte dans les travaux scientifiques.

2.2.2. Indices topographiques dérivés du MNT

Des indices topographiques (ou plus largement indices morphologiques) traduisant les caractéristiques morphologiques du terrain peuvent être calculés à partir du MNT (Figure 2.2). On peut approximer la surface localement par une fonction $Z(x,y)$ dont les neuf paramètres (A, \dots, I) sont déterminés à partir des neuf valeurs d'altitude d'une fenêtre mobile 3*3 cellules (Zevenbergen et Thorne, 1987 ; Burrough et McDonnel, 1998). De nombreux indices topographiques peuvent être obtenus à partir cette surface (Zevenbergen et Thorne, 1987). La dérivation d'ordre 1 permet de calculer une pente locale (*slope*) et son orientation (*aspect*). Les dérivées d'ordre 2 dans les diverses

directions correspondant à des indices de courbures (Wood, 1996). Les plus utilisées sont la courbure en plan et la courbure en profil qui correspondent respectivement à la courbure dans la direction de la plus grande pente et à la courbure dans la direction transverse à la plus grande pente (Evans, 1972 ; Zevenbergen et Thorne, 1987 ; Wood, 1996 ; Rana, 2006). Le calcul de dérivées d'ordre supérieur est possible mais aucune signification morphologique n'a été démontrée (Woods, 1996). Les indices présentés ici sont calculés à partir d'approximations locales de la surface mais ce ne sont pas les seules méthodes d'estimation.

La taille de la surface locale approximée est déterminée par la fenêtre mobile utilisée, le plus souvent 3*3 cellules. Certains auteurs suggèrent une taille de fenêtre optimale pour le calcul des indices topographiques (Sofia *et al.*, 2011) mais celle-ci est variable dans l'espace du MNT (il y a souvent uniformité de la taille adéquate). Une taille de fenêtre optimale peut être recherchée en fonction du contexte morphologique, de l'objet que l'on cherche à représenter et de la résolution du MNT mais elle n'existe pas en tant que telle, *a priori*.

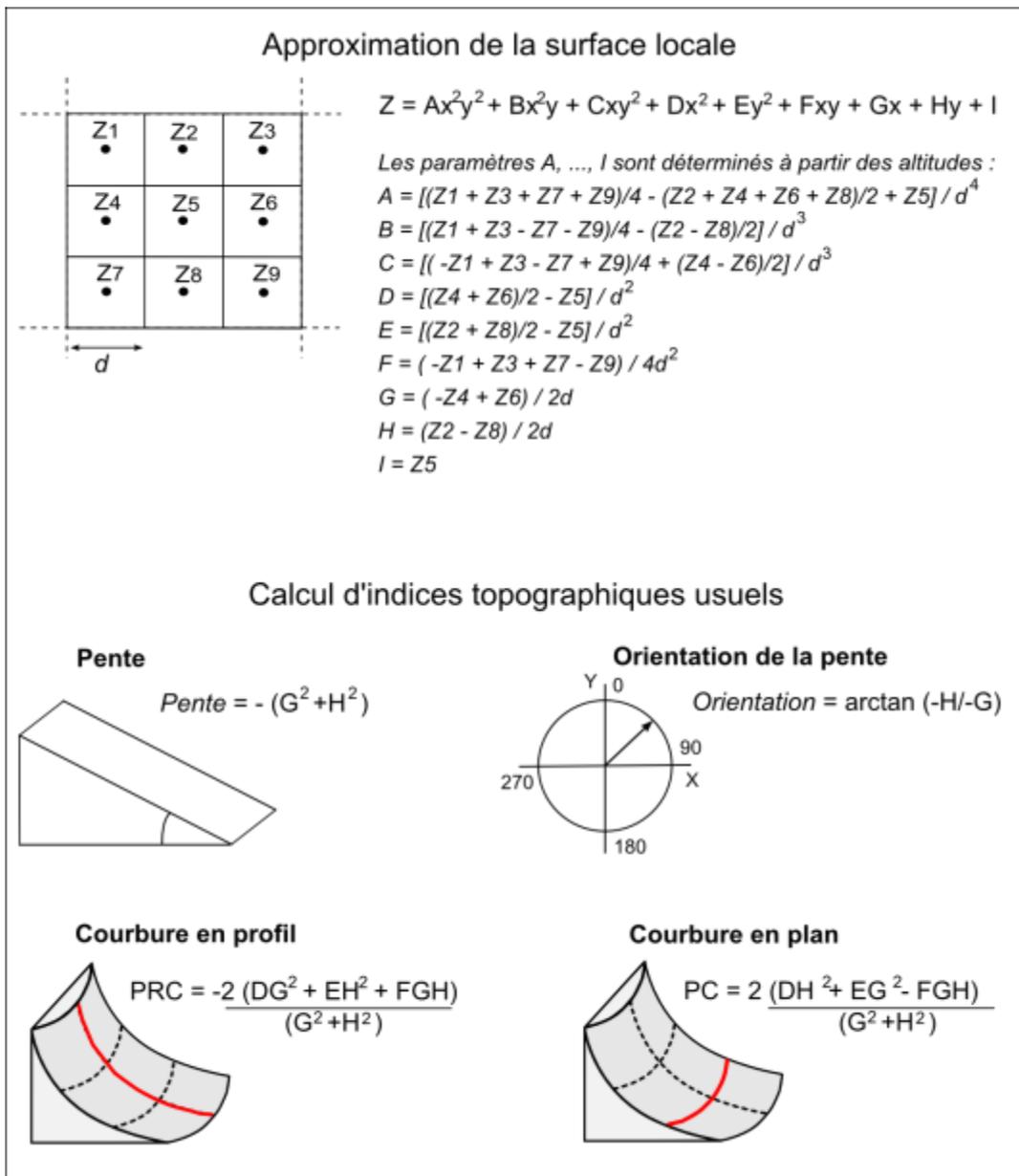


Figure 2.2. Calcul d'indices topographiques à partir d'une approximation locale de la surface représentée par le MNT (d'après Zevenbergen et Thorne, 1987 ; Burrough et McDonnell, 1998)

2.2.3. Extraction de réseaux de talwegs

En format raster, on distingue deux grands groupes de méthodes : les algorithmes de drainage simples et les méthodes qui combinent algorithme de drainage et indice morphologique. Ces méthodes permettent d'obtenir des réseaux continus et orientés. Pour ce qui est des formats TIN, les méthodes reposent sur des concepts différents et ne sont pas traitées ici.

2.2.3.1. Les algorithmes de drainage simples

Il existe plusieurs algorithmes de drainage que l'on peut qualifier de simples qui permettent d'extraire des réseaux de talwegs. Ces algorithmes peuvent être rangés dans deux catégories : ceux dont la direction de flux est unique (unidirectionnel) et ceux pour lesquels la direction de flux est multiple (multidirectionnel). Les algorithmes à flux unidirectionnels (chaque cellule n'admet qu'une sortie unique) ont pour résultat un réseau arborescent ; dans le cas des algorithmes multidirectionnels (une cellule peut admettre plusieurs sorties de l'écoulement), des maillages peuvent apparaître dans le réseau. Wilson *et al.* (2007) proposent une revue détaillée des différents algorithmes existants les plus utilisés.

Le plus courant des schémas unidirectionnels (O'Callaghan et Mark, 1984) appelé D8 repose sur une analyse locale des altitudes par le moyen d'un élément structurant (le plus souvent une fenêtre 3*3 cellules). Dans une première phase, on construit l'image de la *direction d'écoulement*. Le sens d'écoulement est calculé pour chaque cellule par rapport à son voisinage, en faisant l'hypothèse que ce flux se déverse selon le critère de plus forte pente (Figure 2.3). Puis on accumule ces directions pour obtenir l'image des *accumulations des écoulements* qui sont alors représentatives des *aires amont drainées*. Enfin, on seuille cette image pour séparer les *cellules-rivière* (correspondant à des grandes valeurs de surface amont drainée) des *cellules-versant* (correspondant à des valeurs plus faibles). Le résultat obtenu est une image binaire mettant en valeur les cellules déterminées comme appartenant au réseau de talwegs. Une phase de vectorisation est ensuite effectuée pour obtenir un réseau sous forme linéaire. Le seuil de surface amont drainée est unique pour l'ensemble du secteur considéré, ainsi il ne permet pas de variation dans la densité de drainage.

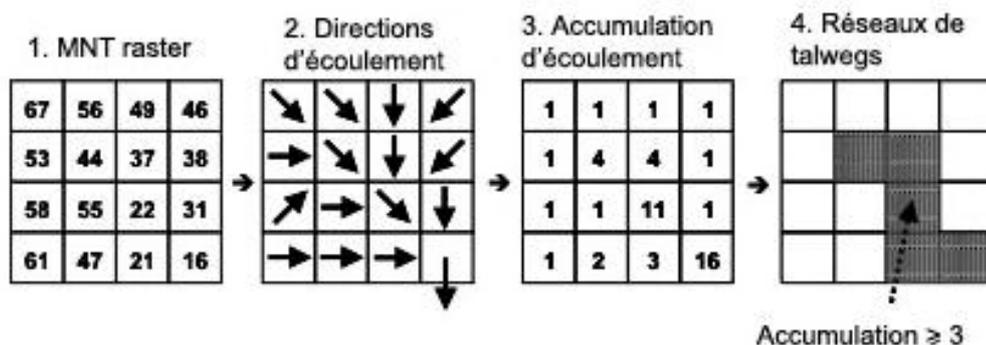


Figure 2.3. Méthode générale basée sur l'algorithme D8 pour extraire un réseau de talwegs à partir d'un MNT (d'après Charleux-Demargne, 2001)

Les directions de base étant multiples de 45° , des effets de grille entraînent des parallélismes de tracé dans les secteurs de relief peu contrasté tels les fonds de vallée en pente douce ou les versants réguliers (Martz et Garbrecht, 1995 ; Charleux-Demargne et Puech, 2000).

D'autres algorithmes de drainage unidirectionnels existent et proposent d'envisager le calcul des directions d'écoulement de manières différentes. Le KRA (*Kinematic Routing Algorithm*) de Lea (1992) admet 1° de précision dans les directions d'écoulement, à la différence du D8 dont les directions sont des multiples de 45° (Wilson, 2007). La direction du flux, basée sur l'orientation de la pente, est plus souple ; l'acheminement du flux est comparable à une balle roulant sur un plan centré sur le centre de chaque cellule. Le plan est ajusté à l'altitude des coins de la cellule considérée ; l'altitude des coins étant estimée en moyennant les altitudes des cellules voisines (Tarboton, 1997). L'algorithme Rho8 (*random eight-node*) proposé par Fairfield et Leymarie (1991) introduit un degré d'aléatoire pour rompre le parallélisme que D8 a tendance à produire sur les surfaces planes (Wilson *et al.*, 2007).

Mais, selon Tarboton (1997), il reste un certain nombre de manques concernant la détermination des directions avec les schémas unidirectionnels tels que sa précision, les effets de grille et les problèmes de décision dans les secteurs à faible relief. Ceci motive la conception d'algorithmes multidirectionnels dont on retient les deux principaux : D_{∞} (Tarboton, 1997) et FD8 (Quinn *et al.*, 1992). Dans ces schémas de drainage, l'écoulement est réparti entre l'ensemble des cellules voisines situées en contrebas de la cellule considérée ; la répartition du flux sortant de la cellule étant définie par une fonction de pondération de valeurs de différences altimétriques (Charleux-Demargne, 2001). Pour Holgren (1994 cité par Charleux-Demargne, 2001), l'objectif est de calculer la proportion surfacique de la cellule qui dirige l'écoulement dans chacune des huit directions en faisant l'hypothèse que l'eau atteignant une cellule est uniformément répartie au sein de la cellule. Le choix du schéma dépend du contexte notamment du terrain et de la résolution du MNT.

Quel que soit l'algorithme considéré, deux difficultés apparaissent lors du calcul de la direction des écoulements. Cependant, elles peuvent être résolues techniquement.

La première, dont nous avons déjà parlé, concerne les secteurs où le MNT présente une faible variation de l'altitude. La faible variation de l'altitude sur certains secteurs peut avoir plusieurs origines : soit elle représente réellement une surface horizontale sur le terrain, soit la résolution verticale n'est pas assez fine pour révéler la variation du relief, ou encore, elle peut apparaître lors de la construction du MNT (Charleux-Demargne, 2001). Une extraction correcte du réseau hydrographique peut se faire en construisant le MNT sous contraintes externes, comme par exemple le *stream burning* qui correspond à une incrustation dans le MNT d'un réseau connu au préalable (Hutchinson, 1989 ; Turcotte *et al.*, 2001 ; Kenny et Matthews, 2005). Cette approche est intéressante pour la construction de MNT hydrologiquement cohérent mais nécessite de posséder un réseau de référence (issu d'une source extérieur) pour les secteurs où la détermination des directions posent problème.

La deuxième difficulté vient du fait que les MNT contiennent souvent des puits ou dépressions fermées. Ces puits correspondent à des cellules qui n'ont pas de sortie car leur altitude est plus faible que celle de ses voisines. Ils posent problème puisqu'elles piègent l'eau et la continuité du chemin d'écoulement n'est plus assurée. Quel que soit l'algorithme choisi, le MNT doit être bouché avant le calcul des directions d'écoulement pour obtenir un réseau continu (Martz et Garbrecht, 1999 ; Planchon et Darboux, 2001). Beaucoup d'auteurs admettent que la majorité des dépressions sont dues aux artefacts du MNT (Jenson et Domingue, 1988 ; Hutchinson, 1989 ; Freeman, 1991 ; Martz et Garbrecht, 1998 cités par Charleux-Demargne, 2001). Cependant, dans certains cas, il s'agit d'anomalies hydrauliques (Charleux-Demargne, 2001 ; Lindsay et Creed, 2006).

La question majeure posée par ce type d'extraction de réseau est : « Où commence le réseau ? » (Montgomery et Dietrich, 1988, 1992). Cette question est délicate (Martz et Garbrecht, 1995 ; Tarboton et Ames, 2001 ; Turcotte *et al.*, 2001) car le problème technique de l'extraction (quelle valeur de seuil de surface amont drainée doit-on appliquer ?) fait également référence à un problème de terrain (qu'est ce qui définit la transition entre versant et chenal ?). La représentation du point de transition en termes de surface amont drainée dépend d'une part la résolution et de la précision du MNT et d'autre part du terrain.

Il est important de souligner que les algorithmes de drainage créent des chemins d'écoulement sur l'ensemble du secteur couvert par le MNT. Du point de vue algorithmique, toutes les cellules peuvent être drainantes. C'est le seuil de surface amont drainée (CA_T) choisi par l'opérateur qui permet le passage d'un chemin d'écoulement qui n'a pas de sens physique a priori à un réseau de drainage significatif (Figure 2.4).

S'il était souvent choisi en fonction d'une référence, par exemple les lignes bleues de la carte topographique (Tarboton, 1991), on recherche de plus en plus des moyens objectifs pour déterminer un seuil pertinent. Certains auteurs proposent d'utiliser des critères topologiques ou physiques objectifs et reproductibles. Montgomery et Dietrich (1992 ; 1994) suggèrent de distinguer les secteurs où l'influence du transport de type fluvial est dominante des secteurs pour lesquels le transport diffus ou de versant domine pour distinguer les têtes de réseau. Tarboton *et al.* (1991) s'appuie sur la recherche de la plus petite surface amont drainée à partir de laquelle on observe une rupture de la propriété de dénivelée moyenne supposée constante des réseaux de talwegs (Broscoe, 1959 cité dans Tarboton et Ames, 2001). La dénivelée moyenne est définie comme la différence d'altitude entre le point amont et le point aval des tronçons. On choisit le plus petit seuil qui permet d'obtenir un réseau dont la dénivelée moyenne des ordres 1 (classification de Strahler) n'est statistiquement pas différente de la dénivelée moyenne des plus grands ordres. Les auteurs soutiennent qu'il y a correspondance entre ce point et la transition physique entre l'érosion de chenal et l'érosion de versant.

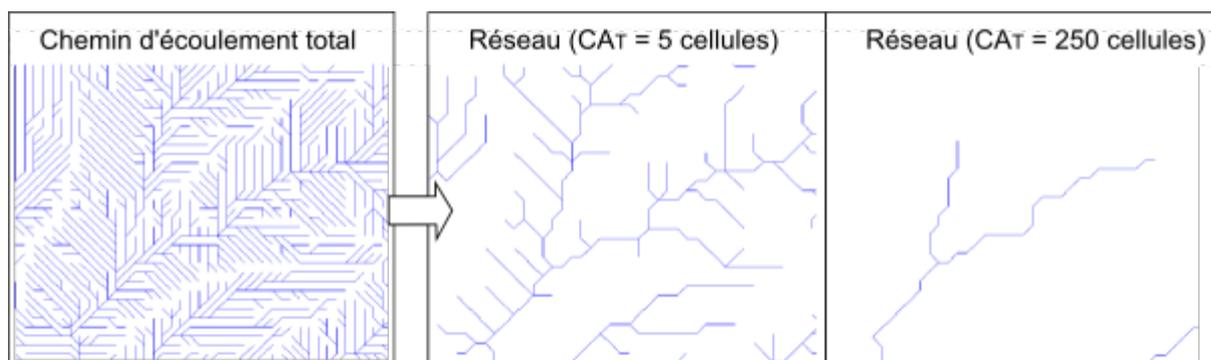


Figure 2.4. Passage d'un chemin d'écoulement à un réseau seuillé significatif (CA_T : seuil de surface amont drainé – contribution area threshold)

Ces méthodes objectives de choix du seuil de surface amont drainée améliorent le rendu cartographique du réseau. Toutefois, nous insistons sur le fait que le seuillage des surfaces amont drainées tel qu'il est défini dans les algorithmes classiques ne permet de créer une variabilité dans la densité de drainage (Tarboton et Ames, 2001). Un même seuil est appliqué à l'ensemble du secteur couvert par le MNT. Or dans la réalité du terrain, cette variabilité existe. Le seuil optimal a souvent pour conséquence la création à la fois de talwegs sur-détectés (qui ne correspondent à aucune réalité sur le terrain) dans certains secteurs et de talwegs sous-détectés (qui existent sur le terrain mais qui ne sont pas extraits) dans d'autres. On voit (Figure 2.5) des exemples d'éléments non détectés alors que les courbes de niveau (issues du même MNT) montrent une concavité (vue du ciel) et inversement, des éléments détectés alors que les courbes de niveaux ne montrent aucune forme.

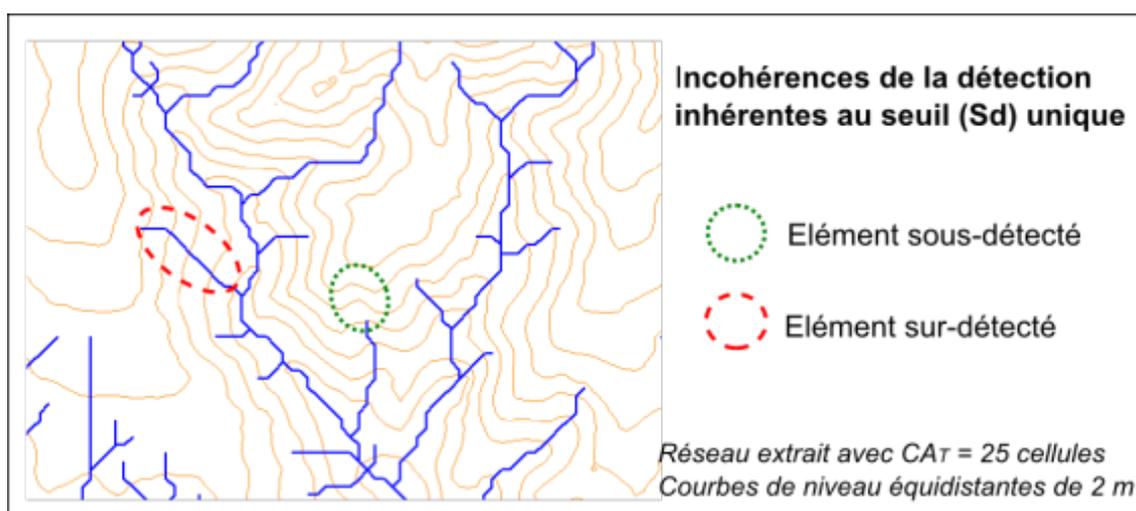


Figure 2.5. Sur et sous-détection inhérentes à l'application du seuil de surface amont drainée unique

2.2.3.2. Les méthodes morphologiques

L'idée générale des méthodes morphologiques est d'intégrer un indice morphologique (également issu du MNT) dans l'algorithme de drainage classique pour restituer un réseau uniquement si une forme concave correspondant à un chenal est discernable. Ceci permet d'obtenir une variabilité spatiale des départs des talwegs et donc des densités de drainage. En pratique, ces méthodes procèdent généralement en deux temps : 1) identification des concavités du terrain qui correspondent aux fonds de vallées à l'aide de l'indice morphologique ; puis 2) connexion des concavités pour obtenir un réseau continu à l'aide de l'algorithme de drainage (Tarboton et Ames, 2001 ; Molloy et Stepinski, 2007, Sofia *et al.*, 2011). Notons que les indices topographiques introduits précédemment (2.2.2) constituent des indices morphologiques.

L'indice morphologique correspond à un plan dérivé du MNT révélant un caractère morphologique du terrain (calculé de préférence sur un MNT non bouché pour garder la représentation du relief initial). Son intégration a pour but de repérer les convexités et concavités du terrain pour pouvoir distinguer les cellules qui appartiennent au réseau (concave) des cellules versants (convexe). Plusieurs indices morphologiques permettent de mettre en évidence les concavités du terrain (Wilson et Gallant, 2000).

Deux travaux récents majeurs intègrent des paramètres de courbures : Tarboton et Ames (2001) utilisent un algorithme identifiant, localement, les cellules convexes (Peucker et Douglas ; 1975) ; Molloy et Stepinski (2007) utilisent la courbure tangentielle (courbure de la ligne formée par l'intersection de la surface avec le plan normal à la ligne d'écoulement). Cette dernière possède la même distribution spatiale que la courbure en plan (Molloy et Stepinski, 2007), plus connue qui mesure la courbure des courbes de niveau. La plupart du temps, pour connecter les cellules de convergence, l'accumulation des écoulements est pondérée par la grille de l'indice morphologique.

Au sein des méthodes morphologiques, on peut distinguer les approches reposant sur une combinaison simple entre indice morphologique et algorithme de drainage (Depraetere et Moniod, 1991 ; Tarboton et Ames, 2001 ; Molloy et Stepinski, 2007) de celles à base statistique (Lashermes *et al.*, 2007 ; Tarolli et Dalla Fontana, 2009 ; Sofia *et al.*, 2011). Cette distinction repose sur la manière dont les cellules qui représentent une concavité significative du terrain sont mises en évidence. Les premières déterminent un seuil arbitrairement ou à partir de la propriété de dénivelée constante. Les secondes utilisent des méthodes statistiques pour choisir un seuil. Le seuillage est réalisé à partir de la distribution des valeurs de l'indice morphologique et est fondée sur l'utilisation conjointe de plusieurs méthodes statistiques.

Les résultats obtenus à partir de ces méthodes sont souvent satisfaisants, plus conformes à la réalité terrain que les algorithmes de drainage classique. Cependant, on remarque parfois une sous-

représentation de l'information de forme contenue dans le MNT. La plupart des méthodes n'exclut pas la détermination d'un seuil dont l'objectivité peut être discutée.

2.3. Effet de la résolution

La résolution constitue un des principaux paramètres des images et des MNT et appartient au triplet d'échelle (4.1.2). Elle contrôle directement la taille des objets que l'on peut extraire. Par exemple, il n'est pas possible d'extraire des objets dont la taille est inférieure à la taille de la cellule (résolution). Etant donné l'importance des paramètres d'échelle dans la représentation des objets liés à l'érosion, il est indispensable d'étudier l'effet de la résolution sur les informations extraites des images et MNT.

En ce qui concerne les MNT, la résolution détermine directement la structure spatiale de ses dérivées et la signification des objets extraits (Puech, 2000 ; Charleux-Demargne, 2001). Puech (2000) montre une stabilité de l'altitude aux changements de résolution mais une grande instabilité des plans dérivés tels que la pente et l'azimut. Ces dernières années, de nombreux travaux se sont intéressés à l'effet de la résolution sur les plans issus du MNT et des conséquences sur leur intégration dans des modèles morphologiques divers (Horritt et Bates, 2001 ; Smith *et al.*, 2006 ; Sørensen et Seibert, 2007 ; Vaze *et al.*, 2010 ; Nguyen et Wilson, 2010).

L'impact de la résolution sur les réseaux de talwegs extraits est abordé dans Garbrecht et Martz (1994), McMaster (2001), et Vaze et al (2010). Les auteurs explorent des questions en lien avec la sensibilité de la précision géographique des réseaux à la résolution. Le point délicat est souvent d'isoler l'effet de la résolution par rapport à l'effet des autres paramètres d'extraction tel que le seuil de surface amont drainé.

Existe-t-il une taille de cellule optimale pour une application donnée et comment la déterminer (Hengl, 2006 ; Napieralski et Nalepa, 2010) ? Pour illustrer cette question, rappelons que le calcul de la pente d'un versant nécessite une cellule bien plus petite que la taille du versant (au moins dans un rapport de 1 à 5). Pour les réseaux de talwegs, Garbrecht et Martz (1994) déterminent le rapport surface totale du bassin / résolution maximale pour pouvoir reproduire un réseau de référence à partir d'un MNT. Ils montrent que le MNT doit avoir une résolution inférieure à 5% de la surface totale pour pouvoir reproduire les éléments importants du réseau de référence avec une précision de 10% (environ).

Concernant l'imagerie satellite, Vrieling (2006) introduit la question de la résolution spatiale pour le choix des capteurs. Les résolutions spatiales des satellites Landsat (30 m) et Spot (entre 5 et 20 m) sont pertinentes pour l'identification des grandes et moyennes ravines mais ne permet pas le suivi

de leur évolution par images séquentielles. Les récents satellites à haute résolution (résolutions métriques) tels qu'IKONOS et Quickbird rendent possible la détection et le suivi de formes d'érosion individuels de petites tailles (largeur inférieure à 5 m). Un point de recherche actuel s'intéresse à la détection des formes d'érosion des niveaux inférieurs tels que les rigoles.

Chapitre 3 : La description quantitative des réseaux de talwegs

Depuis longtemps, les scientifiques cherchent à décrire, caractériser, classer les paysages, considérant que cela participe de la compréhension et du suivi des unités bio-physiques. La morphométrie classique s'est d'abord intéressée à l'orométrie (hypsométrie, altitudes et pente moyennes, volume, relief, formes en plan et densité de drainage) à partir de courbes de niveau. Plus tard, les travaux se sont concentrés sur la topologie des réseaux de drainage, marqués par l'apport de Horton (1945), la distribution des pentes et la classification quantitative des formes du relief terrestre. La géomorphométrie moderne s'est fondée sur le potentiel des MNT pour décrire l'espace, faisant appel à une grande variété de méthodes numériques. La description quantitative moderne du relief fusionne alors les questions fondamentales de la morphométrie classique et le potentiel des données numériques MNT.

Notre attention se porte ici sur la description des bassins versants et réseaux de talwegs associés qui constitue des unités topographiques fonctionnelles, en vue de la caractérisation des *badlands*.

3.1. De la morphométrie classique à la géomorphométrie moderne

3.1.1. Les concepts de la morphométrie classique

L'approche morphométrique classique des bassins versants regroupe trois aspects : le linéaire, le surfacique et le relief (Chorley, 1971). L'aspect linéaire prend en compte le réseau de talwegs et les limites de bassins versants. Les limites de bassins correspondent aux lignes de crêtes. Ce sont au départ des méthodes mises en place pour des réseaux hydrographiques cependant elles sont souvent utilisées pour décrire des réseaux de talwegs notamment en secteur de *badlands* (Schumm, 1956a). Les réseaux de talwegs peuvent être abordés selon deux points de vue : la topologie, qui s'intéresse aux schémas hiérarchiques de réseau et aux interconnexions du système ; et la géométrie qui concerne les dimensions métriques des parties des talwegs ou branchement du réseau (longueurs, angles, et orientations) (Bailly, 2007). L'aspect surfacique concerne tout ce qui est en lien avec la surface du bassin versant (superficie,...) et ses relations avec les autres variables telles que la

longueur du réseau ou la distribution des débits. La description du relief se rattache en morphométrie soit aux éléments linéaires soit aux surfaces : il est possible d'observer les profils longitudinaux des talwegs ainsi que la courbe hypsométrique de l'ensemble du bassin ou simplement des pentes de surfaces. Gaucherel (2003) réalise un tableau synthétique des indicateurs morphométriques regroupés selon les types d'éléments considérés *i.e.* linéaires (telles que la longueur ou la sinuosité de cours d'eau), surfaciques (telle que la surface amont drainée), volumiques (telle que la concavité du bassin). On retient également la typologie de Delahaye *et al.* (2005, cité dans Douvinet *et al.*, 2008). Notons également le rapport de Pike (2002) pour l'USGS (*United States Geological Survey*) qui rassemble un très grand nombre de références bibliographiques portant que la caractérisation numérique de la topographie et organisés par thèmes.

Nous nous concentrons ici sur l'approche par les éléments linéaires. Il est important de noter que la plupart des indices présentés sont sensibles au niveau de détail de la représentation (*i.e.* l'échelle de la carte ou la résolution des documents qui ont servi à l'extraction du réseau).

3.1.2. L'apport de la représentation numérique de l'espace

Les données numériques MNT montrent un fort potentiel pour la description des formes du relief terrestre. Des informations, de diverses natures, peuvent être extraites. Toutefois, le passage du MNT aux attributs du terrain (ou variables morphométriques) n'est pas direct et nécessite des méthodes d'extraction stables, souvent liées aux outils SIG. Ces méthodes reposent sur des séries d'opérations mathématiques, parfois appelées *algorithmes géomorphométriques* (Pike *et al.*, 2008). Le format de représentation des attributs est fixé par les SIG qui gèrent deux types de données : les grilles raster et les vecteurs.

Habituellement, on distingue les attributs du terrain primaires et secondaires, selon leur degré de dérivation à partir du MNT (Wilson et Gallant, 2000). Selon Pike *et al.* (2008), il existe une différence fondamentale entre les attributs qui décrivent la topographie en un point sur une aire d'échantillonnage (par exemple, la pente en un point xy) et les attributs quantitatifs qui décrivent les objets extraits du MNT (tels que les réseaux de talwegs ou limite de bassin).

3.1.3. Les descripteurs géomorphométriques

Les descripteurs géomorphométriques, ou descripteurs numériques spatiaux, résultent du croisement de la morphométrie classique et de l'approche numérique du relief. Sont croisés les questions et besoins de la géomorphologie – l'information que l'on cherche à avoir pour décrire les

formes de manière à pouvoir les expliquer – et le potentiel de description des MNT – l'information que l'on peut extraire à l'aide de méthodes numériques. Ces approches sont complémentaires, chacune possédant ses objectifs, son potentiel et ses contraintes propres.

Les descripteurs peuvent être synthétiques, auquel cas ils sont souvent appelés indicateurs ou indices. Ce sont des valeurs numériques de synthèse traduisant l'état d'un système et permettant de classer, hiérarchiser rapidement deux états. Ce sont souvent des nombres sans dimension (indices de formes, rapports de Horton) mais pas toujours (pente, densité de drainage). Du fait de leur niveau de description qui très global, il est parfois difficile de relier les valeurs obtenues à un fonctionnement érosif ainsi que d'expliquer la différence entre les valeurs obtenues sur deux systèmes différents (bassins ou réseaux)

Au contraire, les descripteurs spatialisés sont des valeurs réparties dans l'espace (sur une grille ou un ensemble de vecteur en mode numérique) donnant une information locale en chaque point de mesure, une valeur fine qui peut servir dans les modèles morphologiques mais qui ne donnent pas instantanément d'information sur une hiérarchie (altitudes, pentes, sinuosité d'un drain ...). Leur structure spatiale et leurs caractéristiques statistiques présentent un intérêt pour la définition fine de l'état du système. Ce type de descripteurs contribue, notamment par intégration dans des modèles morphologiques (1.3), à l'explication des formes par les processus et à la compréhension du fonctionnement actuel des bassins.

Notons qu'avec l'utilisation de l'expression *d'indice topographique ou morphologique*, dérivés du MNT (2.2.2), on est à la limite de la signification du terme d'indice puisque ce sont, en réalité des représentations spatialisées.

Nous retenons trois types de réponses que le MNT peut apporter à la morphométrie :

- 1) des valeurs d'altitude, spatialisées, issues directement du MNT
- 2) des valeurs d'attributs de terrain, dérivées du MNT et décrivant des aspects de la morphologie sur une surface continue (indices topographiques décrits 2.2.2).
- 3) des valeurs d'attributs décrivant des objets du relief qui ont été extraits à partir du MNT (réseau de talwegs)

Nous présentons ici un échantillon des descripteurs de réseaux de talwegs les plus utilisés en morphométrie, classés en trois catégories: les descriptions topologiques, géométriques et fractales.

3.2. Descriptions topologiques des réseaux

3.2.1. Hiérarchiser les talwegs

Il existe plusieurs classifications hiérarchiques des talwegs (Figure 3.1). Ces classifications reposent sur une approche topologique des réseaux. La reconnaissance de la hiérarchie des talwegs est importante du fait des différents objets morphométriques et hydrologiques qui leur sont associés (Chorley, 1971). Les systèmes de classification représentent une manière de mesurer la position d'un talweg dans la hiérarchie d'un réseau (Leopold *et al.*, 1964). De plus ils permettent des comparaisons de structure entre les réseaux de différents bassins.

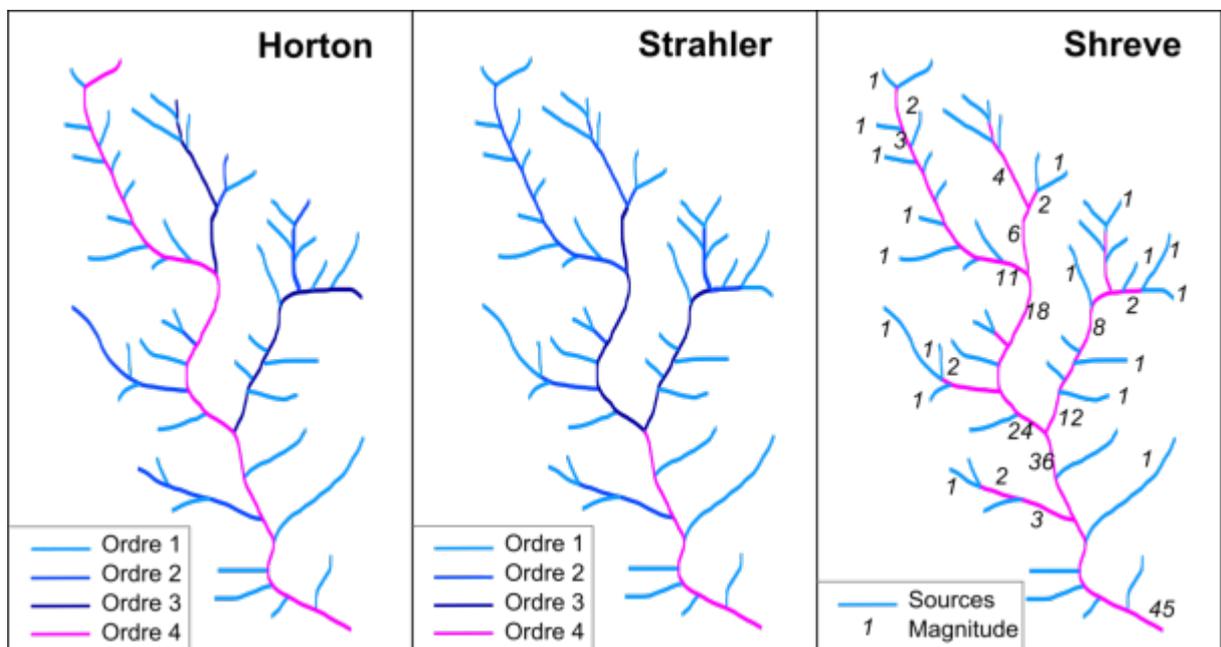


Figure 3.1. Les trois principales classifications des drains ou talwegs (d'après Zavoianu, 1985)

3.2.1.2. Les classifications d'Horton-Strahler

La classification de Strahler (1945), souvent considérée comme la première hiérarchisation des drains au sein d'un réseau hydrographique s'inspire de la classification plus ancienne de Gravelius (1914). Gravelius (1914 cité par Horton, 1945) attribue l'ordre 1 au drain principal et des ordres plus grands à ses tributaires. Les tributaires les plus petits prennent l'ordre le plus grand et malgré le fait qu'ils puissent avoir les mêmes caractéristiques (géométriques, hydrologiques, ...) dans différents bassins, ils prennent des ordres différents. C'est pourquoi, Horton (1945) inverse cette classification,

en suivant son intuition selon laquelle le drain considéré comme principal doit prendre l'ordre le plus grand et les tributaires aux extrémités du réseau l'ordre le plus petit. Ainsi les drains sans tributaires (aux extrémités du réseau) prennent toujours le même ordre qui est de 1. Les drains d'ordre 2 sont ceux qui reçoivent des tributaires d'ordre 1 et uniquement ceux-là ; les drains d'ordre 3 doivent recevoir au moins deux tributaires d'ordre 2 mais peuvent aussi recevoir des ordres 1 ; et ainsi de suite. Ce système fait remonter un drain d'ordre n jusqu'à sa source (Bravard et Petit, 1997). La question se pose de savoir comment déterminer la source d'un tributaire : quel drain amont est considéré comme la source ? Horton (1945) propose des règles pour déterminer le chemin de chaque ordre n pour remonter jusqu'à sa source : la première consiste à rechercher le trajet le plus rectiligne ; soulignant qu'il peut y avoir des exceptions lorsque la géologie affecte le tracé du réseau. Si la première règle ne permet de discriminer les drains amont, alors on considère leur longueur ; le drain le plus court prend l'ordre le plus petit.

La différence entre les systèmes de classification de Gravelius et Horton soulève la question fondamentale du sens de hiérarchisation : doit-on hiérarchiser de l'amont vers l'aval (Horton) ou de l'aval vers l'amont (Gravelius) ? La hiérarchisation de l'amont vers l'aval peut être qualifiée de descendante et traduit la cohérence hydrologique du sens d'écoulement. La hiérarchisation de l'aval vers l'amont peut être qualifiée d'ascendante. Ce schéma peut s'avérer plus adapté dans un contexte de réseau issu de données de télédétection pour lesquels les drains principaux sont plus stables que les drains aux extrémités.

Cependant, les classifications de Gravelius et Horton ne sont pas faciles à mettre en pratique, notamment dans un contexte numérique. La principale difficulté provient de la détermination des sources et donc de la subjectivité du chemin des drains. Strahler (1957) allège les règles de classification d'Horton (1945) ; ce qui la rend plus facile à appliquer et plus conforme à la représentation sous forme de graphe. Cette hiérarchisation reste la plus courante pour décrire un réseau hydrographique car elle offre de nombreuses possibilités (Chorley, 1971). Elle attribue l'ordre 1 à l'ensemble des drains sans tributaires que l'on peut alors appeler drains sources et l'ordre $n+1$ au drain issu de la confluence entre deux drains d'ordre n . Le drain issu d'une confluence entre un drain d'ordre n et un drain d'ordre $n-1$ prend l'ordre n et n'augmente pas. Toutefois, Chorley (1971) note que le système de Strahler va à l'encontre des lois de distribution, car dans ce système, l'entrée d'un cours d'eau d'un ordre inférieur n'élève pas l'ordre du cours d'eau principal.

Notons que la classification de Strahler montre une sensibilité au niveau de détail de la représentation du réseau. Les ordres attribués aux talwegs changent avec l'échelle de la carte (ou niveau de détail de la représentation du réseau) et l'ordre du réseau augmente avec le niveau de détail (Scheidegger, 1966).

3.2.1.3. La classification de Shreve

Encore plus proche de la représentation des réseaux sous forme de graphe, la classification de Shreve (1966) repose sur une toute autre idée. Pour Shreve (1966) comme pour Scheidegger (1966), la classification est en lien direct avec la taille du bassin (Zavoianu, 1985). Dans le système de Shreve, on parle de magnitude des talwegs. Les branches externes du réseau (*i.e.* les talwegs sources) sont de magnitude 1 ; puis on additionne la magnitude des deux talwegs amont à chaque confluence. En d'autres termes, la magnitude de Shreve correspond au nombre de sources à l'amont de chaque point du réseau (Shreve, 1967 cité par Werritty, 1972). Le réseau est bien découpé selon ses arêtes puisque la magnitude change à chaque confluence donc chaque arête prend une valeur différente. On obtient alors des valeurs qui s'élèvent plus rapidement. Ce système ne permet pas de caractériser les branchements à l'intérieur du réseau ni de comparer leur distribution. Mais elle permet d'observer la distribution des apports en chaque point du réseau.

3.2.2. Indices morphométriques issus des classifications

Ces systèmes de classifications rendent possibles le calcul d'indices morphométriques synthétisant différents aspects topologiques de l'organisation des réseaux.

3.2.2.1. Les rapports de Horton-Strahler ou lois de composition des bassins

Horton (1945) a montré qu'il existe une relation entre l'ordre d'un drain et le nombre de drains pour chaque ordre, leur longueur moyenne et la surface drainée moyenne. Le nombre de drains pour chaque ordre suit une progression géométrique inverse. La longueur moyenne des drains, comme la surface drainée moyenne suivent des progressions géométriques normales en fonction de leur accroissement respectif dans la hiérarchie des ordres des drains et des sous bassins versants. Ces relations se traduisent sous la forme de trois rapports :

$$\text{Rapport de confluence (Bifurcation ratio) : } R_C = N_i / N_{i+1} \quad (1.2)$$

$$\text{Rapport des longueurs (Length ratio) : } R_L = L_{i+1} / L_i \quad (1.3)$$

$$\text{Rapports des aires (Area Ratio) : } R_A = A_{i+1} / A_i \quad (1.4)$$

avec N_i le nombre de drains d'ordre i , L_i la longueur moyenne des drains d'ordre i et A_i l'aire de drainage moyenne des drains d'ordre i . L'ordre considéré pour le calcul de ces rapports est l'ordre de Strahler ; de là vient le nom de rapports de Horton-Strahler.

Ces rapports sont relativement constants pour l'ensemble des ordres et constituent les lois de Horton. On attribue une valeur pour l'ensemble du réseau qui correspond graphiquement à la pente de la droite de régression de la variation du nombre ou de la longueur moyenne (en échelle logarithmique) en fonction des ordres (Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997).

Les lois de Horton sont censées être valables quel que soit l'ordre ou la résolution à laquelle est perçu le réseau (Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997). En cela, elles constituent déjà des lois d'échelle (*scaling law*). Selon Dodds et Rothman (2000), les rapports de Horton-Strahler occupent une place centrale dans la théorie des comportements multi-scalaires des réseaux de talwegs.

Certains travaux (de Vries et Eckhardt, 1997 ; Dodds et Rothman, 2000) ont montré que les plus petit et plus grand ordres biaisent le résultat final. Ainsi, ils proposent de ne pas prendre en compte l'ordre 1 et l'ordre maximal du réseau pour le calcul des rapports de Horton. Dodds et Rothman (2001) tentent de stabiliser le calcul en prenant la moyenne des rapports obtenus sur différents intervalles d'ordres. Pour ce travail, nous utiliserons la méthode classique de régression sur l'ensemble des ordres pour pouvoir traiter des réseaux d'ordres inférieurs ou égaux à 3. Toutefois, notons que d'après Dodds et Rothman (2000), les rapports de Horton-Strahler n'atteignent pas leur régime asymptotique avant l'ordre 3 ou 4. Par ailleurs, Dodds et Rothman (1999) notent que seuls les rapports de confluence et de longueur sont indépendants ; R_L et R_A étant corrélés.

R_C traduit numériquement et de manière synthétique l'organisation hiérarchique du réseau. La valeur qu'il prend reflète la plus ou moins forte ramification du réseau (Figure 3.2). La plus petite valeur possible de R_C est 2, qui correspond à un réseau faiblement ramifié mais fortement hiérarchisé (*i.e.* peu de branches comparativement à celles de l'ordre supérieur mais organisées de manière hiérarchique). Théoriquement, il n'y a pas de valeur maximale (Milton, 1965). Les fortes valeurs de R_C traduisent des réseaux fortement ramifiés (nombreux branchements). Pour des bassins réels, les valeurs de R_C semblent être comprises entre 2 et 5 (Milton, 1965). Horton (1945) affirme que le rapport de confluence est faible dans les secteurs de faible pente et prend des valeurs élevées dans les secteurs de montagne ou dans les terrains fortement disséqués. La valeur de R_C est liée aux descripteurs géomorphologiques tels que la densité de drainage et les indices de relief (Milton, 1963). Les valeurs de R_L sont généralement comprises entre 1.5 et 3.5 (Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997).

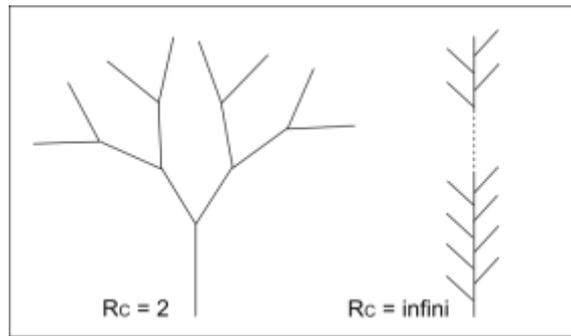


Figure 3.2. Deux cas extrêmes de rapport de confluence (d'après Milton, 1965)

3.2.2.2. Critique des rapports de Horton et modèles de topologie aléatoire

Werritty (1972) présente un aspect critique des lois de Horton et insiste sur le modèle de réseau aléatoire de Shreve (1967). La principale critique des lois de Horton dénonce le fait que le schéma de hiérarchisation est insensible aux variations structurales et lithologiques. Les rapports de confluences montrent une remarquable stabilité d'une région à l'autre. Dans le but de générer un schéma de hiérarchisation plus sensible et un modèle évitant les incohérences des lois de Horton, Smart (1967), Shreve (1966) proposent un modèle de topologie aléatoire TDCN (*Topologically Distinct Channel Network*) qui repose uniquement sur des propriétés combinatoires. Ce modèle repose sur le fait qu'un même nombre de sources (même magnitude du réseau) donc une complexité topologique comparable, peut être relatif à des réseaux de structure topologique différentes (Figure 3.3).

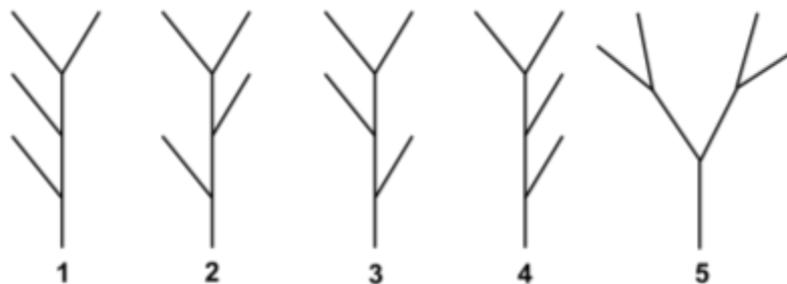


Figure 3.3. Les cinq TDCN pouvant être construits avec quatre sources (magnitude 4)

Shreve montre que les lois de Horton sont respectées pour la grande majorité des TDCN qui peuvent être construits avec une magnitude quelconque ; le respect des lois de Horton est donc inhérent à la définition des ordres de Strahler et ne nécessite pas de structure topologique particulière (Costacabral et Burges, 1997). Shreve propose alors l'hypothèse diamétralement opposé selon laquelle en l'absence de contrôle géologique, la population naturelle de réseaux

hydrographiques possédera une topologie aléatoire représentée par l'ensemble des TDCN (Shreve, 1966 cité dans Costacabral et Burges, 1997). Mais la définition des réseaux aléatoires de Shreve concerne uniquement la topologie, elle est descriptive plus qu'explicative, elle ne suppose rien à propos des processus d'évolution (Costacabral et Burges, 1997).

On oppose donc la vision de Horton qui revient à une approche déterministe de la structuration des réseaux à celle de Shreve qui met en avant son caractère aléatoire. La vision aléatoire de la structure topologique des réseaux de Shreve est examinée par Costacabral et Burges (1997).

3.2.3. Les matrices de ramification

La matrice de ramification est une grandeur topologique qui permet de décrire les branchements d'une arborescence. Moins synthétique que les rapports de Horton-Strahler (qui peuvent être les mêmes pour des réseaux aux allures très différentes), la matrice de ramification rend possible la reconstitution des branchements d'un réseau, ainsi elle permet de caractériser précisément la forme (topologique) des réseaux et peut être utilisée pour simuler des arborescences dans une logique aval/amont (Bailly, 2007). Etant donné que l'on s'intéresse aux branchements, cette matrice se concentre sur les confluences du réseau et non plus sur les linéaires.

Les principes et calculs d'une matrice de ramification sont détaillés dans Janey (1992) et Bailly (2007). Dans le cas d'un arbre binaire, elle correspond au dénombrement de l'ensemble des bi-ordres. Le bi-ordre d'une confluence se rapporte aux deux ordres des talwegs amont. Pour chaque confluence dont le talweg aval est d'ordre n , son bi-ordre est soit de type $(n-1 ; n-1)$ soit de type $(n ; i)$ avec $i < n$.

Figure 3.4 illustre l'élaboration de la matrice de ramification. Sur l'arbre, les confluences sont en rouge et l'épaisseur du trait des talwegs est relative à son ordre de Strahler : les traits pointillés représentent les talwegs d'ordre 1 ; les traits pleins, les talwegs d'ordre 2 ; et les traits épais, les talwegs d'ordre 3. Pour chaque confluence, les bi-ordres sont comptabilisés dans la matrice. Trois exemples de bi-ordres sont situés dans la matrice, respectivement de haut en bas : un bi-ordre $(1 ; 1)$ donnant un talweg d'ordre 2, un bi-ordre $(2 ; 1)$ donnant un talweg d'ordre 2 et un bi-ordre $(2 ; 3)$ donnant un talweg d'ordre 3. Les bi-ordres du même type sont ainsi comptabilisés sur l'ensemble de l'arbre (ici sur 24 branchements, 9 sont de type $(1 ; 3)$).

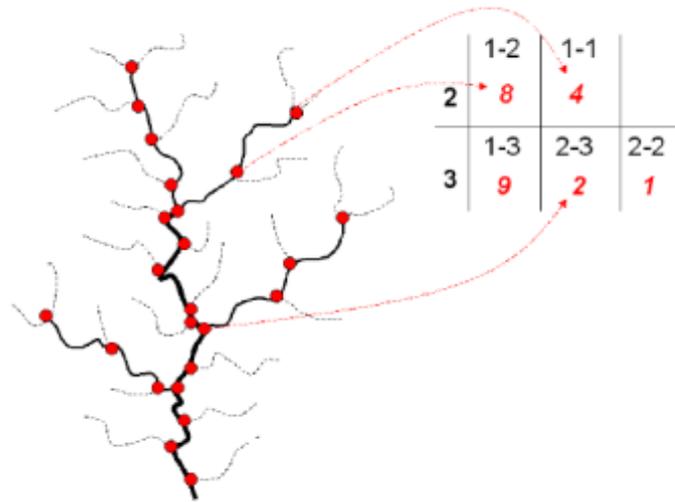


Figure 3.4. Exemple de calcul d'une matrice de ramification (Extrait de Bailly, 2007)

3.3. Descriptions de la géométrie des réseaux

3.3.1. La notion de densité de drainage

La première mesure, simple et expressive, qui permet de mesurer le degré de développement spatial d'un réseau est la densité de drainage (Horton, 1945). Elle (D_d) correspond à la longueur totale des talwegs par unité de surface. Pour Tricart (1977), elle constitue l'un des descripteurs les plus importants du modèle de dissection, qu'il appelle *degré de ciselure*. Pour cette mesure, tous les chenaux permanents ou temporaires doivent être comptabilisés (Chorley *et al.*, 1982).

$$D_d = \frac{L}{A} \quad (1.5)$$

avec L la longueur totale de talweg et A la surface du bassin versant (mesurée en planimétrie).

La forte densité de drainage est une des caractéristiques principales des *badlands* (1.1.3). Toutefois, l'échelle de représentation du réseau influence fortement la longueur mesurée ; ce qui rend les comparaisons de valeurs de densités de drainage délicates.

Une deuxième valeur peut apporter un complément à la densité de drainage : celle de la densité hydrographique (F), qui correspond au nombre de canaux d'écoulement par unité de surface, et dont le calcul s'effectue selon la formule suivante :

$$F = \sum N_i/A \text{ (en canaux par km}^2\text{)} \quad (1.6)$$

avec N_i le nombre de cours d'eau et A l'aire du bassin versant (en km^2)

L'USGS, pour un indicateur très proche appelé *drainage frequency*, propose de retenir le nombre de drains d'ordre 1 rapporté à l'aire de drainage (@USGS).

Une densité de drainage élevée et une densité hydrographique élevée sont deux facteurs allant souvent de pair (@l'EPFL, l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne).

En pratique, la densité de drainage est très variable selon les niveaux de détails de représentation du réseau : elle est fortement dépendante de l'extraction du réseau (seuil de surface amont drainée à partir de MNT) et de la résolution du document de base.

3.3.2. Indicateur de sinuosité

L'indicateur de sinuosité fait partie des indicateurs simples à concevoir et souvent utilisée (Riazanoff, 1994 cité dans Gaucherel, 2003). Il se mesure en rapportant la longueur totale du talweg le long de son cours à la longueur à vol d'oiseau entre le nœud de départ et le nœud d'arrivée du talweg. Il présente toutefois peu d'intérêt dans les régions ravinées, les pentes fortes voir très fortes limitent fréquemment la divagation du tracé des talwegs. En outre, pour des réseaux extraits à partir de données numériques, la sinuosité est fortement dépendante de la résolution du document.

3.3.3. Les mesures des pentes

Les pentes fortes représentent une des principales caractéristiques des paysages de *badlands*. On distingue deux principaux types de pentes : les pentes longitudinales des talwegs et les pentes de versant. Les pentes constituent un des éléments déterminants dans la discrimination des objets morphologiques.

Pour un même versant, différentes pentes (dépendantes de la résolution) peuvent être mesurées : pente moyenne de la surface du versant, pente calculée à partir de la différence d'altitude entre un point haut et un point bas, pente de la ligne de plus grande pente, ... Roering et

al. (2007) utilisent différents indicateurs de pente de versant calculés à partir de MNT dans le cadre de la formalisation du lien entre forme des versants et l'érosion.

Schumm (1956a) vérifie pour des *badlands*, qu'il existe une relation entre la pente longitudinale des talwegs et leur ordre de Strahler ; cette relation correspondant à une loi géométrique inverse (Horton, 1945). Le rapport de pente pour un réseau est donc le suivant :

$$R_p = P_i / P_{i+1} \quad (1.7)$$

avec P_i la pente moyenne des talwegs d'ordre i

3.3.4. Les angles de confluence : élément de description déterminant

L'angle entre les drains aux confluences apparaît comme un élément déterminant dans la caractérisation spatiale qualitative et quantitative des réseaux de talwegs, en lien avec la géologie ou encore l'évolution et l'âge relatif des réseaux (Horton, 1945 ; Schumm, 1956a ; Howard, 1971 ; Paget *et al.*, 2008).

Des observations diachroniques ont montré que les angles sont des éléments dynamiques du paysage (Howard, 1971) sur le long terme mais également à court terme. D'après les travaux de Schumm (1956a) réalisés sur la dynamique des *badlands* de Perth Amboy, les angles évoluent avec le relief. Ainsi, l'âge du relief (jeune ou ancien) influence la distribution des valeurs angulaires (Figure 3.5). Le tracé des nouveaux talwegs (nouvelles incisions) est guidé par la pente du versant dans lequel ils s'inscrivent et la pente du talweg dans lequel il se jette (appelé talweg aval). Lorsque la pente du versant est plus forte que celle du talweg aval, ce qui est pratiquement toujours le cas en secteur de *badlands*, le talweg créé rejoint le talweg aval en formant un angle droit. Dans le cas inverse, les talwegs sont quasiment parallèles.

D'après Howard (1971), les angles sont régis par les mécanismes d'érosion et sédimentation et sur le terrain, l'intersection de deux talwegs (plus exactement deux cours d'eau) correspond non pas à un point mais à une zone de forme triangulaire dont la géométrie exacte est compliquée. L'ajustement des angles d'un réseau est contraint par des facteurs locaux (pentes des talwegs – *i.e.* des lits – à la confluence, sédimentation et obstacles locaux, type de végétation du bassin).

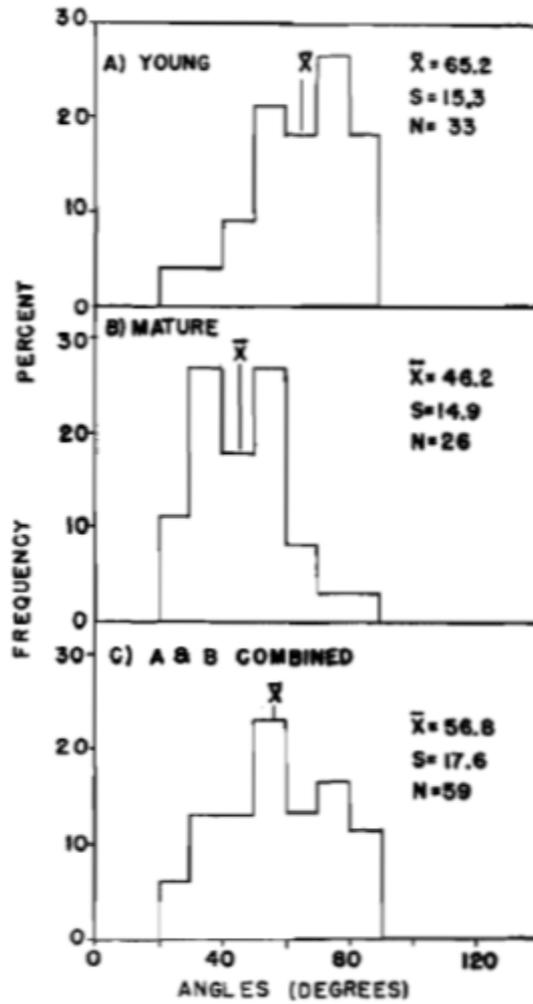


Figure 3.5. Distributions des angles aux confluences dans les badlands de Perth Amboy : jeunes, anciennes et combinées ; avec \bar{X} la moyenne, S l'écart-type et N le nombre d'observations (Schumm, 1956a)

Dans le cas d'arbre binaire, deux visions des angles aux confluences sont possibles : la vision planimétrique et la vision dans l'espace tridimensionnel.

La vision dans l'espace tridimensionnel permet de trouver les valeurs angulaires des confluences en fonction des pentes des talwegs. En supposant que la rigole qui se forme a la même pente que la celle du versant dans lequel elle s'inscrit, Horton (1945 cité par Schumm, 1956a) exprime la mesure de l'angle α sur un plan horizontal de la manière suivante :

$$\cos \alpha = S_m / S_n \quad (1.8)$$

avec S_m la tangente à la pente du talweg principal et S_n celle du versant dans lequel la rigole s'inscrit.

Howard (1971) critique ce modèle car, selon lui, deux aspects ne sont pas satisfaisants : premièrement l'aspect dynamique des angles au cours du temps n'est pas pris en compte, et deuxièmement cette expression ne permet pas d'introduire des différences de pentes entre la partie amont et la partie aval du talweg considéré comme principal. Selon la vision d'Howard (1971), lorsque deux talwegs se rencontrent pour former un troisième qui est à leur aval, la relation angulaire à la confluence est déterminée par les trois arêtes (Figure 3.6). Ainsi, l'équation de Horton (éq. 1.8) est modifiée en faisant l'hypothèse que chacune des arêtes amont suit cette équation séparément ; le talweg principal pris en compte étant l'arête aval. Il montre que ce modèle est plus précis dans la prédiction des angles en secteur de *badlands* que le modèle de Horton.

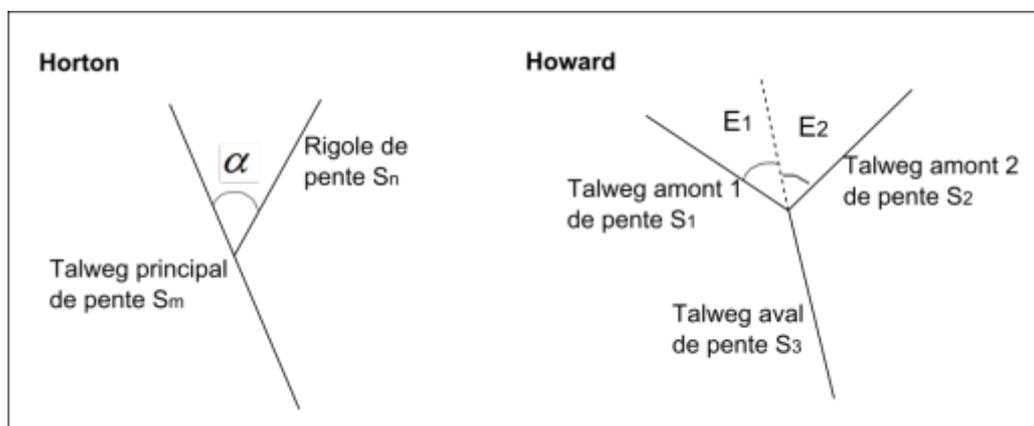


Figure 3.6. Les modèles de prédiction d'angle aux confluences d'Horton et Howard en fonction des pentes des talwegs (d'après Howard, 1971)

Plus récemment, des approches numériques planimétriques des angles aux confluences sont proposées. Deffontaines (1990 cité dans Paget *et al.*, 2008) montre qu'il est possible d'établir une correspondance entre les angles entre les arêtes aux confluences et certains types de réseaux (réseaux dendritiques, parallèles, ...) proposés dans la classification d'Howard (1967). Paget *et al.* (2008) s'intéressent plus particulièrement à la détection automatique des réseaux de type parallèle à partir du calcul des angles. Il montre que la détermination de l'angle à considérer n'est pas univoque : doit-on considérer l'angle localement (mesure locale au niveau de la confluence) ou bien l'angle entre l'orientation globale de des arêtes (mesure utilisant le linéaire droit joignant le nœud de confluence au nœud amont) ? Il semble que l'approche globale prenant en compte l'orientation générale des arêtes associées à la confluence permette d'obtenir des résultats plus stables et représentatifs.

3.4. Approche fractale des réseaux de talwegs

Si les mesures topologiques et géométrique usuellement employées caractérisent les réseaux de talwegs et leur bassin associé, l'analyse par la géométrie fractale permet d'une part de quantifier « *le degré de complexité* » et de fragmentation d'un objet naturel et d'autre part de quantifier l'évolution d'une forme avec l'échelle d'observation (Moussa et Bocquillon, 1993, Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997). L'approche fractale des réseaux hydrographiques a déjà fait l'objet de nombreux travaux (Tarboton, 1988 ; La Barbera et Rosso, 1989 ; Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997 ; Hauchard *et al.*, 1999 ; Schuller *et al.*, 2001). Elle a été utilisée pour tenter d'intégrer aux modèles hydrologiques la complexité des réseaux (Moussa et Bocquillon, 1993 ; Moussa, 2003). En géomorphologie, des auteurs tels que Hauchard (2001) tentent d'établir des relations entre les indices fractals des réseaux et des propriétés morphologiques régionales.

La dimension fractale, sur laquelle nous allons nous concentrer, est le principal indicateur fractal. Contribuant à une description synthétique de l'espace, elle reflète une complexité géométrique du tracé des talwegs acquise sur le temps long.

3.4.1. Définition et caractéristiques

La géométrie fractale est souvent présentée comme la géométrie de la nature. Historiquement, les recherches dans ce domaine concernaient des objets mathématiques « monstrueux » correspondant à des courbes continues mais non dérivables (Cantor, 1883 ; Hilbert, 1891 ; Sierpinski, 1915), difficilement appréhendables par la géométrie euclidienne classique. Ce n'est que plus tard que le terme de fractale est introduit et associé à la notion d'autosimilarité par Mandelbrot (1975).

On trouve diverses définitions ou plus précisément diverses caractérisation de l'objet fractal ; Mandelbrot lui-même ayant renoncé à en donner une définition (Mandelbrot, 1975 ; Gouyet, 1993). On retient deux idées principales concernant les objets fractals : la non-rectifiabilité et l'autosimilarité. Les objets fractals sont caractérisés par une forme irrégulière et fragmentée à toutes les échelles (Mandelbrot, 1975). Pour expliciter sa théorie, Mandelbrot se base sur l'exemple de la côte bretonne : il explique que la mesure de sa longueur dépend de l'étalon (ou pas de mesure) utilisé : plus l'étalon est petit plus la longueur mesurée est grande. Il est donc impossible de lui donner une longueur précise, on dit alors que cette courbe est non-rectifiable partout (Gouyet, 1993). D'autre part, Mandelbrot observe que la côte bretonne présente, quelle que soit l'échelle de la carte étudiée, des baies et des péninsules. On observe les mêmes structures à des échelles différentes et ceci sur une large gamme d'échelle ; on dit alors que l'objet est autosimilaire (Mandelbrot, 1975).

L'exemple du chou illustre bien l'autosimilarité (*self-similarity*) aussi appelée homothétie interne ou invariance d'échelle. L'objet reste le même à toutes les échelles, une partie de ce chou reste similaire au chou entier : si l'on détache une branche de ce chou, on aura un « mini chou » qui ressemblera en tout point, ou presque, au chou de départ (Figure 3.7).



Figure 3.7. Un chou Romanesco et ses sous-ensembles de plus en plus « zoomés » (Source :@J.Walker)

Les fractales sont aussi bien des objets dont la construction est entièrement déterministe que des trajectoires de champs aléatoires (Bardet, 1997 ; Figure 3.8). Les fractales apparaissent dans de nombreuses manifestations de phénomènes aléatoires ; le mouvement brownien, décrivant la trajectoire d'un mouvement totalement aléatoire, est l'exemple de fractale « fabriquée par le hasard » le plus simple mais aussi le plus significatif (Sapoval, 1997). Par ailleurs, les fractales construites de manière déterministes suivent des règles d'organisation données telles que celles qui régissent la courbe de Peano ou le flocon de von Koch. Nous supposons que les objets fractals de la nature se situent quelque part entre les fractales déterministes et les phénomènes aléatoires.

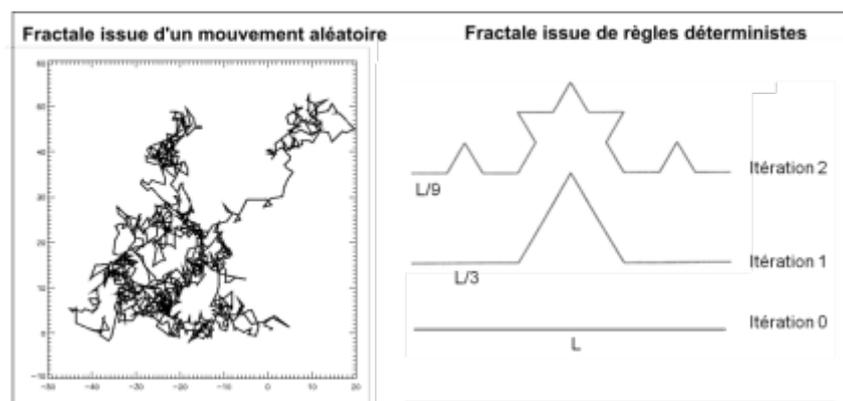


Figure 3.8. Fractales aléatoires (mouvement brownien ; @wikipedia) et fractales déterministes (courbe de von Koch ; d'après Sapoval, 1997). La fractale déterministe de von Koch correspond à un nombre d'itérations qui tend vers l'infini.

Un second concept est introduit, celui de la multi-fractalité. Les multi-fractales sont définis comme des objets géométriques qui présentent différents comportements fractals locaux, dans différentes régions de l'espace (communication orale Le Gall, 2007 ; Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997).

3.4.2. Les objets géographiques sont-ils fractals ?

La géométrie fractale est utilisée dans de nombreux domaines de la géographie et des géosciences (Gouyet, 1993 ; Frankhauser, 1994 ; Lesnes, 2004 ; Turcotte, 2007). Elle fournit un cadre mathématique permettant appréhender les objets ayant les mêmes propriétés aux différentes échelles.

3.4.2.1. Les propriétés fractales des objets de la nature

Les propriétés fractales sont asymptotiques et la transposition des méthodes développées pour des objets abstraits infinis à des objets réels finis pose certaines questions. Les propriétés des objets fractals mathématiques sont connues exactement. Celles des objets naturels sont moins évidentes. Il existe deux différences majeures entre les fractales mathématiques infinies et les objets fractals naturels finis (Lesnes, 2004). D'une part, les objets naturels ne présentent pas une autosimilarité stricte, mais ils sont autosimilaires en probabilité. D'autre part, leur comportement fractal n'est valide que sur une gamme d'échelle finie. Il existe des limites inférieures et supérieures au comportement fractal d'un objet et l'étude de ce comportement n'a d'intérêt que si ces limites sont bien différentes (Sapoval, 1997 ; Lesnes, 2004 ; Roland et Fleurant, 2004). Mandelbrot (1975) avait déjà abordé l'existence d'une limite vers les échelles de mesure fines et il en est de même pour les échelles grossières : *« Il se trouve que, dans le cas des côtes, la supposition selon laquelle les promontoires s'ajoutent sans fin est raisonnable, mais l'homothétie interne ne tient que dans certaines limites. En effet, aux échelles extrêmement petites, le concept de côtes cesse d'appartenir à la géographie ».*

Selon Mandelbrot (1975), toujours à propos de la côte bretonne, *« on est amené à croire qu'à l'échelle près, le même mécanisme eût pu engendrer les petits aussi bien que les gros détails des côtes ».* Si l'approche fractale présente un intérêt pour caractériser les formes, le lien avec un fonctionnement (par exemple hydrologique ou érosif) reste délicat et peu établi dans la littérature. Cette conjecture de Mandelbrot (1975) semble dangereuse pour l'étude d'objets naturels résultant d'une combinaison de processus opérant à différentes échelles. Et si l'approche fractale permet de poser de nouvelles questions sur la genèse des formes (Dauphiné, 1991), le lien entre la forme, sa genèse et son évolution reste à établir.

En outre, pour Meakin *et al.* (2001), la ressemblance superficielle entre deux formes n'implique pas nécessairement qu'il y ait une relation entre les processus qui les ont créées. Depuis quelques décennies, une attention particulière s'est concentrée sur des modèles simples pour représenter un comportement structurel et dynamique complexe. Et l'association entre ces modèles et le comportement complexe est parfois réalisée un peu rapidement.

3.4.2.2. L'approche fractale en géographie et géosciences

« *La morphologie autosimilaire des objets fractals, qui reproduit les mêmes structures à des échelles différentes, est une caractéristique de l'organisation spatiale de nombreux objets géographiques* » (Frankhauser et Pumain, 2001). Ainsi, on trouve dans la littérature un certain nombre de travaux abordant des objets géographiques par la géométrie fractale. Au sein de la communauté française, des approches fractales ont été développées pour l'étude des systèmes urbains (Frankhauser, 1994 ; Tannier et Pumain, 2005) puis, en géomorphologie, pour l'étude des réseaux hydrographiques (Brunstein, 1999 ; Hauchard, 2001) et pour celle des réseaux de fractures (Davy *et al.*, 1990).

La littérature anglo-saxonne est plus fournie. Des auteurs montrent, entre autres, les compléments que l'approche fractale offre aux descripteurs usuels, plus particulièrement dans l'étude des reliefs, des réseaux hydrographiques et, plus largement, des bassins de drainage (Tarboton, 1988 ; Helmlinger *et al.*, 1993 ; Tarboton, 1996 ; Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997 ; Turcotte, 2007).

Dauphiné (1991) avait prédit un grand avenir pour l'application de la théorie fractale en géographie physique puisqu'elle offre un nouvel outil pour aborder les formes. La description des systèmes naturels par la géométrie fractale a apporté une vision intéressante notamment en géosciences, en biogéosciences et biophysique : par exemple pour l'étude et la simulation des colonies de bactéries (travaux du laboratoire Matière et Système Complexes UMR 7057 ; ou celle des formations lithiques qui leur correspondent (Verrecchia, 1995 ; 2003). Toutefois, de nombreuses tentatives de description de structures ont fourni des résultats imprécis ou trompeurs (Meakin *et al.*, 2001).

3.4.3. Autosimilarité et autres hypothèses de la géométrie fractale

L'autosimilarité des réseaux de talwegs est souvent admise. Dodds et Rothman (1999) réalisent une synthèse des travaux marquants et proposent de revoir l'estimation des dimensions fractales en rapport avec leurs hypothèses de départ. Ces hypothèses sont : 1) une densité de drainage uniforme

dans l'espace ; 2) une auto-affinité du réseau, qui traduit une sorte de sinuosité uniforme du réseau ; 3) une autosimilarité de la structure du réseau sur une large gamme d'échelle (Dodds et Rothman, 1999 cité dans Bailly, 2007).

Peckham (1995, 1999) propose des méthodes pour tester l'autosimilarité statistique des réseaux. Pour cela, il s'appuie sur la loi de Tokunaga (1966, 1978). Tokunaga (1966) étend la classification de Strahler et propose une classification des branchements latéraux (*side-branching*). Cette classification est proche de l'idée de la matrice de ramification présentée ci-dessus (3.2.3). On note $(1; 1)$ les talwegs d'ordre 1 qui se branchent sur des ordres 1, $(1; 2)$ les talwegs d'ordres 1 qui se branchent sur les ordres 2 et ainsi de suite. Plus généralement, on note $(i; j)$ les talwegs d'ordre i qui se branchent sur des ordres j . Ce que l'on appelle talwegs dans cette classification correspond en fait aux arêtes de l'arborescence. Un rapport de ramification ou de branchement (*branching ratio*) $T_{(i; j)}$, qui correspond au nombre moyen de talwegs d'ordre i rejoignant des talwegs d'ordre j , est défini.

On considère les arbres déterministes pour lesquels chaque drain d'ordre w a au moins 2 tributaires d'ordre $w-1$ et $T_{(w; k)}$ tributaires latéraux (*side tributaries*) d'ordre k , avec w variant de 2 à Ω (ordre de Strahler du réseau) et k varie de 1 à $w-1$.

Les valeurs $T_{(w; k)}$ peuvent être organisées dans une matrice triangulaire (Figure 3.9). Les arbres autosimilaires sont alors définis comme ceux dont les valeurs sont constantes le long des diagonales.

$$\begin{pmatrix} T_{2,1} & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ T_{3,1} & T_{3,2} & 0 & \cdots & 0 \\ T_{4,1} & T_{4,2} & T_{4,3} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{\Omega,1} & T_{\Omega,2} & T_{\Omega,3} & \cdots & T_{\Omega,\Omega-1} \end{pmatrix}$$

Figure 3.9. Matrice des $T_{(w; k)}$ (Peckham, 1995)

La Figure 3.10 montre différents exemples d'arbres autosimilaires. Leur autosimilarité peut être appréciée en comparant la relation entre le talweg d'ordre 4 et ses tributaires avec la relation des talwegs des divers ordres et leurs tributaires (Peckham, 1995).

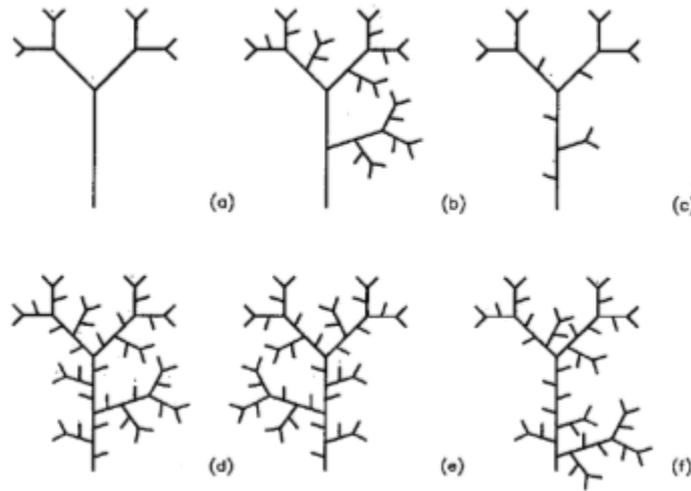


Figure 3.10. Exemples d'arbres autosimilaires d'ordre 4 (Peckham, 1995)

Peckham (1995) fait un parallèle entre les réseaux hydrographiques et les fractales déterministes. Il cherche le motif topologique de base (générateur) qui permet de reconstruire le réseau à partir des rapports de ramification de Tokunaga (1966). De cette manière, l'hypothèse selon laquelle les réseaux hydrographiques peuvent être perçus comme des arbres statistiquement autosimilaires est vérifiée pour un grand nombre de réseaux (Peckham, 1995 ; Peckham, 1999 ; Pelletier et Turcotte, 1999 ; Dodds et Rothman, 1999).

De leur côté, Dodds et Rothman (1999) démontrent l'équivalence entre les lois de Horton concernant les confluences et les longueurs et la loi de Tokunaga dans le cas de paysage dont la densité de drainage est uniforme. Ainsi, l'une ou l'autre des lois peuvent être utilisées pour quantifier ce phénomène d'autosimilarité. En sachant que, pour eux, l'autosimilarité générale du réseau n'est pas affectée si les lois ne sont pas respectées pour les petits ordres. Ces questions des petits ordres (ordres 1 et 2) et du respect de la notion de fractale déterministe stricte réapparaîtront lors de l'estimation et la dénomination des dimensions fractales de réseaux de talwegs en domaine de *badlands* (partie 5).

3.4.4. Les critiques et mises en garde de l'approche fractale

Une des principales critiques des mesures fractales est qu'elles n'intègrent pas d'aspect dynamique, elles restent descriptives et non prédictives (Lebel, 1990 ; Reis, 2006 ; information orale J.M. Grésillon, 2005). La récente *théorie constructale* (Bejan, 1997) décrite dans Reis (2006) se pose en alternative à la vision fractale des objets réels et notamment des réseaux hydrographiques. La liaison entre la géométrie et le fonctionnement dynamique est telle que la géométrie n'est pas

présupposée mais perçue comme le résultat d'une procédure d'optimisation de l'énergie dans le système. A la différence de ce qui est sous-jacent à la théorie fractale, l'autosimilarité n'est pas une hypothèse présupposée mais apparaît comme le résultat d'une construction optimale des réseaux hydrographiques.

Outre ces critiques de la vision de la nature selon le principe fractal, des auteurs comme Meakin *et al.* (2001) mettent en garde devant l'interprétation et surtout la comparaison trop simpliste des valeurs de dimensions fractales. Ce n'est pas parce que l'on a le même résultat final, une même structure que les processus qui ont créé la forme sont les mêmes (Reis, 2006). Ainsi, les valeurs issues de la mesure fractale sur des objets totalement différents ne doivent pas être comparées (Meakin *et al.*, 2001). La comparaison entre la dimension fractale de la côte de Bretagne (Mandelbrot, 1982) et celle de la feuille de fougère (Neill et Murphy, 1993 ; Peitgen *et al.*, 1992 cités dans Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997) n'a pas de sens. Comparer des réseaux hydrographiques ou des reliefs reste un défi raisonnable.

En revanche, contrairement à certaines critiques de Lebel (1990), on retiendra que l'idée d'invariance d'échelle n'est pas incompatible avec l'existence de seuils puisque l'on considère que la continuité dans les motifs n'est valable que sur une certaine gamme d'échelles. Certes, on ne se situe plus dans la fractalité stricte infinie. La détermination de limites inférieures et supérieures pour la mesure de la dimension fractale permet de mettre en évidence une gamme d'échelle sur laquelle l'objet présente une organisation donnée. Cela ne remet pas en question l'existence de niveaux d'organisation hiérarchiques dans le paysage.

Chapitre 4 : De l'importance des échelles spatiales

L'échelle représente une clef pour la lecture du paysage et des processus qui le façonnent, une fenêtre par laquelle chacun choisit de regarder le monde (Marceau, 1999). Toutefois, c'est une notion ambiguë dont la signification et les implications méritent d'être clarifiées puisque les paramètres qui servent à définir la fenêtre d'observation (sa forme, sa taille, ...) influencent directement les résultats de l'observation.

Un premier paragraphe s'intéresse aux sens de l'échelle. Le deuxième s'attache à la structuration du paysage. Enfin le troisième pose certaines questions inhérentes à la vision partielle et orientée que l'on a d'un phénomène du fait des contraintes d'échelle.

4.1. Echelles, résolution, étendue

4.1.1. Echelle cartographique et échelle d'observation

L'acception, la plus simple mais néanmoins primordiale puisqu'elle permet de donner du sens aux représentations, est l'échelle au sens cartographique. Cette dernière est définie comme le rapport entre la taille d'un objet représenté sur une carte et sa taille réelle. Une première confusion possible vient d'une inversion de sens entre l'usage cartographique et l'usage courant des expressions *grandes et petites échelles*. Au sens courant, un phénomène de grande échelle est un phénomène de grande amplitude alors qu'au sens cartographique, une représentation à grande échelle signifie que le rapport d'échelle est grand. En d'autres termes, cela implique que la surface cartographiée est petite mais représentée avec un niveau de détail élevé. Dans ce manuscrit, les expressions *grandes et petites échelles* désignent toujours le sens cartographique.

Depuis quelques décennies, l'avènement des systèmes d'information géographique (SIG) force l'évolution de la notion d'échelle. La cartographie classique associe, à un rapport d'échelle donné, un niveau de détail cohérent. Par exemple, les cartes topographiques de l'IGN au 1/25 000 représentent les courbes de niveaux avec une équidistance de 5 ou 10 m selon les lieux ; ce qui correspond à un niveau de détail normé. En revanche, les SIG n'ont pas d'échelle propre. Le SIG permet de regrouper différentes couches d'informations géographiques qui peuvent posséder des niveaux de détails

différents. C'est à l'opérateur de donner une cohérence d'échelle lors des créations de cartes. L'échelle fait alors référence à la précision du document initial (Puech *et al.*, 2003).

Concernant les observations ou mesure de terrain, on parle souvent d'échelle d'observation ou de vision (à l'échelle du versant, à l'échelle du bassin, à l'échelle de la région). Echelle correspond ici la taille de l'espace sur lequel est effectuée la mesure. Comme pour l'échelle cartographique, plus l'espace considéré est grand, plus (généralement) le niveau de détail d'observation est faible.

4.1.2. Les paramètres d'échelles

L'échelle en tant que fenêtre d'observation dépend de trois paramètres regroupés sous l'expression de triplet d'échelle (Puech *et al.*, 2003). Ces paramètres s'inspirent des trois paramètres qui aident à définir le protocole d'observation dans le cas de mesures expérimentales : la dimension de la mesure (*support*), l'espacement des valeurs observées (*spacing*) et l'extension du domaine d'étude (*extent*) (Figure 4.1). L'amplitude et la variabilité spatiale du phénomène détermine le choix des paramètres d'échelle. La fenêtre d'observation doit permettre de capter toute la variabilité du phénomène hydrologique ou géomorphologique.

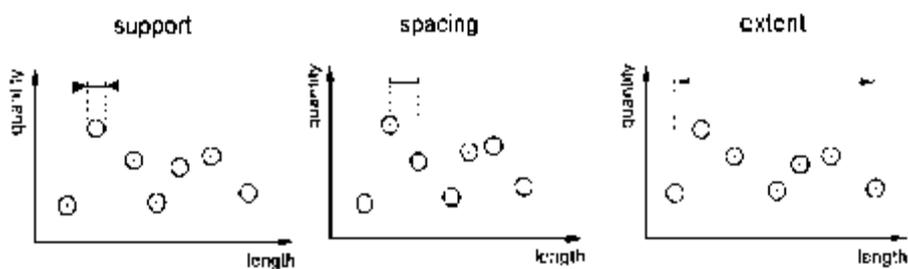


Figure 4.1. Triplet d'échelle dans le cas de mesures expérimentales (d'après Blöschl, 1995 dans Puech, 2003)

Ce schéma d'observation peut être adapté à la représentation numérique du terrain par images ou MNT. Sur une image numérique de type raster, le support de mesure et l'espacement se confondent et sont égaux à la taille du pixel appelée aussi la résolution spatiale de l'image et correspondant au grain élémentaire de vision. Sur MNT, on retrouve la distinction entre support de mesure et espacement dans les données de base avant création éventuelle d'une grille régulière. Le support de mesure correspond à la dimension de la mesure d'altitude ; cette dernière étant différente selon les modes d'acquisition : point d'altitude GPS, pixel en stéréophotogrammétrie, disque dans le cas du LiDAR. Lors du passage à la grille régulière, la résolution spatiale est fixée en

fonction du support et de l'espacement et devient le grain élémentaire d'information. Ainsi, pour l'analyse d'image ou MNT, les paramètres d'échelle à considérer ne sont plus que deux (« doublet d'échelle »): le grain de vision élémentaire, caractérisé par la résolution spatiale et l'étendue. Ces paramètres informent directement sur l'échelle d'observation.

Lorsque l'on se place dans le cadre de la modélisation spatiale qui s'intéresse à des objets de l'espace d'étude, en interrelation les uns avec les autres, il faut rajouter, aux paramètres d'échelle, la taille de l'objet d'étude. Le type et la dimension de l'objet sont déterminants pour identifier le type de processus et de variables à prendre en compte.

4.2. Structuration du paysage morphologique

Parallèlement à ces définitions, il existe des théories de structuration du paysage. On retient deux visions complémentaires de l'espace : la première considère l'espace comme la succession de niveaux d'organisation et se focalise sur la description des différents niveaux ; la seconde assimile l'espace à un système complexe et s'attache au fonctionnement et interactions entre les niveaux.

4.2.1. Le paysage comme succession de niveaux d'organisation

Un schéma théorique décrit par Marceau (1999), le HPDP (*Hierarchical Patch Dynamic Paradigm*) propose une représentation qui permet d'exprimer explicitement les relations entre forme, processus, et échelle dans la description du paysage. Au-delà de la simple vision en feuilleté, cette théorie propose une vision de l'espace correspondant à une superposition de niveaux d'organisation hiérarchiques qui interagissent entre eux. Dans chaque niveau, l'espace est décrit en objets (patches), unités fonctionnelles élémentaires qui sont dépendantes de l'échelle (Marceau, 1999 ; Lebel, 1990 ; Puech *et al.*, 2003).

Les objets de niveau i (pères) sont composés d'éléments correspondant aux objets de niveau $i+1$ (fils) et sont à leur tour éléments d'un niveau supérieur correspondant aux objets de niveaux $i-1$ (grands-pères) (Mering, 1990 cité par Puech, 2000). A chaque niveau d'organisation correspondent des objets, des processus, des paramètres et un vocabulaire pertinents (Lebel, 1990 ; Burel *et al.*, 1992 dans Puech *et al.*, 2003).

Les phénomènes naturels résultent d'une combinaison de différents mécanismes, dont l'importance relative dépend de l'échelle d'observation (Saulnier, 1996 cité par Charleux-Demargne, 2001). En outre, les conclusions obtenues à un niveau hiérarchique, ne sont pas forcément valides pour un autre niveau (McCarthy *et al.* cité par Marceau, 1999).

4.2.2. Le paysage : un système complexe ?

La géographie et les géosciences se sont, par ailleurs, appropriées la théorie de la complexité. Cette théorie, développée par E. Morin, repose sur l'idée forte d'auto-organisation à laquelle est ajouté le concept de structure émergente. L'idée centrale de l'auto-organisation est que le comportement d'un système ne se déduit pas simplement du comportement de ses composantes.

La théorie de l'auto-organisation est issue de la physique qui considère généralement les systèmes à deux échelles ou niveaux : « le niveau microscopique constitué d'un très grand nombre d'éléments en interaction, et le niveau macroscopique où apparaissent des phénomènes collectifs non directement prévisibles à partir de la connaissance des états des éléments microscopiques » (Pumain, 2003). Le concept d'émergence suppose que des éléments organisés qui composent le système créent un ensemble émergent présentant des caractéristiques nouvelles (nouvelles catégories d'éléments, nouvelles structures, ...) (Pumain, 2003 ; Charron, 2006). La compréhension d'un système passe alors par la prise en compte des nombreuses interactions qui existent entre les composantes elles-mêmes (relations horizontales) et entre le système et ses composantes (relations verticales). « Un phénomène se comprend, au moins en partie, par les relations qu'il entretient avec d'autres phénomènes qui s'inscrivent à d'autres échelles : relations de bas en haut mais aussi de haut en bas » (Phillips, 2005 cité par Charron, 2006).

Si l'un des objectifs fondamentaux est d'expliquer et de prédire la manière dont la forme et les processus changent à travers les échelles (Marceau, 1999), les modèles mathématiques fondés sur les concepts de la complexité contribuent théoriquement, par la simulation, à expliquer ces changements.

4.3. Les questions posées par l'échelle : choix d'échelle d'étude et transfert d'échelle

Les deux visions de l'espace (en niveaux d'organisation et selon la théorie de la complexité) se rejoignent notamment sur le fait que l'appréciation d'un phénomène est fortement tributaire du choix de l'échelle d'analyse (Marceau, 1999 ; Charron, 2006). Ce choix implique une observation forcément partielle des phénomènes naturels. De là, émergent un certain nombre de questions dont la première est comment choisir une échelle d'observation pertinente ? Puis un second groupe de questions concerne le passage du local ou global (et inversement), notamment lorsque l'on considère que le tout n'est pas la somme de ses parties (Cambrezy, 1990).

Il existe des échelles d'observation préférentielles pour étudier des phénomènes donnés (Lebel, 1990) et les paramètres d'échelle doivent être adaptés à ce que l'on veut montrer. Toutefois, en pratique, il est parfois difficile de faire le bon choix ; le bon choix étant rarement parfait et unique. De plus, le choix d'une échelle unique pose un problème d'interprétation des formes observées du fait des nombreuses interactions qui existent entre des objets de tailles différentes. Des analyses que l'on qualifiera de « multi-échelles » garantissent une vision, toujours imparfaite, mais plus complète de l'espace. Une solution simple est de multiplier des analyses à différentes échelles.

Le plus souvent, l'observation ou la mesure est menée à une (ou plusieurs) échelle fixe c'est-à-dire à un niveau donné dans le schéma de structuration du paysage (par exemple, à l'échelle du versant ou à l'échelle du bassin). En d'autres termes, on dispose de connaissances de nature discrète d'un paysage où il existe une continuité dans les relations verticales entre les objets. Se pose alors la question délicate du transfert d'échelle : comment transférer à une autre les connaissances obtenues à une échelle donnée ? Et en corollaire : comment certifier une certaine représentativité globale des connaissances obtenues à une échelle locale ?

Compte-tenu de la finesse de la sculpture dans les *badlands*, il faudra des documents images et MNT à forte résolution, celle du mètre en première hypothèse ; il les faudrait à plus haute résolution pour les formes individualisées les plus étroites comme les rigoles et griffures (un à quelques décimètres). La prise en considération de la présence conjointe de formes quasi identiques mais de taille différente conduit à rechercher un mode de mesure (ou d'estimation géométrique) qui traverse les échelles. On s'interrogera sur la perte d'informations essentielles, soit par défaut de documents à haute résolution, soit par insuffisance spatiale de la couverture MNT.

Partie 2

Objectifs et terrain de thèse

Chapitre 5 : Les objectifs de la thèse

Les bassins expérimentaux de Draix (Alpes de Haute-Provence) fournissent, à travers l'ORE Draix-Bléone, un cadre scientifique pour la recherche sur les terrains de *badlands*. Un groupe d'intérêt scientifique (GIS Draix) s'est formé autour de ces bassins marneux fortement disséqués, avec pour objectif la caractérisation de la réponse hydrologique et sédimentaire des hydrosystèmes méditerranéen de montagne aux aléas météorologiques. C'est avec l'appui de ce GIS que le présent travail de thèse a été réalisé, provenant d'une volonté de rapprocher morphologie dynamique et morphométrie numérique et les approches spatialisées des problèmes érosifs et hydrologiques. Ainsi, la thèse s'est déroulée au sein de deux UMR membres du GIS Draix : le laboratoire de géographie physique-UMR 8591 et l'UMR TETIS.

5.1. Problématique

Les secteurs de *badlands* présentent une topographie particulière et d'importants flux solides et liquides y sont observés. Un double enjeu sur ces secteurs est généralement retenu : i) un enjeu de gestion pour prévenir et lutter à court terme contre les crues et laves torrentielles et limiter le comblement des réservoirs et barrages en aval et ii) un enjeu de connaissance théorique du fonctionnement et de la genèse des *badlands* sur du plus long terme.

Les *badlands*, composés de réseaux de ravines, s'organisent en bassins versants dont la dissection est plus ou moins homogène selon les secteurs mais aussi selon les échelles d'observation. Ils constituent des systèmes fonctionnels sur le plan hydrologique mais aussi érosif. La compréhension du fonctionnement de ces bassins passe par l'analyse des non-linéarités éventuelles des processus d'érosion qui y agissent. Cette analyse pose encore question actuellement et des travaux de recherche qui s'appuient sur de nombreuses observations des processus d'érosion tentent d'y répondre.

L'observation des processus d'érosion ne peut que rarement être réalisée directement et leurs mesures sont le plus souvent partielles. La composante spatiale des processus (répartition dans l'espace et aux différentes échelles) est difficile à appréhender. Une réponse est de passer par l'étude des formes du relief pour les identifier et évaluer leurs caractéristiques (vitesse, extension spatiale, rythme, ...). Pour effectuer ce passage entre forme et processus, c'est-à-dire pour relier la variabilité des formes et des processus dans les *badlands*, l'arrivée en continu de nouvelles données spatialisées (images et MNT) ouvre des perspectives insuffisamment explorées jusqu'à présent.

A terme, l'enjeu d'utilisation des données spatiales concerne la modélisation, la compréhension, la comparaison entre les différents secteurs de *badlands*. Cela nécessite au préalable de s'intéresser à la mesure des structures spatiales et la mise en évidence des variabilités spatiales dans les bassins de *badlands* avec la perspective d'explication physique de ces variabilités. Toutefois, avant de se poser la question de savoir si la variabilité des formes traduit le fonctionnement érosif, il faut s'assurer que la mesure de la variabilité des formes est robuste, stable et précise. Cela implique de se donner les moyens de comparer des objets inscrits dans l'espace pour dégager des tendances communes ou au contraire des différences significatives entre les structures spatiales observées. L'utilisation de techniques et méthodes de la géographie physique numérique, c'est-à-dire la géomatique à partir de MNT, images satellites ou photographies aériennes, est un moyen intéressant pour y arriver. Pour être sûr d'obtenir un résultat significatif, il faudra s'assurer que la vision numérique des formes du relief soit bien conforme à la vision naturaliste.

En conclusion, la question principale de ce travail est : comment décrire et comparer des réseaux de ravines à partir de données numériques spatialisées ?

5.2. Les objectifs

Nous cherchons, dans ce travail, des outils pour la description, la modélisation puis pour la compréhension des *badlands*. La construction de ces outils n'est pas évidente et nécessite de passer par des étapes préalables. Avant tout, la description des réseaux de ravines implique une représentation stable et maîtrisée, avec en corollaire, l'évaluation de la conformité entre les objets extraits numériquement et les objets sur le terrain. D'où la première question posée : comment représenter des réseaux de ravines à partir de données numériques spatialisées et vérifier leur conformité avec le terrain ? Pour améliorer les modélisations et la connaissance du fonctionnement érosif des bassins, il faut trouver des descripteurs de réseaux adaptés pour décrire leur structure et capables de mettre en évidence des variabilités spatiales associées au fonctionnement érosif. Toutefois, les réseaux extraits sont dépendants des paramètres d'échelle et l'impact de ces paramètres sur les descripteurs doit être analysé. Ainsi, on se pose la question suivante : comment mesurer la structure spatiale des réseaux à différentes échelles pour, à terme, mettre en évidence des variabilités spatiales et modéliser les *badlands* ? Enfin, on a besoin de mieux comprendre les effets d'échelle sur le réseau pour savoir s'ils peuvent être reliés à la non-linéarité des réponses hydro-sédimentaires des bassins. Pour cela, la théorie fractale propose des outils intéressants et en particulier la dimension fractale qui permet une analyse globale des réseaux. La question est alors de savoir : quel est le potentiel de la dimension fractale, descripteur global, pour une description puis une modélisation des *badlands* s'affranchissant des effets d'échelle ?

Ces trois grandes questions constituent les objectifs de la thèse qui sont :

- Extraire et valider des réseaux de ravines à partir de données numériques spatialisées
- Décrire la structure spatiale de réseaux à différentes échelles par des mesures en lien avec le fonctionnement érosif des *badlands*
- Explorer le potentiel de la dimension fractale pour décrire l'organisation spatiale des réseaux et s'affranchir des effets d'échelle

Pour ces trois objectifs généraux, nous avons définis des objectifs spécifiques.

5.2.1. Extraction et validation des réseaux de ravines

Les MNT constituent, par définition, un document adapté pour extraire des formes du relief ainsi, nous nous concentrons sur ce type de données numériques. Pour extraire des réseaux de ravines, nous avons fixé une hypothèse forte selon laquelle les réseaux de ravines peuvent être schématisés par le réseau de des talwegs associés. Ainsi, la question qui se pose est : comment extraire des réseaux de talwegs réellement associés à des formes du relief à partir de MNT ? Les méthodes proposées dans la littérature sont insuffisantes pour représenter un réseau stable puisque la définition objective de la limite amont des réseaux reste une question d'actualité. Nous cherchons donc à mettre en place une méthode d'extraction de réseau de talwegs à partir du MNT qui permettent une représentation significative du point de vue morphologique.

La validation de ces réseaux est nécessaire pour pouvoir maîtriser la performance de l'extraction, depuis les branches principales jusqu'aux drains-sources. Ainsi, on se demande comment évaluer la qualité des réseaux extraits et les valider. L'objectif suivant est donc de proposer une méthode de comparaison des réseaux qui permette de quantifier les erreurs d'extraction par niveaux hiérarchiques pour juger de la qualité de l'extraction.

5.2.2. Description de la structure spatiale des réseaux à différentes échelles

Pour décrire et caractériser des réseaux, un grand nombre de descripteurs existe dans la littérature. Les descripteurs que l'on qualifie de locaux permettent une caractérisation de chaque élément du réseau (*e.g.* drain ou tronçon) et de son environnement qui s'avère intéressante pour l'analyse de la structure spatiale des réseaux de ravines et l'agencement des formes les unes par rapports aux autres. Il s'agit alors de savoir quels descripteurs numériques peuvent être extraits du

MNT pour, à terme, servir dans des modélisations et des comparaisons de *badlands* ? Toutefois, au préalable, il faudra s'intéresser aux choix et méthodes d'extraction des descripteurs et au passage possible des descripteurs numériques à des descripteurs thématiques en lien avec les formes rencontrées dans les *badlands*. Le plus souvent, les réseaux cartographiés sont des représentations géographiques en mode vecteur. Pour l'analyse des descripteurs locaux, nous passerons des réseaux vectorisés à des représentations abstraites sous forme de graphes. Concernant l'analyse des résultats, nous nous demandons ensuite quel est l'impact de la résolution sur les réseaux et leur structure topologique et géométrique. Pour répondre à cette question, l'objectif est de réaliser une analyse spatiale des descripteurs à différentes résolutions et d'observer les variations. De plus, les réseaux de ravines des *badlands* montrent une forte hiérarchisation des formes d'érosion. Ainsi, on va chercher à utiliser la hiérarchie des éléments des réseaux pour affiner leur description. La question posée est de savoir s'il est possible de retrouver la hiérarchie des formes observées de manière naturalistes à partir de la connaissance numériques des éléments du réseau.

5.2.3. Exploration du potentiel de la dimension fractale pour une description globale des réseaux s'affranchissant de l'échelle

Si le potentiel théorique des propriétés fractales pour formaliser des relations multi-scalaires est connu, l'application à des objets de la nature et l'utilisation que l'on peut en faire sont moins claires. Des travaux antérieurs montrent que les réseaux hydrographiques possèdent des propriétés fractales, à savoir une autosimilarité. Toutefois, la transposition des théories fondées sur des principes mathématiques à des objets de la nature n'est pas évidente. Et, nous nous posons la question des conditions d'utilisation de la dimension fractale. L'intégration de ce descripteur global à une analyse sur l'organisation spatiale du réseau nécessite de bien comprendre son sens et les informations que l'on peut en extraire. D'où la question : quelles sont les comparaisons possibles et significatives entre les dimensions ? On cherchera à savoir si la dimension fractale est performante pour différencier des bassins et surtout si elle permet de dépasser des variations dues à l'échelle. Pour d'autres objets de la nature, la fractalité démontrée et caractérisée des objets peut ouvrir des pistes pour des modélisations physiques. Plus précisément, on se demandera si l'approche fractale permet de mieux comprendre le fonctionnement global des bassins.

5.3. Hypothèses

5.3.1. Hypothèse de simplification du relief de *badlands*

Notre principale hypothèse est que les réseaux de ravines peuvent être schématisés par l'ensemble des talwegs associés eux-mêmes organisés en réseaux. Les *badlands* sont alors représentés par un ensemble de linéaires sans épaisseur ayant une structure arborescente. Cette représentation est cartographiable ; tous les éléments, tronçons et confluences, ont un positionnement géographique.

5.3.2. Hypothèse de continuité et connexité des réseaux

Nous faisons également l'hypothèse que le réseau des talwegs est continu. Cette continuité dans la représentation du réseau repose sur l'idée que l'ensemble des objets, résultat de l'érosion dans un même bassin, sont susceptibles d'être reliés par l'écoulement des eaux à un moment donné dans l'année. Dans les secteurs de *badlands*, la connectivité des écoulements et du transport des sédiments existe mais elle est fortement dépendante des échelles spatiales et temporelles.

5.3.3. Hypothèse d'abstraction des réseaux

La dernière hypothèse de travail concerne l'abstraction des réseaux de talwegs c'est-à-dire de le passage d'un réseau géographique, cartographiable à une représentation abstraite sous forme de graphe. Cette représentation oublie la géométrie et repose sur les relations entre les éléments du réseau (nœuds et tronçons). Les informations spatiales sont réintroduites grâce à l'association de descripteurs. Le graphe est constitué d'un ensemble de sommets et d'arêtes auxquels sont attribuées les valeurs de descripteurs. De plus, on considère que les réseaux dans le cas des *badlands* sont arborescents : chaque arête est orientée d'un sommet amont vers un sommet aval et chaque sommet est l'amont d'une seule arête, excepté pour la racine (représentation de l'exutoire dans le graphe) ; il n'y a donc pas de boucle.

5.4. Plan de thèse

Après la partie 1 qui a présenté la bibliographie et la partie 2 définissant objectifs et terrain, le cœur véritable de la thèse va être abordé dans les parties qui suivent. Sous hypothèse que les *badlands* peuvent être schématisés par des arborescences qui représentent des réseaux de talwegs continus, on va aborder en partie 3 l'extraction de réseaux de talwegs à partir de MNT en prenant en compte les concavités du relief modélisées (chapitre 7) puis leur validation fondée sur une comparaison d'arborescences (chapitre 8). La partie 4 portera sur les descripteurs numériques locaux de réseaux, leur choix, leur extraction, leur analyse hiérarchisée (chapitre 9) puis au passage de descripteurs numériques vers une classification des éléments du réseau en objets morphologiques (chapitre 10). Enfin la partie 5 traitera de la description globale des réseaux à partir des dimensions fractales avec une focalisation sur la signification, l'estimation et la robustesse des résultats de dimensions fractales de réseaux vectoriels simulés (chapitre 11) puis une application aux cas réels (chapitre 12).

Cette thèse s'appuie sur les travaux (articles et présentations à des colloques) dont on trouve une synthèse dans le Tableau 5.1.

Liste de publications et communications

Articles :

Thommeret N., Bailly J.S., Puech C. (2010), On the extraction of thalwegs network from DTM: application to badlands, *Hydrology and Earth System Science*, 7, 879-905.

Thommeret N. et Puech C. (2010), Réseaux de talwegs en secteurs érodés : de la détection spatiale à l'analyse fractale, *Revue Internationale de Géomatique*, 20 : 2, 201-219.

Puech C., Thommeret N., Kaiser B., Bailly J.S., Jacome A., Rey F., Mathys N. (2009), MNT à très haute résolution dans les modelés fortement disséqués : des données aux tests d'application, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, (2), 141-152.

Communications orales avec actes :

Thommeret N., Bailly J.S., Puech C. (2011), A hierarchical graph matching method to assess accuracy of network extraction from DTM, *Geomorphometry 2011*, Université de Redlands, Redlands, Californie, 7-11 septembre 2011.

Thommeret N., Bailly J.S., Puech C. (2009), Robust Extraction of Thalwegs Networks from DTMs for Topological Characterisation: A Case Study on Badlands, *Geomorphometry 2009*, Université de Zurich, 29 août – 02 septembre 2009.

Thommeret N. et Puech C. (2008), Réseau de talwegs en zones érodées, de la détection spatiale à l'analyse fractale, *Colloque SAGEO*, Montpellier, 25-27 juin 2008.

Communications orales sans actes :

Thommeret N. (2011), Evaluation de l'extraction de réseaux de talwegs à partir de MNT : application aux badlands, *Journées des Jeunes Géomorphologues*, Université d'Avignon, 3 – 5 février 2011.

De Belizal E., Chabrol A., Pavlova I., Thommeret N. (2010), Conception et pratique du terrain en géographie physique : approche comparative, *Forum des Doctorants de l'Ecole Doctorale de Géographie de Paris*, Institut de Géographie, 16 avril 2010.

Thommeret N. (2008), Réseaux de ravines en secteurs de badlands. De la détection à l'analyse spatiale, *Séminaire du programme « Dynamiques des Paysages, Erosion et Développement Durable dans les Montagnes Méditerranéennes »*, Paris, 30 octobre 2008.

Thommeret N. (2008), Ravine et réseau de ravines en paysage de badlands: de l'objet banal à l'objet fractal, *Forum des Doctorants de l'Ecole Doctorale de Géographie de Paris*, Institut de Géographie, 4 avril 2008.

Tableau 5.1. Liste des travaux réalisés au cours de la thèse

Chapitre 6 : Sites retenus et données disponibles

6.1. Les bassins versants expérimentaux de Draix

6.1.1. Localisation des bassins marneux de Draix et principales caractéristiques physiques

De nombreuses topographies de *badlands*, de quelques hectares à quelques kilomètres carrés de superficie projetée, ont été modélées dans les secteurs marneux du bassin versant de la moyenne Durance. Parmi ces secteurs, les bassins de Draix se situent au nord-est de Digne-les-Bains (département des Alpes de Haute-Provence), drainés par des rivières torrentielles qui se jettent dans le Bouinenc, affluent de rive gauche de la Bléone, elle-même affluent de la Durance (Figure 6.1 ; Figure 6.2).

Entre 800 et 1260 m d'altitude, cinq bassins sont actuellement équipés (Richard, Mathys, 1999) : la Roubine, le Moulin, le Laval, le Brusquet et réintégré depuis quelques années, le Francon (Tableau 6.1). Ces bassins expérimentaux se situent dans le bassin du Bouinenc (39 km²), plus hétérogène en termes de morphologie et d'occupation du sol. Parmi les cinq bassins, nous nous intéressons plus particulièrement au Moulin, qui se situe entre 850 et 980 m d'altitude environ, et au Laval, approximativement entre 850 et 1235 m d'altitude.

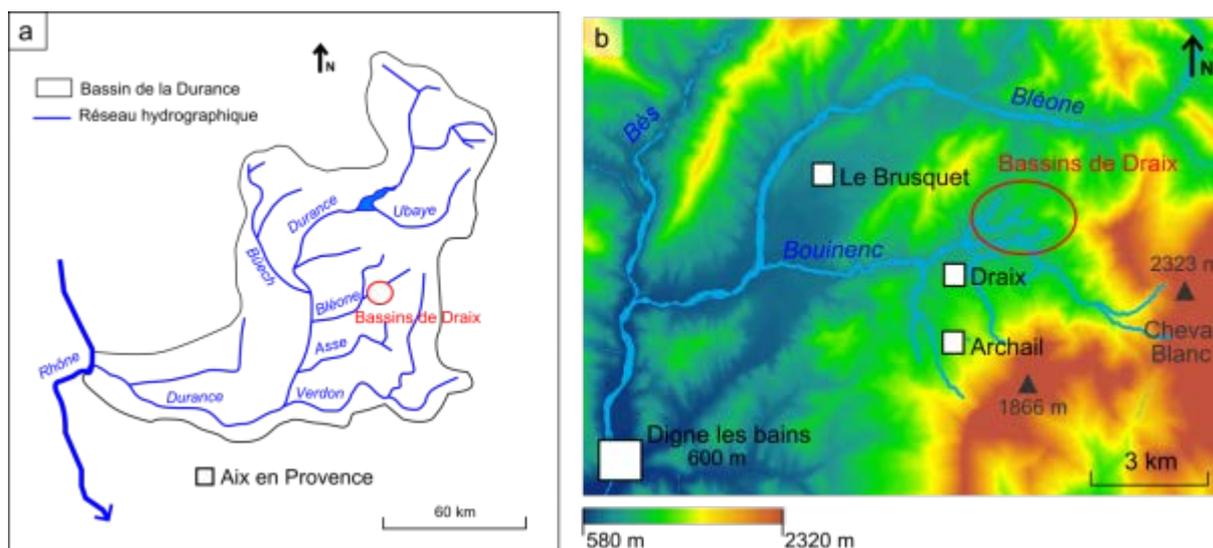


Figure 6.1. Localisation des bassins de Draix dans le bassin de la Durance (a) et contexte topographique (b) (Sources : a. modifié de Mathys, 2006 ; b. données issues de la BD Topo, IGN)

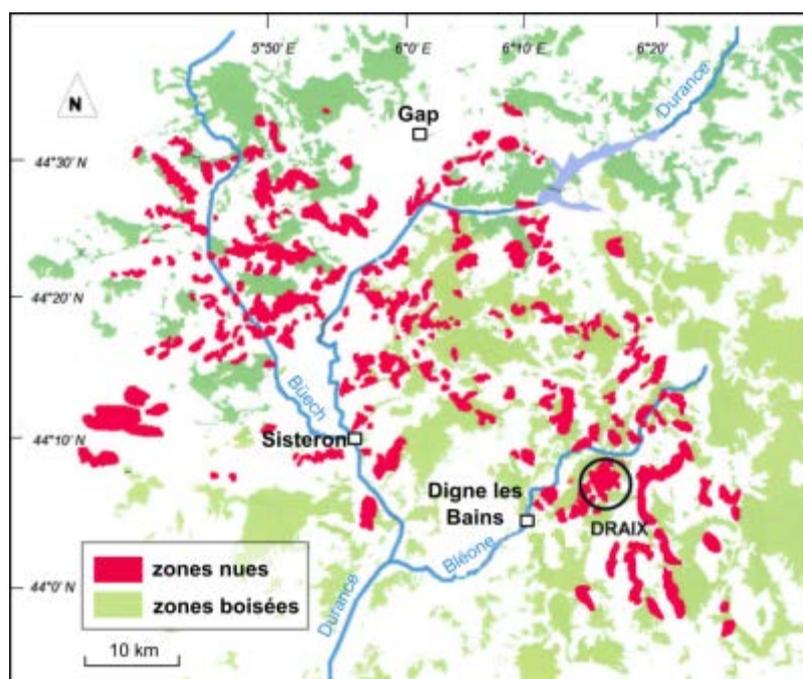


Figure 6.2. Localisation des zones de marnes en moyenne Durance et des sites de Draix (Puech et al., 2009)

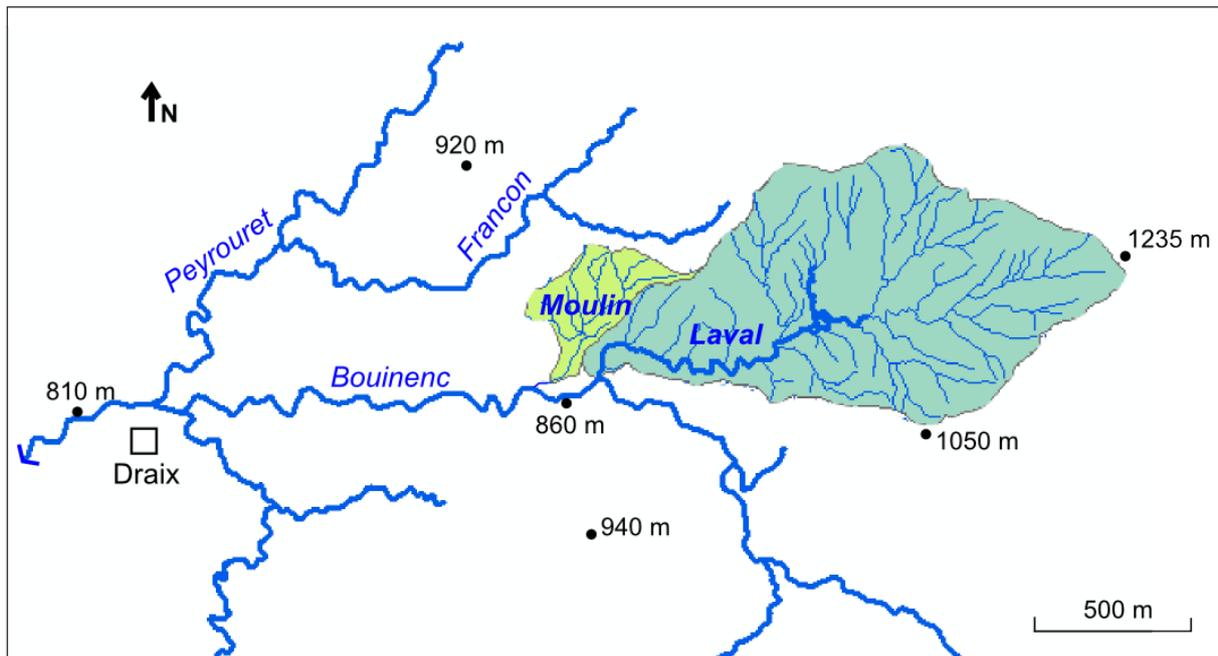


Figure 6.3. Carte de localisation des bassins du Moulin et du Laval (Source : réseau hydrographique – BD Topo, IGN ; limites de bassins – SIG Draix)

	Surface en ha	Taux de terrain nu en %	Pente moyenne en %
Laval	86	68	58
Brusquet	108	13	53
Moulin	8	54	30
Roubine	0.133	79	75
Francon	73	44	41

Tableau 6.1. Principales caractéristiques physiques des bassins gérés par le Cemagref (Annuaire de l'ORE Draix, 2003). Ce sont des valeurs indicatives obtenues à moyenne échelle.

6.1.2. L'ORE Draix : un laboratoire de terrain

Les bassins versants représentatifs et expérimentaux de Draix (BVRE) ont été créés dans les années 1983-84 par l'action conjointe des services de Restauration des terrains en montagne (RTM) et du Cemagref. La mise en place de ce dispositif a abouti à la création d'un véritable laboratoire de terrain, pour l'observation et la compréhension du phénomène d'érosion torrentielle, toujours dans un but d'application.

Depuis 2000, ils sont gérés par le Cemagref et accueillent un Groupement d'Intérêt Scientifique (GIS) « GIS Draix, étude de l'érosion en montagne » qui regroupe 13 équipes partenaires dont le LGP-UMR 8591 et l'UMR TETIS. En 2002, ils reçoivent le label d'Observatoire de Recherche en Environnement « *ORE Draix : Observatoire de recherche sur les processus hydrologiques érosifs en montagne* » (Cemagref Grenoble, GIS Draix, ORE Draix, 2002). Aujourd'hui, le domaine d'étude a été étendu au bassin de la Bléone et prend le nom d'ORE Draix-Bléone.

Ces bassins constituent un laboratoire de terrain, de par les nombreuses équipes qui étudient leur fonctionnement hydrologique et érosif, et de par leur considérable instrumentation permettant la mesure des pluies, des débits et des transports solides par charriage ou en suspension en sortie des bassins.

6.1.3. Spécificité des *badlands* de Draix et des mesures qui y sont effectuées

En regard des caractères décrits dans la partie introductive (chapitre 1), les *badlands* de Draix présentent quelques traits spécifiques et les mesures qui y sont conduites ont un intérêt particulier pour notre recherche. Nous retenons les points suivants, certains étant détaillés plus loin :

- des *badlands* organisés en bassins dotés d'une artère principale à écoulement permanent ou semi permanent ;
- des terrains assez largement couverts de végétation (quoique inégalement répartie selon les types de versants), avec un recru spontané de feuillus ou de résineux ;
- des modelés arrondis en haut de versant et des parties basses souvent raidies par une érosion active (actuelle) dans les chenaux ;
- une compétition spatiale actuelle entre états de biostasie et de rhexistasie (selon la terminologie de Erhart, 1956), voire une alternance entre eux sur le temps long de l'évolution des formes et des contextes climatiques ;
- une ablation élevée et un transport de matière important attestés par des observations et des mesures nombreuses ; ces dernières permettant de mettre en évidence, outre le caractère spasmodique saisonnier déjà connu du fonctionnement, le rôle érosif déterminant d'événements pluviométriques et hydrologiques individuels, y compris dans les lits.

Ce dernier point conforte notre choix d'avoir privilégié la description – et la connaissance – des *badlands* à partir du réseau des talwegs. Ce choix n'était pas évident compte-tenu de l'importance surfacique et de l'attrait visuel des versants en géomorphologie.

6.2. Morphologie des *badlands* de Draix

6.2.1. Caractères morphologiques et géologiques

Les *badlands* de Draix occupent une dépression marneuse, entre des crêtes et des sommets isolés qui la dominent d'environ 600 m. Ils sont structurés en bassins versants par opposition aux rebords de plateau d'autres régions du monde. Leur morphologie présente des ravines nombreuses, denses et hiérarchisées, comptant peu de crêtes très aigües (Figure 6.4). Par ailleurs, ces bassins ont la particularité d'inclure des surfaces planes végétalisées.

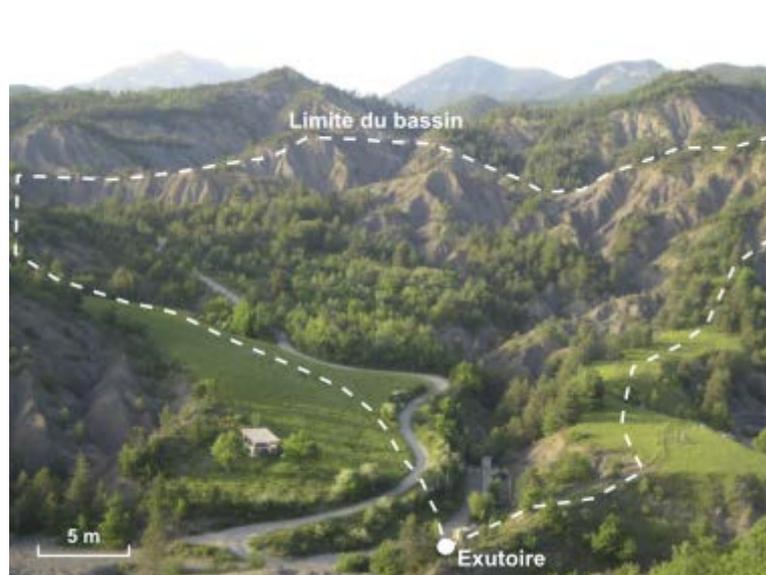


Figure 6.4. Le Moulin : bassin versant raviné (Cliché : N. Thommeret, mai 2009). Les limites approximatives du bassin sont tracées en blanc. Les sommets marneux du deuxième plan appartiennent au bassin du Francon. A l'arrière-plan sont visibles les reliefs structuraux calcaires.

Les bassins de Draix appartiennent aux Préalpes de Digne (massifs externes des Alpes du Sud) et à la nappe de Digne sur le plan structural (Haccard *et al.*, 1989).

Le contexte lithologique, alternant marnes et calcaires, a favorisé l'érosion différentielle, dégagant des crêtes calcaires séparées par des dépressions marneuses (Haccard *et al.*, 1989). La

dissection de ces formations marneuses, d'une épaisseur d'environ 1500 m, forment des paysages de *badlands*. Les bassins de Draix se situent dans les marnes noires, principalement sur les *Terres Noires* du Jurassique supérieur (Antoine *et al.*, 1995).

Les *Terres Noires* présentent une grande sensibilité à l'érosion (Brochot, 1999). On connaît l'effet des teneurs en calcaire de la marne sur la cohésion de la roche. Dans le bassin du Laval, Coulmeau (1987) observe des différences dans l'organisation des réseaux de ravines en fonction de la structure : en situation de pente conforme au pendage, le réseau observé est de type dendritique ; en situation de pendage inverse, les réseaux sont de type parallèle.

6.2.2. Formes d'érosion et objets morphologiques

Dans ces terrains relativement homogènes du point de vue lithologique, l'érosion donne naissance à des formes d'érosion. Ces formes permettent d'individualiser ce que l'on appellera des objets morphologiques.

6.2.2.1. Deux types d'objets identifiés par Coulmeau (1987)

Les observations de terrain de Coulmeau (1987) réalisées dans les *badlands* de Draix aboutissent à la création de deux catégories d'objets morphologiques : ravine (*gully*) et rigole (*rill*). Ces objets se distinguent par leur morphologie et leur fonctionnement résumés Tableau 6.2. Les rigoles sont menues et leur pente longitudinale est la même que celle du versant dans lequel elles s'inscrivent. Elles sont très dépendantes des événements pluvieux actuels : leur existence peut n'être que saisonnière et leur forme évolue au cours d'un événement. Les ravines sont plus larges et plus profondes, et la pente longitudinale de leur talweg associé est plus faible que celle des versants. Notons que les versants sont ceux de la ravine elle-même qui bordent le talweg. Le rapport entre la pente longitudinale et la pente des versants est un critère de terrain possible pour distinguer les deux objets. Ce critère est-il transposable aux représentations numériques du terrain ?

La transition entre les objets morphologiques est progressive, ce qui implique, Poesen *et al.* (2003), que toute classification est subjective.

	Ravines	Rigoles
Durée	Permanententes	Saisonnnières
Profil en long	La pente du talweg est différente de celle du versant.	La pente du talweg est parallèle à celle du versant dans lequel s'inscrit la rigole.
Profil en travers	En V	En U
Dimensions	Longueur	Plurimétrique
	Largeur	Décimétrique

Tableau 6.2. Principales caractéristiques morphologiques et fonctionnelles des ravines et rigoles (Coulmeau, 1987). Les profils sont indiqués pour des échelles de représentation adaptées à la taille des objets et qui ne sont pas les mêmes

6.2.2.2. Hiérarchie proposée et implications en termes d'échelle

Les réseaux de ravines sont constitués d'objets morphologiques linéaire de taille variable et emboîtés qui ne peuvent pas toujours être appréhendés aux mêmes échelles ou niveaux de perception, allant de la vallée jusqu'aux griffures d'érosion sur les versants (Figure 6.5). Dans l'espace 3D, ils sont caractérisés par leur longueur, leur largeur et leur profondeur. En planimétrie, on suppose que la largeur est un critère pertinent pour discriminer et classer les objets. La classification proposée (Tableau 6.3) présente les largeurs, mesurées crêtes à crêtes, associées aux différents objets et les résolutions à partir desquelles on peut détecter ces objets sur des documents spatiaux numériques.

Types d'objets linéaires	Largeur in situ	Taille minimale de pixel nécessaire pour la détection
Vallée	de 1 à qq km	100 à 200 m
Ravin – vallon	de 1 à qq hm	10 à 20 m
Ravine	de 1 à qq dam	1 à 2 m
Ravine élémentaire	de 1 à qq m	10 à 20 cm
Rigole	de 1 à qq dm	1 à 10 cm
Griffures	< 1 dm	1 à 2 cm

Tableau 6.3. Classification des objets morphologiques selon leur largeur et MNT permettant de les appréhender (Puech et al., 2009). Les tailles minimales de pixel sont données d'un point de vue théorique lié au rapport taille de l'objet / taille du pixel.

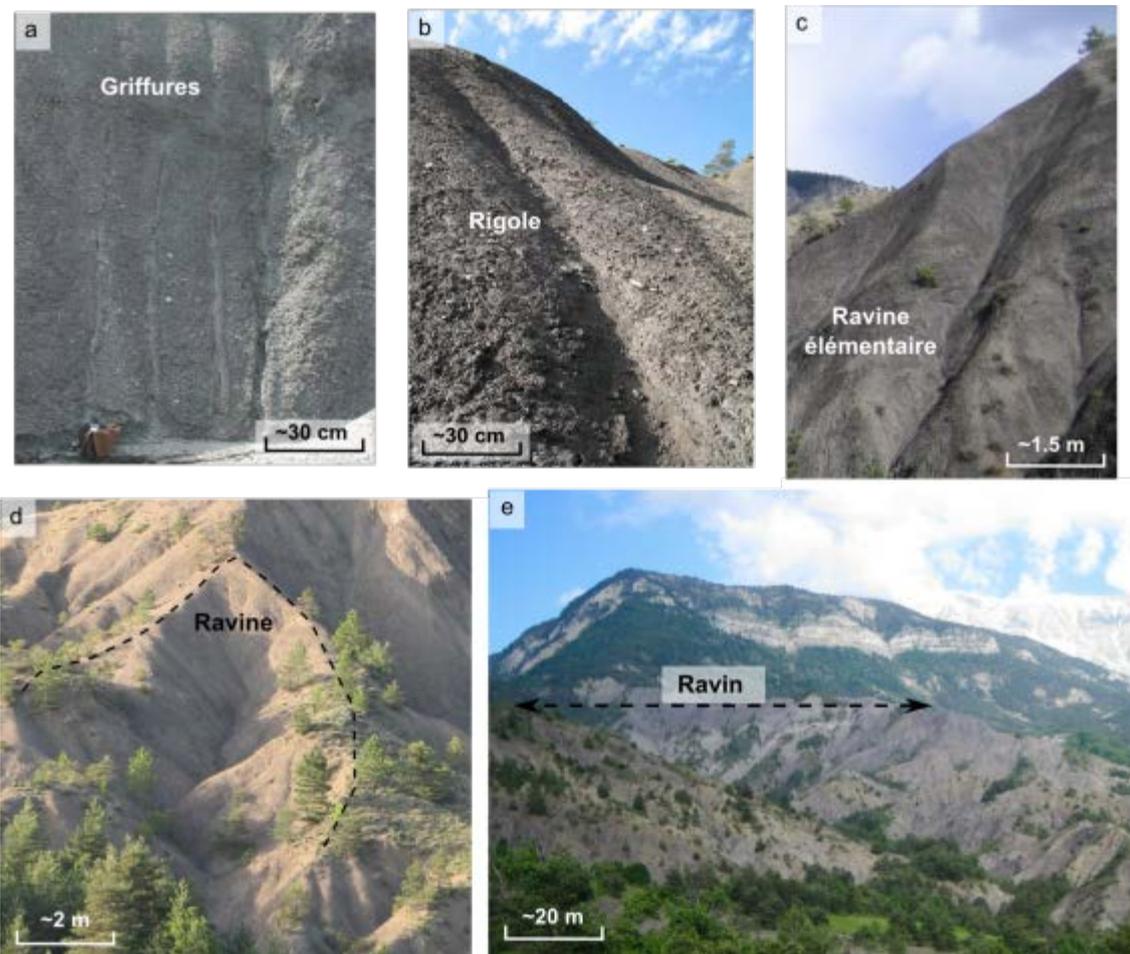


Figure 6.5. Les objets morphologiques dans les badlands de Draix : a. Griffures creusées par les premiers orages estivaux et mini-coulées de débris associées (Cliché extrait de Mathys, 2006) ; b. Rigole pouvant être temporaire, creusée dans le régolithe à l'amont du Moulin (Cliché : B. Kaiser, mai 2009) ; c. Ravine élémentaire inscrite dans la roche en place dans le bassin du Laval (Cliché : N. Thommeret, avril 2006) ; d. Ravine correspondant à un sous-bassin du Moulin (Cliché : C. Puech, mai 2009) ; e. Ravin ou vallon du Laval (Cliché : N. Thommeret, mai 2009)

Notons que la vision par les documents spatiaux numériques est fixée par le domaine et la résolution alors que la vision de terrain permet d'aller au-delà de ces paramètres d'échelle et d'avoir une vision globale, que l'on pourrait qualifier de multi-échelle.

6.2.3. Une évolution sur le temps long

La formation des *badlands* de Draix en particulier pose encore question, même si le travail de Jean Louis Ballais (1996) a permis de dater certaines ravines et propose un scénario de développement.

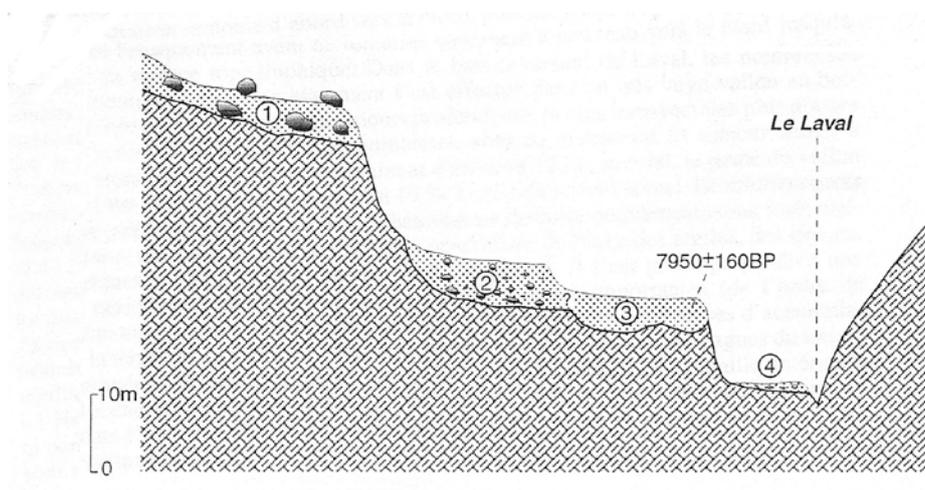


Figure 6.6. Coupe synthétique de la vallée du Laval à Draix : 1. glacis ou terrasse, riche en gros blocs, du Pléistocène moyen (?); 2. terrasse du Pléistocène supérieur; 3. remblaiement holocène principal; 4. terrasse historique (Ballais, 1996).

L'évolution des ravines postérieures au Pléistocène supérieur a été étudiée à partir de datation au ^{14}C de restes de pins (*Pinus*) fossilisés. L'auteur met en évidence plusieurs phases de ravinement, qu'il résume de la manière suivante (Figure 6.6): « [les] vallons creusés par les écoulements du Tardiglaciaire et de l'Holocène inférieur ont des profils en travers en berceau. Ils ont été ensuite comblés par le remblaiement holocène principal qui fossilise des troncs de *Pinus* datés au ^{14}C de 8 860 +/- 70 B.P., 8010 +/- 80 B.P. et 7950 +/- 160 B.P. ». L'entaille en V des fonds de ravine, visible actuellement, serait plus récente et correspondrait à l'exploitation des terres de cette région par les premières sociétés agro-pastorale et à celle du Petit Age Glaciaire. D'après Cécile Miramont (1998; 2000), la dernière phase de crise érosive s'étend globalement de la fin du Moyen Age jusqu'à la fin du XIX^{ème} siècle. Elle aurait pour origine dominante la dégradation climatique.

6.3. Climat méditerranéen d'altitude et crues rapides

6.3.1. Caractéristiques climatiques

Les bassins de Draix présentent les caractéristiques d'un climat méditerranéen d'altitude. Le climat méditerranéen est caractérisé par un été chaud et sec et des maxima de pluies au printemps et à l'automne. En moyenne pluriannuelle, les bassins de Draix ne présentent pas d'été sec (au sens de Gaussen $P < 2T$, avec P en cm et T en °C), même un tel été peut advenir une année particulière. Ceci s'explique par l'effet de l'altitude qui abaisse les températures et augmente les précipitations, notamment sous la forme d'orages estivaux.

Les données de températures et de précipitations présentées sont celles enregistrées à la station climatologique du Laval (alt. 870 m). Les températures à la station du Laval (alt. 870 m) ne sont mesurées que depuis mai 2000. On ne dispose donc que d'une courte période de référence (dix ans).

Les températures moyennes mensuelles au Laval (sur la période 2001-2009) indiquent des chaleurs estivales mais qui restent inférieures à 20°C (juin, juillet, août). D'autre part, les hivers sont froids (températures moyennes inférieures à 5°C en décembre, janvier, février). Les bassins connaissent le gel tous les ans entre décembre et mars. L'analyse des températures journalières minimales et maximales à la station du Laval permettent de conclure à l'existence, chaque hiver, de nombreuses alternances de gel et dégel. Entre 2000 et 2004, il y a eu environ 100 jours où l'on a observé une température minimale négative et une température maximale positive. Par contre, le gel continu sur 24h ou plus est exceptionnel (Mathys, 2006). Notons toutefois que les alternances autour de 0°C dans l'atmosphère sous abri peuvent ne pas se retrouver dans le sol nu au-delà des 2 ou 3 cm superficiels. Le total pluviométrique annuel moyen sur la période 1985-2009, pour le Laval, est de 918 mm. La répartition des pluies mensuelles révèle deux maxima pluviométriques : le premier au printemps et le deuxième en automne (Figure 6.7).

L'observation des pluies journalières montre qu'en moyenne, sur la période 1985-2005, il y a 5 jours avec des pluies supérieures à 30 mm.

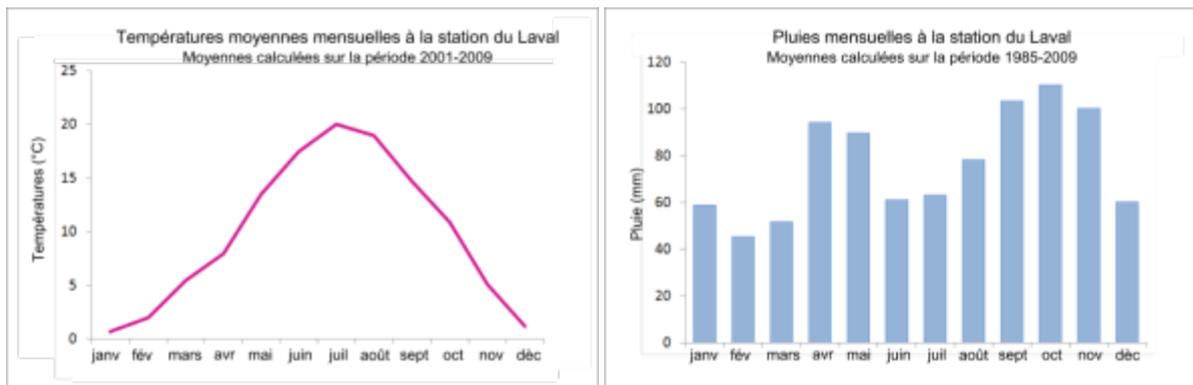


Figure 6.7. Répartition annuelle des températures moyennes mensuelles à la station du Laval sur la période 2001-2009 (à gauche) ; Répartition annuelle des pluies mensuelles à la station du Laval sur la période 1985-2009 (à droite) ; (Source : ORE Draix)

« La Figure 6.8] représente la fraction des précipitations mensuelles tombées au-delà de deux seuils d'intensité (5 et 15 mm/h). On peut constater que la répartition des fractions intenses est différente de celle des cumuls de pluie. Au seuil de 5 mm/h, les deux maxima de printemps et d'automne persistent mais le creux de juillet-août est fortement atténué. Au seuil de 15 mm/h, seuls les mois de mai à octobre montrent un cumul qui dépasse 10 mm et le maximum est observé au mois d'aout » (Mathys, 2006).

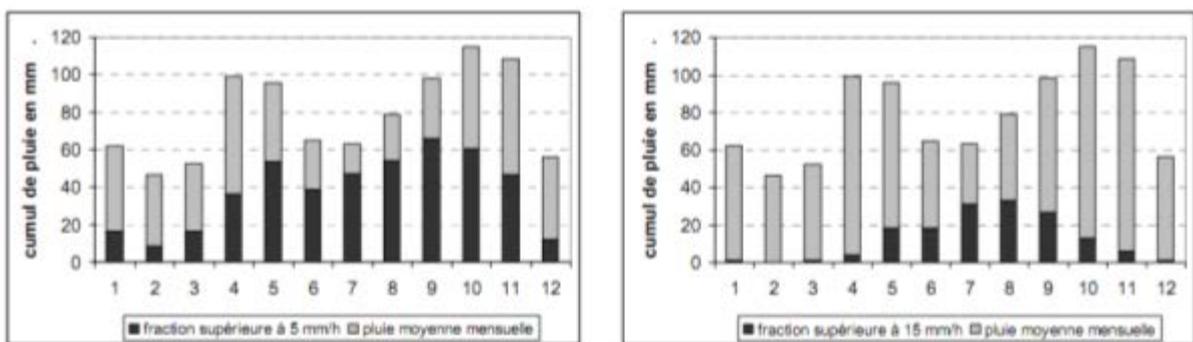


Figure 6.8. Répartition mensuelle des pluies tombant au-dessus d'un seuil d'intensité instantanée (Station du Laval, période 1985-2003 ; Mathys, 2006)

Les données climatiques montrent les spécificités de la dualité climatique : sécheresse estivale relative, entrecoupée d'averses orageuses se poursuivant jusqu'à l'automne et connaissant de nombreuses alternances gel/dégel en hiver, suivies de pluies printanières pouvant être de forte intensité. En conclusion, les bassins connaissent un fonctionnement saisonnier très contrasté marqué par des événements pluvieux de fortes intensités au printemps et à l'automne ; ces

événements ayant un fort pouvoir érosif. Notons qu'il existe une forte variabilité intra et interannuelle des précipitations.

6.3.2. Hydrologie et érosion

Du fait de la situation géographique de moyenne montagne méditerranéenne, les écoulements dans les chenaux à Draix alternent très faibles débits et crues soudaines (Mathys, 2006). A titre d'exemple, la crue du Laval du 5 juin 2003 a connu un débit de pointe de $11 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et a engendré une érosion totale de 4700 tonnes que l'on peut traduire par une ablation moyenne de 2 mm de roche saine sur l'ensemble du bassin (86 ha), ou 4 mm environ de roche altérée. L'épisode fut marqué par 31 mm de pluies ; ORE Draix ; Figure 6.9). La crue des 4 et 5 août 2004 constitue l'un des épisodes majeurs de l'année pour le Moulin, avec des précipitations de 55.1 et 36.3 mm et des débits de pointe respectifs de 0.80 et $0.49 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (valeurs de crue couramment enregistrées sur ce bassin de 8 ha environ). Le tonnage exporté pendant cet épisode correspond à une ablation de 3.1 mm de marne saine (Annuaire ORE Draix 2004) ; soit quelque 6 mm de marne altérée, valeur de l'ablation moyenne interannuelle mesurée sur versants dénudés dans ce bassin (Corona *et al.*, 2011). D'après les mesures de 2004 l'épisode des 4 et 5 août représente près de la moitié de la charge solide de l'année. Reste à s'interroger sur sa provenance : versants et lits fluviaux ?



Figure 6.9. Déversement au barrage de la plage de dépôt à l'exutoire du Laval lors de la crue du 5 juin 2003 (Cliché : N. Mathys)

Richard et Mathys (1999) synthétisent dix ans de suivi de l'érosion dans les bassins de Draix, où l'érosion et les transports solides sont particulièrement importants. Les dépôts mesurés dans les plages de dépôt à l'exutoire des bassins sont très variables d'une crue à l'autre fonction de la saison, de l'érosivité des pluies, de la quantité de matériaux mobilisables, du débit et de la durée de la crue :

au Laval, on a pu mesurer à plusieurs reprises, des volumes de plus de 500 m³ pour un épisode. Les auteurs remarquent que des crues modestes peuvent produire des dépôts plus importants que certains orages violents mais brefs. Les concentrations mesurées dans les préleveurs sont élevées ; les plus fortes étant mesurées au Laval (couramment supérieures à 300 g.l⁻¹ et l'on a obtenu jusqu'à 800 g.l⁻¹). Au Moulin comme au Laval, environ 60 % des crues ont une concentration maximale supérieure à 100 g.l⁻¹, alors qu'à la Roubine (1300 m²), seulement 20 % des crues dépassent ce seuil et la concentration maximale observée reste inférieure à 300 g.l⁻¹.

Des bilans d'ablation annuels ont été calculés à partir du dépôt annuel et de la charge transitée annuelle. Ils montrent une importante érosion, puisque les moyennes annuelles de dégradation spécifique, rapportées à la surface dénudée, se situent entre 110 et 190 t.ha⁻¹.an⁻¹, soit une ablation équivalente de la marne altérée de 8 à 15 mm.an⁻¹. On note également une forte variabilité interannuelle.

Depuis 2007, un dispositif de suivi de l'érosion et du dépôt dans les lits est en place, destiné à établir la variation du stock sédimentaire et à quantifier indirectement la recharge par les versants. Liébault *et al.* (2010) présentent deux épisodes de crues de l'automne 2007 (en septembre et novembre). Grâce aux dispositifs de mesure (sur plusieurs dizaines de transects avec « chaînes enfouies »), les auteurs montrent l'origine possible du volume de sédiments mesuré sur la plage de dépôt en sortie du Moulin : un plus fort prélèvement des réserves sédimentaires dans les lits est observé en novembre, s'expliquant par un volume écoulé plus important lié à la durée (deux jours) de l'événement pluvio-hydrologique (l'intensité maximale des pluies au pas de temps 5 minutes ne dépassant pas 14.4 mm.h⁻¹ ; l'apport des versants a été reconstitué comme négligeable). L'épisode de septembre, aux précipitations brèves mais intenses (45,6 mm.h⁻¹ au pas de temps 5 minutes) se serait traduit par un apport notable depuis les versants dans le lit – phénomène de recharge sédimentaire.

6.4. Végétation

Les bassins de Draix se situent dans la série du chêne pubescent du secteur préalpin méridional dont les espèces caractéristiques sont le chêne pubescent (*Quercus pubescens*), le sumac (*Cotinus coccygia*), et le buis (*Buxus sempervirens*). La forme dégradée de cette série est la lande à lavande (*Lavandula officinalis*) et genêt cendré (*Genista cinerea*) (Mathys, 2006).

Ils présentent, aujourd'hui, des faibles taux de végétalisation sauf pour le Brusquet (Vallauri, 1997). Vallauri et Vincent (1999) notent la disparition d'un bois royal en 1346 (mis au pillage par les tourneurs de bois). Elle constituerait la disparition de la dernière futaie de valeur aux alentours des bassins de Draix. Le déboisement a joué un rôle sur le ravinement, plus ou moins important selon les

auteurs. Toutefois, il semblerait que les bassins de Draix n'aient jamais représentés une surface agricole intéressante. A la fin du XIX^e siècle et au début du XX^e siècle, suite à de nombreux épisodes de crues torrentielles, l'Etat initie une lutte contre ces phénomènes. Cette lutte contre l'érosion donne lieu à une campagne de reboisement massif menée par les services de Restauration des Terrains en Montagne (RTM). Les forestiers implantent une nouvelle espèce, des pins noirs d'Autriche (*Pinus nigra*). Aujourd'hui, d'autres espèces ont pu s'implanter, mais les pins noirs restent majoritaires. Actuellement, Freddy Rey (Rey, 2000) propose une méthode de gestion minimale par l'implantation d'ouvrages de génie biologique dans les lits des ravines pour réduire l'érosion dans les secteurs marneux ravinés de la moyenne Durance.

Le reboisement par les services RTM a permis la conservation des sols dans certains secteurs et ainsi la repousse spontanée de feuillus, caractéristiques des régions méditerranéennes de moyenne montagne (chêne pubescent, hêtre). Le bassin du Laval est un exemple de progression spontanée de la végétation (Cohen et Rey, 2005). Au sol (Figure 6.11), on observe une distribution spatiale de la végétation avec une reconquête localisée essentiellement sur les secteurs de faibles pentes : implantation forestière sur les parties sommitales des bassins, au niveau des interfluves et des secteurs de plateau. A l'opposé, les secteurs de fortes pentes, c'est-à-dire les versants de ravine, sont marqués par la présence ponctuelle de quelques ligneux (essentiellement pins noirs) dont l'âge paraît récent (de par leur taille).

Le taux de recouvrement et la distribution spatiale de la végétation (Figure 6.10) sont des paramètres importants en raison de leur lien avec l'activité érosive d'une part et d'autre part, parce qu'ils participent aux choix des méthodes de repérage et cartographie d'objets géomorphologiques par télédétection.

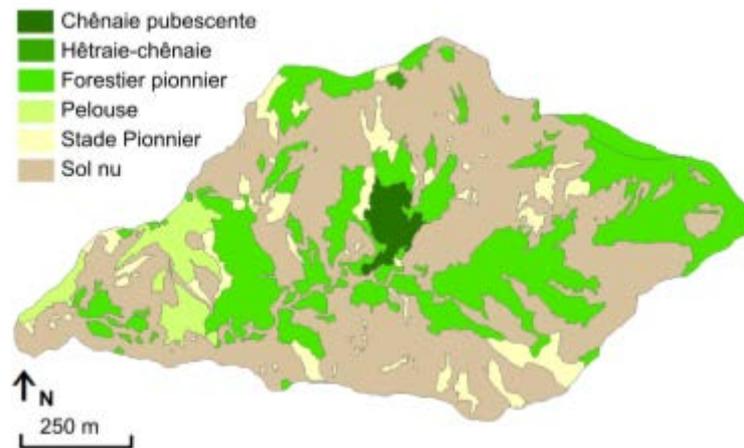


Figure 6.10. Carte de la végétation du Laval (Source : données issues de Vallauri (1997) intégrées dans le SIG Draix) ; détail de la classification en Annexe 2.



Figure 6.11. Photographie au sol d'un détail du bassin du Laval présentant trois types de formation végétale situés sur des espaces différents (Cliché : C. Puech, mai 2009)

6.5. Données de télédétection disponibles et sites choisis

La recherche se concentre sur quatre principaux bassins : la ravine AJ, le Moulin, le Laval et le Bouinenc. Ce choix est déterminé par la disponibilité des données d'une part et la taille et disposition des bassins d'autre part. Les bassins sont choisis en fonction de couples bassin/résolution ; ils sont de tailles différentes et emboîtés et couverts par des documents à différentes résolutions (Figure 6.12).

La ravine AJ, étudiée dans le cadre de la thèse de Jacome (2009), est un sous-bassin du Moulin, qui présente une surface quasiment nue. Le Laval et le Moulin présentent *a priori* des caractéristiques physiques (lithologie, occupation du sol, pentes,...) comparables mais ont une superficie et une forme différentes (le Moulin est dix fois plus petit que le Laval et moins allongé). De plus, le Moulin comporte un secteur de plateau sur la partie ouest du bassin. On note également un secteur plat au niveau de l'interfluve marquant la limite entre le Moulin et le Laval.

Les données utilisées dans ce travail sont les MNT présentés dans le Tableau 6.4. La méthode d'acquisition des données, leur résolution et leur qualité n'est pas la même d'un document à l'autre. Dans ce travail, on s'intéresse à l'impact du type de produit et surtout à leur qualité sur les méthodes de traitement des données. Alors que les informations de qualité des données IGN sur le Bouinenc (BD Topo) n'ont pas été accessibles, l'évaluation quantitative de la qualité des MNT sur le Moulin, le Laval et la ravine AJ est disponible.

	Surface	Type données	Résolution	Origine
Ravine AJ	0.001 km ²	MNT	25 cm	Stéréophotogrammétrie image drone (Jacome, 2009)
		Image	5	Image drone (Jacome, 2009)
Moulin + Laval	0.01 km ² (Moulin~0.08 km ² Laval~0.86 km ²)	MNT	1 m	LiDAR aérien (Sintégra, 2007)
		Image	20 cm	Images associées à la campagne LiDAR (Sintégra 2007)
Bouinenc	39 km ²	MNT	25 m	BD Topo (IGN)
		Occupation du sol	-	Données BD Topo (IGN)

Tableau 6.4. Données spatiales disponibles sur les bassins choisis et leur résolution

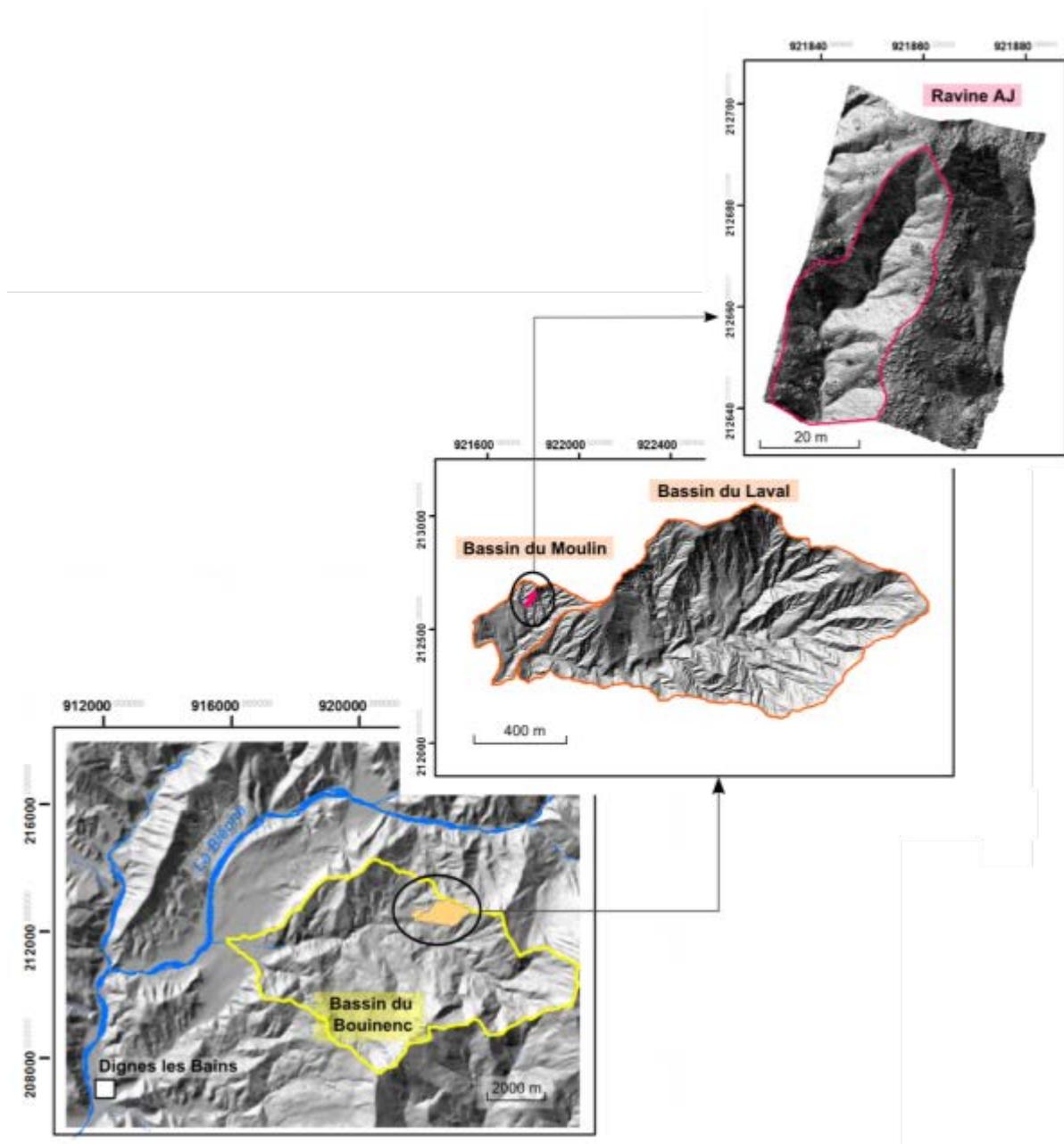


Figure 6.12. Localisation des bassins choisis (Coordonnées en Lambert 3)

Les MNT sur les bassins du Moulin et du Laval constituent nos principaux documents de travail. Ils sont issus de données LiDAR (2.2.1.1) acquises et validées dans le cadre des travaux de recherche de l'ORE Draix et du GIS Draix. Les missions de LiDAR aéroporté ont été réalisées avec le soutien financier de l'INSU. L'évaluation de la qualité des MNT a abouti à la validation des données dans le

cadre d'un travail réalisé par Flory Panissod (Panissod, 2009). Le MNT raster est construit à partir d'un nuage de points issu du dernier écho (correspondant en principe à la surface du sol), dont la densité est de 9 points par m² sur le Moulin et de 4 à 5 par m² sur le Laval. L'évaluation a porté d'une part sur la qualité des points d'altitude par rapport à des points de référence terrain et d'autre part sur la qualité de l'interpolation en grille à maille régulière (raster) à partir de comparaison avec d'autres méthodes d'interpolation (IDW, TIN). Les points de référence (environ 3000) ont été recueillis sur le terrain au moyen d'un GPS différentiel ou d'un tachéomètre de telle sorte que leur précision est meilleure que 3cm. Ils sont ensuite projetés sur le MNT raster. D'après les statistiques d'erreur, le MNT construit par la société Sintégra à partir de leur nuage filtré s'avère le meilleur, caractérisé par un biais de 0.018 m, un écart-type de 0.157 m et une RMSE de 0.158 m. Malgré un filtrage moins restrictif, le MNT ne présente pas d'erreurs plus importantes sous couvert végétal.

Le MNT drone, couvrant la ravine AJ, a été réalisé par stéréoscopie et évalué dans le cadre du travail de thèse d'Andres Jacome (2009). L'évaluation de sa qualité repose sur une comparaison avec des données LiDAR terrestre à plus haute résolution (le nombre de pixels utilisés dans cette validation est de 183 555). La RMSE est de 0.05 m, le biais est quasi-nulle (0.008 m) et la dispersion est de l'ordre de 0.05 m.

Pour les bassins retenus, il existe aussi dans le cadre du GIS Draix des données sur les réseaux hydrographiques ou de talwegs ; ils sont extraits selon diverses méthodes que récapitule le Tableau 6.5.

Nom / Bassin	Données de base	Résolution / Echelle cartographique	Méthode d'extraction	Auteurs
Réseau ravine AJ	Terrain	Terrain	Cartographie terrain	Jacome, 2009
Réseau Moulin	Carte topographique	1/2000	Tracé manuel à partir des courbes de niveau	Greco, Zvonianu et Ferreol, 2004
Réseau Moulin	Courbes de niveau calculées à partir du MNT LiDAR	1 m	Tracé manuel à partir des courbes de niveau	Jantzi, 2009
Réseau du Laval	Carte topographique	1/2000	Tracé manuel à partir des courbes de niveau	Greco, Zvonianu et Ferreol, 2004
Réseau Bouinenc	BD Topo	Equivalent 1/25 000	?	IGN

Tableau 6.5. Base de données réseaux existante pour les bassins de Draix

6.6. Constitution d'un référentiel terrain

Nous avons constitué un référentiel terrain sur un secteur test du bassin du Moulin. Le référentiel comprend la cartographie manuelle d'un réseau de talwegs à laquelle s'ajoute une information sur le type d'objets morphologiques. L'essentiel du travail de terrain a été réalisé en mai 2009 puis terminé en juin. La forte dissection rend le travail de terrain difficile et l'accessibilité des ravines est inégale ; ce qui rend la cartographie de terrain quelque peu hétérogène. Le travail avait été réalisé sur une grande partie du bassin cependant nous avons conservé, comme réseau de référence, le réseau tracé sur un secteur test plus petit mais sur lequel les relevés sont homogènes (Figure 6.13). Ce secteur est en grande partie nu. Le repérage des talwegs n'a pas posé de problème. Il a, par contre, été difficile de qualifier les talwegs et de les classer selon les formes dans lesquelles ils s'inscrivent : griffures, rigoles, ravines, ravins. Cette difficulté provient des critères de discrimination délicats à établir et à repérer sur le terrain. De plus, nous avons observé la présence de niches d'arrachement sur les versants, dans lesquelles s'inscrivent parfois des rigoles. Durant à cette période de l'année, les fonds de ravine sont comblés par les débris de la désagrégation des versants ; ce qui rend la description de la géométrie des chenaux moins aisée (surtout des petits chenaux amont). La présence de seuils, correspondant à des marches d'escalier de 1 voire 2 m de haut, a été observée sur certains chenaux principaux. Aux résolutions auxquelles nous allons travailler, la présence de seuils peut perturber la mesure des pentes.

En pratique, un réseau de talweg a été tracé sur le terrain puis digitalisé à l'aide de l'image issue de la mission aérienne de 2007 avec une résolution de 20 cm et de points relevés au GPS sur le terrain. Sur le terrain, plus de deux cents tronçons associés à des objets morphologiques ont été repérées et caractérisées selon les critères du tableau suivant (Tableau 6.6).

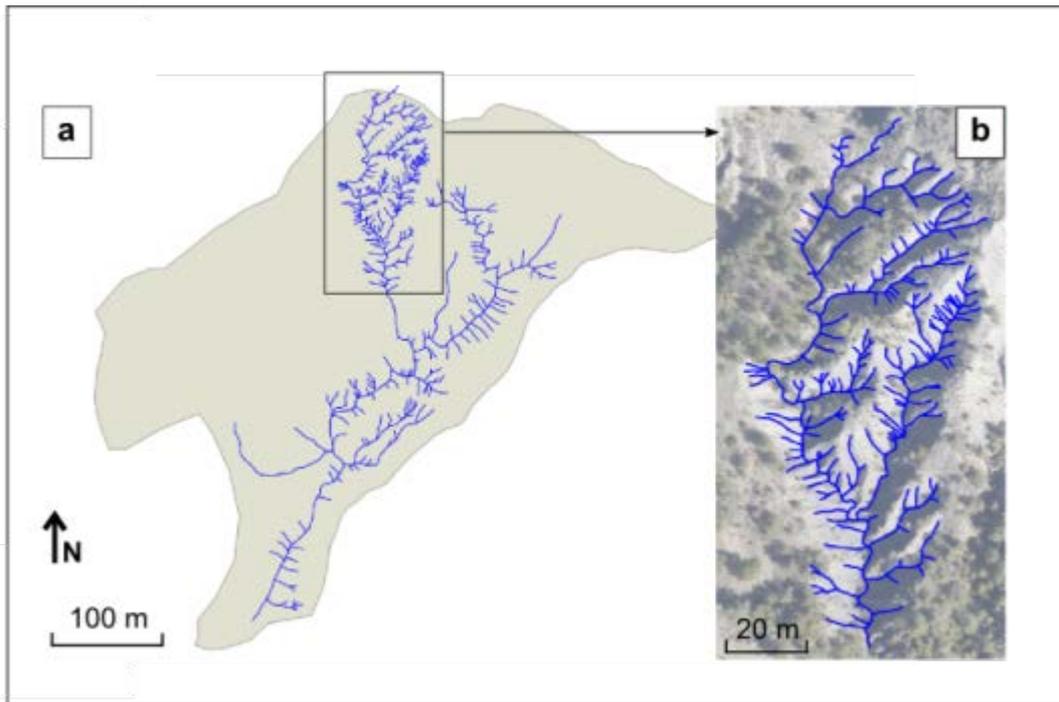


Figure 6.13. Réseau cartographié sur le terrain : a. ensemble du réseau tracé sur le terrain ; b. secteur test homogène considéré comme référence. Le réseau du secteur test comprend 342 arcs de longueur moyenne de 4.37 m.

Type	ravin, ravine, ravine élémentaire, rigole, griffure, niche d'arrachement
Largeur, hauteur, longueur	Largeur estimée crête à crête Hauteur estimée à la verticale
Forme de versant	Forme en V ou en U Symétrique ou dissymétrique
Pente du profil en long	Moyenne estimée
Végétalisation	Sous couvert végétal ou nu

Tableau 6.6. Tableau récapitulatif des critères renseignés sur le terrain pour chaque objet observé

Partie 3

Extraction de réseau de talwegs à partir des concavités du MNT et validation

Sous hypothèse que le réseau des ravines peut être schématisé par le réseau des talwegs associé (5.3), la représentation cartographique des réseaux de talwegs constitue un élément clef de l'analyse spatiale des *badlands*. Avant décrire ces réseaux, il est nécessaire d'en avoir une bonne représentation. On cherche donc des méthodes stables et objectives pour les cartographier et pour évaluer la qualité des représentations obtenues. Les données numériques spatialisées, et plus particulièrement les MNT offrent des possibilités intéressantes pour extraire des réseaux continus et arborescents. Toutefois, certains points de l'extraction restent délicats, le principal étant l'initiation des talwegs à l'amont sur les MNT : où arrêter le réseau (Montgomery et Dietrich, 1992 ; Montgomery et Foufoula-Géorgiou, 1993) ? Ainsi, l'obtention de réseaux continus et arborescents minimisant les erreurs d'extraction (sur-détection et sous-détection) n'est pas directe et fait souvent intervenir un ou plusieurs paramètres subjectifs. Les erreurs d'extraction doivent être évaluées pour juger de la performance de la méthode d'extraction. De plus, les incertitudes de l'analyse spatiale (partie 4 et 5) sont liées à la qualité initiale des réseaux. Cette partie a pour objectif de proposer des méthodes d'extraction de réseaux à partir de données numériques spatialisées issues de la télédétection et d'évaluer la qualité des réseaux extraits.

Nous présentons au chapitre 7 une méthode d'extraction à partir de MNT, fondée sur un critère morphologique, qui permet de cartographier des réseaux de talwegs morphologiquement représentatif et significatif. L'évaluation quantitative de la qualité des réseaux extraits est présentée au chapitre 8. La qualité des réseaux s'appuie sur leur comparaison avec un réseau de référence et reflète la proximité du réseau extrait avec la référence : on considère que plus le réseau extrait est

proche de la référence, meilleur il est. Une méthode automatique de comparaison d'arborescences, fondée sur une vision hiérarchique des réseaux et intégrant des critères géographiques, géométriques et topologiques, est proposée en alternative à la méthode des buffers qui repose sur un critère géographique strict.

Chapitre 7 : Extraction de réseau de talwegs à partir des concavités du MNT

Nous avons vu partie 1 que l'extraction de réseaux à partir de MNT apporte une solution continue et arborescente mais que les méthodes classiques, telles que le D8, demandaient de choisir un critère de démarrage du réseau. L'application d'un critère unique (seuil de surface drainée) ne permet pas de représenter correctement les drains amont du réseau (drains d'ordres 1). Par ailleurs, nous avons mis en évidence que le MNT contient des formes de relief et qu'il est possible d'indiquer la présence ou l'absence de formes convexes et concaves pouvant représenter des objets morphologiques (ravines, rigoles, ...) en fonction de la résolution. C'est pourquoi, dans ce paragraphe, on cherche à extraire des réseaux de talwegs significatifs en testant la propension du MNT seul à révéler des éléments qui ont un sens morphologique direct, tout en tenant compte de la qualité des données. Ce travail reprend l'article « *Extraction of thalweg networks from DTMs: application to badlands* » paru dans la revue *Hydrological and Earth System Sciences* (Thommeret *et al.*, 2010).

A partir de MNT raster (à mailles régulières), divers algorithmes de drainages sont disponibles pour extraire des réseaux de talwegs tels que le D8 (O'Callaghan et Mark, 1984), *kinematic routing algorithm* (Lea, 1992), FD8 (Quinn *et al.*, 1991) ou D_{∞} (Tarboton, 1997). Mais comme nous l'avons vu, le passage d'un chemin d'écoulement à un réseau de talwegs vectoriels n'est pas évident (Martz et Garbrecht, 1995 ; Tarboton et Ames, 2001 ; Turcotte *et al.*, 2001). La plupart du temps, le processus intègre un seuil de surface amont drainée unique au-delà duquel le réseau de talwegs ou hydrographique est défini. Ce seuil n'ayant pas de signification physique direct, la question se pose de savoir où arrêter les talwegs vers l'amont. Divers raisonnements, décrits en partie 1 (Montgomery et Dietrich, 1994 ; Tarboton *et al.*, 1991), proposent des solutions pour déterminer des seuils significatifs. Toutefois ces solutions ne peuvent pas être appliquées dans le cadre de ce travail. La solution de Tarboton *et al.* (1991), la plus utilisée, repose sur les propriétés morphologiques du réseau. Alors que dans notre cas, des analyses morphologiques vont être réalisées à partir des réseaux extraits, cette solution ne peut être retenue. On se pose donc la question suivante : comment extraire un réseau de talwegs qui correspond à l'information contenue dans le MNT ? En d'autres termes, comment calculer un réseau de talwegs à partir d'un MNT qui minimise les artefacts dus à l'algorithme et l'effet du bruit altimétrique ?

L'introduction d'un indice morphologique calculé à partir du MNT permet de localiser les aires de concavités représentées dans les données. De nombreux paramètres existent pour identifier les convergences du terrain (Wilson et Gallant, 2000 ; Peucker et Douglas, 1975 ; Yokoyama *et al.*, 2002)

et certains ont déjà été utilisés pour l'extraction des talwegs (Tarboton et Ames, 2001 ; Molly et Stepinski, 2007, Tarolli et Dalla Fontana, 2009 ; Pirotti et Tarolli, 2010).

Nous présentons ici une méthode qui combine un algorithme de drainage existant et un indice morphologique pour tracer des réseaux de talwegs. En comparaison avec la courbure en plan, l'indice de convergence semble être un bon choix du fait de sa capacité à souligner les éléments morphologiques tels que les vallées. Cette méthode tente d'extraire des talwegs de manière objective, considérant les formes du terrain significatives incluses dans le MNT.

7.1. Matériels

Pour évaluer l'apport de la méthode proposée, cette dernière a été appliquée à des MNT de bassins virtuels et réels pour évaluer l'apport de la méthode proposée.

7.1.1. Bassins virtuels et données simulées

L'utilisation de MNT de bassins virtuels permet la représentation et la comparaison de réseaux extraits suivant les différentes méthodes (celles existantes et celle proposée), dans des contextes où la forme de la vallée est complètement connue et contrôlée. Les MNT virtuels construits correspondent à des formes simples incrustées dans des plans inclinés. Les formes choisies sont soit des vallées virtuelles soit des formes mathématiques idéalisées. Les vallées virtuelles présentent divers types de confluence (principalement avec des variations d'angles), largeur et structure de réseaux. La forme mathématique la plus intéressante et expressive est la tôle ondulée.

7.1.2. Bassin du Moulin et données réelles

Le principal site d'étude sur lequel la méthode a été établie et testée est le bassin du Moulin. Ce bassin possède un taux de couverture végétale relativement faible (46%) et une pente moyenne d'environ 30°.

La méthode a été appliquée à trois MNT du Moulin de différentes résolutions (50 cm, 1 m et 2 m). Ces trois ensembles de données proviennent de la même mission LiDAR (détaillée dans Bretar *et al.*, 2009). Ils dérivent du même nuage de points correspondant au dernier écho du retour d'onde. La RMSE ou EQM de ces MNT est d'environ 0.17 m. L'évaluation de la distribution spatiale de l'erreur altimétrique du MNT a pu être réalisée à l'aide de points xyz relevés au DGPS (Jacome, 2009).

7.2. Méthode

La méthode présentée a pour but l'extraction d'un élément morphologique, le réseau de talwegs, qui reflète l'information contenue dans le MNT. L'objectif est de tracer des talwegs uniquement où le MNT exprime une concavité du terrain où il y a convergence des écoulements. On doit aller jusqu'au bout de l'information lorsqu'une forme est représentée et ceci avec le moins d'artefacts possibles.

Notre méthode comprend trois étapes et repose sur la combinaison d'un algorithme de drainage et d'un indice morphologique (Figure 7.1). L'indice morphologique permet de repérer les éléments convergents de l'espace. Deux indices sont testés : la courbure en plan notée PC et l'indice de convergence noté CI (Köthe et Lehmeier, 1994; Kiss, 2004). Premièrement, des aires de convergence significative sont dérivées du MNT. On suppose que ces aires correspondent à des éléments de fond de ravine. Ces aires étant discontinues, la deuxième étape consiste à reconnecter ces aires à l'aide d'un algorithme de drainage classique pour obtenir une structure arborescente et orientée. On considère que cette structure représente l'ensemble des fonds de ravine. Il en résulte une représentation épaisse du réseau qui est affiné et filtré dans la troisième étape dans le but de produire un réseau de talwegs linéaire en format vecteur.

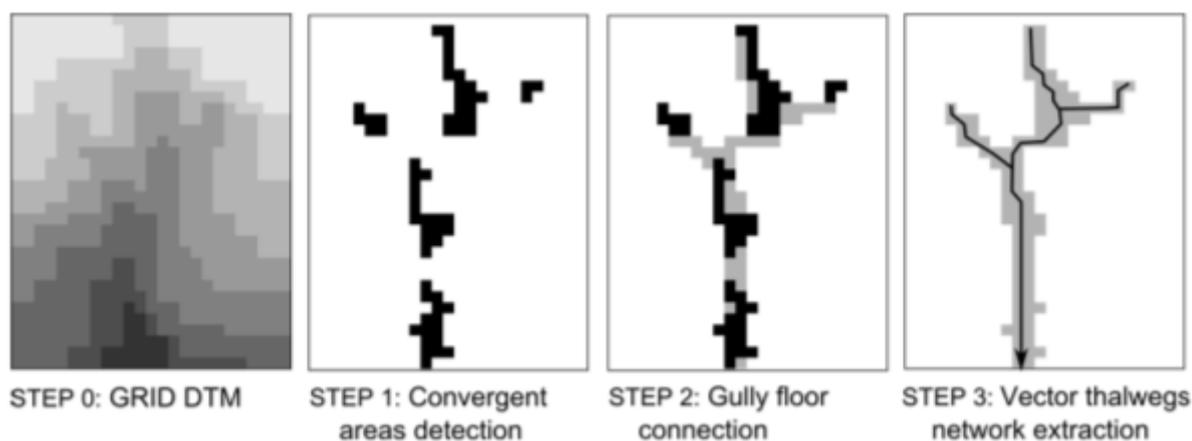


Figure 7.1. Principe de la méthode proposée pour extraire un réseau de talwegs à partir d'un MNT raster fondée sur trois étapes

7.2.2. Détection des aires de convergence significatives

De nombreux indices morphologiques permettent de distinguer les aires de convergence et de divergence des écoulements à partir d'un MNT (Wilson et Gallant, 2000). Deux principaux travaux récents, présentés dans la partie 1, proposent d'intégrer des paramètres de courbure dérivés du MNT pour extraire des réseaux de talwegs (Tarboton et Ames, 2001 ; Molly et Stepinski, 2007). Dans ce travail, nous comparons la propension de la courbure en plan et de l'indice de convergence (CI) pour extraire les cellules de convergence. La courbure en plan est un paramètre de terrain communément utilisée qui semble être pertinent puisqu'il devrait directement indiquer la présence d'un talweg. Etant donné que la courbure en plan et la courbure tangentielle utilisée par Molloy et Stepinski (2007) possèdent la même distribution spatiale (Molloy et Stepinski, 2007), ces deux paramètres auront le même impact dans ce travail. De plus, l'indice de convergence a déjà montré un grand potentiel pour la détection des fonds de ravine dans le travail de Bretar *et al.* (2009).

7.2.2.1. Calcul des grilles de convergences/divergences

Le calcul de la courbure en plan est détaillé dans la partie 1. Elle est obtenue ici à partir d'une fenêtre mobile de 3*3 cellules.

Le principe de calcul de l'indice de convergence (CI), défini par Köthe et Lehmeier (1994) puis Kiss (2004), diffère de celui de la courbure en plan. CI est fondé sur l'orientation ou la direction de la pente (*aspect*) calculée à partir de la fonction de la surface locale (Zevenbergen et Thorne, 1987). A partir d'une fenêtre mobile de 3*3 cellules (Figure 7.2), pour chaque cellule externe i , α_i est l'angle, en degré, entre l'orientation de la pente de la cellule i et la direction vers le centre (*i.e.* la direction du vecteur joignant le centre de la cellule i et le centre de la fenêtre). CI correspond à la moyenne des θ_i moins 90° .

$$CI = \left(\frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \theta_i \right) - 90 \quad (7.1)$$

CI prend des valeurs entre -90° et 90° . Dans la grille raster du CI, les valeurs positives correspondent à des aires de divergence et inversement, les valeurs négatives correspondent à des aires de convergence du terrain. Les valeurs nulles sont relatives à des aires sans courbure, c'est-à-dire des versants plans.

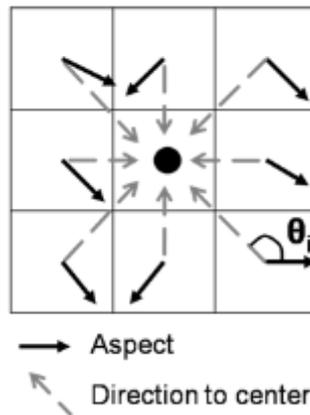


Figure 7.2. Calcul de l'indice de convergence

7.2.2.2. Mise en évidence des valeurs de convergence significatives

Cependant, le bruit du MNT influence le calcul des indices CI et PC et certaines valeurs proches de zéro ne sont certainement pas significatives. Pour souligner les cellules de convergence significative, qui devraient réellement correspondre aux fonds de ravine, de la grille de l'indice morphologique considéré, on applique un seuil CT_T pour la grille de CI et PC_T pour la grille de la PC). Lashermes *et al.* (2007) et Tarolli et Dalla Fontana (2009) ont proposé des méthodes pour seuiller la grille de courbure dans le but d'identifier les transitions versant/chenal. Toutefois, nous proposons dans ce travail, la mise en place objective d'un seuil basé sur le bruit du MNT. Pour déterminer les seuils pour CI et PC de manière objective, le principal paramètre en jeu est la distribution spatiale de l'erreur altimétrique du MNT.

Pour déterminer de manière objective CI_T , un MNT correspondant à un plan incliné (avec une pente d'environ 30° correspondant à la pente moyenne dans le bassin du Moulin) de 50×50 cellules a été simulé avec un bruit respectant la structure spatiale de l'erreur altimétrique du MNT réel considéré (Figure 7.3). Sachant qu'une corrélation spatiale des erreurs dans le MNT a été mise en évidence et modélisée, le processus de simulation du bruit repose sur une simulation géostatistique de champ Gaussien, avec la fonction de covariance spatiale et des paramètres déduits de la même façon que Bretar *et al.* (2009).

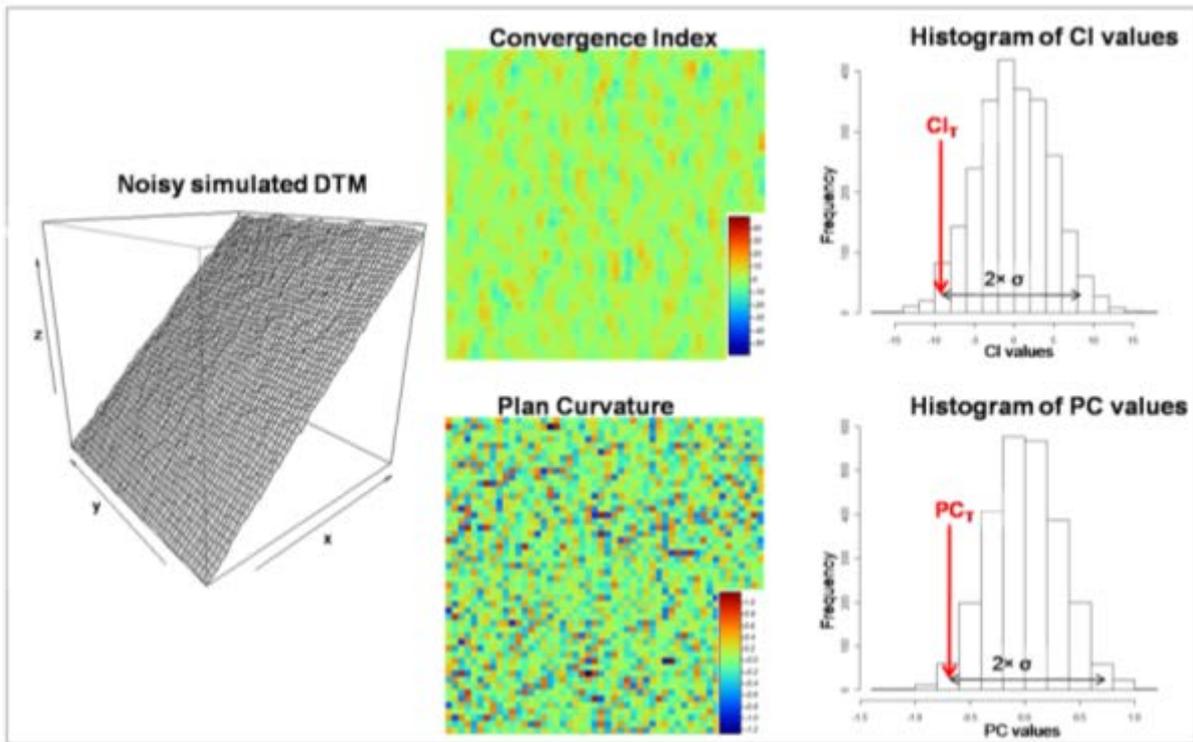


Figure 7.3. Exemple de distribution des valeurs de CI (en haut) et de PC (en bas) calculés à partir du MNT simulé selon un plan incliné bruité (à gauche) et les valeurs de seuils (à droite).

L'indice de convergence dérivé du MNT simulé fournit un seuil CI_T , au-delà duquel les valeurs de CI sont considérées comme significativement différentes du versant plan. La distribution gaussienne des valeurs de CI permet de définir le CI_T comme la moyenne moins deux fois l'écart-type (σ). On accepte que 2.5 pourcent des valeurs de CI dues au hasard sur le MNT bruité puissent être définies comme significatives (Bretar *et al.*, 2009). En conséquence, on construit une image binaire qui attribue la valeur 1 aux cellules de convergence significative et (*i.e.* $CI > CI_T$) et 0 aux cellules de non-convergence.

A la fin de cette étape, les aires de convergence discontinues sont identifiées et considérées comme des éléments de fond de ravine. Cette identification est objective et reproductible. De plus, la méthode de calcul du seuil est valable pour des MNT de différentes résolutions.

7.2.3. Mise en évidence d'une aire de fond de ravine arborescente

L'objectif étant d'extraire des réseaux de talwegs continus et arborescents, les aires de convergence discontinues doivent être connectées pour créer une surface continue. Les algorithmes de drainage rendent possible cette reconnexion amont-aval (Tarboton et Ames, 2001; Molloy et

Stepinski, 2007). La plupart des algorithmes de drainage implémentés repose sur une analyse locale des altitudes et suivent les mêmes étapes (détaillées dans la partie 1) : 1) détermination de la direction des écoulements ; 2) calcul de l'accumulation des écoulements ; 3) détermination du réseau à l'aide d'un seuil de surface amont drainée unique (CA_T). La construction d'un chemin d'écoulement continu est rendue possible par l'accumulation des écoulements. Le choix d'un algorithme unidirectionnel (chaque cellule possède une seule sortie d'écoulement) assure la structure arborescente du réseau, contrairement aux algorithmes multidirectionnels (Tarboton, 1997; Quinn *et al.*, 1992).

Cette étape repose sur deux idées majeures : 1) commencer l'aire de drainage à l'amont seulement où une convergence est marquée et 2) forcer l'écoulement (ou le flux) à passer par les aires de convergence détectées. Pour cela, l'indice morphologique est intégré lors de l'accumulation des écoulements. Habituellement, l'accumulation est basée uniquement sur la grille des directions. Pour prendre en compte la convergence, l'accumulation est pondérée par la grille des convergences seuillée (image binaire obtenue à l'étape précédente). Il en résulte que les cellules qui possèdent des valeurs d'accumulation différentes de zéro font partie du réseau. La valeur 0 dans le calcul de l'accumulation pondérée est attribuée aux cellules qui représentent des aires de divergence. Ces dernières ne doivent donc pas être rattachées au réseau. Cette méthode diffère de l'accumulation communément envisagée, qui nécessite un seuil de surface amont drainée unique pour extraire un réseau.

Il existe plusieurs algorithmes unidirectionnels pertinents pour le calcul de l'accumulation pondérée. Nous avons comparé l'algorithme D8 (O'Callaghan et Mark, 1984) et le *Kinematic Routing Algorithm* (KRA) (Lea, 1992) dont les différences sont détaillées dans la partie 1.

Cette étape permet d'obtenir une carte des fonds de ravine représentés de manière continue et arborescente sous forme d'une grille binaire.

7.2.4. Extraction d'un réseau de talwegs vectoriel

La dernière étape consiste à extraire un réseau de talwegs vectoriel. Le réseau est déduit de l'aire continue des fonds de ravines : on fait l'hypothèse que le réseau de talwegs correspond à la ligne centrale de cette surface. Cette hypothèse empêche la représentation d'une sinuosité des talwegs sauf si la surface elle-même présente des méandres. Dans les bassins de Draix, cette hypothèse semble tout à fait raisonnable : le tracé des talwegs suit bien la morphologie des ravines.

L'extraction d'un réseau vectoriel à partir de la carte des fonds de ravine nécessite une squelettisation (Molloy et Stepinski, 2007) et une vectorisation suivant d'un filtrage du réseau linéaire. La squelettisation produit un réseau d'un pixel de large avec un tracé guidé par la forme de

la surface. Le réseau raster affiné est ensuite vectorisé. La vectorisation correspond à l'opération classique qui joint le centre des cellules. Ce processus intègre les deux principales informations : le réseau raster et la grille de direction des écoulements. L'incorporation de cette dernière dans le calcul assure la continuité et surtout la cohérence amont-aval du réseau, sans création de boucle. Enfin, le filtrage consiste à éliminer les talwegs les plus courts. On fait le postulat que les arcs dont la longueur est inférieure à deux fois la résolution du MNT sont non-significatifs.

7.3. Résultats

La méthode proposée a été appliquée à des MNT de cas virtuels et de cas réels. Ces deux applications se complètent pour tester la validité de la méthode.

7.3.1. Sur les cas virtuels

La Figure 7.4 compare les résultats obtenus par différentes méthodes d'extraction sur deux cas virtuels. La méthode d'extraction classique que nous avons choisie est le KRA avec un seuil de surface amont unique.

On observe, pour le plan incliné (Figure 7.4a), que la méthode classique divise le talweg principal en deux branches alors que la méthode proposée basée sur l'indice morphologique (PC ou CI) procure une branche unique. L'extraction d'une branche unique à l'aval montre que la méthode morphologique proposée fournit des résultats plus réalistes dans les vallées larges. De plus, la méthode classique crée des lignes correspondant à des artefacts sur les côtés du MNT, même lorsque c'est un plan parfait (*i.e.* qu'il n'y a aucune courbure du terrain). Ces lignes n'apparaissent pas lorsque l'indice morphologique est pris en compte. Ces artefacts sont la conséquence directe du seuil de surface amont drainée unique : un talweg est tracé lorsque le seuil est atteint. On remarque également des différences selon l'indice morphologique utilisé (PC ou CI). Le réseau issu de la méthode CI est mieux ajusté à la vallée virtuelle que le réseau issu de la méthode PC : le réseau CI représente tous les talwegs de la vallée virtuelle et pas plus alors que le réseau PC révèle une certaine sous-détection.

La surface de tôle ondulée (Figure 7.4b) montre que lorsqu'un indice morphologique est intégré, le chemin d'écoulement passe seulement dans la partie concave de la tôle alors que dans la méthode classique, selon le seuil choisi, le chemin peut remonter sur les côtés alors qu'aucune courbure n'est représentée. Dans ce cas, il n'y a pas de différence entre l'utilisation de PC ou CI.

Pour résumer, il semble essentiel d'intégrer un indice morphologique pour l'extraction de talwegs significatifs. En outre, l'algorithme basé sur l'indice de convergence semble fournir une solution unique représentative de la vallée virtuelle.

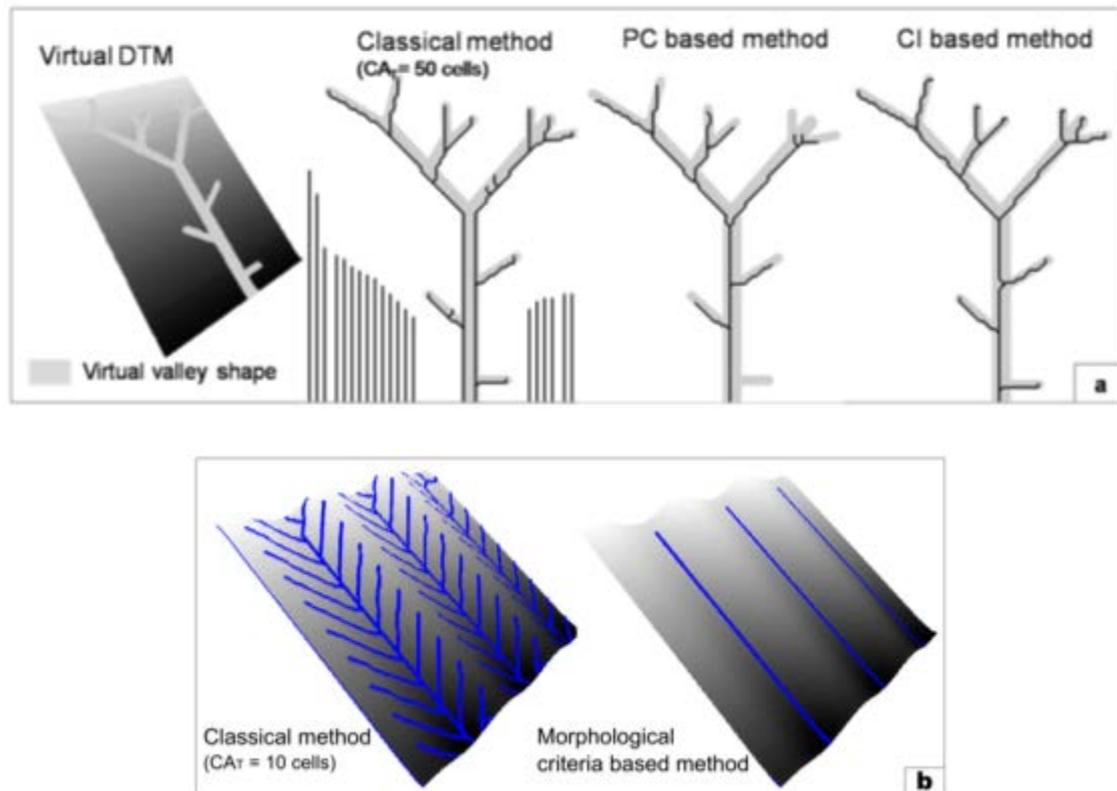


Figure 7.4. Exemples de réseaux de talwegs extraits à partir de MNT simulés: a) MNT de bassins virtuels; b) surface de tôle ondulée.

7.3.2. Sur les cas réels

A partir des MNT cas réels, une première évaluation qualitative compare les réseaux extraits sur le secteur test du bassin du Moulin à partir d'un même MNT avec les différentes méthodes présentées. Dans un deuxième temps, nous comparons des réseaux extraits à différentes résolutions avec la méthode basée sur l'indice de convergence.

Comme pour les cas virtuels, les réseaux obtenus en appliquant les méthodes CI, PC et classique sont confrontés au réseau de référence cartographié sur le terrain. Pour la méthode basée sur l'indice de convergence, le seuil CI_T résultant du calcul géostatistique, considérant la distribution spatiale de l'erreur du MNT LiDAR, est de -9.54° . Pour la courbure en plan, le seuil PC_T est de -0.66 .

Pour la méthode classique, Le KRA est utilisé avec un seuil CA_T de 50 m^2 . Pour apprécier la qualité de représentation des réseaux et juger de la méthode qui fournit le réseau le meilleur (*i.e.* le plus conforme à la réalité-terrain), nous comparons les réseaux extraits à un réseau de référence cartographié sur le terrain (Figure 7.5). Qualitativement, le réseau CI apparaît le plus proche du réseau de référence. Si le seuil CA_T choisi et la méthode PC donne des réseaux correctes, sans artefact, le réseau CI va plus loin dans l'extraction des talwegs : on observe une détection plus complète et plus ajustée à l'information contenue dans le MNT.

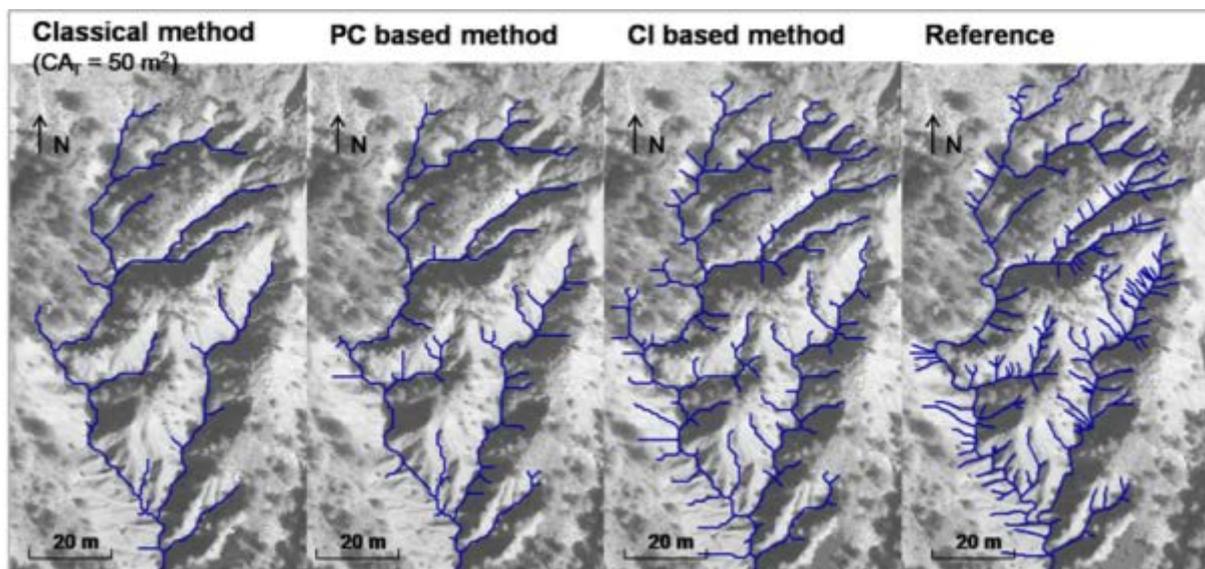


Figure 7.5. Comparaison des réseaux de talwegs obtenus à partir de trois méthodes différentes avec le réseau de référence terrain sur le secteur du bassin du Moulin

Nous avons testé la méthode CI, qui paraît procurer de meilleurs résultats, sur des MNT à d'autres résolutions dans le but d'explorer la sensibilité de la méthode à la résolution des données de base. Pour apprécier la sensibilité de l'extraction à partir de l'indice de convergence, la méthode est appliquée à deux autres résolutions : 50 cm et 2 m.

Les résultats pour le secteur test sont présentés Figure 7.6. Les différences de tracé entre les trois réseaux viennent du changement de résolution car les branches principales (les plus grands ordres de Strahler) sont similaires alors que lorsque la résolution s'affine, les petits ordres augmentent et le réseau extrait se rapproche du réseau de référence. Cela montre que les réseaux extraits à partir de la méthode morphologique basée sur l'indice de convergence expriment clairement les informations de forme du terrain contenu dans le MNT, vérifiant la robustesse de la méthode.

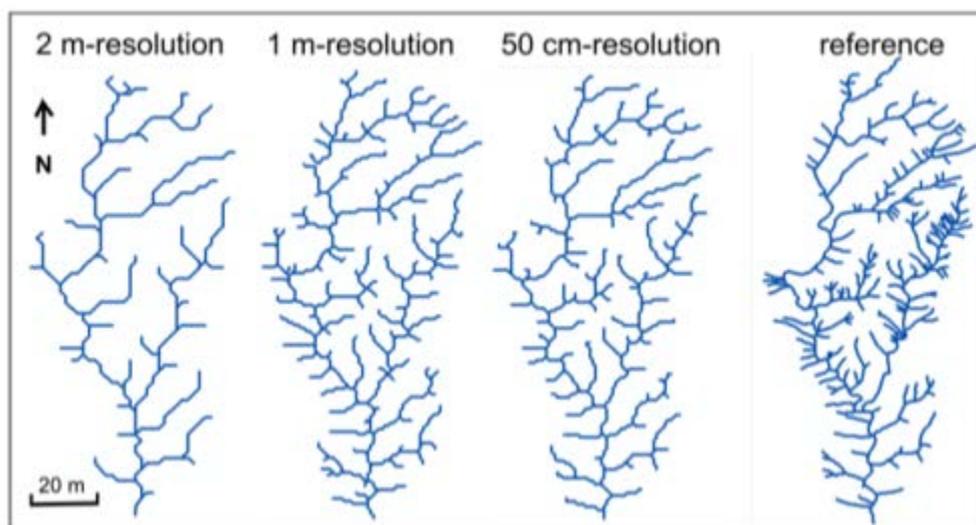


Figure 7.6. Extractions de trois réseaux à partir de MNT à différentes résolutions à l'aide de la méthode basée sur CI et comparaison avec le réseau de référence – secteur test du bassin du Moulin.

7.3.3. Comparaison avec les réseaux utilisés à Draix

Pour évaluer l'apport de l'extraction par la méthode mise en place pour le GIS Draix, nous comparons le réseau extrait par la méthode CI à un réseau tracé manuellement à partir de courbes de niveau issues du même MNT (1 m). Ce travail de tracé manuel a été réalisé par Hugo Jantzi (2009) et est souvent utilisé pour les travaux sur le bassin du Moulin. La Figure 7.7 montre que l'extraction est très proche dans les secteurs nus (nord-est). Cependant, dans le secteur plat végétalisé (ouest), l'extraction automatique par CI engendre le tracé de talwegs qui n'ont pas été détecté manuellement. Il est probable que ces éléments ne correspondent pas à des ravines sur le terrain. Ainsi, la méthode présente un avantage essentiellement pour les secteurs nus.

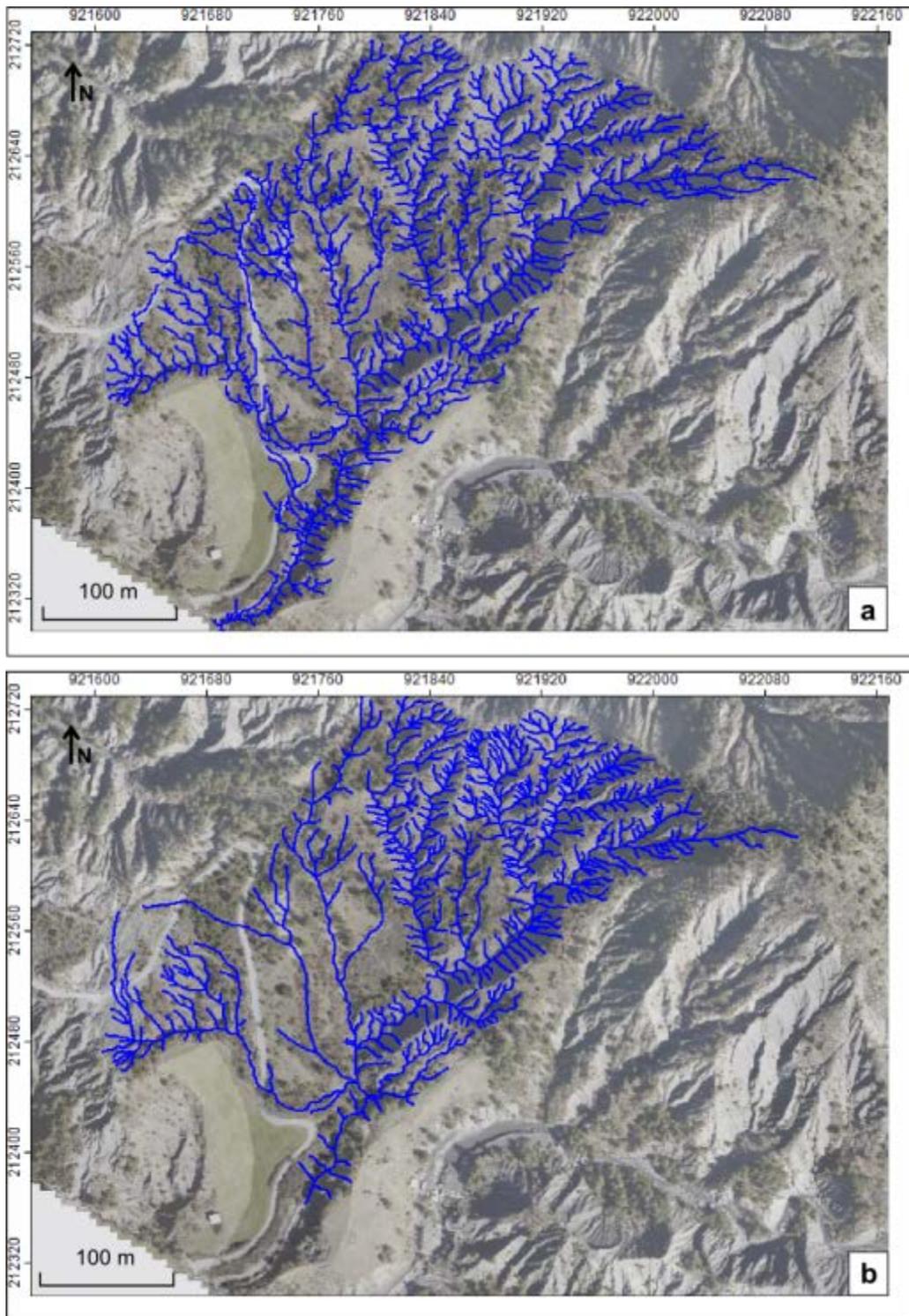


Figure 7.7. Comparaison qualitative du réseau extrait par la méthode CI (a) et un réseau tracé manuellement à partir des courbes de niveaux calculées (b) à partir du même MNT (1m)

7.4. Discussion et conclusion

Notre approche consiste à extraire des fonds de ravines arborescents et leur réseau de talwegs associé à partir de MNT. Avec les méthodes classiques, un talweg est extrait à partir du moment où le seuil numérique de surface amont drainée est atteint, sans prise en compte des formes du terrain. Alors que la méthode développée extrait un talweg uniquement là où le MNT exprime une forme. On note deux principaux avantages à cette méthode qui sont l'objectivité et l'amélioration de l'exactitude des talwegs extraits. Pour établir cette méthode, nous avons utilisé des indices morphologiques qui reflètent la convergence du terrain. Deux indices ont été comparés : la courbure en plan et l'indice de convergence. Les résultats ont montré la capacité de ce dernier à révéler les formes du terrain contenue dans le MNT. La méthode basée sur l'indice de convergence (méthode CI) fournit un réseau plus réaliste et complet, surtout dans le secteur nu.

Cette méthode est directement dépendante de données de base puisqu'elle repose sur les paramètres de bruit du MNT. Ces paramètres permettent de déterminer un seuil objectif pour la cartographie des aires de convergence des écoulements significatives (*i.e.* dont la convergence est assez prononcée par rapport au bruit du MNT). Cette dépendance nécessite une évaluation de la qualité du MNT au préalable. La principale limite de cette méthode vient de la manière dont est modélisé le bruit du MNT. La distribution spatiale de l'erreur altimétrique, telle qu'elle a été déterminée, est valable uniquement sur les secteurs nus. Ce qui explique la principale source de sur-détection qui se situe dans le secteur boisé où des talwegs tendent à être tracé entre les arbres. De plus, un seul plan incliné bruité (dont la pente correspond à la pente moyenne dans le bassin du Moulin) a été utilisé pour la détermination du seuil de convergence significative. Le seuil serait plus précis s'il était déterminé en fonction de plusieurs plans de pentes différentes, respectant la distribution des pentes dans les *badlands* et en différenciant la structure spatiale de l'erreur en fonction de la présence ou non de couvert végétal. Ainsi, la méthode proposée gagnerait à être complétée par une information sur la présence ou absence de couvert végétal. Cette information constitue une donnée externe au MNT et pourrait être apportée soit par une image soit par des données de végétation acquises par ailleurs.

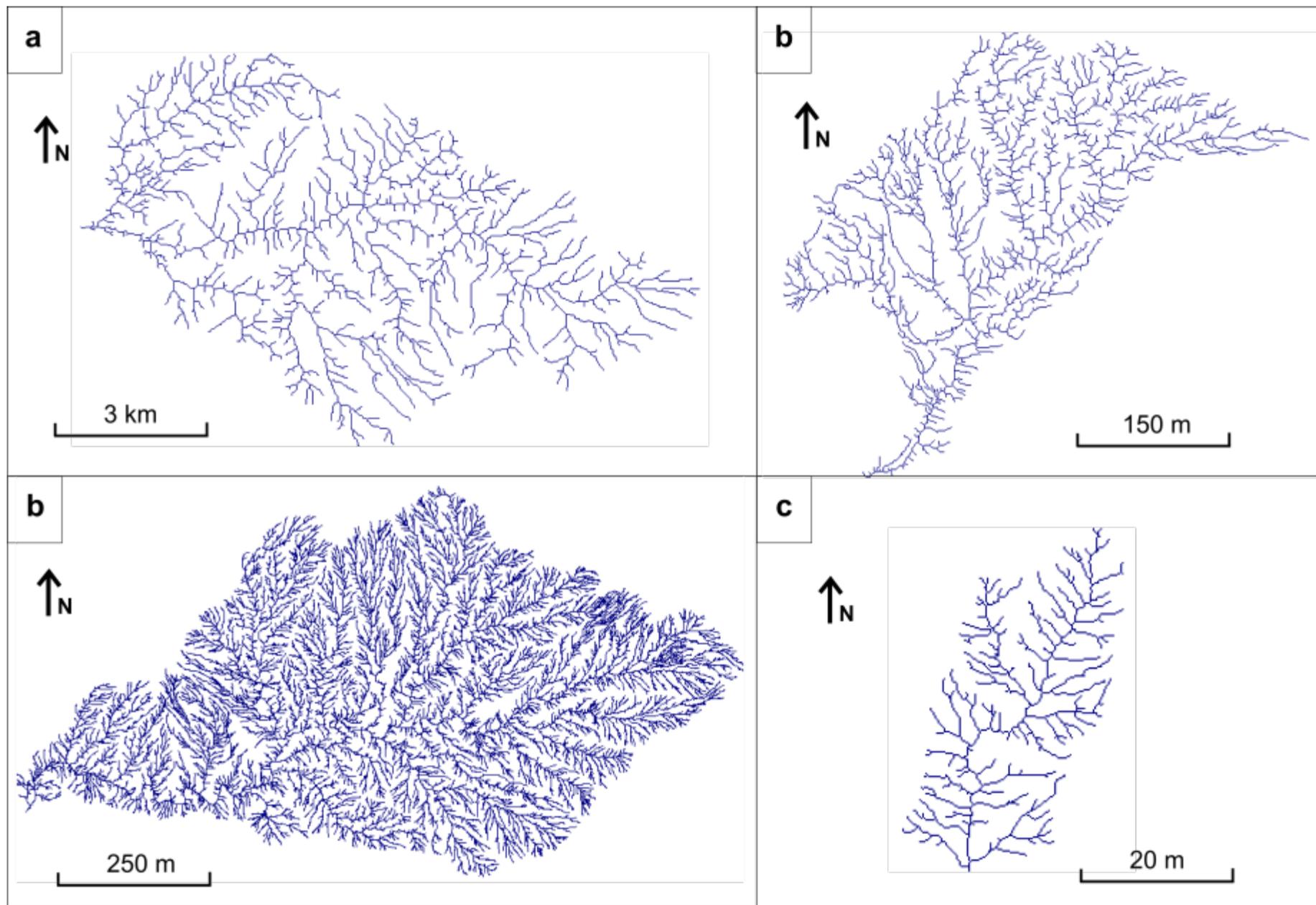
La méthode CI a été appliquée à trois MNT de résolutions différentes (2 m, 1 m et 50 cm) pour tester la sensibilité de cette approche à la résolution. Toutefois, pour des résolutions très différentes de celles étudiées, les indices traduisant la convergence du terrain issus d'analyses locales peuvent limiter l'extraction du réseau et être inapproprié dans les vallées larges. Dans ce cas, une approche pyramidale, basée sur les mêmes principes, devrait être développée. A une résolution donnée, l'utilisation de fenêtres mobiles pyramidales pour le calcul de CI devrait lisser le réseau et fournir des résultats plus cohérents. Dans ce travail, une fenêtre unique de 3*3 cellules a été utilisée pour le calcul de l'indice de convergence et de la courbure en plan. Pirotti et Tarolli (2010) montrent que l'utilisation d'autres tailles de fenêtre peut améliorer les résultats. Les auteurs recherchent une taille

optimale pour détecter des talwegs à partir de paramètres de courbure, qui est de 15*15 cellules dans leur cas. Une analyse pyramidale se justifierait dans notre cas puisque nous cherchons à détecter des éléments morphologiques de différentes tailles.

Pour des résolutions métriques, la détection de talwegs à l'aide de la méthode CI apporte des réseaux cohérents. L'application à des MNT à très haute résolution (centimétrique) constitue un point de réflexion à investiguer dans le futur. Il semble qu'il existe un seuil de résolution, au-delà duquel l'indice de convergence ne serait plus pertinent pour révéler le réseau des talwegs. Au-delà de ce seuil, la convergence risque de n'exprimer que la rugosité du terrain. Particulièrement dans les *badlands*, la convergence rapporterait la micromorphologie du terrain plus que le réseau continu des talwegs. Ainsi, le rapport entre la taille de l'objet étudié et la résolution du MNT de base doit être considéré pour une extraction physiquement significative.

7.5. Liste des réseaux obtenus par la méthode CI sur les bassins de Draix

Les résultats cartographiques des réseaux extraits à partir de MNT avec la méthode CI sont présentés ci-dessous (a. bassin du Bouinenc à une résolution 25 m, b. bassin du moulin à une résolution de 1 m, c. bassin du Laval à une résolution de 1 m, d. ravine AJ à une résolution de 0.25 m).



Nom / Bassin	Données de base	Résolution / Echelle cartographique	Méthode d'extraction	Mesure de qualité	Remarques
Réseau secteur test du Moulin	Terrain	Terrain	Cartographie terrain	non	Réseau de référence pour l'évaluation qualité
Réseau CI ravine AJ	MNT drone	25 cm	Stéréophotogrammétrie à partir des images drones	non	Jacome, 2009 Corrélateur MicMac
Réseau CI ravine AJ	MNT drone Résolution dégradée	50 cm	Stéréophotogrammétrie à partir des images drones	non	Jacome, 2009 Corrélateur MicMac
Réseau CI Moulin	MNT LiDAR	50 cm	Méthode morphologique basée sur l'indice de convergence	oui	Campagne LiDAR Sintégra, 2007
Réseau CI Moulin	MNT LiDAR	1 m	Méthode morphologique basée sur l'indice de convergence	oui	Campagne LiDAR Sintégra, 2007
Réseau CI Moulin	MNT LiDAR Résolution dégradée	2 m, 4 m, 8 m	Méthode morphologique basée sur l'indice de convergence	Dérivable du réseau Moulin 1 m	Résolutions dégradées, données de base issues de la campagne LiDAR Sintégra, 2007
Réseau CI Laval	MNT LiDAR	1 m	Méthode morphologique basée sur l'indice de convergence	Dérivable du réseau Moulin 1 m	Campagne LiDAR Sintégra, 2007
Réseau CI Laval	MNT LiDAR Résolution dégradée	2 m, 4 m, 8 m	Méthode morphologique basée sur l'indice de convergence	Dérivable du réseau Moulin 1 m	Résolutions dégradées, données de base issues de la campagne LiDAR Sintégra, 2007
Réseau CI Laval	MNT BD Topo (IGN)	25 m	Méthode morphologique basée sur l'indice de convergence	non	Peu d'information sur le MNT lui-même
Réseau CI Bouinenc	MNT BD Topo (IGN)	25 m	Méthode morphologique basée sur l'indice de convergence	non	Peu d'information sur le MNT lui-même

Tableau 7.1. Liste des réseaux obtenus par la méthode CI sur les bassins de Draix et réseau de référence cartographié sur le terrain

Chapitre 8 : Validation. Proposition d'une méthode de comparaison par appariement hiérarchique de réseaux

L'évaluation de la qualité d'une représentation est indispensable, dans notre cas, pour deux raisons : 1) pour pouvoir juger de la performance d'une méthode d'extraction, comparer les méthodes et valider les réseaux extraits ; et 2) pour pouvoir quantifier les erreurs d'extraction susceptibles d'intervenir dans la description et l'analyse de la forme du réseau et de ses variabilités (parties 3 et 4).

L'évaluation d'un réseau extrait passe, habituellement, par la comparaison avec un réseau considéré comme référence. Si la comparaison visuelle, qualitative permet de réaliser une première évaluation, il est important de pouvoir quantifier les erreurs. Il n'existe à ce jour, dans la littérature, que peu de méthodes pour comparer deux réseaux. En mode manuel, il est possible de quantifier les erreurs. Cette opération est facile mais fastidieuse et ne peut être généralisée. En mode automatique, la méthode des buffers (Heipke *et al.*, 1997) permet d'évaluer la quantité de linéaire cohérent par rapport au réseau de référence, la sur-détection et la sous-détection. Cette méthode est facile à mettre en œuvre et intéressante. Elle est toutefois imprécise et souvent incomplète puisqu'elle dépend d'un seul critère de proximité géographique. La comparaison d'arborescence pose un problème d'ordre plus général lié au niveau de détail des représentations. D'où la question : comment comparer deux réseaux qui n'ont pas le même niveau de détails ? Ainsi, nous proposons une méthode plus complète qui prend en compte la notion de hiérarchie dans le réseau pour la comparaison des arborescences.

Dans ce chapitre, nous comparons les réseaux extraits à partir de la méthode basée sur l'indice de convergence à un réseau de référence. Ce dernier est ici un réseau cartographié sur le terrain. Nous présentons les résultats obtenus pour les deux premières méthodes de comparaison quantitatives puis la méthode mise en place et ses résultats.

8.1. Qu'est-ce que valider un réseau ?

8.1.1. Evaluation, qualité et validation des réseaux extraits

La validation d'une représentation est liée à l'évaluation de sa qualité. L'évaluation d'un réseau extrait est, le plus souvent, réalisée par la comparaison du réseau avec un réseau de référence. La comparaison permet de quantifier les éléments communs aux deux arborescences et les éléments en trop (sur-détection) ou en moins (sous-détection). Il est ensuite intéressant de déduire de cette comparaison des indicateurs de qualité. Le résultat des indicateurs pour un réseau donné permet de valider ou non le réseau : lorsque les résultats sont bons, le réseau est validé. A cela, plusieurs nuances fortes sont à apporter :

- 1) La notion de « bon résultat » est tout à fait relative. A partir de quelle valeur l'indicateur est-il considéré comme bon ? Aucune extraction n'est parfaite et il est important de pouvoir quantifier quel niveau de confiance on peut avoir concernant le réseau et les informations qui en seront dérivées.
- 2) La notion de « bon indicateur » est également très relative. Le (ou les) indicateur(s) traduisent un ou quelques aspects de ce que l'on appelle la qualité du réseau. Comme Polidori (1995) le montrait pour les MNT, une mesure de la qualité n'est pas absolue et doit être adaptée au contexte de travail. Dans ce travail, nous cherchons à traduire la sous-détection et la sur-détection sans prêter d'attention particulière à la précision du positionnement géographique. Cependant, des travaux s'intéressent à d'autres aspects de la qualité des réseaux tels que le positionnement géographique (Poggio et Soille, 2009) ou la localisation des sources (Montgomery et Foufoula-Géorgiou, 1993). Ainsi, le choix d'indicateurs de qualité adaptés est conditionné par l'utilisation prévue des réseaux.

L'évaluation de l'extraction permet, d'une part, de juger une méthode d'extraction et de comparer différentes méthodes pour en déduire la meilleure selon les critères fixés, et d'autre part, de quantifier les erreurs et de pouvoir étudier la propagation de l'incertitude de la production du MNT au calcul de descripteurs spatiaux (Oksanen, 2006). Nous nous intéressons ici à l'incertitude à chaque étape mais la propagation au cours de la chaîne de traitement n'est pas abordée.

8.1.2. Réseau de référence et limite de la comparaison

L'évaluation d'un réseau extrait repose sur la comparaison avec un réseau de référence. D'où les questions : comment obtenir un réseau de référence et comment s'assurer qu'il possède une qualité suffisante pour être considéré comme référence ? S'il est possible de répondre assez facilement à la première question, la deuxième est moins évidente et les réponses restent souvent floues. Le réseau considéré comme référence provient, généralement, d'une source différente (carte topographique, cartographie terrain, ...). Il peut avoir été construit à partir d'un même type de document mais à une résolution plus fine.

Le principal problème posé par la comparaison d'un réseau extrait à un réseau de référence est la gestion des différences de niveau de détail entre les représentations. Il est rare de posséder un réseau de référence décrit avec le même niveau de détail, exactement, que le réseau extrait. Un problème, plus secondaire dans ce travail mais qui peut avoir son importance, est posé par la précision du géoréférencement (*i.e.* référencement spatial) des documents de base puis des réseaux.

Le réseau de référence ici est un réseau cartographié sur le terrain (6.6). La cartographie de terrain produit des réseaux à une échelle très fine. Le niveau de détail est plus fin que celui atteint avec un MNT à 1m de résolution par exemple. En plus de ce secteur de référence, certains endroits précis du bassin et des réseaux extraits associés ont été vérifiés sur le terrain.

8.1.3. Comment comparer des arborescences ?

Par la comparaison, on tente de répondre aux questions suivantes (Heipke *et al.*, 1997) : quelle part du réseau extrait n'a pas de réalité par rapport à la référence (éléments extraits en trop) et quelle part du réseau de référence n'a pas été détectée (éléments extraits en moins) ? Dans le premier cas, on cherche à estimer la sur-détection et dans le deuxième, la sous-détection. Il n'existe à ce jour que peu de méthodes automatiques pour comparer deux réseaux.

La comparaison des arborescences a pour but d'évaluer leur proximité. Cette proximité peut porter sur différents aspects : leur géographie, leur géométrie ou encore leur topologie. Pour évaluer la qualité d'une représentation, il est nécessaire de disposer d'un outil qui permet de comparer de manière quantitative et synthétique deux réseaux (éventuellement à différentes échelles de représentation).

8.2. Evaluation globale par la méthode des buffers

8.2.1. Méthode des buffers et indicateurs de qualité

La méthode la plus utilisée pour comparer deux réseaux, parfois appelée méthode des buffers, est proposée par Heipke *et al.* (1997). Cette méthode repose sur la superposition géographique des réseaux. Elle permet de donner une estimation quantitative des erreurs de tracé sur la base d'un critère de proximité géographique. C'est une méthode de comparaison globale qui s'intéresse aux longueurs totales de sur et sous-détection.

Pour évaluer un réseau extrait (T) par rapport à une référence (R), la méthode des buffers cherche à repérer d'une part les portions du réseau extrait qui n'ont pas de réalité par rapport à la référence et d'autre part, les portions du réseau de référence qui ne se retrouvent pas dans l'extraction. Le principe de la méthode est de repérer les portions communes aux deux réseaux et les portions sur et sous-détectés par superposition des réseaux puis de mesurer leur longueur. En d'autres termes, on mesure la longueur du réseau extrait contenu dans le domaine du réseau de référence et inversement ; le domaine d'un réseau étant défini comme un *buffer* (ou zone tampon) autour du réseau (Figure 8.1). La largeur du domaine est déterminée par l'opérateur et son choix dépend de la précision d'évaluation requise en fonction de la résolution et de la précision du MNT et du type de terrain.

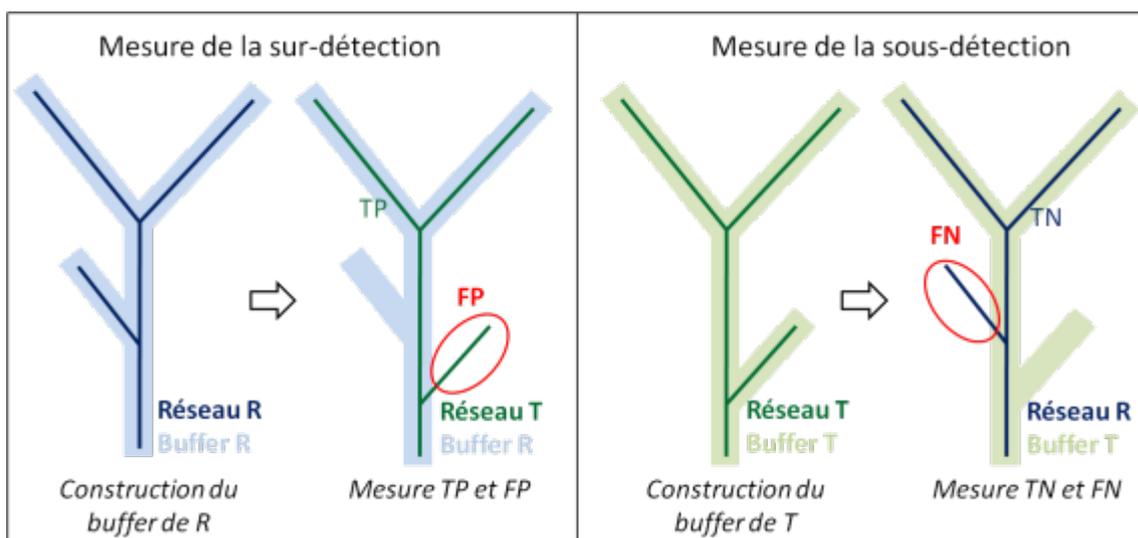


Figure 8.1. Principe de la mesure de sur et sous-détection par la méthode des buffers

Des paramètres d'erreur sont calculés à partir de cette superposition des domaines de réseaux. La longueur du réseau extrait qui n'est pas contenue dans le domaine de référence est notée FP (*False Positive*). Inversement, la longueur de référence qui n'est pas contenue dans le domaine du réseau extrait est notée FN (*False Negative*). FP et FN correspondent respectivement à la sur et sous-détection. Les portions de réseau extrait et de référence cohérentes sont respectivement appelées TP (*True Positive*) et TN (*True Negative*). La normalisation des paramètres d'erreur par la longueur totale du réseau de référence rend possible les comparaisons. Les valeurs de FP et FN proches de zéro traduisent une faible sur et sous-détection alors que des valeurs hautes (autour de 1) rendent compte d'importantes erreurs.

L'indicateur de qualité (IQ_B) défini par Heipke *et al.* (1997) résume l'évaluation du réseau (Eq.8.1). Il prend des valeurs entre 0 et 1 qui traduisent la qualité du réseau : plus le réseau extrait est conforme à la réalité plus son IQ_B est proche de 1.

$$IQ_B = \frac{TP}{TP + FP + FN} \quad (8.1)$$

Nous nous intéressons aux paramètres FN et FP qui traduisent respectivement la sous et sur-détection et dont les valeurs proches de zéro représentent des erreurs de détection minimales. Deux indicateurs d'erreur, déduits de ces paramètres, fournissent une évaluation quantitative plus facile à interpréter que l'indicateur global (IQ_B). Le premier, la balance des erreurs (EB), fait référence à l'équilibre géométrique de l'extraction entre les valeurs de sous et sur-détection. EB prend des valeurs entre 0 et 1 ; plus EB est proche de 0, plus le réseau est conforme à la réalité. Le second, la somme des erreurs, traduit le total des erreurs d'extraction ; l'interprétation des valeurs est la même que pour EB.

$$Error\ Balance\ (EB) = |FN_{normalised} - FP_{normalised}| \quad (8.2)$$

$$Error\ Sum\ (ES) = FN_{normalised} + FP_{normalised} \quad (8.3)$$

8.2.2. Résultats et discussion

La méthode des buffers a été appliquée pour comparer différentes méthodes d'extraction et différentes résolutions au réseau de référence.

8.2.2.1. Comparaison des méthodes d'extraction (CI vs. PC)

Les résultats de l'évaluation quantitative de trois réseaux extraits à partir de méthodes différentes sont présentés dans le Tableau 8.1. D'après cette évaluation, la méthode CI fournit le réseau le plus conforme à la réalité-terrain. Parmi tous ces réseaux, c'est celui qui présente les statistiques ayant les meilleurs statistiques : les indicateurs (EB et ES) sont les plus proches de zéro. Les deux autres réseaux montrent des valeurs de EB et ES plus élevées, ce qui traduit des extractions déséquilibrées avec de plus nombreuses erreurs. La méthode PC fournit des résultats qui restent meilleurs que la méthode classique à seuil de surface amont drainée unique (KRA).

Dans le détail, on observe, pour les réseaux issus des méthodes classiques et PC, que le déséquilibre montré par la forte valeur de EB, provient de FN normalisés élevés (*i.e.* une importante sous-détection). Au contraire, ces réseaux présentent des FP normalisés plutôt bas (*i.e.* une faible sous-détection). Dans ces deux cas, la plupart de la longueur des réseaux extraits correspond à la réalité-terrain : leur géométrie est correcte mais ils connaissent de nombreuses lacunes. Il semble que pour le même MNT, la méthode PC ait extrait moins d'information que la méthode CI. Cependant, le FP normalisé du réseau CI est légèrement plus élevé que pour les autres méthodes. Ce chiffre matérialise des erreurs de sur-détection regroupées et localisées dans un secteur sous couvert forestier (Figure 8.2).

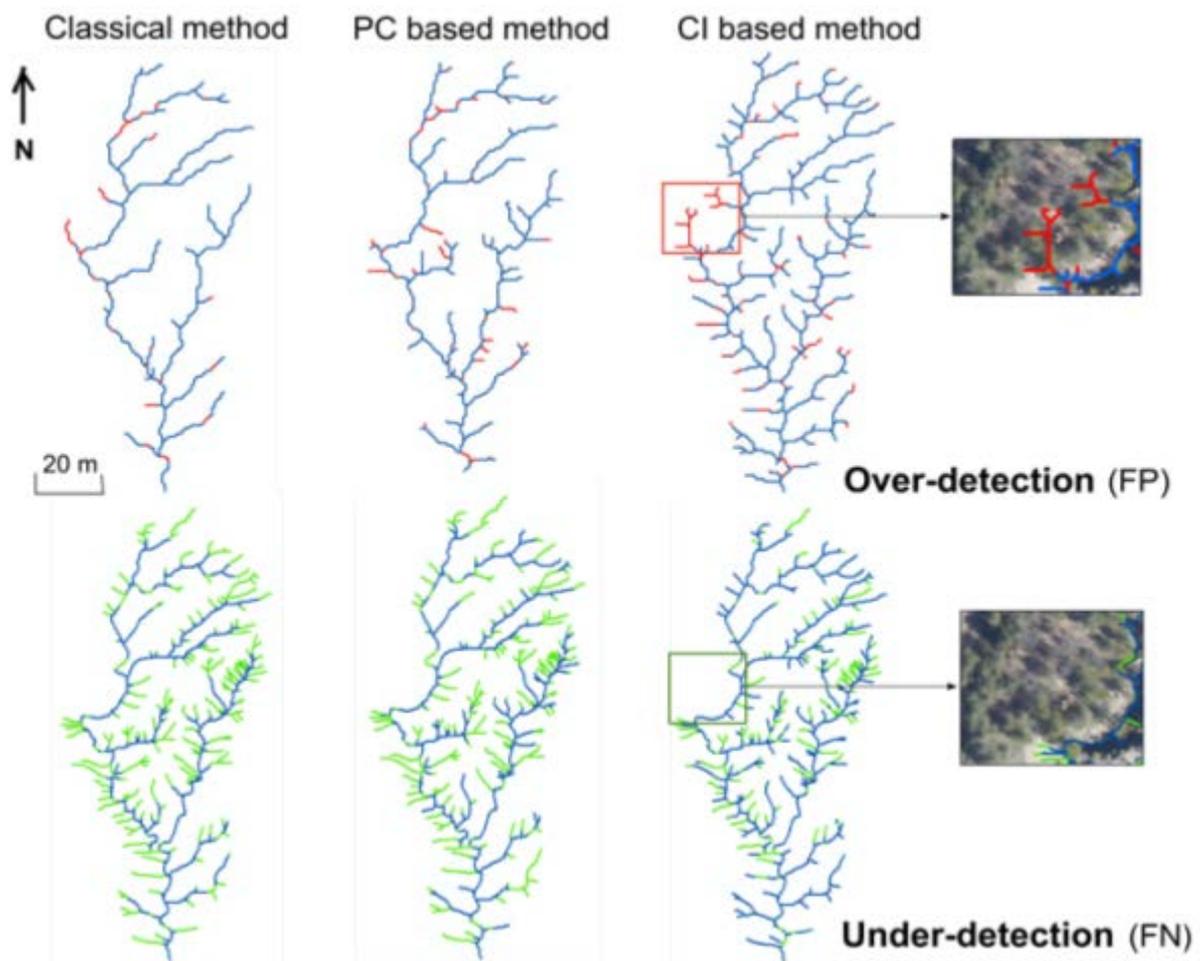


Figure 8.2. Comparaison des sur et sous-détection pour les réseaux extraits à partir des différentes méthodes sur le secteur test du bassin du Moulin. Les portions de réseaux sur-détectées (FN, false negative) sont indiquées en rouge et les portions sous-détectées (FP, false positive) en vert.

Le domaine associé à chaque réseau est défini par un *buffer* de deux mètres de large, en considérant que la valeur de deux fois la résolution approche le bruit des données en planimétrie. Plus la taille du *buffer* est petite, plus les paramètres FN et FP sont élevés. La mesure de qualité aide à évaluer la précision géométrique de l'extraction. L'effet de la taille du *buffer* et de la longueur des plus courts talwegs à supprimer sur ce type d'évaluation n'a pas été mesuré ni qualifié dans ce travail.

	Longueur totale (m)	FP (m)	FN (m)	FP _{normalisé}	FN _{normalisé}	EB	ES
KRA (CA _T = 50 m ²)	625	73	819	0.05	0.55	0.50	0.60
Méthode PC	754	109	755	0.07	0.51	0.43	0.58
Méthode IC	1216	215	427	0.14	0.29	0.14	0.43
Réseau de référence	1495	-	-	-	-	-	-

Tableau 8.1. Evaluation quantitative par la méthode des buffers de trois réseaux du secteur test du bassin du Moulin

8.2.2.2. Comparaison des réseaux extraits à partir de la méthode CI à différentes résolutions

L'évaluation quantitative par la méthode des buffers des réseaux issus de trois résolutions différentes, sur le secteur test, montrent des indicateurs d'erreurs (EB et ES) relativement proches de zéro (Tableau 8.2). Théoriquement, lorsque la résolution est plus fine, les réseaux extraits devraient manifester une sur-détection (FP normalisé) constante et une sous-détection (FN normalisé) plus faible puisque le dessin du réseau se rapproche de celui du réseau de référence. Ce qui devrait réduire les valeurs de EB et ES. Or, les résultats ne sont pas aussi clairs. Le réseau issu de la résolution de 50 cm possède des EB et ES légèrement plus élevés que le réseau à 1 m. Etant donné que l'essentiel du dessin des deux réseaux se ressemble, nous supposons que cette incohérence provient d'une imprécision de la position géographique du réseau due à la résolution. Comme précédemment, nous avons utilisé un *buffer* de deux mètres de largeur pour déterminer les domaines des réseaux.

Résolution MNT (m)	Longueur totale (m)	FP (m)	FN (m)	FP _{normalisé}	FN _{normalisé}	EB	ES
0.5	1151	235	501	0.16	0.34	0.18	0.49
1	1216	215	427	0.14	0.29	0.14	0.43
2	746	181	834	0.12	0.56	0.44	0.68
Réseau de référence	1495	-	-	-	-	-	-

Tableau 8.2. Comparaison de l'évaluation des réseaux extraits sur le secteur test du bassin du Moulin à l'aide de la méthode IC pour des MNT à différentes résolutions

8.2.2.3. Limites de la signification des résultats

La méthode des buffers apporte des informations quantitatives sur les éléments en plus et en moins du réseau extrait en se basant sur les longueurs. Ces informations constituent une première approche de la comparaison des réseaux. Toutefois, certaines anomalies peuvent perturber la signification de la longueur calculée, notamment lorsqu'il y a des différences de topologies fortes entre les deux réseaux à comparer. Dans certains cas, le talweg sur lequel est effectuée la mesure ne correspond pas forcément au talweg à partir duquel a été construit le *buffer* (Figure 8.3). Un deuxième problème de signification relatif à cette méthode intervient lorsque les réseaux comparés n'ont pas le même niveau de détail, ce qui est souvent le cas (il est rare de pouvoir trouver un réseau de référence cartographié avec le même niveau de détail que le réseau extrait). Dans ce cas, ce qui est perçu comme de la sous ou sur-détection ne peut être qu'une différence de niveau de détail.

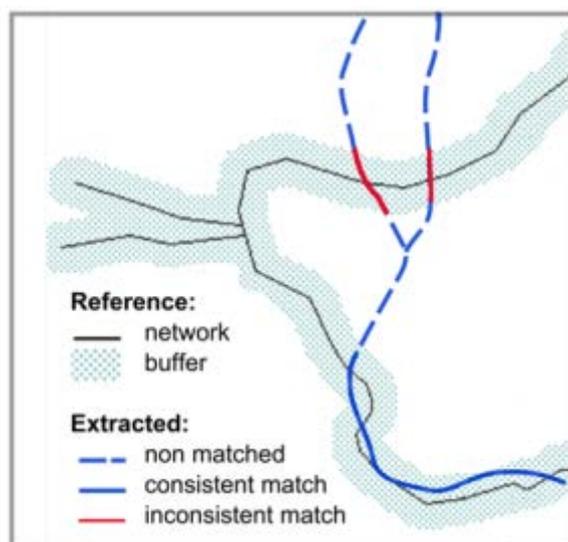


Figure 8.3. Incohérence de l'évaluation par la méthode des buffers : les longueurs mesurées ne sont plus significatives.

Cette méthode fournit des résultats très utiles et adaptés pour une évaluation globale de la proximité de deux réseaux. Dans le détail, leur signification est limitée. Lorsque les résultats sont proches, la méthode n'est pas assez précise pour affirmer qu'un réseau est meilleur que l'autre. Ceci s'explique en partie par le fait qu'elle repose sur un seul critère de proximité géographique alors qu'il semble important de prendre en compte la forme et la hiérarchie du réseau et donc d'intégrer un critère topologique. Par ailleurs, des comparaisons strictement topologiques sont possibles. Ferraro et Godin (2000, 2003) proposent l'adaptation d'une méthode de calcul de distance entre deux graphes pour la comparaison de plantes. La distance, dans ce cas, est définie comme le coût minimal de séquences d'opérations élémentaires nécessaires pour transformer un des graphes en l'autre.

Cependant, ces méthodes ne sont pas directement adaptées à des objets spatialisés pour lesquels la notion de géographie est primordiale.

8.3. Mise au point d'une méthode de comparaison par appariement hiérarchique de réseaux

Pour pallier les limites de la méthode des *buffers* décrites précédemment, nous proposons une méthode de comparaison de réseaux qui intègre des critères géographiques, géométriques mais aussi topologiques.

8.3.1. La méthode d'appariement hiérarchique proposée

8.3.1.1. Hypothèses et base de la réflexion

Les réseaux vectorisés correspondent à des graphes arborescents. Une arborescence est composée de nœuds reliés par des arêtes. L'ensemble des nœuds regroupe les confluences et les sources du réseau. Dans notre cas, chaque nœud possède au maximum 2 branches amont et exactement une branche aval (sauf l'exutoire). Les réseaux comparés doivent avoir le même exutoire. La méthode proposée s'appuie sur les sommets du graphe (dual des arêtes dans le graphe) et non sur les arêtes directement. En effet, les nœuds sont des objets souples et dont la géométrie est plus simple à manipuler, alors que les arêtes sont très sensibles au bruit : par exemple, la résolution spatiale impacte la géométrie et l'extension des drains.

Cette méthode a pour but de rechercher des couples de nœuds homologues entre le réseau extrait (T) et le réseau de référence (R). On cherche à identifier les nœuds communs entre les deux réseaux et les nœuds issus d'une sur-détection ou d'une sous-détection (Figure 8.4).

Pour cela, on procède en deux temps. Dans un premier temps, les nœuds sont classés par niveau hiérarchique de l'aval vers l'amont pour les deux réseaux. Puis, on procède à un appariement hiérarchique itératif : les nœuds de la classe 1 sont appariés puis ceux de la classe 2 jusqu'à la classe des sources qui est la dernière classe. L'appariement par classe est réalisé selon le critère de proximité géographique. Ainsi, il n'intervient qu'une fois la hiérarchie établie ; cette dernière permettant d'affecter un ordre de priorité dans l'appariement. Le schéma suivant (Figure 8.5) résume les étapes de la méthode qui sont décrites dans les paragraphes suivants.

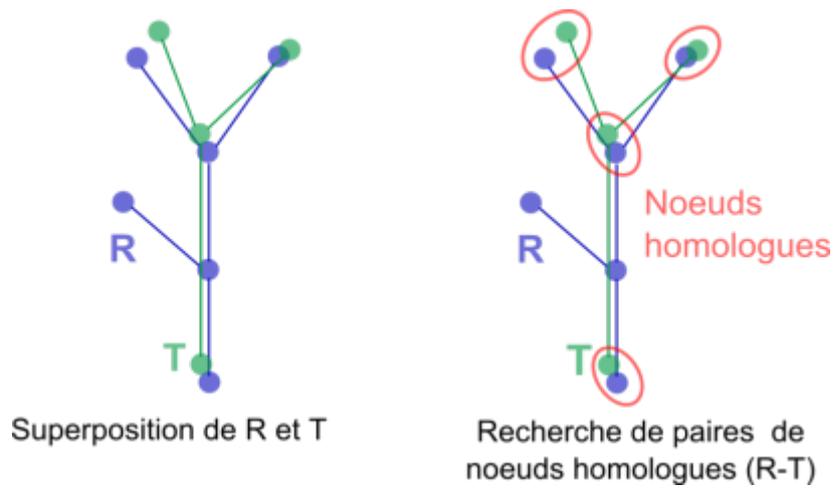


Figure 8.4. Principe de l'appariement des noeuds

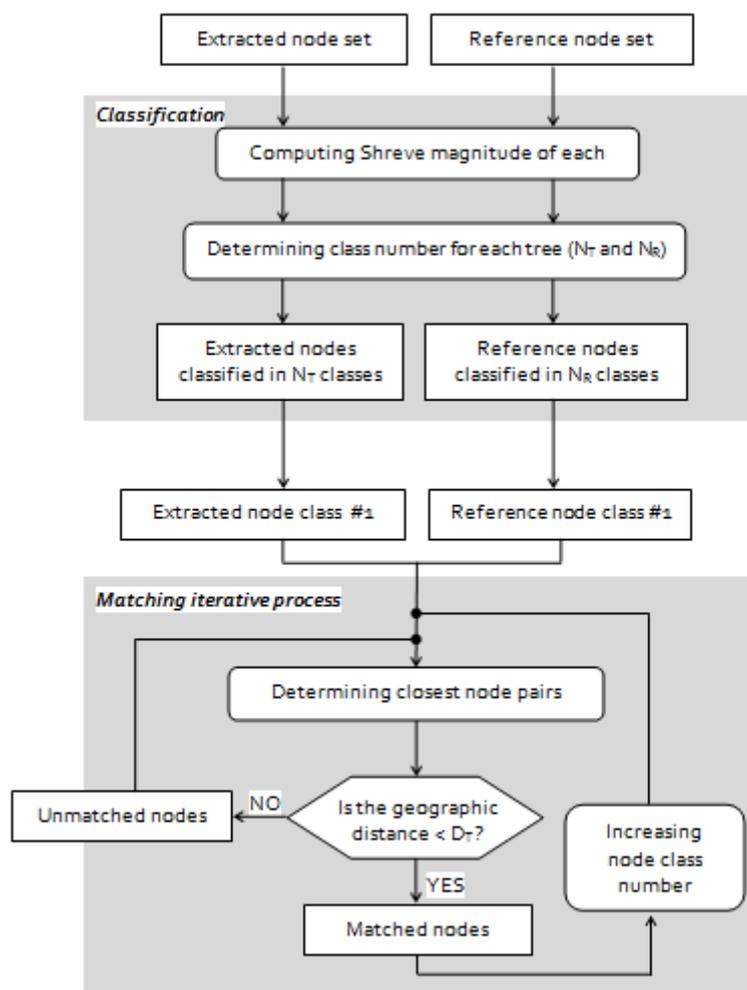


Figure 8.5. Schéma global de la méthode d'appariement hiérarchique

8.3.1.2. Choix des attributs nécessaires à la classification et l'appariement aux nœuds

La classification puis l'appariement des nœuds repose sur des attributs géométriques et topologiques : d'une part des attributs géométriques simples tels que les coordonnées x et y qui interviennent dans la construction du critère de proximité ; et d'autre part des attributs topologiques issus de la magnitude de Shreve (Shreve, 1966 ; 3.2.1.3) qui interviennent essentiellement dans la classification mais également dans l'appariement. Nous avons choisi la taxonomie de Shreve plutôt que celle de Strahler pour une raison simple : dans la classification de Shreve, les nœuds-sources ont le même poids le long du réseau alors que dans celle de Strahler, ils n'ont pas le même impact sur l'augmentation des ordres. La magnitude de chaque nœud est normalisée par la magnitude de l'ensemble du réseau (S_T) dans le but de pouvoir comparer la hiérarchisation de T et R (Figure 8.6). On l'appelle magnitude relative. Elle exprime alors la position amont/aval relative de chaque nœud dans l'arbre.

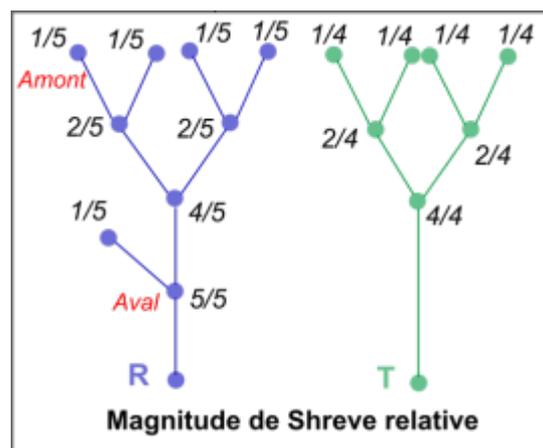


Figure 8.6. Définition de la magnitude de Shreve relative pour les deux réseaux R et T

8.3.1.3. Classification hiérarchique des nœuds

La deuxième étape consiste à classer les deux ensembles de nœuds (T et R) de manière hiérarchique selon leur importance dans l'arbre. La classification permet d'introduire un ordre de priorité dans la recherche des paires de nœuds.

L'importance d'un nœud dépend de la magnitude de ses deux nœuds amont (Figure 8.7). C'est la plus petite valeur des deux magnitudes relatives amont qui détermine le niveau d'importance du nœud : plus le minimum est élevé plus le nœud est considéré comme important dans l'arbre. La première classe regroupe les confluences que l'on peut qualifier de principales. Les sources n'ont pas d'amont donc elles constituent une classe en elles-mêmes qui correspond au dernier niveau

hiérarchique. Les exutoires sont homologues par définition, ils ne sont donc pas pris en compte dans la classification.

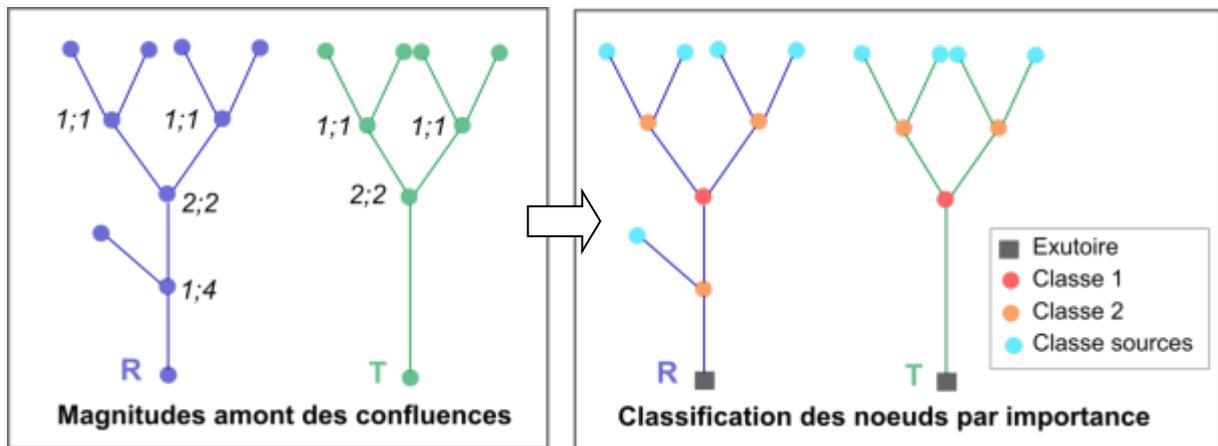


Figure 8.7. Magnitude de Shreve et classification des nœuds par importance pour l'appariement

Le nombre de classes (N) pour une arborescence donnée dépend directement du niveau de finesse de description du réseau : plus le réseau est détaillé (plus S_T est élevé), plus N est élevé. Il est possible de déterminer objectivement un nombre de classes théorique (N_T) en raisonnant sur un arbre binaire parfait (Figure 8.8). Dans ce cas, le nombre de classes correspond au nombre de niveaux hiérarchiques.

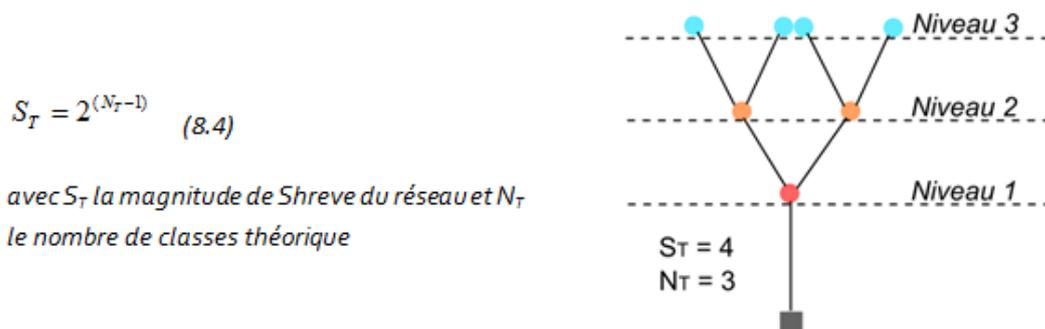


Figure 8.8. Calcul du nombre de classes théorique à partir de l'arbre binaire parfait

Or en pratique, ce nombre de niveaux théorique est trop élevé. D'une part, dans un réseau réel, la majorité des nœuds sont sources pour des niveaux hiérarchiques quelconques. Ainsi, le nombre de niveau obtenu à partir du nombre de source total est bien trop élevé par rapport au nombre théorique correspondant à l'arbre binaire parfait. D'autre part, l'appariement de nœuds issus d'un

même niveau s'avère trop contraignant : les nœuds homologues ne sont pas toujours exactement sur les mêmes niveaux hiérarchiques quand on passe d'un réseau à l'autre. D'où, apparait la nécessité de construire des classes hiérarchiques pour l'appariement qui contiennent plusieurs niveaux. Pour adapter ce nombre de classe théorique à un réseau réel, on introduit un facteur correctif de 2 (correspondant aux deux classes évidentes : les sources et l'exutoire). Ainsi, le nombre de niveaux pratique est donné par l'expression suivante :

$$N = E \left(\frac{\log(S_T)}{\log(2)} \right) - 2 \quad (8.5)$$

Souvent les deux arborescences sont décrites avec un niveau de détails différent. La méthode d'appariement par classes hiérarchiques rend possible la prise en compte de cette différence : on recherche des homologues uniquement sur les classes communes (les premières classes en partant de l'aval) et on laissera de côté les dernières classes (vers les sources) du réseau dont le niveau de détail est plus fin, qui n'ont pas d'équivalent dans l'autre réseau (Figure 8.9).

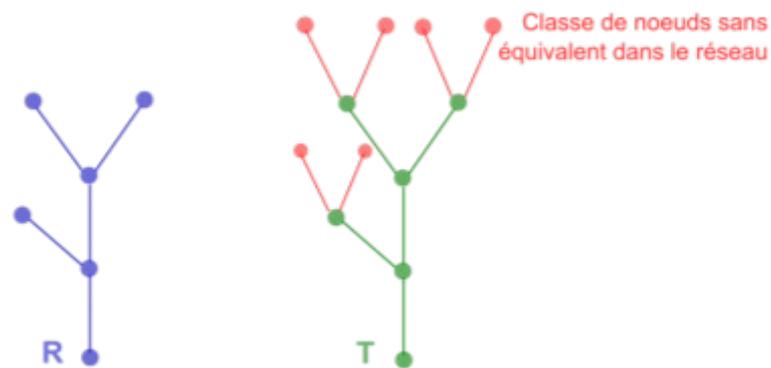


Figure 8.9. Différence de niveaux de détails dans la représentation des réseaux et classes équivalentes

A la fin de cette étape, on obtient deux ensembles de nœuds (T et R) repartis par classes hiérarchiques comparables.

8.3.1.4. Appariement ou recherche de couple de nœuds homologues

Dans la troisième étape, on recherche des couples de nœuds homologues par classe hiérarchique. L'appariement est un processus itératif réalisé depuis les premières classes de nœuds jusqu'aux sources. L'appariement est réalisée sur la base de la proximité géographique des nœuds : 1) des paires de nœuds sont recherchées par classes selon la condition du plus proche voisin à l'aide d'une matrice de distance ; 2) les paires sont validées si la distance au plus proche voisin est

inférieure au seuil de distance déterminé. Le choix du seuil dépend de la résolution du MNT, de la précision d'extraction du réseau et de la longueur des plus courtes distances entre les nœuds du réseau. D'autres conditions discriminantes peuvent être ajoutées telle que la symétrie de la confluence : si les indices de symétrie pour deux nœuds appariés ne sont pas du même ordre de grandeur, alors la paire est rejetée. Ceci a pour but d'affiner l'appariement cependant l'intégration d'autres conditions que la proximité géographique nécessite l'introduction de seuils supplémentaires.

Les nœuds non appariés sont remis en jeu à l'itération suivante. Ce qui permet de nuancer l'effet des limites de classes.

8.3.1.5. Vérification de la cohérence topologique des paires

Une fois l'appariement réalisé, on vérifie la cohérence topologique des couples de nœuds. Chaque couple représente le même nœud physique mais dans deux réseaux différents (T et R) ; ces deux représentations doivent avoir la même position topologique amont/aval dans leur arbre respectif. Si ce n'est pas le cas, la paire est non cohérente et donc rejetée. Le nombre de paires non cohérentes fournit un critère de qualité pertinent de l'appariement : si toutes les paires sont correctes alors cela signifie que l'appariement est de bonne qualité. Notons que, dans l'algorithme mis en place, seule la cohérence topologique avec les voisins les plus proches a été testée.

8.3.1.6. Calcul de statistiques d'appariement globales et hiérarchique

Enfin, on déduit de l'appariement des statistiques globales de ressemblance entre les deux réseaux. Par analogie à Heikpe *et al.* (1997), on compte le nombre de paires (P) obtenues puis le nombre de nœuds non appariés pour T (NA_T) et R (NA_R). Puis l'indicateur de qualité (IQ_H) est donné par la formule 8.6.

$$IQ_H = \frac{P}{P + NA_T + NA_R} \quad (8.6)$$

Cet indicateur de qualité peut être calculé pour chaque classe. Il est alors possible d'analyser cet indicateur, soit la qualité de l'appariement classe par classe.

8.3.2. Résultats

8.3.2.1. Les réseaux comparés et seuil de distance

Nous comparons la qualité de différents réseaux extraits sur le secteur test du bassin du Moulin (Figure 8.10). Les réseaux sont issus du MNT LiDAR à 1 m de résolution avec différentes méthodes. Ils sont évalués par comparaison avec le réseau de référence (Figure 6.13).

Les réseaux extraits sont issus de : 1) l'algorithme D8 avec un seuil amont de 20 cellules (T1) ; 2) la méthode morphologique basée sur la courbure en plan (T2) ; 3) la méthode morphologique basée sur l'indice de convergence (T3) ; 4) l'algorithme D8 mais sur un MNT bruité avec erreur de tracé modifiant la topologie du réseau (T4).

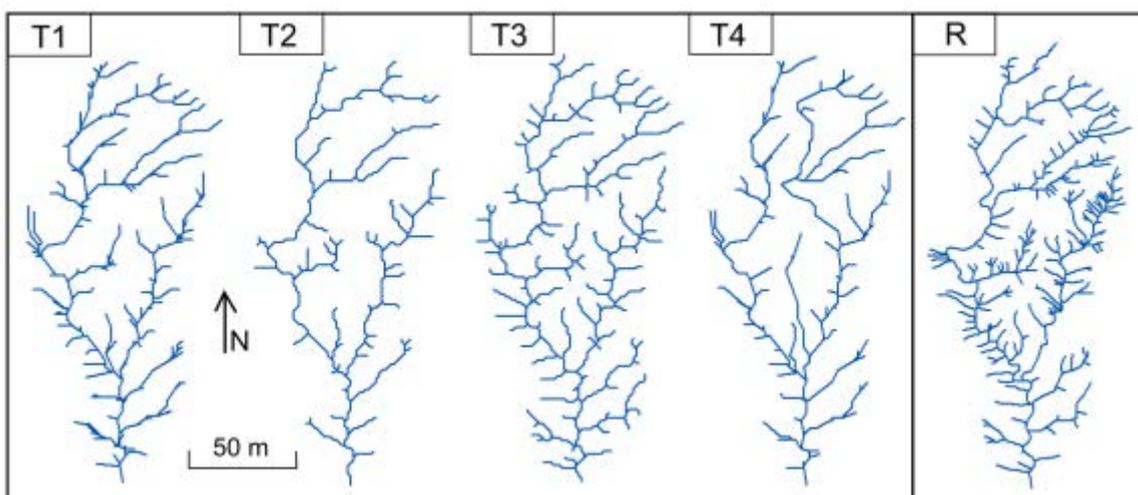


Figure 8.10. Réseaux extraits suivant différentes méthodes d'extraction et réseau de référence

Comme précédemment (8.2.2), nous avons choisi un seuil de distance de 2 m. Les distances entre les plus proches voisins (matrice des distances) sont courtes, la valeur de 2 m est une bonne valeur discriminante pour la validation des paires.

8.3.2.2. Les résultats globaux

L'appariement autorise la quantification de la partie commune entre T et R (*i.e.* le nombre P de paires réalisées), la sur-détection (*i.e.* le nombre NA_T de nœuds de T non appariés) et la sous-

détection (*i.e.* le nombre NA_R de nœuds de R non appariés). Les indicateurs IQ_B obtenus par la méthode des buffers et IQ_H obtenus par appariement hiérarchique sont proches dans leur signification : ils rendent possible une comparaison directe de la qualité des différents réseaux extraits en faisant un compromis entre ces trois paramètres de qualité (P , NA_T , NA_R). Le réseau extrait le plus conforme à la référence-terrain est celui dont l' IQ_H est le plus élevé. D'après les statistiques d'appariement obtenues (Tableau 8.3), les deux réseaux les plus conformes à la référence-terrain sont T₃ et T₁.

L'appariement hiérarchique fournit des résultats plus précis, ainsi des petites différences IQ_H peuvent être significatives contrairement à la méthode des buffers. Ainsi, leurs valeurs de IQ_H sont proches mais significatives plus que dans le cas des IQ_B . On déduit également de ce tableau (Tableau 8.3) des statistiques simples mais révélatrices : pour T₃, les nœuds appariés représentent 87% du nombre total de nœuds contre 76% pour T₁. Ainsi, T₁ présente une plus forte sur-détection.

Réseaux	Nb nœuds	Nb paires (P)	Non appariés		IQ_H	IQ_B
			T	R		
T ₁	238	181	56	162	0.45	0.55
T ₂	106	95	11	249	0.27	0.43
T ₃	200	174	26	170	0.47	0.61
T ₄	144	123	21	221	0.34	0.46

Tableau 8.3. Résultats quantitatifs globaux de comparaisons de réseaux

A la fin des procédures d'appariement des différents réseaux avec le réseau de référence, aucune paire n'est rejetée, 100% des paires réalisées ont une cohérence topologique d'ordre 1 (c'est-à-dire avec leurs voisins les plus proches).

8.3.2.3. Les résultats étape par étape de l'appariement hiérarchique

La principale différence de cette méthode avec celle des buffers est l'intégration d'une hiérarchie des nœuds qui permet d'obtenir des résultats de comparaison par étape en lien avec la position des nœuds dans le réseau. Chaque étape de l'appariement correspond à une classe hiérarchique, comme définie précédemment (8.3.1.3), mais les nœuds mis en jeu comptent les nœuds initiaux de la classe donnée auxquels on ajoute les nœuds non appariés de l'étape précédente.

La progression de l'appariement pour les réseaux les plus conformes T1 et T3 est montrée, quantitativement dans le Tableau 8.4 et spatialement sur la Figure 8.11. On distingue pour chaque étape les nœuds extraits (T) qui trouvent un homologue raisonnable dans R (en rouge) et ceux qui ne sont pas appariés (en vert). Les résultats traduisent différentes qualités d'extraction : pour T3, les nœuds non appariés sont localisés dans un secteur spécifique où le MNT est moins précis alors que pour T1, les nœuds non appariés sont dispersés dans l'espace. Grâce à ces cartes, la distribution spatiale des erreurs d'extraction peut être interprétée de manière significative. On en déduit dans le cas de T1, l'erreur provient plus de la méthode d'extraction que dans le cas que de T3 où l'erreur est plus liée à la qualité du MNT lui-même.

Avec la méthode CI (T3) qui cherche à donner un sens morphologique aux talwegs extraits et notamment aux ordres 1 (les plus instables à l'extraction), on dénombre uniquement 12 nœuds-sources qui n'ont pas de correspondance dans le réseau de référence.

Réseaux	T1			T3		
	Nb de nœuds	Nb de paires	IQ _H	Nb de nœuds	Nb de paires	IQ _H
Par étape 1	4	3	0.75	2	2	0.67
2	16	7	0.19	13	8	0.24
3	108	78	0.41	89	77	0.45
4	149	92	0.29	112	86	0.30

Tableau 8.4. Résultats étape par étape pour les réseaux T1 et T3 : le nombre de nœuds mis en jeu à chaque étape (comprenant le nombre initial de nœuds dans la classe ajouté au nombre de nœuds non appariés à l'étape précédente), le nombre de paires réalisées (l'exutoire n'est pas compté) et l'indicateurs de qualité.

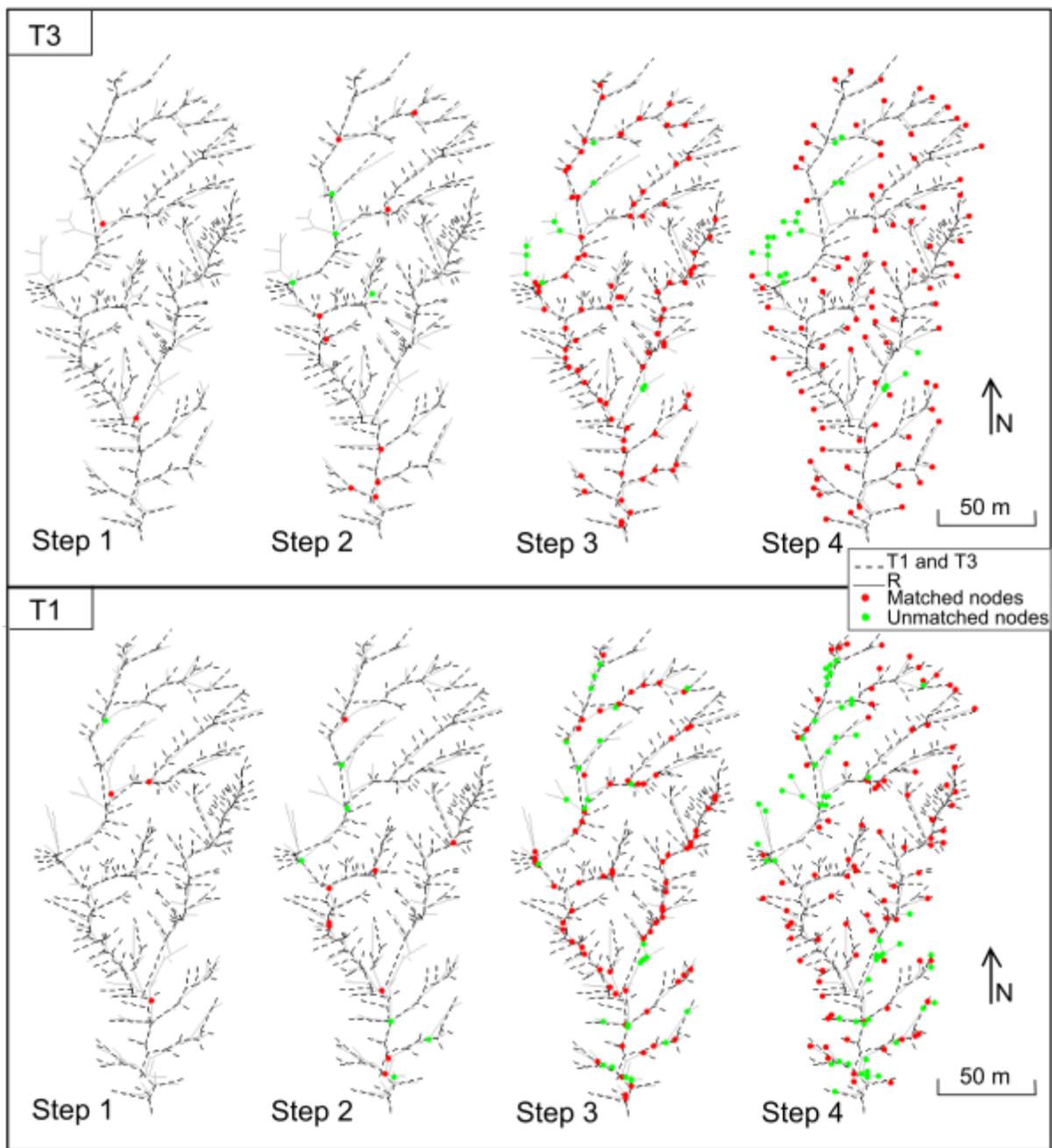


Figure 8.11. Cartes de progression de l'appariement étape par étape pour les réseaux T1 et T3

8.4. Discussion et conclusion

Nous avons proposé une méthode pour comparer, de manière quantitative, deux réseaux arborescents sur un même secteur géographique. Cette méthode a pour but d'évaluer la qualité d'un réseau extrait à partir d'un MNT par rapport à un réseau de référence, dans un contexte scientifique où de plus en plus de données et de méthodes sont disponibles pour cartographier des réseaux hydrographiques en général. La méthode mise en place répond à notre besoin de quantifier les erreurs par niveau hiérarchique dans le réseau. Pour ce faire, elle s'appuie sur un appariement hiérarchique des nœuds du graphe. Cette méthode, fondée sur une approche par objet, permet la maîtrise de la signification des mesures d'erreur. Ses principaux apports sont la quantification des erreurs par niveau hiérarchique, la qualification de la distribution spatiale claire et significative de ces erreurs et enfin, la possibilité de comparer des réseaux représentés avec des niveaux de détails différents. En effet, l'approche hiérarchique permet de distinguer les artefacts dus à l'extraction elle-même des nœuds non appariés du fait de différence d'échelle de représentation. Un unique paramètre doit être renseigné par l'opérateur : le seuil de distance acceptable pour l'appariement. Notons qu'il est possible de rajouter des conditions discriminantes sur l'appariement qui permettent d'ajuster la méthode à des cas de réseaux différents.

Les résultats globaux de la comparaison de réseaux extraits par différentes méthodes avec le réseau de référence sur le secteur test du bassin du Moulin montrent que le réseau CI est le plus conforme. La spatialisation des erreurs de sur-détection présente un intérêt pour la compréhension de l'impact de la méthode. Elle montre pour la méthode CI, des erreurs très localisées qui se situent dans les secteurs sous couvert forestier. Une différence importante de qualité est remarquable entre les secteurs nus et les secteurs boisés où les résultats sont moins cohérents. Au vu des résultats de l'évaluation, il est clair que cette méthode est appropriée et validée pour les secteurs de *badlands* et autres bassins de sols nus. Dans les secteurs boisés, l'extraction est moins performante et rappelle la principale limite de la méthode. Le rôle joué par la couverture végétale dans la qualité des réseaux extraits va dans le sens d'une réflexion sur la prise en compte de données externes au MNT sur la végétalisation pour renforcer la signification des talwegs extraits.

Résumé de la partie 3

Cette partie s'attache à l'extraction de réseaux de talwegs révélateurs des formes contenues dans le MNT puis à la validation de ce réseau par la quantification des erreurs d'extraction. La méthode d'extraction mise en place est fondée sur la combinaison entre un indice morphologique calculé à partir du MNT et un algorithme de drainage classique. Elle repose sur trois étapes : 1) la détection d'aires de convergence des écoulements significatives ; 2) la mise en évidence d'une surface de fonds de ravine continue et arborescente ; 3) et enfin, l'extraction d'un réseau de talwegs vectoriels. Cette méthode utilise comme paramètre une statistique du bruit du MNT pour déterminer la significativité des convergences. Pour évaluer finement le réseau extrait et la capacité de la méthode d'extraction à représenter les formes, nous avons mis en place une méthode de comparaison de réseaux procédant par niveau hiérarchique. Elle compare deux arborescences en recherchant des couples de nœuds homologues : on recherche pour chaque nœud du réseau extrait, le nœud qui lui correspond dans le réseau de référence. Une classification préalable des nœuds selon leur hiérarchie introduit un ordre de priorité dans la recherche des paires. Nous avons comparé le réseau extrait à un réseau de référence sur le secteur test du bassin du Moulin. Les résultats montrent une cohérence globale du réseau extrait avec une représentation des formes satisfaisante. Dans le détail, on observe une disparité entre les secteurs nus et les secteurs situés sous couvert végétal. Sous couvert végétal, les erreurs d'extraction identifiées s'expliquent par une moins bonne représentation des formes sur le MNT. On mesure, par contre, une très forte conformité du réseau extrait par rapport à la référence dans les secteurs nus, y compris pour les talwegs amont qui sont généralement instables à l'extraction avec les méthodes plus classiques.

Partie 4

Descripteurs numériques locaux de réseaux : obtention, analyse hiérarchisée et passage à des descripteurs thématiques

Les données (image, MNT) et méthodes numériques (SIG) constituent un outil puissant pour la géomorphologie et en particulier l'étude des secteurs de dissection. La géomorphologie se focalise sur la description et la classification des formes du terrain, la caractérisation des processus et l'association entre les formes du terrain et les processus tandis que les données numériques apportent des informations sur la localisation et la distribution des formes, sur la composition de la surface voire de sub-surface et sur l'altitude de la surface (Smith et Pain, 2009). Une description fine de l'espace est nécessaire pour caractériser les formes du relief et mettre en évidence des variabilités spatiales. Cette description peut être mise en relation avec des types de fonctionnement à travers les modèles morphologiques (1.3) et participe ainsi de la compréhension des dynamiques (passées et actuelles) des bassins de *badlands*, dans leur globalité et dans les sous-ensembles. La morphométrie classique propose des descripteurs topologiques et géométriques. Le développement des MNT permet une approche renouvelée fondée sur les données et méthodes numériques (MNT et SIG). Par définition, les MNT sont porteurs d'information riche sur le relief, mais l'extraction des descripteurs nécessite des méthodes stables et adaptées.

Au-delà de l'extraction du réseau et de sa schématisation en tronçons, objet des chapitres précédents, on s'intéresse à l'estimation avec le MNT de paramètres numériques. Plus précisément, on souhaite définir quels descripteurs géomorphométriques sont pertinents pour décrire et caractériser les réseaux de ravines à différentes échelles. Ces éléments numériques sont fondamentaux, pour entrer dans des schémas de connaissance des *badlands*, pour mettre en

évidence des variabilités spatiales significatives, bases d'une meilleure compréhension du fonctionnement, de modélisations améliorées et ouvrant des possibilités de comparaisons entre bassins versants.

La numérisation à partir de MNT permet également d'en maîtriser la qualité grâce à une vision plus homogène, plus maîtrisée, moins subjective et plus complète des réseaux et de leur organisation. Toutefois ces extractions sont liées à l'échelle et nous prendrons comme leitmotiv l'impact des échelles sur les estimations des différents paramètres.

Pour arriver à cet objectif, on va développer ces idées en deux parties : une première partie méthodologique porte sur le choix et les méthodes d'obtention de descripteurs liés à la morphologie des réseaux. On partira de descripteurs simples et classiques tels que pente et longueur, pour s'intéresser ensuite à des descripteurs plus élaborés tels que les angles de confluence et l'encaissement. La hiérarchie hydrographique (type Strahler) sera utilisée comme outil essentiel pour décrire et analyser de manière organisée l'ensemble des paramètres caractéristiques du réseau.

Une deuxième partie proposera une transformation de ces paramètres numériques hiérarchisés vers des paramètres thématiques de type ravine ou rigole, montrant le potentiel de ces outils pour une cartographie automatique d'objets morphologiques.

Chapitre 9 : Obtention des descripteurs numériques de réseaux

Le MNT représente l'état du relief terrestre, résultat d'une combinaison de processus d'érosion dans le temps et l'espace, d'un secteur géographique à un instant donné de son histoire. De manière général, il constitue donc un document adapté et riche pour caractériser les éléments du relief, apportant des réponses quantitatives et spatialisées dont l'incertitude peut être estimée et modélisée (Wood, 1996). Cependant, les solutions de description du relief du MNT sont dépendantes et fixées par les résolutions spatiale et temporelle des données.

Le but principal de la géomorphométrie est l'extraction de descripteurs et d'objets à partir de MNT (Pike *et al.*, 2008). L'extraction d'informations spatiales nécessite des choix méthodologiques fondamentaux. On se demande comment mesurer numériquement des descripteurs pertinents pour décrire les réseaux de ravines et quelles sont les résolutions qui permettent de mettre en évidence des caractéristiques des *badlands*. Sachant que les ravines ont la particularité d'être très hiérarchisées, on cherche à analyser les descripteurs géomorphologiques en fonction de la position amont-aval des éléments dans le réseau. Dans ce chapitre, l'objectif est de présenter des méthodes d'extraction de descripteurs du réseau pertinents pour la description de la morphologie des *badlands*, puis d'analyser les résultats en considérant l'impact de la résolution et la hiérarchie spatiale.

9.1. Eléments de support et contraintes pour la description des réseaux

9.1.1. Impact de la résolution sur les réseaux et leurs paramètres

Les formes contenues dans le MNT varient avec la résolution. Plus la résolution est haute, plus le relief est décrit finement. Dans les *badlands*, des objets morphologiques (Tableau 6.3) de plus en plus menus sont représentés. Inversement, lorsque la résolution devient plus basse, les crêtes s'écrasent et les incisions dans les versants s'effacent. De fait, la signification des descripteurs de forme est fortement dépendante de la résolution du MNT (Vaze *et al.*, 2010). Quand change la résolution, la quasi-totalité des paramètres (pentes, longueurs, nombre, angles, etc.) évoluent

numériquement mais changent également de signification propre (par exemple, une pente à 1 m et une pente à 50 m de résolution ne recouvrent pas les mêmes notions ; Puech *et al.*, 2003).

Nous donnons ci-dessous quelques éléments visuels pour apprécier l'impact de la résolution sur formes et réseau. Les figures 9.1 et 9.2 montrent en 3D les bassins du Moulin et du Laval à deux résolutions. La figure 9.3 illustre l'influence de la résolution sur les formes du MNT qui joue sur la représentation du réseau lui-même (Martz et Garbrecht, 1994). On observe d'une part une simplification du dessin plus la résolution est grossière : moins d'éléments du réseau sont représentés. D'autre part, on observe un recul des têtes de ravine. Ce recul sur les têtes est moins visible que *l'effeuillage* du réseau qui fait disparaître les drains les plus amont et se traduit directement par une baisse de la densité de drainage (Dd).

On reviendra sur les impacts de la résolution sur l'obtention des descripteurs tout au long de ce chapitre.

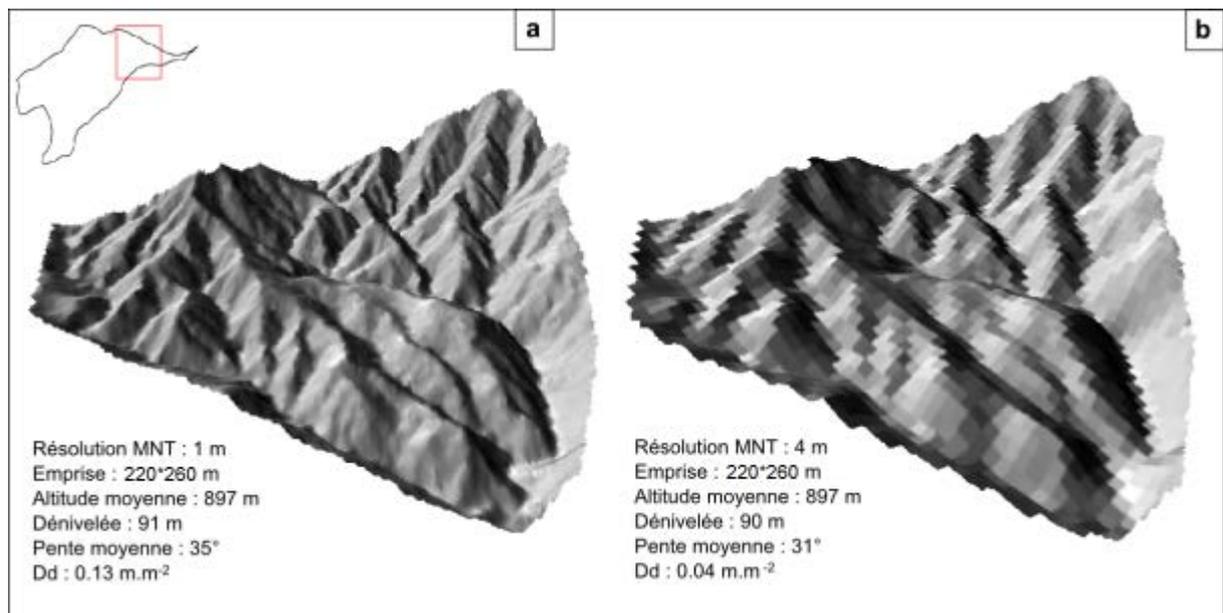


Figure 9.1. Vues 3D d'un MNT couvrant le secteur du bassin du Moulin et principales caractéristiques de formes associées à deux résolutions (1 m et 4 m). La pente moyenne est la pente obtenue par pixel selon la méthode présentée paragraphe 2.2.2. La densité de drainage est celle obtenue à partir du réseau CI.

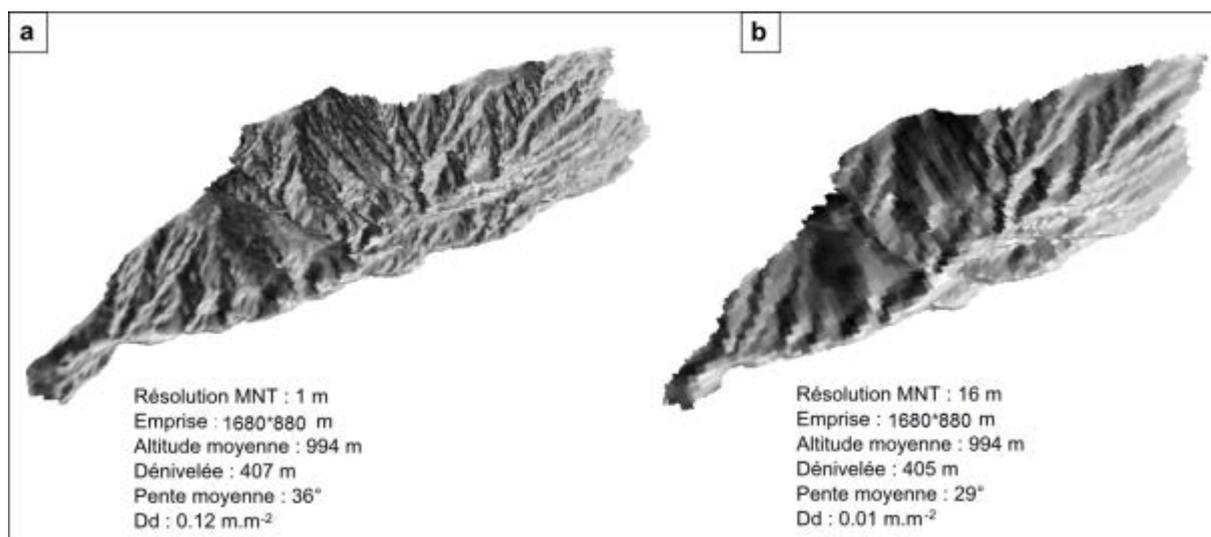


Figure 9.2. Vues 3D d'un MNT du bassin du Laval et principales caractéristiques de formes associées à deux résolutions (1 m et 16 m). La pente moyenne est la pente obtenue par pixel selon la méthode présentée paragraphe 2.2.2. La densité de drainage est celle obtenue à partir du réseau CI.

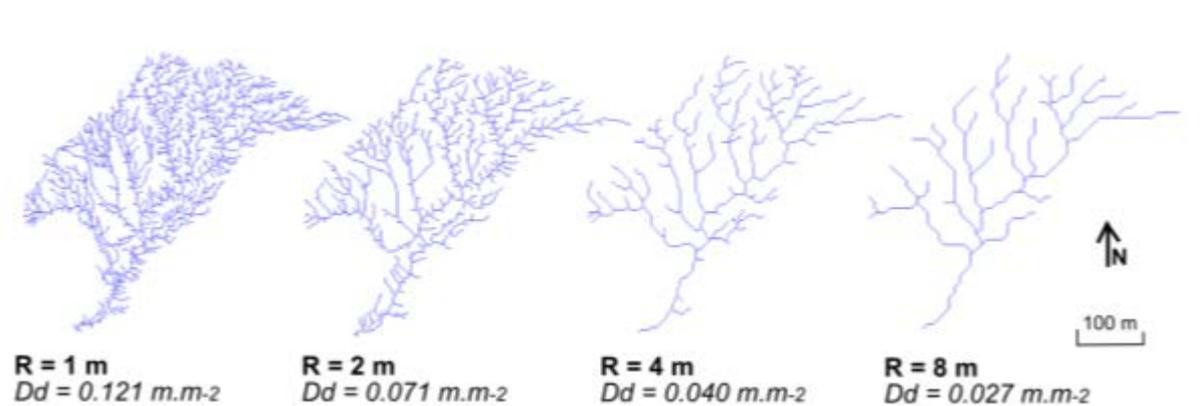


Figure 9.3. Exemple de l'influence de la résolution sur les représentations du réseaux de talwegs (bassin du Moulin)

9.1.2. Du réseau de ravines au graphe

Selon les hypothèses exprimées au chapitre 5, on schématise les réseaux de ravines à travers un modèle filaire.

9.1.2.1. Dichotomie réseau / versant

Dans la vision naturaliste des réseaux de ravines, la séparation chenaux et versants est fondamentale. Le modèle filaire impose une simplification des versants qui sont schématisés par des facettes délimitées par les talwegs d'une part et les lignes de crêtes d'autre part. A noter que la délimitation des facettes est différente selon qu'il s'agit d'un arc intermédiaire ou d'un arc de départ du réseau (Figure 9.4). Dans cette représentation, les versants sont omis lors de la représentation géométrique et seules les caractéristiques de facettes sont rattachées soit aux nœuds soit aux arcs.

9.1.2.2. Passage du réseau au graphe

Ce modèle de représentation des données extraites du MNT, à différents niveaux, repose sur les propriétés d'abstraction du réseau. En SIG, un réseau est constitué d'un ensemble de nœuds (x,y) et d'arcs (suite de vertices x_i,y_i). Dans cette représentation géométrique en planimétrie du réseau, on attribue à chaque nœud des descripteurs de nœuds et facettes et à chaque arête des descripteurs d'arcs et de facettes (Figure 9.4). En théorie des graphes, ce réseau est traduit sous la forme d'un ensemble de sommets et d'arêtes auxquels sont attribués des valeurs, appelé graphe valué. Ce graphe valué associé oublie la géométrie, *i.e.* la position spatiale des entités (nœuds, arcs), pour ne garder que l'information topologique de connexion entre les entités. Les informations spatiales sont réintroduites sous la forme de valeurs qui deviennent attributs de sommets ou d'arêtes. Les graphes valués constituent un outil puissant pour la description fine de l'espace dans les réseaux de ravines.

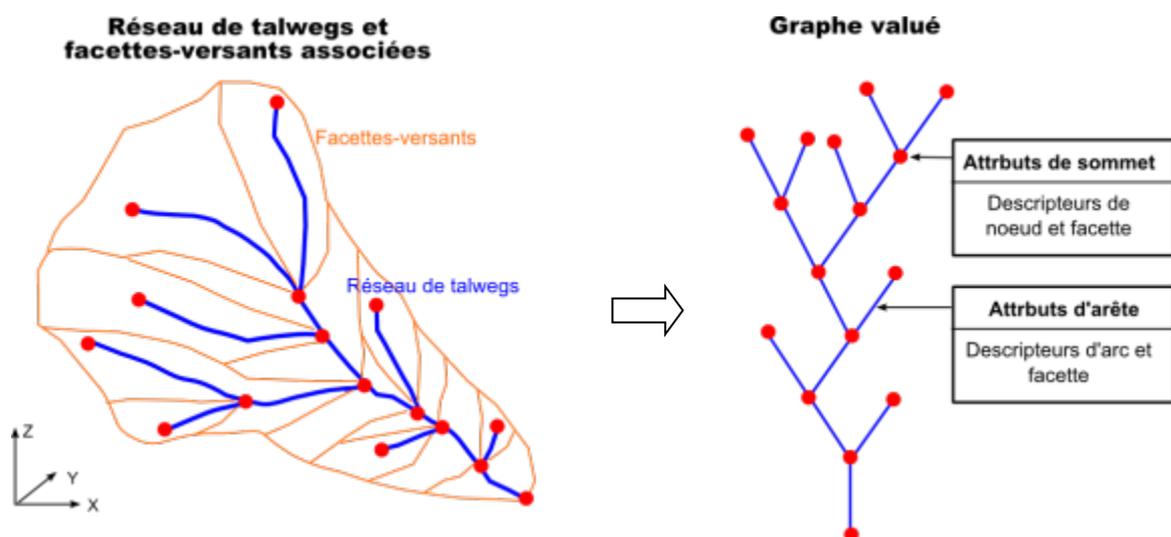


Figure 9.4. Représentation spatiale du réseau et des facettes-versants associées et schéma de graphe valué correspondant

Notons qu'en pratique, la structure topologique des réseaux est légèrement modifiée pour que les graphes soient binaires (*i.e.* chaque sommet a un degré supérieur au plus égal 2). En cas de confluence à plus de deux arêtes amont, des arêtes virtuelles de longueur nulle sont insérées. Cette modification topologique permet de simplifier la topologie et l'automatisation des calculs de descripteurs sans perturber la géométrie.

9.1.2.3. Différentes représentations possibles et leur vocabulaire

Il y a plusieurs représentations possibles des réseaux de talwegs qui servent dans les différentes phases d'extraction et d'analyse : optique physique, SIG, ou abstraction par les graphes (Figure 9.5). A chaque vision est associé un vocabulaire spécifique (Tableau 9.1).

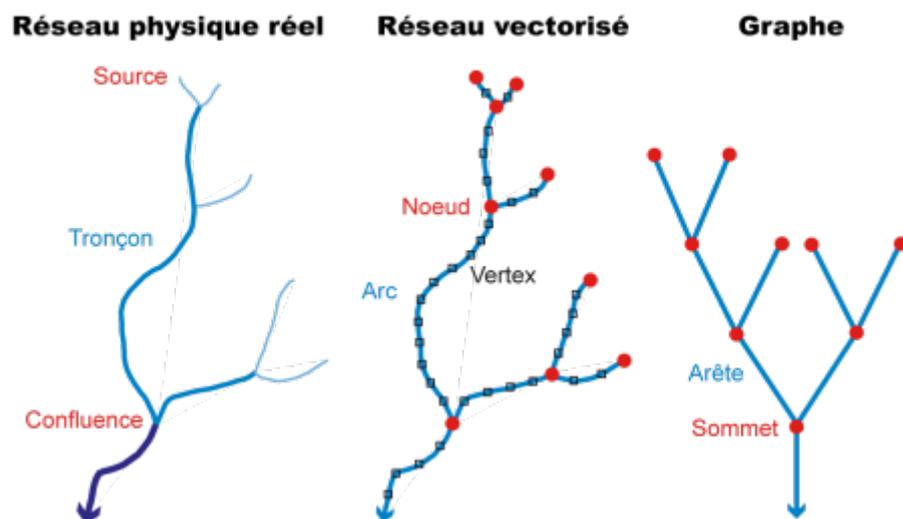


Figure 9.5. Trois représentations de réseau de talwegs et sémantique associée

- Dans la réalité physique, les *badlands* sont composés d'éléments de différentes tailles (ravin, ravines, rigoles, griffures). La linéarisation définit un réseau de talwegs avec ses confluences, sources et exutoire.
- Le réseau réel est représenté dans un système d'information géographique sous forme d'objets vecteurs. Le réseau est alors découpé en unités appelées arcs, définis comme la portion de linéaire entre deux nœuds (correspondant aux confluences, sources et exutoire). En mode vecteur, la géométrie de l'arc est composée par un ensemble de points appelés vertices reliés entre eux par des segments de droite ; ces segments sont

appelés segments unitaires. De ce mode de représentation résulte un modèle géographique de réseau.

- Enfin, au niveau d'abstraction supérieur, le réseau est représenté sous la forme d'un graphe arborescent (ou schéma topologique d'arborescence), arbre orienté décomposé en arêtes orientées et sommets (nœuds internes, feuilles, racine). Les sommets sont les nœuds du réseau vecteur et les arêtes les liens entre les nœuds. L'arborescence est un graphe sans cycle et avec une seule racine et avec une orientation des arêtes qui pointent toutes vers la racine. Ce graphe arborescent est valué aux niveaux des sommets et des arêtes (*i.e.* des valeurs numériques sont attribuées aux éléments du graphe). Par exemple, la géométrie des arcs (longueurs, indice de sinuosité, etc.) est attribuée aux arêtes.

	ensemble	lignes	points
Réalité physique	Réseau de ravines (ravin, ravines, rigoles, griffures)	Linéarisé en talwegs	Confluences, sources, exutoire
Modèle de données SIG	Réseau	Arcs, composés de segments	Nœuds pour les limites d'arcs et vertices pour les limites de segments
Théorie des graphes	Arborescences	Arêtes	Sommets : Nœuds internes, feuilles, racine

Tableau 9.1. Tableau récapitulatif du vocabulaire dans les différentes représentations

- En plus de ces représentations, on associe à la représentation sous forme de graphe un niveau hydrologique, qui introduit la continuité hydraulique issue de la classification de Strahler (Strahler, 1957 ; 3.2.1.2). La classification de Strahler, basée sur la topologie des arêtes, permet de définir de nouveaux individus qui ont un sens hydraulique. Dans ce schéma, on appellera drain (ou tronçon) d'ordre n , une suite d'arêtes contiguës de même ordre n de Strahler et appartenant au même chemin vers l'exutoire. Cette vision nous fait quitter le mode local pour une représentation plus globale introduisant les cheminements de l'eau et des matériaux.

9.1.3. Des descripteurs satisfaisant aux besoins de la morphologie et aux contraintes liées au MNT

Il existe une multitude de descripteurs possibles que l'on peut extraire du MNT. La grande variété des descripteurs traduit la pluralité de l'espace et les multiples manières de l'aborder. La construction de descripteurs est déterminée par les besoins de la géomorphologie pour comprendre le fonctionnement d'un système et les possibilités et contraintes des représentations MNT. L'objectif de ce paragraphe est de faire apparaître le potentiel de la numérisation du relief pour offrir une vision complète des réseaux de ravines, sachant que dans les *badlands*, on cherche le plus souvent à caractériser des volumes et des incisions.

Pour montrer la difficulté et le grand nombre de descripteurs numériques possibles, nous proposons de passer rapidement en revue les provenant d'une part des besoins impliqués par la morphologie des *badlands* et d'autre part des contraintes d'extraction à partir d'un MNT.

9.1.3.1. Besoins impliqués par la morphologie des *badlands*

Selon Chorley (1971), la vision morphométrique distingue trois catégories des descripteurs : les descripteurs linéaires, surfaciques et ceux relatifs au relief (3.1). On retient de ces catégories une différenciation entre la description planimétrique de la forme et celle centrée sur la troisième dimension. Dans le détail des descripteurs morphométriques, on distingue également ceux qui décrivent la topologie de l'objet de ceux qui décrivent sa géométrie. De plus, nous avons identifié une segmentation spatiale de l'espace justifiée entre chenal et versants (1.2). Ces deux catégories morphologiques sont représentatives des processus d'érosion en lien avec la forme du relief et spécifiques aux secteurs disséqués. Nous retenons donc des approches morphométriques classiques deux principales oppositions : chenal/versant et planimétrie/relief (2D / 3D).

En secteur de forte dissection, les traits que l'on cherche le plus souvent à aborder sont les caractéristiques de dénivelée, de pente, d'encaissement, de développement et organisation spatiale des incisions. Ces caractéristiques présentent un intérêt de par leur potentiel d'estimation et d'explication des volumes érodés et du transport de l'eau et des matériaux vers l'exutoire. La Figure 9.6 indique quelques descripteurs pouvant être intégrés au schéma de graphe valué. Dans ce schéma, on cherche à caractériser le réseau et ses facettes associées qui correspondent à des objets morphologiques qui peuvent être extraits à partir de MNT. Ces descripteurs appartiennent à différents types simples en fonction de leur nature morphométrique. L'attribut de surface des facettes fait référence à l'espace versant, décrit en géométrie planimétrique. Les attributs de hiérarchie (ordre de Strahler et magnitude de Shreve) des arcs décrivent un aspect topologique des chenaux en planimétrie. Les attributs de pente (arc ou facette) traduisent un trait du relief (3D).

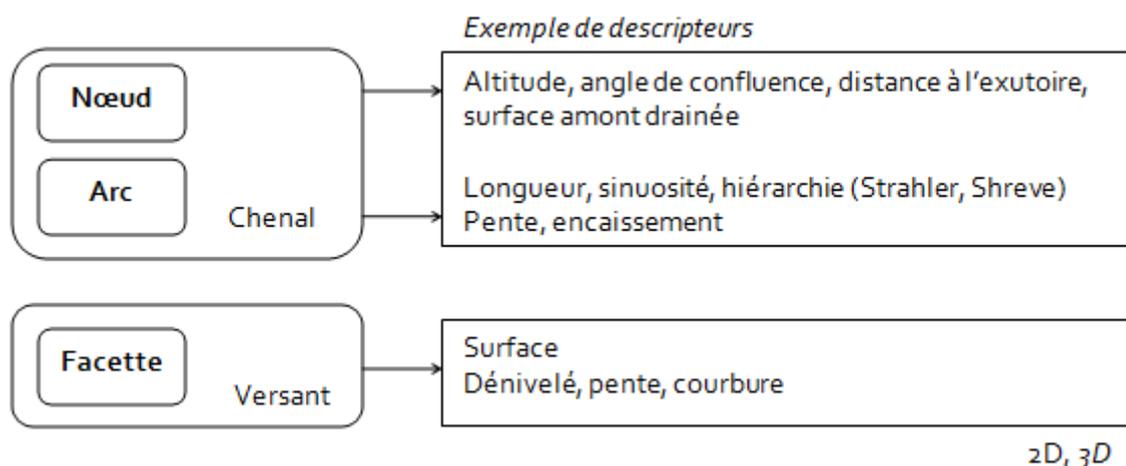


Figure 9.6. Exemples de descripteurs possibles, au croisement entre la morphométrie classique et le potentiel des MNT

9.1.3.2. Contraintes d'extraction à partir de MNT

Le potentiel du MNT pour la caractérisation du relief est considérable et les méthodes pour l'extraction de descripteurs sont variées. Pour répondre aux questions actuelles sur la connaissance des *badlands*, plusieurs descripteurs numériques sont envisageables et peuvent être extraits. Nous avons mis en évidence, en partie 1, trois niveaux d'extraction des descripteurs spatiaux numériques : extraction directe du MNT (altitude), extraction dérivée du MNT (indices morphologiques dérivées de l'altitude), calcul à partir d'objets morphologiques extraits du MNT (descripteurs caractérisant la forme de l'objet). Les méthodes d'extraction des descripteurs sont conditionnées par les possibilités et limites des outils SIG. Dans les SIG, les données spatialisées possèdent une géométrie donnée : grille raster ou objet vecteur. La géométrie vectorielle admet trois types de primitives géométriques possibles (*i.e.* point, ligne, polygone) qui permettent des représentations de l'information sous forme ponctuelle, linéaire ou surfacique. Par ailleurs, le choix de la résolution du MNT est un élément décisif du calcul et de la signification des paramètres extraits. De plus, l'extraction est réalisée selon une fenêtre d'analyse donnée. La fenêtre d'analyse correspond à la taille et éventuellement la forme de l'espace considéré pour le calcul du descripteur. Nous avons le choix entre trois types de fenêtres possibles : les fenêtres locales, globales et de cheminement. On qualifie de local, un descripteur qui se réfère un arc ou un nœud du réseau (par exemple, la longueur d'un arc) et de global, un descripteur qui concerne l'ensemble du linéaire du réseau ou l'ensemble des nœuds (par exemple, la densité de drainage). Les descripteurs globaux ne sont pas attribués aux composants du graphe et ne seront pas traités directement dans cette partie. Les descripteurs de cheminement font référence à la succession spatiale et souvent longitudinale d'une variable (par

exemple, la distance à l'exutoire d'un nœud du réseau). Ce dernier type peut par exemple permettre de dégager des ruptures ou accélérations de pente le long d'un linéaire. D'autres types d'analyse seraient envisageables.

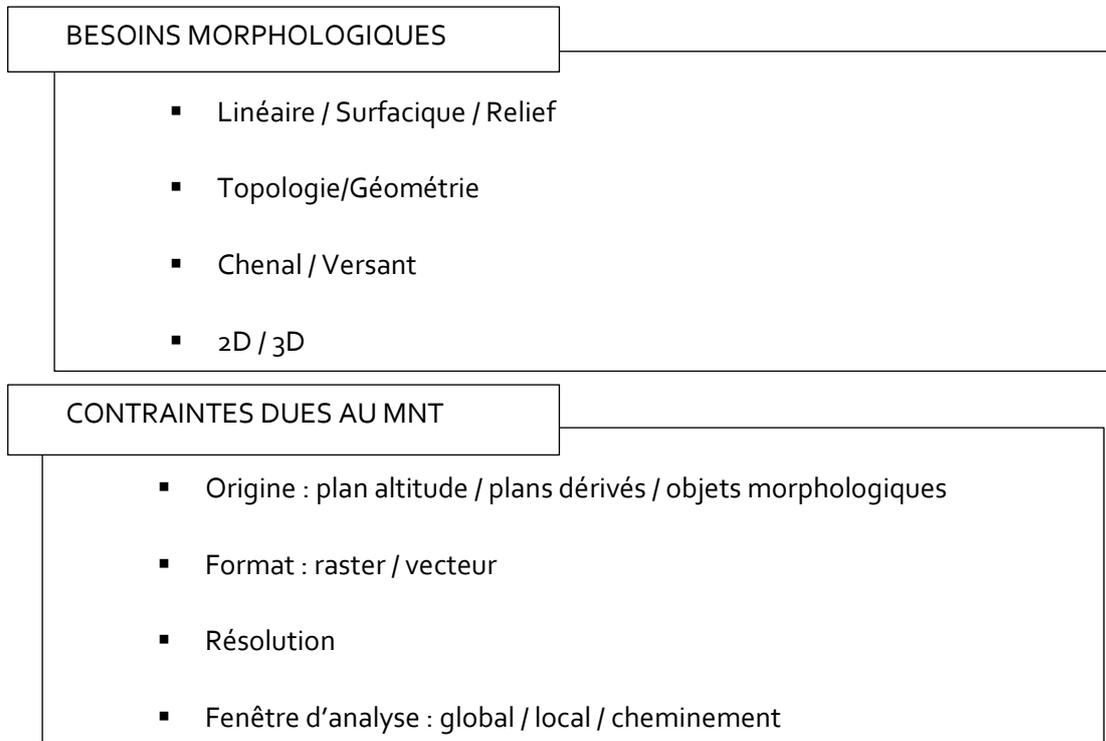


Figure 9.7. les grandes familles de rubriques nécessitant des choix avant d'extraire des descripteurs morphologiques à partir de MNT

Nous arrivons (Figure 9.7) à quatre grandes rubriques pour ce qui concerne les besoins morphologiques et quatre rubriques concernant les contraintes d'extraction à partir de MNT. Ce qui montre la multiplicité des choix et définitions des descripteurs numériques, sachant que la seule variabilité de la résolution, nous amène déjà vers une infinité de solutions.

9.2. Choix et méthodes d'extraction de descripteurs

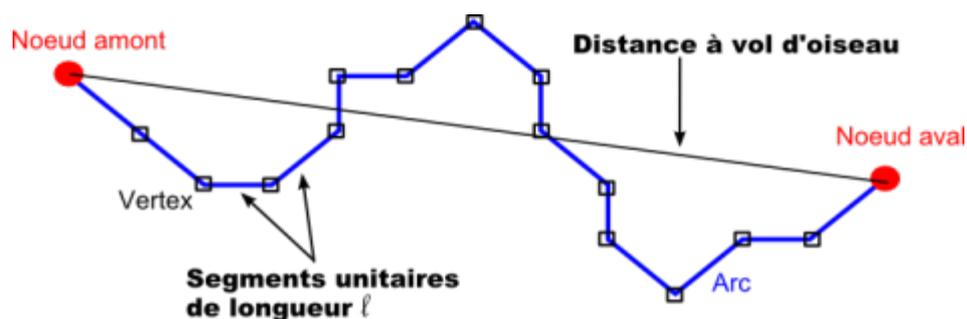
9.2.1. Choix des descripteurs

Parmi la multitude des descripteurs possibles, nous en avons retenu un petit nombre qui nous semble représentatif et suffisant pour représenter les réseaux de ravines en 2D et 3D et pour reconstruire à terme des arborescences similaires. Notre choix s'est porté sur des descripteurs classiques et simples (longueur, pente), des descripteurs plus intégrés (profil longitudinal) et enfin des descripteurs plus spécifiques à la numérisation de la morphologie locale (encaissement, angles de confluence). La hiérarchie amont-aval est introduite à partir d'un descripteur complémentaire local, l'ordre de Strahler (3.2.1.2) qui est approprié pour la représentation d'une arborescence et de sa topologie. Il permet de hiérarchiser les talwegs selon leur position dans l'arbre. Ce descripteur va également servir pour les analyses statistiques en permettant le croisement entre les descripteurs géométriques et la hiérarchie.

On sait que selon la résolution, même si le mode de calcul est inchangé, les descripteurs voient leur signification modifiée. Pour chacun des descripteurs proposés, nous détaillons la méthode d'extraction que nous avons utilisée pour la suite du travail sachant que de nombreuses autres méthodes sont possibles.

9.2.2. Longueur des arcs

Nous définissons la longueur d'un arc, notée L , comme la longueur projetée développée entre deux nœuds (*i.e.* la somme des segments unitaires – vertex à vertex – de l'arc). Il y a d'autres façons d'envisager la longueur telle que la distance à vol d'oiseau entre deux nœuds (Figure 9.8). La précision de sa mesure ne peut être meilleure que la résolution du MNT. La longueur apporte une information d'occupation planimétrique de densité et déterminera des descripteurs globaux tels que la densité de drainage.



$$L_{arc} = \sum \ell$$

Figure 9.8. Mesure numérique de la longueur : à vol d'oiseau et le long du linéaire

Plus la résolution du MNT est fine (*i.e.* petite taille de cellule), plus la longueur totale du réseau est grande, pour deux raisons : d'une part le tracé est plus finement décrit (par exemple avec plus de sinuosités), et d'autre part on détecte un plus grand nombre de talwegs.

Les longueurs d'arc sont définies entre deux nœuds successifs. Les longueurs de drain par ordre de Strahler cumulent les longueurs des arcs contigus de même ordre. Un drain d'ordre 1 est composé d'un seul arc. Au vu des lois de Horton sur les longueurs (Horton, 1945), on considère que la longueur des drains par ordre de Strahler possède un plus grand sens morphologique que la longueur des arcs (Figure 9.9).

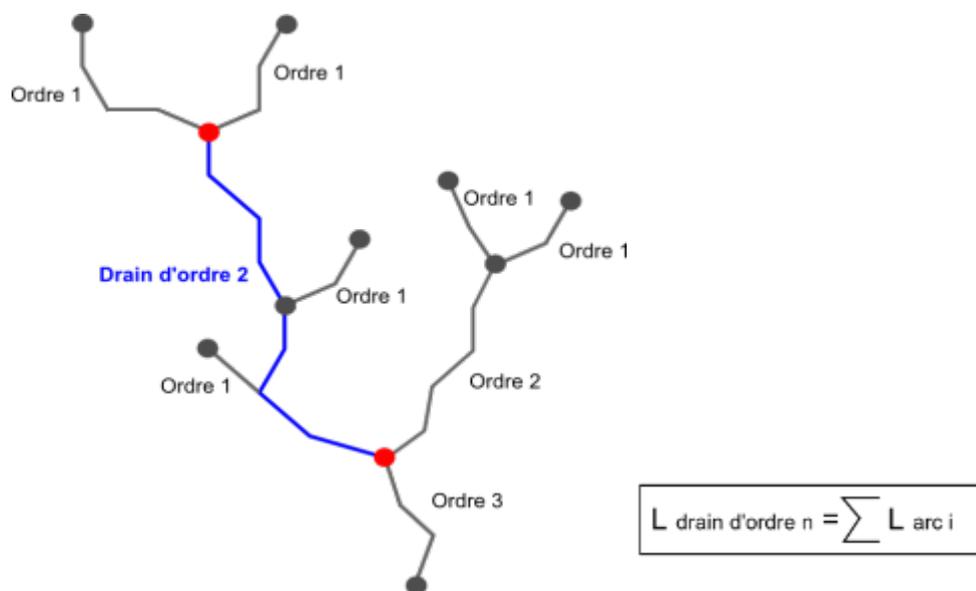


Figure 9.9. Calcul de la longueur d'un drain par ordre de Strahler

9.2.3. Pentas et profils des arcs : introduction de la troisième dimension

La pente introduit la troisième dimension spatiale ; elle est d'autant plus importante que l'on se situe en domaine de *badlands* caractérisés par des fortes pentes (1.1). La pente longitudinale de talwegs conditionne l'entraînement des matériaux et les processus d'incision. On considère ici la pente longitudinale des arcs calculée à partir des coordonnées (x,y,z) des nœuds amont et aval de chaque arc. Le calcul est effectué directement en mode vecteur ; l'altitude z étant extraite du MNT (Figure 9.10). Il est donc toujours possible de calculer une pente pour un arc. Toutefois, sa significativité dépend du bruit du MNT et de la résolution. D'une part, la différence d'altitude (Δz) doit être supérieure à deux fois l'erreur altimétrique du MNT (exprimée en écart-type d'erreur) pour être significative suivant un risque de première espèce de 95% (si l'erreur est gaussienne). D'autre part, la valeur de pente calculée peut être instable, du fait du bruit du MNT, lorsque la longueur de l'arc est faible par rapport à la résolution. On estime expérimentalement qu'une longueur doit être au moins égale à quatre fois la résolution pour que la pente mesurée soit significative. Comme pour les longueurs, la mesure peut être réalisée pour les arcs ou pour une somme d'arc correspondant aux drains.

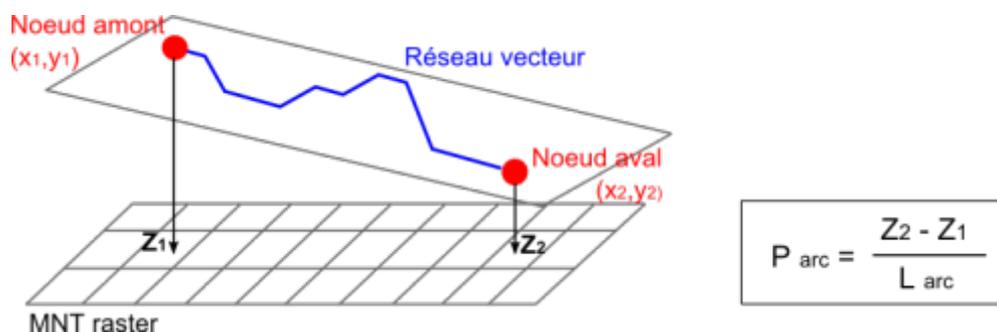


Figure 9.10. Une mesure numérique possible de la pente d'un arc (en mode vecteur)

En complément à la pente longitudinale des arcs, des profils longitudinaux peuvent être calculés sur de plus longue sections. Ce type de profil informe sur la succession des altitudes et des pentes le long d'une section du réseau (par exemple sur un des drains principaux du réseau). Ils intègrent l'idée de cheminement et de continuité des pentes. Le profil longitudinal décrit le talweg lui-même alors que le profil transversal apporte une information sur les versants et l'encaissement du talweg. Dans ce travail, des profils ont été réalisés manuellement à partir du MNT.

Nous définissons le profil longitudinal comme la succession des altitudes issues du MNT prises au niveau des vertex de la suite des arcs correspondant à la section de linéaire choisie et représentée graphiquement en fonction de leur distance au nœud aval (Figure 9.11).

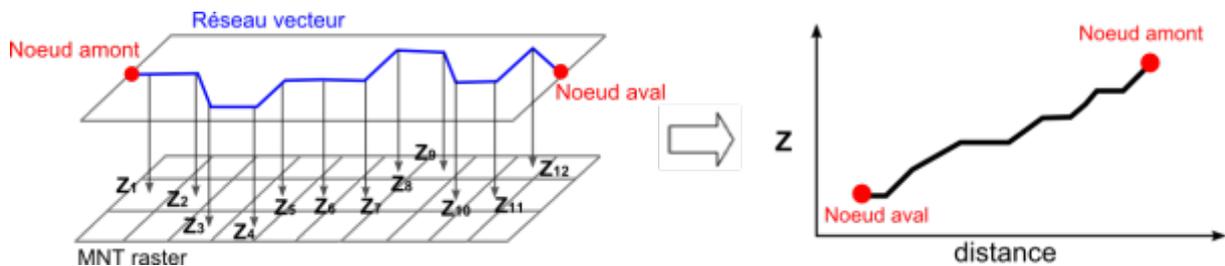


Figure 9.11. Mesure du profil longitudinal d'un arc

9.2.4. Encaissement : profondeur et ouverture du relief

L'encaissement est une représentation de l'incision qui peut s'appliquer à de larges vallées aussi bien qu'à des ravines ou rigoles telles qu'à Draix. Ce descripteur a un fort intérêt morphologique. Sa définition exacte n'est pas claire car elle dépend de la façon de regarder la vallée ainsi que de la position du point d'analyse. Avec les schémas raster, il est possible de faire un calcul systématique, donc en tout point, ce qui élimine le problème du choix du point d'analyse. L'idée générale d'un calcul d'encaissement pour ce qui est des réseaux hydrographiques est de mesurer sur un profil perpendiculaire aux drains les limites en termes d'altitude de crête ou d'angle de vision du ciel. Nous avons utilisé des schémas numériques existants dans la littérature mais qui s'appliquent à un relief de façon générale et non spécifiquement à des vallées. Ainsi, le calcul est généralement non orienté dans le sens de la vallée ou de son profil perpendiculaire.

Dans ce travail, l'encaissement est approché par deux variables complémentaires : la profondeur et l'ouverture du relief. La profondeur du relief notée VD (ou *Valley Depth*; Waddington et Kay, 2003) correspond, pour chaque cellule du MNT, à la différence d'altitude de la cellule avec l'altitude moyenne calculée sur un voisinage dans un rayon donné (Figure 9.12). L'ouverture (*openness*, Yokoyama *et al.*, 2002) est une mesure angulaire représentant l'angle d'ouverture d'un cône centré en un point de la grille et contraint par les altitudes voisines dans un rayon de recherche donné (Figure 9.13). L'indice d'ouverture (IO) prend une valeur entre 0, correspondant à un relief ouvert et 1, correspondant à un relief fermé. Dans les deux cas, la valeur obtenue pour une cellule correspond à une moyenne des calculs réalisés dans les huit directions. De plus, le choix du rayon de recherche est arbitraire et doit être ajusté en fonction du terrain, de la résolution et du bruit du MNT.

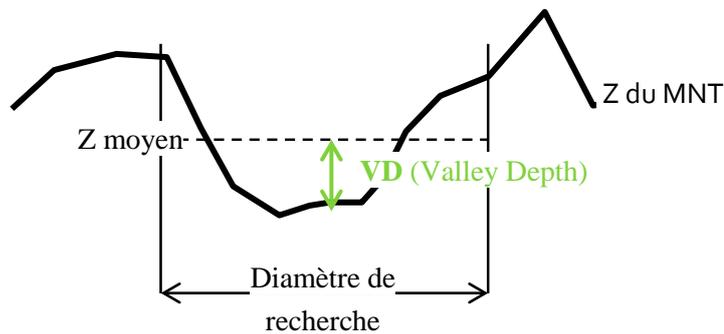


Figure 9.12. Représentation symbolique en 2D du calcul de VD (Valley Depth) sur un MNT

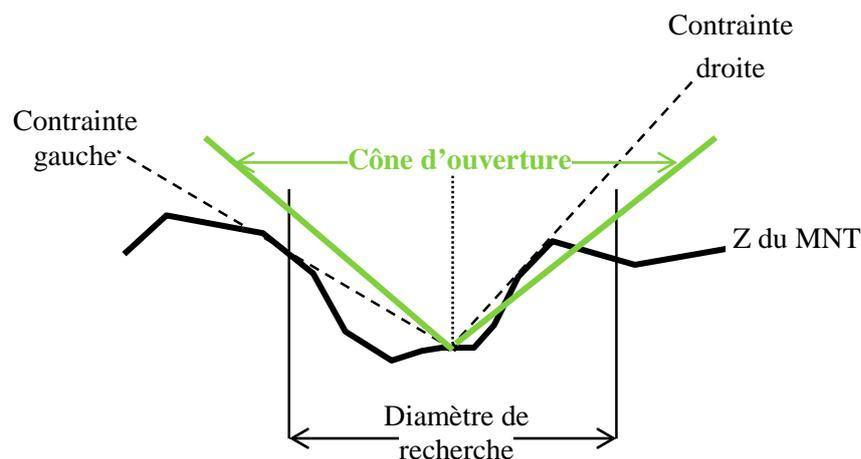


Figure 9.13. Représentation symbolique du calcul de l'ouverture (openness) selon une des directions. Le calcul complet de l'angle du cône d'ouverture est la moyenne des angles issus des contraintes dans les huit directions des cellules voisines.

Pour chacune des variables, il résulte du calcul une grille de valeurs définies en tout point. Le passage de cette grille régulière au calcul de l'encaissement sur un linéaire nécessite un processus d'agrégation. Nous proposons de définir l'encaissement (profondeur et ouverture) d'un arc comme la moyenne des encaissements ponctuels le long du linéaire.

Parmi les effets possibles sur les résultats, il faut signaler les problèmes du rayon de recherche et des effets de bord induits. En outre, la principale limite de la définition de ces variables est qu'elles

sont obtenues de manière non orientées, dans toutes les directions, alors qu'on les voudrait obtenues dans le sens transversal aux talwegs.

9.2.5. Angles de confluence et agencement planimétrique des branches du réseau

L'angle de confluence informe sur l'organisation spatiale du réseau (au sens de la géométrie) dans le plan. Selon Schumm (1956a), ce descripteur peut être mis en relation avec l'âge du réseau. La définition de l'angle de confluence n'est pas toujours claire et différentes modalités de calcul sont envisageables. Pour ce travail, nous nous intéressons à deux angles : l'angle (α) entre les deux arêtes amont du nœud interne et l'angle (β) entre une arête et son aval. L'angle α est calculé pour chaque nœud interne du graphe (correspondant aux confluences du réseau). L'angle β est calculé pour chaque arête du graphe (Figure 9.14).

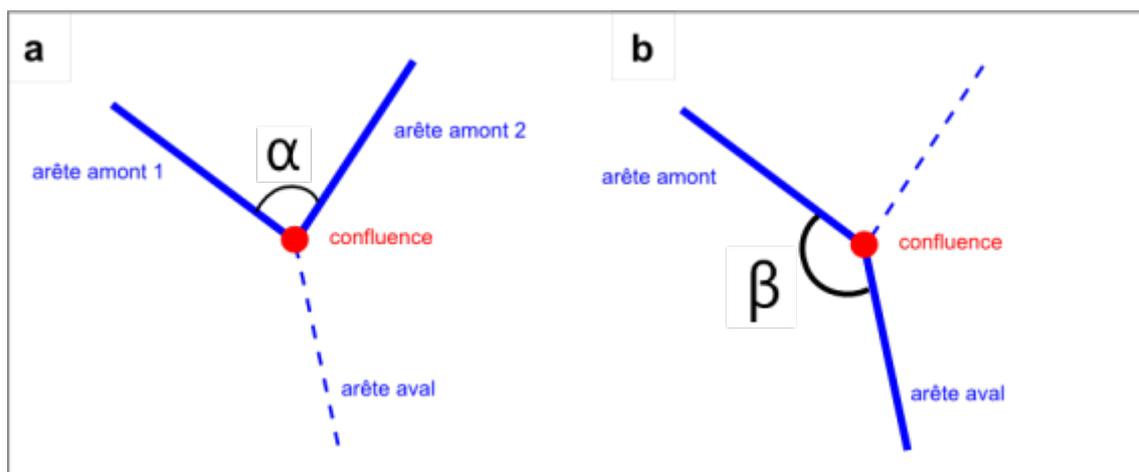


Figure 9.14. Les angles de confluence considérés : a. l'angle α calculé pour une confluence, entre les deux arêtes amont ; b. l'angle β calculé pour une arête (arête amont 1 ici), entre l'arête et son aval.

Les angles à la confluence calculés localement à partir des azimuts des segments d'arc autour du nœud sont très instables parce que ces segments sont sensibles à la résolution et aux menues variabilités locales d'azimut sur les arcs (Paget *et al.*, 2008). Pour pallier cette instabilité, on considère les mesures d'azimut « globales » calculées à partir des arêtes du graphe. La Figure 9.15 illustre la différence entre la mesure globale et la mesure locale de l'angle α .

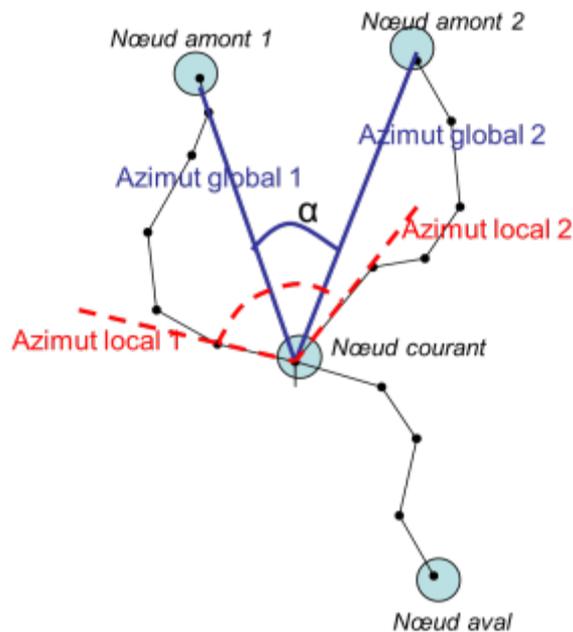


Figure 9.15. Mesures numériques locale et globale de l'angle de confluence α

9.3. Présentation et analyse des résultats

9.3.1. Résultats cartographiques

Les résultats de ce paragraphe concernent le bassin du Moulin, et sont obtenus à partir du MNT à 1 m de résolution.

Nous avons choisi de nous focaliser sur les résultats des descripteurs associés à la morphologie, en laissant de côté la longueur, descripteur classique.

La pente des arcs (Figure 9.16) est un descripteur important dans le cas des *badlands*. Les *badlands* sont souvent considérés comme des terrains à fortes pentes mais ces pentes concernent les versants. Ici, nos calculs concernent les pentes des talwegs et on observe également de fortes valeurs pour ces pentes, atteignant les 60° (soit 173 %) dans les secteurs amont disséqués. On remarque, pour le bassin du Moulin, une organisation classique des pentes avec une nette progression amont-aval depuis des fortes pentes vers des pentes plus faibles. Cette progression est confirmée par les profils longitudinaux (Figure 9.17).

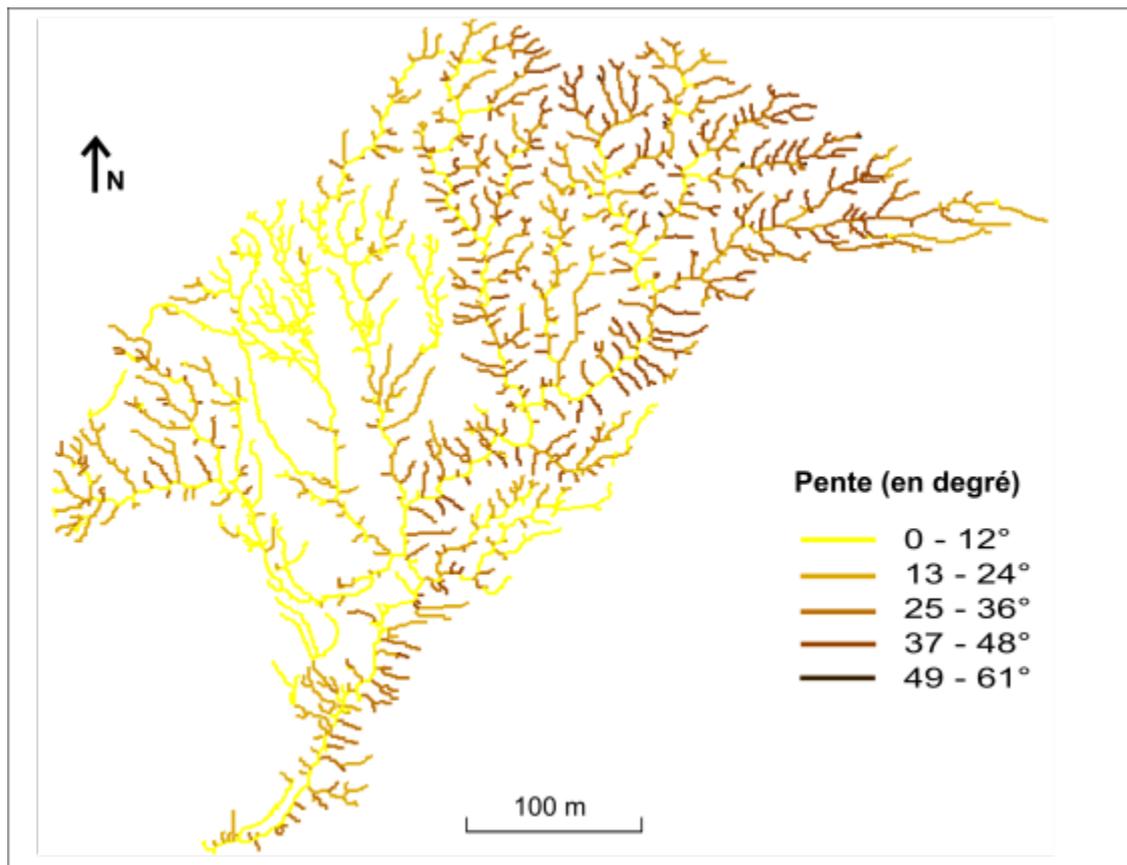


Figure 9.16. Pente des arcs (bassin du Moulin, MNT 1 m)

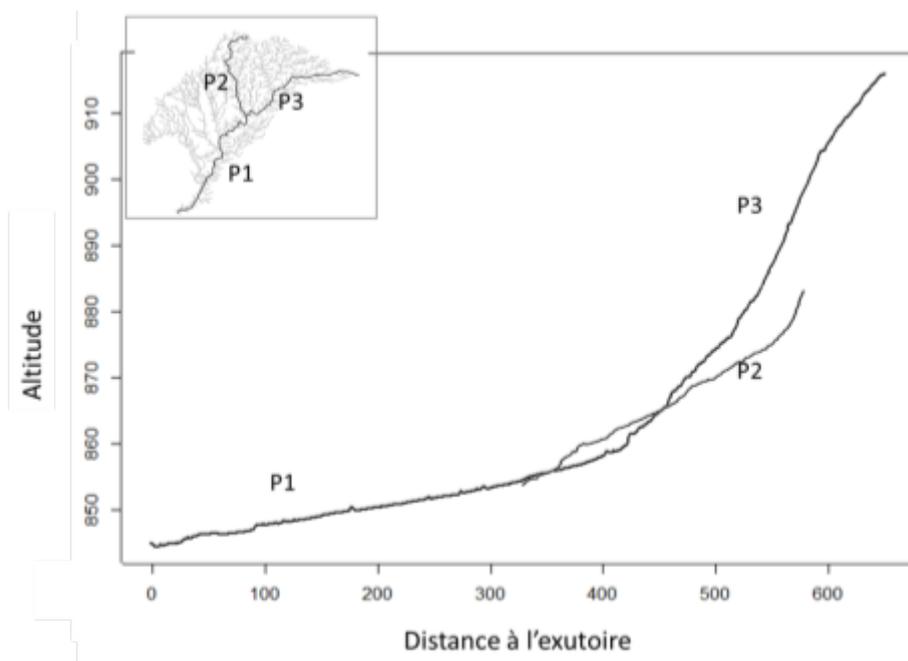


Figure 9.17. Résultats de profils longitudinaux amont-aval le long du réseau

Un des éléments très net observé sur la Figure 9.16 est la présence, pour le bassin du Moulin, de deux principaux ensembles spatiaux : un secteur au nord-ouest avec de faibles pentes longitudinales ($<10^\circ$), opposé au reste du bassin qui présente de fortes pentes. La Figure 9.18, des zones végétalisées, aide à comprendre ces observations. En effet, les deux ensembles identifiés correspondent à la segmentation espace sous couvert végétal / espace non couvert. Ces deux secteurs correspondent à des formes de *badlands* différentes, l'une végétalisée avec des ravines peu marquées et avec une érosion actuelle peu active, l'autre nue avec une activité érosive intense. A priori les pentes et l'encaissement sont très liées à ce contexte et ceci apparaît comme un point majeur dans les résultats cartographiques correspondants.

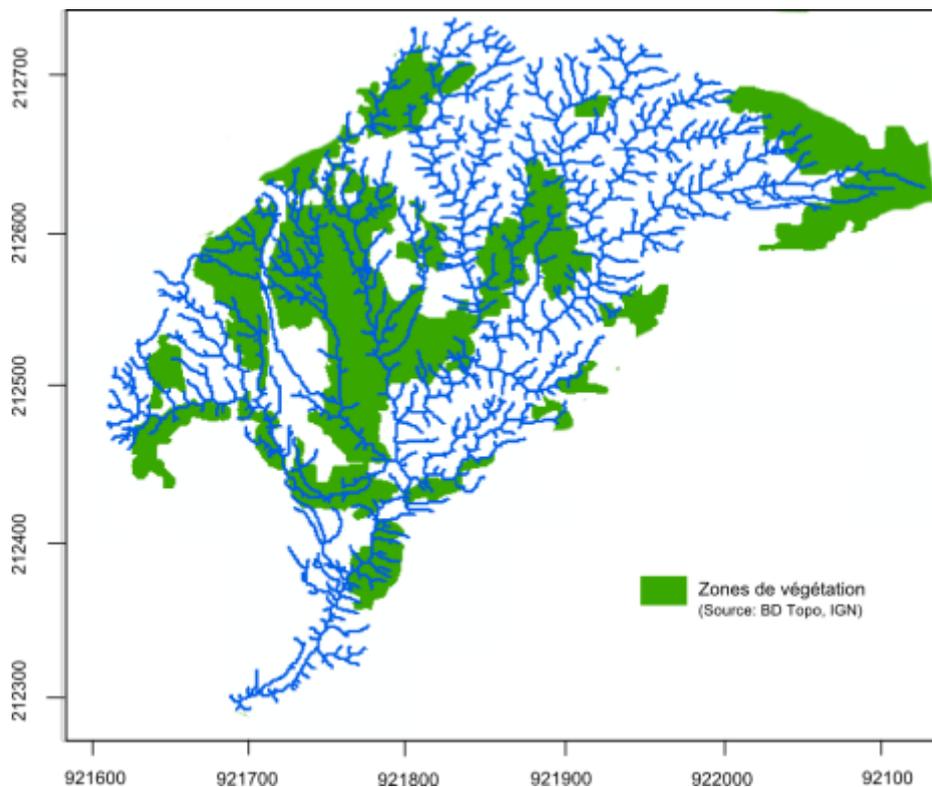


Figure 9.18. Réseau du moulin et zones végétalisées (Source : BD Topo, IGN)

Pour les variables d'encaissement, les cartographies concernent les deux descripteurs : profondeur (VD) exprimée en mètre et indice d'ouverture (IO). Le calcul a été effectué en utilisant le logiciel SAGA qui bloque un rayon de recherche ici choisi à 10 cellules (soit 10 m). Le premier résultat présenté est une cartographie en format raster issue directement du MNT (Figure 9.19 ; Figure 9.20) donc sous un mode pixel à pixel. Une première observation, qualitative, se focalisant sur les secteurs nus (Figure 9.19-zoom ; Figure 9.20-zoom) montre une bonne représentation des talwegs par les deux composantes de l'encaissement. Plus précisément, la profondeur semble très sensible à la différenciation entre ordres, avec de plus fortes valeurs pour les drains principaux. Au contraire, l'ouverture semble plus constante pour les différents ordres.

L'encaissement moyenné sur les arcs du réseau est représenté Figure 9.21 et Figure 9.22. Au niveau valeur numérique, certaines profondeurs semblent plus élevées que l'observation de terrain. Ceci est probablement dû au rayon de recherche trop important pour certaines ravines amont.

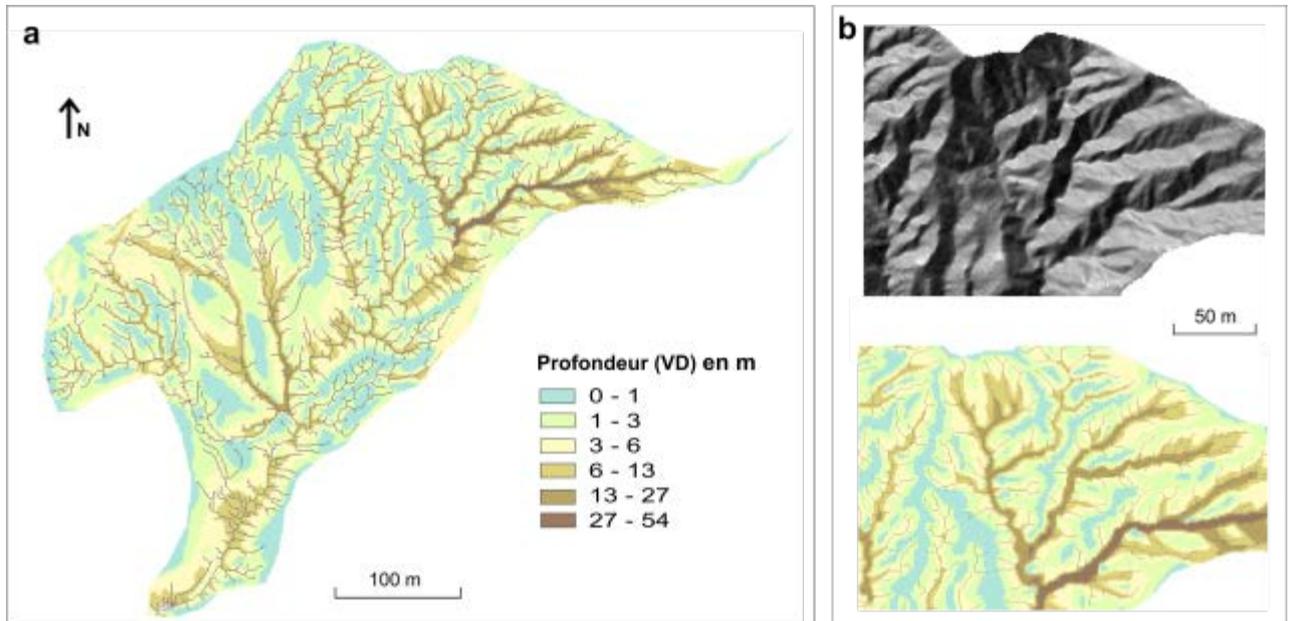


Figure 9.19. Résultats cartographique de la profondeur de vallée en mode raster : a. ensemble du bassin du Moulin ; b. zoom sur un partie au nord-est du bassin

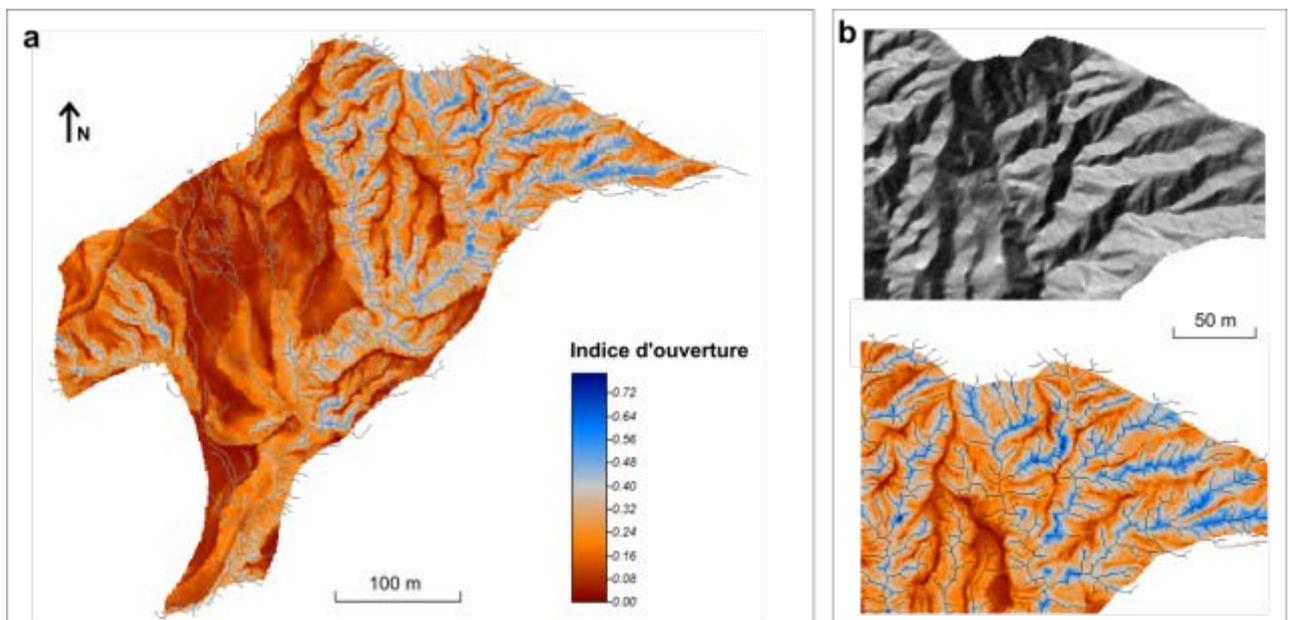


Figure 9.20. Résultats cartographique de l'indice d'ouverture en mode raster : a. ensemble du bassin du Moulin ; b. zoom sur un partie au nord-est du bassin

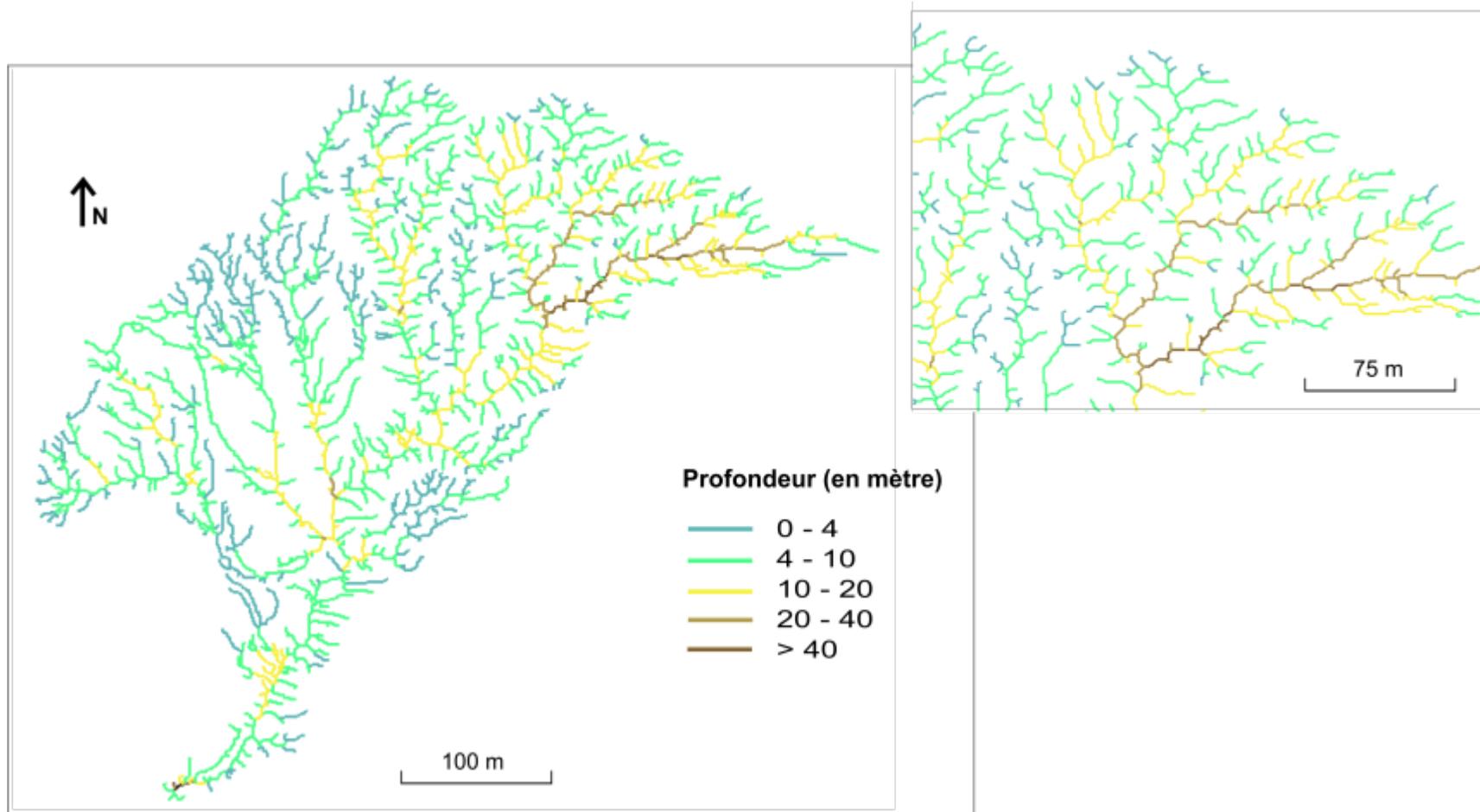


Figure 9.21. Résultat cartographique de la profondeur de vallée, moyenne sur les arcs du réseau : ensemble du bassin et zoom sur le secteur nord-est

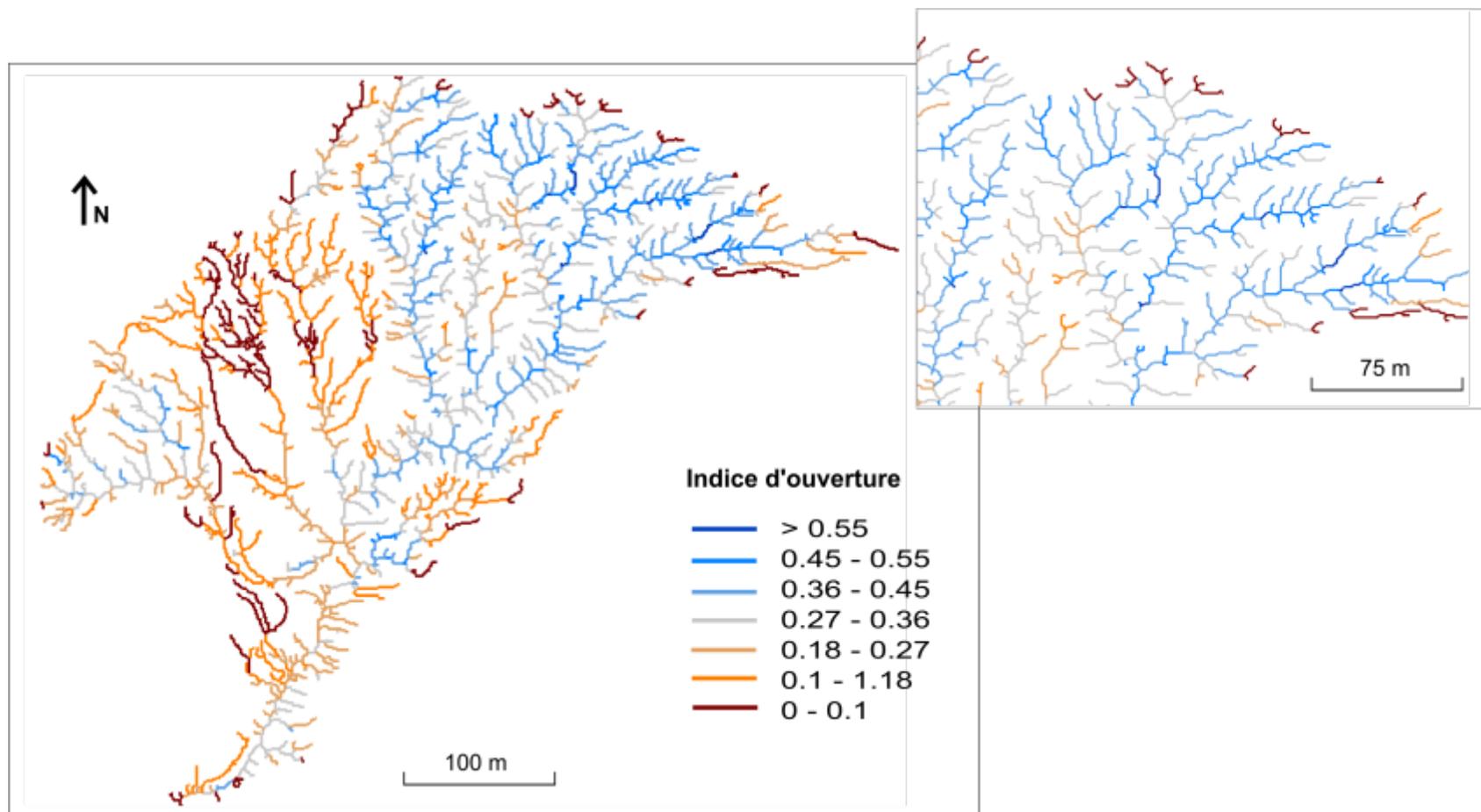


Figure 9.22. Résultat cartographique de l'ouverture du relief au niveau des arcs du réseau : ensemble du bassin et zoom sur le secteur nord-est.

Les angles de confluence sont représentés sous deux aspects : d'une part les angles α relatifs à l'angle formé par les deux arêtes amont et attribué aux nœuds (Figure 9.23), d'autre part les angles β relatifs à l'angle formé par chaque arête avec son aval et attribué à l'arête (Figure 9.24).

Concernant les angles α (Figure 9.23), on observe une opposition de teinte entre les différents points. Les sources, en bordure du bassin apparaissent essentiellement en bleu tandis que les points le long des drains principaux apparaissent plutôt en vert et orange. Ceci met en évidence des points à l'amont marqués par des angles aigus (inférieurs à 60° pour la plupart) alors que les confluences qui se situent au niveau des drains principaux sont marquées par des angles plus élevés (autour de 90°). Ceci pourrait correspondre à une ouverture progressive des drains vers 90° quand on va vers l'aval, quand on passe de confluence symétrique (même bi-ordre de Strahler, faible angle α) à des confluences dissymétriques (bi-ordre dissymétrique, angle α proche de 90°). On vérifiera la cohérence de ces considérations dans l'analyse quantitative du paragraphe suivant.

Pour ce qui est des angles β (Figure 9.24), on retrouve à peu près la même distinction mais de manière moins claire: des teintes rouge orange jaune sur les drains-sources (correspondant à des angles de l'ordre de 140 à 150°) et des teintes proches du vert le long des drains principaux (correspondant à des angles plus proches de 90°).

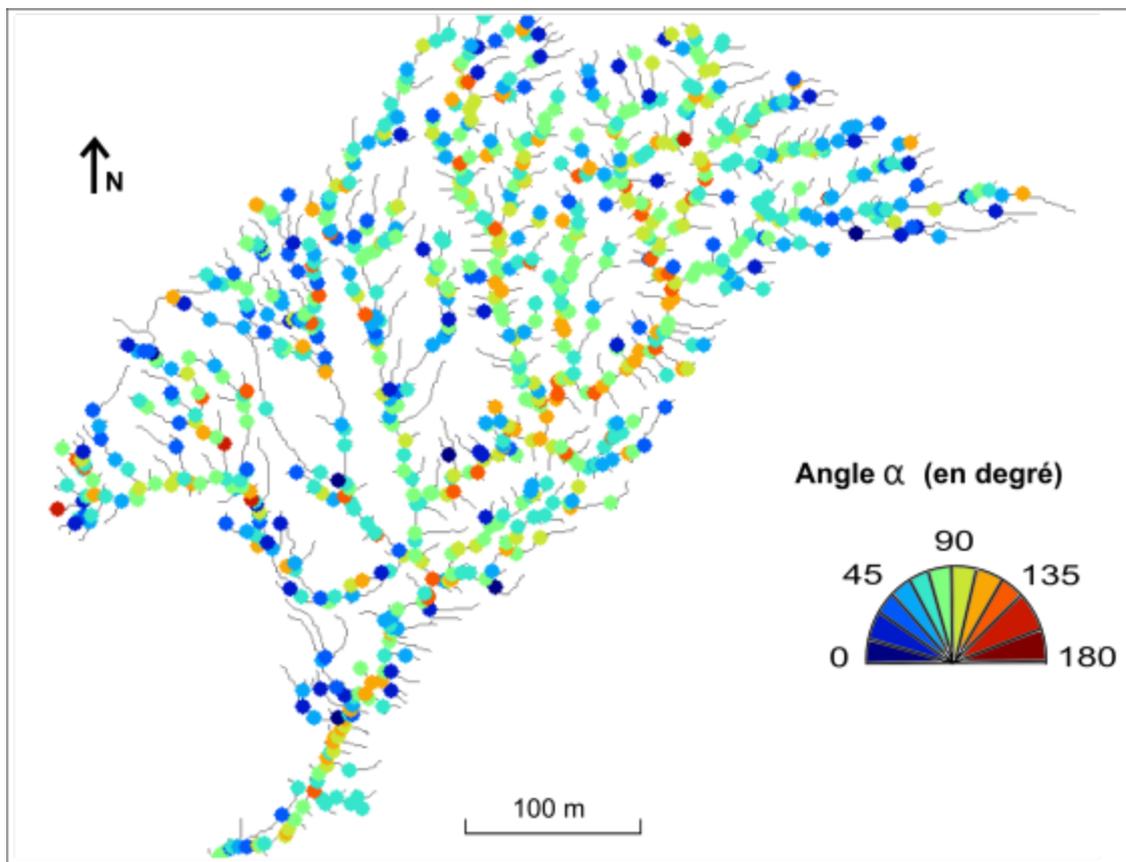


Figure 9.23. Résultat cartographique des angles de confluence α pour l'ensemble du bassin

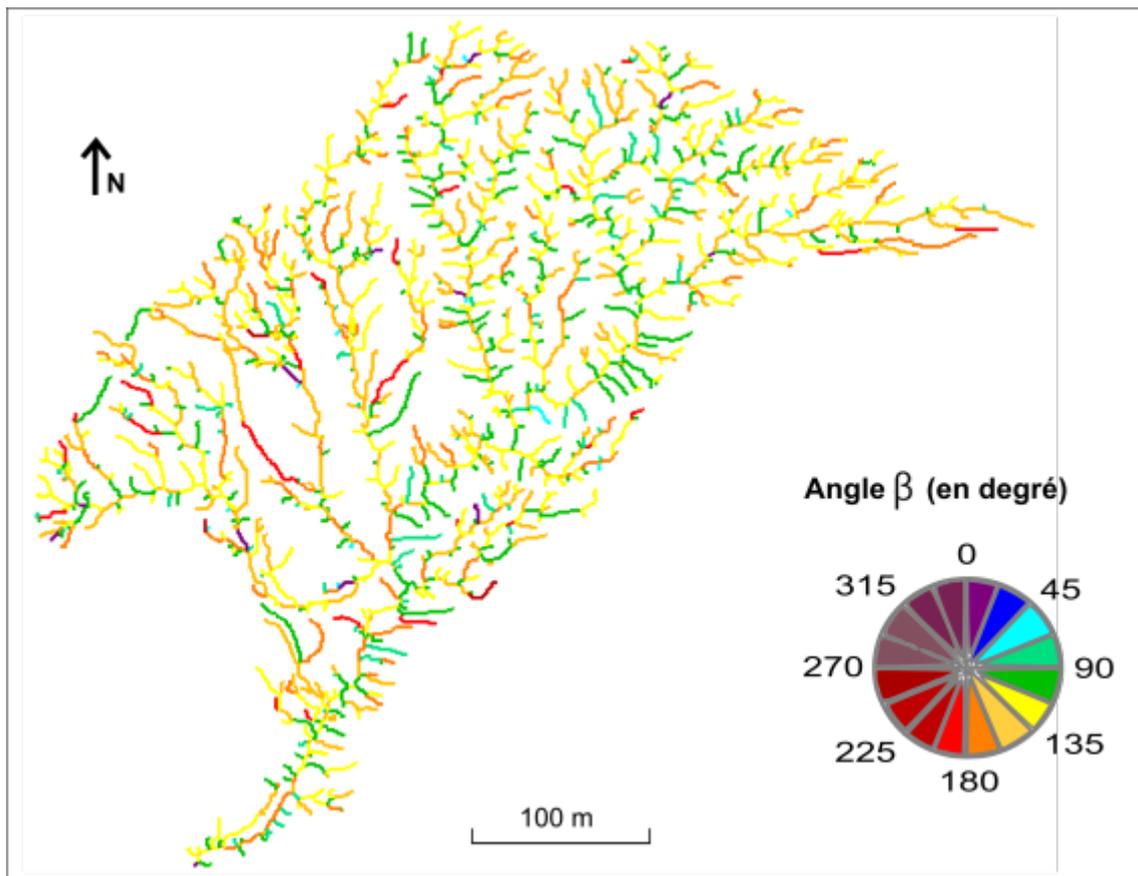


Figure 9.24. Résultat cartographique des angles de confluence β pour l'ensemble du bassin

La Figure 9.24 présente la classification du réseau par ordre de Strahler. La représentation cartographique du réseau issu du MNT à 1 m comporte 1661 arcs qui se rassemblent en 1036 drains de Strahler, de l'ordre 1 à l'ordre 6 (ordre du bassin). On observe ici également une séparation entre secteurs nu et végétalisé : en secteur nu, le nombre de drains d'ordre 1 est plus important, entraînant une augmentation de la densité des points sources puis une apparition plus rapide des ordres supérieurs.

Une façon d'analyser la structure des réseaux est d'étudier les descripteurs suivant un axe amont/aval. Ceci peut se réaliser de plusieurs manières. Un premier mode qualitatif peut être l'analyse des profils longitudinaux le long du cheminement des eaux. On montre Figure 9.17 l'évolution de l'altitude qui révèle la variabilité très forte des pentes. Les aspects quantitatifs peuvent être analysés à travers des métriques diverses. L'ordre de Strahler est un index possible qui sera utilisé dans le paragraphe suivant pour une analyse combinée entre la géométrie et la topologie. D'autres indices de position amont-aval peuvent être également utilisés : par exemple, la distance à l'exutoire, la distance à la source la plus proche. A priori, en fonction de ces indices les descripteurs locaux de réseau évoluent souvent de manière exponentielle décroissante pour les réseaux hydrographiques (lois de Horton, loi de Leopold et Maddock).

L'intérêt de la classification de Strahler est d'être une formulation discrète mais robuste de cet axe amont-aval, ce qui est un moyen de regarder la structure spatiale des éléments du réseau. Ce même index peut être réutilisé pour tester l'hypothèse d'un lien statistique entre descripteurs, ordres et hiérarchie naturaliste des objets morphologiques. De ce fait, on retient cet index d'axe amont-aval pour la suite.

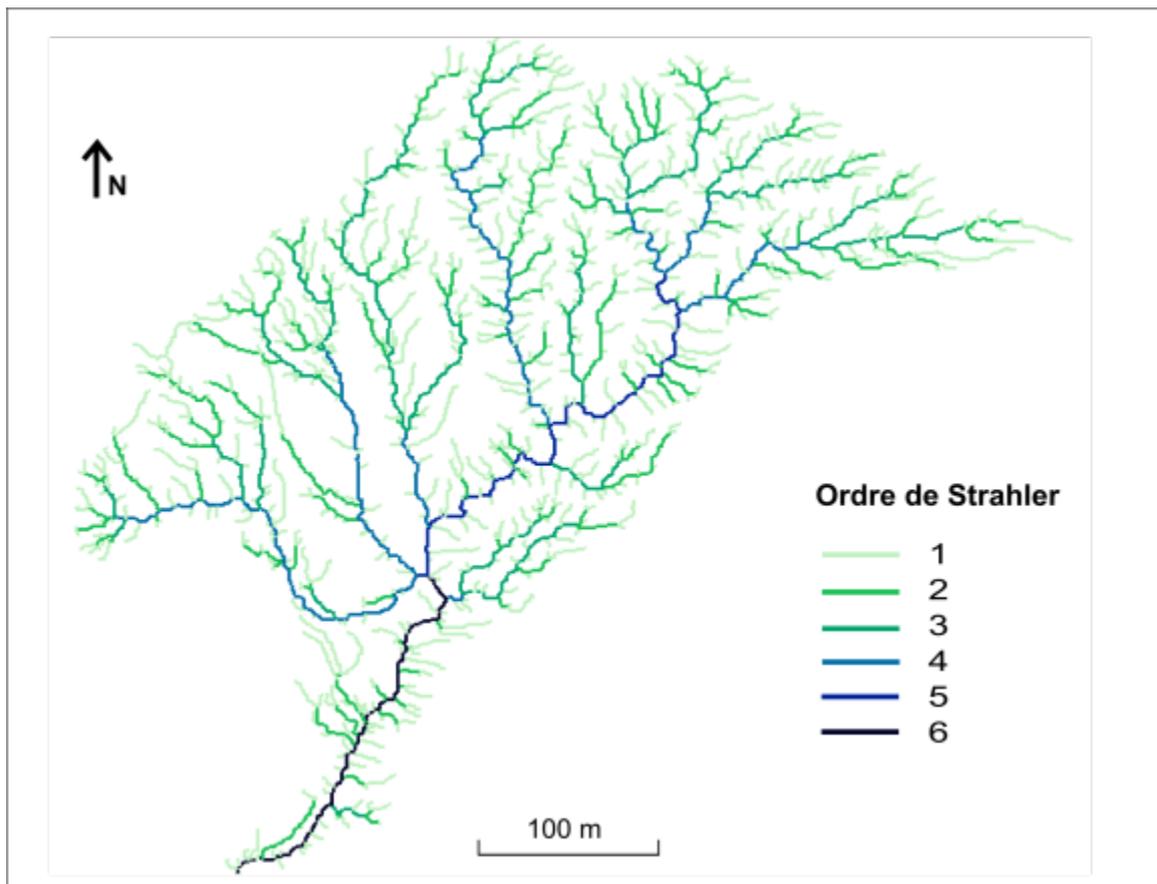


Figure 9.25. Hiérarchisation du réseau par ordre de Strahler (bassin du Moulin, résolution 1 m)

9.3.2. Analyse quantitative des descripteurs des éléments du réseau en fonction de la hiérarchie et impact de la résolution

Avec le MNT de 1 m de résolution, le réseau extrait comporte 1661 arcs et 837 sources. La densité de drainage est de 0.121 m.m^{-2} . On peut observer sur les résultats cartographiques que cette densité est variable entre les secteurs nus (densité forte) et végétalisés (densité plus faible). Des tableaux

récapitulant les paramètres (nombre d'arcs, nombre de drains, longueur totale, densité de drainage, ...) des réseaux aux différentes résolutions sont présentés en Annexe 3.

9.3.2.1. Approche combinée géométrie et topologie des éléments du réseau

L'analyse qualitative montre une distinction nette entre l'amont et l'aval, il nous semble important d'orienter l'analyse quantitative selon cette organisation. La hiérarchisation de Strahler, également sous une forme amont-aval semble tout à fait pertinente pour formaliser cette distinction. On espère également que cette classification puisse être liée aux objets morphologiques de types ravines, rigoles, etc., mais ceci est l'objet du chapitre suivant (chapitre 10).

En ce qui concerne l'analyse des différents drains de Strahler, nous présentons les caractéristiques géométriques par ordre pour une résolution (1 m) pour le bassin du Moulin pour les différents descripteurs analysés (L , P , VD , IO , β ; Tableau 9.2). La progression générale des longueurs et pentes moyennes par ordre, connue depuis les travaux de Horton (1945) puis Schumm (1956a) sur des réseaux hydrographiques, est ici respectée pour des réseaux de ravines. Concernant les descripteurs d'encaissement, la profondeur moyenne des arcs par ordre semble corrélée à l'ordre alors que l'indice d'ouverture (IO) moyenne ne montre pas de progression significative, ce qui conforte l'analyse visuelle du paragraphe précédent. L'angle β moyen ne semble pas sensible à l'ordre et une analyse par bi-ordre, pouvant être réalisée à partir des angles α aux niveaux des sommets, est nécessaire.

Ordre	Nb de drains	L_{moy} (m)	P_{moy} (°)	VD_{moy} (m)	IO_{moy}	β_{moy} (°)
1	837	7	23	5.32	0.27	136
2	158	15	21	7.34	0.29	146
3	30	49	15	11.02	0.33	149
4	8	105	10	15.13	0.33	148
5	2	150	5	14.63	0.38	140
6	1	233	4	18.88	0.27	148

Tableau 9.2. Longueur et pente moyenne des drains en fonction des ordres de Strahler, réseau du Moulin (1 m)

Les rapports de Horton peuvent être calculés pour ces descripteurs, en particulier la longueur et la pente. On obtient 3.95 pour le rapport de confluence, 2.04 pour le rapport de longueur, 1.4 pour les pentes et 1.3 si l'on rajoute un rapport de profondeurs. Par comparaison, Horton (1945) recense

des valeurs de rapport de confluence entre 2.22 et 3.91 et des rapports de longueur entre 1.84 et 2.74 pour différents réseaux dans différents contextes géographiques. Les valeurs obtenues pour le réseau du Moulin ne montrent pas de spécificité par rapport aux valeurs habituelles obtenues dans d'autres contextes et pour d'autres dimensions.

Les angles de confluences peuvent être analysés en s'intéressant à la symétrie topologique de la confluence. Nous présentons uniquement le tableau des valeurs de l'angle α par bi-ordre de Strahler (Tableau 9.3). On peut constater une évolution sensible des valeurs de α . Même si les valeurs numériques sont assez fluctuantes, on note des angles de l'ordre 61° à 77° pour des confluences symétriques et des valeurs plus fortes autour de 80 à 100° pour les dissymétriques. On retrouve les résultats de l'analyse qualitative qui indique que les faibles ordres qui se branchent sur des grands ordres du réseau forment des angles proches de l'angle droit alors que les angles formés au niveau des bi-ordres (1 ; 1) ou (1 ; 2) sont plus faibles. Les résultats pour l'angle β , non présentés ici, sont sensiblement identiques.

Ordre	1	2	3	4	5	6
1	61°	71°	79°	82°	101°	92°
2	-	77°	78°	89°	101°	87°

Tableau 9.3. Tableau des angles α moyens des bi-ordres (1 ; i) et (2 ; i), réseau du Moulin (1 m)

Au-delà des valeurs moyennes, on s'intéresse aux formes de la distribution des valeurs des différents descripteurs à l'aide de pseudo-histogrammes (diagrammes en violon). Pour cette analyse, on ne considère que les trois premiers ordres jugés les plus significatifs. Au-delà, le trop faible nombre de drains traités ne permet pas de montrer des comportements significatifs.

Ces diagrammes montrent la distribution des valeurs selon les ordres pour les différents descripteurs d'arêtes : longueur, pente, profondeur et ouverture (Figure 9.26). La largeur des distributions correspond à une fréquence normalisée. Ainsi, la surface occupée par les ordres 1 peut apparaître petite alors que ce sont les plus nombreux.

La distribution des longueurs par ordre montre une évolution marquée de la dispersion depuis une faible dispersion à l'ordre 1 vers une forte dispersion à l'ordre 3. La distribution des pentes montre une progression inverse. On peut toutefois observer une grande dispersion des valeurs de pentes qui s'explique par le mélange dans la statistique entre secteur nu et secteur végétalisé. Or on sait que les pentes sont très fortement atténuées en secteur végétalisé.

Concernant les composantes de l'encaissement, on remarque un comportement différent entre profondeur et indice d'ouverture. La profondeur évolue fortement et régulièrement avec l'ordre allant d'une moyenne de 5 m pour l'ordre 1 à une moyenne de près de 18 m pour l'ordre 6. Pour

l'indice d'ouverture, on note une petite évolution: moindre dispersion et fermeture de vallée quand on passe de l'ordre 1 à l'ordre 3. Ces éléments confortent les idées exprimées lors de l'analyse qualitative du lien entre encaissement et ordre de Strahler.

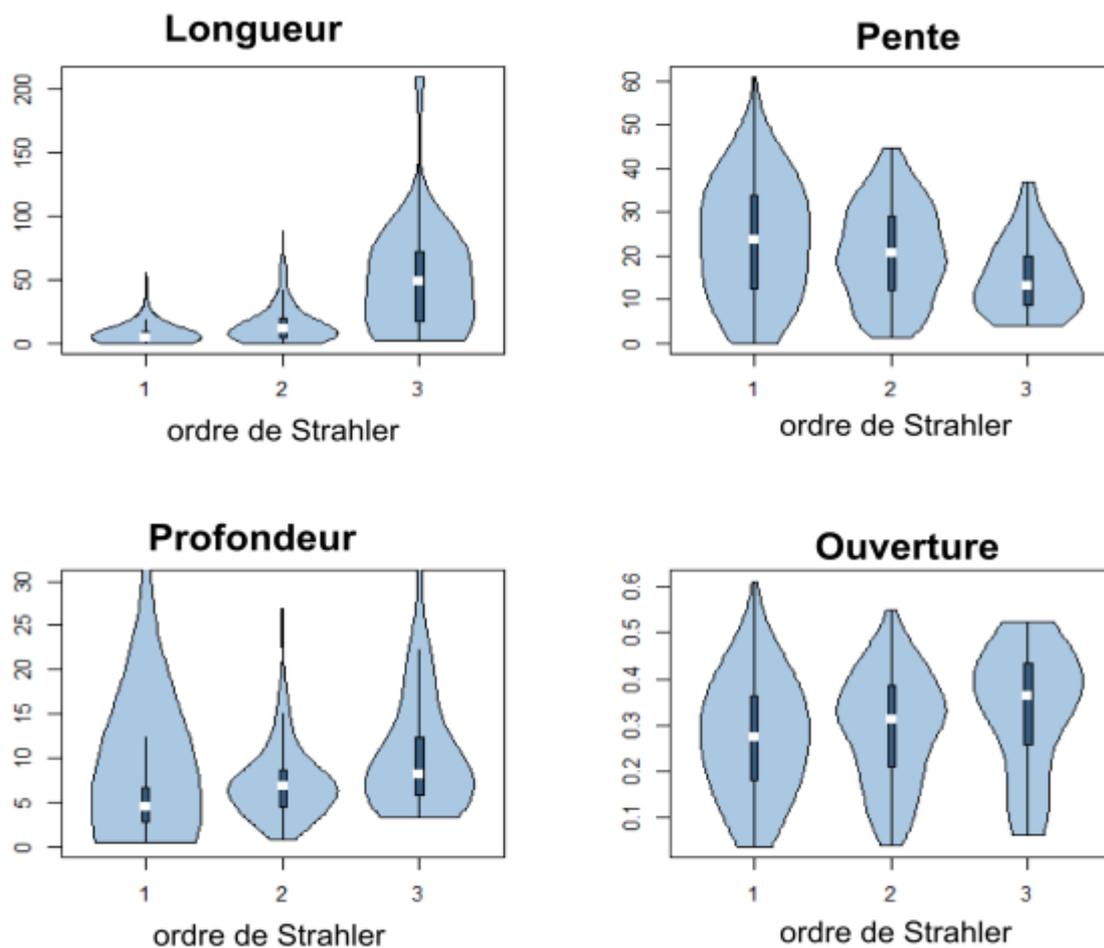


Figure 9.26. Diagramme en violon : distribution des valeurs des différents descripteurs selon les ordres de Strahler (ordres 1, 2 et 3). La largeur des distributions correspond à une fréquence normalisée. Refaire profondeur en imposant

9.3.2.2. Impact de la résolution sur les descripteurs des éléments du réseau

Cette analyse va porter sur deux façons d'analyser l'impact de la résolution : une première série d'analyses à l'intérieur du seul bassin du Moulin où seule la résolution évolue (de 1 à 4 m) ; et une deuxième série d'analyses inter-bassin dans lesquelles vont évoluer à la fois la résolution et la

dimension de la zone d'étude (la résolution varie de 0.25 à 25 m pour des bassins allant 0.001 km² à 22 km²). Pour chacune des résolutions, un nouveau MNT est calculé par ré-échantillonnage à partir des données de base (0.25m pour la ravine AJ, 1 m pour le Moulin et le Laval et 25 pour le Bouinenc) puis un nouveau réseau est extrait avec la méthode CI. Les descripteurs sont recalculés à partir de ces nouveaux réseaux.

A. Impact de la résolution sur un même domaine

Dans un premier temps, on cherche à observer l'effet de la résolution seule sur les descripteurs des éléments du réseau pour un même domaine, celui du Moulin. Les analyses se concentrent sur les résolutions 1 m, 2 m et 4 m qui donnent une idée de l'évolution des descripteurs. Au-delà de 4 m, le réseau extrait comporte trop peu d'éléments pour en faire une analyse statistique significative.

L'analyse est résumée par les diagrammes en violons de la Figure 9.27. La distribution des longueurs par drains semble sensiblement constante pour les trois résolutions, avec un léger décalage numérique du pic de fréquence vers des plus grandes valeurs. Pour la pente, la profondeur et l'ouverture, on note une diminution de la dispersion, avec un resserrement autour de la moyenne lorsque la résolution devient plus grossière. La pente moyenne baisse sensiblement (passant de 22 à 17°) alors que la profondeur moyenne augmente (passant de 6 à 8.5 m). On peut alors dire que, vers les résolutions grossières, *l'effeuillage* (élagage de l'arbre) du réseau enlève les drains les plus courts, de pentes plus fortes et les moins encaissés pour laisser les drains principaux. Or, on sait d'après le paragraphe précédent que ces drains les plus courts, de pentes plus fortes et moins encaissés correspondent aux plus petits ordres du réseau.

Ces résultats quantitatifs introduisent une prédominance des ordres 1, qui sont les plus nombreux, pour décrire et expliquer la forme du réseau. Toutefois, ce que l'on appelle ordre 1 ne représente pas les mêmes drains à 1 m de résolution et à 4 m. Le changement de résolution d'induit pas seulement une généralisation du tracé des réseaux mais également un changement des objets eux-mêmes ; les ordres 1 étant les plus petits objets représentés à une résolution donnée.

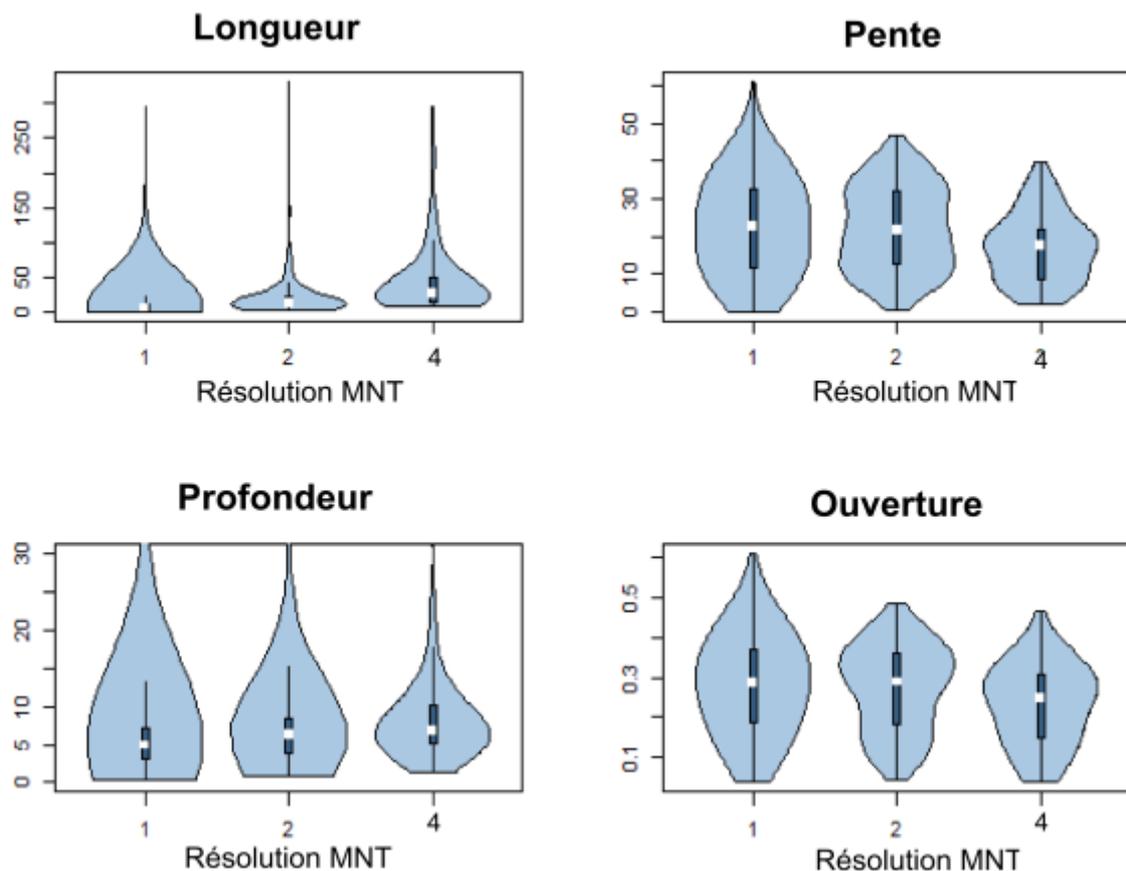


Figure 9.27. Diagrammes en violon : distribution des valeurs des descripteurs par drains pour l'ensemble du bassin du Moulin selon différentes résolutions (1, 2 et 4 m)

B. Analyse inter-bassin

On analyse les moyennes des différents descripteurs par drains, tous ordres de Strahler confondus, pour différents bassins et à différentes résolutions. Sont alors combinés l'effet de la résolution et l'effet de la taille du domaine, ce qui rend l'analyse plus difficile. En plus des effets de la résolution abordée dans le paragraphe précédent, le changement de bassin aboutit à une troncature des éléments aval par restriction du domaine ou au contraire à l'intégration d'éléments en plus à l'aval du réseau lorsque le domaine s'agrandit. Ce qui implique un changement des populations d'objets analysés.

La Figure 9.28 présente les valeurs moyennes des descripteurs (longueurs, pentes, profondeur, ouverture, et angles β) en fonction de la résolution du MNT et ceci pour différents bassins. Lorsque l'on regarde bassin par bassin, on retrouve l'impact de la résolution, conformément à ce qui a été décrit au paragraphe précédent. Cependant, tous bassins confondus, l'impact de la taille du domaine devient capital. Dans le détail, nous retenons trois points principaux de ces résultats :

- On observe une augmentation de la longueur moyenne des drains lorsque la résolution devient plus grossière. L'augmentation de la longueur s'accompagne d'une diminution du nombre de drains. Cette diminution est orientée vers les drains d'ordre les plus faibles, qui statistiquement, sont les plus courts (conformément aux lois de Horton). Les différences entre bassins (par exemple, pour le Laval et Moulin à 1 m) s'expliquent directement par la taille du bassin : plus le bassin est grand, plus le réseau intègre des drains longs, et ce d'autant plus que le bassin a une forme allongée (Laval).
- Les pentes et profondeurs moyennes varient également avec la résolution. La pente diminue progressivement pendant que la profondeur augmente.
- La variation des angles moyens entre arcs en fonction de la résolution est à peu près stable, prenant des valeurs entre 140 et 150°. L'angle β moyen ne semble dépendre ni de la résolution ni de la taille du domaine. Ceci renforce l'idée selon laquelle l'angle ne doit pas être considéré en moyenne mais de manière plus locale, selon les bi-ordres.

En fonction de la résolution il existe un glissement progressif non seulement des valeurs numériques mais aussi de la sémantique (*i.e.* la signification des valeurs mesurées). Ce dernier point est plus délicat à intégrer mais explique plus fondamentalement la dérive numérique (Puech, 2003). La pente apparaît dépendante de la résolution. Vers les résolutions grossières, elle est probablement liée à l'inclinaison globale du domaine dans lequel s'inscrit le réseau des talwegs. Elle correspond à une mesure très globale, limitant le potentiel d'inclinaison des talwegs. Vers les résolutions fines, la signification est plus délicate. Elle correspond à une mesure moyennée des talwegs qui sont *a priori* plus inclinés que le domaine (en considérant la différence entre le point le plus haut et le point le plus bas du bassin).

Bassin	Bouinenc	Laval					Moulin				Ravine AJ	
Résolution	25	1	2	4	8	16	1	2	4	8	0.25	0.5
Ordre de Strahler du réseau	6	7	6	6	4	3	6	5	4	4	4	4

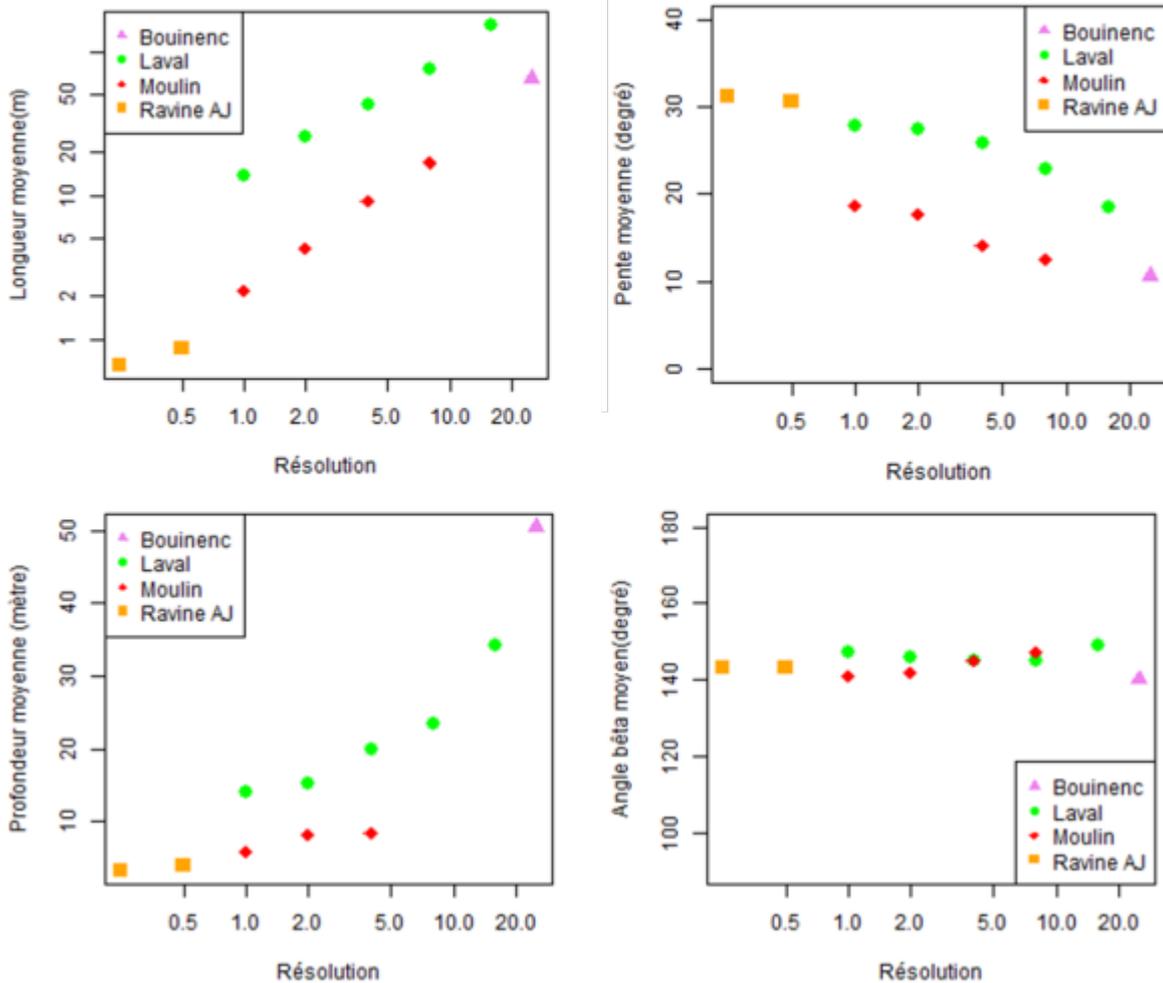


Figure 9.28. Variation des descripteurs (longueur, pente, profondeur et angle θ) moyens par drains, avec la résolution du MNT, pour les différents bassins. La résolution est celle du MNT exprimée en mètres.

En complément de ce graphique, l'indice d'ouverture moyen semble stable, avec des valeurs autour de 0.3 pour tous les réseaux. On peut supposer que les valeurs moyennes globales ne sont pas pertinentes pour analyser ce descripteur.

9.3.2.3. Rôle des ordres 1 dans le réseau

L'analyse des descripteurs tend à montrer l'importance des drains ordres 1 dans le réseau. Les ordres 1 sont une image des sources et constituent une représentation proche de la densité de drainage (en particulier dans les comparaisons entre bassins). Dans une comparaison entre des réseaux de talwegs issus de MNT de résolutions différentes, les ordres 1 sont les éléments les plus changeants et donc les éléments importants à analyser.

L'effet de la résolution est encore plus net sur les ordres 1 que sur l'ensemble du réseau (Figure 9.29). Cela confirme qu'en moyenne, plus la résolution est fine, plus les éléments détectés sont courts, avec une forte pente et peu encaissés. On pourrait s'attendre à ce que, pour une même résolution, les moyennes des descripteurs soient les mêmes pour tous les bassins, c'est-à-dire que les objets « ordre 1 » soient les mêmes. On l'observe bien pour les longueurs mais peu pour les autres descripteurs. Ceci peut s'expliquer par une variabilité de la densité de drainage (*i.e.* du degré de ciselure) entre les bassins.

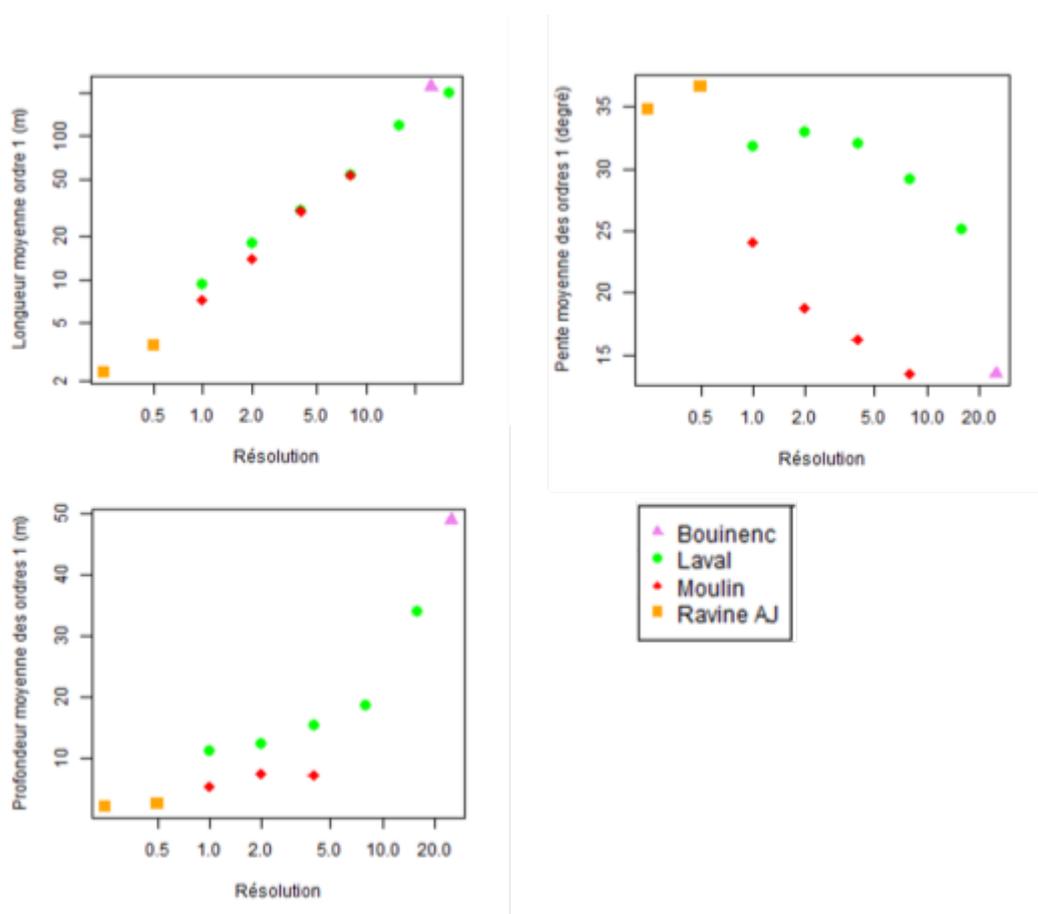


Figure 9.29. Longueurs, pentes et profondeurs moyennes des drains d'ordre 1 en fonction de la résolution pour les différents couples bassin-résolution

D'après la Figure 9.30, il semble qu'à partir des seuls ordres 1, on ait déjà une idée claire de la structure du secteur nu pour le bassin du Moulin. De manière générale, l'image des ordres 1 ou des sources peut être une façon simplifiée de représenter et de comparer des réseaux. Les ordres 1 conditionnent certaines propriétés spatiales du réseau. Toutefois, il ne représente pas tout, en particulier, la forme des drains principaux qui échappent à cette représentation.

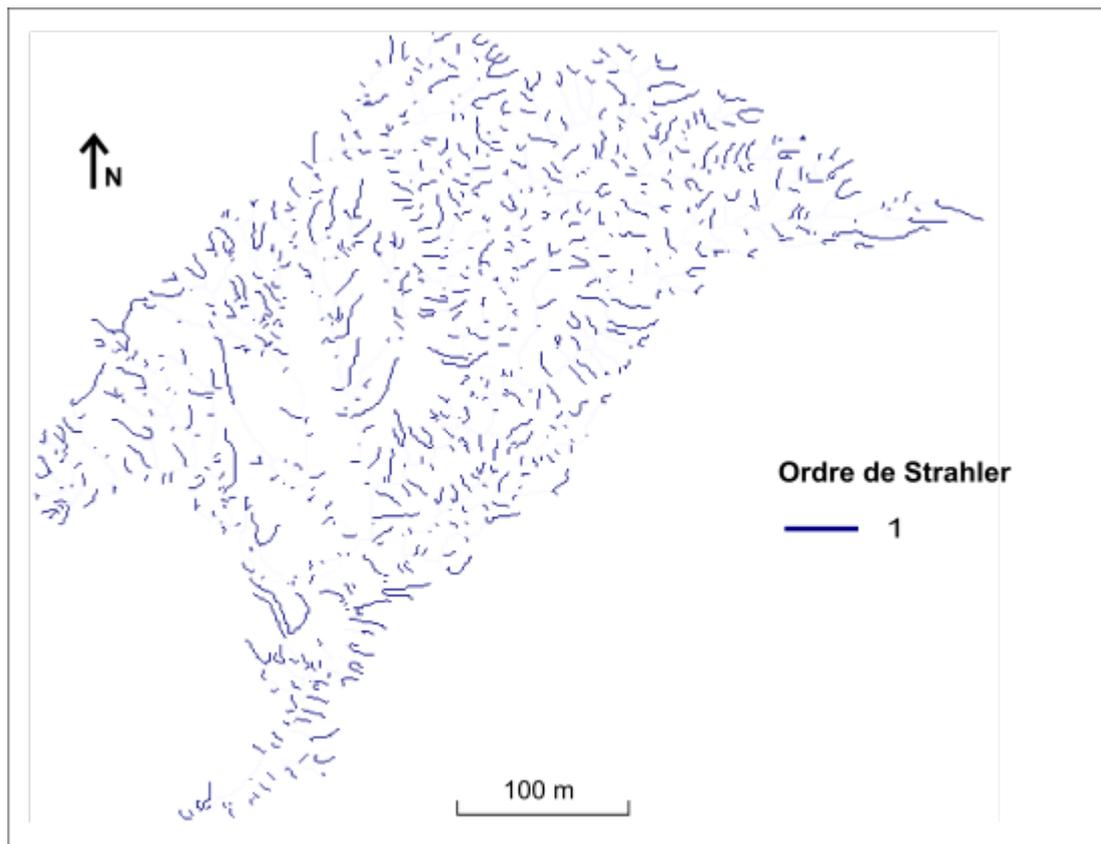


Figure 9.30. Distribution spatiale des drains d'ordres 1 dans le bassin du Moulin

9.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé des descripteurs pour caractériser les éléments du réseau des talwegs et leur environnement. Ces outils s'appuient sur des descripteurs numériques locaux, choisis en lien avec les besoins de la morphologie, et associés à une représentation du réseau sous forme de graphe arborescent. Les descripteurs peuvent caractériser les talwegs du réseau mais également les confluences. Parmi la multitude de descripteurs possibles, nous nous sommes focalisés sur quatre principaux descripteurs géométriques : depuis des descripteurs classiques (la

longueur, la pente) vers des descripteurs plus spécifique de la morphologie (l'encaissement, décrit selon deux composantes, la profondeur et l'ouverture du relief, et l'angle de confluence). En plus de ces descripteurs, nous avons retenu un descripteur topologique local, l'ordre de Strahler, qui constitue un index de position amont-aval dans la hiérarchie du réseau.

A la question de savoir si les MNT sont pertinents pour décrire les réseaux de ravines et dégager des caractéristiques spécifiques des *badlands*, la réponse est oui. On retrouve numériquement les propriétés caractéristiques des *badlands* décrites au chapitre 1 : fortes pentes, densité de drainage élevée et encaissement important. A une résolution de 1 m, les descripteurs mesurés révèlent, pour le Moulin, des pentes de talwegs allant jusqu'à 60° pour les éléments les plus à l'amont, des profondeurs d'encaissement (mesurée par rapport à l'altitude moyenne du voisinage dans un rayon donné) de 20 m en moyenne pour les drains aval. L'indice d'ouverture, dépassant 0.5 pour les ravines amont et nus, traduisent une fermeture claire du relief. L'analyse des angles, moins souvent considérés dans la littérature, indiquent deux grandes catégories de confluences : les confluences symétriques en termes topologiques (bi-ordres identiques) à angles aigus se distinguent des confluences dissymétriques (grande différence entre les bi-ordres) marquées par des branchements quasiment perpendiculaires. A noter que l'ensemble des descripteurs montrent une forte différenciation entre les secteurs sous couvert végétal et les secteurs nus.

Toutefois, on sait que les paramètres d'échelle en particulier la résolution du MNT impacte fortement la description des formes. Outre l'évolution des valeurs numériques, la signification des descripteurs changent avec la résolution (Puech, 2000). Pour évaluer l'effet de la résolution sur les descripteurs choisis, nous avons étudiés des bassins à différentes résolutions. Il en ressort une dépendance forte des longueurs de drains, des pentes et profondeur et une dépendance moins explicite sur les autres descripteurs.

Les analyses qualitative et quantitative des descripteurs montrent une forte sensibilité à la position amont-aval et en particulier à l'ordre de Strahler. L'ouverture et les angles de confluence semblent notamment montrer une dépendance plus forte à la hiérarchie amont-aval qu'à la résolution. Et on peut se demander dans quelle mesure la classification de Strahler est liée aux objets morphologiques (ravin, ravine, rigoles, ...). En plus de cette progression amont-aval des descripteurs, l'analyse par ordre introduit l'importance des drains d'ordre 1 pour représenter, décrire et comparer des réseaux. Ces éléments du réseau constituent une image possible du réseau, plus simple et dont les variations sont plus faciles à interpréter. Cette image, simplifiée dans sa représentation, comprend des objets dont les caractéristiques morphologiques sont, par définition, plus homogènes. Les ordres 1 sont les éléments du réseau les plus sensibles à la résolution et sont donc les plus susceptibles de mettre en évidence de variation d'une résolution à l'autre.

Chapitre 10 : Des descripteurs numériques aux objets morphologiques

Les descripteurs numériques locaux analysés au chapitre précédent vont être utilisés pour réaliser une spatialisation fondée sur des descripteurs thématiques plus directement en lien avec les objets morphologiques. L'objectif de ce chapitre est d'aller vers une cartographie thématique des éléments du réseau. Pour cela, le chapitre 9 a constitué une étape préliminaire, permettant d'établir une base de données numérique des descripteurs élémentaires qui vont nous servir à approcher une spatialisation morphologique. Ce type de cartographie peut constituer un outil pour la comparaison des formes du relief à un instant donné. On se demande alors comment passer des descripteurs numériques locaux aux classes d'objets morphologiques (Figure 10.1).

Les classes d'objets morphologiques sont ici les classes identifiées sur le terrain et présentées chapitre 6 ; les objets ayant été classés en fonction de leur taille. Malgré la simplicité de l'observation réalisée sur le terrain « à titre d'expert », cette information nous paraît suffisante pour une première approche du lien entre les classes d'objets terrain issues d'une vision naturaliste et les descripteurs numériques des éléments du réseau issus de MNT.

Nous chercherons ici à évaluer la capacité des différents descripteurs à discriminer les talwegs et les associer à une classe d'objets morphologiques. On a vu au chapitre précédent que les descripteurs sont sensibles à la position amont-aval dans le réseau. Une des variables clefs sera donc la hiérarchie de Strahler, qui semble être un bon indice de cette position, est suffisante pour approcher ces classes morphologiques. Ces analyses seront également à mettre en perspective avec les variations induites par le changement de résolution.

10.1. Les données terrain de référence

Nous avons travaillé à deux échelles : d'une part, sur le secteur test du bassin du Moulin avec le référentiel terrain du chapitre 6 et d'autre part, sur un secteur test du bassin Bouinenc à une résolution de 25 m. Les arcs de ces réseaux, extraits par les méthodes CI, ont été classés de manière naturaliste. Ce sont deux secteurs majoritairement nus, choisis dans des bassins qui présentent d'autres secteurs sous couvert végétal.

Sur le secteur test du Moulin, la classification des arcs du réseau extrait à une résolution de 1m a été réalisée à partir d'observations de terrain en utilisant comme principal critère la largeur crête à crête des formes. Les 196 arcs sont répartis en trois classes : rigole, ravine élémentaire et ravine. La qualification des objets sur le terrain est parfois difficile, la limite entre les différents types étant floue. Cette incertitude n'est pas quantifiée mais ne doit pas être oubliée lors de l'interprétation des résultats. Notons que, ne pouvant être classés sur le terrain, les arcs du réseau correspondant à une sur-détection (partie 3) ne sont pas pris en compte pour cette analyse.

Sur deux secteurs tests du Bouinenc, la classification des arcs du réseau extrait a été réalisée à partir des informations de la BD Topo. Les 245 arcs sont répartis en deux classes fondées sur une approche hydrologique : cours d'eau à régime permanent et cours d'eau intermittents. Notre connaissance du terrain, nous permet de ranger les cours d'eau permanents dans une classe nommée vallée et les cours d'eau intermittents dans une classe nommée ravine. La classe « vallée » regroupe les éléments que nous avons appelés ravin-vallon et vallée.

10.2. Méthode

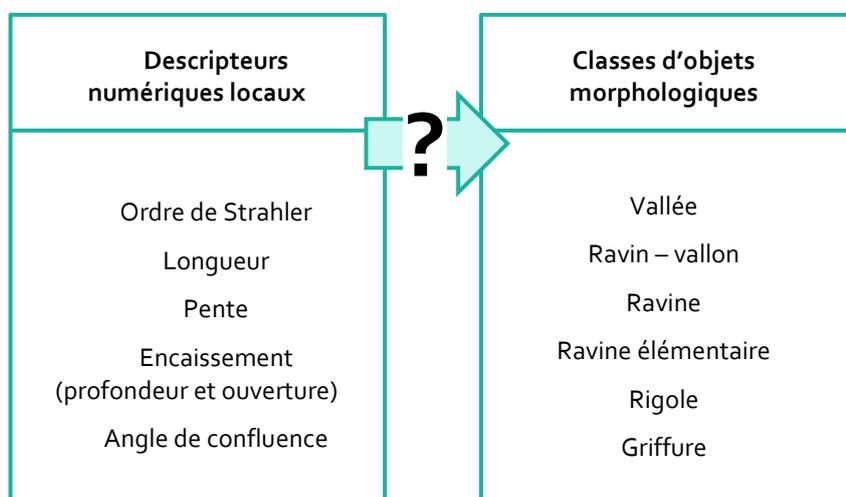


Figure 10.1. Comment passer des descripteurs numériques locaux des éléments du réseau aux classes d'objets morphologiques ?

La méthode utilisée a pour but de traduire des descripteurs numériques élémentaires en descripteurs thématiques permettant de réaliser une classification numérique des objets équivalente à celle des objets morphologiques établie de manière naturaliste (Figure 10.1).

Pour cela, nous avons choisi une approche de classification supervisée de type CART. Le principe est de retrouver les classes connues de la classification de référence à partir des descripteurs numériques. Cette approche vise à mettre en évidence les descripteurs discriminants, qui permettent d'approcher au mieux la classification de référence. Elle repose sur un arbre de classification (CART pour *Classification And Regression Tree*) qui utilise un principe de seuillage hiérarchique dans l'espace des descripteurs (Breiman *et al.*, 1984). Cette méthode a l'avantage, outre sa facilité d'interprétation, de hiérarchiser les descripteurs discriminants pour la classification. Bien que simple, elle est également connue pour sa robustesse, *i.e.* sa moindre sensibilité au surparamétrage.

Plus précisément, la méthode CART génère des classes grâce à des règles binaires construites à partir des descripteurs explicatifs afin que les groupes d'individus soient les plus homogènes (critère d'homogénéité de Gini) possible du point de vue des classes connues. Cette méthode présente l'avantage d'être stable, robuste et les résultats sont facilement interprétables. De plus, elle permet de mettre en évidence des seuils pour la séparation des objets.

Cette exploration comprend deux étapes : 1) La construction d'un modèle sur un jeu de données d'apprentissage pour le réseau des deux secteurs tests. On y associe une statistique de performance qui mesure la conformité entre la classification numérique issue du modèle et la classification de référence. Cette statistique correspond au pourcentage d'arcs bien classés par rapport à la référence. 2) l'application du modèle au réseau entier pour le Moulin et le Bouinenc. On réalise une évaluation qualitative de la qualité du modèle pour voir si les classes obtenues sont cohérentes même en dehors du jeu de données ayant servi à l'apprentissage du modèle de classification.

10.3. Résultats

10.3.1. Modèle construit sur les secteurs tests et performance associée

Un modèle prédictif est construit sur chacun des secteurs tests du Moulin et du Bouinenc à l'aide des classifications de référence. Ce modèle a permis de classer les arcs du réseau. Le résultat de cette classification est présenté Figure 10.2 pour le Moulin et Figure 10.3 pour le Bouinenc. On obtient 86 % d'arcs bien classés sur le Moulin et 91% sur le Bouinenc. Nous estimons que ces résultats sont équivalents compte tenu de l'incertitude qui existe sur les classes de référence.

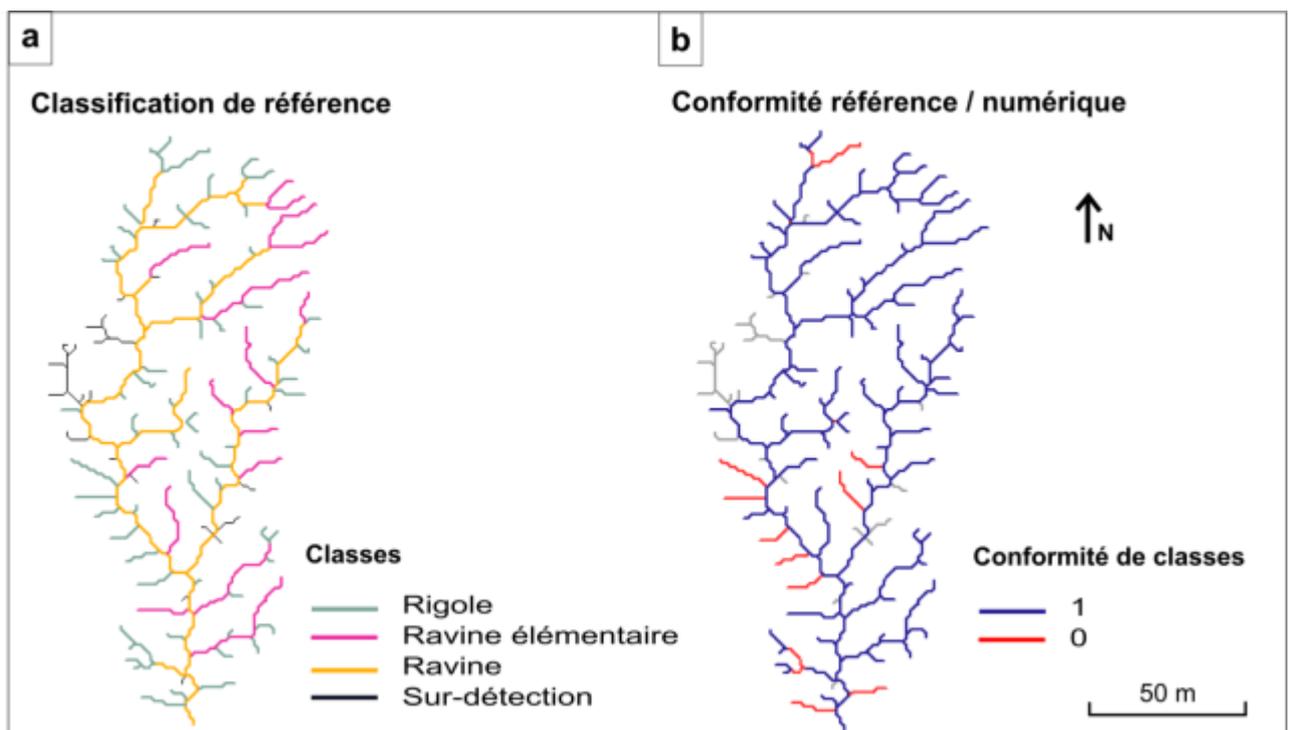


Figure 10.2. Classification de référence, correspondant aux objets morphologiques identifiés sur le terrain (a), et conformité de la classification numérique issue de l'arbre de classification avec cette référence (b), secteur test du Moulin (1 m). Les arcs prenant la valeur 1 sont les arcs bien classés par l'approche numérique, inversement la valeur 0 est attribuée aux arcs mal classés. Les arcs en gris sont ceux issus d'une sur-détection.

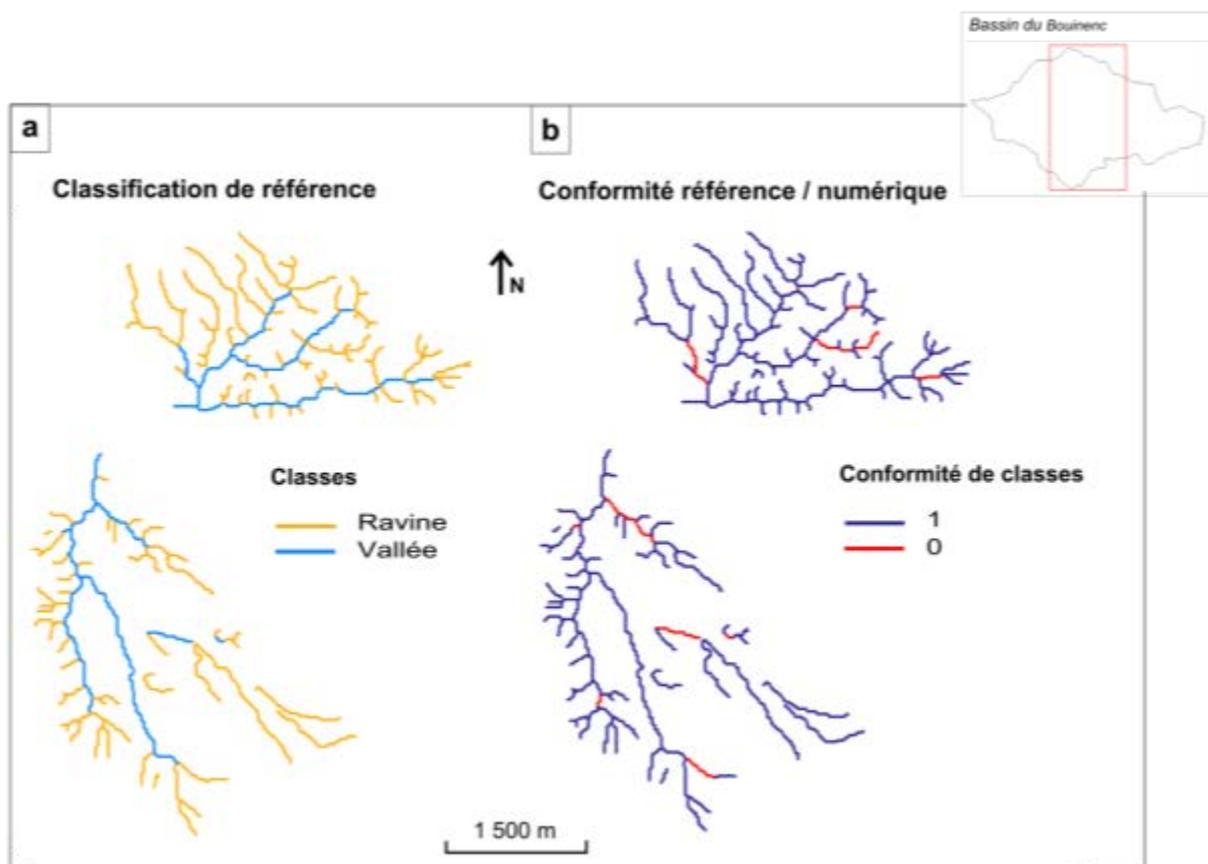


Figure 10.3. Classification de référence, correspondant aux objets morphologiques identifiés sur la BD Topo (a), et conformité de la classification numérique issue de l'arbre de classification avec cette référence (b), le secteur test du Bouinenc (25 m). Les arcs prenant la valeur 1 sont les arcs bien classés par l'approche numérique, inversement la valeur 0 est attribuée aux arcs mal classés. Le réseau n'apparaît pas continu du fait de la présence d'arcs non classés dans la BD Topo.

Les deux arbres de classification obtenus (Figure 10.4) montrent l'importance de l'ordre de Strahler pour discriminer les arcs. Pour le Moulin (Figure 10.4a), les ordres supérieurs à 1 sont des ravines (avec une probabilité d'appartenance à cette classe de 85 %). Les ordres 1 peuvent être des ravines élémentaires ou des rigoles. La discrimination entre ces deux classes peut être effectuée à l'aide d'un critère de longueur (avec un seuil à environ 9 m), comme présenté sur la figure, mais également avec un critère d'angle de confluence β (avec un seuil à environ 166°). Ces deux critères aboutissent à des résultats équivalents. Pour ce qui est des ordres supérieurs à 1, on distingue les ordres 2 et 3, qui ont une probabilité d'appartenance à la classe des ravines de 68%, des ordres supérieurs à 3 qui sont des ravines à 100%.

Pour le Bouinenc (Figure 10.4b), la coupure se fait entre les ordres 2 et 3 : les arcs d'ordres inférieurs à 3 sont classés dans les ravines avec une forte probabilité d'appartenance (96 %) alors que les ordres supérieurs ou égaux à 3 sont classés comme des vallées, avec une probabilité d'environ

80%. A l'intérieur de cette dernière classe, on note une légère variation de probabilité d'appartenance entre les éléments ayant une profondeur inférieure à 61 m (vallée avec 59%) et ceux supérieurs (vallée à 100%).

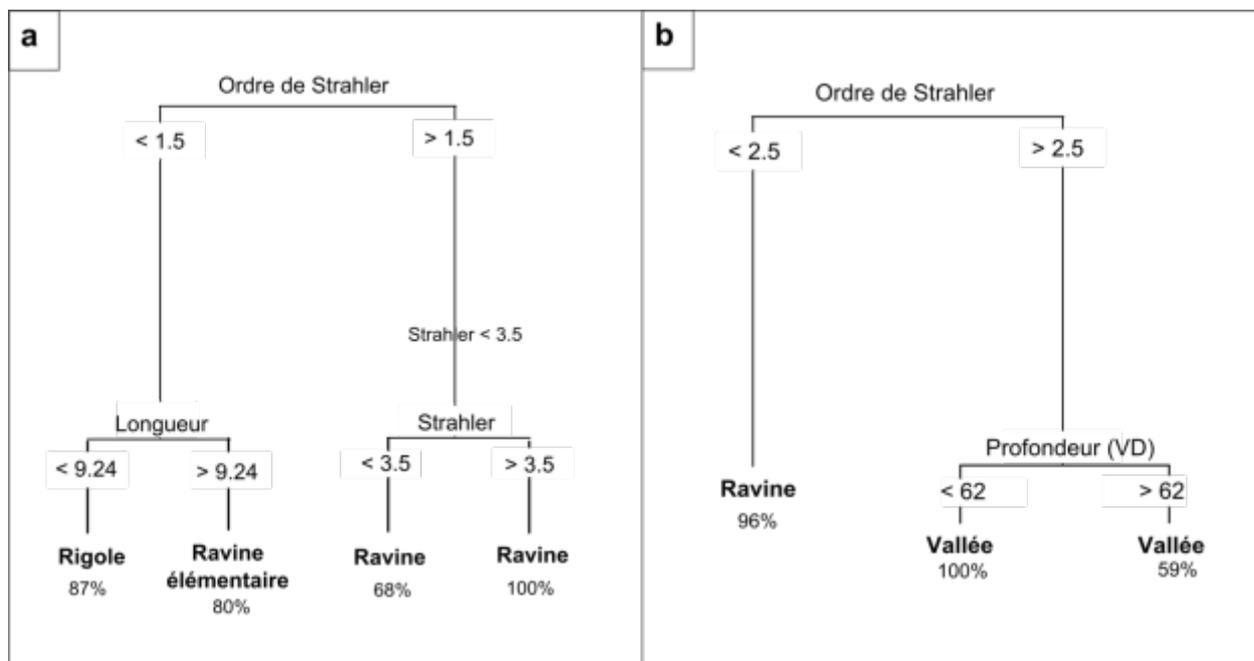


Figure 10.4. Arbre de classification et probabilité d'appartenance à chaque classe : a. pour le secteur test du Moulin (1 m) ; b. pour le secteur test du Bouinenc (25 m)

Pour les cas traités, l'approche CART donne des résultats présentant une bonne correspondance entre les classes numériques et les classes naturalistes de référence. Il en ressort que les classes numériques sont essentiellement issues des ordres de Strahler. L'introduction possible des angles de confluence β pour discriminer les ordres 1 et les classer en « ravines élémentaires » ou « rigoles » va au-delà des résultats obtenus au chapitre 9 où une différence remarquable de valeur d'angle entre bi-ordres symétriques et dissymétriques avait été montrée. L'analyse de l'arbre de classification indique que cette différence est significative en termes de morphologie puisque elle peut être exploitée pour séparer les arcs en « rigole » et « ravine élémentaire ».

A ces résolutions, l'utilisation des descripteurs de pente et d'encaissement n'apporte pas d'amélioration numérique notable et les ordres suffisent pour obtenir une classification raisonnable. Toutefois, si l'on veut utiliser ces résultats pour d'autres bassins ou résolution, il faut être prudent. En effet, on sait les ordres sont très sensibles aux effets d'échelle (en particulier à la résolution du MNT). Un changement de résolution implique un recalage de la classification. Pour stabiliser la classification et s'affranchir en partie de ces effets d'échelle sur les ordres, il faudra introduire dans la

liste des variables discriminantes un élément dimensionné. Par conséquent, même si avec la résolution de 1m, la variable ordre est suffisante pour obtenir des classes thématiques, pour d'autres résolutions ce n'est pas forcément le cas. Une variable dimensionnée devra être introduite. La variable de « profondeur de vallée » relative à l'encaissement peut être un choix intéressant.

10.3.2. Evaluation qualitative de l'application au reste du réseau

Le modèle est appliqué aux réseaux du bassin du Moulin (1m) et du bassin du Bouinenc dans leur totalité pour évaluer sa cohérence en dehors du jeu d'apprentissage. Les résultats cartographiques (Figure 10.5 ; Figure 10.6) de l'application montrent une cohérence spatiale pour les deux bassins. Du fait de l'utilisation de l'ordre de Strahler comme premier critère de discrimination, la cohérence amont-aval est conservée.

Dans le cas du Moulin, les arcs composant le drain principal du Moulin sont classés comme « ravine » alors que ce drain n'est pas une ravine d'après nos critères-terrain de classification des objets morphologiques. Ceci est dû au changement de domaine traité entre le secteur test et le bassin entier. Le secteur test ne comprend pas d'objets plus grands que la ravine alors que l'agrandissement du domaine avec le bassin entier rajoute au réseau des éléments aval, et *a priori* plus grands que la ravine. Nous avons vu au paragraphe précédent que la résolution implique un recalage de la classification, ceci montre que c'est également le cas lorsque la taille du domaine change.

Par ailleurs, le critère de végétalisation n'est pas pris en compte dans ce calcul. Les arcs ont tous été classés sans prise en compte de leur végétalisation à partir du modèle établi sur des secteurs nus. Or nous savons qu'il a un impact majeur sur les descripteurs. Ainsi, il est fortement probable que les arcs sous couvert végétal ne soient pas correctement classés mais cela n'affecte pas notre évaluation qui est qualitative et globale.

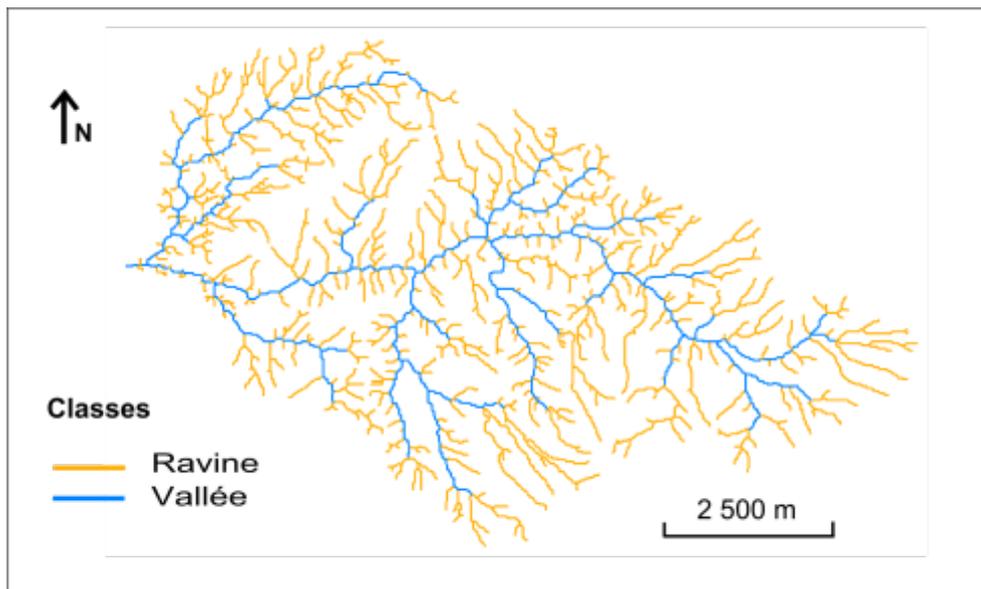


Figure 10.5. Résultat cartographique de l'application du modèle construit sur le secteur test à l'ensemble du réseau du Bouinenc (25 m)

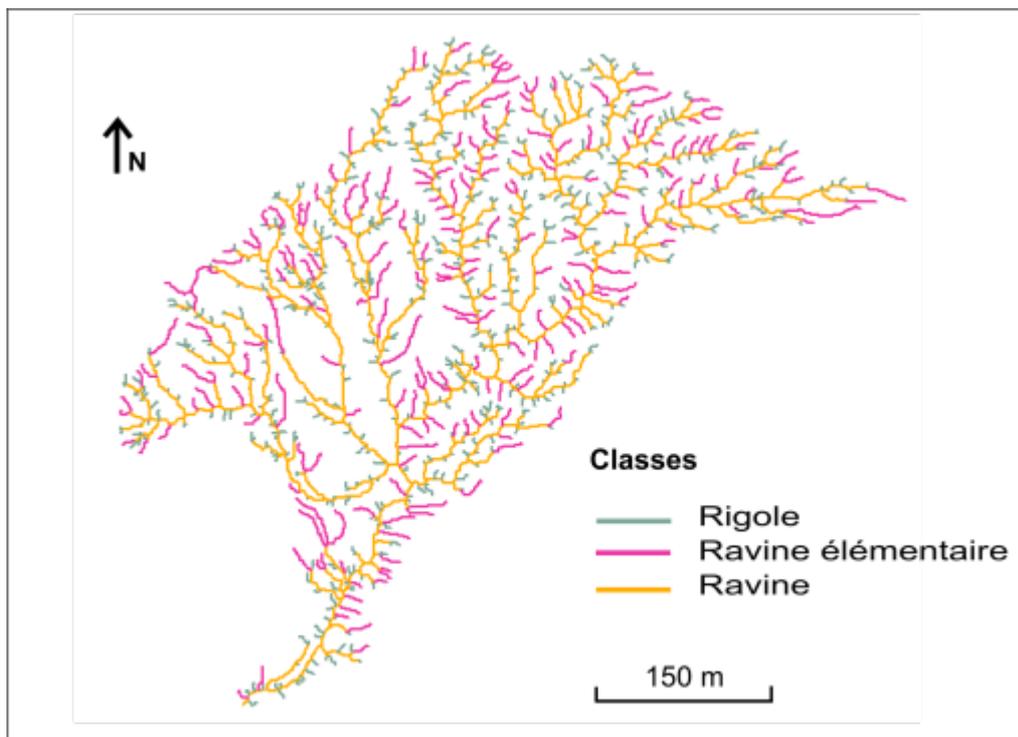


Figure 10.6. Résultat cartographique de l'application du modèle construit sur le secteur test à l'ensemble du réseau du Moulin (25 m)

10.4. Discussion

Les modèles de classification construits par l'approche CART indique une bonne conformité des classes obtenues à partir des descripteurs numériques avec les classes de référence et leur application aboutit à des cartographies spatialement cohérentes. Ce chapitre a permis de poser les premiers éléments pour une spatialisation morphologique.

Il nous paraît important de discuter la pertinence des classifications de référence et des objets morphologiques intégrés, notamment pour le secteur test du Moulin. En effet, le travail de terrain a permis d'observer d'autres formes ressemblant à des cicatrices d'arrachement ou de parties hautes de glissement, dans lesquels s'inscrivent parfois des rigoles. Ces formes ne sont pas distinguées pour ce calcul mais il constitue vraisemblablement une classe d'objets morphologiques supplémentaire à prendre en compte.

On a pu observer dans les cas particuliers traités que les ordres de Strahler étaient les informations les plus importantes pour approcher les classes d'objets morphologiques. Aux résolutions traitées et pour les secteurs nus, il est clair qu'ils sont grandement explicatifs des classes, ce qui confirme l'existence d'un lien présumé entre les ordres et les objets morphologiques. Toutefois, des nuances sont à apporter car, d'une part, à une résolution donnée, les ordres de Strahler ne sont pas toujours suffisants pour expliquer les classes (comme par exemple pour la distinction entre rigole et ravine élémentaire à 1 m) et d'autre part, la numérotation de Strahler est très sensible à la résolution. Ainsi, les objets morphologiques associés à un ordre donné changent avec la résolution (on le voit par exemple entre les deux résolutions : à 1 m les ravines sont associées à aux grands ordres alors qu'à 25 m elles correspondent aux petits ordres). D'où la proposition d'introduire une grandeur dimensionnée comme paramètre stabilisateur de la classification numérique, palliant ce deuxième point.

Quels objets à quelles résolutions ? On sait que les objets représentés sur un MNT changent selon la résolution et le domaine couvert. Avec un MNT, à une résolution et un domaine donnés, on observe les objets morphologiques à travers une fenêtre fixe. Si l'on considère que les objets morphologiques sont organisés de manière hiérarchique dans les *badlands*, la question est de savoir comment se positionne cette fenêtre d'observation sur la hiérarchie des objets en fonction des paramètres de résolution et domaine (Figure 10.7). En sachant que cette fenêtre s'étire vers la gauche lorsque la résolution est plus fine (*i.e.* on représente des objets plus menus) et s'agrandit vers la droite lorsque la taille du domaine couvert augmente (*i.e.* on représente des objets plus grands). Une des problèmes est de pouvoir exprimer ce lien entre paramètres d'échelle et objets morphologiques et de l'intégrer lors de classification numérique.

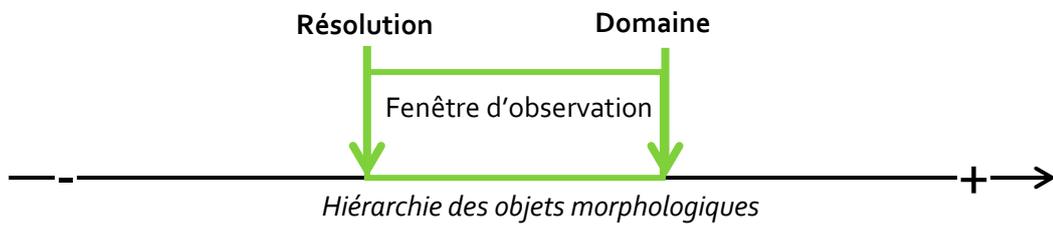


Figure 10.7. Positionnement de la fenêtre d'observation du MNT sur la hiérarchie des objets morphologiques en fonction de la résolution et du domaine

Enfin, quels sont les effets du changement des paramètres d'échelle sur la classification numérique des objets morphologiques ? On suppose pour l'instant que l'on retrouvera un même type de structure d'arbre de classification avec une même hiérarchie des descripteurs, avec toutefois des valeurs de seuils de discrimination différentes, fonction de la résolution et du domaine et une variation des objets représentés, découlant de la position de la fenêtre d'observation sur la hiérarchie des objets.

Résumé de la partie 4

Cette partie porte sur la description numérique des éléments du réseau et montre le potentiel du MNT pour une caractérisation des réseaux de ravines à différentes échelles. Elle repose sur la représentation du réseau sous forme de graphe arborescent. Des descripteurs numériques locaux associés aux éléments du réseau sont choisis et extraits, en supposant qu'ils sont pertinents et suffisants pour représenter les réseaux de ravines en 2D et 3D et pour, dans le futur, pouvoir reconstruire des arborescences similaires. Une analyse croisée est réalisée entre deux types de descripteurs complémentaires : d'une part ceux relatifs à la géométrie décrivant les longueurs, les pentes, l'encaissement (selon deux composantes, la profondeur et l'ouverture du relief) et les angles de confluences, et d'autre part l'ordre de Strahler, relatif à la topologie et décrivant la position d'un élément dans la hiérarchie du réseau. Pour des MNT de résolutions métriques, cette analyse permet de mettre en évidence numériquement des caractéristiques spécifiques des *badlands*, ainsi que la forte sensibilité de la description géométrique à l'ordre de Strahler. En parallèle, l'effet de la résolution sur les descripteurs choisis est montré, avec un effet majeur observé sur les drains d'ordre 1. Alors qu'ils constituent une image simplifiée du réseau, pertinente pour décrire et comparer des réseaux, les ordres 1 sont les drains les plus sensibles à la résolution et donc les plus intéressants à analyser. Pour dépasser ces descriptions strictement numériques, nous tentons d'aller vers des descripteurs thématiques permettant de réaliser une classification numérique des éléments du réseau équivalente à celle des objets morphologiques établie de manière naturaliste. Pour deux bassins à deux résolutions différentes (Moulin à 1 m et Bouinenc 25 m), l'utilisation d'un arbre de classification aide à dégager les descripteurs discriminants permettant d'approcher au mieux la classification de référence. D'après le modèle construit, les classes morphologiques naturalistes sont principalement issues des ordres de Strahler. Toutefois, on s'interroge sur la stabilité des critères de classifications avec les changements de paramètres d'échelle (résolution et domaine).

Partie 5

Description globale des réseaux à partir de la dimension fractale

La dimension fractale est un descripteur global et synthétique de réseau dont l'intérêt réside dans sa propension à s'affranchir des questions d'échelle, portée par sa définition même ; échelle étant entendue ici comme l'échelle de mesure des réseaux extraits. Toutefois, la littérature montre que cet attrait théorique pose souvent des problèmes d'application et d'interprétation. Les définitions et méthodes de calcul sont parfois divergentes et les comparaisons ne paraissent pas toujours évidentes tant dans la significativité des différences que dans leur interprétation.

L'analyse fractale des réseaux, outre la caractérisation de la structure actuelle, permet d'ouvrir sur des questions de long terme, celles de la croissance du réseau, du développement des drains les uns par rapport aux autres. La physique propose en effet des modèles dynamiques, notamment de morphogenèse, associés aux propriétés fractales des objets. Cette propriété doit tout d'abord être établie, et son domaine de validité clairement délimité.

Cette partie a pour objectif d'explorer la signification de ce descripteur global qu'est la dimension fractale. Sa signification regroupe des questions de définitions, d'estimation et robustesse (chapitre 11), et aussi de comparaison et d'interprétation (chapitre 12). Nous tentons de clarifier les conditions d'applications des approches fractales à des objets réels tels que les réseaux de talwegs (ou réseaux hydrographiques), notamment à travers l'étude de réseaux simulés dont les propriétés sont connues. Puis, nous nous attachons aux comparaisons de valeurs de dimension sur des réseaux réels pour les différents couples bassin-résolution dont nous disposons dans les badlands de Draix. Nous rappelons pour finir un schéma interprétatif de morphogenèse issu de la physique, celui de diffusion limitée par l'agrégation.

Le chapitre 1 reprend un article en passe d'être soumis concrétisant une collaboration des unités LGP et TETIS avec J.M. Bardet (SAMM).

Chapitre 11 : Les dimensions fractales de réseaux vectoriels : signification, estimation et robustesse des résultats

La géométrie fractale, considérée comme la géométrie de la nature (Mandelbrot, 1975, 1982), est utilisée dans de nombreux domaines des géosciences et de la géographie (Gouyet, 1993 ; Frankhauser, 1994, 2005 ; Gao and Xia, 1996 ; Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997 ; Lam et De Cola, 2002 ; Tannier et Pumain, 2005 ; Turcotte, 2007 ; Forriez *et al.*, 2010). Elle fournit un cadre mathématique permettant d'appréhender des figures irrégulières ou fragmentées, qu'elles soient des ensembles de points, de courbes ou de surfaces.

Les fractales peuvent être caractérisées – sinon définies – comme des objets dont la structure reste strictement ou en distribution de probabilité la même à toutes les échelles d'observation possibles. Elles sont alors dites autosimilaires et obéissent à des « lois d'échelle *1 ». On distingue les fractales mathématiques obtenus par construction déterministe ou probabiliste, et les fractales de la nature dont les modalités d'élaboration ne sont pas forcément connues. La courbe de Peano, celle de von Koch, le tapis de Sierpinski, l'ensemble triadique de Cantor ou celui dit de Mandelbrot (Douady et Hubbard, 1982) appartiennent au premier groupe; la côte de Bretagne (l'exemple fondateur ; Mandelbrot, 1967), la sinuosité des rivières, l'arborescence du réseau hydrographique, la porosité des sols illustrent la fractalité naturelle. L'existence de celle-ci a toutefois suscité des réserves en raison du petit nombre d'ordres de grandeur sur lesquels elle semble se déployer (Meakin, 1995 ; Fleury, 1998). Certains ont pu ainsi parler de fractalité apparente (Hamburger *et al.*, 1996 ; Avnir *et al.*, 1998).

Mathématiquement, la caractérisation de la fractalité est asymptotique et la transposition des méthodes développées pour des objets abstraits infinis à des objets réels finis pose certaines questions (Lesne, 2004). Les propriétés des objets fractals mathématiques peuvent se prêter à une étude théorique et être parfois connues exactement. Celles des objets naturels résultent plutôt

¹ Une loi d'échelle représente une relation générale entre diverses grandeurs *sans dimension* décrivant le système. Une telle loi n'est généralement possible que lorsqu'il existe une seule unité de longueur indépendante dans l'objet. Gouyet, 1992, p. 10.

d'études statistiques. La principale question porte sur la gamme d'échelle (et ses bornes) pour laquelle l'objet présente des structures fractales. Il paraît nécessaire de prendre en compte le fait que les objets analysés ne sont souvent que des modèles de représentation d'objets réels. A ce propos, le mode de représentation numérique des objets géographiques sous la forme d'objets vectoriels n'est pas sans effet.

D'autres questions primordiales concernent le principal indicateur fractal appelé dimension fractale. Il existe une diversité des définitions avec des significations différentes (Gouyet, 1993 ; Godin, 2003). En particulier, il existe des dimensions fractales théoriques et des estimateurs de ces dimensions que l'on peut désigner sous le terme de dimensions empiriques. Pour les fractales autosimilaires de manière stricte et déterministe (typiquement issues d'un procédé de construction que l'on itère), les différentes dimensions théoriques que nous considérerons sont de même valeur ; mais pour des fractales plus complexes (typiquement issues d'un système dynamique chaotique ou de processus stochastiques) cette équivalence n'est pas assurée. Enfin, pour des objets naturels pour lesquels seules des dimensions empiriques sont accessibles, la pertinence de leurs calculs dépend – essentiellement – de la taille des objets considérés mais aussi d'autres facteurs comme le choix de la gamme des échelles d'investigation ou de la qualité des mesures effectuées.

L'approche des réseaux hydrographiques par la géométrie fractale a déjà fait l'objet de nombreux travaux (Tarboton *et al*, 1988 ; La Barbera et Rosso ; 1989 ; Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997 ; Crave et Davy, 1997 ; Maitre et Pinciroli, 1999 ; Hauchard *et al*, 1999, 2002 ; Schuller *et al*, 2001). Dans le cas présent, nous nous intéressons aux réseaux de talwegs dans des secteurs densément ravinés. Ces réseaux sont considérés comme une image simplifiée et inversée du relief. Nous exposons selon quelle démarche, avec quels résultats et dans quelles limites nous pouvons calculer une dimension empirique d'un tel objet réel irrégulier. On retiendra deux approches d'estimation différentes : la première est une approche géométrique aboutissant à deux dimensions : la dimension par comptage de boîtes (Gouyet, 1993) et la dimension de corrélation (Grassberger et Procaccia, 1983) ; la seconde est liée aux paramètres morphométriques classiques décrivant la topologie du réseau arborescent que sont les rapports de Horton-Strahler (Horton, 1945 ; Strahler, 1957 ; Dodds et Rothman, 1999). Dans ce travail la comparaison des modalités et qualités d'estimation porte d'abord sur des réseaux virtuels simulés dont le mode d'obtention est connu. Cette importante étape a pour but de déterminer ensuite dans quelle mesure une valeur de dimension estimée sur des réseaux réels est significative et comparable à d'autres valeurs. Ce qui nous amènera à clarifier les conditions d'application des techniques d'estimation pour des réseaux réels modélisés numériquement sous forme vectorielle (SIG).

La première partie présente quelques éléments concernant le champ sémantique des réseaux selon les différents modes de représentation et les réseaux virtuels utilisés. La deuxième partie introduit les concepts de la géométrie fractale adaptée aux objets de la nature, puis présente différentes dimensions fractales pertinentes pour la caractérisation des réseaux hydrographiques.

Les estimations de dimensions et incertitudes associées sur les réseaux simulés sont explorées dans la partie 3. Enfin, les particularités des estimations sur des réseaux réels sont abordées à travers l'exemple d'un cas réel type, avant que le chapitre 12 ne s'attache aux comparaisons de résultats pour différents couples bassin-résolution.

11.1. Concepts de la géométrie fractale et méthodes d'estimation des dimensions

11.1.1. Objet fractal, autosimilarité et non-rectifiabilité

La géométrie fractale, souvent considérée aujourd'hui comme appropriée à la représentation de formes naturelles, s'enracine historiquement dans les recherches abstraites sur des objets mathématiques « monstrueux » correspondant à des courbes continues en tout point mais dérivables en aucun point, difficiles à appréhender par la géométrie euclidienne classique (Cantor, 1883 ; Hilbert, 1891 ; Sierpinski, 1915, von Koch, 1904 ; Hausdorff, 1919). Bien d'autres travaux fondamentaux en géométrie, analyse et probabilités ont nourri la création mathématique d'objets irréguliers, fragmentés, dotés d'invariance d'échelle rassemblés – et construits – par Mandelbrot sous l'appellation retentissante de « fractals », « fractales » en français (Mandelbrot, 1975). Le pas fut franchi d'étendre avec enthousiasme (trop d'enthousiasme ?) le modèle fractal à des formes compliquées naturelles. D'où la question : *Are fractal everywhere ?* (copiée de *Fractal everywhere*, Barnsley, 1988). D'où, peut-être, la difficulté de donner une définition des fractales et le recours à de simples propriétés comme l'autosimilarité et la non-rectifiabilité (celle-ci appliquée à une courbe signifie que la courbe n'a pas de longueur finie ; Gouyet, 1992 ; Tricot, 2008). De plus il y a une grande différence à introduire entre les dimensions fractales « théoriques » qui d'une manière ou d'une autre font appel à une propriété asymptotique et ne peuvent donc être considérées que pour des fractales « théoriques » infinies et les dimensions fractales empiriques qui peuvent être calculées pour des objets réels mais dont le mode de calcul requiert des choix et dont les valeurs sont entachées d'une incertitude.

11.1.2. Les dimensions fractales

11.1.2.1. Généralités sur les dimensions fractales

La notion de dimension fractale constitue le principal indicateur de la fractalité d'un objet. Elle mesure en quelque sorte le degré d'irrégularité et de fragmentation d'un ensemble géométrique mathématique ou représentant un objet naturel (Mandelbrot, 1975, 1982). Contrairement à la dimension topologique appelée encore dimension de recouvrement de Lebesgue (qui est de 1 pour une droite, de 2 pour un plan et de 3 pour un volume), la dimension fractale peut prendre – et prend souvent – une valeur non entière. Elle est dite parfois dimension fractionnaire (Mandelbrot, 1967) même si ce nombre peut être irrationnel. La dimension fractale d'un objet est toujours supérieure à sa dimension topologique. Par exemple un réseau linéaire planimétrique a une dimension fractale comprise entre 1 et 2. Plus sa dimension est proche de 2, plus le réseau remplit l'espace plan.

On parle souvent de la dimension fractale comme d'une valeur unique attribuée à un objet. Or il existe plusieurs dimensions fractales et en général elles ne fournissent pas des valeurs identiques. On parlera alors des dimensions fractales d'un objet. Nous en présentons ici quelques-unes qui nous semblent avoir un intérêt pour l'étude des réseaux de talwegs et son arrière-plan théorique.

11.1.2.2. Les dimensions théoriques

A. La dimension de Hausdorff

La dimension de Hausdorff – souvent appelée « la » dimension fractale – est une dimension théorique d'un ensemble de points qui ne prend en compte que la position de ces points. Elle fut introduite en 1918 par Hausdorff et s'obtient de la manière suivante :

On considère un ensemble A de points de l'espace (\mathbb{R}^3). Pour r un réel positif, on considère des ensembles S_n de A (où les n sont des entiers) ayant tous un diamètre (distance maximale entre deux points de S_n) inférieur à r et tels que l'ensemble constitué par l'union de tous les S_n recouvre A . La famille d'ensembles S_n ainsi définie s'appelle un r -recouvrement de A . Ensuite pour tout r positif et tout α positif, on cherche le r -recouvrement de A qui minimise la somme des diamètres des S_n à la puissance α . Lorsque l'on considère la limite de cette somme quand r tend vers 0, on obtient la mesure de Hausdorff de A de dimension α qui est réel positif que nous noterons $m^\alpha(A)$. Lorsque l'on fait varier α entre 0 et l'infini, on s'aperçoit qu'il existe un seuil s tel que pour $\alpha < s$, $m^\alpha(A)$ est infini et pour $\alpha > s$, $m^\alpha(A) = 0$. Ce seuil s est ce que l'on appelle la dimension de Hausdorff de A que nous noterons $D_H(A)$ ou plus simplement D_H . On montre facilement que pour tout ensemble A dans

l'espace, $0 \leq D_H \leq 3$, pour tout ensemble A dans un plan, $0 \leq D_H \leq 2$ et enfin pour tout ensemble A sur une droite, $0 \leq D_H \leq 1$.

B. La dimension de Kolmogorov

La dimension de Kolmogorov (ou dimension de Minkowski-Bouligand) est une version asymptotique de la méthode plus connue du comptage de boîtes (voir ci-dessous). Le principe de calcul de cette dimension est de recouvrir l'ensemble A avec des boîtes de même taille (typiquement des pavés disjoints) puis de faire varier la longueur ε du côté de la boîte (*i.e.* du pavé) et de compter à chaque variation le nombre minimal de boîtes $N(\varepsilon)$ nécessaires pour couvrir entièrement A. La dimension de Kolmogorov D_K correspond à la limite, si elle existe, du rapport entre le logarithme de $N(\varepsilon)$ et $-\log \varepsilon$ lorsque ε tend vers zéro, soit

$$D_K = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left(-\frac{\log N(\varepsilon)}{\log \varepsilon} \right) \quad (11.1)$$

Lorsque cette limite n'existe pas, on remplace la limite par une limite supérieure qui est le plus grand nombre réel s tel que $\left(-\frac{\log N(\varepsilon)}{\log \varepsilon} \right)$ se rapproche une infinité de fois d'aussi près que l'on veut de s quand ε tend vers zéro. Comme précédemment pour la dimension de Hausdorff, on a pour tout ensemble A dans l'espace, $0 \leq D_K \leq 3$, pour tout ensemble A dans un plan, $0 \leq D_K \leq 2$ et enfin pour tout ensemble A sur une droite, $0 \leq D_K \leq 1$. Il existe également une relation entre les dimensions Hausdorff et de Kolmogorov d'un ensemble A:

$$D_H \leq D_K.$$

Pour de nombreuses fractales "théoriques", en particulier les fractales construites à partir d'un procédé itératif répété un nombre infini de fois (typiquement un ensemble de Cantor ou une courbe de von Koch), on a $D_H = D_K$, mais ceci n'est pas vrai dans le cas général. Un contre-exemple simple est celui de l'ensemble des rationnels de l'intervalle $[0,1]$, qui est dense dans $[0,1]$ (c'est-à-dire tel que tout réel de $[0,1]$ peut être encadré d'aussi près que l'on veut par deux rationnels de $[0,1]$), et donc de dimension $D_K=1$, alors que $D_H=0$. On peut se reporter aussi aux fractales obtenues comme attracteurs de systèmes dynamiques chaotiques (Ruelle, 1989).

C. La dimension d'autosimilarité

La dimension d'autosimilarité (D_A) s'applique aux courbes et aux figures fractales strictement autosimilaires dont les différentes pièces constitutives sont construites par itérations successives

avec un seul et même rapport de réduction q (*a unique down scale factor*) ; elle ne peut donc être utilisée que dans un nombre limité de cas, car ce type de procédé de construction de fractales est loin d'être général. On pourrait prendre l'exemple de la courbe de von Koch (Figure 11.1) qui est construite selon des règles déterministes. On part d'un segment de longueur L (itération 0) sur lequel on retire le $1/3$ central que l'on remplace par un triangle équilatéral sans base de côté $L/3$ (itération 1). On recommence cette opération sur chacun des quatre segments de cette nouvelle forme (itération 2) et ainsi de suite. La courbe de von Koch correspond à la limite de cette construction lorsque le nombre d'itérations tend vers l'infini. D'une manière générale, à la n ème itération on dispose de 4^n segments qui sont dans un rapport de longueur $1/3^n$ avec le segment initial. En reprenant la relation générale mise en avant par Sapoval (1997, p. 63) selon laquelle la dimension d'autosimilarité correspond au logarithme du nombre de morceaux nécessaires pour couvrir l'objet, rapporté au logarithme du rapport d'agrandissement faisant coïncider ces morceaux avec l'objet initial, nous obtenons ici $D_A = \text{Log } 4^n / \text{Log } 3^n = \text{Log } 4 / \text{Log } 3 \approx 1.2618$.

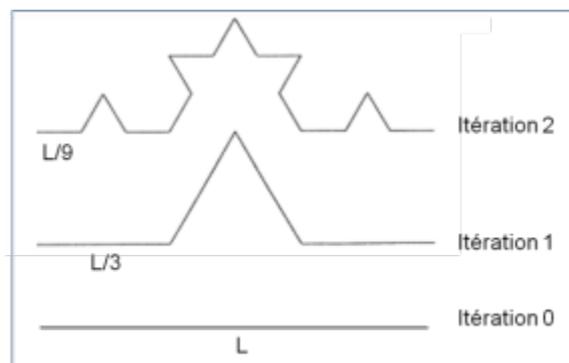


Figure 11.1. Construction de la courbe fractale de Von Koch

Plus généralement pour un objet autosimilaire, la dimension d'autosimilarité D_A est donnée par le rapport suivant (Gouyet, 1992) :

$$D_A = -\frac{\text{Log } N}{\text{Log } q}. \quad (11.2)$$

avec N le facteur de décomposition et q le facteur unique de réduction d'une étape à une autre (ce qui s'écrit aussi $D_A = \text{Log } N / \text{Log } 1/q$, avec $1/q$ le rapport d'agrandissement).

Notons que la position des éléments contenus dans l'ensemble n'intervient pas. Seuls comptent leur nombre et leurs tailles relatives. Des formes différentes peuvent avoir la même dimension. Lorsque les itérations se répètent infiniment la longueur de la courbe tend vers l'infini de même que toute portion entre deux points de cette courbe : la courbe est dite non-rectifiable.

11.1.2.3. Les dimensions empiriques

Les différentes dimensions fractales théoriques ne peuvent, hors cas très particuliers, être calculées pour des fractales de la nature ni même souvent pour des fractales mathématiques (typiquement l'attracteur de Hénon). Nous présentons ici trois dimensions empiriques qui peuvent être, sous certaines conditions, des estimateurs convergents des dimensions théoriques présentées ci-dessus.

A. Dimension de comptage de boîtes

La dimension de comptage de boîte reprend la définition de la dimension de Kolmogorov D_K (éq. 11.1) en l'adaptant au cas réel qui est non asymptotique (on dispose d'un nombre fini de points ou de segments), c'est-à-dire au cas où ε ne tend pas vers 0 mais où ε peut prendre des valeurs suffisamment petites par rapport au diamètre général de l'ensemble (de manière à fournir un nombre de boîtes suffisamment grand) sans être pour autant « petit ». En effet, dans le cas où A est un ensemble fini de points, lorsque ε devient plus petit qu'un certain seuil, dans chaque boîte il n'y a qu'un seul point, et ainsi le nombre de boîtes est le même que le nombre de points et la dimension de comptage de boîtes tend vers 0 si ε se rapproche encore plus de 0 ; dans le cas où A est un réseau constitué de segments, lorsque ε devient plus petit qu'un certain seuil, le nombre de boîtes nécessaires pour recouvrir le réseau évolue en $1/\varepsilon$, comme si finalement les segments étaient tous disjoints et ainsi la dimension de comptage de boîtes tend vers 1 si ε se rapproche encore plus de 0. Il apparaît ainsi que le choix de la gamme de valeurs que l'on peut choisir pour ε est décisif. Concrètement, une fois choisie une famille $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n)$ on effectue la régression des $\log N(\varepsilon_i)$ par les $-\log \varepsilon_i$. On obtiendra ainsi D_B , dimension de comptage de boîtes de la fractale pour la famille $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n)$. Il est clair que plus une fractale naturelle est composée d'un grand nombre de points (ou segments), plus D_B converge vers la dimension D_K de la fractale « théorique » (obtenue avec une infinité de points ou de segments), sous réserve que la dimension de Kolmogorov D_K existe comme limite, et non comme limite supérieure (Hall et Wood, 1993 ; Cutler, 1991).

La Figure 11.2 donne un exemple de calcul de D_B . Sur le graphique de la régression les points résultants du comptage de boîtes sont répartis de manière linéaire et la pente de la droite de régression est la dimension D_B de l'ensemble. Dans le cas d'un seul cours d'eau la dimension obtenue traduit l'existence de méandres et la tortuosité de la forme. On le voit, l'indicateur morphométrique donné par la dimension fractale est synthétique. Toutefois, en considérant le nombre élevé de boîtes nécessaires pour couvrir un objet avec ses détails, on approche concrètement la complexité de la forme de l'objet. D'après J.-F. Gouyet (1993), la méthode du comptage de boîtes est intéressante pour de nombreuses structures fractales.

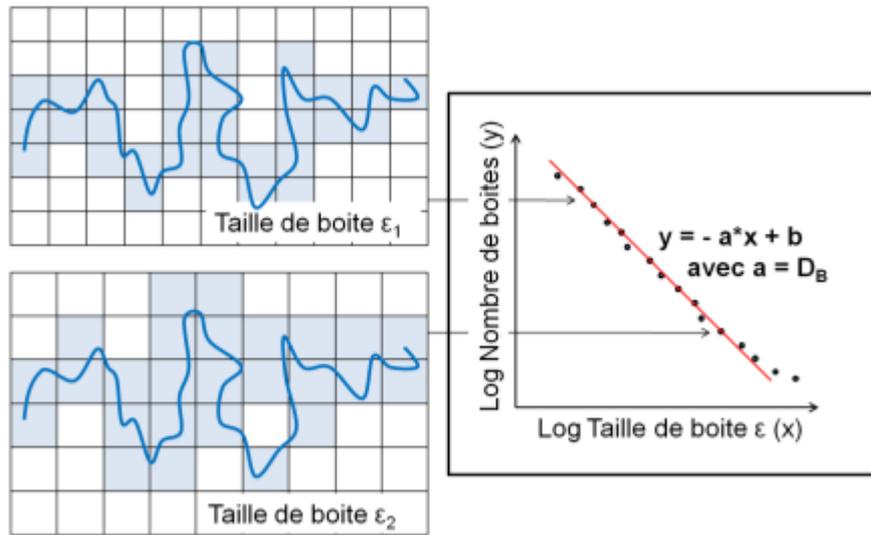


Figure 11.2. Principe du calcul de la dimension fractale par comptage de boîtes (inspiré de Gouyet, 1992)

B. Dimension de corrélation

Pour rendre plus robuste le calcul de la dimension de comptage de boîtes, Grassberger et Procaccia (1983) ont popularisé une autre dimension empirique appelée dimension de corrélation. Le calcul de cette dimension s'effectue sur des points (X_1, \dots, X_n) constitutifs de la fractale considérée. Pour un rayon ε choisi « suffisamment » petit, on détermine $P(\varepsilon)$ qui est la proportion de couples (X_i, X_j) issus de (X_1, \dots, X_n) dont l'interdistance est inférieure à ε (il y a en tout $n(n-1)/2$ couples (i, j) tels que $1 \leq i < j \leq n$). On effectue ce calcul pour plusieurs valeurs $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n)$ choisies « suffisamment petites », puis tout comme pour la dimension de comptage de boîtes, on réalise une régression des $\text{Log}P(\varepsilon_i)$ par les $-\text{Log}\varepsilon_i$. La pente de la droite de régression est la dimension D_C .

Il est à noter que, tout comme la dimension de comptage de boîtes est un estimateur naturel de la dimension de Kolmogorov, la dimension D_C est un estimateur naturel de la dimension théorique D_C , applicable à une fractale constituée d'un nombre infini de points et définie par :

$$D_C = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left(- \frac{\text{Log}P(\varepsilon)}{\text{Log}\varepsilon} \right) \quad (11.3)$$

où $P(\varepsilon)$ est la proportion de couples de points dont l'interdistance est inférieure à ε parmi tous les couples de points de la fractale (là encore une limite supérieure peut remplacer la limite simple si celle-ci n'est pas définie).

Une question intéressante concerne les relations entre D_A , D_H , D_K et D_C . Pour des fractales issues d'une itération infinie et donc autosimilaires de manière déterministe, il y a égalité entre ces différentes dimensions. Mais dans le cas plus général de fractales mathématiques, la dimension D_A n'est pas calculable et on a juste des inégalités entre les dimensions $D_H \leq D_C \leq D_K$.

Une telle relation se retrouve sur les estimations, donc en général $D_C \leq D_B$ lorsqu'il y a « suffisamment » de points pour effectuer des estimations convergentes.

C. Dimension par les rapports de Horton-Strahler

Il est connu que Horton (1945) puis Schumm (1956a) et Strahler (1957) se sont intéressés à la topologie des réseaux hydrographiques. Quelques décennies plus tard, leur approche quantitative a été reliée à la dimension fractale des réseaux (La Barbero et Rosso, 1989; Tarboton, 1996; Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997; Dodds et Rothman, 1999). Ces rapports (3.2.2.1), qui décrivent de manière simple la structure arborescente des réseaux, sont censés permettre, sous certaines conditions, de calculer une dimension fractale apparentée à la dimension d'autosimilarité. En effet, le rapport de confluence revient à savoir, pour chaque niveau hiérarchique, combien de drains sont en moyenne nécessaires pour créer un drain du niveau hiérarchique supérieur et le rapport de longueur peut être considéré comme un facteur moyen d'agrandissement de taille d'un niveau hiérarchique à l'autre. Ainsi, on pose:

$$D_{HS} = \frac{\text{Log } R_c}{\text{Log } R_L} \quad (11.4)$$

Cette formule (éq. 11.4) est comparable à la formule (éq.11.2), $1/R_L$ jouant le rôle de facteur de réduction et R_c celui du facteur de décomposition (on rappelle que $\text{Log}R_c/\text{Log}R_L = -\text{Log}R_c/\text{Log}1/R_L$).

Les conditions d'utilisation de D_{HS} comme estimateur de dimension fractale sont celles d'homogénéité spatiale du réseau (Moussa et Bocquillon, 1993), de pertinence de la moyenne et la prise en compte des lois de répartition des valeurs individuelles. Certains travaux (de Vries et Eckhardt, 1997; Dodds et Rothman, 2001) ont montré que les plus petit et plus grand ordres biaisent le résultat final. Ainsi, ils proposent de ne pas prendre en compte l'ordre 1 et l'ordre maximal du réseau pour le calcul des rapports de Horton. Ce qui est justifié pour les grands réseaux (atteignant des ordres de 10 ou plus) ne peut être retenu pour les réseaux de ravines représentés à haute résolution où les tronçons d'ordre 1 donnent leur spécificité au bassin.

11.1.2.4. Transposition des méthodes à un objet vectoriel fini

Insistons sur le fait que l'autosimilarité des objets naturels, si elle existe, est statistique et que les objets dont il est question ici sont finis et ne peuvent être qualifiés d'« autosimilaires » et de « fractals » que sur une certaine gamme d'échelles (Peckham, 1995 ; Pelletier et Turcotte, 1999, Roland et Fleurant, 2004 ; Thommeret et Puech, 2010). Dans le cas des réseaux de talwegs, on fait l'hypothèse qu'ils possèdent une organisation fractale mais on sait, avant toute vérification de cette hypothèse, qu'à partir d'une certaine limite vers les échelles de mesure fines on ne verra plus l'organisation des talwegs eux-mêmes mais la structure du matériau dans lequel ils s'inscrivent. Ce matériau correspond à un autre objet. Ainsi il n'est plus question du caractère asymptotique de la dimension fractale.

De plus, nous travaillons sur des représentations d'objets et celles-ci changent avec l'échelle d'observation et la résolution du MNT dont elles sont issues. Et plus important encore, les réseaux réels ou simulés dont nous traitons dans ce travail sont des représentations de réseaux sous forme vecteur (paragraphe 1.1). Les arcs sont composés de segments unitaires rectilignes séparés par les vertices (Figure 11.3). Ainsi une courbe irrégulière dans les échelles grossières (sa longueur variant avec le pas de mesure) est rectifiable vers les échelles de mesure fines (sa longueur étant alors proportionnelle au nombre de segments rectilignes unitaires). Lorsque les réseaux sont issus de MNT, la longueur des segments unitaires est la même pour tous et elle est exactement égale à la résolution. Ainsi, l'estimation de l'irrégularité de la forme du réseau – et de sa fractalité – est limitée par la résolution dans les échelles de mesure fines (quand le niveau de détail est grand).

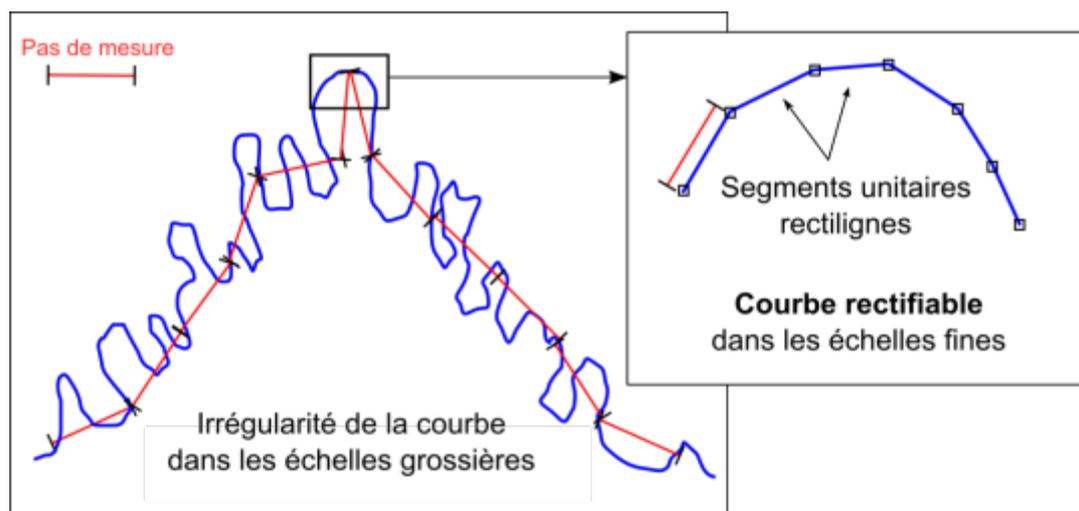


Figure 11.3. Rectifiabilité des réseaux vectoriels

11.2. Les réseaux simulés

Pour aborder les dimensions fractales de réseaux, nous nous sommes fondés sur des réseaux-types simulés dont les paramètres sont connus. Trois types de modèles ont été choisis (Figure 11.4) : les réseaux aléatoires de Scheidegger, d'une part, les arbres binaires parfaits et quasi-parfaits, d'autre part. Leurs formes les rattachent à des schémas érosifs différents que l'on retrouve dans les paysages ravinés : réseaux de griffures ou rigoles qui courent avec une orientation privilégiée sur un versant plan fortement incliné, pour les premiers ; réseaux de grandes ravines profondes juxtaposées les unes aux autres, faisant entre elles des angles quasi constants dans les amphithéâtres amont des bassins versants, cas du réseau binaire à angle 60° (tant qu'il n'est pas trop hiérarchisé du moins).

La première famille de réseaux a été créée dès la fin des années soixante par Scheidegger cherchant à modéliser les réseaux « hortonien » par des processus stochastiques. Il s'appuyait alors sur des observations à méso-échelle (la disposition des bassins de drainage sur le versant nord de la vallée alpine du Rhône suisse). Ces réseaux simulés tendent donc aussi à respecter les « lois de Horton ». Ils valent pour une bande comprise entre deux lignes droites parallèles (la ligne de crête et le fond de la vallée principale), la pente forte virtuelle de la surface drainée (le flanc de montagne) n'autorisant aucun cours d'eau à adopter un tracé dirigé vers le haut (*backward*). Selon la terminologie de Scheidegger il s'agit d'un *directed network (up to down)* (Figure 11.5). La grille qu'il a utilisée est à maille triangulaire avec des points en ligne décalés d'une ligne à l'autre. Chaque point de la grille est drainé. Le caractère aléatoire réside dans le choix à partir d'un point donné de poursuivre au hasard le drainage vers la droite ou vers la gauche, en direction de l'un ou l'autre des deux points les plus proches en contrebas. Le réseau est spatialement homogène et son dessin, assez simple, ne montre que deux orientations du linéaire. D'autres auteurs ont utilisé une grille à maille carrée ou à maille carrée diagonalisée qui tout en respectant le principe du *up to bottom* permet de multiplier les orientations des drains (de Vries et Eckhardt, 1997). Les valeurs des angles entre eux sont aussi plus variées. Les divers types de réseaux de Scheidegger sont spatialement homogènes (chaque point étant drainé) et apparaissent peu hiérarchisés, les convergences de drains d'ordre supérieur à 2 ne se produisant que lentement.

Nous avons simulé les réseaux de Scheidegger de la manière suivante : nous attribuons aléatoirement une altitude entre 0 et 1 à chaque point d'une grille régulière puis la grille est inclinée de sorte qu'il ne reste aucun minimum local. Les réseaux sont tracés en suivant le chemin de plus grande pente (vers l'un des trois voisins en contrebas). Ils ne possèdent aucun paramètre en dehors de la largeur totale de la grille de points et de l'espacement entre les points qui est choisi fixe ici. Tous les réseaux de Scheidegger sont spatialement homogènes (chaque point étant drainé) et apparaissent peu hiérarchisés, les convergences de drains d'ordre supérieur à 2 ne se produisant que lentement.

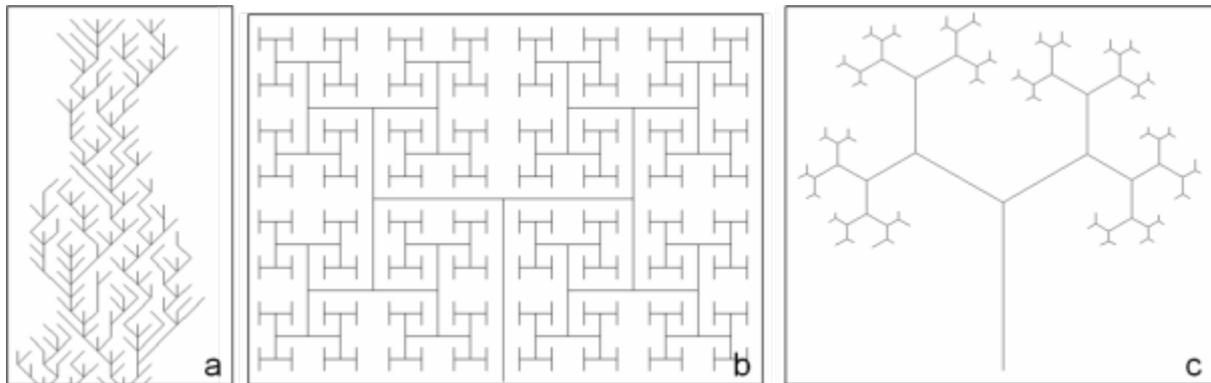


Figure 11.4. Les familles de réseaux : a) Branche d'un réseau aléatoire de Scheidegger ; b) Réseau déterministe parfait ($RI = \sqrt{2}$, $\alpha = 90^\circ$, niveau d'itération = 8 ; c) Réseau déterministe avec bruit sur les longueurs ($RI = 1.667$, $\sigma(RI) = 0.05$, $\alpha = 60^\circ$, niveau d'itération = 6)

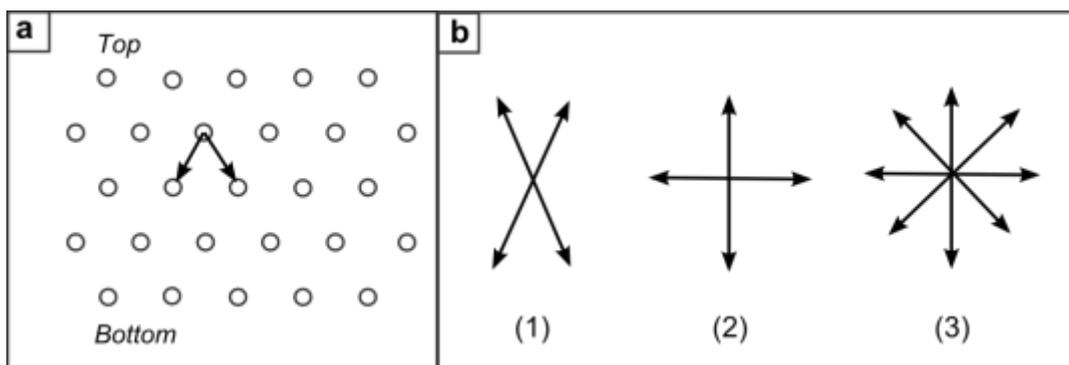


Figure 11.5. Réseaux de Scheidegger : grilles de points et orientations du linéaire. a) Grille de points choisie par Scheidegger pour simuler un réseau aléatoire se développant dans une bande contenue par deux droites parallèles. D'après Scheidegger, 1967, « A stochastic model for drainage patterns into an intramontane trench ». b) Différentes grilles utilisées pour générer un réseau de Scheidegger (d'après de Vries et Eckhardt, 1997) : (1) triangulaire, (2) carrée, (3) carrée étendue aux diagonales. Cas 1, le réseau ne fait apparaître que deux orientations du linéaire (grosso modo NNE-SSW et SSE-NNW, en supposant le haut dirigé vers le nord). Cas 2, deux orientations. Cas 3, quatre orientations ; si le drainage n'admet aucune orientation selon la ligne de pente nulle alors il ne reste que trois orientations. Les réseaux de Scheidegger que nous avons simulés correspondent à cette configuration avec trois orientations.

La deuxième famille est celle des réseaux construits de manière déterministe en suivant des règles hiérarchiques de longueurs et d'angles (Garcia-Ruiz et Otolara, 1992 ; Masek et Turcotte, 1993). Ces réseaux sont binaires c'est-à-dire que chaque confluence a exactement deux arcs amont. Les paramètres de construction sont le rapport de longueur des arcs (RI) entre niveaux hiérarchiques

successifs, l'angle entre les deux arcs amont (α) et le niveau d'itération. On part du segment le plus long au niveau d'itération zéro ; à chaque incrémentation du niveau d'itération le réseau se développe vers l'amont et son ordre hiérarchique s'élève. A l'intérieur de cette famille, on distingue des réseaux dont les paramètres permettent que les arcs ne se recoupent jamais même si le niveau d'itération est proche de l'infini et les réseaux qui finissent par se recouper. Même si, par certains aspects, ces derniers sont plus proches des réseaux réels qui ne sont ni réguliers ni des objets dont les règles de composition peuvent être répétées à l'infini (ne serait-ce qu'en raison de la contrainte de voisinage), nous n'étudierons évidemment pas les niveaux pour lesquels les arcs se recouper, le réseau devenant, globalement, trop peu réaliste.

A partir des réseaux déterministes, nous créons une autre famille de réseaux dont la longueur est bruitée. Pour la création de chacun des arcs, le paramètre de rapport de longueur est une valeur tirée au hasard dans une normale centrée sur la moyenne (μ) et d'écart-type σ .

11.3. Estimation de dimension fractale par comptage de boîtes sur réseaux simulés et précision des estimations

11.3.1. Détermination d'un domaine empirique de fractalité

Dans les paragraphes qui suivent nous nous attachons à la méthode par comptage de boîtes en mettant en valeur quelques règles de comportement de réseaux vectoriels simulés. Nous traitons en premier lieu des réseaux de Scheidegger, réseaux aléatoires reconnus comme « *the simplest, physically reasonable model of river network* » (Dodds et Rothman, 2001, p. 29). La première information concerne l'existence de plusieurs « pentes » dans la relation Log-Log. Ainsi (Figure 11.6), pour un réseau de Scheidegger simulé d'ordre cinq.

Lorsque la taille de la boîte est inférieure à la taille du segment unitaire, la pente tend vers 1. Comme indiqué ci-dessus, le domaine des petites boîtes est celui où la longueur du linéaire devient proportionnelle au pas de mesure. On sort de l'objet fractal. Cette première limite est facile à déterminer. Une seconde limite s'impose. Elle correspond vers les grandes tailles de boîtes à l'apparition d'une instabilité des résultats du comptage. La pente qui se dessine alors ne traduit qu'un bruit du pavage (Tarboton *et al*, 1988). Entre les deux limites, il existe un domaine porteur de sens en termes de fractalité et une pente qui est l'estimation de la dimension fractale D_B , (ici environ 1,7). Ce domaine entre les deux limites en rouge est parfois appelé domaine d'autosimilarité, mais nous préférons l'appeler domaine empirique de fractalité.

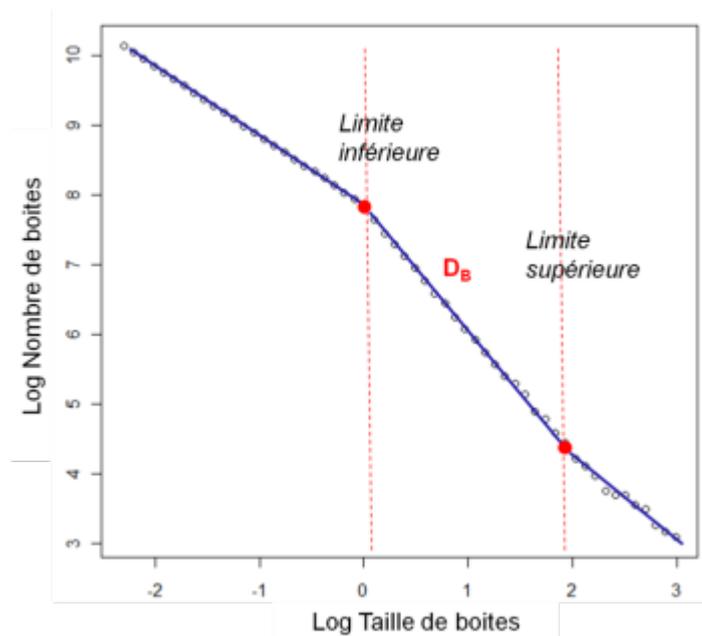


Figure 11.6. Détermination du domaine à considérer pour l'estimation de la dimension fractale par comptage de boîtes – exemple du réseau de Scheidegger.

Il est possible de déterminer ces limites de manière automatique. La méthode consiste à rechercher les points de rupture (marqués en rouge sur la figure) entre les domaines qui suivent des tendances linéaires différentes. Pour cela, on considère trois régressions linéaires (linéarités par morceaux) et on recherche les points de rupture qui minimisent la somme des carrés des écarts des points à la droite pour la droite centrale ; celle-ci permettant de calculer la dimension du réseau.

Nous observons (Figure 11.6) que les limites déterminées à l'aide de cette méthode d'optimisation sont pertinentes (la limite inférieure du domaine d'estimation correspond bien à la valeur de la résolution, ici 1m). Dans de nombreux cas de réseaux naturels, il est possible d'utiliser ce procédé afin de borner le domaine sur lequel est effectué le calcul de D_B . Lorsque l'on s'intéresse à des réseaux de dimensions proches de 1, il devient difficile de borner l'intervalle pertinent.

11.3.2. Paramètres géométriques et domaine d'estimation de la dimension fractale par comptage de boîtes

Dans les paragraphes suivants, nous cherchons à tester la cohérence des résultats de l'estimation par comptage de boîtes pour différents paramètres géométriques d'une même structure, celle d'un réseau de Scheidegger.

11.3.2.1. Effet de la longueur de linéaire du réseau – pour une même structure de réseau simulé (réseau de Scheidegger)

Pour apprécier l'effet de la taille du réseau, nous avons réalisé un comptage de boîtes sur quatre réseaux emboîtés. Ils se développent sur des domaines de tailles différentes et surtout ils possèdent des longueurs de linéaire différentes. Les sous-ensembles sont issus d'un découpage d'un réseau de Scheidegger simulé sur une grille 250×250 cellules de taille unitaire 1m (Figure 11.7). Ces quatre réseaux présentent une même organisation spatiale, on s'attend donc à une même dimension fractale. On observe que le point de transition marquant la limite inférieure du domaine d'estimation de la dimension fractale correspond à la même taille de boîte pour les quatre réseaux (cette taille est celle des cellules de départ) et que les pentes sont les mêmes (donc même D_B). En revanche, on constate un décalage vertical entre les quatre courbes qui s'explique directement par la variation de la longueur totale de linéaire et donc par le nombre de boîtes pour chacun des réseaux : plus la longueur totale est importante, plus il faut de boîtes d'une taille donnée pour couvrir le réseau et plus la courbe est décalée vers le haut.

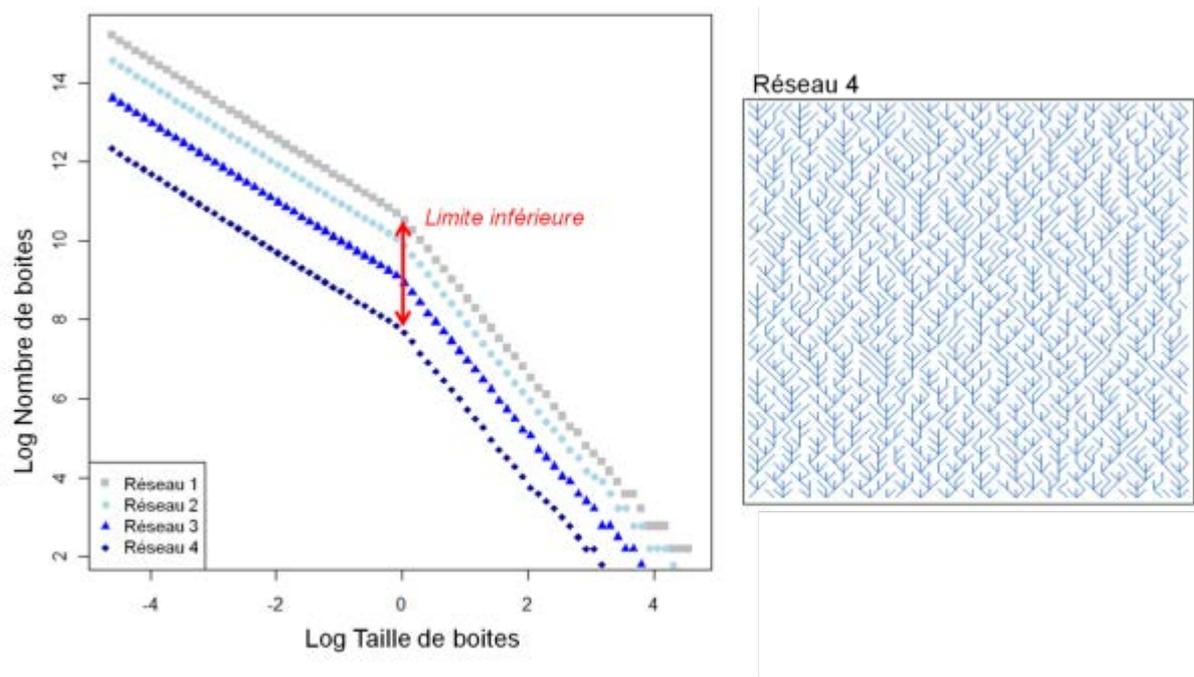


Figure 11.7. Décalage vertical des résultats de comptage de boîtes pour quatre sous parties d'un réseau simulé (réseau de Scheidegger). Le réseau 4 est le plus petit sous-ensemble (ordre de Strahler ici 5).

11.3.2.2. Effet de la dilatation (réseau de Scheidegger)

Nous avons en quelque sorte étiré ou dilaté un réseau de Scheidegger en le simulant sur des grilles de 100*100 cellules mais avec des tailles de cellules différentes, respectivement de 1, 2, 4 et 8 mètres. Quatre réseaux ont été générés. La pente qui permet d'estimer la dimension de boîtes est la même pour les quatre réseaux avec un simple décalage horizontal de la limite inférieure. Ce décalage rend compte des différentes résolutions (Figure 11.8). On ne constate pas de décalage vertical du point de transition (limite inférieure) car le rapport entre la taille du domaine et la résolution (taille de cellule) est constant. Ces variations de la résolution avec un même nombre de cellules n'a pas d'effet du D_B .

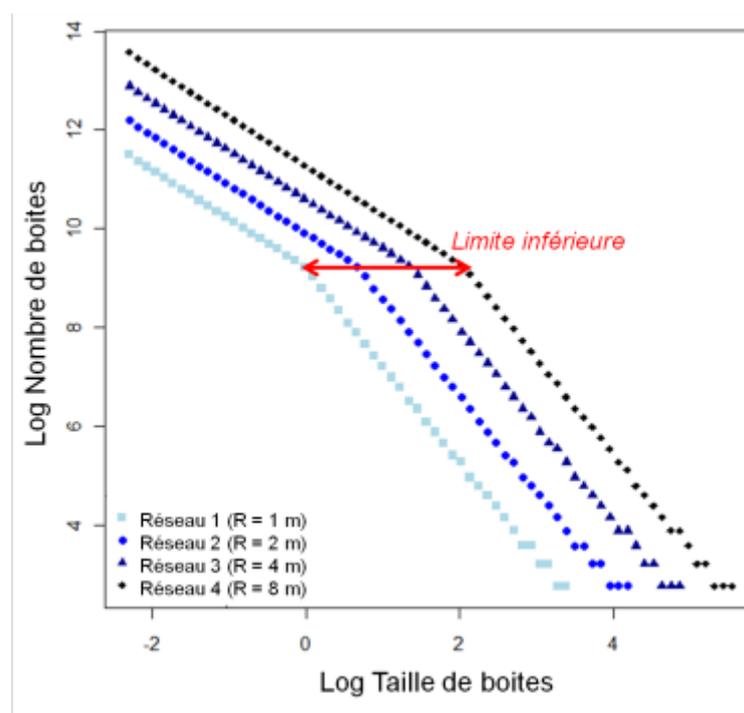


Figure 11.8. Décalage horizontal des résultats de comptage de boîtes par extension d'un réseau de Scheidegger (extension du domaine et de la taille des cellules)

11.3.2.3. Effet de l'orientation du réseau (réseau de Scheidegger)

Une rotation de 90° a été réalisée sur un réseau de Scheidegger. On observe sur la Figure 11.9 que la rotation du réseau n'a pas d'impact sur le domaine pertinent pour l'estimation de la dimension fractale par comptage de boîtes : même point de transition et même pente. Le décalage sur la partie gauche du graphique est expliqué par la variation de la proportion de segments en

diagonale. Il en est de même pour le bruit de pavage à droite du graphique. Ceci traduit une distribution statistique de l'orientation des arêtes quasi-constante entre les réseaux.

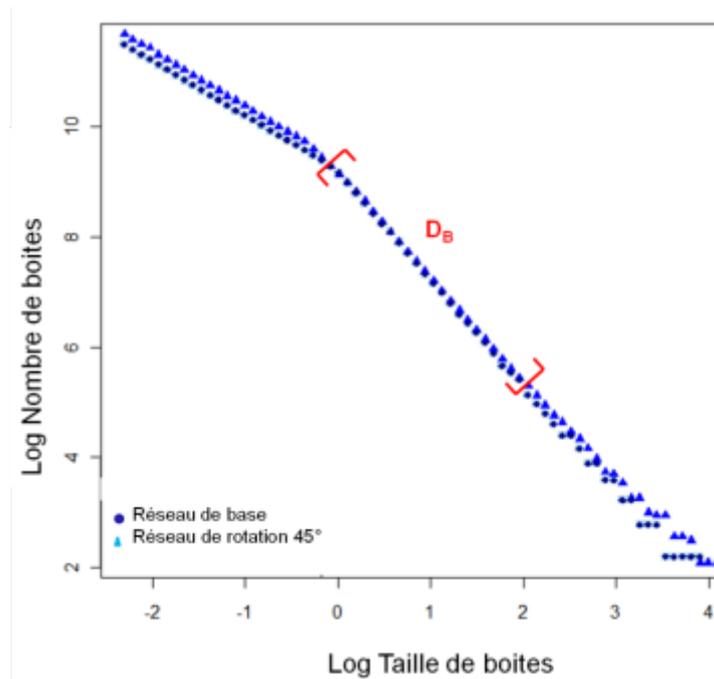


Figure 11.9. Effet de la rotation du réseau sur le comptage de boîtes (réseau de Scheidegger)

11.3.2.4. Le cas des réseaux binaires

La méthode d'estimation par comptage de boîtes sur les réseaux binaires parfaits ou quasi-parfaits (Figure 11.5) fait de même apparaître trois pentes dans la relation Log-Log ; celle du côté des petites tailles de boîtes prenant comme précédemment la valeur 1 et pour la même raison (la longueur du linéaire devient proportionnel au pas de mesure).

Pour le réseau binaire parfait construit avec un angle de 90° , un rapport de longueur de $\sqrt{2}$ et susceptible par itérations successives d'occuper tout l'espace, la pente centrale se rapproche de la valeur 2, celle de la fractale déterministe autosimilaire stricte correspondante.

Les expériences montrent que plus le nombre d'itération est élevé – et donc aussi le niveau de hiérarchisation du réseau² – plus le domaine d'estimation de la dimension fractale est large, la limite

² On rappelle que pour les réseaux binaires parfaits le niveau d'itération plus 1 correspond à un niveau de hiérarchisation. L'itération zéro correspond à l'arc le plus grand et le niveau croît avec des arcs de plus en plus petits.

inférieure se déplaçant vers la gauche, du côté des petites tailles de boîtes (celles-ci permettant de couvrir des arcs de plus en plus petits). La sensibilité à la hiérarchisation du réseau se retrouve dans les grandes tailles de boîtes avec une plus ou moins grande instabilité des résultats selon le niveau d'itération (de fait, avec une forte instabilité des résultats pour une faible hiérarchisation). Cette instabilité se retrouve sur d'autres réseaux et intervient dans la précision des estimations.

11.3.3. Incertitude des estimateurs selon les types de réseaux

La détermination de l'incertitude sur l'estimation des dimensions fractales par comptage de boîtes et par les indices de Horton-Strahler est difficile et nous tentons d'apporter des éléments de réponse pour les réseaux comportant un aspect aléatoire. On pourrait être tenté d'utiliser, notamment pour les réseaux déterministes, l'intervalle de confiance portant sur le coefficient directeur de la droite de régression « Log-Log », qui n'est autre que la dimension de comptage de boîtes, mais ceci est contestable lorsque les résidus ne sont pas indépendants et non gaussiens, ce que les expériences numériques ne semblent pas attester.

L'incertitude des réseaux aléatoires est fondée sur la répétition de l'estimation de la dimension sur un grand nombre de réseaux (jusqu'à 100 réalisations). Une série de tirages d'un même type de réseau – avec le même ordre de Strahler – est effectuée et la dispersion des résultats analysée. Sur l'ensemble des valeurs, nous retenons comme intervalle de confiance les limites qui permettent de conserver 95% des valeurs autour de la moyenne. Nous supposons que les 5% de valeurs extrêmes ne sont pas significatives.

Les types de réseaux simulés et les résultats sont présentés Tableau 11.1. Lorsque cela est possible, les valeurs de dimension obtenues sont comparées aux valeurs des dimensions asymptotiques théoriques ou à des valeurs rapportées dans la littérature.

11.3.3.1. Les réseaux binaires

Les résultats obtenus sur les réseaux binaires parfaits avec différents angles de confluence (90° et 60°) montrent que la dimension de boîtes tend vers la valeur de dimension asymptotique et théorique (Figure 11.10).

Le réseau binaire parfait avec angle de confluence à 90° admet la valeur de référence 2. Celle-ci correspond à la dimension fractale théorique d'une courbe infinie autosimilaire stricte construite par itérations successives. Il s'agit donc d'une dimension d'autosimilarité D_A obtenue en application de la formule (éq. 11.2) et valant ici $-\text{Log } 2/\text{Log } 1/\sqrt{2}$ (soit $\text{Log } 2/\text{Log } \sqrt{2}$). Cette valeur est aussi celle de l'estimation de la dimension fractale du réseau par les rapports de Horton-Strahler (D_{HS}). Les

réseaux de faible niveau hiérarchique montrent une dimension de boîtes fort éloignée de la valeur de la dimension asymptotique, alors que les réseaux fortement hiérarchisés se rapprochent de plus en plus de cette valeur.

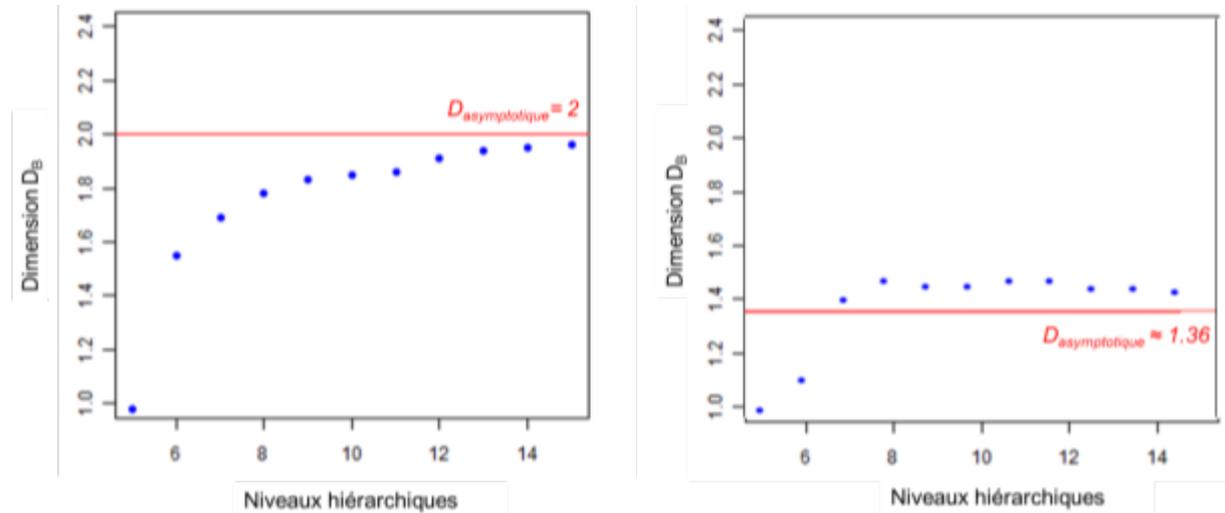


Figure 11.10. Evaluation des dimensions fractale estimée par comptage de boîtes pour différents niveaux hiérarchiques – à gauche, réseau 1 : binaire parfait $R_C=2, R_L = 1/\sqrt{2}, \alpha = 90^\circ$; à droite, réseau 2 : binaire parfait $R_C=2, R_L = 1.67, \alpha = 60^\circ$

Le réseau binaire parfait avec angle de confluence à 60° (Figure 11.10) montre également des différences considérables selon le niveau de hiérarchisation. Avec le développement du réseau associé à la multiplication et à l’amenuisement des branches externes, la dimension de boîtes approche (et même dépasse un peu) la dimension théorique D_A d’une courbe infinie autosimilaire stricte qui vaudrait ici 1,36 ($\text{Log } 2/\text{Log } 1,67$). Ce rapport est aussi celui des valeurs des indices de Horton.

Pour le réseau binaire bruité, les valeurs moyennes obtenues sur 100 réalisations augmentent régulièrement avec le niveau hiérarchique et peuvent être considérées comme robustes à un niveau hiérarchique élevé (Figure 11.11). Les réseaux d’ordre 8 ou supérieur sont seuls à s’approcher de la valeur 1.36, valeur de référence retenue pour le réseau non bruité. La faible dispersion des estimations obtenues par les rapports de Horton-Strahler résulte de la faible valeur de l’écart-type sur le rapport des longueurs (RI).

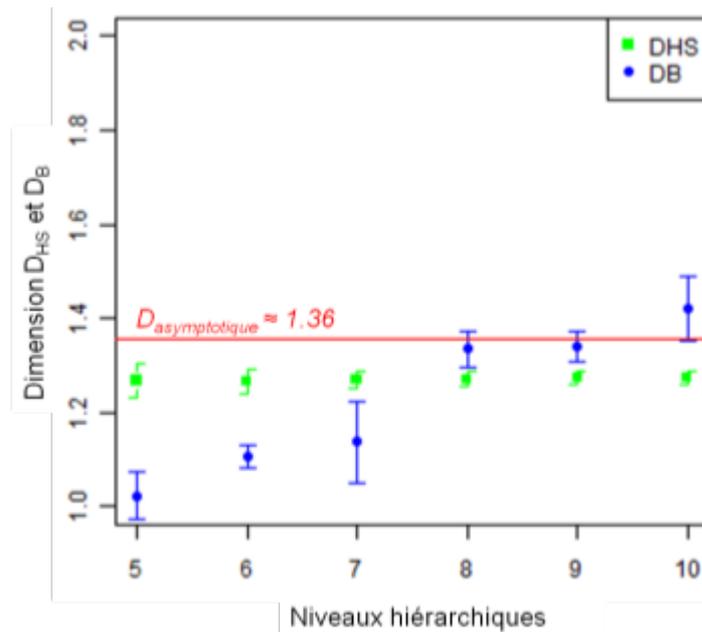


Figure 11.11. Evaluation de la dimension fractale estimée par comptage de boîtes pour différents niveaux hiérarchiques – réseau 3 : binaire bruité $R_c=2$, $R_L = 1.67$, $\sigma(R_L)=0.05$, $\alpha = 60^\circ$. 100 réalisations par niveau hiérarchique.

11.3.3.2. Les réseaux de Scheidegger

Les dimensions fractales de réseaux aléatoires de Scheidegger révèlent un comportement moins évident que les réseaux binaires (Figure 11.12). Trois remarques peuvent être formulées :

- L'estimation par les rapports de Horton-Strahler est très instable (i.e avec une très forte incertitude) et elle dépasse systématiquement la valeur 2 à partir de l'ordre 6. Elle ne paraît pas appropriée pour caractériser la structure ce type de réseau.
- L'estimation par le comptage de boîtes ne réserve, elle, en revanche, pas de mauvaise surprise : D_B augmente régulièrement et globalement l'incertitude se réduit du niveau 4 au niveau 7. Pour les niveaux 5, 6, 7, en termes d'incertitude, l'estimation est donnée à moins de 3% (à moins de 1% pour le niveau 7, ce qui peut s'expliquer par la forte ramification du réseau).
- Avec l'élévation du niveau hiérarchique, DB semble tendre vers 2 et non vers la valeur de 1.5. issue de la littérature (de Vries et Eckhardt, 1997 ; Dodds et Rothman, 1999). Ce 1.5 n'est qu'une valeur de comparaison dont l'estimation repose sur les rapports de Horton-Strahler obtenus sur de très grands réseaux (3000*3000 cellules) après dix simulations ; RC à 5.15 ± 0.03 et RL à de 2.95 ± 0.02 sont donnés par de Vries et Eckhardt (1997) pour

une grille identique à celle utilisée ici. Pour D_B , atteindre 1.8, voire tendre vers 2 est conforme à la géométrie du réseau : il est construit à partir d'une grille régulière dont tous les points appartiennent au réseau. Pour un espacement entre les points (résolution de grille) de plus en plus petit relativement à la taille totale de la grille, le réseau remplit de plus en plus l'espace. On peut induire des expériences numériques que la dimension de boîtes autant que la dimension de corrélation tendrait vers 2, pour des réseaux d'ordre de plus en plus grand.

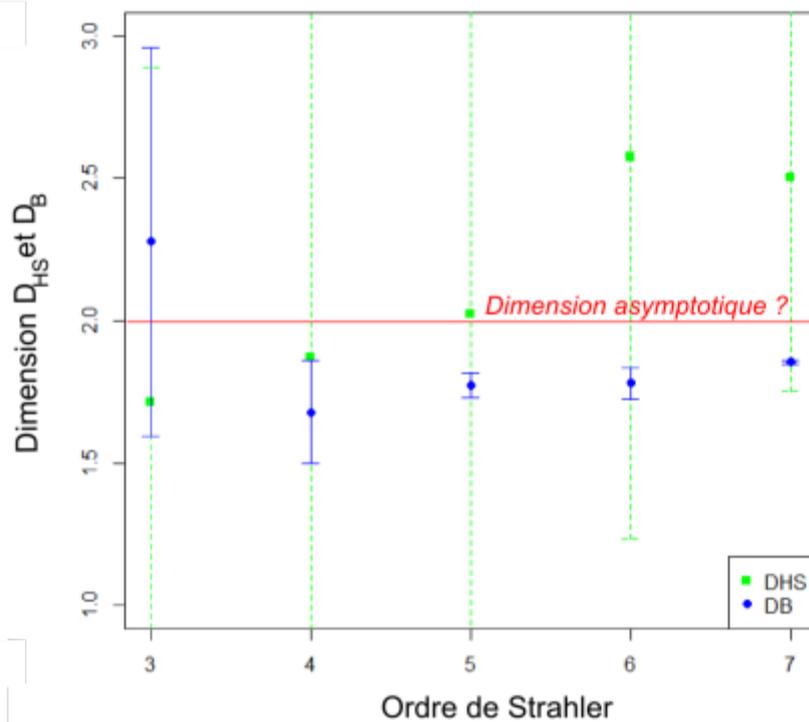


Figure 11.12. Evaluation de la dimension fractale par comptage de boîte et par rapports de Horton-Strahler – réseau 4 : aléatoire de Scheidegger. 50 réalisations par ordre.

Types de réseaux	Nombre d'itérations	Ordre	Dimension de boîtes		Dimension de Horton-Strahler		Dimension asymptotique
			D _B	IC	D _{HS}	IC	
Binaire parfait angle 90° <i>construction déterministe</i>	1 par niveau	5	0.98				2 dimension d'autosimilarité et LnR _C /LnR _L
		6	1.55				
		7	1.69				
		8	1.78				
		9	1.83				
		10	1.85				
		11	1.86				
		12	1.91				
		13	1.94				
		14	1.95				
15	1.96						
Binaire parfait angle 60° <i>construction déterministe</i>	1 par niveau	5	1.00				1.36 dimension d'autosimilarité et LnR _C /LnR _L
		6	1.11				
		7	1.40				
		8	1.47				
		9	1.45				
		10	1.45				
		11	1.47				
		12	1.47				
		13	1.44				
		14	1.44				
15	1.43						
Binaire 60° avec bruit sur les longueurs	100 par niveau	5	1.02	0.97- 1.07	1.27	1.23 – 1.30	1.36 comparaison avec le réseau non bruité
		6	1.01	1.08 – 1.29	1.27	1.24 – 1.29	
		7	1.14	1.05 - 1.22	1.27	1.25 – 1.29	
		8	1.33	1.29 - 1.37	1.27	1.25 – 1.28	
		9	1.34	1.31 - 1.37	1.27	1.26 – 1.29	
		10	1.42	1.35 – 1.49	1.27	1.26 – 1.29	
Scheidegger <i>construction aléatoire</i>	50 par niveau	3	2.28	1.6 - 2.96	1.71	1.12 - 2.3	Comparaison de Vries et Eckardt,1997 (grands réseaux)
		4	1.68	1.5 - 1.86	1.87	1.17 - 2.57	
		5	1.77	1.73 - 1.81	2.02	1.44 - 2.6	
		6	1.78	1.73 - 1.83	2.57	1.9 - 3.24	
		7	1.85	1.85 – 1.86	2.5	2.13 - 2.87	

Tableau 11.1. Estimations des dimensions fractales sur réseaux simulés. Intervalles de confiance à 95% obtenus par confrontation des 100 ou des 50 itérations; cette indication vaut pour toutes les valeurs de la colonne.

11.4. Estimation par comptage de boîte pour un cas réel « type »

L'application du comptage de boîte à un réseau de talwegs réel présente des différences par rapport aux réseaux idéaux simulés. Lorsque l'on balaye une large gamme de valeurs de boîte, on distingue quatre domaines (Figure 11.13). On reste ici dans une représentation vectorielle du réseau.

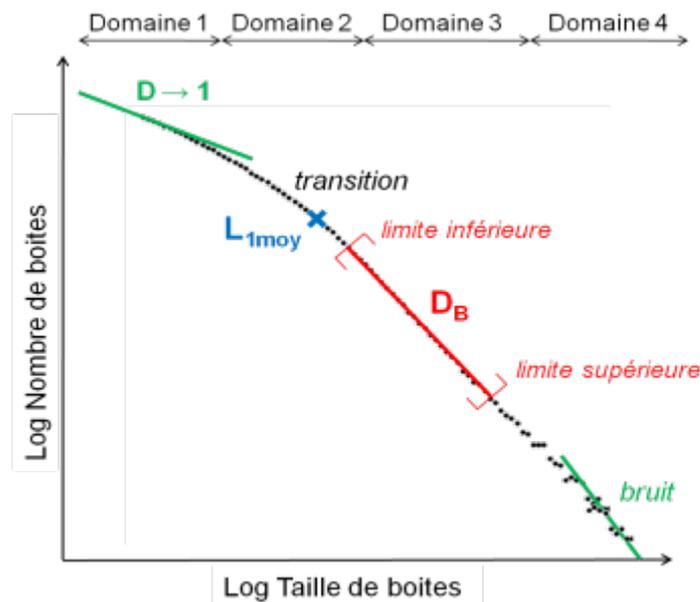


Figure 11.13. Résultat d'un comptage de boîtes réalisé sur réseau vectoriel

Comme pour les réseaux simulés, le domaine 4 et le domaine 1 représentent respectivement : i) l'instabilité de la relation Log-Log pour les grandes tailles de boîtes (avec un bruit qui exclut l'obtention d'une droite de régression significative, ii) une pente qui tend vers 1 pour les plus petites tailles de boîtes. Un domaine 2 qui n'apparaissait pas ou peu sur les réseaux simulés fait transition entre ce domaine 1 et le domaine 3 central, domaine empirique de fractalité du réseau. La principale question est toujours de déterminer les limites de ce secteur central. Comme pour les réseaux simulés, une procédure automatique de détection du domaine empirique de fractalité est utilisée. Cette procédure recherche les limites (inférieures et supérieures) qui permettent d'obtenir la meilleure linéarité sur le domaine 3. Ainsi, elle permet de calculer la dimension de boîtes sur un domaine de fractalité déterminé de manière stable et objective ; ce qui autorisera les comparaisons entre dimensions.

D'après les travaux antérieurs (Tarboton, 1988 ; Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997 ; Dodds et Rothman, 1999), nous savons que le comptage de boîtes permet d'aborder deux aspects de la forme des réseaux de talwegs : la forme des tronçons individuels caractérisée par des paramètres tels que leur sinuosité et l'organisation du réseau en tant que structure arborescente. Nous rappelons certaines des remarques consignées par ces auteurs. Dans le domaine 1, la majorité des boîtes (de petite taille) ne recouvrent qu'un seul tronçon. En revanche, un même tronçon peut être recouvert par plusieurs boîtes (de tailles variées mais restant petites). Celles-ci jouent alors le rôle du « pas de mesure » dans la mesure de longueur d'une courbe irrégulière (Figure 11.3). Une dimension fractale peut être estimée : souvent proche de 1.1, elle informe sur la sinuosité du linéaire (les arcs). Dans le cas des réseaux vectorisés composés de segments unitaires rectilignes, cette dimension tend vers 1 quand la taille de boîtes devient très petite (dès qu'elle atteint la taille de la résolution de grille) : le nombre de boîtes nécessaire pour couvrir le linéaire devient alors inversement proportionnel à la taille de la boîte. Dans le domaine 3, les boîtes recouvrent des portions de différents tronçons. La variation du nombre de boîtes en fonction de la taille caractérise l'organisation globale du réseau. Parler de structure fractale du réseau n'aura un sens que si ce secteur de stabilité dans la relation Log-Log s'étend sur au moins plusieurs décades (Lesnes, 2004), voire sur plusieurs ordres de grandeurs. Plus le réseau est développé, ramifié et hiérarchisé, plus la stabilité est observable sur une large étendue (Peckham, 1995).

La transition entre les domaines est souvent progressive puisque le réseau réel n'est pas parfaitement homogène (il ne possède pas les mêmes caractéristiques de ramifications – angles, longueurs etc. – à tous les niveaux hiérarchiques). Pour Tarboton (1988), le passage du domaine 2 vers le 3 s'effectue lorsque pratiquement toutes les boîtes à l'intérieur de l'espace réseau croisent un talweg. Toutefois, cette explication intuitive et empirique ne permet pas de borner la fin de la transition de manière évidente. Dodds et Rothman (1999), se fondant sur les rapports de Horton-Strahler, considèrent que ce point de passage correspond à la longueur moyenne des arcs d'ordre 1 (arcs sources du réseau). Encore faut-il rappeler que pour ces auteurs la dimension obtenue par les rapports de Horton-Strahler est équivalente à la pente de la droite de régression calculée sur le domaine de stabilité (le domaine 3), ce que nos analyses précédentes sur les réseaux simulés n'ont pas toujours montré, loin de là. Théoriquement, la limite inférieure se situe à la taille de boîte à partir de laquelle les variations des arcs eux-mêmes ne sont plus détectées. Nous nous demandons si la boîte de cette taille équivaut à l'espacement moyen entre arcs. Ce qui paraît être en conformité avec l'idée de remplissage de l'espace sur laquelle repose la méthode du comptage de boîtes.

11.5. Conclusion

A travers ce travail, nous tentons de montrer qu'il existe de nombreuses dimensions fractales et plusieurs méthodes d'estimation. Les valeurs dites de dimension fractale ne sont donc pas uniques

et leurs modes d'obtention doivent être précisés. Nous avons présenté trois principaux estimateurs de dimension fractale : la dimension de boîtes, la dimension de corrélation et la dimension issue des rapports de Horton-Strahler. Les deux premiers reposent sur une approche géométrique de l'espace alors que l'estimateur basé sur les rapports de Horton-Strahler est directement lié à la structure arborescente du réseau.

Les réseaux hydrographiques sont des objets de la nature et représentés, la plupart du temps, en format vectoriel (composé de segments unitaires). La transposition des définitions et calculs de dimensions d'objets mathématiques à des objets naturels nécessite des adaptations.

Pour comprendre la signification des divers modes d'estimations de dimensions fractales sur réseaux et évaluer leur robustesse, nous avons choisi d'explorer les valeurs obtenues sur des réseaux simulés. Les résultats montrent que les dimensions fractales tendent vers une valeur asymptotique lorsque le niveau de hiérarchisation des réseaux est élevé. Pour les réseaux binaires parfaits ou quasi-parfait, il faut un niveau de hiérarchisation élevé (ordre Strahler d'au moins 8) pour approcher avec le comptage de boîtes la valeur de la dimension asymptotique (théorique) correspondante. Ceci s'explique par le fait que ce type de réseau est très hiérarchisé mais peu ramifié (avec un rapport de confluence minimal). Pour les réseaux de Scheidegger il a été possible de donner des informations en termes d'incertitude sur les valeurs ; les résultats à partir du comptage de boîtes se montrent alors satisfaisants avec une incertitude faible et des valeurs s'approchant de la dimension asymptotique dès le niveau hiérarchique correspondant à un ordre de Strahler du réseau de 5. La robustesse de l'estimation par comptage de boîtes provient du fait que ces réseaux possèdent les caractéristiques inverses des arbres binaires : ils sont peu hiérarchisés (l'ordre des réseaux augmente peu rapidement) mais très ramifiés.

Les petits réseaux (peu ramifiés) posent des problèmes d'estimation dans tous les cas et les estimations sont trop instables pour qu'une comparaison soit pertinente, entre eux ou avec de plus grand réseaux. De manière générale, nous pouvons conclure que la comparaison de valeurs de dimension fractale est délicate. Les traitements réalisés sur les réseaux simulés permettent de mettre en garde vis-à-vis d'estimations sur des réseaux réels. Il n'est pas certain que des différences de valeurs de dimensions fractales pour deux réseaux différents traduisent réellement des différences de structures.

Le domaine à considérer pour le calcul des dimensions de boîtes et de corrélation est porteur d'information sur le caractère fractal ou l'autosimilarité du réseau. Toutefois, la détermination des limites du domaine à considérer pour le calcul des dimensions de boîtes et de corrélation pose encore question. S'il est possible de fixer les limites pertinentes par des procédures automatiques, leur interprétation reste difficile.

Chapitre 12 : Application aux cas réels – comparaison et interprétation des dimensions

Le chapitre précédent explore les propriétés des dimensions fractales à partir de l'étude de réseaux simulés et qualifie l'incertitude qui se rapporte aux deux estimateurs de dimension fractale choisis (dimension par les rapports de Horton-Strahler et dimension par comptage de boîtes). Ce travail pose des bases d'une analyse raisonnée des dimensions fractales de réseaux de talwegs. Nous pouvons maintenant appliquer ces méthodes aux réseaux réels et observer l'apport des dimensions fractales pour l'analyse spatiale des badlands et la compréhension de leur fonctionnement. Nous nous intéressons à deux informations complémentaires : à la dimension fractale d'une part et d'autre à la fractalité elle-même de la structure. Nous allons chercher à comprendre ces deux éléments.

Nous avons vu dans le chapitre précédent comment différents paramètres géométriques peuvent influencer sur les dimensions fractales pour des réseaux simulés. Il s'agit ici d'observer l'effet de ces paramètres sur des réseaux de talwegs réels et d'en déduire les comparaisons possibles. Nous étudions les réseaux de Draix en nous attachant aux effets de la résolution, la taille du bassin mais aussi de l'ordre de Strahler. Nous nous concentrons sur la méthode du comptage de boîtes décrite au paragraphe 11.1.2.3.A.

Dans ce chapitre, nous allons chercher à voir les résultats de dimension fractale des réseaux réels des bassins de Draix, et ceci à différentes résolutions et pour différents bassins. Nous allons également tenter de déterminer les comparaisons possibles de valeurs de dimension, avant de proposer des pistes pour savoir comment comprendre la structure fractale.

12.1. Présentation des résultats de dimensions fractales pour les bassins de Draix à différentes résolution

On présente deux types de résultats complémentaires : les valeurs de dimensions fractales pour les réseaux des différents réseaux et extraits à différentes résolutions et les domaines de fractalité associés. Les premiers décrivent l'organisation spatiale du réseau et les seconds informent sur les limites de fractalité du réseau.

12.1.1. Les valeurs de dimensions fractales

La méthode d'estimation de la dimension fractale par comptage de boîtes est appliquée aux différents réseaux des bassins de Draix extraits à partir de MNT par la méthode dite de l'indice de convergence CI (chapitre 7), et ce pour différentes résolutions. Le Tableau 12.1 présente les résultats (D_B) pour les différents couples bassin-résolution et, à titre de comparaison, la dimension issue des rapports de Horton-Strahler (D_{HS}). La dimension D_B a été obtenue sur un intervalle de valeurs correspondant au domaine empirique de fractalité. Les limites en ont été déterminées de manière automatique tel que cela a été définie au paragraphe (11.4) : on cherche l'intervalle de valeurs le plus large possible qui permet d'obtenir la meilleure linéarité. Le tableau contient également des caractéristiques qui semblent avoir une influence sur l'estimation de la dimension (résolution, surface du bassin, longueur totale du réseau, nombre d'arcs et ordre de Strahler).

Bassin	Surface (m ²)	Résolution MNT	Longueur totale (m)	Nb arcs	Ordre de Strahler	Rc	RI	D_{HS}	D_B
Bouinenc	39000000	25 m	23 0186	1129	6	3.68	1.34	4.45	1.64
Laval	860000	1 m	105 151	12127	7	4.37	2.19	1.88	1.84
		2 m	66 399	4094	6	4.64	2.33	1.81	1.74
		4 m	39 649	1466	6	3.86	2.01	1.93	1.71
		8 m	21 953	444	5	3.83	2.05	1.87	1.64
		16 m	11 712	109	4	3.71	2.11	1.76	1.56
		32 m	1 444	39	3	4.44	1.70	2.81	1.40
Moulin	80000	1 m	11 385	1661	6	3.95	2.04	1.93	1.70
		2 m	6 732	500	5	4.12	2.11	1.90	1.57
		4 m	3 811	132	4	4.11	2.02	2.01	1.49
		8 m	2 586	47	4	2.98	1.47	2.83	1.40
Ravine AJ	1000	0.25 m	588	282	4	5.37	2.52	1.82	1.60
		0.5 m	450	167	4	4.49	2.27	1.83	1.54

Tableau 12.1. Tableau de différents paramètres et des dimensions fractales par comptage de boîtes et rapport de Horton pour les différents réseaux étudiés, à différentes résolutions

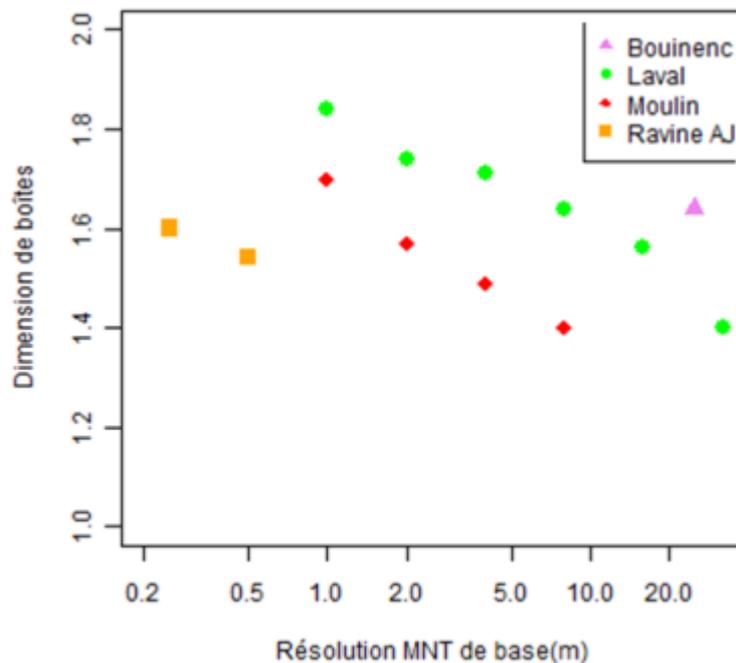


Figure 12.1. Les dimensions fractales (D_B) pour les différents couples bassin-résolution. La dimension est calculée sur un réseau extrait par la méthode CI (chapitre 7) à partir de MNT pour chacune des résolutions.

Sur le Tableau 12.1, on constate tout d'abord pour un même bassin, une variation de l'estimation de la dimension fractale avec la résolution. La valeur de D_B diminue alors que la résolution augmente. Pour le Laval, par exemple, D_B atteint 1.84 à 1 m de résolution, 1.71 à 4 m et 1.64 à 8 m (cette valeur étant fortuitement (?) la même que celle du Bouinenc à 25 m). Comme le montre aussi la Figure 12.1, la variation est plus ou moins linéaire selon les bassins (Laval et Moulin).

On constate que la longueur totale du réseau diminue avec la valeur de la résolution, pour un même bassin. Il en va de même pour le nombre d'arcs, et ce serait vrai encore pour le nombre de points de grille par lesquels passe le réseau. L'idée exprimée dans le chapitre 11 selon laquelle plus le nombre de points constitutifs de l'objet est grand, plus la dimension fractale estimée D_B se rapproche de la valeur asymptotique d'une fractale « théorique » trouve ici toute son importance.

La forte réduction du nombre d'arcs pour les résolutions 16 m et 32 m au Laval, 4 m et 8 m au Moulin se retrouvent dans les valeurs de D_B . Les uns et les autres témoignent d'une image très appauvrie du réseau de ces bassins.

La quasi-totalité des réseaux étudiés ici présentent des rapports de confluence proche de 4, ce qui traduit des réseaux relativement ramifiés (les valeurs restent toutefois inférieures aux réseaux aléatoires de Scheidegger très ramifiés pour lesquels R_C tend vers 5.15 pour les très grands ordres).

Les estimations par les rapports de Strahler ($\text{Log } R_c / \text{Log } R_L$) varient d'une façon désordonnée avant de s'envoler vers des valeurs non significatives, supérieures à 2, dans les petits niveaux hiérarchiques (marqués par des rapports de longueur très faibles). On observe ainsi l'instabilité de cette méthode d'estimation.

12.1.2. Les domaines empiriques de fractalité

La question de la détermination du domaine empirique de fractalité est d'autant plus importante avec des données réelles. La dimension estimée par comptage de boîtes est très sensible aux limites du domaine. Nous avons donc utilisé pour l'ensemble des réseaux, un algorithme de détection automatique des limites pour que les limites soient déterminées de manière objective et reproductible (11.4.1). Le but est de trouver le plus grand intervalle pour lequel la relation Log-Log du comptage de boîtes est linéaire.

Nous remarquons que la limite inférieure déterminée automatiquement est à chaque fois inférieure à la longueur moyenne des arcs d'ordre 1. Ainsi, cette dernière pourrait être utilisée comme limite inférieure (Dodds et Rothman, 1999) mais la limite automatique agrandit le domaine, rendant l'estimation de la dimension plus stable. La limite inférieure varie dans le même sens que la longueur moyenne des arcs d'ordre 1, avec une valeur qui augmente avec la valeur de la résolution (Tableau 12.2). Ceci s'explique par le fait que plus la résolution est grossière, moins on détecte de petits éléments du réseau (9.3.2).

Concernant la limite supérieure, on pourrait s'attendre à une stabilité puisqu'elle dépend de la taille du bassin. En pratique, on observe une augmentation de la valeur de cette limite lorsqu'elle est déterminée de manière automatique (Tableau 12.2). Ainsi, contrairement à ce que l'on pourrait penser, l'intervalle entre les deux limites s'élargit vers les résolutions grossières. Pour le Laval et le Moulin à la résolution 1m, la limite supérieure calculée automatiquement est respectivement de 54 m et de 44 m. Il en résulte une très courte plage de valeurs pour le calcul de la dimension, avec un rapport de 8 environ entre les deux limites déterminées automatiquement, mais avec une très bonne linéarité. L'élargissement du domaine avec l'augmentation de la résolution n'est pas significatif d'une plus large plage de fractalité de l'objet. Il s'explique par la dégradation de la linéarité de la relation Log-Log (même si l'on reste à des coefficients R^2 autour de 0.99) qui induit la prise en compte d'un domaine plus large. La méthode automatique de détection des ruptures permet de retenir une portion du domaine de fractalité, celle montrant la meilleure linéarité selon les critères de détection, alors que le domaine lui-même est plus large ; ou du moins apparaît comme tel visuellement (Annexe 4).

Une confirmation de la petite plage de fractalité du Moulin à 1m est donnée par une autre méthode d'estimation, celle de la dimension de corrélation D_c , qui a été présentée dans le chapitre

11. Pour ce même réseau avec ses 1661 arcs et nœuds correspondants, les limites du domaine empirique de fractalité sont à 15m et 42 m pour D_c , avec un coefficient de corrélation Log-Log de 0,999 ; la valeur de D_c étant de 1,81. Soit une valeur d'estimation plus forte pour D_c que pour D_B et une plage plus courte.

Bassin	Résolution	$L_{1_{moy}}$	Limite inférieure (auto)	Limite supérieure (auto)	Intervalle de valeurs (auto)
Laval	1 m	9.32	6.9	54.6	47.7
	2 m	18.07	9.8	94.4	84.6
	4 m	30.54	16.6	117.0	100.4
	8 m	53.13	30.1	121.0	90.9
	16 m	117.52	47.7	150.5	102.8
	32 m	198.66	84.8	383.6	298.8
Moulin	1 m	7.3	5.31	44.27	38.96
	2 m	14.1	8.7	40.5	31.8
	4 m	29.9	16.1	134.4	118.3
	8 m	53.6	26.1	135.1	109
Bouinenc	25 m	220.12	127.5	703.2	575.7
Ravine AJ	0.25 m	2.27	1.7	10.4	8.7
	0.5 m	3.53	1.9	10.4	8.5

Tableau 12.2. Tableau récapitulatif des limites inférieures et supérieures du domaine empirique de fractalité pour les différents bassins aux différentes résolutions. $L_{1_{moy}}$ correspond à la longueur moyenne des arcs d'ordre 1. Les limites inférieures et supérieures sont celles obtenues par la méthode automatique de détection du domaine. Les limites sont données en mètres.

On retient de ce premier examen des tableaux 12.1 et 12.2 que la valeur d'estimation fractale D_B demande à être accompagnée de l'étendue du domaine sur lequel cette valeur a été obtenue, du mode d'obtention, de la qualité de la régression et aussi de la pertinence de la représentation de l'objet réel à une résolution donnée, ou plus précisément dans le cas qui nous occupe (un bassin et son réseau) à partir de MNT à une résolution donnée.

12.2. Analyse des résultats : les comparaisons possibles ?

Au-delà des estimations seules, nous nous posons la question cruciale de la comparaison entre les valeurs : dans quelles conditions les dimensions obtenues peuvent-elles être comparées ? Quelles comparaisons significatives peuvent être effectuées ? Pour savoir quelles comparaisons sont possibles entre des valeurs de dimensions de boîtes, on a besoin de connaître l'impact de la résolution et de la taille du domaine sur les dimensions fractales de réseaux réels. Par ailleurs, les drains d'ordre 1 ayant été considérés comme une image simplifiée du réseau facilitant les comparaisons dans la partie précédente, on se demande si cela se vérifie du point de vue fractal.

Nous retenons pour la suite la dimension de boîtes D_B qui semble la plus adaptée pour décrire la forme des réseaux de talwegs. Rappelons que les essais réalisés sur réseaux simulés, permettent de comprendre certains aspects du comportement de D_B , mettant notamment en évidence des décalages verticaux et horizontaux des résultats du comptage de boîtes avec les changements de taille de cellule et taille de grille pour les réseaux de Scheidegger (11.3.2).

12.2.1. Impact de la résolution

On aurait pu s'attendre à ce que la dimension fractale pour un même bassin soit constante malgré les changements de résolution. En effet, on aurait pu considérer que la structure hiérarchique du réseau reste la même aux différentes résolutions jusqu'au changement d'objet morphologique représenté. Or les résultats présentés (Tableau 12.1) sont contraires à cette idée : la dimension fractale pour un bassin donné varie avec la résolution du MNT (document source à partir duquel le réseau est extrait) et les caractéristiques de l'objet dont on estime la dimension fractale changent aussi.

Pour mieux saisir cette variation, nous pouvons observer le détail des résultats de comptage de boîtes obtenus sur le réseau du Laval à plusieurs résolutions (Figure 12.2). Pour les deux résolutions les plus basses (16 et 32 m), on ne distingue plus de domaine de fractalité claire. Dans ces deux cas, nous considérons que les valeurs ne sont pas suffisamment significatives pour être prises en compte. A l'inverse, plus la résolution est fine plus le domaine de fractalité est visuellement net et étendu. Ce qui permet une estimation plus stable de D_B . Cette dernière tend vers une valeur asymptotique vers les résolutions les plus fines, ce qui doit être pris en compte pour la comparaison de dimension fractale de réseaux issus de résolutions différentes.

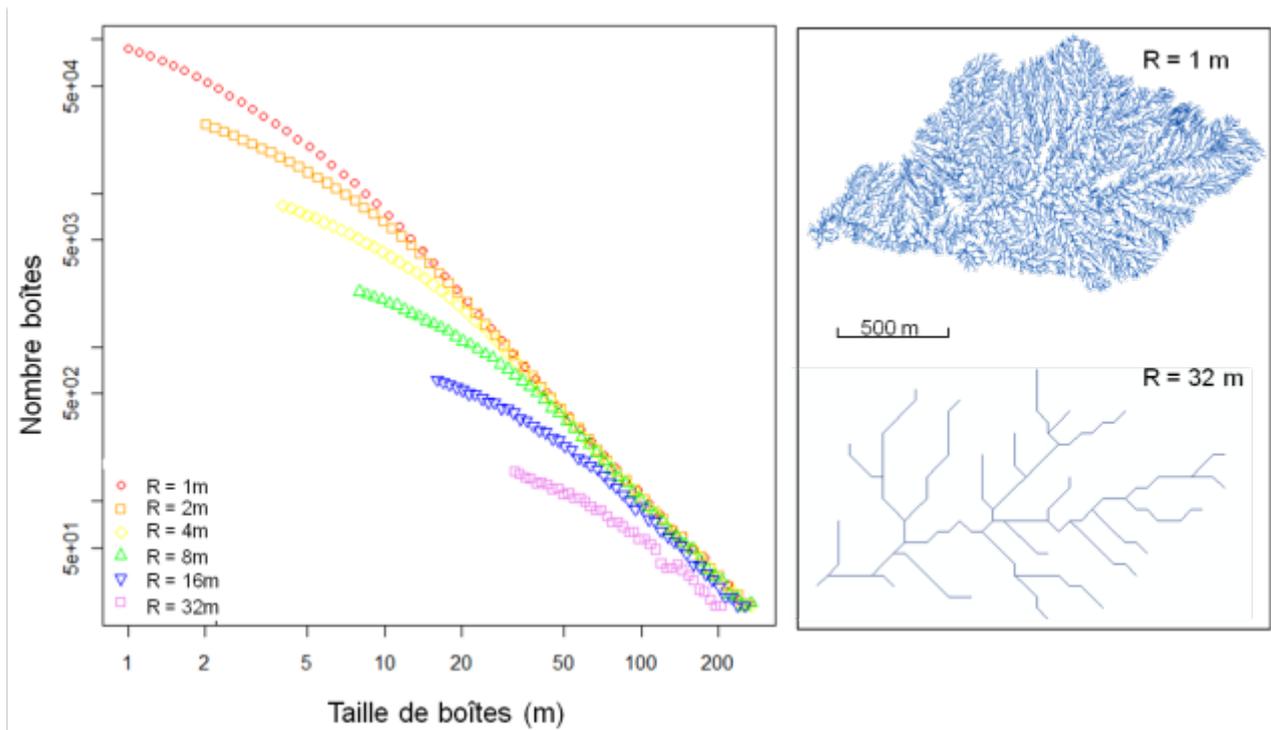


Figure 12.2. Résultat du comptage de boîte du Laval pour différentes résolutions

12.2.2. Impact de la taille du bassin

Autant pour des réseaux simulés (dont le mode de construction et le type d'organisation spatiale sont connus) l'effet de taille peut être mis en évidence, autant l'évaluation de l'effet de la taille est délicate pour des réseaux réels. En effet, cela implique de considérer que les domaines comparés sont homogènes en termes de structure de réseau, ce qui ne va pas de soi. Et les comparaisons se font alors implicitement sur deux critères à la fois : la taille et la structure ! Nous donnons un bref exemple à partir du Laval et de sous domaines emboîtés (Figure 12.3), chacun à 1 m de résolution.

Plus le domaine considéré est petit, moins on observe de domaine de fractalité et moins la valeur de la dimension estimée est forte. Pour une même résolution, plus le domaine considéré est petit plus le calcul s'effectue sur un nombre réduit d'arcs ; plus l'estimation de la dimension fractale (D_B) est délicate. Il en va de même pour les comparaisons.

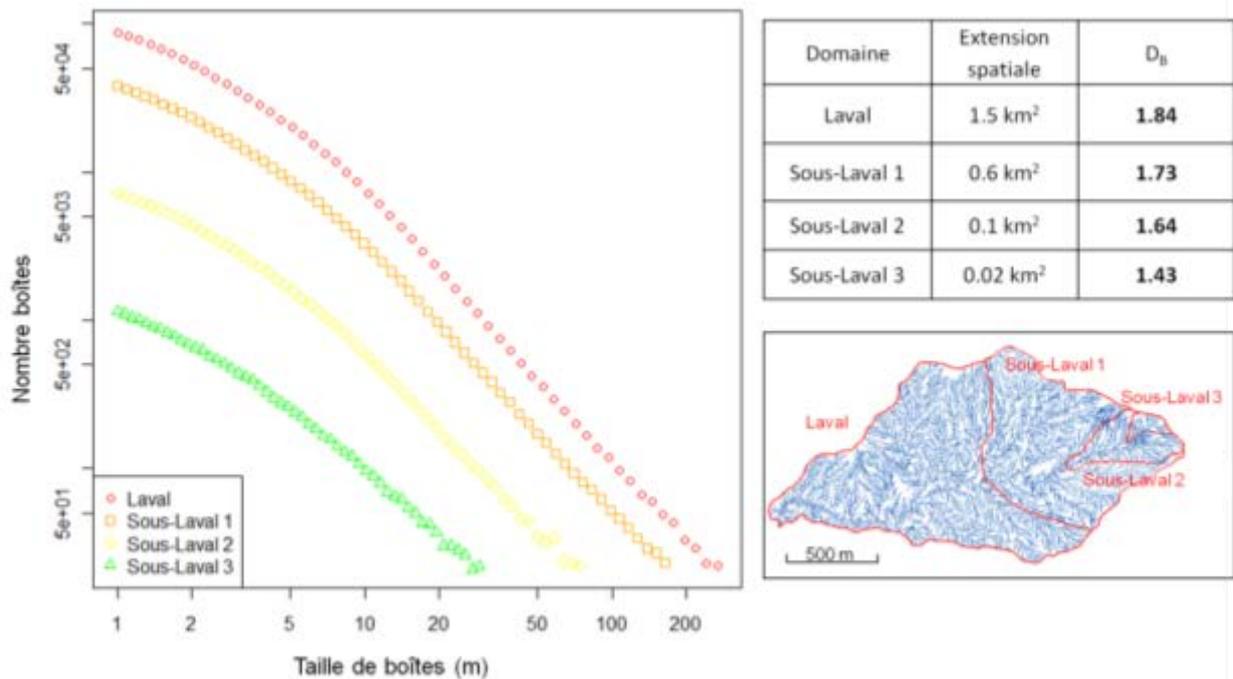


Figure 12.3. Dimension fractale de réseau obtenue pour des sous-bassins du Laval avec une même résolution de base (1 m).

12.2.3. Effet de la quantité d'information traitée sur la dimension ?

Les variations constatées avec le changement de résolution et de domaine tendent à montrer que la dimension par comptage de boîtes est très sensible à la quantité d'information traitée. Les observations réalisées sur les réseaux simulés convergent avec cette interprétation. La notion de quantité d'information demande à être définie ; en première approximation elle peut être considérée comme le rapport entre la taille du domaine et la résolution (dont vont dépendre le nombre d'arcs, la longueur totale du linéaire, la densité de drainage, la densité hydrographique). L'ordre de Strahler peut-être commode, voire pertinent pour qualifier la quantité d'information puisque nous sommes dans le cas de réseaux très arborescents de secteurs de badlands. L'ordre est peut-être moins pertinent dans des secteurs plus plats où les réseaux sont moins arborescents et plus sinueux. Lorsque les réseaux sont petits, souvent traduit par des ordres de Strahler faible, la quantité d'information sur laquelle la mesure est effectuée est faible. Ce qui induit une forte incertitude et des difficultés à mettre en évidence un domaine de fractalité significatif.

En conclusion, on retient qu'une dimension D_B n'est pas significative si le domaine empirique de fractalité n'est pas nettement observable et objectivement délimité. Ainsi, la comparaison de dimensions n'est valable que si la quantité d'information est suffisante pour les différents réseaux mis en regard.

12.2.4. Dimension de boîtes des ordres 1

La partie 4 a montré l'importance du descripteur topologique local « ordre de Strahler » pour approcher les classes d'objets morphologiques d'une part, et plus particulièrement le rôle des drains d'ordre 1 pour une représentation simplifiée du réseau. On se demande alors si les drains d'ordre 1 constituent une image du réseau ayant un sens du point de vue fractal, auquel cas les comparaisons pourraient être plus faciles, et plus intéressantes d'un point de vue morphologique.

Le calcul de la dimension fractale D_B par ordre de Strahler sur le bassin du Laval à 1 m de résolution (Figure 12.4) montre que la valeur correspondant aux ordres 1 est très proche de celle du réseau entier (valeurs respectives de 1.80 et 1.84 et des limites respectives de 13 m - 167 m et 7 m - 54 m) alors que celle des autres ordres s'en éloignent. Il semble que les drains d'ordre 1 déterminent la dimension du réseau. On considérera alors que ces drains-sources constituent bien une image simplifiée du réseau du point de vue fractal. Ceci paraît justifié en secteur de *badlands* : ces drains sont certes les plus nombreux (6132 sur 7670 drains), mais aussi occupant l'ensemble de l'espace du fait du fort degré de ramification des réseaux (Figure 12.5).

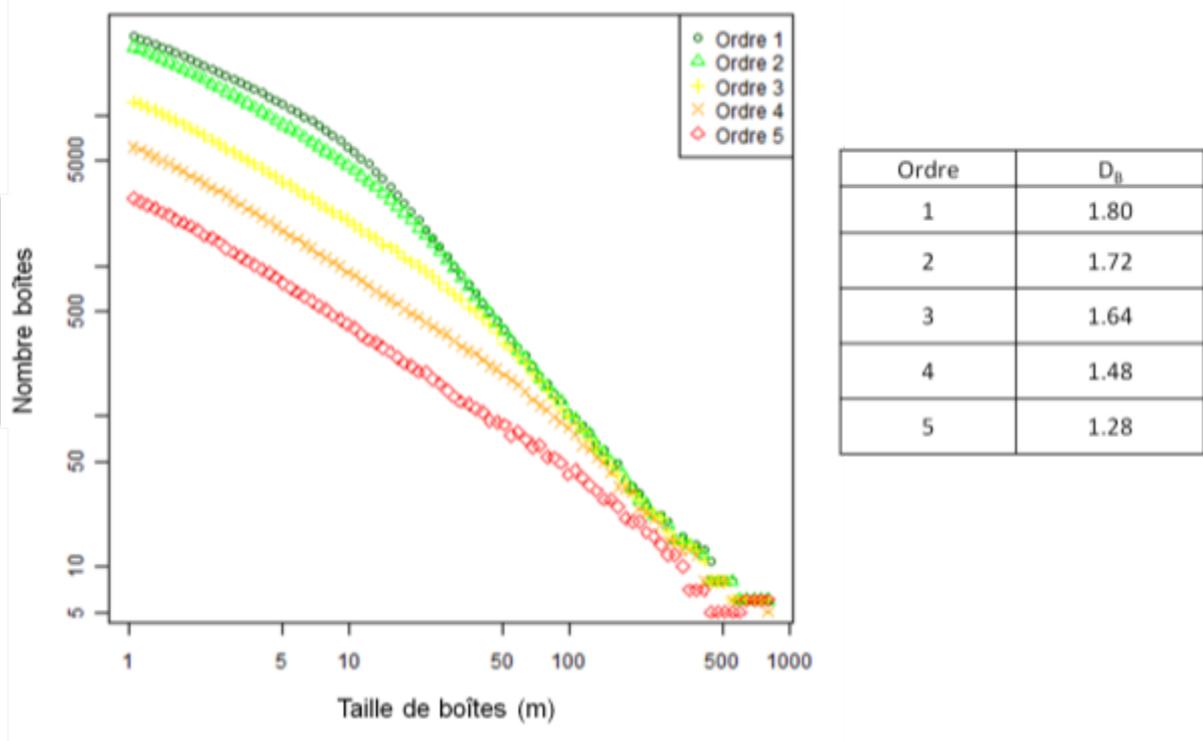


Figure 12.4. Dimension par comptage de boîtes sur le réseau du Laval (1 m) par ordre de Strahler

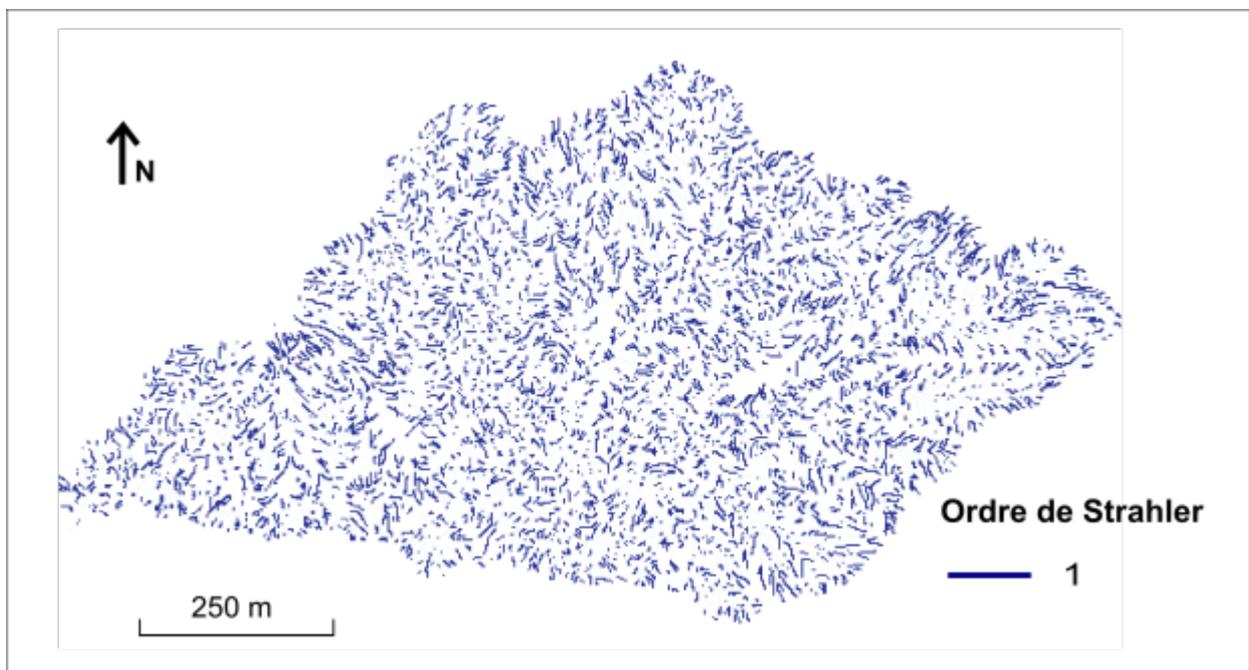


Figure 12.5. Répartition spatiale des drains d'ordre 1 du réseau du Laval (résolution 1 m)

12.3. Discussion

12.3.1. Interpréter et utiliser de la dimension de boîtes pour segmenter l'espace ?

L'interprétation des valeurs de dimension fractale pour les réseaux de ravines pose encore question. Une première stratégie possible est d'expliquer des différences de valeurs de dimensions fractales par des différences connues notamment en termes de contraintes physiques (Schuller, 2001 ; Hauchard *et al.*, 2002). Une seconde approche, plus exploratoire, tente de mettre en évidence l'information portée par les descripteurs synthétiques fractals. Cette approche a été abordé par de Keersmeacker et al. (2004) pour les milieux urbains. Les auteurs établissent des relations entre dimension fractale et descripteurs spatiaux et socio-économiques en milieu urbain pour mieux comprendre l'information transcrite par les mesures fractales. Toutefois, les paragraphes précédents nous amènent à penser que, pour les réseaux de talwegs, plus que la valeur de dimension elle-même, ce sont les différences entre valeurs qui peuvent être intéressantes et interprétées en termes de fonctionnement.

Selon Frankhauser et Genre-Grandpierre (1998) se fondant sur des réseaux de transports, cette dimension fractale est une mesure du degré de non-homogénéité de la desserte adaptée pour les études intra-urbaines. Elle fournit une information différente de celle de la densité. Selon les auteurs, la dimension fractale fait référence à une organisation hiérarchique alors que la densité fait référence à une homogénéité spatiale. Ainsi, il est possible grâce à une analyse de la distribution spatiale de la dimension fractale de segmenter les zones d'un réseau selon le degré d'homogénéité de la répartition des éléments.

Nous proposons ici un premier essai de cartographie rapide reposant sur un calcul de dimension fractale par cellule. Sur le réseau du Laval extrait avec une résolution de 1 m, nous avons calculé la dimension D_B sur des cellules de 100*100 m quadrillant le bassin (Figure 12.6). Le choix de la taille de la cellule pour quadriller le réseau est délicat puisque nous avons montré l'instabilité de la dimension par rapport à la taille du réseau considéré. La taille de la cellule a été choisie en fonction de la taille de l'ensemble du réseau pour permettre d'avoir une significativité suffisante des dimensions estimées (ici la plage de valeurs pour laquelle on détecte une linéarité est assez courte, approximativement entre 7 m et 20 m). Pour tenter de comprendre d'éventuelles variations de la dimension, nous comparons cette cartographie avec le même type de représentation pour d'autres descripteurs, analysés dans la partie 4, à savoir la longueur totale, le nombre de sources et la pente moyenne par cellule. Nous avons retenus ces quatre variables supposant *a priori* un lien possible avec la dimension D_B .

Cette première cartographie des dimensions D_B montre un résultat intéressant même s'il est encore difficile d'en avoir une interprétation claire en termes de fonctionnement (Figure 12.7). On observe que les dimensions par cellules sont inférieures ou égales à la dimension totale du réseau (1.84). Pour l'instant, aucune corrélation directe entre D_B et les descripteurs locaux n'est observée. Mais ce type d'analyse semble présenter un potentiel pour la compréhension et l'utilisation de la dimension fractale pour la segmentation de l'espace en rapport avec un fonctionnement érosif. Cette approche sera intéressante à stabiliser et à développer dans de futures recherches.

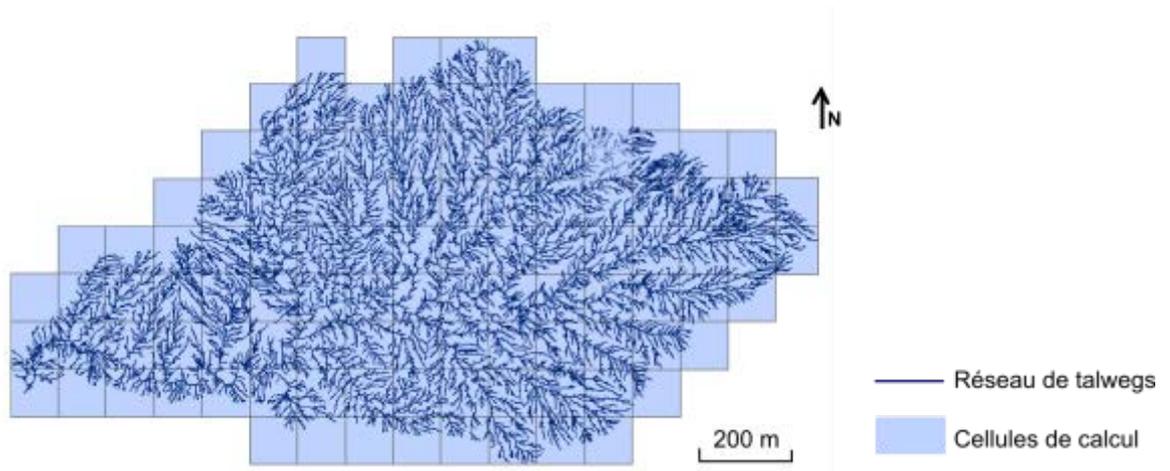


Figure 12.6. Quadrillage du réseau du Laval (1 m) avec des cellules de 100*100 m

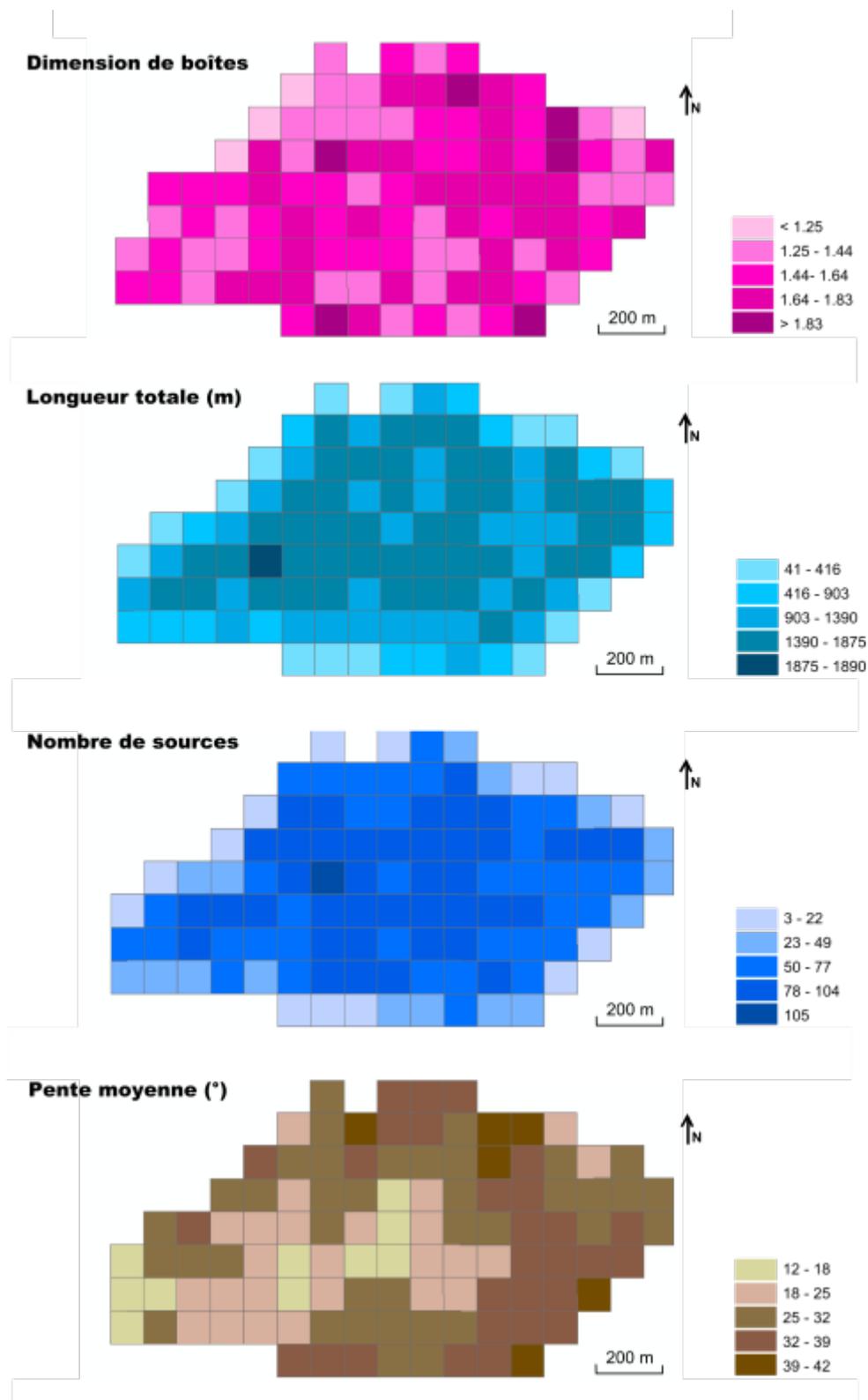


Figure 12.7. Cartographie de la dimension fractale (D_b) par cellules comparées à celles de la longueur totale, du nombre de sources et de la pente moyenne pour le réseau du Laval (1 m)

12.3.2. Comprendre la structure fractale des réseaux ?

Le détour par l'estimation de la dimension fractale des divers réseaux de talwegs dans les badlands nous aide-t-il à comprendre l'organisation de ces réseaux ? Cette question appelle une réponse en deux temps à travers deux nouvelles questions : 1) les réseaux de ravines méritent-ils l'appellation de « fractales »? 2) existe-t-il des recherches sur les objets fractals réels susceptibles d'ouvrir aux naturalistes des pistes recherches interdisciplinaires ?

Pour les réseaux du Laval et du Moulin à la résolution 1 m, l'existence même du domaine de fractalité est informative. Est-elle suffisante pour parler d'objet fractal naturel ? La plage des valeurs couvre plusieurs décades selon l'expression de Lesnes (2004). On considère alors que la réponse est oui. Par ailleurs, il existe des études nombreuses sur les objets fractals ou sur des systèmes hiérarchisés ayant des propriétés fractales, tels les systèmes auto-organisés étudiés par les physiciens en particulier. La physique propose des explications physiques exprimées mathématiquement mais elles ne seront pas abordées dans ce travail.

On peut aussi tenter de comprendre grâce à des simulations mettant en place des réseaux qui ont une structure proche de celle des réseaux de talwegs hiérarchisés des *badlands*. Parmi les modèles possibles, on peut utiliser les DLA, déjà employés dans différents domaines de géosciences et en physique. Ces modèles présentent un intérêt pour comprendre la naissance de formes branchues et organisées. Leur simulation repose sur un principe de marche aléatoire et permet de générer des réseaux fractals très proches des réseaux de talwegs réels (Masek et Turcotte, 1993 ; Figure 12.8). Les réseaux issus des simulations par DLA évoluent au cours du temps. Leur construction est fondée sur un principe itératif de marche aléatoire de points lancés à une distance donnée du réseau existant. Lorsqu'une trajectoire aléatoire croise le réseau, un élément est ajouté au réseau, amenant à une croissance du réseau. Fleury (1998) souligne qu'il y a une probabilité inégale qu'un élément préexistant du réseau reçoive une particule, celle-ci étant plus forte sur les parties externes du réseau (*i.e.* aux extrémités). Ce modèle est donc un modèle de morphogenèse, acceptable à la fois pour les tenants de l'érosion régressive comme pour ceux de l'érosion progressive. En effet, on peut considérer que ces modèles combinent les deux.

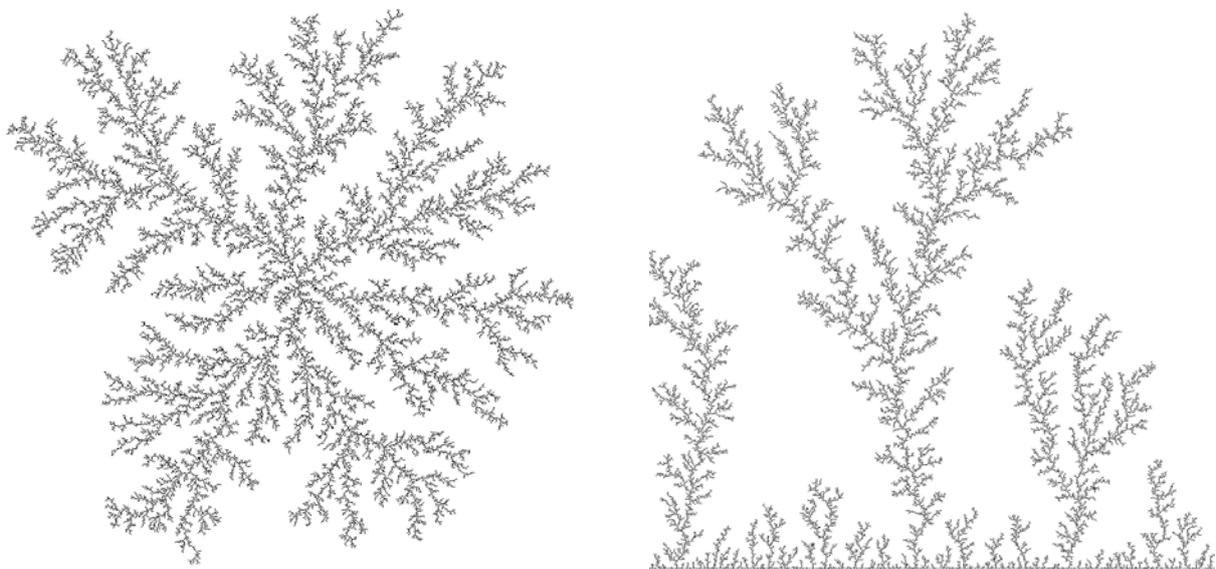


Figure 12.8. Exemples de résultat de simulation par DLA (Source : @PaulBourke) : à gauche, l'attracteur est un point, à droite c'est une ligne.

Toutefois, la structure des réseaux de Draix s'éloigne des DLA du fait que l'on n'observe pas de densités de sources plus importantes sur les parties externes du réseau (Figure 12.8)

Les modèles de diffusion limitée par l'agrégation font référence à des systèmes en croissance. On peut se demander si les *badlands* sont eux-mêmes des systèmes en croissance ; ils l'ont été. A Draix, cette croissance n'est pas certaine actuellement et nous supposons que le système n'est pas dans une phase d'extension mais plutôt dans une phase d'entretien ; ce qui n'exclut pas l'apparition de petites formes nouvelles telles que rigoles ou griffures à pentes fortes.

En revanche, pour des domaines où apparaissent des ravines, avoir un tel modèle de développement peut s'avérer intéressant ou du moins à tester, pour tenter de montrer, compte tenu des systèmes de pentes, de l'homogénéité du substrat quels seraient les axes de développement prioritaires de ce réseau, et donc identifier les secteurs à protéger prioritairement. Nous rejoignons ici des préoccupations de gestion des systèmes de ravines dont nous avons fait état au chapitre 1.

Résumé de la partie 5

Ce travail pose des conditions d'application de la dimension fractale et apporte des éléments pour la comparaison de réseaux. Il indique clairement l'existence de non pas une dimension fractale unique mais de plusieurs dimensions qui reposent sur des approches très différentes et qui ne mesurent pas les mêmes caractères. De plus, il introduit les difficultés inhérentes à la transposition de méthodes basées sur les propriétés d'objets mathématiques infinies et parfaits pour la description d'objets réels par définition finis. Deux estimateurs de dimension fractale ont été retenus et analysés en raison de leur intérêt pour décrire des arborescences : la dimension par comptage de boîtes et celle issue des rapports de Horton-Strahler. Une analyse de ces estimateurs sur des réseaux simulés permet de déterminer une incertitude en fonction du type de réseau et de leur niveau hiérarchique.

Ces essais sur réseaux simulés, ainsi que l'application à des cas réels, convergent vers l'idée que les dimensions fractales sont des descripteurs globaux très intéressants et puissants mais en pratique très sensibles au niveau de description du réseau et surtout aux conditions de calcul. La mise en place d'un algorithme de détection automatique du domaine empirique de fractalité a permis de stabiliser l'estimation de la dimension de boîtes. Toutefois, les comparaisons entre dimensions d'un réseau à l'autre doivent être réalisées avec prudence. Outre la valeur de la dimension fractale, la structure fractale de l'objet telle qu'elle est observée sur les réseaux du Moulin et du Laval à une résolution de 1 m s'avère intéressante en soi. On se demande alors comment la comprendre. L'approche fractale nécessite encore des approfondissements pour pouvoir interpréter les dimensions fractales en termes de fonctionnement érosif et des pistes sont ouvertes dans ce sens, telles que des comparaisons intra-bassins avec un rapprochement avec des fonctionnements connus.

Conclusion générale

Ce travail est né de la volonté de relier la forme des réseaux de ravines et leur fonctionnement érosif (actuel et morphogénèse) dans les domaines de *badlands*. Plus particulièrement, une des questions auxquelles nous souhaitons apporter des éléments de réponse était celle du lien entre la variabilité spatiale des formes et les processus d'érosion et ceci à différentes échelles spatiales. Or, pour approcher cet objectif lointain, il était nécessaire de poser des bases stables pour la description et la comparaison de réseaux de ravines, ainsi nous avons cherché à proposer des outils pour la description, permettant à terme des modélisations améliorées et une meilleure compréhension du fonctionnement des *badlands*.

Les outils proposés reposent sur l'utilisation de méthodes et données numériques (en particulier de MNT) qui présentent un potentiel intéressant pour la description d'éléments du relief. Ainsi, ce travail porte sur la description numérique des réseaux de ravines, fondée sur l'hypothèse que le réseau des ravines peut être schématisé par le réseau de talwegs associé.

La description raisonnée et stable des réseaux de talwegs exigeait avant tout chose de réfléchir aux méthodes de représentation et d'extraction à partir de données numériques spatialisées et d'évaluation des talwegs (partie 3), puis aux descripteurs possibles, en lien avec la morphologie, à deux niveaux : local (partie 4) et global (partie 5). L'apport général de cette thèse est avant tout méthodologique. Les apports spécifiques de la thèse par thème sont décrits dans les paragraphes suivants.

Sur l'extraction de réseaux de talwegs partir de MNT et leur validation

Nous proposons une méthode opérationnelle d'extraction de réseaux de talwegs à partir de MNT. Cette méthode combine un indice morphologique (également issu du MNT) et algorithme de drainage classique pour extraire des talwegs uniquement là où le MNT exprime une forme chenalisée. L'idée avait déjà été explorée (Tarboton et Ames, 2001 ; Molloy et Stepinski, 2007). Nous estimons que la méthode mise en place possède deux avantages : 1) elle est objective et permet d'écarter la question du seuil de surface amont drainé ; 2) elle montre le potentiel de l'indice de convergence pour révéler les fonds de ravine. Un seuil de significativité de la forme est déterminé statistiquement à partir du bruit du MNT. Il en résulte un réseau continu et arborescent dont la

représentation est stable et objective, dépendante uniquement de l'information contenue dans le MNT. Ainsi, les talwegs extraits ont une signification morphologique.

Dans un second temps, nous nous sommes intéressés à l'évaluation de la qualité des réseaux extraits pour comparer la méthode d'extraction mise en place à d'autres méthodes. Pour cela, nous comparons les réseaux extraits par différentes méthodes à un réseau de référence (ici un réseau cartographié sur le terrain). La méthode la plus courante pour comparer deux représentations d'un même réseau (méthode des buffers ; Heipke *et al.*, 1997) fournit des résultats quantitatifs sur la proximité géométrique des deux réseaux (réseaux extraits et réseaux de référence) mais ils sont peu précis et ne prennent pas en compte la topologie. Or pour la description des réseaux vers laquelle nous tendons, l'aspect topologique est important. Nous avons donc mis en place une méthode de comparaison de réseau basée sur l'appariement hiérarchique des nœuds du réseau. La méthode proposée intègre des critères géographiques, géométriques mais aussi topologiques. Le concept d'appariement correspond à la recherche de couples de nœuds homologues entre les deux réseaux.

Les résultats de l'évaluation montrent une variabilité dans la qualité de l'extraction, avec une très forte conformité de la référence et du réseau extrait dans les secteurs de *badlands* nus. Dans les secteurs sous couvert végétal, la méthode d'extraction fournit des résultats moins satisfaisants avec une tendance à tracer des talwegs entre les arbres.

Les questions d'extraction et de comparaison automatique de réseau arborescent à partir de MNT sont très présentes dans la littérature contemporaine. En particulier, la comparaison entre deux représentations d'un réseau semble au cœur des préoccupations actuelles compte tenu des progrès technologiques et méthodologiques conduisant à une disponibilité accrue de données numériques d'altitude et une diversité des méthodes d'extraction de talwegs. D'autres travaux contemporains s'y intéressent (Lindsay, 2006 ; Hengl *et al.*, 2009 ; Read, 2011). Un travail de comparaison entre notre méthode d'appariement et la méthode d'Arthur Read (2011) fondée non pas sur les nœuds mais sur des surfaces drainées associées aux arcs du réseau est amorcé.

Sur la description numérique des éléments du réseau

Nous nous intéressons au potentiel des MNT pour décrire les réseaux de ravines : d'une part à travers l'utilisation de descripteurs numériques locaux décrivant la géométrie et la topologie, depuis des descripteurs simples et classiques vers des descripteurs plus nouveaux et spécifiques à la morphologie ; et d'autre part, à la transformation de ces descripteurs numériques en descripteurs thématiques permettant d'approcher des classes d'objets morphologiques. Les analyses sont dominées par deux thèmes récurrents : l'impact de la résolution et l'importance de la hiérarchie amont-aval des réseaux.

En premier lieu, les résultats numériques montrent qu'à des résolutions fines (de l'ordre du mètre), les descripteurs sont pertinents pour caractériser les *badlands* et pour en dégager des spécificités conformes avec celle issue de la littérature. De plus, ils soulignent la sensibilité des descripteurs géométriques à l'ordre la hiérarchie amont-aval, et en particulier à l'ordre de Strahler. On l'observe sur les descripteurs numériques mais également dans l'approche thématique. Les valeurs numériques évoluent avec l'ordre, et au-delà, aux résolutions traitées, les classes d'objets morphologiques issues de références-terrain s'expliquent essentiellement par l'ordre. On note également l'impact des paramètres d'échelle sur ces réseaux hiérarchisés, sur la valeur numérique des descripteurs mais aussi sur les objets morphologiques représentés. On considère une fenêtre d'observation des objets morphologiques hiérarchisés dont les limites sont fixées par la résolution pour les petits objets amont et la taille du domaine pour les grands éléments aval. Ce travail propose une première réflexion sur la spatialisation morphologique, permettant des comparaisons thématiques de bassins en lien direct avec l'état de l'érosion, qui mériterait d'être développée par la suite. Enfin, les résultats numériques introduisent l'importance des ordres 1 pour représenter, décrire et comparer des réseaux. Ils constituent une image simplifiée du réseau, très sensibles aux changements de résolutions et donc intéressante à analyser. Pour l'instant, l'incertitude sur la mesure des descripteurs n'a pas été considérée et serait à prendre en compte, notamment pour les classifications thématiques d'objets morphologiques.

Ainsi, cette approche par les descripteurs numériques locaux fournit des résultats intéressants et montre des développements possibles dans le contexte de description numérique de la morphologie : d'une part, sur la spatialisation morphologique puisque les premiers essais réalisés sont positifs et encourageants, et d'autre part, sur des aspects de modélisation des réseaux. En effet, cette approche pourrait permettre d'aller vers les descripteurs choisis permettant de représenter mais aussi de reconstruire des réseaux arborescents similaires et des modélisations, du même type que les modélisations AMAP pour les arbres (de Reffye *et al.*, 1988 ; Guédon *et al.*, 2007). Ce type de modélisation intégrant la connaissance sur la morphologie des éléments du réseau et leur fonctionnement, pourraient être intéressantes à développer pour comparer des bassins et à termes mieux comprendre la relation entre la spatialisation des formes et les processus d'érosion.

Sur la description globale du réseau par la dimension fractale

La dimension fractale, en tant que descripteur global du réseau, avait retenu notre attention du fait de son potentiel théorique pour aborder les effets d'échelle (Mandelbrot, 1967 ; Rodriguez-Iturbe et Rinaldo, 1997 ; Dodds et Rothman, 2000). Toutefois, les conditions d'utilisation et la signification de ce descripteur synthétique ne sont que peu abordées dans la littérature. Nous proposons une clarification méthodologique de l'utilisation de la dimension fractale pour décrire des objets naturels en format vectoriel. Un des principaux résultats est qu'il n'existe pas une mais des

dimensions fractales ; chacune ayant une signification différente. Elles fournissent parfois des résultats équivalents pour des objets mathématiques mais rarement pour des objets naturels. Nous avons réalisé un travail sur l'incertitude de l'estimation des dimensions fractales et la significativité des comparaisons entre les dimensions de différents réseaux. Nous nous sommes concentrés sur les dimensions les plus courantes dans l'analyse de réseaux dont les méthodes d'estimations sont le comptage de boîtes et les rapports de Horton-Strahler. Les résultats obtenus sur réseaux simulés montrent une forte instabilité des dimensions, qui semblent dépendre de la quantité d'information représentée (on estime l'incertitude entre +/- 0.2 pour des très petits réseaux et +/- 0.01 pour des réseaux denses et ramifiés). Cette instabilité rend délicates les comparaisons entre dimensions de réseaux réels. Les dimensions, notamment celle issue du comptage de boîtes, sont sensibles aux conditions de calcul. Pour autoriser les comparaisons, des méthodes de calcul objectives et répétables sont mises en place pour calculer les dimensions.

Après exploration des dimensions à partir de réseaux simulés, l'application aux réseaux réels et les possibilités de comparaison apparaissent plus claires. Premièrement, la méthode du comptage de boîtes semble plus adaptée à la description de réseaux réels. Ensuite, le réseau de talwegs étudié doit être décrit avec un niveau de détail (conditionné par le rapport entre la résolution du MNT et la surface couverte et qui peut être traduit par l'ordre de Strahler du réseau) suffisamment grand pour que l'incertitude sur l'estimation de la dimension soit raisonnable. Nous considérons que l'ordre de Strahler doit être d'au moins 4. Enfin, il apparaît que les valeurs numériques de dimension fractale ne sont pas porteuses d'une information en elles-mêmes mais que ce sont les différences entre valeurs qui sont les plus intéressantes. A ce stade, nous n'avons pas pu mettre en évidence de variabilités spatiales claires avec les dimensions fractales. A terme, une possibilité pour pouvoir interpréter les différences de dimensions en termes de fonctionnement érosif serait de rechercher des corrélations entre la dimension fractale choisie et les descripteurs locaux liés à la morphologie.

Il apparaît que, pour les résolutions de l'ordre du mètre sur les bassins de Draix, les réseaux possèdent des propriétés fractales, révélées par la présence nette d'un domaine de fractalité dans le comptage de boîte. Et que, parallèlement à ce qui a été observé pour les descripteurs locaux, les ordres 1 déterminent pour l'essentiel la dimension fractale du réseau. La question est maintenant de comprendre cette fractalité des réseaux et de savoir ce qu'elle peut nous apprendre de leur morphogenèse. Pour cela, les simulations par DLA semblent intéressantes et constitue une piste d'investigation future.

Ce travail de thèse contribue à la recherche sur les questions du lien entre les approches spatiales et l'érosion qui intéressent le GIS Draix. Un des défis de l'équipe « érosion et spatialisation » du GIS Draix est d'aller vers une compréhension fine des processus à l'intérieur des bassins. Pour cela, nous proposons une approche de spatialisation à travers le réseau des talwegs. La thèse présente des

résultats de description de l'espace stables et clairs dans leur signification (de l'extraction des réseaux à leur description quantitative). Ces résultats pourront être utilisés dans le futur pour interpréter la structure spatiale en termes de processus d'érosion. Pour cela, deux directions peuvent être retenues : la première s'attacherait à répondre à la question comment se sont formés ces *badlands* et la réponse serait à aller chercher du côté des modèles physiques de morphogenèse ; la deuxième se focaliserait plus sur le fonctionnement actuel pour répondre à la question de la prédiction des réponses érosives des bassins.

Bibliographie

- Ackermann F., 1999**, Airborne laser scanning: present status and future expectations, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54 (2-3), 64-67.
- Ahnert F., 1976**, A brief description of a comprehensive three-dimensional process-response model of landform development, *Zeitschrift für Geomorphologie supplementband*, 25, 29-49.
- Alexander D.E., 1982**, Difference between calanchi and biancane badlands in Italy, in Bryan R.B. & Yair A. (eds.), *Badland Geomorphology and Piping*, Geo Books in Norwich, 71-87.
- Anderson M.G., 1988**, *Modelling Geomorphological Systems*, John Wiley, New York, 458 p.
- Antoine P., Giraud A., Meunier M. & Van Asch T., 1995**, Geological and geotechnical properties of the 'Terres Noires' in southeastern France: weathering, erosion, solid transport and instability, *Engineering Geology*, 40 (3-4), 223-234.
- Asseline J., De Noni G. & Chaume R., 2000**, Note sur la conception et l'utilisation d'un drone lent pour la télédétection rapprochée, in *Photo Interprétation, images aériennes et spatiales*, Editions ESKA, Paris, 3-9, 42-47.
- Avnir D., Biham O. & Malcai O., 1998**, Is the geometry of nature fractal?, *Science*, 279, 39-40.
- Bailly J.S., 2007**, *Méthodes de spatialisation de réseaux arborescents et orientés par simulations conditionnelles : Application aux réseaux de fossés de paysages viticoles*, Université Montpellier II, 204 p.
- Bailly J.S., Levavasseur F. & Lagacherie P., 2011**, A stochastic algorithm to reconstruct artificial drainage networks from incomplete remote sensing delineations, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13, 853-862.
- Ballais J.L., 1996**, L'âge du modelé de roubines dans les Préalpes du Sud : l'exemple de la région de Digne, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 4, 61-68.
- Bardet J.M., 1997**, *Test d'autosimilarité des processus gaussiens. Dimension fractale et dimension de corrélation*, Université Paris-Sud, 116 p.
- Barnsley M.F., 1988**, *Fractals Everywhere*, Academic Press, Boston, 394 p.
- Battaglia S., Leoni L., Rapetti F. & Spagnolo M., 2011**, Dynamic evolution of badlands in the Roglio basin (Tuscany, Italy), *Catena*, 86 (1), 14-23.
- Bertran P., Le Bissonnais Y. & Texier J.P., 2004**, Ruissellement, *Quaternaire, Hors-Série: Dépôts de pente continentaux, dynamique et faciès*, 1, 176-191.
- Birot P., 1981**, *Les processus d'érosion à la surface des continents*, Masson, Paris, 605 p.
- Bonnet, S., and Crave, 2006**, A. Macroscale dynamics of experimental reliefs, in Buiter, S.J. H. & Schreurs, G. (eds.), *Analogue and numerical modelling of crustal-scale processes*, J. Geol. Soc. London Spec. Publ., 253, 327-339.
- Borges A.L.O., 1993**, *Modélisation de l'érosion sur deux bassins versants des Alpes du Sud*, Université de Grenoble 1, 205 p.
- Bravard J.P. & Petit F., 1998**, *Les cours d'eau*, A. Colin, 192 p.

- Breiman L., Friedman J., Olshen R. & Stone C., 1984**, *Classification and Regression Trees*, Chapman & Hall/CRC, 368 p.
- Bretar F., Chauve A., Bailly J.-S., Mallet C. & Jacome A., 2009**, Terrain surfaces and 3-D landcover classification from small footprint full-waveform lidar data: application to badlands, *Hydrology and Earth System Sciences*, 13 (8), 1531-1544.
- Brochot S. & Meunier M., 1995**, Erosion en badlands dans les Alpes du Sud : synthèse, in *Compte-rendu de recherches*, n° 3, BVRE de Draix., Cemagref éditions, Antony, 41-174.
- Brochot S., 1999**, Les bassins versants de Draix, expérimentaux... et représentatifs, in *Les bassins versants expérimentaux de Draix laboratoire d'étude de l'érosion en montagne - Actes du séminaire, Draix Le Brusquet Digne*, 22-24 octobre 1997, Draix Le Brusquet Digne, 223-234.
- Brunet R., Ferras R. & Théry H., 1992**, *Les mots de la géographie*, GIP Reclus, Montpellier ; La Documentation Française, Paris, 518 p.
- Brunstein D., 1999**, *Un système d'information géographique pour l'analyse du continuum amont-aval et des changements d'échelle dans un système fluvial. Exemple du bassin versant du Grand-Morin (France)*, Université Paris 1, 239 p.
- Bryan R. & Yair A., 1982**, *Badland geomorphology and piping*, GeoBooks in Norwich, England, 408 p.
- Bufalo M. & Nahon D., 1992**, Erosional processes of Mediterranean badlands: a new erosivity index for predicting sediment yield from gully erosion, *Geoderma*, 52 (1-2), 133-147.
- Bull L.J. & Kirkby M.J., 1997**, Gully processes and modelling, *Progress in Physical Geography*, 21 (3), 354-374.
- Bürgmann R., Rosen P.A. & Fielding E.J., 2000**, Synthetic aperture radar interferometry to measure earth's surface topography and its deformation, *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 28, 169-209.
- Burrough P.A. & McDonnell R.A., 1998**, *Principles of Geographical Information Systems*, Oxford University Press, 352 p.
- Cambrezy L., 1990**, Transfert d'échelle et organisation spatiale, in *Séminfor 4 « le transfert d'échelle »*, 281-289.
- Cantón Y., Solé-Benet A., de Vente J., Boix-Fayos C. and Calvo-Cases A., Asensio C. & Puigdefàbregas J., 2011**, A review of runoff generation and soil erosion across scales in semiarid south-eastern Spain, *Journal of Arid Environments*, In Press, Corrected Proof.
- Cantor G., 1883**, Über unendliche, lineare Punktlannigfaltigkeiten, *Mathematische Annalen*, 21, 545-591.
- Cavalli M., 2009**, *Caratterizzazione idrologica e morfologica dei bacini montani mediante scansione laser da aeromobile*, Università degli Studi di Padova, 186 p.
- Chaplot V., Darboux F., Bourenane H., Leguédou S., Silvera N. & Phachomphon K., 2006**, Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density, *Geomorphology*, 77 (1-2), 126-141.
- Charleux-Demargne J., 2001**, *Qualité des modèles numériques de terrain pour l'hydrologique. Application à la caractérisation du régime de crue des bassins versants*, Université de Marne-la-Vallée, 275 p.
- Charron M., 2006**, La complexité des phénomènes spatiaux, *Cahiers de géographie du Québec*, 50 (141), 327-335.
- Chodzko J. & Lecompte M., 1992**, *Ravinement dans les Baronnies, suivi expérimental*, Trav. Lab. Géogr. Phys., Univ. Paris VII, 20, 111p.
- Chorley R.J., 1971**, *Introduction to fluvial processes*, Methuen and co, London, 218 p.
- Chorley R.J., Schumm S.A. & Sugden D.E., 1982**, *Geomorphology*, Methuen and co, London, 605 p.

- Chorowicz J., Ichokun C., Riazanoff S., Youn-Jong K. & Cervelle B., 1992**, A combined algorithm for automated drainage network extraction, *Water Resource Research*, 28 (5), 1193-1302.
- Clark M.L. & Rendell H. M., 2006**, Process-form relationships in Southern Italian badlands: erosion rates and implications for landform evolution, *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, 15-29.
- Cohen M. & Rey F., 2005**, Dynamiques végétales et érosion hydrique sur les marnes dans les Alpes françaises du Sud, *Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement*, 1, 31-44.
- Coque R., 1977**, *Géomorphologie*, A. Colin, Paris, 503 p.
- Corona C., Lopez Saez J., Rovéra G., Stoffel M., Astrade L. & Berger F., 2011.**, Highly-resolved, quantitative reconstruction of erosion rates based on anatomical changes in exposed roots (Draix, Alpes de Haute-Provence) – critical review of existing approaches and independent quality control of results, *Geomorphology*, 125, 433-444.
- Costa-Cabral M. & Burges S., 1997**, Sensitivity of Channel Network Planform Laws and the Question of Topologic Randomness, *Water Resource Research*, 33 (9), 2179-2197.
- Coulmeau P., 1987**, *Quelques éléments sur la géomorphologie et les processus érosifs observés dans le bassin du Laval dans Bassins versants expérimentaux de Draix*, Cemagref, Grenoble, 128 p.
- Crave A. & Davy P., 1997**, Scaling relationship of channel networks at large scales : examples from two large-magnitude watersheds in Brittany, *Tectonophysics*, 269, 91-111.
- Culling W.E H., 1963**, Soil Creep and the Development of Hillside Slopes, *The Journal of Geology*, 71(2), 127-161.
- Cutler C.D., 1991**, Some results on the behavior and estimation of the fractal dimensions of distributions on attractors, *Journal of Statistical Physics*, 62, 651-708.
- Dauphiné A., 1991**, De l'ordre au chaos. Nouvelles démarches en géographie physique, *L'espace géographique*, 4, 289-301.
- Davy P., Sornette A. & Sornette D., 1990**, Some consequences of a proposed fractal nature of continental faulting, *Nature*, 348, 56-58.
- De Joinville O., Ferrand B. & Roux M., 2002**, Levé laser aéroporté: état de l'art, traitement des données et comparaison avec des systèmes imageurs, *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 166, 72-81.
- de Keersmaecker M.L., Frankhauser P. & Thomas I., 2004**, Dimensions fractales et réalités périurbaines. L'exemple du Sud de Bruxelles, *L'Espace géographique*, 3, 219-240.
- de Martonne E., 1951**, *Traité de Géographie physique. t. 2 : Le relief du sol*, A. Colin, Paris, 563 p.
- de Ploey J. & Schmidt K., 1992**, Gullying and the age of badlands: an application of the erosional susceptibility model Es, *Functional geomorphology. Landform analysis and models, Catena - Supplement*, 23, 31-45.
- de Reffye P., Edelin C., Françon J., Jaeger M. & Puech C., 1988**, Plant models faithful to botanical structure and development, *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 22, 151-158.
- De Santis F., Giannossi M.L., Medici L., Summa V. & Tateo F., 2010**, Impact of physico-chemical soil properties on erosion features In the Aliano area (Southern Italy), *Catena*, 2(81), 172-181.
- de Vente J. & Poesen J., 2005**, Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale: scale issues and semi-quantitative models, *Earth-Science Reviews*, 71, 95-125.
- de Vries H. & Eckhardt B., 1997**, Phase transitions in Scheidegger and Eden networks, *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 30 (18), 6233.

- Depraetere C. & Moniod F., 1991**, Contribution des modèles numériques de terrain à la simulation des écoulements dans un réseau hydrographique. Exemple du bassin de Bras-Davis (Guadeloupe), *Hydrologie Continentale*, 6 (1), 20-53.
- Descroix L. & Mathys N., 2003**, Processes, spatio-temporal factors and measurements of current erosion in the french southern Alps: a review, *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, 993-1011.
- Descroix L. & Olivry J.C., 2002**, Spatial and temporal factors of erosion by water of black marls in the badlands of the French southern Alps, *Hydrological Sciences-Journal des Sciences Hydrologiques*, 47 (2), 227-242.
- Desmet P., Poesen J., Govers G., Vandaele K., 1999**, Importance of slope gradient and contributing area for optimal prediction of the initiation and trajectory of ephemeral gullies, *Catena*, 37, 377-392.
- Dietrich W.E. & Perron J.T., 2006**, The search for a topographic signature of life, *Nature*, 439, 411-419.
- Dodds P.S. & Rothman D.H., 1999**, Unified view of scaling laws for river networks, *Phys. Rev. E*, 59, 4865-4877.
- Dodds P.S. & Rothman D.H., 2000**, Geometry of river networks I: Scaling, fluctuations, and deviations, *Phys. Rev. E*, 63, 016115.
- Douady A. & Hubbard J.H., 1982**, Itération des polynômes quadratiques complexes, *C. R. Académie des Sciences de Paris*, 1 (294), 123-126.
- Douvinet C., Delahaye D. & Langlois P., 2008**, Modélisation de la dynamique potentielle d'un bassin versant et mesure de son efficacité structurelle, *Cybergeo : European Journal of Geography, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques*, (412), [En ligne].
- Erhart H., 1956**, *La genèse des sols en tant que phénomène géologique; esquisse d'une théorie géologique et géochimique; biostasie et rhexistasie*, Masson, Paris, 177 p.
- Evans I.S., 1972**, General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics, in Chorley R. J. (ed.), *Spatial Analysis in Geomorphology*, Methuen and co, London, 17-90.
- Fairfield J. & Leymarie P., 1991**, Drainage Networks From Grid Digital Elevation Models, *Water Resources Research*, 27 (5), 709-717.
- Falconer K., 1990**, *Fractal Geometry. Mathematical Foundations and Applications*, John Wiley & Sons, Chichester, 288 p.
- Falconer K., 1997**, *Techniques in fractal Geometry*, John Wiley & Sons, Chichester, 256 p.
- Faulkner H., 2008**, Connectivity as a crucial determinant of badland morphology and evolution, *Geomorphology*, 100 (1-2), 91-103.
- Faulkner H., Alexander R. & Zukowskyj P., 2008**, Slope-channel coupling between pipes, gullies and tributary channels in the Mocatán catchment badlands, Southeast Spain, *Earth Surface Processes and Landforms*, 33 (8), 1242-1260.
- Ferraro P. & Godin C., 2000**, A distance measure between plants architectures, *Annals of Forest Sciences*, 57, 445-461.
- Ferraro P. & Godin C., 2003**, An Edit Distance between Quotiented Tree Graphs, *Algorithmica*, 36, 1-39.
- Fleury V., 1998**, *Arbres de Pierre. La croissance fractale de la matière*, Flammarion, 334 p.
- Forriez M., Martin P. & Nottale L., 2010**, Lois d'échelle et transitions fractal-non fractal en géographie, *L'Espace géographique*, 39 (2), 97-112.
- Foucault A. & Raoult J.P., 1980**, *Dictionnaire de géologie*, Masson, Paris, 382 p.

- Frankhauser P. & Genre-Grandpierre C., 1998**, Géométrie fractale - Un nouvel outil pour évaluer le rôle de la morphologie des réseaux de transport public dans l'organisation spatiale des agglomérations, *Les cahiers scientifiques du transport*, 33, 41-78.
- Frankhauser P. Pumain D., 2001**, Fractales et géographie, in Sanders L. (dir), *Modèles en analyse spatiale*, Hermes-Science, Paris, 301-329.
- Frankhauser P., 1994**, *La fractalité des structures urbaines*, Anthropos, Paris, 291 p.
- Frankhauser P., 2005**, La morphologie des tissus urbains et périurbains à travers une lecture fractale, *Revue Géographique de l'Est*, 45 (3-4), [En ligne].
- Fu B.J., Zhao W.W, Chen L.D., Liu Z.F. & Lü Y.H., 2005**, Eco-hydrological effects of landscape pattern change, *Landscape and Ecological Engineering*, 1 (1), 25-32.
- Fuller I.C. & Marden M., 2011**, Slope-channel coupling in steepland terrain: A field-based conceptual model from the Tarndale gully and fan, Waipaoa catchment, New Zealand, *Geomorphology*, 128 (3-4), 105-115.
- Gao J. & Xia Z.G., 1996**, Fractals in physical geography, *Progress in Physical Geography*, 20 (2), 178-191.
- Garbrecht J. & Martz L., 1994**, Grid size dependency of parameters extracted from digital elevation models, *Computers & Geosciences*, 20, 85-87.
- Garcia-Ruiz J.M. & Otalora F., 1992**, Fractal trees and Horton's laws, *Mathematical Geology*, 24 (1), 61-71.
- Gaucherel C., 2003**, Pertinence de la notion d'indicateur pour la caractérisation du bassin-versant, *L'espace géographique*, 3 (32), 265-281.
- Gessler P., Pike R., MacMillan R.A., Hengl T. & Reuter H.I., 2008**, The Future of Geomorphometry, in Hengl T. & Reuter H.I. (eds.), *Geomorphometry - Concepts, Software, Applications*, Elsevier, Amsterdam, 637-652.
- Gilbert K., 1877**, *Report on the geology of the Henry Mountains, US Geographical and Geological Survey, of the Rocky Mountain Region*, Washington, D.C., U.S. Government Printing, Department of Interior, 170 p
- Godfrey A.E., Everitt B.L. & Martín Duque J.F., 2008**, Episodic sediment delivery and landscape connectivity in the Mancos Shale badlands and Fremont River system, Utah, USA, *Geomorphology*, 102, 242-251.
- Godin C., 2003**, *Introduction aux structures multi-échelles. Application à la représentation des plantes*, HDR, Université Montpellier II, 120 p.
- Gouyet J.F., 1991**, *Physique et structures fractales*, Masson, Paris, 234 p.
- Grassberger P. & Proccacia I., 1983**, Measuring the strangeness of strange attractors, *Physica D.*, 189-208.
- Guédon Y., Caraglio Y., Heuret P., Lebarbier E. & Meredieu C., 2007**, Analyzing growth components in trees, *Journal of Theoretical Biology*, 248, 418-447.
- Gutiérrez M., Sancho C., Benito G., Sirvent J. & Desir G., 1997**, Quantitative study of piping processes in badland areas of the Ebro Basin, NE Spain, *Geomorphology*, 20 (3-4), 237-253.
- Haccard D., Beaudoin B., Gigot P. & Jorda M., 1989**, *Notice explicative, Carte géol. France (1/50 000), feuille La Javie (918)*, BRGM, Orléans, 152 p.
- Hall P. & Wood A., 1993**, On the performance of box-counting estimators of fractal dimension, *Biometrika*, 80 (1), 246-251.
- Hamburger D., Biham O. & Avnir D., 1996**, Apparent fractality emerging from models of random distributions, *Phys. Rev. E*, 53, 3342-3358.
- Harvey A.M., 1982**, The role of piping in the development of badlands and gully systems in south-east Spain, In: Bryan R. & Yair A. (ed.), *Badland Geomorphology and Piping*, Geo Books in Norwich, 317-335.
- Hauchard E., Delahaye D. & Frankhauser P., 1999**, Analyse morphologique de talwegs et comportement scalant. Application des dimensions non-entières à la géographie physique, *L'espace géographique*, 3, 215-224.

- Hauchard E., Laignel B. & Delahaye D., 2002**, Proposition d'un nouveau schéma structural du Nord-Ouest du bassin de Paris reposant sur l'analyse fractale des réseaux de thalwegs et les données récentes de la géologie régionale, *Comptes Rendus Geoscience*, 334 (4), 295-302.
- Hausdorff F., 1919**, Dimension und äusseres Mass, *Mathematische Annalen*, 79, 157-179.
- Heipke C., Mayer H., Wiedemann C. & Jamet O., 1997**, Evaluation of Automatic Road Extraction, *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 23, 47-56.
- Helmlinger K.R., Kumar P. & Foufoula-Georgiou E., 1993**, On the use of digital elevation model data for Hortonian and fractal analyses of channel networks, *Water Resource Research*, 29 (8), 2599-2613.
- Hengl T., 2006**, Finding the right pixel size, *Computers & Geosciences*, 32 (9), 1283-1298.
- Hengl T., Grohmann C.H., Bivand R.S., Conrad O. & Lobo, A., 2009**, SAGA vs GRASS: A Comparative Analysis of the Two Open Source Desktop GIS for Automated Analysis of Elevation Data, in *Proceedings of Geomorphometry 2009*, 31 August - 3 September 2009, Zurich.
- Hengl T., Heuvelink G.B.M. & van Loon E.E., 2010**, On the uncertainty of stream networks derived from elevation data: the error propagation approach, *Hydrology and Earth System Sciences*, 14 (7), 1153-1165.
- Hilbert D., 1891**, Über die stetige Abbildung einer Linie auf ein Flächenstück, *Mathematische Annalen*, 38, 459-460.
- Hodges W.K. & Bryan R.B., 1982**, The influence of material behavior on runoff initiation in the Dinosaur Badlands, Canada, in Bryan R. & Yair A. (eds.), *Badland geomorphology and piping*, Geo Books in Norwich, England, 13-46.
- Hodgson M.E. & Bresnahan P., 2004**, Accuracy of airborne Lidar-derived elevation: empirical assessment and error budget, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70 (3), 331-339.
- Horritt M.S. & Bates P.D., 2001**, Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow, *Journal of Hydrology*, 253 (1-4), 239-249.
- Horton R.E., 1945**, Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology, *Bulletin of the Geological Society of America*, 56, 275-370.
- Howard A.D., 1971**, Optimal angles of stream junction: geometric, stability to capture and minimum power criteria, *Water Resource Research*, 7 (4), 863-873.
- Howard A.D., 1971**, Simulation model of stream networks by headward growth and branching, *Geographical Analysis*, 3 (1), 29-50.
- Howard A.D., 1997**, Badland morphology and evolution: interpretation using simulation model, *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, 211-227.
- Howard A.D., 2009**, Badlands and Gullying, in Parsons A. & Abrahams A.D. (eds.), *Geomorphology of Desert Environments*, Springer, 265-299.
- Hsiao K.H., Liu J.K., Yu M.F. & Tseng Y.H., 2004**, Change detection of landslide terrains using ground-based lidar data, in *Commission VII, WG VII/5*.
- Hutchinson M.F., 1989**, A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits, *Journal of Hydrology*, 106, 211-232.
- Jacome A., 2009**, *MNT à très haute résolution spatiale pour la représentation 3D de ravines d'érosion en montagne*, AgroParisTech, 241 p.
- Jacome A., Puech C., Raclot D., J. Bailly, & Roux B., 2008**, Extraction d'un modèle numérique de terrain à partir de photographies par drone, *Revue des Nouvelles Technologies de l'Information*, 13, 79-99.
- Jantzi H., 2009**, *Conditions de formation et dynamique des nappes sédimentaires alluviales du Moulin (Draix, Alpes-de-Haute-Provence)*, Master Géosciences, Environnement, Risques, Université de Strasbourg, 46 p.

- James L.A., Watson D.G. & Hansen W.F., 2007**, Using LiDAR data to map gullies and headwater streams under forest canopy: South Carolina, USA, *Catena*, 71 (1), 132-144.
- Janey N., 1992**, *Modélisation et synthèse d'image d'arbres et de bassins fluviaux associant méthodes combinatoires et plongement automatique d'arbres et cartes planaires*, Université de Franche-Comté, [En ligne]
- Jenson S.K. & Domingue J.O., 1988**, Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54, 1593-1600.
- Kasanin-Grubin M. & Bryan R., 2007**, Lithological properties and weathering response on badland hillslopes, *Catena*, 70 (1), 68-78.
- Kenny F. & Matthews B., 2005**, A methodology for aligning raster flow direction data with photogrammetrically mapped hydrology, *Computer & Geosciences*, 31, 768-779.
- Kirkby M.J. & Bull L.J., 2000**, Some factors controlling gully growth in fine-grained sediments: a model applied in southeast Spain, *Catena*, 40 (2), 127-146.
- Kirkby M.J., 1971**, Hillslope process-response models based on the continuity equation, in Brunsden D. (ed.), *Slopes Form and Process*, Institute of British Geographers, Special Publication, 15-30.
- Kiss R., 2004**, Determination of drainage network in digital elevation model, utilities and limitations, *Journal of Hungarian Geomathematics*, 2, 16-29.
- Köethe R. & Lehmeier F., 1996**, *SARA – Systeme Zur Automatischen Relief-Analyse*, Benutzerhandbuch, Goettigen University.
- Kuhn N.J., Yair A. & Grubin M.K., 2004**, Spatial distribution of surface properties, runoff generation and landscape development in the Zin Valley Badlands, northern Negev, Israel, *Earth Surface Processes and Landforms*, 29 (11), 1417-1430.
- La Barbera P. & Rosso R., 1989**, On the fractal dimension of stream networks, *Water Resource Research*, 25, 735-741.
- Lacoste C., 2004**, *Extraction de Réseaux Linéiques à partir d'Images Satellitaires et Aériennes par Processus Ponctuels Marqués*, Université de Nice Sophia Antipolis, 197 p.
- Lam S.N. & De Cola L., 2002**, *Fractals in Geography*, The Blackburn Press, Caldwell, New Jersey, 308 p.
- Lashermes B., Foufloula-Georgiou E. & Dietrich W.E., 2007**, Channel network extraction from high resolution topography using wavelets, *Geophysical Research Letters*, 34, L23S04.
- Le Bissonnais Y., Montier C., Jamagne M., Daroussin J. & King D., 2001**, Mapping erosion risk for cultivated soil in France, *Catena*, 46 (2-3), 207-220.
- Lea N.J., 1992**, An aspect-driven kinematic algorithm, in: A. Parson, & A. Abrahams, (ed.), *Overland flow: hydraulics and erosion mechanics*, UCL Press, London, 393-407.
- Lebel T., 1990**, Le transfert d'échelle en hydrologie : concept ou confusion, in *Séminfor 4 « le transfert d'échelle »*, 147-156.
- Lecompte M., Lhénauff R. & Marre A., 1998**, Huit ans de mesures du ravinement des marnes dans les Baronnies méridionales (Préalpes françaises du sud), *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 4 (4), 351-373.
- Leopold L.B., Wolman L.G. & Miller J.P., 1964**, *Fluvial processes in geomorphology*, W.H. Freeman, San Francisco, 522 p.
- Lesne A., 2004**, Fractales : les limites du réel, *Tangente. L'aventure mathématique. Les Fractales. Art, nature et modélisation*, 18, 102-108.
- Letourneur J. & Michel R., 1971**, *Géologie du génie civil*, A. Colin, Paris, 728 p.

- Lhenaff R., Coulmeau P., Lecompte M. & Marre A., 1993**, Erosion and transport processes on badlands slopes in Baronnies mountains (French southern Alps), *Geografia fisica e dinamica quaternaria*, 16, 65-73.
- Liberti M., Simoniello T., Carone M.T., Coppola R., D'Emilio M. & Macchiato M., 2009**, Mapping badland areas using LANDSAT TM/ETM satellite imagery and morphological data, *Geomorphology*, 106, 333-343.
- Liébault F., 2003**, *Les rivières torrentielles des montagnes drômoises : évolution contemporaine et fonctionnement géomorphologique actuel (massifs du Diois et des Baronnies)*, Université Lumière Lyon 2, 375 p.
- Liébault F., Peteuil C. & Remaître A., 2010**, Focus : Le bassin versant expérimental du Moulin à Draix, *Sciences Eaux et Territoires, la revue du Cemagref*, [En ligne].
- Lier P., Valorgue C. & Briottet X., 2008**, *Imagerie spatiale : des principes d'acquisition au traitement des images optiques pour l'observation de la Terre*, Editions Cépaduès, 844 p.
- Lindsay J. 2006**, Sensitivity of channel mapping techniques to uncertainty in digital elevation data, *International Journal of Geographical Information Science*, 20 (6), 669-692.
- Lindsay J.B. & Creed I.F., 2006**, Distinguishing actual and artefact depressions in digital elevation data, *Computers & Geosciences*, 32 (8), 1192-1204.
- Maitre H. & Pinciroli M., 1999**, Fractal characterization of a hydrological basin using SAR satellite images, *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 33 (1), 175-181.
- Mandelbrot B. & Frame M., 2001**, Fractals, in *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, Academic Press, 185-207.
- Mandelbrot B., 1967**, How Long Is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension, *Science*, 156 (3775), 636-638.
- Mandelbrot B., 1975**, *Les objets fractals : forme, hasard, et dimension*, Flammarion, Paris, 190 p.
- Mandelbrot B., 1982**, *The fractal geometry of nature*, W.H. Freeman, Oxford, 460 p.
- Marceau D.J., 1999**, The scale issue in the social and natural sciences, *Canadian journal of remote sensing*, 25 (4), 347-356.
- Martínez-Casasnovas J.A., 2003**, A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion, *Catena*, 50 (2-4), 293-308.
- Martz L.W. & Garbrecht J., 1995**, Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method – Comment, *Journal of Hydrology*, 167, 393-396.
- Martz L.W. & Garbrecht J., 1999**, An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM, *Computers & Geosciences*, 25 (7), 835-844.
- Masek J.G. & Turcotte D.L., 1993**, A diffusion-limited aggregation model for the evolution of drainage networks, *Earth and Planetary Science Letters*, 119 (3), 379-386.
- Mathys N., 2006**, *Analyse et modélisation à différentes échelles des mécanismes d'érosion et de transport de matériaux solides Cas des petits bassins versants de montagne sur marne (Draix, Alpes-de-Haute-Provence)*, Institut National de Polytechnique de Grenoble, 341 p.
- McMaster K.J., 2002**, Effects of digital elevation model resolution on derived stream network positions, *Water resources research*, 38 (4).
- Meakin P., 1995**, Progress in DLA research, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 86 (1-2), 104-112.
- Meakin P., Sun T. & Jossang T., 2001**, Branched pattern in geology: rivers and other systems, In: Fleury V., Gouyet J.-F. & Leonetti M. (ed.), *Branching in nature : dynamics and morphogenesis of branching structures*, EDP Sciences, 119-160.
- Meunier M., 1991**, *Éléments d'hydraulique torrentielle*, Etudes Montagne n°1, Editions Cemagref, 278 p.

- Milton L.E., 1967**, An analysis of the laws of drainage net composition, *International Association of Scientific Hydrology. Bulletin*, 12 (4), 51-56.
- Miramont C., 1998**, *Morphogenèse, activité érosive et détritisme alluvial holocènes dans le bassin de la Moyenne Durance*, Université d'Aix-Marseille I, 287p.
- Miramont C., 2000**, Evolution temporelle de la dynamique érosive et sédimentaire dans les Alpes du Sud : l'exemple des bassins de «terres noires» et de la Durance, *Forêt méditerranéenne*, XXI (2), 195-201.
- Molloy I. & Stepinski T.F., 2007**, Automatic mapping of valley networks on Mars, *Computers & Geosciences*, 33, 728-738.
- Montgomery D. & Foufoula-Georgiou E., 1993**, Channel network source representation for Digital Elevation Models, *Water Resources Research*, 29 (12), 3925-3934.
- Montgomery D.R. & Dietrich W.E., 1988**, Where do channels begins?, *Nature*, 336, 232-234.
- Montgomery D.R. & Dietrich W.E., 1992**, Channel initiation and the problem of landscape scale, *Science of The Total Environment*, 255, 826-830.
- Montgomery D.R. & Dietrich W.E., 1994**, Landscape dissection and area-slope thresholds, in Kirkby M. (ed.), *Process Models and Theoretical Geomorphology*, John Wiley, New York, 221-246.
- Morgan R.P.C. & Mngomezulu D., 2003**, Threshold conditions for initiation of valley-side gullies in the Middle Veld of Swaziland, *Catena*, 50 (2-4), 401-414.
- Moussa R. & Bocquillon C., 1993**, Morphologie fractale du réseau hydrographique, *Hydrological sciences journal*, 38 (3), 187-201.
- Moussa R., 2003**, On morphometric properties of basins, scale effects and hydrological response, *Hydrological Processes*, 17, 33-58.
- Moyersons J., 1991**, Ravine formation on steep slopes: Forward versus regressive erosion. Some case studies from Rwanda, *Cat*, 18 (3-4), 309-324.
- Muller E., Décamps H. & Dobson M.K., 1993**, Contribution of space remote sensing to river studies, *Freshwater Biology*, 29 (2), 301-312.
- Nadal-Romero E., Regüés D., Martí-Bono C. & Serrano-Muela P., 2007**, Badland dynamics in the Central Pyrenees: temporal and spatial patterns of weathering processes, *Earth Surface Processes and Landforms*, 32 (6), 888-904.
- Napieralski J. & Nalepa N., 2010**, The application of control charts to determine the effect of grid cell size on landform morphometry, *Computers & Geosciences*, 36, 222-230.
- O'Callaghan J. & Mark D., 1984**, The extraction of drainage networks from digital elevation data, *Computer vision, graphics and image processing*, 28, 323-344.
- Oksanen J. & Sarjakoski T., 2005**, Error propagation of DEM-based surface derivatives, *Computers & Geosciences*, 31, 1015-1027.
- Oksanen J., 2006**, *Digital elevation model error in terrain analysis*, PhD Thesis, Faculty of Science, University of Helsinki, Publication of the Finnish Geodetic Institute, 51 p.
- Olivry J.C. & Hoorelbeck J., 1990**, Erodabilité des terres noires de la vallée du Buëch (France, Alpes du Sud), *Cahiers de l'ORSTOM, série Pédologie*, XXV (1-2), 95-110.
- Oostwoud Wijdenes D.J., Poesen J., Vandekerckhove L. & Ghesquiere M., 2000**, Spatial distribution of gully head activity and sediment supply along an ephemeral channel in a Mediterranean environment, *Catena*, 39 (3), 147-167.
- Paget A., Perret J. & Gleyze J., 2008**, La géomatique au service de la caractérisation automatique des réseaux hydrographiques, *Physio-Géo*, 2, [En ligne].

- Panissod 2009**, *Etude du troisième filtrage de Sintegra pour la construction du MNT de Draix*, Note interne GIS Draix.
- Panissod F., Bailly J.S., Durrieu S., Jacome A., Mathys N., Cavalli M. & Puech C., 2010**, Qualification de modèles numériques de terrain Lidar pour l'étude de l'érosion : application aux badlands de Draix, *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 192, 50-57.
- Papasaika H. & Baltsavias E., 2010**, Quality Evaluation of DEMs, in *Accuracy 2010*, 20 - 23 July, 2010, Leicester, UK.
- Pardini G., Gispert M. & Dunjó G., 2004**, Relative influence of wildfire on soil properties and erosion processes in different Mediterranean environments in NE Spain, *Science of The Total Environment*, 328 (1-3), 237-246.
- Parsons A.J., Brazier R.E., Wainwright J. & Powell D.M., 2006**, Scale relationships in hillslope runoff and erosion, *Earth Surface Processes and Landforms*, 31 (11), 1384-1393.
- Peckham S., 1995**, *Self-Similarity in the Three-Dimensional Geometry and Dynamics of Large River Basins*, University of Colorado, 301 p.
- Peckham S.D. & Gupta V.K., 1999**, A reformulation of Horton's Laws for large river networks in terms of statistical self-similarity, *Water Resource Research*, 35 (9), 2763-2777.
- Peckham S.D., 1995**, New results for self-similar trees with applications to river networks, *Water Resources Research*, 31(4), 1023-1029.
- Péguy C.P., 1942**, Principes de morphométrie alpine, *Revue de Géographie Alpine*, 30, 453-486.
- Pelletier J.D. & Turcotte D.L., 2000**, Shapes of river networks and leaves: are they statistically similar?, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 355 (1394), 307-311.
- Perroy R.L., Bookhagen B., Asner G.P. & Chadwick O.A., 2010**, Comparison of gully erosion estimates using airborne and ground-based LiDAR on Santa Cruz Island, California, *Geomorphology*, 118 (3-4), 288-300.
- Peuker T.K. & Douglas D.H., 1975**, Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data, *Computer Graphics Image Processing*, 4, 375-387.
- Phillips J.D., 2003**, Sources of nonlinearity and complexity in geomorphic systems, *Progress in Physical Geography*, 27 (1), 1-23.
- Pierson T.C & Costa J.E., 1987**, A rheologic classification of subaerial sediment-water flows, *Geological Society of America Reviews in Engineering Geology*, 7, 1-12.
- Pike R.J., 2000**, Geomorphometry - diversity in quantitative surface analysis, *Progress in Physical Geography*, 24 (1), 1-20.
- Pike R.J., 2002**, *A Bibliography of Terrain Modeling (Geomorphometry), the Quantitative Representation of Topography—Supplement 4.0*, USGS, [En ligne].
- Pike R.J., Evans I. & Hengl T., 2008**, Geomorphometry: A Brief Guide, in Hengl T. & Reuter H.I. (eds.), *Geomorphometry - Concepts, Software, Applications*, Elsevier, Amsterdam, 3-33.
- Pirotti F. & Tarolli P., 2010**, Suitability of LiDAR point density and derived landform curvature maps for channel network extraction, *Hydrological processes*, 24, 1187-1197.
- Planchon O. & Darboux F., 2002**, A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models, *Catena*, 46 (2-3), 159-176.
- Poesen J., Nachtergaele G., Verstraeten G. & Valentin C., 2003**, Gully erosion and environmental change: importance and research needs, *Catena*, 50 (2-4), 121-133.
- Poggio L. & Soille P., 2009**, Influence of spurious pit removal methods from STRM on river networking positioning, in *Geomorphometry 2009*, 31 August - 2 September 2009, University of Zurich.

- Poggio L. & Soille P., 2010**, Modelling uncertainty in watershed divides from STRM and GDEM, in *Accuracy 2010*, 20-23 July, 2010, University of Leicester, Leicester, UK.
- Polidori L., 1995**, Réflexions sur la qualité des modèles numériques de terrain, *Bulletin - Société française de photogrammétrie et de télédétection*, 139, 10-19.
- Puech C., 2000**, *Utilisation de la télédétection et des modèles numériques de terrain pour la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes*, Institut National de Polytechniques de Grenoble, 83 p.
- Puech C., Dartus D., Bailly J.S. & Estupina-Borell V., 2003**, Hydrologie distribuée, teledetection et problèmes d'échelle, *Bulletin - Société française de photogrammétrie et de télédétection*, 172, 11-21.
- Pumain D., 2003**, Un approche de la complexité en géographie, *Géocarrefour*, 78 (1), [En ligne].
- Quinn P.F., Beven K.J. and Chevallier P. & Planchon O., 1991**, The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models, *Hydrological Processes*, 5, 59-79.
- Raclot D., Puech C., Mathys N., Roux B., Jacome A., Asseline J. & Bailly J-S., 2005**, Photographies aériennes par drone et Modèle Numérique de Terrain : apports pour l'observatoire sur l'érosion de Draix, *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, 1, 7-20.
- Rana S., 2006**, Use of plan curvature variations for the identification of ridges and channels on DEM, in *Spatial Data Handling Proceedings*, 789-804.
- Read A.M., 2011**, A Catchment Conflation Tool for Comparing DEM Derived River Networks, in Hengl T., Evans I.S., Wilson J.P. & Gould M. (eds.), *Geomorphometry 2011*, Redlands, 23-26.
- Regüés D. & Gallart F., 2004**, Seasonal patterns of runoff and erosion responses to simulated rainfall in a badland area in Mediterranean mountain conditions (Vallcebre, southeastern Pyrenees), *Earth Surface Processes and Landforms*, 29, 755-767.
- Regüés D., Guàrdia R. & Gallart F., 2000**, Geomorphic agents versus vegetation spreading as causes of badland occurrence in a Mediterranean subhumid mountainous area, *Catena*, 40 (2), 173-187.
- Rey F., 2002**, *Influence de la distribution spatiale de la végétation sur la production sédimentaire de ravines marneuses dans les Alpes du Sud*, Université Joseph Fournier Grenoble, 182 p.
- Richard D. & Mathys N., 1999**, Historique, contexte technique et scientifique des BVRE de Draix. Caractéristiques, données disponibles et principaux résultats acquis au cours de dix ans de suivi, in *Actes du séminaire, Draix Le Brusquet Digne, 22-24 octobre 1997*, Editions Cemagref, Antony, 11-28.
- Ries A.H., 2006**, Constructal view of scaling laws of river basins, *Geomorphology*, 78 (3-4), 201-206.
- Ries J.B. & Marzolf I., 2003**, Monitoring of gully erosion in the Central Ebro Basin by large-scale aerial photography taken from a remotely controlled blimp, *Catena*, 50 (2-4), 309-328.
- Rodriguez-Iturbe I. & Rinaldo A., 1997**, *Fractal River Basins: Chance and Self-Organization*, Cambridge University Press, 564 p.
- Roering J.J., Kirchner J.W. & Dietrich W.E., 1999**, Evidence for nonlinear, diffusive sediment transport on hillslopes and implications for landscape morphology, *Water Resources Research*, 35 (3), 853-870.
- Roering J.J., Perron J.T. & Kirchner J.W., 2007**, Hillslope morphology and functional relationships between topographic relief and denudation, *Earth and Planetary Science Letters*, 264, 245-258.
- Roland B. & Fleurant C., 2004**, Caractérisation des formes du bocage à l'aide de la géométrie fractale, *L'espace géographique*, 2, 164-175.
- Ruelle D., 1989**, *Chaotic Evolution and Strange Attractors: the statistical analysis of time series for deterministic nonlinear systems*, Lezioni Lincee editor, Cambridge, Cambridge University Press, 96 p.
- Saint-Geours N., Lavergne C., Bailly J. & Grelot F., 2011**, Analyse de sensibilité globale d'un modèle spatialisé pour l'évaluation économique du risque d'inondation, *Journal de la Société Française de Statistique*, 152 (1), 24-46.

- Sapoval B., 1997**, *Universalités et fractales*, Flammarion, Paris, 275 p.
- Scheidegger A.E., 1966**, Statistical description of river network, *Water Resource Research*, 2, 785-790.
- Scheidegger A.E., 1967**, A stochastic model for drainage patterns into an intramontane trench, *International Association of Scientific Hydrology. Bulletin*, 12 (1), 15-20.
- Schuller D.J., Rao A.R. & Jeong G.D., 2001**, Fractal characteristics of dense stream networks, *Journal of Hydrology*, 243 (1-2), 1-16.
- Schumm S.A., 1956a**, Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, *Geological Society of America Bulletin*, 67, 597-646.
- Schumm S.A., 1956b**, The role of creep and rainwash on the retreat of badland slopes (South Dakota), *American Journal of Science*, 254 (11), 693-706.
- Shreve R.L., 1966**, Statistical law of stream numbers, *Journal of Geology*, 74, 17-37.
- Sierpinski W., 1915**, Sur une courbe cantorienne dont tout point est un point de ramification, *C.R. Académie des Sciences de Paris*, 160, 302.
- Smith L.C., 2002**, Emerging application of interferometric synthetic aperture rader (InSAR) in geomorphology and hydrology, *Annals of the Association of American Geographers*, 92 (3), 385-398.
- Smith M.J. & Pain C.F., 2009**, Applications of remote sensing in geomorphology, *Progress in Physical Geography*, 33 (4), 568-582.
- Smith M.P., Zhu A-X., Burt J.E. & Stiles C., 2006**, The effects of DEM resolution and neighborhood size on digital soil survey, *Geoderma*, 137 (1-2), 58-69.
- Sofia G., Tarolli P., Cazorzi F. & Dalla Fontana G., 2011**, An objective approach for feature extraction: distribution analysis and statistical descriptors for scale choice and channel network identification, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15 (5), 1387-1402.
- Sørensen R. & Seibert J., 2007**, Effects of DEM resolution on the calculation of topographical indices: TWI and its components, *Journal of Hydrology*, 347 (1-2), 79-89.
- Strahler A.N., 1957**, Quantitative analysis of watershed geomorphology, *American Geophysical Union*, 38, 913-920.
- Summerfield M.A., 1991**, *Global Geomorphology : an introduction to the study of landforms*, John Wiley, New York, 537 p.
- Tannier C. & Pumain D., 2005**, Fractals in urban geography: a theoretical outline and an empirical example, *Cybergeo : European Journal of Geography*, 307, [En ligne].
- Tarboton D.G. & Ames D.P., 2001**, Advances in the mapping of flow networks from digital elevation data, in *Proceedings of World Water and Environmental Resources Congress*, May 20-24, Orlando, Florida.
- Tarboton D.G., 1996**, Fractal River Networks, Hortons laws and Tokunaga cyclicity, *Journal of Hydrology*, 187 (1/2), 105-117.
- Tarboton D.G., 1997**, A new method for the determination of flow directions and contributing areas in grid digital elevation models, *Water Resources Research*, 33 (2), 309-319.
- Tarboton D.G., Bras R.L. & Rodriguez-Iturbe I., 1988**, The fractal nature of river networks, *Water Resources Research*, 24 (8), 1317-1322.
- Tarboton D.G., Bras R.L. & Rodriguez-Iturbe I., 1991**, On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data, *Hydrologic Processes*, 5 (1), 81-100.
- Tarolli P. & Dalla Fontana G., 2009**, Hillslope to valley transition morphology: new opportunities from high resolution DTMs, *Geomorphology*, 113, 47-56.

- Tokunaga E., 1978**, *Consideration on the composition of drainage networks and their evolution*, Geographical Reports, Tokyo Metropolitan University.
- Tricart J., 1947**, Sur quelques indices géomorphométriques, *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences*, 225, 747-749.
- Tricart J., 1977**, *Précis de Géomorphologie, tome 2 : Géomorphologie dynamique générale*, Société d'Édition d'Enseignement Supérieur, Paris, 345 p.
- Tricot C., 2008**, *Géométrie et mesures fractales : une introduction*, Ellipses, Paris, 440 p.
- Turcotte D.L., 2007**, Self-organized complexity in geomorphology: Observations and models, *Geomorphology*, 91, 302-310.
- Turcotte R., Fortin J.P., Rousseau A.N., Massicotte S. & Villeneuve J.P., 2001**, Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network, *Journal of Hydrology*, 240, 225-242.
- Valentin C., Poesen J. & Li Y., 2005**, Gully erosion: impacts, factors and control, *Catena*, 63 (2-3), 132-153.
- Vallauri D. & Vincent P., 1999**, Histoire de l'occupation de l'espace au XIXème siècle dans les bassins expérimentaux du Saignon, du Brusquet et du Laval (Alpes-de-Haute-Provence), in *Les bassins versants expérimentaux de Draix laboratoire d'étude de l'érosion en montagne - actes du séminaire, Draix Le Brusquet Digne*, 22-24 octobre 1997, 263-277.
- Vallauri D., 1997**, *Dynamique de la restauration forestière des substrats marneux avec Pinus nigra J.F. Arnold ssp. nigra dans le secteur haut-provençal*, Université Marseille 3, 300 p.
- Vandaele K., Poesen J., Govers G. & van Wesemael B., 1996**, Geomorphic threshold conditions for ephemeral gully incision, *Geomorphology*, 16, 161-173.
- Vandekerckhove L., Poesen J., Oostwoud Wijdenes D. & de Figueiredo T., 1998**, Topographical thresholds for ephemeral gully initiation in intensively cultivated areas of the Mediterranean, *Catena*, 33 (3-4), 271-292.
- Vandekerckhove L., Poesen J., Oostwoud Wijdenes D., Nachtergaele J., Kosmas C., Roxo M.J. & de Figueiredo T., 2000**, Thresholds for gully initiation and sedimentation in Mediterranean Europe, *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, 1201-1220.
- Vanmaercke M., Poesen J., Verstraeten G., de Vente J. & Ocakoglu F., 2011**, Sediment yield in Europe: Spatial patterns and scale dependency, *Geomorphology*, 130 (3-4), 142-161.
- Vaze J., Teng J. & Spencer G., 2010**, Impact of DEM accuracy and resolution on topographic indices, *Environmental Modelling & Software*, 25, 1086-1098.
- Verrecchia E.P., 2003**, Image analysis and morphometry of geological objects, *Mathematical Geology*, 35(7), 759-762.
- Verrecchia E.P., 1995**, On the relationship between the pore-throat morphology index ("a") and fractal dimension (Df) of pore networks in carbonate rocks; discussion, *Journal of Sedimentary Research*, 65, 701-702.
- Voight B., 1978**, *Rockslides and avalanches: natural phenomena*, Elsevier, Amsterdam, 850 p.
- von Koch H., 1904**, Sur une courbe continue sans tangente, obtenue par une construction géométrique élémentaire, *Arkiv för Matematik, Astronomi och Fysik*, 1, 681-704.
- Vrieling A., 2006**, Satellite remote sensing for water erosion assessment: A review, *Catena*, 65, 2-18.
- Waddington A. & Kay D., 2003**, The Impacts of Mine Subsidence on Creeks, River Valleys and Gorges Due to Underground Coal Mining Operations, in *Coal Operators' Conference 2003 - The AusIMM Illawarra Branch*, 12-14 February 2003, 101-116.
- Warren A., 1984**, Arid geomorphology, *Progress in Physical Geography*, 8 (3), 399-420.

- Werritty A., 1972**, The topology of stream networks, in Chorley R.J. (ed.), *Spatial Analysis in Geomorphology*, Methuen and co, London, 162-196.
- Wilson G.V., 2009**, Mechanisms of ephemeral gully erosion caused by constant flow through a continuous soil-pipe, *Earth Surface Processes and Landforms*, 34 (14), 1858-1866.
- Wilson J.P. & Gallant J.C., 2000**, *Terrain analysis: principle and applications*, J. Wiley, 479 p. p.
- Wilson J.P., Lam C.S. & Deng Y., 2007**, Comparison of the performance of flow-routing algorithms used in GIS-based hydrologic analysis, *Hydrological Processes*, 21, 1026-144.
- Wise S.M., Thornes J.B. & Gimán A., 1982**, How old are the badlands? A case from south-east Spain, in Bryan R. & Yair A. (eds.), *Badlands geomorphology and piping*, Geobooks in Norwich, 259-278.
- Wood J.D., 1996**, *The geomorphological characterisation of digital elevation models*, University of Leicester, UK, [En ligne]
- Yair A., Sharon D. & Lavee H., 1980**, Trends in runoff and erosion processes over an arid limestone hillside, northern Negev, Israel, *Hydrological Sciences Bulletin*, 25 (3), 243-255.
- Yokoyama R., Shirasawa M. & Pike R.J., 2002**, Visualizing topography by openness: a new application of image processing to digital elevation model, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68, 257-265.
- Young A., 1972**, *Slopes. Geomorphology Text 3*, Oliver and Boyd, Edimburgh, 288 p.
- Zavoianu I., 1985**, *Morphometry of drainage basins*, Elsevier, Bucarest, 238 p.
- Zevenbergen L.W. & Thorne C.R., 1987**, Quantitative analysis of land surface topography, *Earth Surface Processes and Landforms*, 12, 47-56.
- Zhu T.X., Cai Q.G. & Zeng B.Q., 1997**, Runoff generation on a semi-arid agricultural catchment: field and experimental studies, *Journal of Hydrology*, 196 (1-4), 99-118.
- Zimmerman D., Pavlik C., Ruggles A. & Armstrong M., 1999**, An Experimental Comparison of Ordinary and Universal Kriging and Inverse Distance Weighting, *Mathematical Geology*, 31, 375-390.

Sitographie

- @geomorphometry <http://geomorphometry.org/>
- @hypergeo <http://www.hypergeo.eu/>
- @J.Walker <http://www.fourmilab.ch/images/Romanesco/>
- @l'EPFL <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre2/chapitre2.html>
- @NPS <http://www.nps.gov/badl/index.htm>
- @ORE Draix <http://oredraixbleone.cemagref.fr/>
- @PaulBourke <http://local.wasp.uwa.edu.au/~pbourke/fractals/dla/>
- @riservacalanchidiatri www.riservacalanchidiatri.it
- @USGS <http://www.usgs.gov/>
- @wikipedia <http://fr.wikipedia.org>

Annexes

Annexe 1. Liste des acronymes

Annexe 2. Liste des logiciels utilisés

Annexe 3. La classification de Vallauri

Annexe 4. Table des descripteurs

Annexe 5. Détermination du domaine empirique de fractalité et calcul de la dimension fractale par comptage de boîtes sur le bassin du Laval 1 m

Annexe 6. Listes des figures

Annexe 7. Listes de tableaux

Annexe 1. Liste des acronymes

AMAP _ botAnique et bioinforMatique de l'Architecture des Plantes

CNAM _ Conservatoire national des arts et métiers

ESGT _ Ecole supérieure des géomètres et topographes

GIS _ Groupement d'intérêt scientifique

Irstea _ Institut nationale de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture

IUF _ Institut universitaire de France

LGP _ Laboratoire de géographie physique

ORE _ Observatoire de recherche en environnement

RTM _ Restauration des terrains en montagne

SAMM _ Statistique, Analyse, Modélisation Multidisciplinaire

TETIS _ Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale

Annexe 2. Liste des logiciels utilisés

Les outils développés dans le cadre de ce travail ont été réalisés sous R. L'essentiel des traitements fait appel aux logiciels libres R et SAGA GIS. Le module ArcInfo a parfois été utilisé pour la structuration topologique des réseaux extraits. Les cartes ont été conçues soit directement avec R (package « *sp* » et « *maptools* ») soit sous ArcGIS, et mise en forme à l'aide du logiciel libre Inkscape.

Annexe 3. Classification de Vallauri (1997)

La classification de la végétation dans les bassins de Draix (Vallauri, 1997, cité dans Mathys, 2006) distingue les groupements suivants :

- Les substrats nus en érosion active et sans végétation
- Les stades pionniers constitués des mêmes substrats marneux colonisés par des espèces herbacées comme la bauche (*Achnatherum calamagrostis*, L., *P. Beauv.*) soit par des arbustes (argousier, *Hippophae rhamnoides*, L., genêt cendré, *Genista cinerea*, Vill., amélanchier, *Amelanchier Ovalis*) soit par des arbres (Pin sylvestre, *Pinus sylvestris*, L.). En exposition Nord, l'amélanchier prend une importance particulière sous la forme de « brousse ».
- Les pelouses pâturées dominées par le brachypode, *Brachypodium pinnatum* (L.), ce qui est le signe d'un sous-pâturage.
- Les pelouses embroussaillées qui sont progressivement colonisées par le genévrier (*Juniperus communis*, L.), l'argousier, le genêt cendré et l'amélanchier.
- Le stade forestier pionnier qui est dominé par le pin sylvestre mais où se développent une quantité non négligeable de feuillus (érable, *Acer opalus*, Mill., sorbier, *Sorbus aria*, L., chêne pubescent) et d'arbustes (buis, genévrier, amélanchier).
- La chênaie pubescente, claire lorsqu'elle est mélangée à une ancienne pelouse pâturée, ou dense même si l'influence du pâturage passé se fait encore sentir par l'absence de sous-bois arbustif.
- La hêtraie-chênaie lorsque le hêtre (*Fagus sylvatica*, L.) commence à s'installer, au-dessus de 1100 m d'altitude.

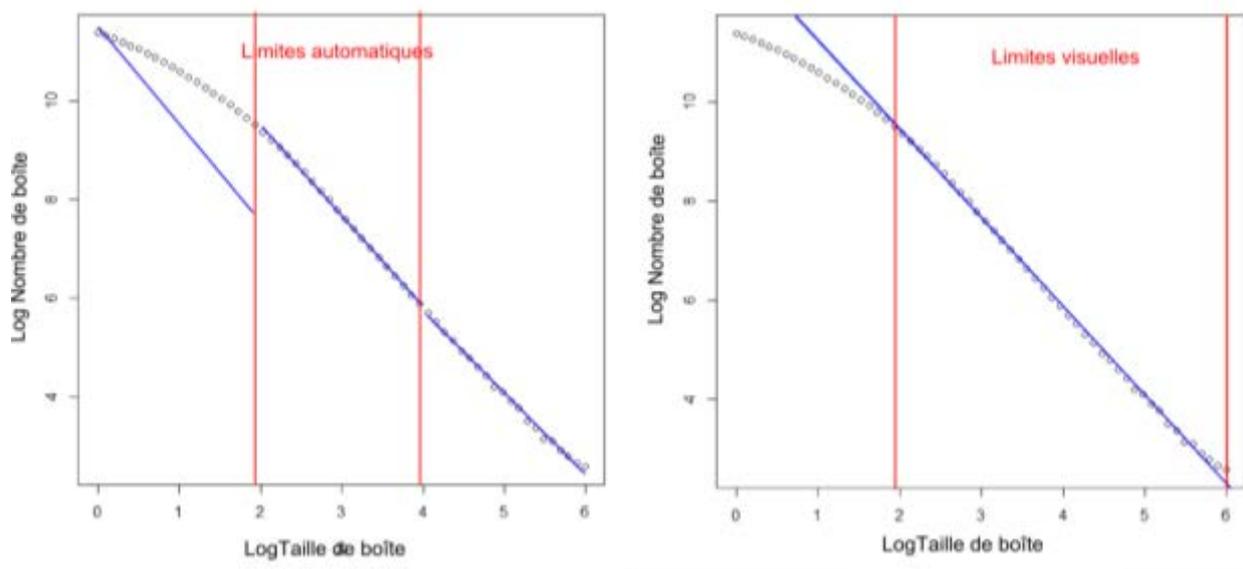
Annexe 4. Tableaux des descripteurs de base des différents réseaux

	Bouinenc 25m	Laval 1m	Laval 2m	Laval 4m	Laval 8m	Laval 16m	Laval 32m
Résolution MNT (m)	25	1	2	4	8	16	32
Surface bassin (m ²)	39 000 000	860 000	860 000	860 000	860 000	860 000	860 000
Nb d'arcs	1129	12127	4094	1466	444	109	39
Nd nœuds	1130	12128	4095	1467	445	110	40
Shreve du réseau	570	6132	2061	739	225	55	20
Longueur totale (m)	230186	105151.10	66265.93	39648.59	21953.34	11711.68	5999.37
Dd (m.m ⁻³)	0.010	0.122	0.077	0.046	0.025	0.014	0.007
Longueur moyenne par arc (m)	203.88	8.67	16.08	26.84	49.11	107.45	166.65
Nb de drains (par ordre de Strahler)							
Ordre 1	570	6132	2061	739	225	55	20
Ordre 2	131	1233	425	142	51	15	4
Ordre 3	30	238	83	36	13	5	1
Ordre 4	8	52	18	8	4	1	-
Ordre 5	2	11	4	2	1	-	-
Ordre 6	1	3	1	1	-	-	-
Ordre 7	-	1	-	-	-	-	-
Longueur moyenne par ordre (m)							
Ordre 1	220.12	9.32	18.07	30.54	53.13	117.52	198.66
Ordre 2	402.17	21.15	35.54	62.18	94.63	183.57	347.65
Ordre 3	943.48	47.80	84.39	105.26	232.31	242.92	572.78
Ordre 4	1541.5	100.57	230.29	310.24	245.28	1280.20	-
Ordre 5	5538.02	279.12	330.01	264.94	1170.94	-	-
Ordre 6	320.71	265.14	1446.83	1387.79	-	-	-
Ordre 7	-	1426.43	-	-	-	-	-

	Moulin 1m	Moulin 2m	Moulin 4m	Moulin 8m	Ravine AJ 0.25m	Ravine AJ 0.5m
Résolution MNT (m)	1	2	4	8	0.25	0.5
Surface bassin (m ²)	80 000	80 000	80 000	80 000	1 000	1 000
Nb d'arcs	1661	500	132	47	282	167
Nd nœuds	1662	501	133	48	283	168
Shreve du réseau	837	252	68	24	142	84
Longueur totale (m)	11384.68	6732.13	3810.56	2586.40	588.06	449.96
Dd (m.m ⁻²)	0.121	0.071	0.040	0.027	0.59	0.45
Longueur moyenne par arc (m)	6.85	13.46	28.87	55.03	2.08	2.69
Nb de drains (par ordre de Strahler)						
Ordre 1	837	252	68	24	142	84
Ordre 2	158	44	13	8	35	17
Ordre 3	30	11	3	2	5	3
Ordre 4	8	2	1	1	1	1
Ordre 5	2	1	-	-	-	-
Ordre 6	1	-	-	-	-	-
Longueur moyenne par ordre						
Ordre 1	7.3	14.1	29.9	53.6	2.27	3.53
Ordre 2	15.3	35.9	74.7	91.4	4.84	4.13
Ordre 3	49.3	82	192.8	210.8	11.86	16.37
Ordre 4	105.1	236.4	226.1	146.5	36.59	34.38
Ordre 5	150.5	230	-	-	-	-
Ordre 6	232.8	-	-	-	-	-

Annexe 5. Détermination du domaine empirique de fractalité et calcul de la dimension fractale par comptage de boîtes sur le bassin du Laval 1 m

Pour le réseau du bassin du Laval à 1 m de résolution, la dimension fractale est de 1.84, calculée entre les limites de domaine empirique de fractalité obtenues par détection automatique (environ 7 à 55 m). La méthode de détection doit être utilisée pour stabiliser le calcul de la dimension fractale et pouvoir comparer ces valeurs d'un bassin à l'autre. Toutefois, pour observer l'étendue de la fractalité des réseaux, il est possible d'étendre visuellement la plage de valeurs c'est-à-dire le domaine empirique de fractalité. Pour ce réseau, il apparaît raisonnable de considérer l'intervalle de 7 m à 500 m qui donnerait une dimension fractale de 1.79.



Domaine empirique fractalité pour le Laval 1 m : à gauche avec les limites déterminées de manière automatique, à droite avec des limites déterminées visuellement. On voit apparaître en bleu les droites de régression pour les domaines.

Taille de boîtes	Nombre de boîtes	Taille de boîtes	Nombre de boîtes
1	87937	21.0417255	1989
1.10688553	82905	23.2907816	1637
1.22519559	77716	25.7802292	1348
1.35615127	72502	28.5357628	1114
1.50110422	67165	31.5858231	914
1.66155055	62460	34.9618906	754
1.83914627	57548	38.698811	621
2.0357244	52879	42.8351541	511
2.25331389	47972	47.4136124	421
2.49416055	43408	52.4814417	355
2.76075023	39388	58.0909486	293
3.05583449	35525	64.3000307	246
3.382459	31810	71.1727739	201
3.74399493	28474	78.7801138	167
4.14417383	25358	87.2005684	137
4.58712607	22671	96.5210477	119
5.07742349	20036	106.837751	98
5.62012661	17636	118.257162	82
6.22083684	15427	130.897141	66
6.88575431	13389	144.888152	60
7.62174184	11665	160.3746	49
8.43639579	9980	177.516325	43
9.33812446	8557	196.490252	33
10.3362349	7257	217.492217	29
11.4410289	6115	240.738989	23
12.6639093	5134	266.470505	22
14.0174981	4276	294.952347	18
15.5157658	3525	326.478486	16
17.1741767	2929	361.374313	14
19.0098478	2404	400	13

Tableau de tailles et nombre de boîtes issues du comptage de boîtes sur le réseau du Laval 1m. Les tailles de boîtes sont en mètres.

Annexe 6. Liste des figures

FIGURE 1.1. LA VARIETE DES PAYSAGES DE BADLANDS	18
FIGURE 1.2. SCHEMA SYNTHETIQUE, EN PLAN, DE L'ORGANISATION DES LIGNES DE CRETES (GILBERT, 1877, D'APRES ANDERSON, 1988).....	20
FIGURE 1.3. LES BADLANDS, RESEAUX DE RAVINES : RESEAUX DE TALWEGS ET DE CRETES (SOURCE : SIG DRAIX).....	21
FIGURE 1.4. BADLANDS DANS LES « TERRES NOIRES » DE DRAIX – ALPES MERIDIONALES FRANÇAISES (PUECH ET AL., 2009)	21
FIGURE 1.5. STRUCTURE DU REGOLITHE	23
FIGURE 1.6. LES PRINCIPAUX PROCESSUS DE DESAGREGATION, FACTEURS ET CONSEQUENCES	25
FIGURE 1.7. LES PRINCIPAUX PROCESSUS DE TRANSPORT SUR LES VERSANTS.....	29
FIGURE 1.8. LES PRINCIPAUX PROCESSUS DE TRANSPORT DANS LES CHENAUX	30
FIGURE 1.9. ECOULEMENTS ET MOUVEMENTS DE MASSE. LES DISCIPLINES CONCERNEES (D'APRES MEUNIER, 1991, FIG. 4-3 ET 4-4, P.62 ET 63).....	31
FIGURE 1.10. REPARTITION DES DIFFERENTS PROCESSUS EN FONCTION DES VARIABLES MORPHOLOGIQUES DE PENTE LOCALE ET DE SURFACE AMONT DRAINEE EXPRIMEES PAR LEUR LOGARITHME (EXTRAIT DE VANDEKERCKHOVE ET AL., 2000 ; REPRIS DE MONTGOMERY ET DIETRICH, 1994).....	37
FIGURE 1.11. MODELE CONCEPTUEL DE CHARGE SOLIDE SPECIFIQUE (SPECIFIC SEDIMENT YIELD) A DIFFERENTES ECHELLES ET CONTRIBUTION DES SOURCES ET PUIITS (EXTRAIT DE DE VENTE ET POESEN, 2005).....	39
FIGURE 2.1. ERREUR SYSTEMATIQUE ET DISPERSION STATISTIQUE A TRAVERS TROIS CONFIGURATIONS (@WIKIPEDIA)	49
FIGURE 2.2. CALCUL D'INDICES TOPOGRAPHIQUES A PARTIR D'UNE APPROXIMATION LOCALE DE LA SURFACE REPRESENTEE PAR LE MNT (D'APRES ZEVENBERGEN ET THORNE, 1987 ; BURROUGH ET McDONNELL, 1998)	52
FIGURE 2.3. METHODE GENERALE BASEE SUR L'ALGORITHME D8 POUR EXTRAIRE UN RESEAU DE TALWEGS A PARTIR D'UN MNT (D'APRES CHARLEUX-DEMARGNE, 2001).....	53
FIGURE 2.4. PASSAGE D'UN CHEMIN D'ECOULEMENT A UN RESEAU SEUILLE SIGNIFICATIF (CA_T : SEUIL DE SURFACE AMONT DRAINE – CONTRIBUTION AREA THRESHOLD).....	56
FIGURE 2.5. SUR ET SOUS-DETECTION INHERENTES A L'APPLICATION DU SEUIL DE SURFACE AMONT DRAINEE UNIQUE.....	56
FIGURE 3.1. LES TROIS PRINCIPALES CLASSIFICATIONS DES DRAINS OU TALWEGS (D'APRES ZAVOIANU, 1985).....	64
FIGURE 3.2. DEUX CAS EXTREMES DE RAPPORT DE CONFLUENCE (D'APRES MILTON, 1965).....	68
FIGURE 3.3. LES CINQ TDCN POUVANT ETRE CONSTRUITS AVEC QUATRE SOURCES (MAGNITUDE 4).....	68
FIGURE 3.4. EXEMPLE DE CALCUL D'UNE MATRICE DE RAMIFICATION (BAILLY, 2007).....	70
FIGURE 3.5. DISTRIBUTIONS DES ANGLES AUX CONFLUENCES DANS LES BADLANDS DE PERTH AMBOY (SCHUMM, 1956A).....	73
FIGURE 3.6. LES MODELES DE PREDICTION D'ANGLE AUX CONFLUENCES D'HORTON ET HOWARD EN FONCTION DES PENTES DES TALWEGS (D'APRES HOWARD, 1971)	74
FIGURE 3.7. UN CHOU ROMANESCO ET SES SOUS-ENSEMBLES DE PLUS EN PLUS « ZOOMES » (SOURCE : @J.WALKER)	76
FIGURE 3.8. FRACTALES ALEATOIRES (MOUVEMENT BROWNIEN ; @WIKIPEDIA) ET FRACTALES DETERMINISTES (COURBE DE VON KOCH ; D'APRES SAPOVAL, 1997)	76
FIGURE 3.9. MATRICE DES $T_{(w;k)}$ (PECKHAM, 1995).....	79
FIGURE 3.10. EXEMPLES D'ARBRES AUTOSIMILAIRES D'ORDRE 4 (PECKHAM, 1995)	80
FIGURE 4.1. TRIPLLET D'ECHELLE DANS LE CAS DE MESURES EXPERIMENTALES (D'APRES BLÖSCHL, 1995 DANS PUECH, 2003)	84
FIGURE 6.1. LOCALISATION DES BASSINS DE DRAIX DANS LE BASSIN DE LA DURANCE (A) ET CONTEXTE TOPOGRAPHIQUE (B) (SOURCES : A. MODIFIE DE MATHYS, 2006 ; B. DONNEES ISSUES DE LA BD TOPO, IGN)	100

FIGURE 6.2. LOCALISATION DES ZONES DE MARNES EN MOYENNE DURANCE ET DES SITES DE DRAIX (PUECH ET AL., 2009)	100
FIGURE 6.3. CARTE DE LOCALISATION DES BASSINS DU MOULIN ET DU LAVAL (SOURCE : RESEAU HYDROGRAPHIQUE – BD TOPO, IGN ; LIMITES DE BASSINS – SIG DRAIX)	101
FIGURE 6.4. LE MOULIN : BASSIN VERSANT RAVINE (CLICHE : N. THOMMERET, MAI 2009)	103
FIGURE 6.5. LES OBJETS MORPHOLOGIQUES DANS LES BADLANDS DE DRAIX	106
FIGURE 6.6. COUPE SYNTHETIQUE DE LA VALLEE DU LAVAL A DRAIX (BALLAIS, 1996).	107
FIGURE 6.7. REPARTITION ANNUELLE DES TEMPERATURES MOYENNES MENSUELLES A LA STATION DU LAVAL SUR LA PERIODE 2001-2009 (A GAUCHE) ; REPARTITION ANNUELLE DES PLUIES MENSUELLES A LA STATION DU LAVAL SUR LA PERIODE 1985-2009 (A DROITE) ; (SOURCE : ORE DRAIX)	109
FIGURE 6.8. REPARTITION MENSUELLE DES PLUIES TOMBANT AU-DESSUS D'UN SEUIL D'INTENSITE INSTANTANEE (STATION DU LAVAL, PERIODE 1985-2003 ; MATHYS, 2006)	109
FIGURE 6.9. DEVERSEMENT AU BARRAGE DE LA PLAGE DE DEPOT A L'EXUTOIRE DU LAVAL LORS DE LA CRUE DU 5 JUIN 2003 (CLICHE : N. MATHYS)	110
FIGURE 6.10. CARTE DE LA VEGETATION DU LAVAL (SOURCE : DONNEES ISSUES DE VALLAURI (1997) INTEGREES DANS LE SIG DRAIX)	113
FIGURE 6.11. PHOTOGRAPHIE AU SOL D'UN DETAIL DU BASSIN DU LAVAL PRESENTANT TROIS TYPES DE FORMATION VEGETALE SITUES SUR DES ESPACES DIFFERENTS (CLICHE : C. PUECH, MAI 2009)	113
FIGURE 6.12. LOCALISATION DES BASSINS CHOISIS (COORDONNEES EN LAMBERT 3)	115
FIGURE 6.13. RESEAU CARTOGRAPHIE SUR LE TERRAIN : A. ENSEMBLE DU RESEAU TRACE SUR LE TERRAIN ; B. SECTEUR TEST HOMOGENE CONSIDERE COMME REFERENCE	118
FIGURE 7.1. PRINCIPE DE LA METHODE PROPOSEE POUR EXTRAIRE UN RESEAU DE TALWEGS A PARTIR D'UN MNT RASTER FONDEE SUR TROIS ETAPES	123
FIGURE 7.2. CALCUL DE L'INDICE DE CONVERGENCE	125
FIGURE 7.3. EXEMPLE DE DISTRIBUTION DES VALEURS DE CI (EN HAUT) ET DE PC (EN BAS) CALCULES A PARTIR DU MNT SIMULE SELON UN PLAN INCLINE BRUTE (A GAUCHE) ET LES VALEURS DE SEUILS (A DROITE)	126
FIGURE 7.4. EXEMPLES DE RESEAUX DE TALWEGS EXTRAITS A PARTIR DE MNT SIMULES: A) MNT DE BASINS VIRTUELS; B) SURFACE DE TOLE ONDULEE.	129
FIGURE 7.5. COMPARAISON DES RESEAUX DE TALWEGS OBTENUS A PARTIR DE TROIS METHODES DIFFERENTES AVEC LE RESEAU DE REFERENCE TERRAIN SUR LE SECTEUR DU BASSIN DU MOULIN	130
FIGURE 7.6. EXTRACTIONS DE TROIS RESEAUX A PARTIR DE MNT A DIFFERENTES RESOLUTION A L'AIDE DE LA METHODE BASEE SUR CI ET COMPARAISON AVEC LE RESEAU DE REFERENCE – SECTEUR TEST DU BASSIN DU MOULIN.	131
FIGURE 7.7. COMPARAISON QUALITATIVE DU RESEAU EXTRAIT PAR LA METHODE CI (A) ET UN RESEAU TRACE MANUELLEMENT A PARTIR DES COURBES DE NIVEAUX CALCULEES (B) A PARTIR DU MEME MNT (1M)	132
FIGURE 8.1. PRINCIPE DE LA MESURE DE SUR ET SOUS-DETECTION PAR LA METHODE DES BUFFERS	140
FIGURE 8.2. COMPARAISON DES SUR ET SOUS-DETECTION POUR LES RESEAUX EXTRAITS A PARTIR DES DIFFERENTES METHODES SUR LE SECTEUR TEST DU BASSIN DU MOULIN.	143
FIGURE 8.3. INCOHERENCE DE L'EVALUATION PAR LA METHODE DES BUFFERS : LES LONGUEURS MEASUREES NE SONT PLUS SIGNIFICATIVES.	145
FIGURE 8.4. PRINCIPE DE L'APPARIEMENT DES NŒUDS	147
FIGURE 8.5. SCHEMA GLOBAL DE LA METHODE D'APPARIEMENT HIERARCHIQUE	147
FIGURE 8.6. DEFINITION DE LA MAGNITUDE DE SHREVE RELATIVE POUR LES DEUX RESEAUX R ET T	148
FIGURE 8.7. MAGNITUDE DE SHREVE ET CLASSIFICATION DES NŒUDS PAR IMPORTANCE POUR L'APPARIEMENT	149

FIGURE 8.8. CALCUL DU NOMBRE DE CLASSES THEORIQUE A PARTIR DE L'ARBRE BINAIRE PARFAIT	149
FIGURE 8.9. DIFFERENCE DE NIVEAUX DE DETAILS DANS LA REPRESENTATION DES RESEAUX ET CLASSES EQUIVALENTES ...	150
FIGURE 8.10. RESEAUX EXTRAITS SUIVANT DIFFERENTES METHODES D'EXTRACTION ET RESEAU DE REFERENCE	152
FIGURE 8.11. CARTES DE PROGRESSION DE L'APPARIEMENT ETAPE PAR ETAPE POUR LES RESEAUX T1 ET T3	155
FIGURE 9.1. VUES 3D D'UN MNT COUVRANT LE SECTEUR DU BASSIN DU MOULIN ET PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DE FORMES ASSOCIEES A DEUX RESOLUTIONS (1 M ET 4 M)	162
FIGURE 9.2. VUES 3D D'UN MNT DU BASSIN DU LAVAL ET PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DE FORMES ASSOCIEES A DEUX RESOLUTIONS (1 M ET 16 M)	163
FIGURE 9.3. EXEMPLE DE L'INFLUENCE DE LA RESOLUTION SUR LES REPRESENTATIONS DU RESEAU DE TALWEGS (BASSIN DU MOULIN)	163
FIGURE 9.4. REPRESENTATION SPATIALE DU RESEAU ET DES FACETTES-VERSANTS ASSOCIEES ET SCHEMA DE GRAPHE VALUE CORRESPONDANT	164
FIGURE 9.5. TROIS REPRESENTATIONS DE RESEAU DE TALWEGS ET SEMANTIQUE ASSOCIE	165
FIGURE 9.6. EXEMPLES DE DESCRIPTEURS POSSIBLES, AU CROISEMENT ENTRE LA MORPHOMETRIE CLASSIQUE ET LE POTENTIEL DES MNT	168
FIGURE 9.7. LES GRANDES FAMILLES DE RUBRIQUES NECESSITANT DES CHOIX AVANT D'EXTRAIRE DES DESCRIPTEURS MORPHOLOGIQUES A PARTIR DE MNT	169
FIGURE 9.8. MESURE NUMERIQUE DE LA LONGUEUR : A VOL D'OISEAU ET LE LONG DU LINEAIRE	171
FIGURE 9.9. CALCUL DE LA LONGUEUR D'UN DRAIN PAR ORDRE DE STRAHLER	171
FIGURE 9.10. UNE MESURE NUMERIQUE POSSIBLE DE LA PENTE D'UN ARC (EN MODE VECTEUR)	172
FIGURE 9.11. MESURE DU PROFIL LONGITUDINAL D'UN ARC	173
FIGURE 9.12. REPRESENTATION SYMBOLIQUE EN 2D DU CALCUL DE VD (VALLEY DEPTH) SUR UN MNT	174
FIGURE 9.13. REPRESENTATION SYMBOLIQUE DU CALCUL DE L'OUVERTURE (OPENNESS) SELON UNE DES DIRECTIONS.	174
FIGURE 9.14. LES ANGLES DE CONFLUENCE CONSIDERES.	175
FIGURE 9.15. MESURES NUMERIQUES LOCALE ET GLOBALE DE L'ANGLE DE CONFLUENCE A	176
FIGURE 9.16. PENTE DES ARCS (BASSIN DU MOULIN, MNT 1 M)	177
FIGURE 9.17. RESULTATS DE PROFILS LONGITUDINAUX AMONT-AVAL LE LONG DU RESEAU	177
FIGURE 9.18. RESEAU DU MOULIN ET ZONES VEGETALISEES (SOURCE : BD TOPO, IGN)	178
FIGURE 9.19. RESULTATS CARTOGRAPHIQUE DE LA PROFONDEUR DE VALLEE EN MODE RASTER	179
FIGURE 9.20. RESULTATS CARTOGRAPHIQUE DE L'INDICE D'OUVERTURE EN MODE RASTER	179
FIGURE 9.21. RESULTAT CARTOGRAPHIQUE DE LA PROFONDEUR DE VALLEE, MOYENNE SUR LES ARCS DU RESEAU	180
FIGURE 9.22. RESULTAT CARTOGRAPHIQUE DE L'OUVERTURE DU RELIEF AU NIVEAU DES ARCS DU RESEAU	181
FIGURE 9.23. RESULTAT CARTOGRAPHIQUE DES ANGLES DE CONFLUENCE A POUR L'ENSEMBLE DU BASSIN	182
FIGURE 9.24. RESULTAT CARTOGRAPHIQUE DES ANGLES DE CONFLUENCE B POUR L'ENSEMBLE DU BASSIN	183
FIGURE 9.25. HIERARCHISATION DU RESEAU PAR ORDRE DE STRAHLER (BASSIN DU MOULIN, RESOLUTION 1 M)	184
FIGURE 9.26. DIAGRAMME EN VIOLON : DISTRIBUTION DES VALEURS DES DIFFERENTS DESCRIPTEURS SELON LES ORDRES DE STRAHLER (ORDRES 1, 2 ET 3)	187
FIGURE 9.27. DIAGRAMMES EN VIOLON : DISTRIBUTION DES VALEURS DES DESCRIPTEURS PAR DRAINS POUR L'ENSEMBLE DU BASSIN DU MOULIN SELON DIFFERENTES RESOLUTIONS (1, 2 ET 4 M)	189
FIGURE 9.28. VARIATION DES DESCRIPTEURS (LONGUEUR, PENTE, PROFONDEUR ET ANGLE B) MOYENS PAR DRAINS, AVEC LA RESOLUTION DU MNT, POUR LES DIFFERENTS BASSINS.	191
FIGURE 9.29. LONGUEURS, PENTES ET PROFONDEURS MOYENNES DES DRAINS D'ORDRE 1 EN FONCTION DE LA RESOLUTION POUR LES DIFFERENTS COUPLES BASSIN-RESOLUTION	192

FIGURE 9.30. DISTRIBUTION SPATIALE DES DRAINS D'ORDRES 1 DANS LE BASSIN DU MOULIN.....	193
FIGURE 10.1. COMMENT PASSER DES DESCRIPTEURS NUMERIQUES LOCAUX DES ELEMENTS DU RESEAU AUX CLASSES D'OBJETS MORPHOLOGIQUES ?.....	196
FIGURE 10.2. CLASSIFICATION DE REFERENCE, CORRESPONDANT AUX OBJETS MORPHOLOGIQUES IDENTIFIES SUR LE TERRAIN (A), ET CONFORMITE DE LA CLASSIFICATION NUMERIQUE ISSUE DE L'ARBRE DE CLASSIFICATION AVEC CETTE REFERENCE (B), SECTEUR TEST DU MOULIN (1 M)	198
FIGURE 10.3. CLASSIFICATION DE REFERENCE, CORRESPONDANT AUX OBJETS MORPHOLOGIQUES IDENTIFIES SUR LA BD TOPO (A), ET CONFORMITE DE LA CLASSIFICATION NUMERIQUE ISSUE DE L'ARBRE DE CLASSIFICATION AVEC CETTE REFERENCE (B), LE SECTEUR TEST DU BOUINENC (25 M).	199
FIGURE 10.4. ARBRE DE CLASSIFICATION ET PROBABILITE D'APPARTENANCE A CHAQUE CLASSE : A. POUR LE SECTEUR TEST DU MOULIN (1 M) ; B. POUR LE SECTEUR TEST DU BOUINENC (25 M)	200
FIGURE 10.5. RESULTAT CARTOGRAPHIQUE DE L'APPLICATION DU MODELE CONSTRUIT SUR LE SECTEUR TEST A L'ENSEMBLE DU RESEAU DU BOUINENC (25 M)	202
FIGURE 10.6. RESULTAT CARTOGRAPHIQUE DE L'APPLICATION DU MODELE CONSTRUIT SUR LE SECTEUR TEST A L'ENSEMBLE DU RESEAU DU MOULIN (25 M)	202
FIGURE 10.7. POSITIONNEMENT DE LA FENETRE D'OBSERVATION DU MNT SUR LA HIERARCHIE DES OBJETS MORPHOLOGIQUES EN FONCTION DE LA RESOLUTION ET DU DOMAINE	204
FIGURE 11.1. CONSTRUCTION DE LA COURBE FRACTALE DE VON KOCH.....	214
FIGURE 11.2. PRINCIPE DU CALCUL DE LA DIMENSION FRACTALE PAR COMPTAGE DE BOITES (INSPIRE DE GOUYET, 1992)..	216
FIGURE 11.3. RECTIFIABILITE DES RESEAUX VECTORIELS	218
FIGURE 11.4. LES FAMILLES DE RESEAUX : A) BRANCHE D'UN RESEAU ALEATOIRE DE SCHEIDEGGER ; B) RESEAU DETERMINISTE PARFAIT ($R_L = \sqrt{2}$, $A = 90^\circ$, NIVEAU D'ITERATION = 8 ; C) RESEAU DETERMINISTE AVEC BRUIT SUR LES LONGUEURS ($R_L = 1.667$, $\Sigma(R_L) = 0.05$, $A = 60^\circ$, NIVEAU D'ITERATION = 6)	220
FIGURE 11.5. RESEAUX DE SCHEIDEGGER : GRILLES DE POINTS ET ORIENTATIONS DU LINEAIRE.....	220
FIGURE 11.6. DETERMINATION DU DOMAINE A CONSIDERER POUR L'ESTIMATION DE LA DIMENSION FRACTALE PAR COMPTAGE DE BOITES – EXEMPLE DU RESEAU DE SCHEIDEGGER.	222
FIGURE 11.7. DECALAGE VERTICAL DES RESULTATS DE COMPTAGE DE BOITES POUR QUATRE SOUS PARTIES D'UN RESEAU SIMULE (RESEAU DE SCHEIDEGGER). LE RESEAU 4 EST LE PLUS PETIT SOUS-ENSEMBLE (ORDRE DE STRAHLER ICI 5).	223
FIGURE 11.8. DECALAGE HORIZONTAL DES RESULTATS DE COMPTAGE DE BOITES PAR EXTENSION D'UN RESEAU DE SCHEIDEGGER (EXTENSION DU DOMAINE ET DE LA TAILLE DES CELLULES)	224
FIGURE 11.9. EFFET DE LA ROTATION DU RESEAU SUR LE COMPTAGE DE BOITES (RESEAU DE SCHEIDEGGER).....	225
FIGURE 11.10. EVALUATION DES DIMENSIONS FRACTALE ESTIMEE PAR COMPTAGE DE BOITES POUR DIFFERENTS NIVEAUX HIERARCHIQUES – A GAUCHE, RESEAU 1 : BINAIRE PARFAIT $R_C=2$, $R_L = \sqrt{2}$, $A = 90^\circ$; A DROITE, RESEAU 2 : BINAIRE PARFAIT $R_C=2$, $R_L = 1.67$, $A = 60^\circ$	227
FIGURE 11.11. EVALUATION DE LA DIMENSION FRACTALE ESTIMEE PAR COMPTAGE DE BOITES POUR DIFFERENTS NIVEAUX HIERARCHIQUES – RESEAU 3 : BINAIRE BRUTE $R_C=2$, $R_L = 1.67$, $\Sigma(R_L)=0.05$, $A = 60^\circ$. 100 REALISATIONS PAR NIVEAU HIERARCHIQUE.	228
FIGURE 11.12. EVALUATION DE LA DIMENSION FRACTALE PAR COMPTAGE DE BOITE ET PAR RAPPORTS DE HORTON-STRAHLER – RESEAU 4 : ALEATOIRE DE SCHEIDEGGER. 50 REALISATIONS PAR ORDRE.....	229
FIGURE 11.13. RESULTAT D'UN COMPTAGE DE BOITES REALISE SUR RESEAU VECTORIEL.....	231
FIGURE 12.1. LES DIMENSIONS FRACTALES (D_B) POUR LES DIFFERENTS COUPLES BASSIN-RESOLUTION. LA DIMENSION EST CALCULEE SUR UN RESEAU EXTRAIT PAR LA METHODE CI (CHAPITRE 7) A PARTIR DE MNT POUR CHACUNE DES RESOLUTIONS.	237

FIGURE 12.2. RESULTAT DU COMPTAGE DE BOITE DU LAVAL POUR DIFFERENTES RESOLUTIONS.....	241
FIGURE 12.3. DIMENSION FRACTALE DE RESEAU OBTENUE POUR DES SOUS-BASSINS DU LAVAL AVEC UNE MEME RESOLUTION DE BASE (1 M).	242
FIGURE 12.4. DIMENSION PAR COMPTAGE DE BOITES SUR LE RESEAU DU LAVAL (1 M) PAR ORDRE DE STRAHLER	244
FIGURE 12.5. REPARTITION SPATIALE DES DRAINS D'ORDRE 1 DU RESEAU DU LAVAL (RESOLUTION 1 M)	244
FIGURE 12.6. QUADRILLAGE DU RESEAU DU LAVAL (1 M) AVEC DES CELLULES DE 100*100 M	246
FIGURE 12.7. CARTOGRAPHIE DE LA DIMENSION FRACTALE (D_B) PAR CELLULES COMPAREES A CELLES DE LA LONGUEUR TOTALE, DU NOMBRE DE SOURCES ET DE LA PENTE MOYENNE POUR LE RESEAU DU LAVAL (1 M)	247
FIGURE 12.8. EXEMPLES DE RESULTAT DE SIMULATION PAR DLA (SOURCE : @PAULBOURKE).	249

Annexe 7. Liste des tableaux

TABLEAU 5.1. LISTE DES TRAVAUX REALISES AU COURS DE LA THESE	97
TABLEAU 6.1. PRINCIPALES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES BASSINS GERES PAR LE CEMAGREF (ANNUAIRE DE L'ORE DRAIX, 2003). CE SONT DES VALEURS INDICATIVES OBTENUES A MOYENNE ECHELLE.....	101
TABLEAU 6.2. PRINCIPALES CARACTERISTIQUES MORPHOLOGIQUES ET FONCTIONNELLES DES RAVINES ET RIGOLES (COULMEAU, 1987). LES PROFILS SONT INDICUES POUR DES ECHELLES DE REPRESENTATION ADAPTEES A LA TAILLE DES OBJETS ET QUI NE SONT PAS LES MEMES	105
TABLEAU 6.3. CLASSIFICATION DES OBJETS MORPHOLOGIQUES SELON LEUR LARGEUR ET MNT PERMETTANT DE LES APPREHENDER (PUECH ET AL., 2009). LES TAILLES MINIMALES DE PIXEL SONT DONNEES D'UN POINT DE VUE THEORIQUE LIE AU RAPPORT TAILLE DE L'OBJET / TAILLE DU PIXEL.....	105
TABLEAU 6.4. DONNEES SPATIALES DISPONIBLES SUR LES BASSINS CHOISIS ET LEUR RESOLUTION	114
TABLEAU 6.5. BASE DE DONNEES RESEAUX EXISTANTE POUR LES BASSINS DE DRAIX	116
TABLEAU 6.6. TABLEAU RECAPITULATIF DES CRITERES RENSEIGNES SUR LE TERRAIN POUR CHAQUE OBJET OBSERVE.....	118
TABLEAU 7.1. LISTE DES RESEAUX OBTENUS PAR LA METHODE CI SUR LES BASSINS DE DRAIX ET RESEAU DE REFERENCE CARTOGRAPHIE SUR LE TERRAIN.....	136
TABLEAU 8.1. EVALUATION QUANTITATIVE PAR LA METHODE DES BUFFERS DE TROIS RESEAUX DU SECTEUR TEST DU BASSIN DU MOULIN.....	144
TABLEAU 8.2. COMPARAISON DE L'EVALUATION DES RESEAUX EXTRAITS SUR LE SECTEUR TEST DU BASSIN DU MOULIN A L'AIDE DE LA METHODE IC POUR DES MNT A DIFFERENTES RESOLUTIONS	144
TABLEAU 8.3. RESULTATS QUANTITATIFS GLOBAUX DE COMPARAISONS DE RESEAUX	153
TABLEAU 8.4. RESULTATS ETAPE PAR ETAPE POUR LES RESEAUX T ₁ ET T ₃ : LE NOMBRE DE NŒUDS MIS EN JEU A CHAQUE ETAPE (COMPRENANT LE NOMBRE INITIAL DE NŒUDS DANS LA CLASSE AJOUTE AU NOMBRE DE NŒUDS NON APPARIES A L'ETAPE PRECEDENTE), LE NOMBRE DE PAIRES REALISEES (L'EXUTOIRE N'EST PAS COMPTE) ET L'INDICATEURS DE QUALITE.	154
TABLEAU 9.1. TABLEAU RECAPITULATIF DU VOCABULAIRE DANS LES DIFFERENTES REPRESENTATIONS	166
TABLEAU 9.2. LONGUEUR ET PENTE MOYENNE DES DRAINS EN FONCTION DES ORDRES DE STRAHLER, RESEAU DU MOULIN (1 M).....	185
TABLEAU 9.3. TABLEAU DES ANGLES A MOYENS DES BI-ORDRES (1 ;1) ET (2 ;1), RESEAU DU MOULIN (1 M)	186
TABLEAU 11.1. ESTIMATIONS DES DIMENSIONS FRACTALES SUR RESEAUX SIMULES. INTERVALLES DE CONFIANCE A 95% OBTENUS PAR CONFRONTATION DES 100 OU DES 50 ITERATIONS; CETTE INDICATION VAUT POUR TOUTES LES VALEURS DE LA COLONNE.	230
TABLEAU 12.1. TABLEAU DE DIFFERENTS PARAMETRES ET DES DIMENSIONS FRACTALES PAR COMPTAGE DE BOITES ET RAPPORT DE HORTON POUR LES DIFFERENTS RESEAUX ETUDIES, A DIFFERENTES RESOLUTIONS.....	236
TABLEAU 12.2. TABLEAU RECAPITULATIF DES LIMITES INFERIEURES ET SUPERIEURES DU DOMAINE EMPIRIQUE DE FRACTALITE POUR LES DIFFERENTS BASSINS AUX DIFFERENTES RESOLUTIONS. L _{1MOY} CORRESPOND A LA LONGUEUR MOYENNE DES ARCS D'ORDRE 1. LES LIMITES INFERIEURES ET SUPERIEURES SONT CELLES OBTENUES PAR LA METHODE AUTOMATIQUE DE DETECTION DU DOMAINE. LES LIMITES SONT DONNEES EN METRES.	239

Résumé

Les *badlands*, tels ceux des bassins expérimentaux de Draix (Alpes de Haute-Provence), sont des terrains où les processus d'érosion sont actifs et l'évolution des formes relativement rapide. Pour une meilleure compréhension de leur morphologie, nous cherchons des outils pour décrire, comparer et modéliser ces secteurs de forte dissection, composés de réseaux de ravines ; et ceci pour différentes échelles spatiales. Dans ce travail, nous proposons des outils fondés sur l'utilisation de méthodes et données numériques, en particulier des MNT, qui permettent une description stable des réseaux de ravines et des comparaisons raisonnées. Pour cela, nous faisons l'hypothèse que ces réseaux peuvent être schématisés par les réseaux de talwegs associés. Nous proposons des méthodes objectives et reproductibles d'extraction de réseaux de talwegs puis d'évaluation de leur qualité. Nous nous attachons ensuite au choix, méthode d'obtention et analyse de descripteurs pertinents, en lien avec la morphologie : d'une part des descripteurs locaux, décrivant les éléments du réseau et d'autre part un descripteur global de l'organisation spatiale du réseau, la dimension fractale.

Mots-clefs : MNT, réseau, hiérarchie, résolution, fractale, ravine, badlands

Abstract

Badlands terrains, such as Draix experimental basins (French Alps), undergo active erosion and rapid evolution of landforms. These highly dissected areas are formed of gully networks. To better understand their morphology, we need tools to describe, compare and model the gully networks, for different spatial scales. In this work, we propose tools based on the use of numerical methods and data (especially DTM) which allow stable network description and comparison. We assume that the gully networks can be represented by the thalweg networks. For this purpose, we assume that these networks can be represented by networks of troughs associated. We provide objective and reproducible methods to extract thalweg networks and evaluate their quality. Then, we focus on choosing, computing and analyzing relevant descriptors, related to the morphology: local descriptors describing the network components on one hand and on the other hand, global descriptor of spatial organization of the network, the fractal dimension.

Keywords: DTM, network, hierarchy, resolution, fractal, gully, badlands