Table des matières

V Une application : La généralisation 159

The hills *and* moutains *raised from the* plains,
The plains *extended level with the* ground,
The grounds divided into sundry veins,
The veins inclos'd with rivers *running round;*
These rivers making way through natures chains
With headlong course into the sea profound;
The raging sea, beneath the vallies low,
Where lakes *and* rills *and* rivulets *do flow.*

The Compleat Angler, Izaak Walton (1676)

I Introduction

Depuis une vingtaine d'années, les Systèmes d'Information géographique (SIG) connaissent un essor considérable, plus particulièrement dans le domaine de la cartographie numérique. La transition des principes traditionnels vers un univers numérique cause certaines difficultés puisque la transposition de la perception et du savoir-faire humains n'est pas toujours élémentaire. Cependant, l'informatisation allège grandement le travail du cartographe et l'on tend de plus en plus à fournir, par son biais, un moyen de communication de l'information géographique sous la forme d'un message lisible, compréhensible et adapté. Depuis les premiers traités de cartographie, les auteurs ont abouti à une formalisation d'une partie des procédés et du savoir-faire cartographiques. La recherche, dans ce domaine, a pour volonté de structurer les gestes et les réflexions, qui ne sont encore que partiellement formalisés.

L'objectif premier de cette thèse est d'analyser et de traiter le problème de la caractérisation et de la segmentation de l'orographie dans le but de produire une carte topographique (éventuellement thématique) à différentes échelles. La carte topographique doit être évocatrice des formes du paysage et, par là même, permettre au lecteur de les reconstituer mentalement. Le sujet que nous avons traité ici, *Caractérisation du terrain en vue de son traitement numérique (application à la généralisation de l'orographie)*, présente un certain degré de complexité par le nombre de disciplines scientifiques couvertes. Nous avons centré notre travail sur notre objectif premier et, plus particulièrement, sur la généralisation (cf. figure 1).

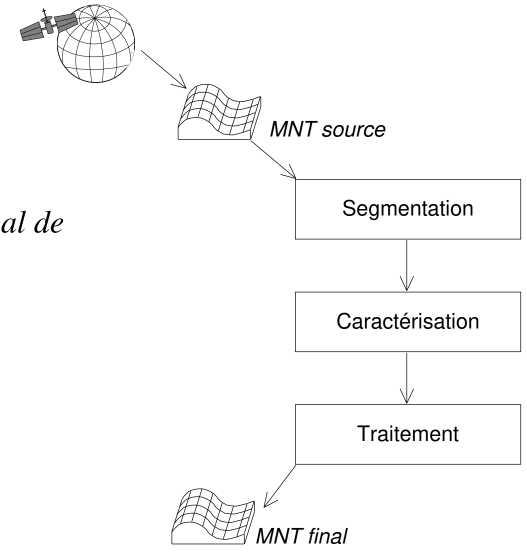


Figure 1 : Schéma simplifié du processus global de traitement numérique du terrain.

Le relief est intrinsèquement un phénomène très complexe. Il résulte de la combinaison de processus naturels variés, notamment des forces tectoniques, et des facteurs lithologiques et érosifs. Beaucoup d'autres facteurs, comme par exemple le climat, contribuent à la diversification de la surface terrestre. A l'heure actuelle, il n'existe pas de taxonomie exhaustive des formes locales (à l'échelle de la carte topographique) de la surface terrestre étant donnée leur multitude. Notre analyse des formes du relief est restreinte à la géomorphologie subaérienne française. Sur le territoire ainsi délimité, la réunion de quatre grands domaines structuraux, c'est-à-dire les chaînes de montagnes récentes, les massifs anciens, les bassins sédimentaires et les volcans, fournit déjà une grande diversité de formes à caractériser en vue de leur représentation graphique.

L'acte de communication cartographique s'appuie sur une identification des éléments constitutifs du paysage (grandes zones morphologiques et accidents du terrain, éléments structurants d'un relief) dont la carte doit transmettre une description à l'utilisateur. Pour cela, le cartographe se fixe des priorités selon l'échelle et l'objectif de la carte. Il prend en compte chaque type de relief qu'il dessine en extrayant ses caractéristiques intrinsèques, afin de choisir la représentation graphique la mieux adaptée. Une classification des formes et de leurs caractéristiques aiderait le cartographe en lui fournissant une description géomorphologique du phénomène à représenter. En effet, la représentation topographique donnée par la carte doit rendre compte de la morphologie des paysages et le cartographe s'appuie sur une analyse géomorphologique afin d'en rendre les principales caractéristiques.

Une fois caractérisées, le cartographe traduit dans un langage compréhensible ces formes du paysage. Autrement dit, il transforme le phénomène naturel en un ensemble d'objets graphiques représentatifs. Deux difficultés principales apparaissent. Il s'agit, d'une part, de traduire les ondulations du terrain dans le plan et, d'autre part, de conserver les caractéristiques d'une grande variété de reliefs. Pour cela, le cartographe dispose d'une palette de méthodes, afin de donner une image concrète des phénomènes continus existant sur le terrain. Par le dessin, le cartographe sélectionne les objets géographiques qu'il va représenter en mettant en valeur les plus importants et en éliminant ceux qu'il estime superflus.

L'évolution de la cartographie vers la numérisation de ses processus entraîne l'émergence de nouveaux besoins à analyser et à satisfaire, qui couvrent aussi bien la saisie de l'information orographique issue du monde réel, que sa modélisation numérique ou sa généralisation en vue d'une représentation cartographique. Les données altimétriques forment une couche à part et peuvent être représentées à l'aide de divers modèles qui donnent une image approchante de la surface terrestre. Dans le cadre de la cartographie traditionnelle, l'orographie constitue le fond de la carte topographique et, par conséquent, conditionne le positionnement des autres objets. De même, le traitement numérique du terrain doit aboutir à la création d'une surface sur laquelle peuvent être positionnés les autres objets topographiques (réseau routier, bâti, *etc.*). Afin que la couche altimétrique soit un préalable à la manipulation des objets des autres couches, on a besoin d'une analyse numérique du terrain qui extrait et qualifie les formes géomorphologiques qui seront représentées sur la carte.

Afin de détecter et de caractériser numériquement les formes géomorphologiques, une phase importante consiste à déterminer des zones à topographie homogène, à extraire les caractéristiques de la région et à qualifier les formes dans chaque zone. Pour cela, la connaissance apportée par les sciences de la terre doit être sélectionnée, modélisée et intégrée, formant ainsi une bibliothèque renfermant des modélisations et des méthodes à adapter aux besoins. Par exemple, les éléments structurants fournissent une information fondamentale à l'analyse numérique (et analogique) du terrain. Une modélisation possible est de les représenter sous la forme de réseaux structurés d'éléments linéaires alors, qu'en réalité, une crête ne s'apparente que rarement à une ligne. Il existe plusieurs méthodes pour extraire les éléments structurants d'une surface numérique. Par exemple, l'extraction du réseau de drainage peut utiliser une simulation de l'écoulement naturel des eaux qui, elle-même, peut être modélisée selon diverses techniques (flot unidirectionnel, flot multidirectionnel…). Le choix d'une méthode plutôt qu'une autre a lieu en fonction de sa capacité à réduire certains effets néfastes dus au bruit inhérent à la surface numérique (fausses cuvettes), à reproduire un processus naturel déterminé (écoulement des eaux), à fournir un réseau adapté pour une application particulière (hydrologie, cartographie).

Les éléments structurants du relief sont indispensables mais ne forment pas la seule information nécessaire à une analyse numérique du terrain. Ainsi, beaucoup de travaux ont étudié la possibilité d'attribuer une *signature géométrique* au terrain : peut-on déterminer un ensemble de descripteurs numériques du terrain à nature géomorphométrique définissant tout type de terrain ? Existe-t-il, pour chaque type de relief, une combinaison de ces descripteurs qui permette de l'identifier ? A l'heure actuelle, il existe une grande variété d'indicateurs géomorphométriques applicables sur des modèles numériques de terrain, qui doivent être sélectionnés minutieusement selon l'application (géologique, géomorphologique, *etc.*) et adaptés à la nature des reliefs couverts par le modèle (la connaissance géographique que l'on a de la région aide à choisir les indicateurs). Il n'y a pas de nombre magique identifiant tous les types de relief pour toutes les applications ; la signature géométrique varie d'une étude à l'autre et doit être redéfinie pour chaque nouvelle application. Cependant, il existe une large bibliothèque d'indicateurs qui offre des modélisations de divers phénomènes géomorphologiques plus ou moins généraux comme, par exemple, des approximations de la pente en un lieu, le degré de convexité ou de concavité des formes du relief, la qualification hydrologique des bassins versants… et qui nécessite un complètement au fur et à mesure de son exploitation par de nouvelles applications.

Dans un dessein cartographique, les indicateurs sont une aide précieuse à la segmentation de la surface initiale en zones topographiquement homogènes mais demandent une adaptation. Ils s'intègrent dans une démarche globale de caractérisation du relief qui nécessite l'extraction d'autres informations à nature géomorphologique telles que les réseaux d'éléments structurants ou les zones caractéristiques (bassins versants, zones de crête). La caractérisation a pour but de qualifier chaque zone topographique, en identifiant les similitudes et les exceptions, et de hiérarchiser les réseaux en vue de leur sélection cartographique. Autrement dit, l'idéal serait de fournir une méthode numérique qui attribue aux zones homogènes un type de relief, qui extrait de chaque zone les formes exceptionnelles et qui détermine un ordre hiérarchique aux éléments structurants à nature géomorphologique et contextuelle. Il s'agit d'une étape indispensable pour guider un processus tel que la généralisation.

La généralisation est le procédé qui permet de passer d'une représentation des données vers une nouvelle représentation à une échelle plus petite. Plus précisément, *la généralisation vise à modifier les données en vue d'une représentation plus synthétique, tout en conservant leurs caractéristiques les plus significatives* [Monier *et al.*, 96]. Lorsque, à un niveau d'abstraction donné, la lisibilité est rendue impossible par la trop grande densité des données à représenter sur une surface déterminée, une nouvelle modélisation doit transformer la géométrie des formes de façon à les adapter à l'espace de représentation, tout en respectant certains critères de qualité [Müller *et al.*, 95]. Entre autres, le contrôle des résultats porte sur le maintien des structures les plus importantes, des formes typiques et des accidents du terrain.

Dans le cas de l'orographie, les caractéristiques nécessaires à la généralisation sont à nature géomorphologique ; elles correspondent aux réseaux de structures telles que les crêtes et les thalwegs, aux formes particulières du relief qui peuvent être soit des formes originales, soit des accidents du terrain, et aux types de relief eux-mêmes. La recherche de ces caractéristiques est fondamentale pour l'automatisation des processus de généralisation. Sans la connaissance géomorphologique, chaque opération de généralisation cartographique devient incertaine.

Par là même, le traitement numérique de l'orographie s'inscrit dans une stratégie de généralisation élaborée au laboratoire COGIT de l'IGN et décrite dans [Plazanet, 96:22] pour des objets géographiques linéaires (réseau routier et hydrographie). La généralisation des objets linéaires et la généralisation des objets orographiques sont deux processus semblables dans le sens où il est indispensable de caractériser (*i.e.* de déterminer les caractéristiques intrinsèques) les objets géographiques avant d'appliquer un procédé de généralisation adéquat.

Les transformations spatiales et sémantiques induites par le processus de généralisation opèrent par simulation des pratiques manuelles ou par développement de techniques nouvelles. Peu d'outils de généralisation adaptés à l'orographie ont été développés. D'une part, de tels opérateurs doivent tenir compte des deux aspects planimétriques et altimétriques. D'autre part, ils doivent être aptes à modifier les caractéristiques géométriques d'un relief identifié, *i.e.* ils peuvent agir sur les structures ou les formes. Cependant, le caractère identifié et analysé de chaque type de relief ne doit pas être perdu après la généralisation. Dans ce but, une première démarche doit être la définition d'une stratégie de généralisation adaptative qui identifie les connaissances structurales nécessaires, définisse les contraintes qui déclencheront ou valideront les opérations appliquées et adapte les processus à la topographie identifiée par la caractérisation.

Notre document s'articule autour des quatre thèmes fondamentaux annoncés précédemment. Chaque partie se compose d'une analyse des travaux principaux trouvés dans la littérature et d'une description de nos propositions (implémentées ou théoriques). Nous nous sommes concentrée sur le relief de la France métropolitaine en vue de son analyse préalable au 1:50 000. La transformation de sa représentation initiale au 1:50 000 vise des échelles comprises entre le 1:100 000 et le 1:250 000.

- Le relief et sa représentation

La première partie traite des processus qui engendrent le relief, de l'analyse des types *physiographiques* français et des représentations cartographiques possibles. Le passage au numérique est ensuite étudié par une présentation des modèles de représentation numérique du terrain. Tout le processus de construction d'une telle surface est analysé, à savoir les sources de données, les procédés d'obtention des données brutes, la qualité de ces données, l'interpolation de ces données en un modèle numérique de terrain (MNT) et la qualité interne des MNT. Le MNT que nous avons choisi est une grille régulière qui sert de pivot à la constitution d'autres représentations de l'information extraite.

- La segmentation

La segmentation du terrain a pour objectif la classification des pixels du MNT source dont les groupements déterminent des zones à topographie homogène. La méthode utilisée s'appuie sur une information extraite du MNT composée, d'une part, des réseaux de crêtes et thalwegs imbriqués et, d'autre part, des modèles surfaciques de pente et de dureté. Les différentes étapes de la démarche sont détaillées : une première segmentation en micro-zones à partir de la construction d'un diagramme de Voronoï autour de points géomorphologiquement significatifs puis une fusion sur des critères géomorphométriques en méso-zones homogènes, et les résultats sont analysés.

- La caractérisation

La caractérisation conduit à analyser deux types d'information disponibles : des champs continus et des réseaux d'éléments structurants. Dans un dessein cartographique, la caractérisation des éléments structurants a pour principal objectif sa hiérarchisation, tandis que la caractérisation des champs continus a pour principal objectif la détection des accidents du terrain. Dans le cadre de cette thèse, elle se limite à des propositions théoriques et correspond à une étape d'acquisition et de formalisation de la connaissance pour la généralisation de l'orographie.

- Une application : la généralisation

Une stratégie dynamique de généralisation de l'orographie, dont les divers points sont développés, est proposée. Entre autres, des contraintes sont formalisées et adaptées à nos modélisations, des opérateurs (lissage de MNT et transformations des éléments structurants) et des méthodes d'évaluation sont proposés.

Les contributions principales de notre travail de thèse sont les suivantes :

· une typologie des reliefs suffisante à ce stade des recherches pour des régions topographiques françaises ;

- à partir de l'analyse des méthodes existantes dans les domaines du traitement d'image et de la géomorphométrie, l'implémentation d'une méthode de segmentation fondée sur la reconnaissance de sites caractéristiques extraits des éléments structurants du relief et sur la structuration et l'analyse de l'espace autour de ces sites ;
- à partir d'une étude des corrélations et d'une expérimentation approfondie, l'implémentation d'une méthode adaptative de classification fondée sur la reconnaissance d'une différence relative de texture entre les régions et sur la création d'indicateurs régionaux ;
- à partir de l'état de l'art, des propositions théoriques pour la caractérisation des régions obtenues par segmentation en vue de l'application d'une méthode adaptée de généralisation cartographique ;
- l'amélioration de la stratégie de généralisation du relief proposée par Robert Weibel (1989), notamment par la définition d'un ensemble de contraintes adapté.

Le puy de Sancy (volcans d'Auvergne).

La corniche de L'Eyrieux (Vivarais).

II Le relief et sa représentation

La création d'une carte topographique passe, tout d'abord, par la transposition de la topographie, figuration graphique des formes du paysage, sur la carte pour reformer dans le plan la continuité de l'espace dans lequel l'homme évolue. Le dessin de l'orographie précède le dessin des autres couches car il influence nettement le positionnement des autres objets géographiques : l'information hydrographique puis les infrastructures édifiées par l'homme, c'est-à-dire le réseau routier, le réseau ferroviaire et le bâti, sont disposées sur cette reconstruction planaire du terrain naturel. En dernier lieu, les objets qui qualifient les éléments de la carte précédemment dessinés ou qui ajoutent un repérage géométrique mais sans réalité physique, c'est-à-dire la toponymie et les limites administratives, sont respectivement calligraphiés et tracés.

Le cartographe ne signe pas la carte qu'il dessine, dans le sens où la carte n'est pas une œuvre personnelle mais collective[1]. Dans le cas du relief, le cartographe est souvent spécialisé dans ce thème particulier. La carte est, en tant qu'œuvre collective, un moyen de communication relativement objectif transmettant un message lisible, compréhensible et esthétique à son destinataire. Lorsqu'il s'agit de représenter l'orographie, le dessin doit être évocateur des formes du paysage et ainsi permettre au lecteur de les reconstituer mentalement. La représentation cartographique d'un lieu implique alors des choix. [Caron, 77:3] l'exprime en ces termes : *le contenu de la carte n'est pas donné au cartographe, c'est à lui de décider ce qu'il représentera*. En effet, le relief demeure intrinsèquement un phénomène très complexe dont l'analyse des processus procure une grande quantité d'informations (information isolée : un versant par rapport au versant opposé dans la val-

---

[1] Le dernier thème signé jusque dans les années 70 est la planche d'estompage qui demande une interprétation maximale de la réalité.

lée, information croisée : cohérence entre la route et la pente) que le cartographe ne peut reproduire dans son ensemble sur la carte ; il se fixe donc des priorités selon l'échelle et le but de la carte. Cette idée, selon laquelle il est impossible de saisir le phénomène dans sa totalité, donne une part de subjectivité à la représentation cartographique car elle implique une décision humaine. Cette représentation doit tout à la fois préserver une certaine précision mais aussi permettre d'appréhender le modelé du terrain.

Nous nous intéressons, dans cette partie II, aux représentations cartographiques et numériques envisageables lorsque l'on traite de relief. Dans ce contexte, il convient de comprendre les caractéristiques inhérentes au phénomène naturel que l'on cherche à représenter afin de choisir ensuite un modèle de représentation et des indices descriptifs satisfaisants et cohérents (objet des parties III et IV de cette thèse). Entre autres, les disciplines des sciences de la terre permettent d'approcher le terrain et d'en comprendre les traits principaux qui sont reproduits sur la carte (chapitre 1). Puis, nous évoquons des procédés de représentation cartographique du relief (chapitre 2) et des méthodes de modélisation numérique (chapitre 3).

Etant donné l'essor des nouvelles technologies dans le domaine des Systèmes d'Information géographique (SIG), la transition d'une représentation cartographique à une représentation numérique pourrait à première vue paraître sans grande difficulté. Pourtant, le processus est complexe et différentes étapes s'y distinguent avec leurs problèmes intrinsèques (chapitre 4). L'obtention des données numériques d'une part et la modélisation de ces données d'autre part peuvent s'effectuer par un grand nombre de techniques dont le choix dépend en partie du résultat souhaité. Chacune de ces techniques présente à la fois des avantages et des inconvénients.

1 Eléments de géomorphologie

Le relief est né des bouleversements de l'écorce terrestre et se transforme au cours des millénaires, donnant son modelé actuel, ensemble des formes du paysage. C'est la structure interne des terrains qui donne ses formes à la surface terrestre, soit directement par édification active de relief, soit indirectement par le jeu de l'érosion sur des roches de duretés diverses. Un grand nombre de disciplines scientifiques se sont développées traitant de lithologie ou de géographie physique : l'orogénie décrit les mouvements de l'écorce terrestre, en particulier ceux qui ont donné naissance aux montagnes ; l'orogenèse, le processus de formation des montagnes ; et l'orographie, leur agencement.

Le modelé du terrain apparaît à la surface de la terre, mais il est le miroir de la structure même du relief. Ces disciplines apportent une connaissance indispensable à la compréhension et donc à l'étude du terrain. Elles décrivent l'origine de son modelé et aident ainsi à l'élaboration d'une description purement morphologique, base de la qualification (numérique ou non) d'un terrain. Justement, la structure élémentaire qui intéresse un cartographe aux moyennes et grandes échelles est très fine en terme de niveau d'analyse. C'est pourquoi, l'analyse qui suit part d'une étude d'éléments géographiques à étendue très large (vision mondiale : les grands domaines structuraux) de façon à poser le contexte pour ensuite se concentrer sur la notion d'objet structurant du terrain (vision élémentaire, c'est-à-dire à l'échelle de la montagne).

1. 1. La formation du relief

Les chaînes de montagnes, avec leur relief et leur structure complexe, sont nées il y a des millions d'années et ont évolué dans le temps façonnées par des forces tectoniques, des facteurs lithologiques et érosifs [Derruau, 62]. La tectonique étudie ces déformations qui ont affecté des terrains géologiques postérieurement à leur formation, en excluant les déformations mineures des sédiments. Beaucoup de théories et de représentations existent quant à la formation du relief sur la surface de l'écorce terrestre. Ainsi, des hypothèses ont été approuvées puis réfutées selon la tendance de l'époque (des commentaires détaillés se trouvent dans [Derruau, 90]). Par ordre chronologique, les théories successives les plus importantes qui ont été critiquées sont :

- parmi les hypothèses émises sur le mouvement des continents, la dérive des continents (Wegener) repose sur la dislocation d'une seule masse continentale, la tectonique de serrage (Argand) sur le rapprochement de masses continentales en dérive avec serrage horizontal, et la théorie des nappes de charriage sur le chevauchement de blocs en dérive ;
- la convection (Griggs) agit sur les courants magmatiques pour former une alternance, sous la croûte solide, de zones de convergence superficielle avec succion profonde et de zones de divergence amincissant l'écorce terrestre ;
- la doctrine fixiste de Baulig se résume par la stabilité de presque tous les continents et de la stabilité de nombreuses régions.

La théorie en vigueur depuis une vingtaine d'années est la *tectonique des plaques*, où l'hypothèse fondamentale est le morcellement de l'écorce terrestre en plaques rigides ou mobiles. D'une part, la divergence et l'amincissement auraient lieu par élargissement des océans, et d'autre part, la convergence aurait lieu par écrasement des plaques de front ou par chevauchement selon leur densité.

Bien qu'ils se rapprochent d'une théorie de plus en plus fiable, les spécialistes continuent à postuler sur les principes de formation de l'écorce terrestre qui concernent en grande partie les rapports entre le rythme tectonique et celui de l'érosion. Ainsi, l'érosion peut attaquer le relief si des mouvements tectoniques et eustatiques créent des dénivellations étendues. Les facteurs érosifs et lithologiques sont mieux connus que les forces tectoniques, quoiqu'il reste encore des points à clarifier. En effet, des théories existent, qui expliquent les déformations du terrain géologique par les deux facteurs d'érosion et de sédimentation, couvrant ainsi tous les reliefs (en saillies ou en creux).

1. 2. Le modelé actuel

La structure de l'écorce terrestre, à entendre par types de roches et agencement tectonique, joue un rôle primordial dans la création des paysages. En effet, le terrain doit ses formes à l'action de l'érosion et à l'arrangement des roches du sous-sol. La lithologie interprète la genèse des roches, étudie leur description et les classe selon les formations géologiques. Il découle des études du domaine que toutes les régions du monde ont été affectées par différents cycles orogéniques successifs ; ces cycles bien connus sont résumés dans le tableau stratigraphique suivant emprunté à [Foucault et Raoult, 84] :

- le commencement de l'ère précambrienne est daté d'il y a trois mille six cent millions d'années ;
- le cycle calédonien s'étend sur la première partie du paléozoïque (primaire) ;
- le cycle hercynien correspond à la deuxième partie du paléozoïque ;
- le cycle alpin englobe le mésozoïque (secondaire) et le cénozoïque (tertiaire et quaternaire), il a commencé il y a deux cent trente millions d'années.

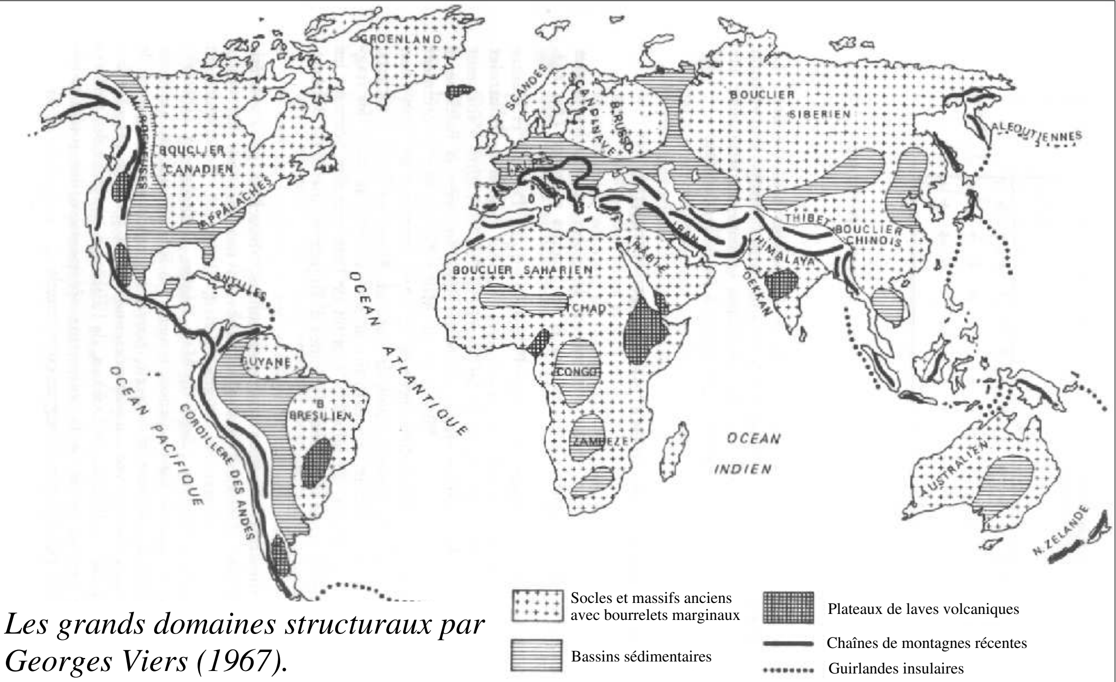


Figure 2 : Les grands domaines structuraux par Georges Viers (1967).

Certaines formes du relief se composent de matériaux très anciens (pour les massifs anciens du primaire) mais les mouvements d'exhaussement qui leur ont donné leur hauteur actuelle sont plus récents. Cette description chronologique des grands cycles doit donc être pondérée par la nature du socle. Cet élément de complexité supplémentaire montre pourquoi le relief reste si peu connu quant à son histoire, malgré toutes les découvertes faites dans le domaine des sciences de la terre.

Pendant ces longues phases orogéniques, se sont construits de vastes domaines structuraux. Ce sont de grands secteurs à l'échelle planétaire, caractérisés par une série stratigraphique particulière [Derruau, 90]. Les disparités entre reliefs issus de domaines distincts apparaissent dans le message cartographique, comme le montrent les quelques exemples illustrés dans la figure 2 pour quatre grands types de situations géomorphologiques particulières :

- dans les chaînes jeunes (de l'ère tertiaire et ayant subi la glaciation du quaternaire), les roches sédimentaires stratifiées prédominent ainsi que les structures plissées d'âge récent : les crêtes principales rocailleuses sont saillantes, longues et sinueuses, les crêtes secondaires sont séparées par de nombreux thalwegs droits, courts et très encaissés (cf. figure 2.a).
- les massifs anciens (de l'ère primaire puis rajeunis au tertiaire) exhibent les restes de vieilles chaînes de plissement où l'érosion a atteint la racine des plis : le relief est très régulier, les

crêtes et thalwegs sont moins denses et moins perturbés que dans un relief jeune, les variations sont plus douces et progressives, les altitudes sont moins élevées (cf. figure 2.b).

- les bassins sédimentaires (de l'ère précambrienne) ont été des domaines de mers épicontinentales, en bordure de continent, où la sédimentation a été contrôlée par la situation des terres environnantes : le relief est plat, continu, interrompu par des échancrures de rivières (cf. figure 2.c).
- les volcans sont le résultat d'une activité tellurique par accumulation de laves, de projections, de cendres soit autour d'une cheminée, soit de part et d'autre de fissures : ici, les restes de l'activité passée apparaissent sous la forme de monts très arrondis qui se détachent sur un terrain aplani (cf. figure 2.d).

Figure 3 : Extraits de carte au 1:100 000 (1 cm pour 1 km).

a : Les Alpes.

1 km

c : Le Bassin parisien.

b : Les Vosges.

d : Les volcans d'Auvergne.

Cette distinction entre les grands domaines structuraux qui couvrent la terre doit être affinée pour une étude plus locale des formes du paysage. En effet, la description rapide des régions cartographiées montre que la qualification d'un type de relief passe par l'analyse de ses caractéristiques locales (forme des crêtes, entrelacement des crêtes et thalwegs, absence de crête…). Cependant, une telle description ne peut pas être universelle : les formes de pics aigus étant dues essentiellement à l'action prédominante du gel, on peut trouver des crêtes saillantes dans un massif ancien (les monts Appalaches). De même, l'altitude n'est pas un critère universel d'opposition entre massifs anciens et récents. [Derruau, 62] prend l'exemple du Tian-Chan, fragment de socle soulevé, dont l'altitude dépasse 7 000m et est donc bien plus élevé que les massifs récents de nos régions.

1. 3. Les types de relief

Les paysages présentent une multitude de formes difficilement qualifiables sans les expliquer à l'aide de plusieurs processus naturels (nature des roches et leur disposition, plissements, volcanisme…). Il convient, avant de débuter une analyse des types de relief, d'en restreindre le cadre à certains éléments de façon à les cerner et les décrire correctement car, de cette étude, découleront les définitions de descripteurs numériques du terrain (cf. parties III et IV). L'objectif est de refléter dans la représentation graphique du relief, la diversité de ses types. Leurs originalités s'expliquent à l'aide de différentes disciplines des sciences de la terre dont les principales sont la géomorphologie (l'étude des formes du relief terrestre) et la géologie (l'étude des roches et de leur genèse, composition, âge, disposition) [Viers, 67][Gloriod, 69][Foucault et Raoult, 84][Chenuet, 93].

1. 3.1. Deux restrictions : relief subaérien et France métropolitaine

Une première restriction, dans notre étude, concerne les catégories géomorphologiques qui vont être prises en compte. Par définition, la notion de relief couvre tous les contours de la surface terrestre, englobant donc toutes les terres immergées, littorales ou émergées, par analogie avec la division de l'action de la sédimentation en marine, lagunaire ou continentale. Les fonds sous-marins présentent de grandes variations de profondeur et de paysage. Notre travail, quant à lui, est limité au domaine couvert par l'orographie.

La seconde restriction, de loin la plus importante, touche la situation géographique du relief étudié. En effet, à l'échelle planétaire, les types locaux de relief sont trop nombreux pour obéir à un ensemble de règles qualificatives connues. En plus des disciplines courantes évoquées auparavant, les études météorologiques expliquent l'influence d'un autre facteur sur le modelé du terrain : le système bioclimatique. Certains modelés du relief ne se trouvent que sous certaines conditions atmosphériques et météorologiques, un exemple très marquant étant celui de la banquise, constituée d'inlandsis et de langues de glace allant jusqu'à la mer et se fragmentant en icebergs. D'une manière générale, le relief d'une chaîne érigée dans une région tropicale, même s'il est similaire au point de vue structural, se différencie de celui d'une chaîne localisée en région froide, aride ou tempérée. Le climat provoque l'altération des roches et l'implantation de la végétation freine ou accélère les processus érosifs. Par exemple, dans les Causses, il demeure des restes de formes karstiques tropicales mais dont le modelé porte l'empreinte des actions périglaciaires du quaternaire. Sur l'île de la Grande Terre en Guadeloupe, la conjonction du climat tropical marqué par de violentes pluies d'été, du couvert végétal libérant un fort taux de gaz carbonique, des calcaires tendres et d'une topologie initiale assez plane a entraîné une dissolution plus latérale que verticale [Ministère *et al.*, 85] (cf. figure 3).

Figure 4 : Extraits de cartes au 1:100 000 : deux régions karstiques.

a : Les grands Causses, France métropolitaine.

b : La grande Terre, Guadeloupe.

Nos travaux sont restreints à une petite partie du globe : la France métropolitaine. Cette zone plutôt qu'une autre car l'Institut géographique national a pour premier objectif de fournir une couverture complète en cartes et en données numériques du territoire français. De plus, ce territoire présente déjà une grande diversité des types de relief sur une surface relativement petite. En particulier, les quatre grands domaines structuraux présentés plus haut y trouvent des représentants (voir les extraits de carte au 1:100 000 portés dans la figure 2). La présence de ces quatre grands domaines structuraux justifie la démarche proposée dans le cadre de notre travail.

1. 3.2. Les types "physiographiques" du relief français

En se fondant sur la classification par grands domaines structuraux exprimée au paragraphe 1.2, les principales composantes françaises pour lesquelles le caractère essentiel doit être préservé sur une carte à moyenne ou grande échelle[1] correspondent à des unités "physiographiques". Dans une classification du terrain construite sur des principes physiographiques, le territoire français est divisé en régions selon la structure et les caractéristiques naturelles de son modelé. Chaque région est la plus homogène possible par rapport à un caractère dominant et peut être divisée à son tour suivant un critère plus fin. Le découpage régional que nous proposons est spécifique. Cependant, il fournit des unités géographiques dans lesquelles les éléments structurants du terrain pourront ensuite être détaillés (premiers éléments d'une classification du terrain plus générale, cf. parties III et IV).

---

[1] Pour les petites échelles (au millionième), l'altitude et la répartition des principaux types dans l'espace géographique sont plus importantes que les formes elles-mêmes.

La tectonique s'exprime à travers l'âge des types de relief présentés, les formations volcaniques mises à part. Du modelé le plus récent au plus vieux, les principaux types de relief sont alors les chaînes jeunes, les massifs anciens et les bassins sédimentaires. La lithologie explique directement les formes du relief lorsque l'agencement des roches du sous-sol joue un rôle majeur, ce qui est notamment le cas pour les zones tabulaires (à couches presque horizontales), monoclinales (à couches inclinées dans le même sens), volcaniques ou de plissement. La géomorphologie, quant à elle, explique l'origine des reliefs dessinés par la seule érosion, autrement dit les modelés désertiques, glaciaires, périglaciaires et karstiques.

1. 3.2.1. Chaînes jeunes

En débutant notre exploration des paysages français par le massif de montagnes récentes le plus au nord de la France, nous trouvons le Jura, chaîne ayant connu une phase orogénique cassante, due à la consolidation en profondeur de sédiments préalablement plissés, où les plis sont orientés du sud-ouest vers le nord-est et coupés de longues failles nord-sud. Ce massif est un représentant typique du relief dit jurassien. Il se caractérise par une morphologie conforme aux déformations des couches structurales où les synclinaux correspondent à des dépressions et les anticlinaux à des saillies. L'érosion y a dégagé les couches dures sous forme de crêtes et a creusé les couches tendres en formant des combes.

Séparées du Jura par le Rhône, les Alpes montrent une zone axiale cristalline, dont fait partie le massif du mont Blanc. A l'ouest et au sud, des couches se sont détachées des massifs centraux pour former les Préalpes. Edifiées au tertiaire, les Alpes ont subi une intense érosion glaciaire quaternaire qui a modelé sommets et vallées. Les glaciers occupent actuellement une faible partie, les anciennes dépressions étant remplies par des lacs.

A l'extrême sud de la France, les Pyrénées se sont formées par plissement au début du tertiaire, dans un matériau souple sans formation de relief prononcé, puis par soulèvement en bloc des masses plissées à la fin de la période. La glaciation quaternaire a sculpté des cirques et creusé des lacs. Leur partie occidentale est assez peu élevée, coupée de cols et s'abaisse graduellement vers la côte basque. Le centre est hérissé de pics élevés et troué de brèches. La zone orientale est échancrée de vallées.

1. 3.2.2. Massifs anciens

La hauteur et les modelés des massifs anciens dépendent de leur éloignement par rapport au massif alpin et, pour certains, d'une zone d'effondrement. Ainsi, dans les Ardennes, se retrouve le même relief que celui du Massif central mais avec des altitudes plus basses.

En partant du nord de la France, l'Ardenne est un massif de grès et de schistes primaires, pénéplané, et entaillé par des vallées. La plateau lorrain lui sert de lien avec les Vosges. Les Vosges sont des fragments de plissements datant du primaire, rajeunis au tertiaire par le rehaussement consécutif au plissement alpin. Les glaciers du quaternaire ont couvert une grande partie des Vosges du sud, creusant la roche de niches et de cirques que les eaux ont remplis ; des moraines se sont formées dans certaines vallées. La partie nord est constituée de cols et sommets moins élevés. Dans les montagnes, les noyaux granitiques aux formes arrondies ressemblent à des ballons, ce qui crée un paysage typique. Les deux versants du massif des Vosges sont dissymétriques : l'un tombe brutalement sur la plaine d'Alsace, dominée par un escarpement de failles, l'autre s'incline doucement vers le plateau lorrain.

Le Massif central est un massif ancien ayant subi des mouvements verticaux prononcés au tertiaire. Les formes y sont aplanies et se répètent sans accidents notables du terrain. Les Cévennes sont constituées par la retombée du Massif central sur la plaine rhodanienne, en une série de blocs cristallins orientés d'ouest en est.

Le plus à l'ouest, sur la péninsule bretonne, s'étend le Massif armoricain, pénéplaine rajeunie à l'ère tertiaire, de faible altitude.

1. 3.2.3. Bassins sédimentaires

Les bassins sédimentaires proviennent de très lentes déformations épirogéniques[1], ayant séparé des morceaux de socle en massifs anciens, puis du recouvrement des régions déprimées par une couverture sédimentaire ployée en cuvette.

La région la plus au nord de la France est occupée par la plaine des Flandres légèrement inclinée vers la Belgique et le rivage. Une partie intérieure aligne des monts sablonneux, l'autre partie, maritime, est sillonnée de canaux et protégée par un cordon de dunes.

Le Bassin parisien est limité par des massifs anciens, formé d'une succession de couches sédimentaires à peu près concentriques, inclinées vers le centre de la cuvette et se terminant à l'est par des cuestas.

1. 3.2.4. Volcans

La traînée volcanique part de la chaîne des Puys pour finir par le volcan d'Agde ; elle est composée d'édifices magmatiques disposés en alignements qui correspondent à de longues fractures ouvertes lors des éruptions (types péléens et stromboliens).

Le relief primitif, présenté par la succession des volcans d'Auvergne, se constitue de l'accumulation de laves et de produits d'éjection divers relativement récents (de 35 000 à moins de 4 000 ans). Les coulées montrent des surfaces rugueuses et scoriacées[2] semées de blocs (les cheires). Le sud-est du Massif central, quant à lui, est un relief dérivé dont l'érosion s'est attaquée aux cônes volcaniques laissant en relief le contenu de leur cheminée. Les mesas sont constituées de basaltes des plateaux épanchés avant le creusement des vallées, souvent jalonnées par des coulées plus récentes de basaltes provenant des vallées.

---

[1] L'épirogenèse traite des lents mouvements de montée (régression) ou de descente (transgression) des continents.

[2] Une scorie est un fragment de lave à surface irrégulièrement poreuse, hérissée d'arêtes et de pointes.

1. 4. Les formes du relief

Le relief est complexe et très divers et les géomorphologues cherchent, actuellement encore, à aboutir à une typologie des formes du relief fondée sur des caractères communs puisqu'il n'existe pas encore de classification exhaustive et communément admise. Notre propos ici n'est pas d'élaborer une telle classification mais, de façon plus limitée, une classification qui rende compte, pour la France, de la diversité des formes du paysage due à certains facteurs naturels et que l'on souhaite retrouver sur une carte topographique. Une typologie à but géomorphologique devrait prendre en considération non seulement le rôle de la structure dans l'agencement et l'ossature du relief, mais aussi le rôle des phénomènes bioclimatiques, qui fournissent des types morphoclimatiques particuliers. Pour compléter cette typologie, les formes héritées devraient, elles aussi, être intégrées, autrement dit l'ensemble des formes du passé divisé en :

- éléments de vieilles surfaces fossilisées puis exhumées ;
- éléments de surfaces élaborées au cours de répits de l'orogenèse et de la tectogenèse ;
- éléments de surfaces ayant subi les fluctuations climatiques du quaternaire.

Une classification aussi poussée est utile en cartographie si l'accent est placé sur la façon de représenter les caractéristiques de chaque forme géomorphologique le plus fidèlement possible (le besoin d'une telle typologie est perçu dans la partie IV). En fait, l'évolution d'une telle forme au cours du temps et sa structure interne concourent à définir la forme graphique car, alors, le dessinateur connaît les caractéristiques (qualification des crêtes, thalwegs…) qu'il doit préserver sur la carte. Dans un but de taxonomie cartographique, on s'attachera à lister des éléments (montagne, vallée…) pour tous les types de relief identifiés et l'histoire de ces types aidera à en déterminer les caractéristiques essentielles. En plus des similitudes régionales que présentent les crêtes et thalwegs, les formes particulières concourent également à caractériser ces types. Parmi toutes les formes géomorphologiques, décrivons-en qualitativement certaines de façon à les repérer sur les extraits de carte de la figure 2 (a et d) :

- Type de relief : *chaîne jeune*

aiguille : une pointe rocheuse sur une crête alpine
cirque: une dépression à parois abruptes, fermée par une barre rocheuse
auge : vallée modelée en forme de U
glacier : langue de glace éternelle

- Type de relief : *volcan*

dôme : colline peu élevée et arrondie qui se détache sur une zone plate

Il est à noter que, par exemple, la forme *dôme* peut être trouvée ailleurs que dans le massif des monts Dôme. C'est la toponymie qui qualifie la forme de dôme sur la carte. En effet, rien dans la description de la forme ne permet de différencier le puy de Dôme, le puy de Côme et le Ménez Bré (à l'ouest de Guingamp, Armorique), si ce n'est leur histoire géologique. Le puy de Dôme est un volcan de type péléen, le puy de Côme est un cône strombolien de scories ayant conservé son cratère tandis que le Ménez Bré est un morceau de socle exhaussé. Quel est alors le facteur le plus important : que la forme décrite par l'expression *colline peu élevée et arrondie qui se détache sur une zone plate* soit une forme géomorphologique spécifique *dôme* ou bien qu'elle se distingue des autres formes par son origine ? De même, une coupure étroite et encaissée creusée perpendiculairement à une chaîne de montagne s'appelle cluse dans le Jura et clue dans les Préalpes. L'escarpement peut être un escarpement de faille ou un escarpement de ligne de faille selon qu'il est dû directement à une dénivellation tectonique ou à une érosion différentielle. Sur la carte, ces subtilités n'apparaîtront pas par l'utilisation d'un procédé de représentation différent mais aideront le cartographe dans le choix des éléments caractéristiques à représenter.

En fait, une typologie des formes du relief ayant un but topographique est axée vers une description visuelle des formes que l'on peut trouver sur le terrain et est caractérisée par leur appartenance à un type. La connaissance géomorphologique et géologique permet ensuite de nommer ces formes et de les qualifier plus finement.

Deux notions de formes sont donc possibles : formes géométriques et formes géomorphologiques. Ce dernier type de formes contient toutes les formes dues à l'érosion et à la sédimentation. Le premier type envisage la forme comme une partie de la surface séparable du voisinage suivant des critères géométriques (crêtes, thalwegs, bassins versants). Et ce sont les formes géométriques qui changent à travers les échelles cartographiques[1] [Weibel, 92] (cf. partie V).

2 Représentation cartographique

La manière de représenter le relief sur la carte vise donc à établir une similitude entre les formes géomorphologiques de la surface terrestre et le dessin de celles-ci. Le promeneur potentiel doit pouvoir éventuellement imaginer, en regardant la carte, quelle forme de relief il rencontrera sur son chemin. Autrement dit, un élément montagne peut prendre plusieurs formes et sa spécificité doit apparaître sur la représentation. L'étude du relief est un domaine très complexe et tout utilisateur potentiel d'une carte n'est pas censé posséder une connaissance très développée sur le sujet. Pour intégrer les formes du paysage sur la carte d'une manière homogène, une représentation graphique adaptée doit être choisie, selon les objectifs fixés (thème et échelle).

La richesse en types de paysage peut figurer sur une carte topographique si le dessinateur utilise une méthode adaptée pour que chacun de ces types ressorte, tout en respectant une certaine harmonie entre les feuilles. Ainsi, le cartographe actuel suggère les particularités des flancs de montagne à l'aide de représentations figuratives, telles que l'estompage ou les figurés, et il symbolise l'ensemble du relief à l'aide de modèles de représentation, tels que les courbes de niveau ou les teintes hypsométriques. Les formes graphiques sont difficilement importables directement dans l'univers du numérique. Par contre, nous verrons qu'un modèle de représentation par courbes de niveau est un pont entre cartographie traditionnelle et numérique.

---

[1] La généralisation de l'orographie nécessite la recherche de formes géométriques adaptées à l'échelle souhaitée, qui représentent les formes géomorphologiques ("constantes" de la réalité), et adaptables au thème que la généralisation est appelée à supporter avec cohérence.

2. 1. Un phénomène continu

La meilleure représentation du relief dans le plan pourrait être, intuitivement, le couple stéréoscopique de photographies aériennes : objectif et réaliste, il fournit un instantané de la surface terrestre. Par le dessin d'un lieu, est recherchée une intellectualisation qui soit plus simple, plus explicite, parfois plus esthétique qu'un cliché. Ainsi, la représentation graphique d'un paysage devient une schématisation des formes de ce paysage observées sur le terrain, autrement dit elle saisit l'essence même du paysage. Le rôle du cartographe revient à traduire dans un langage lisible un phénomène naturel, il transforme les ondulations du terrain en un ensemble d'objets graphiques (abstraction).

Le problème majeur qui ressort lorsque l'on cherche à représenter graphiquement le paysage vient de sa propriété de continuité dans un espace à trois dimensions. D'une part, il paraît en effet difficile de traduire les ondulations du terrain dans le plan et, d'autre part, l'existence sur le terrain d'une grande variété de reliefs induit naturellement une grande diversité d'informations à recueillir puis à reporter sur la carte. Pour cela, le cartographe dispose d'une palette de méthodes afin de donner une image concrète des phénomènes continus existant sur le terrain. Une contradiction apparaît entre la continuité du phénomène à représenter et la discrétisation du procédé de représentation (qu'il soit traditionnel ou numérique).

Enfin, par le dessin, le cartographe sélectionne les objets (les formes) qu'il va représenter en mettant en valeur les plus importants et en éliminant ceux qu'il estime secondaires, mais sans que cette abstraction entraîne forcément une dégradation de la précision spatiale : *Sketching means leaving things out !* [Imhof, 82:45].

Par analogie, le même problème de représentation d'un paysage se pose au peintre qui travaille dans le plan de la toile avec le même outil, la lumière (le blanc et le noir). Quelle peinture est-elle la plus pertinente ? la peinture classique qui lèche tous les détails ou bien l'impressionnisme ? Quel doit être le degré de fidélité lorsqu'on regarde la toile à cinq mètres ? Plus on descend dans l'échelle, plus il faut donner une impression et plus on s'éloigne de la rigueur numérique.

2. 2. Des représentations

La cartographie est un langage, c'est-à-dire un moyen d'exprimer une idée et une réalité physique. Pour cela, elle utilise un ensemble de signes graphiques qui, disposés d'une manière cohérente, suggèrent les objets géographiques sur le papier. Le jeu individuel ou l'association de ces signes expriment des idées au-delà d'une seule description géométrique ; ils suscitent une image des relations entre les éléments naturels et une représentation intellectuelle de leur forme réelle. On trouvera une explication technique et détaillée de tous les procédés qui suivent dans [Cuenin, 72] et [Imhof, 82].

2. 2.1. Des représentations anciennes

La plus vieille représentation paysagère du monde, une ébauche de la position des mines d'or en Nubie, est aussi la première carte représentant des montagnes [Eckert, 21]. Elle est issue de la période du grand pharaon, symbole de l'histoire égyptienne, Ramsès II (1300-1230 avant J.C.). Les montagnes y sont esquissées de profil en coupe verticale et réparties à droite et à gauche du chemin. La représentation graphique d'une montagne sous la forme d'une *taupinière* vue de profil est, d'ailleurs, la plus commune parmi les anciennes illustrations. Cette figuration apparaît dès l'époque babylonienne. Pour symboliser la vallée, les monticules sont disposés en rangées perpendiculairement à son axe ou bien les uns au-dessus des autres, lorsque la direction de son lit est face à l'observateur. Ce système est très limité, il ne dépeint qu'une partie de l'espace géographique ; la continuité de la surface ainsi qu'une grande quantité d'informations topographiques ne sont pas représentées et manquent au lecteur pour reconnaître le paysage dessiné. La forme et la disposition de ces figures évoluent ensuite avec les techniques de représentation.

La représentation continue de la topographie apparaît bien plus tard (XV$^{\text{ème}}$ siècle). Le relief est dessiné à partir d'un point de vue situé en hauteur bien au-dessus d'une crête de montagne par utilisation de la perspective cavalière (cf. figure 4), le caractère de chaque montagne se différencie des autres, le terrain dans sa totalité semble cohérent. Des lignes de pente et un ombrage en hachures sont ajoutés afin d'accroître l'impression de volume. Ces cartes sont très esthétiques, voire artistiques, mais manquent totalement de précision géométrique.

Figure 5 : Vue perspective numérique (Valence, Drôme).

C'est au XVII$^{\text{ème}}$ siècle qu'apparaît la première représentation verticale (Hans Conrad Gyger, 1667). Précision et densité des points levés sur le terrain ont forcé l'auteur à dessiner ses montagnes dans le plan. Mais malgré les efforts de certains créateurs, la cartographie du relief reste inchangée jusqu'au XIX$^{\text{ème}}$ siècle, préférant la vue en perspective à une représentation verticale.

Le système de représentation par *hachures* a été inventé en 1799 par Johann Georg Lehmann et a été modernisé pour être utilisé sur les cartes monochromes. La représentation du relief par des segments qui matérialisent la pente suit les quatre règles de construction suivantes :

- la direction d'une hachure suit la plus grande pente ;
- les hachures sont disposées en rangées autour de courbes de niveau en blanc ;
- la longueur d'une hachure correspond à un intervalle séparant deux courbes de niveau ;
- l'intensité de couleur suit le principe *le plus pentu, le plus fonc*é (principe de l'estompage avec une lumière zénithale).

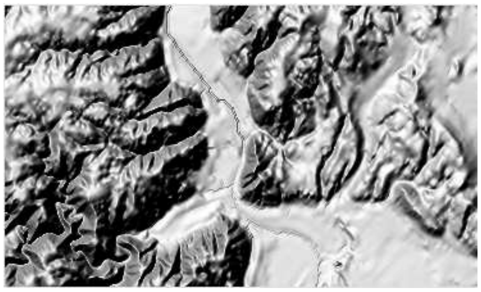
D'autres formes de hachures ont été utilisées par le passé telles que les hachures horizontales pour représenter les contours des glaciers sur les cartes à hachures. Ce procédé, en tant que modèle de représentation, a été abandonné faute de précision géométrique. Par contre, il est très utilisé en combinaison avec d'autres procédés pour indiquer la direction de versants abrupts (cf. infra 2.2.4).

2. 2.2. Les représentations modernes

Un nombre limité de procédés a été sélectionné par les cartographes contemporains compte tenu des progrès techniques qui ont été réalisés dans les domaines touchant l'observation du terrain et la précision des levés, la reproduction de ces observations sous forme graphique et l'imprimerie, et compte tenu aussi des lois de l'optique physiologique qui obéissent à différents stimuli visuels et aux habitudes. Le choix des procédés décrits ci-après provient de leur appréciation qualitative et de leur efficacité reconnues par les cartographes. Pour des cartes à grandes et moyennes échelles, ils sont rarement utilisés séparément et donc très souvent combinés afin d'accroître l'impression de volume qu'ils doivent rendre sur un plan.

L'expression du relief sous forme d'*estompage* (cf. figure 5) consiste à reconstituer les ombres dues au seul relief, c'est-à-dire que sont omises la couverture végétale et les infrastructures, en simulant un éclairage artificiel provenant d'une direction conventionnelle, le nord-ouest, et incliné d'un angle conventionnel, 45° ou 35°15', par rapport au plan horizontal sans figuration d'ombres portées. Souvent, afin de saisir les phénomènes orientés parallèlement à la source de lumière initiale, l'orientation de la source lumineuse varie de part et d'autre de la direction théorique. Utilisé seul, ce procédé permet une appréciation relative des pentes et des caractères généraux du relief. Un inconvénient est que, s'il suggère correctement les formes des parties ombrées, il néglige les versants éclairés qui semblent plats[1]. De plus, il n'a absolument aucune précision géométrique. Il est donc utilisé afin d'accroître l'effet plastique d'un autre procédé, très souvent un procédé de modélisation, à savoir la représentation à l'aide de teintes hypsométriques ou la représentation à l'aide d'isohypses.

Figure 6 : Estompage numérique (Valence, Drôme).



Les *teintes hypsométriques et bathymétriques* attribuent à des intervalles de classes d'altitude convenablement choisies des couleurs appropriées, le bleu étant réservé aux eaux. Ce type de représentation favorise l'évaluation rapide de la hauteur d'une région et l'appréciation de la répartition et de l'amplitude des mouvements de terrain. Elles sont en général utilisées pour les planisphères ou les cartes physiques (très petites échelles inférieures au million). Par conséquent, en sus de leur valeur figurative, elles dotent la représentation d'une valeur géométrique.

---

[1] Dans les parties éclairées, le cartographe utilise modérément l'éclairage zénithal pour que les détails figurent.

Les *courbes de niveau* (cf. figure 6) fournissent aussi une définition géométrique du terrain et donnent une impression de volume. Un ensemble de courbes serrées ou lâches donnent une idée de la pente qui peut être renforcée par la teinte (bistre clair ou soutenu). Une courbe prise isolément définit l'altitude des points dont elle est le lieu. [Cuenin, 72] définit la courbe comme une *épure géométrique et abstraite spécialement adaptée aux mesures cartométriques élémentaires*. D'une manière générale, une interpolation entre deux courbes de niveau consécutives est toujours possible pour déterminer la valeur d'altitude d'un point situé entre ces deux isolignes. La technique de représentation du terrain par courbes de niveau procure en ce sens un modèle géométrique associé à un mode graphique.

L'une des règles de lisibilité[1] en cartographie conduit à déterminer un intervalle graphique minimal entre deux courbes (0,2mm), par exemple la valeur minimale de l'équidistance entre deux courbes de niveau sur une carte au 1:50 000 est égale à 10m. Mais si cette équidistance est respectée en zone faiblement ondulée, l'ensemble des courbes ne définit plus le relief parce qu'elles sont alors trop espacées les unes des autres. Si la même équidistance est préservée en zone de montagne, alors les courbes sont beaucoup trop serrées et nuisent à la lisibilité. Le système adopté autorise par conséquent une variabilité de l'équidistance selon le type de terrain représenté, par adjonction de courbes intercalaires chaque fois qu'elles deviennent nécessaires. L'effet plastique des courbes de niveau est alors maintenu : elles évoquent les formes du terrain et permettent une reconstitution mentale des volumes.

Figure 7 : Courbes de niveau numériques (Valence, Drôme).

Du point de vue de la précision, les courbes de niveau fournissent une définition géométrique du terrain. Lors d'un changement d'échelle cartographique, l'erreur sur la précision altimétrique s'accroît avec la réduction de l'échelle mais aussi la courbe perd de son caractère géométrique au fur et à mesure que l'échelle diminue pour devenir un moyen d'expression de plus en plus schématique.

Certains accidents du terrain peuvent échapper aux représentations examinées ci-dessus mais ils doivent tout de même figurer sur la carte car ils apportent une information morphologique. De plus, ils servent de points de repère. Par exemple, en zone de montagne où il n'y a pas d'habitation, une petite butte est un point de repère. La carte procure une information sélectionnée selon son objectif et son échelle sur une feuille restreinte par la taille du papier. Les règles de lisibilité conduisent à des contraintes pour le cartographe, qu'il doit dans certains cas outrepasser afin de figurer l'information qu'il juge essentielle.

Le cartographe embellit la carte en ajoutant un figuré spécial (dessin de rochers) ou en accentuant la représentation initiale. Dans ce dernier cas, par exemple, il peut décaler la source de lumière

---

[1] Il faut qu'une carte soit lisible à l'œil nu à 30cm.

d'un estompage lorsque les rayons induits sont parallèles à une vallée, il peut ajouter des courbes de niveau intercalaires lorsqu'un accident du terrain se trouve ignoré entre deux courbes successives. Une autre méthode consiste à jouer sur la taille de l'objet géographique que l'on cherche à dessiner et non plus avec le procédé de représentation lui-même. Le cartographe peut, en effet, agrandir la forme qu'il veut maintenir sur la carte et qui serait sans cela effacée du fait de sa faible emprise.

2. 2.3. La combinaison des représentations

Afin d'harmoniser et de compléter l'information altimétrique, le cartographe combine en fait les différents procédés selon l'échelle de la carte qu'il produit et le but recherché. Il associe ainsi très souvent une représentation de type figuratif avec une modélisation. Pour des cartes topographiques aux moyennes échelles, la combinaison la plus usitée est l'alliance d'une représentation par un estompage et d'un système de courbes de niveau. En effet, celle-ci constitue un moyen d'expression qui couvre tout l'espace concerné et montre clairement les variations continues du terrain dans leur ensemble. Le lecteur peut isoler mentalement chacun des moyens (estompage et courbes de niveau) pour apprécier dans le détail les formes du terrain (cf. figure 2).

2. 2.4. L'étude d'un extrait

Nous avons choisi un extrait de carte issu de la *Série verte* (1:100 000) sur lequel figure une combinaison de divers procédés de représentation (cf. figure 2.a).

Dès le premier regard sur cet extrait, l'œil est attiré par un estompage très foncé, qui délimite une longue ligne s'étendant du nord-est au sud-ouest, divisant ainsi l'image en deux régions : au nord, la partie française des Alpes, et au sud, la partie italienne. Par conséquent, cet estompage très prononcé met en valeur l'élément principal de ce paysage, à savoir une longue crête sinueuse, passant par les Grandes Jorasses et allant jusqu'au mont Blanc, ligne structurante essentielle du massif du mont Blanc. De cette crête, s'échappent deux autres crêtes d'emprise moindre et dont l'importance est donnée par les cirques qu'elles délimitent. L'estompage qui les souligne est beaucoup plus doux et bien qu'elles soient secondaires par rapport à la crête des Grandes Jorasses, elles n'en sont pas moins importantes pour la structure du paysage. Afin de les appréhender dans leur ensemble, l'origine des rayons lumineux provient d'une source mobile, tournant approximativement de l'ouest vers le nord. Ainsi, les deux crêtes, l'une passant par l'aiguille du Midi et l'autre par l'aiguille Verte, encadrent la mer de Glace sans que l'une paraisse plus influente que l'autre dans la structure du massif. La différence entre la partie éclairée de l'image, *i.e.* la partie française, et la partie à l'ombre rehausse la dissemblance des deux versants principaux. Le côté français descend moins rapidement vers la vallée de Chamonix que le côté italien vers le val Ferret.

La différence de texture et de rugosité du terrain est marquée par la couleur et le motif employés pour tracer lignes et figurés. Ainsi, les versants relativement lisses et homogènes sont représentés par des courbes de niveau bistrées et les versants très rocailleux par des hachures noires. Le bleu permet de distinguer très aisément les glaciers, vestiges de la glaciation du quaternaire.

En se rapprochant de la carte pour examiner ces différences de texture, on remarque le glacier de Talèfre, par exemple, situé dans le cirque délimité par la crête de l'aiguille Verte. L'association du bleu et du noir met en valeur les formes caractéristiques du modelé glaciaire. De l'amont vers l'aval, le dessin des rochers par des hachures horizontales soulignant la direction des pans rocheux ou verticales symbolisant les lignes de plus grande pente, est entremêlé de morceaux de courbes de niveau et de hachures bleues, horizontales ou verticales, matérialisant le glacier. Au centre du cirque, une zone sans glace et plus lisse qu'ailleurs est représentée par des tronçons de courbes de niveau bistres. Des traits en pointillé noir courant dans le sens de la pente figurent les éboulis, plus ou moins lâches et plus ou moins épais selon l'ampleur du phénomène naturel qu'ils symbolisent.

Figure 8 : Extrait d'une carte au 1:100 000, les Grandes Jorasses.

Les isolignes bleues, en général non connectées au réseau de lignes bistrées, modélisent l'inclinaison de la dénivelée du glacier par leur écartement. Ainsi, l'écoulement du glacier de Leschaux débute par une zone très pentue au niveau du col des Hirondelles et, à partir de 2800m, il se redresse progressivement pour finir sa course avec une pente extrêmement faible. La surface du glacier est striée de hachures horizontales et verticales marquant les directions des zones de crevasse.

Conclusion

Nous voyons sur cet extrait que le cartographe ne choisit pas arbitrairement les procédés de représentation du terrain ; ils sont adoptés selon leur capacité à mettre en valeur les formes caractéristiques de la région. Par exemple, l'échelle du 1:100 000 ne permet pas de dessiner précisément la position des crevasses ou des éboulis mais ces phénomènes sont tout de même représentés car ils sont très importants. Deux aspects sont toujours conjugués en cartographie traditionnelle : qualitatif pour apprécier la forme naturelle et quantitatif pour apporter une précision géométrique au dessin.

Reprenons les exemples de formes de relief que l'on a décrit au paragraphe 1.4. Il est alors possible de leur associer une représentation (cf. figure 2) :

- *Chaîne jeune, structure alpine*
  - aiguille : intersection de crêtes, figuré de rochers ou hachures noires
  - glacier : courbes de niveau bleues, crevasses : hachures bleues, éboulis : pointillé noir
  - cirque occupé par un glacier : représentation du glacier, barre rocheuse : estompage et hachures noires
  - auge (vallée glaciaire et transition avec les versants) : représentation du glacier, changement de couleur des courbes de niveau : noires si présence de rochers, bistres si versant lisse
- *Volcan explosif, structure dôme de lave*
  - dôme : courbes de niveau bistres circulaires, estompage, cratère : courbes de niveau bistres arrondies suggérant la forme du cratère, estompage

D'une manière générale, si une crête n'est pas saillante et rocheuse telle que les crêtes alpines, elle sera suggérée par la forme des courbes de niveau et rehaussée par de l'estompage. Le passage d'un thalweg est suggéré par une concavité locale des courbes de niveau et par le dessin d'un cours d'eau lorsqu'il existe.

2. 3. Des cartes

Il existe différents types de cartes où le relief figure en tant que thème principal et pour lesquels le cartographe utilise d'autres techniques de modélisation que celles présentées dans le paragraphe précédent ou, s'il les utilise, c'est souvent pour obtenir plus de précision géométrique. Ainsi, sur une carte géologique, le trait graphique modélise les frontières planimétriques entre les régions d'histoire géologique différente.

2. 3.1. Carte géologique

La carte géologique fournit une représentation de la distribution des formations géologiques et des substances minérales. Les roches sédimentaires y sont classées par ordre chronologique dont le facteur d'ordre est rendu par une gamme de couleurs normalisées (cf. supra 1.2 pour les équivalences entre époque et type de relief) :

- pour le trias, période couvrant le début du secondaire, on choisit le violet ;

· pour le jurassique, milieu du secondaire, le bleu ;

· pour le crétacé, fin du secondaire, le vert ;

· pour le tertiaire, le jaune ;

· pour le quaternaire et le primaire, des teintes neutres.

Certaines formations peu épaisses mais qui constituent des repères locaux ou qui soulignent par leur position la structure d'une région sont mises en valeur par des couleurs tranchées. La couleur des formations magmatiques et métamorphiques[1] représente leur nature lithologique car l'âge de ces terrains, avant la publication de la sixième édition, était souvent inconnu. Le BRGM[2] a sorti en 1996 une nouvelle édition de la carte géologique de la France à l'échelle du millionième où la règle précédente est dépassée. En effet, l'information principale portée par la couleur correspond à l'âge des terrains qu'ils soient sédimentaires, magmatiques ou métamorphiques. L'information a pu être complétée grâce à l'utilisation des chronomètres isotopiques[3] appliquées aux roches magmatiques et métamorphiques. La teinte évoquant l'âge, son intensité indique le caractère des formations :

· teintes vives pour le magmatisme ;

· teintes moins vives pour le sédimentaire.

Les figurés noirs soulignent les principaux accidents tectoniques, tels que les failles ou les chevauchements, et les traits mettent en valeur la structure de la carte, en délinéant les domaines orogéniques [Chantraine, 96] (cf. partie III, figure 19).

Une telle carte est très intéressante pour repérer les principaux types de changements induits sur le paysage. La comparaison d'une carte géologique et d'une carte topographique de la même région souligne ainsi la relation entre la structure interne du terrain et le modelé du paysage. La même remarque est valable si on compare une représentation numérique du terrain en estompage et l'extrait de carte géologique qui lui correspond (cf. partie III).

2. 3.2. Autres cartes

Il existe un ensemble complet de cartes thématiques touchant les autres domaines de la géographie physique. Parmi celles-ci, la *carte géomorphologique* offre une représentation qualitative, quantitative et explicative des formes du terrain. Lithologie, tectonique, processus d'altération et autres phénomènes morphologiques sont représentés sur un fond topographique en courbes de niveau afin d'apporter une information géométrique complémentaire. Etant donnée l'abondance de l'information reproduite, ce type de carte est relativement difficile à interpréter. La *carte phytogéographique* représente la distribution géographique des végétaux, phénomène qualitatif et discontinu. Ce type de carte est difficile à utiliser pour repérer une segmentation va-

---

[1] La transformation d'une roche à l'état solide s'effectue lors d'une élévation de température ou de pression, avec cristallisation de nouveaux minéraux et acquisition de textures et structures particulières, sous l'influence de conditions physiques ou chimiques différentes de celles ayant présidé à la formation de la roche originelle.

[2] Bureau des Recherches géologiques et minières.

[3] Il s'agit, ici, de l'âge du protolite avant qu'il ne soit affecté par le métamorphisme [Rossi, 96]. Le protolite est une petite sphère de diamètre en moyenne inférieur à 2mm constituée d'un nucléus (petit fragment de roche) et d'un cortex (enveloppe donnant une structure concentrique).

lide du paysage français en types de relief car il se fonde sur les conditions écologiques et les groupements végétaux. En outre, l'homme modifie parfois l'équilibre initial d'une manière prépondérante en créant des régions dépourvues de végétation naturelle. Citons, en dernier exemple, la *carte clinographique* qui présente des pentes. Elle est déduite directement des cartes topographiques en courbes de niveau par mesure des intervalles entre deux courbes successives. Elle peut être un support pour un contrôle visuel des résultats d'algorithmes de calcul de pentes à partir de données numériques du terrain.

2. 3.3. Une spécialité, une carte

Différentes spécialités en sciences de la terre impliquent différents besoins cartographiques. Par conséquent, comme nous l'avons déjà signalé, l'utilisation des divers procédés de représentation doit être adaptée selon l'information à mettre en valeur (définie par l'objectif de la carte) et selon l'échelle voulue.

Dans un domaine purement scientifique, nous avons vu dans le chapitre 1 que les spécialistes s'intéressent aux processus d'édification de la surface terrestre. Dans un domaine plus applicatif, les scientifiques de l'agriculture, par exemple, se focalisent principalement sur les propriétés du paysage en matière de fertilité du sol, d'aménagement du sol ou de nature de la végétation existante. En météorologie et climatologie, ils regardent davantage les effets du terrain sur le temps et le climat. Pour des types de spécialité très diversifiés, les besoins cartographiques sont intrinsèquement différents et demandent une analyse préalable du terrain très spécifique.

L'analyse différentiée du terrain s'appuie sur des descripteurs particuliers. Les descripteurs qualitatifs fournissent à l'utilisateur une information générale sur un paysage particulier, tandis que les descripteurs quantitatifs sont repérés par des valeurs numériques, souvent statistiques, et sont beaucoup plus facilement implantables numériquement. Compte tenu de la description des types de relief du chapitre 1, la surface terrestre peut être classée pour un large éventail d'échelles et avec différents degrés de spécificité. Une telle classification implique la définition de descripteurs génétiques, c'est-à-dire qui décrivent les éléments de la surface terrestre et leurs origines [Li, 90:29]. Par exemple, une classification de la topographie glaciaire fournira des éléments du type glacier, crevasse, cirque, auge, *etc.* auxquels peuvent être associées des représentations cartographiques (cf. supra 2.2.4). Cette classification n'est possible que si la région d'étude est décomposée en types de relief à topographie homogène (glaciaire, volcanique, sédimentaire…) dont chaque sous-partie est qualifiable. Ces notions de segmentation de la région en zones homogènes et de qualification de chaque sous-partie seront abordées d'une manière théorique et numérique dans les parties III et IV de cette thèse.

2. 4. Le passage au numérique

Le passage de la cartographie classique à la cartographie numérique est un point-clef dans les SIG. La carte dessinée à la main constitue un objet de repérage et un objet esthétique qui symbolise à lui seul tout un savoir, une compétence artistique couplée à une connaissance géographique. Ce changement très novateur dans la fabrication d'un objet, qui a toujours demandé une dextérité artistique et une intelligence des sciences géographiques, n'implique pas pour autant la mort de ce savoir-faire. Du traditionnel au numérique, de nouvelles connaissances sont nécessaires afin de compléter les connaissances d'hier. «*Les fondements théoriques de la première édition*[1] *qui reposent sur le paradigme de la communication graphique ne sont pas vraiment remis en cause*, mais plutôt, de nouveaux paradigmes scientifiques émergent et se greffent sur les concepts de la cartographie traditionnelle, dus à l'extension de l'expression cartographique aux nouveaux moyens de communication que procurent les progrès technologiques en sciences de l'informatique. *Nous sommes donc à la fois dans une période de révolution et de transition, avec au bout du compte l'émergence possible d'un nouvel art cartographique*» [Laurini et Müller, 96].

Plusieurs procédés traditionnels de représentation du relief ont été évoqués précédemment (cf. supra 2.2 et 2.3). Ils interviennent dans la fabrication des différentes cartes, qu'elles soient utilisées dans une thématique purement orographique (terme entendu au sens large pour les cartes géologiques, géomorphologiques...) ou topographique. La transition vers le numérique implique l'utilisation d'un ou de plusieurs procédés de numérisation qui dépend en fait de la source disponible (planche de courbes de niveau, photographies aériennes). Les données brutes obtenues sont stockées dans une base de données altimétriques sous la forme, généralement, de courbes de niveau (polylignes) ou d'un échantillon de points. Le choix d'une méthode de construction d'une surface numérique dépend étroitement de la qualité des données et du but. Il est clair qu'une cartographie géomorphologique n'aura pas les mêmes exigences qu'une application hydrologique. La géomorphologie s'intéresse à une représentation quantitative et précise des formes du terrain (cf. supra 2.3.2.) et l'hydrologie à une représentation quantitative des bassins versants (associés au système hydrographique).

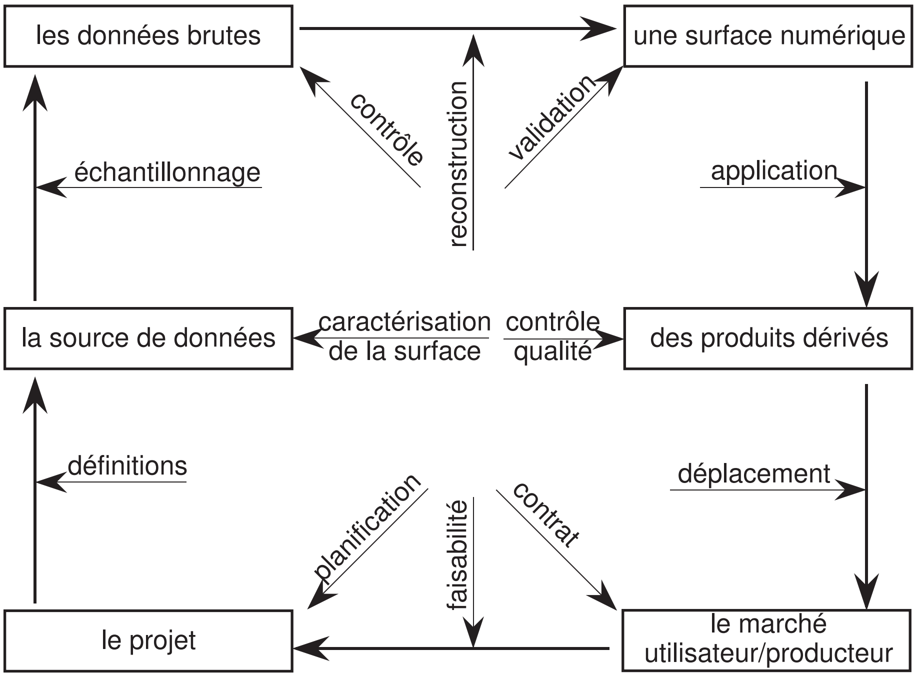
Les objets géographiques dessinés sur la carte (analogique ou numérique) doivent aussi être représentés numériquement. Cependant, par définition, le numérique privilégie l'aspect quantitatif de l'information géographique : tandis que la représentation cartographique est déjà une interprétation graphique de la surface terrestre, les données numériques ne sont qu'une suite de valeurs. Cette base quantitative ne fournit explicitement aucun élément qualitatif de structuration, tel qu'une crête ou un thalweg, qui permette de qualifier le terrain (cf. supra 2.2.4.). Bien que la position de certains thalwegs soit marquée explicitement par un trait bleu (cours d'eau), la représentation graphique incite le lecteur à une interprétation de la carte s'il désire une information géomorphologique.

Parmi les modes de représentation numérique, les plus communs sont les grilles rectangulaires et les polylignes. La représentation numérique fournissant un échantillon de la réalité, toutes les ondulations, tous les détails ou toutes les petites formes ne figurent pas forcément dans les données. Dans le cas d'une grille régulière, la résolution détermine la taille minimale des phénomènes représentés. Pour les polylignes, le procédé de représentation traditionnelle par courbes de niveau fournit une information géométrique directement numérisable. Le scannage d'une planche d'isohypses permet de stocker toute l'information préalablement préservée et amplifiée par le cartographe, évitant l'élimination des formes par un seul critère de taille (résolution). Cependant, la continuité du terrain entre les courbes est perdue.

---

[1] Les premières publications d'ouvrages synoptiques de cartographie remontent aux années vingt.

Le processus général de construction d'un modèle numérique du terrain extrait de [Li, 90] permet de réorganiser les idées exprimées précédemment dans le schéma suivant :



Dans ce diagramme, six étapes peuvent être distinguées. De plus, une ou plusieurs opérations doivent être appliquées au cours du processus pour le faire progresser d'étape en étape. En pratique, toutes ces opérations ne sont pas nécessaires dans le contexte d'un projet de recherche tel que le nôtre. Les deux étapes successives qui seront décrites respectivement dans les chapitres 4 et 3 sont l'acquisition des données et la construction d'une surface.

Cependant, le schéma fait apparaître la création d'un MNT comme isolée des autres couches d'information. Or, un utilisateur peut avoir besoin de l'orographie à une certaine échelle qu'il voudra ensuite superposer à d'autres couches (routier, bâti…) et demandera pour cela une certaine cohérence avec ses données. Ce problème de l'interaction sera exposé dans les parties IV et V.

3 Discrétisation et représentation numérique

Les modèles altimétriques numériques occupent une place très importante dans les travaux consacrés à la cartographie numérique puisqu'en découle tout type de modélisation numérique des phénomènes naturels (dans le diagramme du paragraphe 2.4, les modèles numériques correspondent à des surfaces numériques, cf. infra 3.1.2). La modélisation façonne une image d'un phénomène qui peut être, par exemple, les ondulations du terrain, le système hydrographique, les zones d'avalanche ou d'affaissement du terrain. Elle permet aussi de représenter des activités humaines liées directement au relief et qui touchent des domaines tels que l'aménagement du territoire ou l'utilisation des ressources naturelles.

Or, le terrain est une surface constituée d'une infinité de points mesurables qui ne peuvent être stockés. Ainsi, les données altimétriques forment un échantillon qui approxime le terrain réel.

L'idée devient donc, à partir d'un ensemble de données, de créer un modèle qui reproduise les informations que l'on souhaite retrouver pour une application donnée, voire pour plusieurs applications si c'est possible.

Le procédé de capture des données terrain génère un ensemble d'éléments ordonnés selon leur position planimétrique dans le cas des échantillons de points, ou selon leur valeur altimétrique pour les courbes de niveau. Les variations sont alors soit discontinues (échantillon de points), soit continues le long de polylignes (courbes de niveau). Afin de créer un Modèle numérique de Terrain (MNT) représentant de manière explicite les ondulations du terrain sur toute la surface, il convient, par conséquent, de recréer cette idée de continuité de l'information altimétrique en mode discret. L'utilisation d'une fonction d'interpolation répartit l'information existante là où elle manque. L'expertise des méthodes de manipulation d'un modèle altimétrique, et notamment la méthode d'interpolation utilisée, forme en partie la connaissance procédurale (cf. partie V).

Dans un premier temps, nous définissons la notion de représentation 2D½ par rapport à une représentation 3D (cf. infra 3.1). Puis, nous passons en revue les MNT les plus communément utilisés (cf. infra 3.3), dont l'un provient de la cartographie traditionnelle, après avoir défini la notion d'interpolation dans le paragraphe 3.2.

3. 1. La troisième dimension

Dans le domaine des SIG, le nombre des applications ayant besoin d'une véritable modélisation 3D s'accroît [Raper et Kelk, 91].

3. 1.1. Des modèles 3D

En parcourant Internet, nous pouvons voir un nombre impressionnant de sites consacrés à la représentation du terrain en 3D et aux animations qui en découlent. De très nombreuses applications utilisent la modélisation du terrain en 3D comme, par exemple, les études sur la sécurité des avions aux abords des aéroports, les recherches sur la distribution spatiale et la forme des lits des glaciers, les CD-ROM pédagogiques. Une telle modélisation des données permet de visualiser des paysages en perspective tels qu'ils étaient représentés au tout début de la cartographie, mais avec une précision géométrique accrue (cf. supra 2.2.1.).

Dans le cadre des représentations 3D, [Weibel, 93] distingue deux classes descriptives regroupant les modélisations possibles d'un paysage :

- les modèles de surface, qui représentent des phénomènes surfaciques entourant un espace 3D ;
- les modèles de volume capables de rendre des phénomènes volumiques et des solides par modélisation, soit de la surface enveloppante, soit de l'intérieur.

Les modèles de surface représentent des surfaces avec ondulations. Ces surfaces 3D peuvent être intersectées ou se connecter pour former des volumes. Une telle surface peut être paramétrique ou non. La méthode la plus simple pour générer une surface 3D est de construire une surface de révolution dont l'équation paramétrique, dans le cas d'une rotation d'angle Φ autour de l'axe des x d'un point initialement dans le plan (x, y), est :

$$Q(t, \Phi) = [x(t), y(t)\cos\Phi, y(t)\sin\Phi], \text{ où } t \text{ évolue dans } 0 \le t \le t_{max}.$$

Le modèle de départ peut être compliqué à souhait, créant ainsi beaucoup d'autres possibilités [Rogers et Adams, 90]. Des auteurs ont discuté les principes de l'utilisation des surfaces polynomiales paramétriques pour une modélisation des surfaces géologiques ([Weibel, 93] en fournit une synthèse). On pourra également trouver la description de construction de surface 3D, par exemple dans [Barski, 93] (beta-splines), [Cheng et Idesawa, 86] (intersection courbes de niveau et grille), [Muraki *et al.*, 90] (à partir de courbes de niveau, par minimisation d'une fonction d'énergie). Les techniques de modélisation par surface ont l'avantage de permettre une modélisation de formes plus complexes que ce que permettent les modèles de volume.

Les modèles de volume, quant à eux, permettent la modification directe d'unités élémentaires volumiques. La visualisation des résultats est plus facilement interprétable [Westort, 96]. [Weibel, 93] analyse l'utilisation de différentes représentations dans le domaine des sciences géographiques :

- la *B-rep*, équivalente à une triangulation irrégulière en 3D (cf. infra 3.3.3.1), sert à modéliser des grottes, des couches minières.
- le *modèle de voxels*, équivalent à un MNT à grille rectangulaire en 3D (cf. infra 3.3.2.1) où le voxel est une unité de volume, sert de base à l'approche géocellulaire (par interpolation de différentes couches 2D½) et l'approche par isosurfaces contraintes (par interpolation d'une grille 3D à partir de points dans l'espace 3D) représentant des variables spatiales en x, y et z. Le premier type de modèle sert pour les analyses sismiques, le deuxième aide à la visualisation de variables 3D continues telle que la salinité.
- l'*octree*, équivalent au quadtree en 2D (cf. infra 3.3.3.2), connaît une utilisation limitée à la recherche.

La représentation du terrain par un modèle 3D paraît être intuitivement la meilleure représentation numérique du relief que l'on puisse construire puisqu'elle permet de se libérer de la contrainte du 2D rencontrée dans la cartographie (cf. supra 2.1). Cependant, ce type de représentation est très lourd à utiliser dans le cadre de manipulations du modèle initial. Nous focalisons donc notre étude sur les représentations 2D½.

3. 1.2. Le 2D½

Des travaux récents ont évoqué le modèle numérique de terrain comme un champ de valeurs continu. En effet, un MNT repose sur un échantillon de points, dont l'ensemble reproduit un phénomène naturel particulier et où chaque valeur est liée à un sous-ensemble de l'espace entier, *i.e.* chaque unité élémentaire (point) de la partition est associée à une valeur. Ce qui répond à la règle rudimentaire rappelée dans [Vckovski, 95] qui affirme que, dès que des variables indépendantes continues entrent en jeu, alors le type d'information traitée est assimilable à un champ.

Définition. Un champ est une propriété physique ou observable $H(s)$, spatialement ou temporellement indexée par s.

Chaque fois que l'on manipule un ensemble de données décrit par un champ, les conséquences de la discrétisation apparaissent lors de l'échantillonnage de ce champ. En effet, la discrétisation affecte le domaine continu des variables indépendantes (x, y), qui forment le support du champ. Le champ est alors décrit par un ensemble fini de points échantillon, dont chacun est une valeur d'altitude H (pour *height*) et est relié à un élément particulier du support, l'index.

En transposant la définition mentionnée par [Vckovski, 95:128] à un index spatial scalaire dont le champ de valeurs représente l'altitude, le domaine des valeurs altimétriques B est réel : $H(s) \in \mathbb{R}$. Un champ idéal, déterministe et non perturbé, est une fonction surjective de I, espace des index, vers B :

$$\begin{aligned} H : \mathrm{I} \subset \mathbb{R}^2 &\longrightarrow B \subset \mathbb{R} \\ s &\longrightarrow H(s) \end{aligned}$$

La surface approchée par un modèle altimétrique numérique peut donc être effectivement assimilée à un champ de valeurs d'altitude $H(s) = H(x, y)$ de dimension 2, dans lequel il existe une valeur unique z pour chaque couple de coordonnées spatiales (x, y) (d'autres champs sont étudiés dans la partie IV). Par exemple, pour un certain index s_i, la valeur du champ échantillonné $H(s_i)$ peut s'écrire comme une moyenne pondérée du champ $H(s)$ autour de l'index s_i, où les poids sont donnés par une fonction de sélection ϕ_i, dépendante de s_i (cas d'une "méthode exacte" d'interpolation) :

$$H(s_i) = \int_{\mathrm{I}} \phi_i(s).H(s)\, ds, \text{ avec la fonction de sélection normalisée : } \|\phi_i\| = \int_{\mathrm{I}} \phi_i(s)\, ds = 1.$$

Dans ce cas, le champ des valeurs mesurées correspondant à l'ensemble des indices s_i est un ensemble de z_i lié au champ $z(s)$ et la fonction de sélection ϕ_i ne dépend que de s_i. L'ensemble des données décrivant le champ s'écrit :

$$D = \{M, \{s_i\,;\, z_i\}_1^2\},\ s_i \subset \mathrm{I},\ z_i \in \mathbb{R}, \text{ M fournit une description de l'échantillon (c'est une méta-donnée).}$$

Dans le cas d'un modèle numérique de terrain régulier (cf. infra 3.3.2), l'ensemble des indices $\{s_i\}$ n'est pas donné explicitement puisqu'il existe une régularité. La méta-donnée M est alors précisée par la dimension du pas du pavage et le nombre d'unités dans toutes les directions, l'orientation et le point de départ. La fonction de sélection doit être connue afin de comprendre D ; sa description est une part importante de la méta-donnée M et correspond, par là même, à une fonction d'interpolation (cf. infra 3.2).

3. 2. Interpolation

Définir dans un premier temps ce qu'est l'interpolation est primordial. D'une part, cette fonction rétablit la continuité naturelle qui existait entre les éléments du terrain mais d'une manière artificielle et donc approximative. D'autre part, elle est la base de la construction de toutes les modélisations numériques de terrain à partir d'un ensemble de données brutes. [Pienovi et Spagnuolo, 94:786] définissent la continuité d'une surface obtenue par approximation d'un échantillon de points :

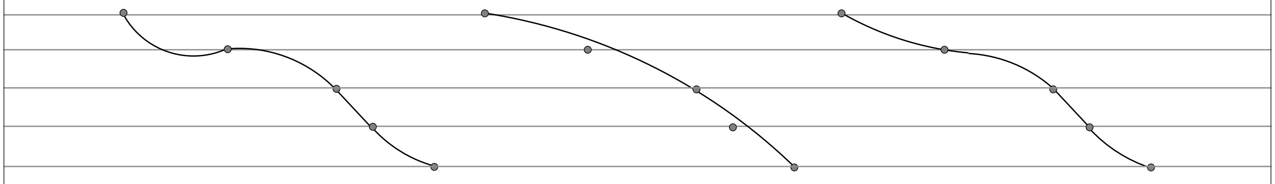
Définition. La continuité C° est la propriété mathématique qui assure qu'il est possible de se promener sur la surface interpolée, en allant d'un point de l'échantillon vers un autre sans rencontrer de trou, autrement dit, une altitude peut être calculée pour n'importe quel point de la surface.

Nous énonçons, dans un premier temps, les principes de l'interpolation puis nous passons en revue les techniques de conversion des données altimétriques en un MNT.

3. 2.1. Utilisations dans les SIG

Une interpolation est une transformation appliquée entre les points d'un échantillon. Le but de l'interpolation est d'estimer des altitudes dans les régions où aucune donnée n'existe, autrement dit elle établit un lien continu entre les valeurs altimétriques stockées dans la base de données. La courbure de ce lien diffèrera suivant la fonction choisie, par exemple, l'interpolation d'un profil à partir de cinq points homologues extraits de cinq courbes de niveau successives ne donnera pas le même résultat avec un polynôme de degré 4, une approximation à l'aide d'un polynôme de degré 3 ou une spline (la figure 8 est inspirée des travaux de Bernhard Schneider [Brändli et Schneider, 94]).

Figure 9 : Courbes polynomiales issues de l'interpolation de courbes de niveau.



a : Polynôme de degré 4. *b : Polynôme de degré 3.* *c : Spline (Hermite).*

Au-delà, le choix de la formule d'interpolation influe clairement sur les relations spatiales reconstituées à partir des points de l'échantillon initial. La connaissance des reliefs constituant la surface à représenter numériquement guide le choix du procédé d'interpolation. Par exemple, une fonction polynomiale de degré 3 (cf. figure 8.b) est acceptable pour approximer une zone de plaine sans accidents notables de terrain (terrain mou) mais ne convient pas dans le cas d'une zone de montagne fortement accidentée (lissage trop fort des ruptures de pente). Aucune des méthodes existant ne peut être estimée supérieure aux autres pour toutes les applications. [Pariente, 94] définit un ensemble intéressant de contraintes supportables par une *bonne* interpolation. L'auteur se place dans le cadre très vaste des applications SIG ; il convient donc de restreindre l'objectif puisque ce qui est un avantage pour une application peut devenir un inconvénient pour une autre application. En focalisant et en adaptant l'ensemble des propriétés au cadre qui nous intéresse, c'est-à-dire la détermination d'indicateurs géomorphologiques (cf. partie III), elles se réécrivent alors de la façon suivante :

- le système doit pouvoir prendre en compte les éventuelles frontières du phénomène à représenter, la formule d'interpolation doit pouvoir accepter une pondération plus forte à proximité de certaines lignes (lignes de structure du terrain) ;
- la fonction mathématique choisie doit être continue et dérivable une à deux fois afin de faciliter les calculs de pente (dérivée première de l'altitude) et de courbure (dérivée seconde) ;

- les valeurs des données source doivent être conservées, et non pas estimées, et peuvent servir ainsi de points d'appui pour contrôler le résultat final ;
- ajouter un point au système ne doit pas modifier considérablement les résultats précédents après réinterpolation des données.

En effet, l'interpolation est principalement utilisée dans quatre types d'opérations [Weibel et Heller, 91:274] :

- le calcul d'une altitude en un point ;
- le calcul des altitudes d'une grille régulière (MNT) à partir d'un échantillon de points ;
- le calcul des positions planimétriques de points le long d'une isoligne ;
- le rééchantillonnage d'une grille régulière.

L'interpolation permet de passer d'un modèle mathématique à un autre, de transformer des polylignes en un ensemble de points régulièrement espacés, et vice-versa. Ce qui nous assure, par la suite, qu'un modèle numérique de terrain peut s'enrichir de lignes et de points sans que l'information fournie initialement soit significativement détériorée ou perdue.

3. 2.2. Conversions des données altimétriques

Il existe différentes conversions possibles entre les représentations classiques développées plus loin dans le paragraphe 3.3. En effet, l'interpolation offre conceptuellement la possibilité de transformer, dans un sens ou dans l'autre, un modèle de courbes de niveau en une tessellation régulière, une tessellation régulière en une tessellation irrégulière, un modèle de courbes de niveau en une tessellation irrégulière. Dans le cas d'un MNT irrégulier ou de courbes de niveau, les points sont irrégulièrement répartis dans l'espace, mais on connaît la relation qui les relie (deux à deux). Le passage d'un MNT régulier vers un MNT irrégulier est en fait plus délicat que dans le cas inverse (choix des points à préserver en fonction du type de relief).

Nous avons mentionné le fait que l'interpolation est indispensable à la construction d'un MNT. Pour cela, il existe une multitude de méthodes d'interpolation dépendant de l'échantillon initial et du modèle de terrain souhaité. Ce paragraphe étudie les transformations des données source constituées de polylignes ou de points vers un MNT à maille carrée (cf. figure 8). Ces conversions ont déjà suscité beaucoup de travaux, ceux-ci correspondant à une pratique extrêmement répandue. La transition d'un modèle vers un autre pose, en effet, des problèmes biunivoques entre les deux jeux d'information principalement parce que l'information n'y est pas répartie de la même façon ce qui complique la recherche de points homologues [Beauvillain *et al.*, 95].

3. 2.2.1. Formules d'interpolation

Au cours de l'interpolation, un modèle mathématique est sélectionné et utilisé pour construire un modèle de la surface terrestre fondé sur les points d'un jeu de données pour lesquels la valeur d'altitude est connue. La hauteur de n'importe quel autre point de cette surface peut être approchée à l'aide de ce modèle mathématique. Son expression générale $z = H(x,y)$ exprime ainsi l'idée que l'altitude d'un point de la surface, dont la position est repérée par ses coordonnées planimétriques (x,y), se définit comme une fonction des deux variables x,y. Dans ce sens, un MNT correspond plutôt à une représentation 2D½ qu'à une représentation 3D (cf. supra 3.1).

[Lam, 83] répertorie les différentes formules d'interpolation en les classant dans deux types : *méthodes exactes* ou *méthodes approximatives*. Toutes ces méthodes appliquées séparément présentent des défauts, mais leur intérêt réside dans leur exploitation au sein d'un processus d'interpolation plus global (tel ceux décrits dans le paragraphe suivant). Le premier type recensé regroupe les méthodes qui prennent en compte dans les calculs toutes les données source disponibles. Dans le cas d'un MNT interpolé à partir de courbes de niveau, toutes les valeurs des courbes originales restent inchangées après interpolation. On répertorie les méthodes suivantes (à partir d'un ensemble de n points (x_i, y_j)) :

1· l'interpolation polynomiale dont la forme commune est :

$$H(x, y) = \sum_{i, j = 0}^{n} a_{i, j}.x^i.y^j, \text{ où les coefficients } a_{i, j} \text{ sont déterminés par } H(x, y) = z.$$

Du fait du manque de contrainte entre les points initiaux, les valeurs estimées peuvent varier radicalement suivant le degré du polynôme choisi et, dans certains cas, elles ne fournissent pas une surface qui semble naturelle (cf. figure 8). Nous verrons dans la partie III qu'elle fournit une approximation correcte de la pente si elle est utilisée dans un voisinage limité autour de chaque point.

2· la distance polynomiale dont l'expression usuelle est :

$$H(x, y) = \frac{\sum_{i = 1}^{n} w(d_i).z_i}{\sum_{i = 1}^{n} w(d_i)}, \quad \text{où : } \begin{cases} w \text{ est la fonction de pondération ;} \\ z_i \text{ est la valeur au point i ;} \\ d_i \text{ est la distance entre i et } (x, y). \end{cases}$$

La surface approchée dépend du choix de la fonction de pondération. En prenant par exemple la pondération la plus commune $w = d^{-1}$, les artefacts qui apparaissent en zone de plaine dans le cas d'une pondération directe de la distance sont moins nombreux. Cependant, certains demeurent et, principalement, dans les zones très encaissées.

3· le krigeage est une technique d'interpolation fondée sur l'étude de la structure d'autocorrélation entre les points de l'échantillon. Un variogramme est défini par une variance :

$\mathrm{var}(H(x+d, y+d) - H(d, d))$, où d est la distance entre deux échantillons.

Il manque encore des ponts entre la géostatistique et la géométrie du MNT qui permettraient une plus large application de cette technique. Son utilisation se restreint principalement au domaine des fractales [Polidori, 91] [Klinkenberg et Goodchild, 88].

4· la spline définit des morceaux de courbes :

si l'on considère le cas du 2D, étant donné un ensemble de points le long d'un profil $x_0 < x_1 < \ldots < x_n$, la fonction spline f de degré m aux nœuds $x_0, x_1 \ldots x_n$ est la fonction définie sur toute la ligne telle que dans chaque intervalle $[x_i, x_{i+1}]$, f(x) est donnée par un polynôme de degré inférieur ou égal à m : $f \in C^m$.

Le problème récurrent de ce type de transformations vient de la définition des intervalles (*knot points*). De plus, elles introduisent toutes des ruptures de pente qui ne figurent pas sur la surface originale à approcher.

5· l'idée de la différence finie repose sur l'hypothèse selon laquelle la surface interpolée obéit à un système d'équations différentielles, approximées par différences finies et résolues itérativement. La plus commune, l'équation de Laplace, revient à trouver une fonction z répondant à :

$$\frac{\delta^2 H}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 H}{\delta y^2} = 0 \text{ dans la région et } H(x, y) = 0 \text{ sur la frontière.}$$

Une approximation de l'équation en mode rasteur sur une grille régulière demande que la valeur en un point soit la moyenne de ses voisins 4-connexes :

$$z_{i,j} = \frac{z_{i-1,j} + z_{i+1,j} + z_{i,j-1} + z_{i,j+1}}{4}, \text{ où } z_{i,j} \text{ est la valeur de z au point (i, j).}$$

L'interpolation au-delà du voisinage défini autour des points initiaux est pauvre et, pour certains types de zone tels que les régions plates, des courbes au rendu non naturel peuvent apparaître. Par contre, ce type de démarche est très utilisé dans la création de masques de lissage (cf. partie V).

Les méthodes d'approximation, par opposition aux méthodes exactes, déterminent une fonction H qui attribue des valeurs aux points mais sans qu'elles soient forcément égales aux valeurs observées. Il y a donc une erreur résiduelle en chaque point qui doit rester dans un certain intervalle. Les deux critères communément employés sont la minimisation du maximum des erreurs e sur tous les points i et surtout la minimisation de la somme des carrés des résidus (moindres carrés) :

$$\sum_{i=1}^{n} e_i^2 = \sum_{i=1}^{n} (H(x_i, y_i) - z_i)^2 = \min$$

6· La sixième méthode utilise des polynômes ordinaires basés sur les moindres carrés de forme générale équivalente à la méthode 1, mais le nombre de termes exprimés $(m+1)^2$ est inférieur au nombre de points n et il figure en plus un terme résiduel e :

$$H(x, y) = \sum_{i,j=0}^{m} a_{i,j}\, x^i y^j + e.$$

Ce modèle d'estimation est très influencé par les valeurs extrêmes et par la distribution inégale des points de l'échantillon. De plus, aux bords des zones approchées par des surfaces polynomiales, les raccords peuvent poser problème.

7· Sous l'hypothèse que la surface prend des formes récurrentes ou cycliques, un polynôme trigonométrique peut être utilisé. Le modèle des séries de Fourier a pour base :

$$z = a_{00} + \sum_{i=1}^{m} \sum_{i=1}^{n} F(a_{i,j}, p_i, q_i) + e, \text{ avec } p_i = \frac{2\pi i x}{m} \text{ et } q_j = \frac{2\pi j y}{n},$$

où m et n sont les longueurs d'onde dans les directions x et y. La série des coefficients de Fourier est définie par :

$$F(a_{i,j}, p_i, q_j) = cc_{i,j} \cos(p_i) \cos(q_j) + cs_{i,j} \cos(p_i) \sin(q_j) + sc_{i,j} \sin(p_i) \cos(q_j) + ss_{i,j} \sin(p_{i,j}) \sin(q_{i,j}),$$

où $cc_{i,j}$, $cs_{i,j}$, $sc_{i,j}$ et $ss_{i,j}$ sont les quatre coefficients pour chaque $a_{i,j}$.

Une surface peut ainsi être décomposée en surfaces périodiques selon différentes longueurs d'onde. Mais, mis à part des cas très particuliers, le terrain n'a pas un comportement aussi régulier (cf. infra 3.2.2.2). On peut alors envisager une utilisation des ondelettes (cf. partie IV).

8· Les moindres carrés sur des distances pondérées sont utilisés pour prendre en compte l'effet de diminution de la distance. L'erreur à minimiser devient :

$$\sum_{i=1}^{n} e_i^2 = \sum_{i=1}^{n} w(d_i) \,.\, (H(x_i, y_i) - z_i)^2, \text{ où w est une fonction de pondération.}$$

Le choix de la pondération a, là encore, un effet important sur le résultat et la méthode est influencée par la configuration des points à partir desquels l'interpolation a lieu.

La qualité du MNT obtenu par interpolation d'un ensemble de points initiaux dépend soit du seul et unique choix de la fonction de transformation selon qu'elle atténue les effets néfastes dus au bruit ou non (dans le cas où l'échantillon n'est pas modifié), soit de la variation de l'échantillon et du choix de la transformation. L'existence de formules d'interpolation repose sur l'hypothèse selon laquelle les ondulations du terrain peuvent être approchées d'une manière satisfaisante par des fonctions mathématiques localisées à de petites surfaces. La validité d'une telle approche dépend de la configuration locale de la surface terrestre. Dans beaucoup de cas, des morceaux de terrain sont sous-définis notamment dans les zones de forts changements d'altitude et de pente ou, au contraire, sur des plats. Des solutions purement mathématiques produisent des surfaces dont la visualisation montre souvent un rendu peu naturel ; une connaissance sur le caractère géomorphologique du terrain améliore les résultats [Brändli et Schneider, 94].

3. 2.2.2. Processus d'interpolation

Certains auteurs ont mis en évidence le fait qu'un ensemble initial de données (courbes de niveau ou échantillon de points) interpolé directement sans ajout de données complémentaires telles que des lignes structurantes ne donne pas des MNT qualitativement corrects [Baudot, 91]. Un axe de recherche s'est donc développé s'intéressant aux informations géomorphologiques contenues implicitement dans les données altimétriques. Ces informations permettent de guider l'interpolation vers un MNT plus fiable, la combinaison ou la séquence d'outils d'interpolation ne se réduisant pas à l'addition des comportements de chacun.

[Rost, 87:231] rappelle la sporadicité[1] du terrain et, par là même, l'impossibilité de le caractériser avec une seule fonction. Il propose alors une méthode d'approximation par morceaux en utilisant les splines cubiques, autrement dit une fonction spline de degré 3 (méthode 4). La valeur de z est correctement approximée dans chaque sous-intervalle, le problème des discontinuités est traité par intersection des sous-intervalles successifs en une valeur commune z, $f'(x)$ et $f''(x)$ étant continues. Aux points de division des sous-intervalles risquent d'apparaître de fausses lignes de rupture et de fausses lignes de plus grande pente (perpendiculaires aux courbes de niveau), une fois l'interpolation transposée en x, y. Et, si la surface d'approximation est trop lissée pour éviter cet inconvénient, le caractère de rugosité du terrain risque d'être atténué. L'utilisation de seules fonctions mathématiques ne conduit donc pas à un résultat satisfaisant. Il manque une information sur la structure locale du terrain qui guiderait l'interpolation.

[Brändli et Schneider, 94] proposent en conséquence une démarche adaptative pour la construction d'un MNT, qu'ils qualifient de haute fidélité, composée de deux phases principales :

- la modélisation pendant laquelle un MNT initial est créé à partir des données de l'échantillon ;

---

[1] Les phénomènes naturels n'apparaissent pas et ne se produisent pas d'une manière régulière et constante dans le temps et dans l'espace.

- · l’analyse de la surface initiale (détection des erreurs, extraction de paramètres) pendant laquelle les insuffisances du modèle correspondant sont décelées, qui pourront être par la suite corrigées.

Cette démarche de principe permet l’application de méthodes pour la construction et l’amélioration des surfaces définies par un MNT afin de les adapter au caractère sporadique du terrain. Des sous-tâches déterminent chaque état successif du MNT.

Création / manipulation

L’échantillonnage est le processus basique d’acquisition des données (cf. infra 4.2). L’échantillon sert de donnée en entrée pour la création des surfaces successives au moyen de triangulation (cf. infra 3.3.2.2) et d’interpolation.

Interprétation

Une analyse des erreurs par identification numérique ou inspection visuelle des données initales doit être effectuée pour repérer les difficultés (cf. infra 4.1). Les parties bruitées doivent être rééchantillonnées ou ajustées via des corrections spécifiques.

Les modèles de courbes de niveau représentent une source courante de données initiales pour la construction de MNT puisque ces isohypses proviennent directement de la cartographie traditionnelle (cf. supra 2.2.2 et infra 4.2). La difficulté pour modéliser une grille à partir de courbes repose sur l’inégalité de la distribution de l’information, limitée aux courbes. Les méthodes d’interpolation décrites précédemment construisent un modèle du terrain par l’utilisation d’une formule mathématique appliquée plus ou moins localement. L’idée de [Brändli et Schneider, 94] est qu’un lot de courbes de niveau contient implicitement une information apte à supporter l’interpolation. Cette information consiste en lignes structurantes (lignes de rupture de pente caractérisant le terrain) et trajectoires (ici, chemin de plus grande pente). Si ces lignes sont extraites avant la modélisation et prises en compte lors de l’interpolation, elles contribuent à en améliorer le résultat. L’information initialement limitée aux courbes de niveau est étendue à toute la surface. La densité du réseau ainsi obtenu assure que la surface est définie par plus d’une seule courbe voisine et permet la reproduction correcte des formes géomorphologiques. Le choix d’une fonction d’interpolation adéquate sur les trajectoires inclut des contraintes hydrologiques. Cependant, le résultat ne peut pas être considéré comme exact mais comme une approximation qui intègre une connaissance sur le terrain. L’échantillonnage de la topographie fait qu’il existe toujours un certain degré d’incertitude sur la forme du relief entre les données.

Une autre approche consiste à utiliser l’outil *grille élastique* (introduit par [Masson d’Autume, 78]). Une telle démarche est décrite dans [Moreau, 92] et [Julien, 94]. Elle exploite l’interpolation par moindres carrés avec pondération (méthode 8) où $H(x_i, y_i) = z(s_i)$ est une formule d’interpolation bilinéaire (méthode 4). La grille élastique rend à la fois compte des valeurs initiales de départ et elle fournit, en l’absence d’informations sur l’allure du terrain entre les valeurs connues, un MNT aussi lisse que possible. D’une part, chaque nœud de la grille peut coulisser verticalement et les nœuds proches d’une altitude initiale connue sont contraints de ne pas trop s’en éloigner. D’autre part, les articulations entre les côtés rigides des mailles sont élastiques. En l’absence de force extérieure, les côtés sont maintenus alignés. Par réaction, les nœuds de la grille se fixent à une altitude influencée par celles des points de l’échantillon. L’ensemble se place en position d’équilibre et définit le MNT cherché, les côtés étant les plus alignés possible. Cette approche a l’intérêt de prendre simultanément en compte les données initiales et des données extérieures, tout en lissant les zones non renseignées.

Le processus global d'interpolation, que nous avons utilisé pour construire un MNT à grille carrée à partir d'un jeu de courbes de niveau, procède par étapes successives. L'enrichissement par la prise en compte d'éléments structurants du relief et le lissage par la grille élastique éliminent la plupart des artefacts. Les fonds de thalwegs sont améliorés, les plats mieux tenus, les falaises et les vallées encaissées mieux approchées et il y a moins de problèmes de faux rebonds.

- Dans un premier temps, une approximation brutale des polylignes source construit un MNT brut, calculé par interpolation linéaire (méthode 1) selon la plus grande pente, ce qui évite la création de faux rebonds au pied des montagnes, itérativement dans les huit directions privilégiées, afin de propager l'information existante dans les zones inaccessibles telles que les vallées encaissées.
- Ensuite, un lissage par la grille élastique a lieu en n'attribuant un poids qu'aux points proches des courbes de niveau et d'autant plus fortement que la pente est faible, pour compenser le manque d'information dans les régions plates.
- L'utilisation du réseau hydrographique par intersection avec les courbes de niveau accroît l'information au fond des thalwegs dans les zones de forte pente pour résoudre le problème des vallées encaissées.
- La possibilité d'adapter une pondération selon l'importance des points permet de mettre en valeur ceux qui participent à la structure du terrain ainsi que leurs proches voisins (cf. partie III).

Plus concrètement, il existe un algorithme de grille élastique déjà implémenté au service de la recherche de l'IGN à partir duquel a été construit notre MNT test (cf. infra 4.4). Une telle approche prend en compte des caractéristiques du terrain (réseau hydrographique) : les réseaux de crêtes et de thalwegs extraits automatiquement, l'estompage de la zone et les courbes de niveau dérivées sont visuellement satisfaisants.

3. 3. Représentations classiques

Les représentations des données numériques altimétriques les plus communément utilisées dans les SIG pour résoudre les problèmes de cartographie automatique, se fondent sur les concepts de lignes d'isovaleur et de tessellation de l'espace. Dans ce cadre, il ne s'agit plus de présenter à l'œil humain une image du paysage mais de modéliser un ensemble de données d'une manière cohérente et adaptée au phénomène qu'elles reproduisent. Un MNT n'est d'ailleurs qu'un reflet des phénomènes naturels puisqu'il n'est qu'une représentation numérique de bas niveau d'une partie de la surface terrestre (champ de valeurs donnant la hauteur de la topographie : cf. supra 3.1.2). Cette dernière remarque souligne la pauvreté d'un MNT en information géographique qui complète la définition mentionnée par [Weibel et Heller, 91:269] : *a DTM may be understood as a digital representation of a portion of the earth's surface*.

Ce groupe de modèles, les MNT, est le plus connu et le plus facile à manipuler. Chacun est formé d'un échantillon et d'une méthode d'interpolation, l'échantillon pouvant être une grille, des courbes de niveau… Par définition, un MNT est une description numérique de la forme et de la position de la surface du sol, il ne décrit donc pas les objets qui occupent cette surface (cours d'eau, routes, végétation, bâtiments…[1]) [Julien, 94]. Nous verrons, d'ailleurs, au chapitre 4 le rôle du sursol dans l'évaluation de la qualité d'un MNT. Nous exposons brièvement dans les paragraphes qui suivent les connaissances actuelles en matière de modèles numériques.

3. 3.1. Courbes de niveau

La modélisation d'un jeu de données numériques sous forme de courbes de niveau se rapproche de la représentation cartographique explicitée dans le paragraphe 2.2.2. Une courbe de niveau est le lieu des points d'une surface ayant même altitude. Formellement, la définition d'un modèle de courbes de niveau est donnée par [Julien, 94:42] :

Définition. C'est un échantillonnage du terrain, suivant la direction verticale, où chaque courbe de niveau est décrite numériquement par une ligne polygonale p_1p_2…

Graphiquement, pour une altitude donnée, une courbe de niveau est une polyligne joignant par des segments de droite les points de changement de direction. Un modèle de courbes de niveau est, par conséquent, constitué de une ou plusieurs listes de points (x, y) données pour chaque altitude z. La distance entre deux points successifs dépend de la forme de la courbe localement, elle est choisie suffisamment petite pour que le segment délimité par les deux points soit assimilable à la portion de courbe concernée.

[Lam, 83] mentionne deux approches différentes pour la construction d'un modèle numérique de courbes de niveau à partir d'un ensemble de points. La première commence par le calcul d'une triangulation basée sur l'échantillon de points (la description de la triangulation irrégulière se trouve plus loin, cf. infra 3.3.3.1). Les contours sont ensuite extraits par interpolation dans les triangles. La seconde approche interpole l'échantillon de points en un maillage et trace ensuite les contours à travers la grille des valeurs interpolées.

La modélisation de la surface topographique par des courbes de niveau donne un modèle de données initial continu le long de chaque courbe mais non dense sur tout l'espace. Un désavantage est qu'un tel modèle n'est pas optimal pour le calcul des pentes ou pour le calcul d'estompage automatique [van Kreveld, 94]. Contrairement, à une tessellation où $H : (x,y) \rightarrow z$, on a ici :

$$z \rightarrow L(z) = \{(x, y) \,/\, alt(x, y) = z\}.$$

Nous concluons avec la remarque de [Rost, 87:229] : *Quantitative terrain analysis based solely on contour lines is difficult, time consuming and often ineffective.*

3. 3.2. Tessellation régulière

Dans un premier temps, le principe de la construction du modèle de base réside dans la constitution à partir de données source d'un nouveau modèle composé de tesselles qui partitionnent l'espace planimétrique. [Chassery et Montanvert, 91:24] rappellent que les polygones qui composent une tessellation régulière doivent répondre aux deux propriétés suivantes :

---

[1] En cartographie numérique (cf. partie V), une démarche de généralisation consiste à traiter les différentes couches d'information séparément puis à gérer l'interaction entre les objets cartographiques.

Propriété 1. Les polygones sont convexes et réguliers.

Propriété 2. Les polygones n'ont que leurs sommets en commun.

Les caractéristiques intéressantes d'un tel pavage sont par conséquent la régularité (distribution régulière de l'information sur tout l'espace), l'isotropie[1] (on verra dans la partie III que cette propriété n'est pas forcément recherchée) et la simplicité (pour les calculs d'extraction de l'information géomorphologique). Dans ce contexte, il existe trois partitions courantes du plan : par triangles, par rectangles ou par hexagones, pour lesquelles il existe une relation entre le nombre n de côtés d'un polygone et le nombre k de polygones qui se rencontrent en chaque sommet :

$$k = \frac{2n}{n-2}, \text{ pour } k > 2 \text{ et } n > 2.$$

En ce qui concerne la construction d'un modèle de terrain, les formes des tuiles adoptées pour partitionner le plan les plus souvent rencontrées sont le carré (ou rectangle) et le triangle.

3. 3.2.1. Pavage rectangulaire

Dans le cas d'un échantillonnage régulier du terrain, z_{cl} est une famille d'altitudes formant un réseau à mailles rectangulaires, où c décrit les colonnes et l les lignes du modèle :

$z_{cl} = (c.h, l.k)$, (h,k) sont les pas du réseau.

Il ressort qu'un MNT régulier est totalement déterminé par sa matrice des altitudes z_{cl} et sa fonction d'interpolation. La méthode d'interpolation détermine la forme de la surface et, en cela, les coefficients z_{cl} dépendent directement de la fonction adoptée (cf. supra 3.2).

3. 3.2.2. Pavage triangulaire

Il est possible aussi de construire un MNT à facettes triangulaires, nommé alors *triangulation*, à partir d'une famille de points $M_i = (m_i, z_i)$, où $m_i = (x_i, y_i)$ pour $i = 1 \ldots n$. Pour cela, on suppose que l'on connaît sur la surface $z = 0$, une famille de triangles T_s, où $s = 1 \ldots r$, telle que les propriétés ci-dessous soient vérifiées :

· les intérieurs des triangles sont disjoints ;

· les sommets des triangles sont des points m_i ;

· chaque point m_i est un sommet de triangle et

· aucun triangle n'a une aire nulle.

Définition. Etant donné un ensemble fini de points, une triangulation est un ensemble de segments qui joignent deux à deux les points, qui ne se coupent pas et dont chaque face est un triangle.

On connaît une loi qui associe à chaque point m du domaine D couvert par les triangles, le numéro des triangles s_m contenant m : $D = T_1 \cup \ldots \cup T_r \rightarrow \{1 \ldots r\}$. Pour tout triangle du domaine D, $T_s = (m_i, m_j, m_k)$, le plan affine $h_s(m) = a_s.x + b_s.y + c_s$ vérifie : $h_s(m_i) = z_i$, $h_s(m_j) = z_j$, $h_s(m_k) = z_k$.

---

[1] Un aspect particulier de la continuité du terrain est sa propriété d'anisotropie. L'isotropie est vérifiée, en géomérie, lorsque les propriétés sont indépendantes de la direction : la mesure de la distance à partir d'un point ne varie pas avec la direction [Laurini et Thompson, 94:90].

La fonction paramétrique H est alors donnée par :

$$H(m) = \sum_{1 \leq s \leq r} \delta_{s,\, s_m} . h_s(m) \text{ avec } \begin{cases} \delta_{s,\, t} = 0 \text{ si } s \neq t \,; \\ \delta_{s,\, s} = 1. \end{cases}$$

3. 3.3. Tessellation irrégulière

Un maillage régulier de l'espace, qu'il soit rectangulaire ou triangulaire, facilite les traitements mais la densité des points qui le composent ne s'adapte pas à la complexité du terrain. Le concept de tessellation irrégulière suit cette idée : le nombre de tesselles sera d'autant plus élevé que le terrain sera accidenté, puisque la quantité d'informations contenues dans le modèle devra alors être plus importante.

3. 3.3.1. Triangulation irrégulière

Le réseau irrégulier à facettes en forme de triangles est communément appelé TIN (pour *Triangulated Irregular Network*) dans la littérature anglo-saxone et francophone. Il est composé d'un ensemble de triangles dont les sommets correspondent généralement aux points d'échantillonnage initial.

L'ensemble des triangulations possibles à partir d'un ensemble de points est vaste. Toute triangulation étant arbitraire, le problème est de choisir les règles qui conviennent le mieux. Comme le soulignent [Falcidieno *et al.*, 92:247] : *In surface approximation problems, an acceptable triangulation is the one in which most of the triangles are as equiangular as possible, in order to avoid long thin triangles*. Le rapprochement d'une triangulation vers une équiangularité des triangles permet de contrôler les distances maximales entre chaque point intérieur et les sommets du triangle qui le contient. Cette propriété est vérifiée par la triangulation la plus couramment utilisée, c'est-à-dire la triangulation de Delaunay, où l'on impose que tout triangle $T_s = (m_i, m_j, m_k)$ $(s = 1 \ldots r)$ réponde à la propriété formalisée par :

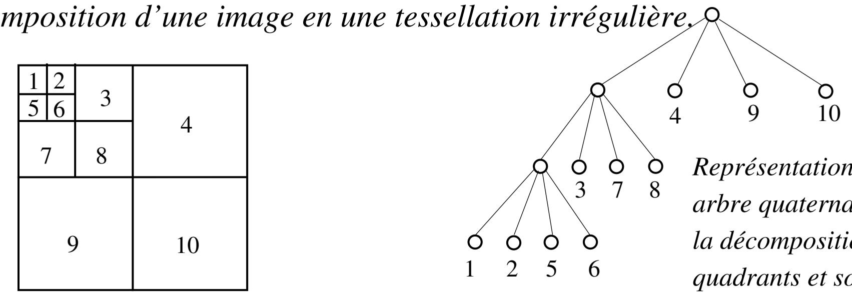
Propriété. Le disque ouvert circonscrit à un triangle $T_s = (m_i, m_j, m_k)$ *ne contient aucun autre point* m_l.

Ce type de représentation permet une incorporation aisée d'éléments structurants du terrain, tels que les lignes qui suivent les vallées ou les crêtes, et la densité variable des points reflète clairement la rugosité du terrain. Ainsi, l'adjonction d'éléments significatifs de la surface à modéliser permet de construire une triangulation contrainte. Certains côtés des triangles doivent être des tronçons de ces éléments ou bien les points stratégiques ajoutés imposent de prendre en compte de nouveaux sommets dans la construction des triangles. Mais, les relations topologiques doivent être calculées explicitement (par opposition au maillage régulier) et, de plus, ce type de modèle est beaucoup plus complexe et difficile à traiter qu'une grille régulière [Weibel et Heller, 91].

3. 3.3.2. Arbre quaternaire

Depuis plusieurs années, les spécialistes en SIG s'intéressent aux arbres quaternaires (*quadtrees*). L'arbre quaternaire est défini comme une structure de données spatiales fondée sur un découpage carré récursif de l'espace. La décomposition régulière de l'image en quadrants et sous-quadrants se poursuit jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit vérifié par la dalle. L'arbre quaternaire est dit parfait si le critère d'arrêt est : tous les pixels d'une dalle ont la même valeur. Cette décomposition est représentée correctement par un arbre de degré 4 et de profondeur n, où n est la résolution (cf. figure 9).

Figure 10 : Décomposition d'une image en une tessellation irrégulière.



Représentation par un arbre quaternaire traduisant la décomposition en quadrants et sous-quadrants.

Le principe d'un tel codage se fonde sur la propriété de récursivité du pavage carré, c'est-à-dire qu'il est décomposable à l'infini au moyen des mêmes tesselles, mais de plus petite taille [Chassery et Montanvert, 91:30]. Il a aussi été appliqué à la décomposition de l'espace en triangles (QTM pour *quaternary triangular mesh*) [Dutton et Buttenfield, 93].

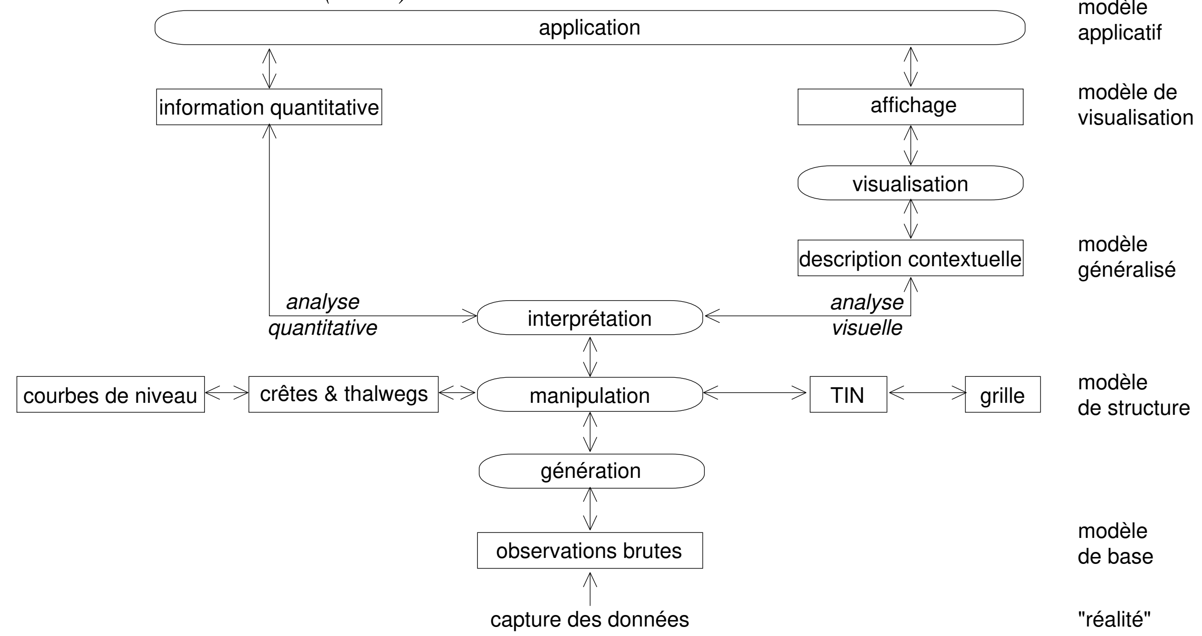
Des auteurs ont étudié l'adaptation et l'adéquation d'un tel modèle pour traiter des surfaces géographiques [Cebrian *et al.*, 85][Mark, 86]. Ce type de représentation a beaucoup d'avantages pour traiter des données spatiales d'une manière cohérente et adaptée à la densité d'information contenue dans le modèle, mais il devient difficile à utiliser pour traiter des surfaces continues telles qu'une surface topographique (cf. partie III). En effet, l'information étant répartie d'une manière uniforme dans un MNT à maille régulière, la transformation en un arbre quaternaire n'est pas triviale. Et, d'autre part, une telle partition ne repose pas sur les éléments structurants du terrain (par opposition aux TIN).

Conclusion

A partir de courbes de niveau ou bien d'un échantillon de points cotés, une surface mathématique peut être construite (MNT), donnée par l'ensemble des observations quantitatives et par une fonction qui restaure la continuité entre ces éléments (interpolation). Entre autres parce que les surplombs et les failles verticales sont rares dans la nature, les MNT (grille régulière, TIN, courbes de niveau) correspondent à un modèle de champ : pour chaque couple de coordonnées (x, y), il y a une et une seule valeur de z [Brändli et Schneider, 94].

Le MNT fournit une base intéressante pour l'élaboration d'une modélisation plus riche en connaissances géomorphologiques, dépendante du but (hydrologique, géomorphologique). Un modèle à mailles carrées présente une structure simple dans laquelle la distance entre deux points est toujours connue et, si l'on a besoin des valeurs entre deux points, une fonction d'interpolation permet de les approximer. Par contre, sa résolution uniforme limite la variété des formes que l'on peut y détecter. Les études en géomorphométrie, qui sont exposées dans la partie III, montrent que les formes spécifiques du paysage ont lieu seulement pour un intervalle d'échantillonnage limité. *Because sampling of rectangular grids does not occur at geomorphologically significant points (i.e. surface-specific), but rather at a fixed sampling interval (i.e. surface-random), the DTM can only* *represent a limited range of features* [Weibel et DeLotto, 89:30]. En terme de praticabilité, il existe un grand nombre de méthodes aptes à représenter des paramètres à nature géomorphologique qui s'adaptent à une structure régulière (cf. partie III).

Figure 11 : Architecture du système de modélisation numérique du terrain selon Robert Weibel et Martin Heller (1990).



Il est impossible de déterminer une structure de données qui soit supérieure aux autres. Par contre, un système souple doit permettre de basculer d'une modélisation à une autre (d'une structure régulière à une structure reposant sur les éléments structurants du terrain) comme le montre l'architecture du système de modélisation numérique proposée dans [Weibel et Heller, 90] (cf. figure 10). Nous avons choisi de partir d'une structure de données qui soit un maillage régulier de l'espace comme structure de données pivot, à partir de laquelle des modélisations complémentaires sont déduites et des informations particulières sont extraites.

4 Base de données altimétriques

Dans le cadre de nos travaux, le type de carte que nous cherchons à reproduire à l'aide d'un procédé automatique est topographique (l'un des produits dérivés du diagramme du paragraphe 2.4). Par définition, la topographie est la figuration des formes du terrain sur une carte. Ainsi, nous cherchons à représenter planimétrie et orographie par approximation de l'univers nominal dans une base de données.

Définition. L'univers nominal est le contenu virtuellement parfait de la base de données géographiques, à jour et exhaustive, sans aucune erreur ou incohérence topologique, respectant toutes les spécifications, et ne commettant aucune erreur sémantique ou géométrique.

La représentation de l'information altimétrique sous forme de polylignes est fréquemment adoptée car, d'une part, elle demande une capacité mémoire réduite et, d'autre part, les lignes de contour (ainsi enregistrées) proviennent souvent de la numérisation directe d'une planche cartographique des courbes de niveau.

D'autres processus d'acquisition des données altimétriques existent (cf. infra 4.2). En effet, le terrain nominal fournit une information continue qui est appréhendée soit par levé des courbes sur le terrain, soit par photographie aérienne, soit par prise de vue satellite, le tout formant une source de données variées (cf. diagramme du paragraphe 2.4). Le levé des courbes fournit une planche d'isohypses, qui sont ensuite scannées et vectorisées pour former un modèle numérique de courbes de niveau. La mission photographique fournit un couple stéréoscopique analogique ou, par scannage des photographies, un couple stéréoscopique numérique. Par stéréorestitution de ces couples, on obtient un modèle de courbes de niveau. Par corrélation d'un couple stéréoscopique numérique, on obtient un échantillon de points.

Afin d'utiliser les données altimétriques au mieux et en tenant compte du bruit inhérent aux MNT, il est utile de disposer de méta-données, en particulier de qualité, relatives à la base de données d'origine (opération de contrôle du diagramme en 2.4, cf. infra 4.1). Cette présentation de l'évaluation de la précision des données nous permettra alors d'introduire la notion de fiabilité des MNT (cf. infra 4.3).

4. 1. Qualité

D'une manière générale, la définition [ISO 8402, 94] de la qualité est :

Définition 1. La qualité est l'ensemble des caractéristiques d'une entité qui lui confèrent l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés ou implicites.

La qualité d'une base de données géographiques répond à des normes bien précises et, en raison de son coût de production, les concepteurs projettent toujours l'utilisation d'une même base de données pour différentes applications. Une partie de la qualité, la qualité interne (définition extraite de [PQBD, 95]), peut donc être évaluée indépendamment de son utilisation. La qualité externe décrit, quant à elle, l'adéquation des spécifications aux besoins de l'utilisateur.

Définition 2. La qualité interne est l'ensemble des propriétés et caractéristiques d'un produit ou service qui lui confère l'aptitude à satisfaire aux spécifications de contenu de ce produit ou de ce service.

La définition de la qualité interne peut alors se traduire par cette autre formulation : *l'adéquation entre l'univers nominal et le jeu de données effectivement produit* [Vauglin, 96]. Cependant, cette comparaison suppose l'existence d'un terrain nominal unique alors qu'en fait, cette unicité ne se vérifie pas car plusieurs représentations du terrain réel correspondant aux mêmes spécifications (floues) sont admissibles.

L'expression générale de la qualité, pour une base de données, se traduit par des aspects qualitatifs et quantitatifs à un instant donné. Une composante d'actualité, traduisant le décalage entre le jeu de données produit et l'univers nominal à un instant ultérieur, peut être évaluée mais ce sont les autres composantes que nous décrivons ici, tout en sachant qu'il existe des interactions entre les différentes composantes : généalogie, cohérence logique, précision géométrique, exhaustivité et précision sémantique. Afin d'évaluer la qualité des données numériques d'une base de données, et de les corriger le cas échéant, il faut se donner des outils spécifiques de mesure décrits dans les paragraphes qui suivent [PQBD, 95]. Dans ce but, on doit disposer d'une référence dont le degré de confiance est connu et supérieur à celui des données à tester. Cependant, les mesures ne sont, en général, pas effectuées à partir de lot complet de données mais calculées sur un échantillon (problème d'évaluation).

4. 1.1. Généalogie

La généalogie décrit l'histoire des données. Elle fournit une description des sources et méthodes d'acquisition des données, des opérations appliquées sur ces données (changement de système de référence, passage du mode maillé au mode vecteur…) et des organismes responsables.

Ainsi, la qualité des MNT dérivés de la BD ALTI® de l'IGN est directement liée à l'existence et à la bonne définition des courbes de niveau de la base de données. La source des isohypses varie selon les régions, la saisie provient en effet soit d'une numérisation manuelle de documents au 1:25 000 et au 1:50 000, soit d'un scannage de documents au 1:25 000 et au 1:50 000, soit d'une restitution photogrammétrique au 1:30 000 et au 1:60 000 (la description des techniques d'obtention est donnée au paragraphe 4.2).

4. 1.2. Cohérence logique

La cohérence logique d'un jeu de données s'exprime par le degré de cohérence interne des données selon les règles de modélisation et les règles inhérentes aux spécifications de contenu du jeu de données.

Les règles d'intégrité, qui sont définies dans le schéma conceptuel des données ou issues des spécifications de contenu, permettent de formaliser des règles de cohérence. D'un point de vue qualitatif, l'un des principes de base est que les courbes de niveau saisies ne doivent pas se croiser. Ce qui implique qu'un à-pic ou un surplomb seront traités en partage de primitive, c'est-à-dire que plusieurs courbes très serrées (à-pic) ou devant se croiser (surplomb) auront en commun un même tronçon de courbe. Parfois une contrainte stipulée dans les spécifications demande aussi que les courbes ne présentent aucune discontinuité.

Si la base de données se compose de plusieurs thèmes, une comparaison s'impose afin de valider l'harmonie entre ces couches. Par exemple, le réseau hydrographique coule-t-il au fond des thalwegs [Chatelain, 92] ? Les routes de montagne serpentent-elles entre crêtes et thalwegs [Plazanet, 96] ?

Prenons l'exemple de la BD TOPO® produite à l'IGN. Les objets du thème *altimétrie* sont physiquement indépendants du reste de la base de données puisqu'ils sont gérés dans une couche isolée. L'équidistance des courbes de niveau de cette couche peut être de 5, 10 ou 20 mètres selon la feuille ; les valeurs d'altitude sont données avec une résolution décimétrique. Ce thème regroupe aussi un ensemble de points cotés, de l'ordre d'une dizaine par km², symbolisant sur une carte des lieux significatifs, tels que les sommets, cols et cuvettes, ou se situant sur le sol naturel mais sur aucun détail remarquable. Un exemple du maintien de la cohérence logique implique que la polyligne entourant un point coté *sommet* ait une valeur d'altitude inférieure.

4. 1.3. Précision géométrique

La précision géométrique permet d'évaluer les différences entre les positions contenues dans le jeu de données et les positions sur le terrain nominal (estimées par une mesure sur la source de contrôle choisie). On distingue la précision de position ponctuelle, linéaire, surfacique et la précision de forme, la précision absolue (par rapport à une référence sûre) et la précision relative (entre deux thèmes dont on ne connaît pas la précision).

Une méthode possible d'évaluation de la précision relative ponctuelle consiste à comparer certains thèmes extraits de la référence, tels que l'altimétrie, les voies de communication routière, l'hydrographie, la végétation, pour lesquels l'altitude au sol est connue avec l'altitude des courbes de niveau que l'on cherche à valider. L'intersection entre le thème de référence et les courbes de niveau est calculée, fournissant un ensemble de points à tester. On estime alors la répartition statistique des incertitudes en calculant l'erreur quadratique moyenne, ainsi que les écarts extrêmes entre l'altitude d'un point provenant du modèle numérique et celle d'un point issu de la référence [Beauvillain *et al.*, 95].

Pour évaluer la cohérence du thème *altimétrie* par rapport aux autres thèmes de la base de données à l'aide de mesures de précision ponctuelle relative, on calcule l'écart moyen et une erreur quadratique estimée par le paramètre emq du z entre ce thème et un autre thème de la base de données pour lequel l'altitude est connue :

$$\text{écart moyen} = \frac{\sum (z_{\text{altimétrie}} - z_{\text{thème}})}{\text{nombre de points}} \qquad \text{et emq} = \sqrt{\frac{\sum (z_{\text{altimétrie}} - z_{\text{thème}})^2}{\text{nombre de points}}}$$

Par exemple, il existe un thème spécifique orographie qui contient les lignes de crête, coulées d'éboulis, bords de crevasse, blocs rocheux, fonds de cuvette, zones de glacier, zones de moraines, zones d'éboulis, zones de ravine, zones de dune. Superposer les thèmes *altimétrie* et *orographie* permet d'établir une estimation des taux de déviation altimétrique qui apparaissent au sein de la base.

Les travaux de [Vauglin, 97] ont étudié les questions liées à la qualité de l'information de localisation des données géographiques numériques (qualité géométrique) restreintes aux objets ponctuels et linéaires. Le lecteur trouvera des outils de quantification des écarts de géométrie entre deux objets de même dimension topologique.

Pour l'instant, il n'existe pas de technique réellement surfacique pour évaluer la précision de position surfacique. D'ailleurs, elle n'est pas utile dans le cas d'une base de données altimétriques. Les courbes de niveau délimitent des surfaces lorsqu'elles sont fermées mais cette notion de surface n'est pas légitime puisqu'elle ne correspond pas à la surface d'un objet topographique, il faudrait pour cela que la surface soit définie en 3D.

En complément, la précision géométrique de l'altimétrie peut s'évaluer par comparaison avec une référence (précision absolue). En plus de l'erreur moyenne quadratique (emq) qui croît lorsque la dissemblance entre les deux réalisations de mesures du même phénomène augmente, il faut compléter l'évaluation de la qualité géométrique par d'autres mesures comme, par exemple, certaines propositions de [Wood, 96] (cf. encadré ci-dessous) :

- le ratio a de la précision peut être utilisé pour une comparaison à différentes échelles spatiales et entre différentes surfaces d'approximation ;
- les estimateurs de la moyenne $d\,\bar{z}$ et l'écart type σ permettent de mesurer une tendance globale sur tout le MNT. Une moyenne non nulle indique que surestimation et sous-estimation des altitudes ne sont pas égales et que la précision globale du MNT peut être améliorée en soustrayant la déviation moyenne de toutes les valeurs d'altitude (valable lorsque la référence est le terrain nominal) ;
- les estimateurs des moments d'ordre supérieur (*skewness* s et *kurtosis* k) peuvent fournir une description plus fine de la distribution des incertitudes géométriques ;
- enfin, l'histogramme des incertitudes permet, entre autres, de visualiser des incohérences internes.

$$\mathrm{emq} = \sqrt{\frac{\Sigma\,(z_i - z_j)^2}{n}} \qquad a = \sqrt{\frac{\Sigma\,(z_i - z_j)^2}{\Sigma\,(z_i - \bar{z}_i)^2}} \qquad d\,\bar{z}_{ij} = \frac{\Sigma\,(z_i - z_j)}{n} \qquad \sigma = \sqrt{\frac{\Sigma\,[(z_i - z_j) - d\,\bar{z}_{ij}]^2}{n}}$$

z_i et z_j sont deux valeurs d'altitude de points homologues

n est le nombre de couples de valeurs d'altitude

$\bar{z}_i$ est l'altitude moyenne des i

$d\,\bar{z}_{ij}$ est la déviation moyenne entre les modèles

σ est l'écart type de la déviation entre les modèles

$$s = \frac{\Sigma\,[(z_i - z_j) - d\,\bar{z}_{ij}]^3}{n\sigma^3} \qquad k = \frac{\Sigma\,[(z_i - z_j) - d\,\bar{z}_{ij}]^4}{n\sigma^4}$$

4. 1.4. Exhaustivité et précision sémantique

L'exhaustivité représente la conformité de la présence ou de l'absence des éléments (objets, attributs ou relations) du jeu de données par rapport au terrain nominal. La précision sémantique est la conformité des valeurs des éléments (classification et relations entre les objets, codification des attributs) du jeu de données avec les valeurs de leurs homologues dans le terrain nominal.

L'exhaustivité est mesurée par le taux de déficit et le taux d'excédent. La précision sémantique est mesurée par le taux de confusion et le taux d'accord. Dans les définitions qui suivent, on considère que l'unité est le terrain nominal, ce qui soulève parfois des problèmes de comptage d'objets.

Soient N_i le nombre d'éléments de la classe C_i du terrain nominal, n_j le nombre d'éléments de la classe C_j du jeu de données, N_{i0} le nombre d'éléments de la classe C_i du terrain nominal sans homologue dans le jeu de données, n_{0j} le nombre d'éléments de la classe C_j du jeu de données sans homologue dans le terrain nominal. Alors, le taux de déficit de la classe C_i et le taux d'excédent de la classe C_j sont définis par :

$T_{déf} = \frac{N_{i0}}{N_i}$ et $T_{exc} = \frac{n_{0j}}{n_j}$.

Soit N_{ij} le nombre d'éléments de la classe C_i du terrain nominal appariés à un élément de la classe C_j du jeu de données. Le taux de confusion entre les classes C_i et C_j $(i \neq j)$ et le taux d'accord de la classe C_i sont donnés par les rapports :

$T_{conf} = \frac{N_{ij}}{N_i}$ et $T_{acc} = \frac{N_{ii}}{N_i}$.

Dans le cas de la BD TOPO®, on vérifiera par exemple que l'ensemble des courbes normales, celles dont l'altitude est multiple de l'équidistance, est exhaustif à 100%, autrement dit, qu'il n'en manque aucune. Le taux de confusion correspond au pourcentage d'erreurs commises sur l'attribution d'une classe à chaque courbe, c'est-à-dire il indique s'il y a confusion entre des courbes maîtresses, des courbes normales ou des courbes intercalaires. Le taux d'accord donne le décalage entre les cotes des courbes de niveau et les cotes des courbes du terrain nominal. Par exemple, si toutes les courbes sont décalées de 1m, le taux de désaccord sera de 100%. Cependant, ce n'est pas une méta-donnée intéressante puisque l'utilisateur préférera connaître la valeur de la déviation, c'est-à-dire la moyenne des erreurs altimétriques (et planimétriques) ou l'emq.

Conclusion

Un problème incontournable des bases de données géographiques est l'évaluation de leur qualité interne. *Techniquement, la mesure de la position d'un objet géographique n'est pas réalisée avec une précision illimitée. De même, l'expérience montre qu'il est impossible d'éliminer avec certitude toutes les erreurs humaines* [Vauglin, 97:25]. La connaissance de la fiabilité des résultats des opérations appliquées sur un jeu de données en fonction de la qualité géométrique de ces données suppose que l'on connaisse déjà le comportement des incertitudes géométriques. La modélisation des incertitudes géométriques d'un MNT sort du cadre de cette thèse. Toutefois, la manipulation de MNT entraîne des transformations et des propagations spatiales que l'on cherche à estimer, notamment après une simplification de la surface altimétrique par une opération de généralisation (cf. partie V). L'évaluation de la qualité interne d'un MNT généralisé peut s'effectuer par évaluation de la précision géométrique absolue en prenant comme référent le MNT source.

4. 2. Techniques d'obtention

Les objets géographiques qui doivent être présents dans la base de données sont précisés avant le processus de saisie, ainsi que la structure de stockage. Autrement dit, les deux composantes essentielles de l'information véhiculée par chaque objet, à savoir l'information de position et de forme et l'information descriptive factuelle, sont déterminées par une modélisation [Vauglin, 96]. Pour saisir ces objets géographiques dans une base de données spécifiée, il existe alors différents procédés techniques. La caméra numérique est un nouveau moyen de capture de la donnée brute mais elle n'est, pour l'instant, qu'au stade de prototype [Jurvillier et Thom, 96]. De même, de nouvelles perspectives s'ouvrent sur des méthodes telles que l'altimétrie laser, l'interférommétrie

SAR (*synthetic aperture radar*), *etc.* qui ne sont pas décrites ici. Donc, seules les techniques les plus classiques et utilisées largement d'un point de vue opérationnel à l'IGN sont exposées dans ce qui suit.

Rappelons tout d'abord que la numérisation des données terrain nécessite le passage par trois étapes.

- Dans un premier temps, l'échantillonnage lui-même remplace un signal continu $f(x, y)$ (dans notre cas, les ondulations du terrain) par une suite de mesures. Pour la clarté de l'explication, dans le cas simplifié d'un signal à une dimension, la transformation s'écrit :

  $f(x, y) : x, y \in |R^2 \longrightarrow (f(n\delta))_{n \in \mathbf{Z}}$, où δ est la période d'échantillonnage.
- Ensuite, la quantification aboutit à une discrétisation des valeurs $f(n\delta)$ en les approchant par un multiple entier d'une valeur $Q \in |R : m.Q, m \in |N$.
- Enfin, le codage proprement dit consiste à appliquer une transformation bijective sur les entiers $m_0, m_1, m_2 \dots$ telle que la suite image $p_0, p_1, p_2 \dots$ puisse être représentée sur un nombre d'octets minimum.

Ainsi, il est possible de stocker un échantillon régulier ou irrégulier (par exemple, pour le stockage par courbes de niveau) de points qui, par interpolation, fournira un MNT.

4. 2.1. Numérisation de planches

La numérisation de cartes permet la récupération des courbes de niveau d'une carte à l'aide d'un scanner. Lorsque le document numérisé est la planche des courbes de niveau prise isolément, et non pas la carte complète, le résultat obtenu est une matrice binaire ou une matrice de niveaux de gris, dans laquelle chaque trait a une épaisseur de plusieurs pixels. Cette image rasteur est ensuite traitée automatiquement en trois étapes [Julien, 94] :

- l'extraction du squelette de chaque trait (procédure nommée *squelettisation* dans la littérature), qui réduit chaque trait à sa ligne centrale d'épaisseur un pixel ;
- la vectorisation où chaque ligne est approximée par une ligne polygonale ;
- l'association d'une cote à chacune des courbes.

Le scannage n'est limité que par la résolution du pixel. Le bruit n'est pas tant dû au scannage qu'à la planche mère. En effet, celle-ci présente une qualité variable selon la feuille scannée et, notamment :

- les courbes de niveau peuvent être interrompues au passage des routes, en zones de forte pente, ou pour l'écriture des textes ;
- elles peuvent être trop serrées en zone de relief jusqu'à être double ou triple selon la région.

La squelettisation permet une visualisation plus aisée de la qualité du résultat du scannage. La détection des incohérences est facilitée et leur correction est en général largement manuelle.

Le scannage direct de cartes en couleurs pose d'autres problèmes. Notamment, les planches de cyan, magenta, jaune et noir sont rarement parfaitement superposées de telle sorte qu'au niveau du pixel, des bavures apparaissent. De plus, les discontinuités sont plus fréquentes, dues à l'apposition des autres objets géographiques (routes, cours d'eau…).

La saisie directe des courbes de niveau à partir d'une planche existante peut se faire aussi par suivi manuel. Grâce à un pointeur manuel, le restituteur suit les courbes en cliquant sur chaque point, le point étant un changement de direction de la courbe. Le résultat est un fichier de lignes au format vecteur, c'est-à-dire une suite de points (x, y) pour chaque isoligne de valeur d'altitude z.

Le processus de numérisation directe des courbes de niveau à partir d'un support existant engendre des erreurs, autant planimétriques qu'altimétriques, du type tremblement ou croisement des lignes. [Urabe, 92] propose une méthode en remplacement des méthodes de corrections manuelles : le calcul d'un MNT local autour de chaque point qui présente une erreur. Le résultat est satisfaisant malgré certains défauts qui apparaissent. Par exemple, la position des sommets n'étant pas fixée pendant le calcul, le dessin des courbes peut présenter certains sommets légèrement déplacés. Ces déplacements peuvent entraîner des problèmes lors de la construction de MNT maillés.

4. 2.2. Photorestitution

Placé dans un avion, un appareil photographique prend des clichés, à la verticale, à intervalle de temps régulier le long d'un axe de vol et de façon à ce que les images se chevauchent. Le stéréoscopie permet de reconstituer le relief à partir d'un couple de ces photographies aériennes de deux régions voisines. La vision en relief du paysage est obtenue en plaçant ce couple dans un appareil de restitution. Le restituteur suit alors les lignes de même altitude à l'œil et les enregistre sous forme numérique, alimentant ainsi la base de données géographiques.

Si les photographies sont de mauvaise qualité, l'opérateur a du mal à repérer les lignes d'isovaleur ou à éliminer le sursol. Des artefacts dus à des problèmes de fausse restitution apparaissent alors (valeurs d'altitude fausses…).

4. 2.3. Corrélation automatique

La corrélation automatique est un processus de stéréorestitution du relief à partir d'un couple de photographies aériennes ou d'images satellite. Mais, en zone accidentée, il n'est pas rare que de grandes disparités entre les deux photographies gênent la corrélation. Plus généralement, il faut qu'elles soient homogènes en radiométrie l'une par rapport à l'autre et avec un bon contraste (critère de gain pour des images Spot). Il existe diverses méthodes de corrélation qui produisent des modèles numériques de qualité variable.

[Beauvillain *et al.*, 95] analysent la qualité de différents procédés par calcul de la précision géométrique sur les altitudes (cf. supra 4.1.3). La première méthode testée transforme le couple d'images en géométrie épipolaire, c'est-à-dire l'homologue d'une ligne d'une image est une ligne de l'autre image. La recherche des pixels homologues se fait alors ligne épipolaire par ligne épipolaire, les mesures de parallaxe donnant l'altitude. La seconde méthode suit le même procédé mais avec élimination du sursol (bâti, arbres…). Un troisième traitement consiste à effectuer une corrélation sur les images en géométrie brute. Les points homologues sont alors validés si le résultat est satisfaisant vis-à-vis de leur voisinage et les artefacts apparus (micro-sommets ou micro-cuvettes) sont éliminés. Lorsque la détection du pic de corrélation est imprécise, par exemple en zone de faille, l'homologue n'est pas trouvé et une grille élastique (cf. supra 3.3.4) est alors utilisée pour reconstituer les parties manquantes de l'image des parallaxes et fournir un modèle numérique. La dernière méthode procède par corrélation hiérarchique. A chaque itération, un MNT est calculé avec une résolution d'image supérieure à celle de la phase précédente.

La conclusion principale de ces travaux montre que, quel que soit le corrélateur, la présence de sursol nuit à la fabrication d'un MNT de bonne qualité. En zone où le terrain est non boisé, les résultats sont satisfaisants. Il n'y a pas une méthode qui paraisse meilleure que les autres pour tous les types de régions traités [Beauvillain *et al.*, 95].

Conclusion

La base de données altimétriques BD ALTI® qui assure la couverture complète de la France provient de la conjonction de plusieurs procédés d'obtention classiques fortement corrélés aux types physiographiques de relief (cf. supra 1.3.2). Les bassins sédimentaires, la pénéplaine armoricaine ainsi que les massifs au nord du lac Léman sont couverts à partir de documents au 1:25 000. Dans cette zone, seules les données pour les ballons des Vosges sont obtenues à partir du 1:50 000. Le massif central et les chaînes récentes au sud du lac Léman sont en majeure partie restitués photogrammétriquement au 1:60 000. La partie orientale de la Garonne provient du 1:50 000. La côte Vermeille, le delta du Rhône, le Lubéron et une petite partie du Sillon rhodanien sont couverts soit par restitution au 1:30 000, soit par scannage de document au 1:25 000 (la liste des méthodes de numérisation des feuilles est extraite de [Duquenne, 92]).

4. 3. Différentes qualités de MNT

L'erreur est le produit des imperfections de l'équipement et des méthodes qui sont générées par la capture, le calcul et la présentation des données [Morad *et al.*, 96]. Le bruit inhérent à la construction de modèles numériques de terrain entraînera par la suite des traitements spécifiques afin de supprimer les artefacts qu'il engendre ou le choix d'algorithmes atténuant au maximum leurs effets néfastes (cf. partie III). Ces phénomènes d'origine artificielle proviennent donc de diverses causes : source des documents, procédé de numérisation ou de restitution du relief, choix de la méthode d'interpolation… En sachant qu'aucun MNT n'est parfait, le choix des méthodes de traitement s'établit en fonction de la faiblesse intrinsèque du modèle, de façon à minimiser l'influence de ces erreurs dans les calculs. Les erreurs qui en découlent peuvent prendre plusieurs formes : erreurs d'altitude sur des zones de plusieurs points, erreurs d'altitude sur un point, erreurs linéaires dans une direction privilégiée (souvent : nord/sud, ouest/est, nord-ouest/sud-est, sud-ouest/nord-est).

Principalement, on distingue les erreurs provenant des données source, et donc de la technique d'obtention des valeurs d'altitude, et les erreurs dues à la méthode d'interpolation.

4. 3.1. Erreurs dans les données source

La qualité des données source affecte énormément la qualité (fidélité, précision) de la surface construite à partir de ces données et des produits dérivés du MNT (carte des pentes, indices géomorphométriques, réseaux d'éléments structurants du terrain…). A ce propos, [Li, 90] décrit trois attributs qui qualifient la qualité d'un MNT : précision, densité et distribution, dont les deux derniers sont définis par la stratégie d'échantillonnage. La précision est généralement sujette à trois types d'erreurs : erreurs aléatoires, erreurs systématiques et erreurs aberrantes.

Classiquement, la variabilité d'une série de mesures d'une quantité donnée est due à des erreurs d'observation. De telles erreurs ne suivent pas de règle déterministe et sont donc considérées en tant qu'erreurs aléatoires (souvent elles suivent une distribution normale). Lors de la restitution, des erreurs systématiques ont lieu à cause d'un manque d'ajustage de l'instrumentation, de la limitation de l'observation humaine… Les erreurs aberrantes sont des fautes qui apparaissent avec une faible probabilité et interviennent souvent après corrélation automatique aux endroits où l'appariement donne un résultat aberrant. Statistiquement, il s'agit d'observations spécifiques qui n'appartiennent pas à la même population que les autres observations.

[Li, 90] supprime les erreurs aléatoires d'un jeu de données en le convoluant avec un filtre passe-bas. Les erreurs systématiques sont difficilement corrigeables à moins de recommencer le processus de saisie. La présence d'erreurs aberrantes perturbe l'apparence du MNT en agissant sur les variations spatiales présentes dans les données numériques et sur les produits dérivés d'une manière plus sérieuse que le bruit aléatoire.

Une connaissance sur les types de relief (rugosité du terrain, origine des formes, cf. supra 1) et sur la couverture du sol (végétation, eau, neige, construction artificielle) peut aider le restituteur dans son activité. En effet, la description d'une région relativement petite offre une information sur les formes du paysage et sur le sursol présents, qu'il serait intéressant de prendre en compte lors de la décision d'une stratégie d'échantillonnage, que ce soit pour le choix de la meilleure fonction de reconstrution, la détermination de l'échantillonnage optimal ou l'évaluation de la précision du MNT final.

Par exemple, nous avons vu précédemment que la végétation posait des problèmes majeurs quant à la fabrication d'un MNT de bonne qualité. Ainsi, dans une vallée encaissée en V, les arbres sont plus hauts au fond du thalweg. Ce qui a pour conséquence de rendre le fond de la vallée beaucoup plus arrondi qu'il ne l'est en réalité, autrement dit la vallée encaissée devient une auge. Lors du traitement d'un MNT bruité par ce type d'artefacts, le lit de certains thalwegs ne sera donc pas positionné exactement, la pente calculée localement sera inexacte, la dénivelée du bassin versant correspondant sera approximative. C'est pourquoi certains indices géomorphologiques, tels que les indices de concavité verticale locale, sont parfois faussés. Ils sont cependant utilisés en parallèle avec d'autres indicateurs présentés dans la partie III.

4. 3.2. Erreurs d'interpolation

Les artefacts les plus courants sont les fausses cuvettes ou micro-dépressions, altérant les MNT souvent de manière invisible lors d'une visualisation à l'échelle de résolution. C'est pourquoi les travaux traitant de l'extraction des éléments structurels du relief comportent des prétraitements inévitables, comme le lissage du MNT initial et l'élimination systématique des cuvettes. En effet, mis à part les réseaux endoréiques des régions karstiques, on estime que tous les cours d'eau se jettent dans la mer[1]. Les erreurs linéaires sont plus embarrassantes pour cette catégorie d'algorithmes car elles influencent le dessin du réseau de drainage extrait de telle sorte que certains drains (thalwegs) sont strictement parallèles entre eux et certaines confluences ont lieu suivant un angle droit, ce qui ôte tout aspect naturel au réseau. D'une manière générale, il existe des directions privilégiées dans n'importe quel algorithme d'extraction, provoquées par la forme du voisinage pris en compte pour les calculs, qui se retrouvent forcément dans le dessin des éléments caractéristiques.

Le problème de bruit inhérent aux MNT se renforce lors du choix d'algorithmes de calcul d'indices géomorphologiques et, tout particulièrement, de pente. En effet, selon la nature des erreurs contenues dans le modèle, on n'appliquera pas le même type d'algorithme. Un algorithme ne prenant en compte que peu de valeurs (points) dans ses calculs sera moins fiable si le MNT comporte des erreurs individuelles. S'il fonde son calcul sur la recherche d'un maximum, les larges écarts de valeurs fausseront les résultats en favorisant les zones bruitées. Si des directions sont privilégiées dans le calcul, les erreurs de type linéaire ressortiront. Par conséquent, le choix d'un algorithme, pour la mesure d'un indice morphologique par exemple, doit avoir lieu selon sa capacité à atténuer les effets néfastes dus au bruit.

Toutes les erreurs que nous avons mentionnées précédemment, à savoir les écarts d'altitude, le bruit, les fausses cuvettes… se regroupent dans un ensemble de points parasites, c'est-à-dire un ensemble de points n'ayant pas de réalité topographique sous-jacente. Lors des calculs, ces parasites ressortent donc plus ou moins selon la taille et la forme du voisinage adopté. Déterminer des surfaces plus pertinentes que les petites fenêtres mobiles standards, autrement dit des surfaces ayant une réalité topographique intrinsèque, permet d'atténuer davantage leurs effets néfastes. Ceci sera développé dans la partie III.

4. 3.3. Méthodes de détection des erreurs

Quel que soit le traitement envisagé, il est nécessaire de connaître la qualité du MNT manipulé afin de choisir des algorithmes adaptés. Par conséquent, nous présentons tout d'abord une méthode de détection et de correction des erreurs aberrantes introduite par [Li, 90] puis, une méthode de détection des erreurs linéaires dues à l'interpolation.

En ce qui concerne les différents types d'erreurs trouvés dans les données source, les erreurs aléatoires n'entraînent pas de problèmes majeurs car elles ne troublent pas l'apparence du MNT, ce qui n'est pas le cas des erreurs aberrantes. Parmi les erreurs dues à l'interpolation, les fausses dépressions sont traitées directement par les algorithmes d'extraction du réseau de drainage et ne posent pas de problèmes supplémentaires (cf. partie III). Par contre, nous avons constaté que des erreurs linéaires pouvaient apparaître aux endroits où l'information altimétrique est peu dense. C'est pourquoi la deuxième méthode constituera un moyen de les détecter. Enfin, certaines erreurs sont détectables visuellement et font l'objet du dernier paragraphe.

---

[1] Nous rappelons ici que nous restreignons notre étude à la France métropolitaine.

4. 3.3.1. Détection des erreurs aberrantes

L’information utilisée par [Li, 90] pour détecter les erreurs aberrantes est la pente. Le principe repose sur la détermination d’une différence entre les changements de pente (DSC pour *Differences in Slope Changes*) dans le voisinage immédiat d’un point. Pour cela, il calcule autour de chaque point P d’une grille régulière six pentes en ligne et six pentes en colonne par la valeur absolue des différences d’altitude de ses voisins en 8-connexité. A partir de ces pentes, il détermine trois changements de pente en ligne et trois changements en colonne. En chaque point, peuvent être mesurées deux DSC en valeurs relatives. S’il n’y a pas d’erreur en P alors, pour une même direction, la DSC en P et celles de ses voisins 8-connexes seront compatibles même si les valeurs absolues varient.

Le seuil de compatibilité est calculé en sommant les deux DSC dans chaque direction puis en déterminant l’erreur moyenne quadratique. Théoriquement, la valeur absolue de la somme de deux DSC dans une direction au même point diminue si le changement de pente est cohérent et augmente sinon. Si les erreurs aberrantes sont proches les unes des autres, elles risquent de ne pas toutes être détectées lors d’un seul passage de l’algorithme. Elles sont donc corrigées au fur et à mesure de façon à optimiser la détection.

La méthodologie présentée ci-dessus sert à détecter si un point présente une erreur ou non (et élimine le bruit le cas échéant). Si le seuil est dépassé par la DSC dans les deux directions en un point, le point n’est pas naturel par rapport à son voisinage et il est donc suspecté d’être une erreur aberrante.

4. 3.3.2. Détection des erreurs linéaires

Les erreurs linéaires se présentent sous la forme de trous rectangulaires orientés dans l’une des directions privilégiées par la fonction d’interpolation, généralement sur des zones relativement plates. L’information que nous avons utilisée est une statistique sur les altitudes dans un voisinage immédiat de chaque point du MNT. En chaque point P, sont calculées quatre variances :

$$\overline{z} = \frac{\sum_{k \in K, l \in L} z_{k,l}}{n}$$

$$var = \frac{\sum_{k \in K, l \in L} z^2_{k,l}}{n} - \overline{z}^2$$

où : 1· K = {-1,0,1} et L = {-1,1}
2· K = {-1,1} et L = {-1,0,1}
3· K = L = {-1,0,1} et k+l < 0 et k+l > 0
4· K = L = {-1,0,1} et k-l < 0 et k-l > 0

Elles sont comparées à un seuil en mètres entré par l’opérateur. Si les variances dépassent le seuil en un point, alors le point est étiqueté comme faisant partie d’une erreur linéaire. Le chaînage des points suspectés permet d’éliminer les points isolés et de conserver des tendances linéaires qui apparaissent très clairement sur une visualisation.

Notre méthode permet de détecter la présence d’erreurs linéaires dues à l’interpolation. Il n’y a pas lieu de chercher une méthode de correction de ces erreurs car, en fait, la meilleure solution consiste à repartir des données source et à réinterpoler le jeu de données de façon à construire un nouveau MNT.

4. 3.3.3. Détection des erreurs visualisables

[Wood, 96] présente une synthèse sous la forme de quatre tableaux qui identifient certains facteurs d'erreur ainsi que la méthode de détection des erreurs engendrées par visualisation du MNT d'origine et de produits dérivés (modèle numérique de pente ou de concavité). Ainsi par visualisation, il est possible de détecter :

- l'arrondi des vraies valeurs d'altitude en entiers car elle cause une classification par bande de 1 m et produit ainsi des terrasses près des côtes et sur les zones plates ;
- des terrasses régulières qui apparaissent sur toute la surface lorsque le MNT a été construit à partir de courbes de niveau par une méthode d'interpolation qui ne les a pas interprétées d'une manière correcte (courbes traitées comme une collection de points indépendants ou crénelures mal identifiées) ;
- un nombre insuffisant de données aux endroits topographiquement stratégiques, car cela crée une simplification des éléments par aplatissage des sommets locaux, arrondissage des crêtes et rehaussement des thalwegs ;
- un mauvais enregistrement des coordonnées planimétriques des données source, qui déséquilibre la pente le long des flancs des éléments topographiques : un versant a des altitudes sous-estimées et l'autre versant des altitudes surestimées.

La visualisation des cartes numériques du relief estompé, de la pente, de la concavité, et d'une image filtrée par rehaussement des ruptures de pente permet de diagnostiquer les deux premiers types d'erreurs. Le troisième type est mis en évidence par superposition des courbes de niveau ou de l'estompage avec une surface des différences entre les valeurs brutes et la surface interpolée. Le dernier type exige une référence à une source de données indépendantes de façon à créer une surface de précision entre les deux modèles, en divisant la déviation verticale par la tangente de la pente.

La visualisation joue un rôle central, voire plus important que celui des mesures statistiques conventionnelles dans la détermination de certaines erreurs inhérentes aux MNT. Les problèmes liés à la méthode d'interpolation rejoignent les remarques faites au paragraphe 3.2.2.2. Une interpolation à partir de courbes de niveau doit être contextuelle, c'est-à-dire elle doit prendre en compte les lignes de structure du terrain. L'ajout de courbes intermédiaires ou l'utilisation des points cotés ne peuvent qu'améliorer la qualité du MNT résultant.

Conclusion

L'exactitude avec laquelle un MNT est une représentation de la surface terrestre est fonction des limitations conceptuelles du modèle et de la qualité des données source. L'étude des moments statistiques fournit un ensemble de descripteurs conventionnels, dont les modèles présentés dans le paragraphe 4.1 pour l'IGN, sont appliqués par d'autres institutions telles que l'U.S. Geological Survey ou l'Ordnance Survey. Ces mesures requièrent deux ensembles indépendants de données qui décrivent le même phénomène altimétrique dont l'un est reconnu avoir une précision plus élevée. Très souvent, l'estimation de la qualité d'un MNT pose un problème méthodologique car il n'existe pas forcément un modèle qui soit une référence sûre pour une comparaison, c'est-à-dire une vérité terrain ou un lot de données dont la précision est plus haute. L'évaluation de la précision doit alors s'effectuer par identification des incohérences internes au MNT qui peuvent provenir d'un grand nombre de causes.

Le problème majeur rencontré dans nos travaux concerne un type d'erreurs particulier : les erreurs linéaires. Tous les calculs d'indices géomorphométriques établis sur des données bruitées produisent des résultats éronnés, parfois ininterprétables d'un point de vue géomorphologique. L'implantation d'un calcul de variance a donc permis de détecter l'étendue de ces fautes. Seule la zone de plaine était touchée mais suffisamment pour que la méthode d'interpolation soit modifiée (cf. supra 3.2.2.2). Nous ne prétendons pas que le nouveau modèle numérique soit parfait cependant les erreurs restantes n'ont pas entravé notre démarche.

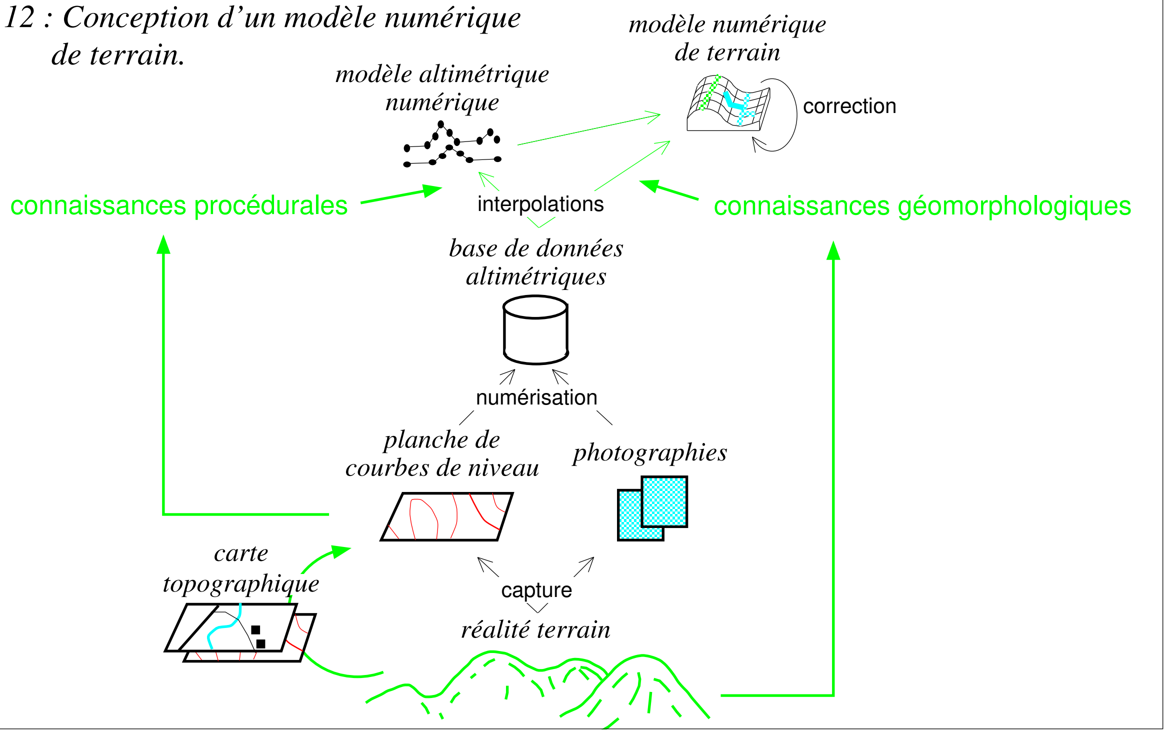
5 Conclusion

Le terrain doit ses formes actuelles à l'érosion et à l'arrangement des roches du sous-sol. Pendant les longues phases orogéniques, se sont construits de vastes domaines structuraux dont quatre grands types de situations sont présents en France métropolitaine : les chaînes jeunes, les massifs anciens, les bassins sédimentaires et les volcans. A l'échelle planétaire, les types locaux de relief sont trop nombreux pour obéir à un ensemble de règles qualificatives connues. En plus, des facteurs tectoniques, lithologiques et érosifs, le système bioclimatique influence le modelé du terrain.

Cependant, l'analyse du terrain en vue de sa représentation cartographique nécessite une étude plus locale des caractéristiques qui qualifient les différents types de relief. Le cartographe recherche, en effet, à établir une similitude entre les formes géomorphologiques de la surface terrestre et le dessin de celle-ci par la détermination des éléments caractéristiques (crêtes, thalwegs…) qui doivent être représentés sur la carte. Par le dessin, il sélectionne les formes en mettant en valeur les plus importantes et en ignorant celles qu'il estime secondaires par rapport à l'information topographique qu'elles apportent dans la description du relief. Pour cela, il dispose d'une palette de techniques cartographiques qu'il combine selon le thème et l'échelle souhaités.

Le passage au numérique implique l'utilisation de divers procédés de numérisation qui dépend de la source disponible, dont la plus commune est la planche de courbes de niveau. Il en ressort un ensemble de données brutes stockées sous la forme de courbes de niveau ou d'un échantillon de points cotés. Un modèle numérique de terrain peut être construit, donné par l'ensemble des observations quantitatives et par une fonction d'interpolation qui restaure la continuité entre ces éléments (cf. figure 11). Nous avons choisi de travailler à partir d'une modélisation de l'information altimétrique sous la forme d'un maillage carré, qui correspond à un champ continu : en chaque position, il y a une unique valeur d'altitude.

Figure 12 : Conception d'un modèle numérique de terrain.

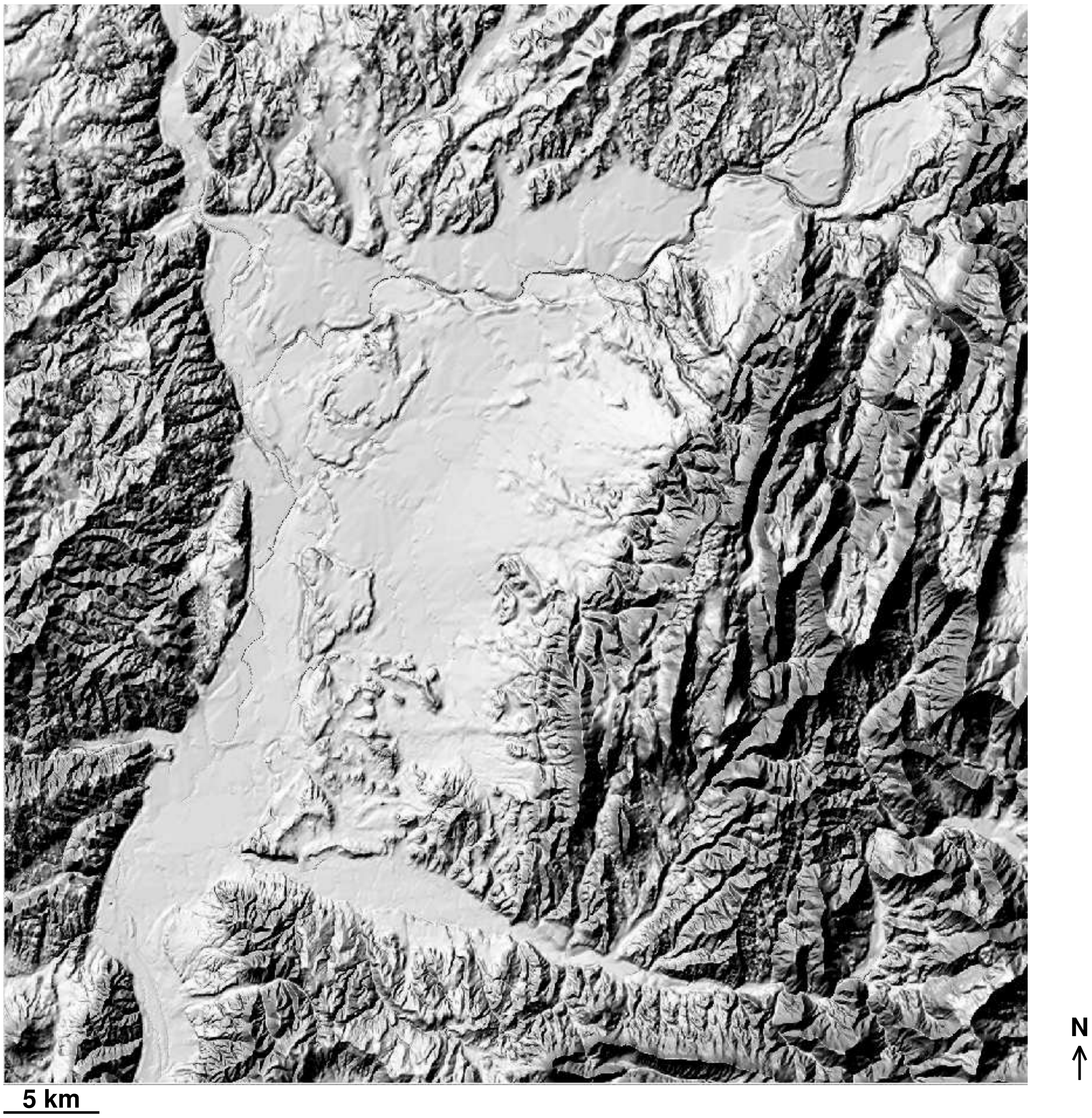


Le modèle numérique de terrain à partir duquel nous avons testé nos travaux est issu de la BD ALTI® de l'IGN. Il s'agit d'une grille régulière carrée de pas 40 m interpolée à partir d'un ensemble de courbes de niveau (méthode décrite dans le paragraphe 3.2.2.2) stockées dans la base de données et obtenues par restitution photogrammétrique numérique au 1:60 000, à l'exception de la zone sud-ouest obtenue par scannage de document au 1:25 000. Le MNT couvre une surface d'environ 3 160 km² équivalente à six feuilles au 1:50 000 (54,76 km dans la direction est-ouest et 57,68 km dans la direction nord-sud) pour une altitude minimale de 74 m et une altitude maximale de 1 690 m. Les valeurs d'altitude sont codées sur huit bits et ont une précision altimétrique de 1 m.

Sa visualisation par ombrage montre des terrasses de faible dénivelée en zone plate, dues au manque d'information géomorphologique entre les courbes de niveau (utilisation du réseau hydrographique dans la méthode d'interpolation), qui n'ont pas eu de répercussions dans la suite de nos travaux. Il s'agit en fait d'un second MNT qui nous a été fourni après détection d'erreurs linéaires importantes dans le premier.

Ce site a été sélectionné car il contient une grande variété de formes topographiques (cf. figure 12), allant de la plaine alluviale à une topographie accidentée de type préalpin. Ces formes ont été générées par sédimentation ou érosion glaciaire. Une petite partie à l'ouest de la zone provient d'une ancienne activité volcanique. Par conséquent, pour une surface relativement petite, le site est représentatif de trois grands types de relief.

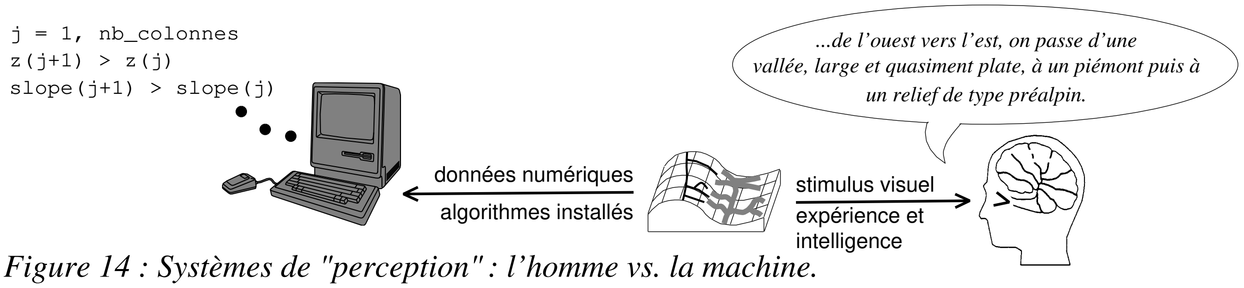
Figure 13 : MNT test, la région de Valence dans la Drôme.



La forêt de Saou (Diois).

III La segmentation

La visualisation d'un MNT sous la forme d'un estompage fournit une image des ondulations du terrain. L'être humain est capable d'en extraire les informations pertinentes et de les interpréter (système cognitif), l'œil ne fait que les percevoir. L'analyse numérique du même MNT permet d'aller au delà des simples capacités perceptuelles. En effet, l'intérêt d'un traitement numérique repose, en partie, sur sa capacité à prendre en compte un large nombre de données et sur sa sensibilité aux différences que l'œil ne perçoit pas. Quant à l'expertise humaine d'un MNT, elle aboutit à une qualification : le MNT est interprété et compris à l'aide de mots (cf. figure 1).



```
j = 1, nb_colonnes
z(j+1) > z(j)
slope(j+1) > slope(j)
```

Figure 14 : Systèmes de "perception" : l'homme vs. la machine.

Dans un objectif de qualification du relief, l'information brute fournie par un MNT est difficilement exploitable car trop locale. Une première phase consiste donc à délimiter des zones de travail, dans lesquelles des qualifications sont possibles. Une représentation graphique de la segmentation (caractérisée ou non) devient un outil pour l'interprétation visuelle. Par conséquent, la qualification numérique du terrain se décompose naturellement en deux phases principales, qui se distinguent par leur contenu sémantique :

- une simplification de la situation initiale par regroupement des données selon un critère de nature numérique, prédéterminé (segmentation) ;
- une étude plus spécifique à chaque groupe de données faisant le lien avec le phénomène naturel qu'il représente (caractérisation).

La segmentation intervient soit sur les valeurs initiales attachées aux points, soit sur des grandeurs calculées à partir de ces valeurs (traitement de bas-niveau). Les données initiales, autrement dit la base quantitative, ne fournit explicitement aucun élément qualitatif de structuration, dont certains apparaissent clairement lors de la visualisation (information implicite). Cependant, elle présente une structure de base simple (pixel carré) adaptée à un traitement du type analyse d'image qui permettra de préciser l'information. La segmentation sera donc abordée dans cette optique et elle se définit de la manière suivante [Cocquerez et Philipp, 95] :

Définition. La segmentation est un traitement de bas-niveau qui consiste à créer une partition de l'image I *en sous-ensembles* R_i*, appelés régions, tels que :*

$$\forall i,\ R_i \neq \emptyset$$
$$\forall i, j\ ;\ i \neq j,\ R_i \cap R_j = \emptyset$$
$$I = \cup_i R_i$$

Il n'existe pas une méthode universelle de segmentation, le choix dépend de différents facteurs (nature de l'image, contraintes d'exploitation…). Par contre, sa qualité s'apprécie en fonction des traitements ultérieurs. On estimera, par exemple, que la segmentation en zones topographiquement homogènes obtenue est *bonne* si elle permet ensuite à un opérateur humain d'associer chaque primitive extraite (région) à un type de relief (cf. partie IV) ou si elle permet d'appliquer des traitements (cf. partie V).

La première phase de l'analyse numérique de MNT fait l'objet de ce chapitre. Nous abordons ainsi une autre discipline, à savoir l'analyse d'image. Tout d'abord, nous en présenterons les principes théoriques. Dans un deuxième temps, nous étudierons les éléments de base qui servent à toute analyse numérique de phénomènes naturels. Dans le troisième chapitre, nous analyserons des démarches globales extraites de la littérature. Puis, nous exposerons notre démarche et les résultats expérimentaux.

1 Principes de segmentation

Par définition, la segmentation consiste à effectuer une partition de l'image (MNT) en régions[1] homogènes par rapport à un ou plusieurs critères [Cocquerez et Philipp, 95].

---

[1] Bien que nous abordions le domaine de la physique, nous essaierons par la suite d'utiliser le terme *zone* plutôt que *région* pour éviter toute ambiguïté avec sa signification géographique plus floue (désigne un territoire étendu possédant des caractères physiques et humains particuliers).

Le MNT est constitué d'un ensemble de points de l'ordre de grandeur du micro-relief, c'est-à-dire couvrant une surface terrain de 10^0 à 10^4 m² [Dikau, 90]. Ces points constituent un pavage rectangulaire du MNT et forment le niveau de représentation élémentaire du relief (échantillon initial). Une zone du MNT peut être un voisinage d'un point (fenêtre carrée centrée sur le point) ou, plus généralement, un sous-ensemble de forme quelconque de points connexes du MNT. La segmentation exploite soit une certaine homogénéité de groupements connexes de points pour déterminer les zones, soit les lieux de disparité (frontières). Le critère de segmentation permet d'apprécier le degré d'homogénéité d'une zone par rapport à une notion concrète et quantifiée. En effet, le critère implique la définition d'attributs, c'est-à-dire des descripteurs associés à une zone qui caractérisent ainsi un ensemble de points voisins (en cours de construction ou figé) ou chaque point pris individuellement. Ainsi, deux points adjacents seront homogènes et appartiendront à la même zone lorsqu'ils auront le même comportement face à un critère précis.

Il existe alors deux manières d'aborder la segmentation : en recherchant les contours, *i.e.* en déterminant les hétérogénéités dans le MNT, ou bien en exploitant l'homogénéité de groupements connexes de points. Etant donnés la nature de l'information intrinsèque à un MNT et le but de la segmentation (cf. infra 1.1), nous nous intéressons ici aux homogénéités par référence à des groupements de points ayant des propriétés communes plutôt qu'aux lieux d'inhomogénéités. En effet, un traitement qui opère sur des grandeurs calculées directement à partir des valeurs d'altitude locales (au niveau du point) ne fait pas la relation avec le phénomène naturel qu'elles représentent. Si le MNT n'est pas traité (interprété et compris) en tant que modélisation d'une réalité, les bords détectés risquent de ne pas correspondre à des formes réelles.

1. 1. Quelle segmentation ? Pour quel but ?

L'étude numérique du terrain à partir d'un MNT fournit une base de connaissance pour diverses applications des SIG. Une telle analyse quantitative peut répondre à plusieurs objectifs. D'une part, elle peut être utilisée comme un *outil descriptif*. Par exemple, la sélection de sites pour l'implantation de fermes à vent (*wind farm*, [Kidner, 96]) demande un découpage préalable du terrain selon différents critères. Ces critères de détermination des zones envisageables pour une telle installation se répartissent dans trois catégories principales : il y a ceux qui minimisent l'impact sur l'environnement, ceux qui maximisent le potentiel en ressources énergétiques et ceux qui minimisent les coûts de développement. La modélisation du problème peut soit prendre en compte simultanément les différents critères, soit les analyser indépendamment. Un ensemble de points connexes est homogène lorsqu'il optimise le critère choisi.

D'autre part, l'analyse quantitative du terrain peut être un *paramètre dans la modélisation et la prédiction de phénomènes*. Les domaines d'application sont très variés et touchent de nombreuses branches de la gestion des ressources naturelles telles que la gestion de l'eau avec, par exemple, la modélisation des crues et inondations [Le Roux, 93]. L'objectif de la segmentation est, dans ce cas, de produire la carte hydrologique d'un bassin principal (ici, le bassin amont de Vaison-La-Romaine), c'est-à-dire de fournir un réseau hydrographique plus ou moins détaillé et sa division en sous-bassins en fonction de la superficie drainée par ses affluents. La segmentation en bassins versants offre un support pour des études hydrologiques par la possibilité d'extraire des paramètres tels que la superficie, le périmètre, la compacité (reflet du temps de réponse du bassin versant), l'exutoire, le plus long chemin de drainage avec sa pente moyenne.

Enfin, la classification des MNT peut fournir une *base de connaissance pour guider des fonctions de manipulation de MNT*. Ainsi, la généralisation cartographique est une tâche qui peut être améliorée par l'utilisation d'informations sur la nature géométrique de la surface (caractérisée par des indices mathématiques) [Weibel et DeLotto, 88]. L'objectif des travaux de [Weibel, 89] est de construire une technique pour une généralisation du relief dépendante de la structure topographique et du but, c'est-à-dire une approche adaptée aux caractéristiques du terrain et aux contraintes de la généralisation (objectif, échelle de la carte). Le processus global présenté se décompose en cinq étapes dont la première consiste en une reconnaissance de structure qui a pour objectif de classer le MNT en régions de type de terrain homogène (cf. partie V). La classification a lieu par utilisation des techniques d'analyse d'image empruntées à la télédétection, mais plutôt que d'utiliser une représentation spectrale, on préfère retenir des paramètres géomorphométriques. Le résultat de cette reconnaissance de zones est ensuite utilisé dans la reconnaissance d'un processus de généralisation adapté, définissant des types d'algorithmes et leurs paramètres en fonction du type de relief présent dans chaque zone.

Ces exemples montrent que l'analyse numérique du terrain débute par une simplification de la situation initiale par regroupement de points connexes en zones homogènes répondant à un critère précis. Le critère détermine, en partie, la méthode de segmentation utilisée. Dans une optique de cartographie topographique, le critère de regroupement se fonde sur la nature de la topographie. Cependant, une difficulté majeure est de définir numériquement ce qu'est une zone à topographie homogène. Les experts du domaine convergent dans leur interprétation visuelle d'un MNT en distinguant des zones où la texture y est homogène mais sans en définir précisément les contours. D'ailleurs, l'existence sur la surface terrestre de zones de transition (changement progressif du relief) entre deux types de relief distincts diminue l'importance d'une délimitation très précise. L'aspect le plus important du critère porte donc sur l'identification de la granularité du terrain et non sur la précision des frontières. Ainsi, la recherche de régions connexes par une méthode de détection des contours à partir du MNT, image du relief telle que $z = H(x, y) = I[x, y]$, peut aboutir, dans le meilleur des cas, à une partition en régions correspondant plus ou moins aux bassins versants, ce qui limite la segmentation à une application en hydrologie. En fait, la nature bas-niveau de ce type de traitement provoquerait plutôt une segmentation sans liaison avec la réalité terrain recherchée et les bords ne correspondraient pas forcément à des formes de la topographie. L'idée est donc de rechercher des zones dans lesquelles les points ont un comportement indiciaire homogène plutôt que le lieu des disparités par l'application de traitements de haut-niveau. Pour cela, une information sur la nature du phénomène représenté devra, tout d'abord, être extraite.

La cartographie est la transcription plane de l'ordre géographique, elle est un moyen de régionaliser l'espace sans perte d'information [Bertin, 68]. Le MNT, en tant que transcription numérique en 2D½ du relief, peut aussi être régionalisé sur un critère topographique. Il forme ainsi une base intéressante pour la dérivation d'une connaissance structurale (décomposition du terrain en zones orographiques, extraction des éléments caractéristiques) à partir des données altitude du terrain. En effet, l'objectif premier est le maintien du système géomorphologique afin que la représentation cartographique qui lui est liée en fasse ressortir les caractères principaux. Une fois le MNT régionalisé à l'aide d'un traitement de haut-niveau, il restera à transformer des hypothèses complexes sur la nature du relief en formulations discrètes, afin de simuler chacune des composantes géomorphologiques du paysage [Dikau, 90].

1. 2. Méthodes de classement

D'après ce qui précède, une première phase logique dans le partitionnement d'un MNT est de déterminer les paramètres qui formaliseront le critère de regroupement des pixels. Ces paramètres (indicateurs, variables) sont ensuite utilisés dans une classification.

1. 2.1. Méthodes de sélection des attributs

Il n'est pas toujours pertinent de choisir un unique critère d'homogénéité, surtout lorsque l'on traite de phénomènes naturels complexes tels que les ondulations du terrain. D'autre part, un grand nombre d'attributs n'apporte pas forcément une meilleure discrimination car l'information ajoutée par les attributs excédentaires est négligeable face au bruit qu'ils apportent. Par conséquent, une méthode de sélection est un filtre face au bruit apporté par les attributs non représentatifs. On distingue généralement les méthodes supervisées, qui utilisent un critère de discrimination (critère de la trace, de Wilks, *etc.*), et les méthodes non supervisées dont la plus connue est l'Analyse en Composantes principales (ACP).

Cependant, l'ACP exige, pour être efficace, que les attributs ne soient pas trop corrélés et qu'ils soient normalisés. Les méthodes supervisées recherchent le pouvoir discriminant d'un ensemble d'attributs et sélectionnent les plus performants dans le sens du critère choisi. Dans le cas par exemple d'une analyse factorielle, le critère exigera une bonne séparation des classes dans l'espace de représentation des ellipsoïdes d'inertie.

1. 2.2. Méthodes de classification

Le calcul d'attributs pour décrire une image fournit un grand nombre de valeurs qui est difficilement exploitable tel quel (cf. infra 4.4.2). Leur classification permet d'affecter chaque pixel de l'image à une classe unique par l'estimation de la distance entre les vecteurs d'attributs, en tenant compte ou non de la proximité spatiale entre pixels de l'image. Dans une méthode supervisée, cette opération est préalable à la segmentation. Elle fournit les classes d'homogénéité auxquelles appartiennent les pixels (cf. infra 4.4.3). Elle simplifie ainsi l'image à analyser tout en conservant le maximum d'informations sur la géométrie des objets représentés.

Il existe deux familles principales de méthodes de classification. Pour la classification de MNT, on trouvera une analyse des méthodes présentées dans [Weibel, 89] :

- monodimensionnelle : cette famille de méthodes prend en compte un seul attribut ;
- multidimensionnelle : elle exploite plusieurs attributs.

En analyse monodimensionnelle, pour chaque attribut, un histogramme normalisé caractérise la distribution des valeurs (associées aux mesures). Son exploitation aboutit à la détermination des seuils qui constituent les limites des classes. Le seuillage peut être global (par recherche de seuils inter-modes, de séparateurs de distribution), local (estimation de paramètres, classification bayésienne sous hypothèse gaussienne) ou dynamique (découpage en blocs et calcul d'histogrammes).

Une méthode simple de détection des seuils par la recherche des minima locaux d'un histogramme est vite dépassée car les histogrammes présentent, la plupart du temps, du bruit et donc de nombreuses irrégularités qui mettent en échec la détection. Il existe d'autres méthodes pour les détecter : certaines nécessitent de connaître *a priori* le nombre de classes à détecter, d'autres fournissent ce nombre de classes (problème avec les histogrammes unimodaux). Les méthodes adaptatives (locales et dynamiques) permettent de rendre la détection plus performante vis-à-vis d'éventuelles variations de la distribution des intensités dans l'image, en faisant varier, en fonction de la position du pixel courant, les valeurs des seuils de classification et éventuellement le nombre de classes. Dans leur principe, elles font appel à une hypothèse d'unimodalité de la distribution des intensités dans une région homogène (voire de distribution gaussienne).

L'analyse multidimensionnelle requiert un prétraitement qui consiste à extraire parmi les nombreux attributs, ceux qui peuvent être discriminants (cf. supra 1.2.1). Les limites entre les classes peuvent ensuite être déterminées. Il existe deux grandes familles de méthodes multidimensionnelles :

- la classification par apprentissage construit à partir d'une classification connue *a priori* d'un certain nombre d'individus, une fonction d'identification des autres individus qui sont ensuite classés en fonction de leur position dans l'espace des attributs ;
- la classification non supervisée découpe l'espace en zones homogènes selon un critère de ressemblance entre les individus.

Si on a une connaissance sur la classe d'appartenance de certains individus, on utilise le premier type de méthodes (analyse discriminante). Sinon, il faut définir une mesure de proximité entre les vecteurs de valeurs des attributs et utiliser la seconde approche (analyse de clusters). L'étude de [Niemann et Howes, 91] sur la stabilité du terrain exposée au paragraphe 3.2 met en œuvre ces deux types de méthodes.

1. 3. Méthodes de regroupement

A un niveau élémentaire, le MNT est partitionné en points, dont la taille et la forme dépendent de l'échantillonnage. Le second niveau correspond à une partition du plan en micro-zones, regroupant plusieurs points connexes. Les points d'une même zone ont tous une même valeur, l'étiquette de la zone étant déterminée soit par une méthode de classement, soit d'une manière arbitraire (cf. infra 4.1.2).

Il existe différentes méthodes de construction de régions. Les hypothèses portent sur la nature de l'homogénéité des régions à extraire, quantifiée à l'aide d'un attribut, ainsi que sur la structure sous-jacente de graphe permettant d'étendre le concept de voisinage point à celui d'adjacence entre groupements de points. Les stratégies employées sont ascendantes ou descendantes suivant qu'elles exploitent des mécanismes de croissance ou de division/fusion de zones. L'analyse qui suit s'appuie sur [Cocquerez et Philipp, 95].

1. 3.1. Méthodes ascendantes

Une méthode ascendante de segmentation opère par croissance de région. Elle part du pixel (ou d'une micro-zone) et élabore progressivement les zones plus étendues en se basant sur des critères d'homogénéité. Cette croissance est conduite par l'utilisation d'un critère de contrôle défini préalablement. Il permet d'identifier une contrainte que doivent satisfaire les zones, et qui peut être géométrique (forme de la zone) ou à nature radiométrique (homogénéité thématique de la zone).

La méthode peut être par exemple :

- une agrégation de pixels : elle part de la représentation de l'image comme un ensemble de pixels, les regroupe selon un double critère d'homogénéité et d'adjacence ;
- une croissance de régions par exploitation de la description des textures à l'aide d'histogrammes locaux : deux points appartiennent à la même zone si les histogrammes associés se ressemblent suffisamment.

Un MNT présente, au niveau élémentaire, un champ continu de valeurs donnant la hauteur de la topographie. Une agrégation de points consisterait à fonder le prédicat d'homogénéité, qui identifie les contraintes que doivent satisfaire les régions, sur les altitudes uniquement. Par exemple, l'écart type des altitudes associé aux points de la zone est inférieur à un seuil préfixé. La détermination des zones dépend alors du point de départ et du seuil donné. Une croissance de régions repose, quant à elle, sur la détermination préalable de zones de référence. Les deux algorithmes souvent utilisés en traitement d'image sont la relaxation (à partir d'un histogramme mesuré sur une zone de référence, on extrait une composante connexe qui englobe tous les points présentant dans leur voisinage le même type de distribution) et la propagation (réitération de la relaxation). Cette méthode demande la définition d'un degré d'homogénéité qui fixe le seuil du coefficient de corrélation entre deux histogrammes.

1. 3.2. Méthodes descendantes

Une méthode descendante, contrairement à une méthode ascendante qui fait intervenir initialement un niveau élémentaire de représentation, démarre à un niveau élevé. Elle utilise, classiquement, différents types de graphes d'adjacence comme structure de données. Elle procède par éclatement et regroupement des composantes de l'image décrites par un graphe d'adjacence. Un graphe d'adjacence $G = (V, E)$ est non orienté et chaque arête est un couple de sommets (v_i, v_j) entre deux zones d'adjacence. L'information obtenue à partir de zones est statistiquement plus fiable que l'information calculée dans le voisinage d'un pixel, car elle permet d'appuyer un processus ultérieur de fusion sur des moyennes calculées dans des régions plus vastes, et non sur une grande quantité de valeurs locales.

Le graphe d'adjacence peut être, par exemple :

- un diagramme de Voronoï : la recherche d'une partition en régions de Voronoï homogènes part de la détermination des germes et de la détection des intérieurs ; on divise tant que les polygones sont inhomogènes, puis on fusionne par suppression des germes inutiles ;
- un arbre quaternaire : l'initialisation de la segmentation est fondée sur la coupure d'une arborescence, chaque nœud est carré (bloc de pixels).

L'initialisation de la construction d'un partitionnement de Voronoï consiste en un positionnement aléatoire des germes. Cependant, le processus impose la définition d'un prédicat d'homogénéité, qui peut être la variance des altitudes, et un critère de fusion, qui permet d'éliminer les germes inutiles. De même, l'arbre quaternaire demande la définition d'un prédicat de fusion et d'un prédicat de division.

1. 4. Simplification

La segmentation de second niveau (le niveau élémentaire est une segmentation en pixels, cf. infra 4.1.2), obtenue par l'utilisation d'un graphe d'adjacence ou d'un procédé de croissance de régions, fournit une ou des classifications que l'on veut simplifier : carte zonale de l'occupation du sol, carte d'un critère, carte des classes (on associe une couleur à une valeur d'attribut), qui sont déduites en monodimensionnel ou en multidimensionnel. La particularité d'une carte des classifications est la partition complète de l'espace : lorsqu'une zone est supprimée, la thématique associée à chacun des pixels qui la composent doit être modifiée. Or, la segmentation de second niveau ne simplifie pas forcément assez la situation initiale ou aboutit à un ensemble de zones de trop petite dimension. Par exemple, dans une zone homogène, il est souvent nécessaire d'éliminer les micro-zones appartenant à une autre classe pour supprimer le bruit (information que l'on considère non significative).

Les études sur la cartographie de l'occupation du sol fournissent des méthodes de généralisation qui sont intéressantes pour résoudre des problèmes de simplification d'une carte de zones. Les opérations utilisées sont, principalement, la suppression, la fusion et la simplification (des contours). Elles répondent à des règles formalisables par :

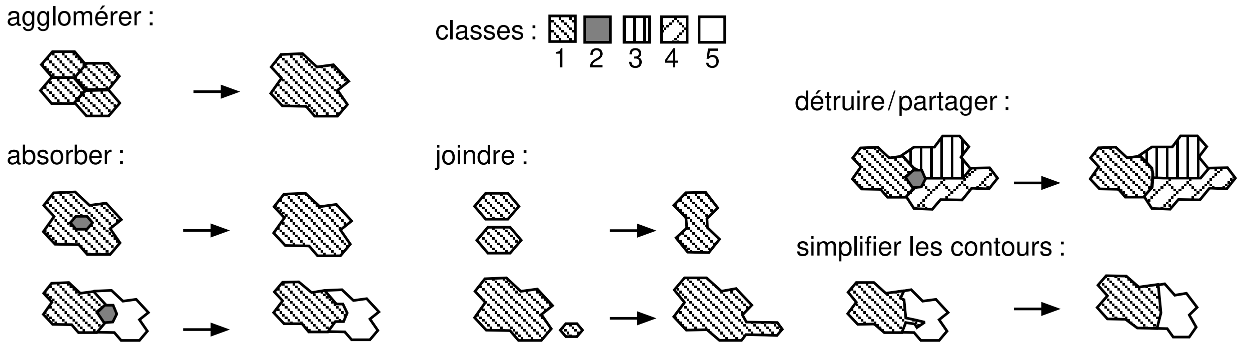
SI <condition> ALORS <action>.

La condition porte sur les valeurs d'attribut des zones (l'appartenance à une classe sémantique) ou sur leurs caractéristiques spatiales (la géométrie : taille, compacité ; les relations d'adjacence : voisinage) ; elle déclenche une action, c'est-à-dire un opérateur de généralisation. L'ensemble des opérations autorisées par le cartographe pour supprimer ou fusionner les zones de surfaces trop faibles sont répertoriées dans [Le Men, 96a] et les opérations de simplification des contours dans [Schylberg, 93]. La figure 2 représente à gauche de chaque flèche, une situation initiale et, à droite, le résultat des opérations mentionnées ci-dessous :

- la fusion suit deux règles :
  - l'agglomération regroupe plusieurs petites zones connexes de même classe pour former une seule zone de surface assez grande ;
  - la jonction regroupe deux zones de classe identique mais non connexes.

- la suppression peut s'effectuer de deux manières :
  - la destruction/partage supprime une ou plusieurs zones connexes trop petites en répartissant la surface correspondante sur les zones voisines (classes différentes) ;
  - l'absorption change la classe d'une petite zone soit incluse entièrement dans une zone plus grande, soit connexe à une zone plus grande, puis agglomère la petite zone avec la grande.
- la simplification de contours utilise l'opérateur de dilatation/rétrécissement (et toutes ses dérivées) qui absorbe les micro-aspérités des contours ou détruit les petits isthmes.

Figure 15 : Opérateurs de généralisation type occupation du sol.



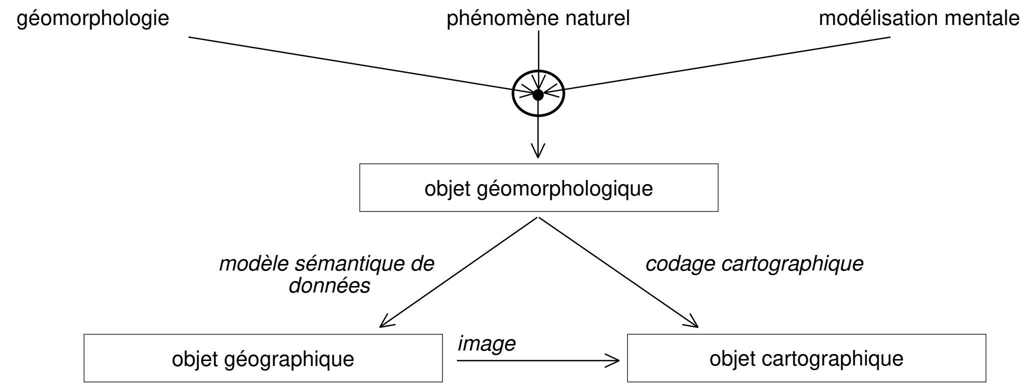
Toutes ces opérations contribuent à simplifier une image classifiée par fusion, suppression ou lissage/caricature des contours, opérations de généralisation qui agissent en modifiant l'appartenance à une classe ou la géométrie de la zone (cf. partie V).

2 Eléments d'analyse

Nous venons d'exposer les principes généraux de segmentation. Dans le cadre de nos travaux, le but de la segmentation est de définir des zones à topographie homogène. Dans les paragraphes qui constituent ce chapitre, nous abordons les éléments d'analyse exploitables lors de la segmentation d'un MNT. Par ailleurs, le chapitre 3 présente des démarches globales de la littérature qui conjuguent les principes décrits dans le chapitre 1 et des éléments du chapitre 2. Afin de prendre en compte les informations apportées aux différentes étapes d'un processus global de segmentation, nous introduisons la notion d'objet topographique (cf. figure 4).

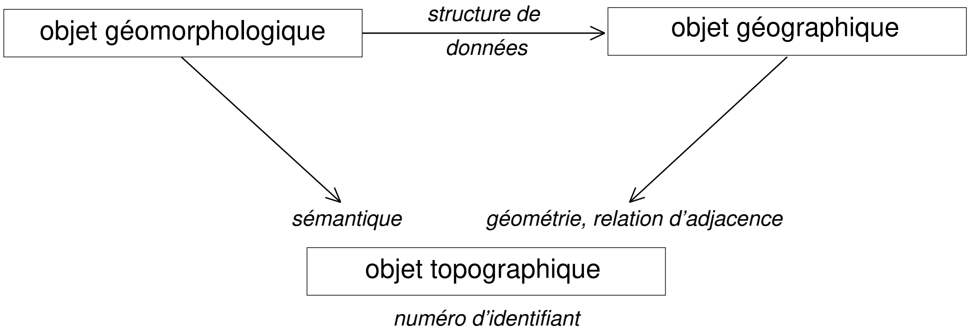
Un traitement de haut-niveau produit différents espaces, construits à partir du MNT initial, qui conjuguent modes vecteur (graphe d'adjacence) et rasteur (groupements de pixels). On emprunte le concept d'*objet* au mode vectoriel pour définir l'objet topographique. La notion générale a été introduite par [Dikau, 90] dans le cas des objets géographiques, représentants de différents niveaux d'abstraction et de complexité. La figure 3 distingue les cinq éléments conceptuels de la modélisation objet : les phénomènes du monde réel (phénomène naturel), la conception mentale des objets géomorphologiques (modélisation mentale et géomorphologie), l'abstraction et l'image de ces objets en un modèle numérique (objet géomorphologique), la gestion de la base de données fondée sur les types d'objets géographiques (objet géographique), la visualitation (objet cartographique). Les objets géomorphologiques sont définis en terme d'hypothèses (modélisation mentale) émises sur la conception humaine du phénomène naturel, ils sont perçus non comme des faits mais comme une image de ce qui existe dans la réalité.

Figure 16 : Relations entre les objets définis par Richard Dikau (1990).



L'objet topographique est une zone de la segmentation finale ou un élément structurant, ayant un unique identifiant et auquel sont associés des attributs qualificatifs. Ces attributs définissent la géométrie de l'objet (zone ou lien), les relations avec les zones ou les liens voisins et les grandeurs mesurées résumées en une valeur de classe (cf. figure 4). Cette abstraction numérique est nécessaire pour simuler les relations spatiales entre objets connexes et percevoir les changements lors de traitements ultérieurs (cf. partie V).

Figure 17 : Conception de l'objet topographique.

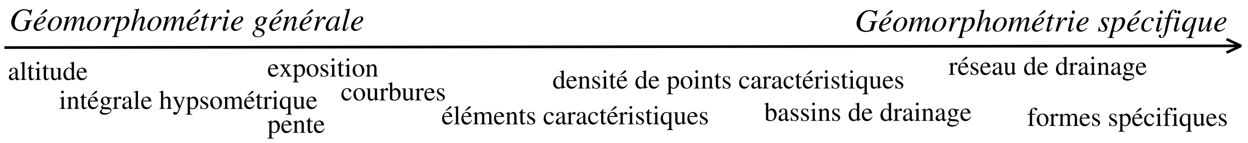


Nous développons, dans ce chapitre, les éléments indispensables à l'analyse d'un MNT qui concourent à définir les attributs sémantiques quantifiés de chacun des objets topographiques : les indicateurs géomorphométriques. Dans un deuxième temps, nous définissons les éléments structurants et en présentons les méthodes d'extraction. Une qualification de ces objets est proposée dans la partie IV.

2. 1. Indicateurs de la géomorphométrie générale

Par définition, la *géomorphométrie* est une discipline de la géomorphologie qui traite de la géométrie du paysage ; autrement dit, elle apporte une description quantitative des formes de la surface terrestre. A partir des années 70, des auteurs tels que [Evans, 72], [Mark, 75] et [Pike, 88] ont analysé et critiqué les paramètres géomorphométriques existants et ont proposé des systèmes simples de géomorphométrie répondant aux besoins de leurs études. La plupart des auteurs reprennent la distinction introduite par Ian Evans, qui scinde les paramètres géomorphométriques en *généraux* et *spécifiques*. Par *géomorphométrie générale*, on entend l'ensemble des mesures et analyses des caractéristiques du paysage qui peuvent être appliquées à n'importe quelle surface rugueuse. En cela, elle fournit une base de comparaison quantitative même si les paysages sont qualitativement disparates. La *géomorphométrie spécifique* fournit un ensemble de mesures mathématiques qui définissent des formes nommées (cirques, drumlins *etc.*) et d'autres phénomènes locaux (réseau de drainage).

En regard de ces principes, [Wood, 96] propose de visualiser le passage de la géomorphologie générale (objet de cette partie) à la géomorphologie spécifique (objet de la partie IV) par le biais d'un continuum. La progression d'une extrémité à l'autre a lieu par un accroissement de l'information spatiale nécessaire à la définition des indicateurs positionnés sur l'axe. Le continuum ainsi déterminé a l'apparence suivante :



Il n'existe pas un ensemble universel de paramètres qui décrivent le terrain. C'est le contexte (processus étudié, données initiales…) qui détermine le choix. L'état de l'art se compose, par conséquent, de travaux divers qui analysent et déterminent un ensemble précis de paramètres pour une application donnée en géomorphologie. Par contre, tous contribuent à déterminer un aspect de la rugosité du terrain. [Pike, 88] a par ailleurs introduit la notion de *signature géométrique* (*the geometric signature*). C'est un ensemble de mesures qui décrit la surface topographique de façon à distinguer des paysages géomorphologiquement disparates. Nous allons donc décrire les éléments d'analyse qui peuvent entrer dans la définition d'une signature.

2. 1.1. La pente

La notion de *pente* est sans doute l'aspect le plus important pour décrire une surface topographique, qu'elle soit ensuite exploitée pour définir des modèles d'estompage automatique, construire des cartes hypsométriques, ou pour déterminer des indices géomorphologiques. [Mark, 75:170] souligne sa propriété intrinsèque : la pente est le résultat de phénomènes géomorphologiques passés et présents, et influence à son tour ces phénomènes. La pente reflète l'inclinaison de la surface naturelle par rapport au plan horizontal et détermine ainsi la force gravitationnelle du versant. Un cours d'eau n'a pas les mêmes effets érosifs s'il s'écoule sur une pente forte ou sur une pente faible, les torrents de montagne sont linéaires, les rivières de plaine suivent de larges méandres et présentent ainsi une forte courbure[1] planimétrique. Ce comportement variable du cours d'eau selon la pente et sa longueur, est aussi dû à la lithologie des lieux, *i.e.* à la nature de la roche qui compose le versant. Matériau et pente se complètent pour fournir son caractère au modelé du terrain.

Certains cours d'eau suffisamment longs présentent un comportement différent de la source jusqu'à leur confluence. L'Isère, par exemple, naît dans les Alpes, grandit dans les Préalpes et finit sa course dans le Sillon rhodanien. Du glacier des sources de l'Isère au lac de Chevril, cette rivière se comporte en torrent suivant un parcours linéaire au fond d'une vallée encaissée. Puis la vallée s'élargit, la pente s'affaiblit, la vallée devient une auge. La rivière se gonfle grâce à ses nombreux affluents et ses méandres épousent docilement les formes des thalwegs relativement étroits jusqu'à Bourg-St-Maurice. Les vallées s'élargissent ensuite progressivement pour ne plus canaliser la rivière d'Albertville à Grenoble. En coulant dans la plaine rhodanienne, l'Isère suit un comportement de cours d'eau de plaine présentant de larges méandres avant de se jeter dans le Rhône. Le suivi de son parcours sur une carte topographique montre que la pente varie en fonction du relief que l'Isère traverse.

Définition. La pente en un point est le plan tangent à la surface en ce point. Ce plan est caractérisé par son gradient.

Beaucoup de travaux se sont intéressés aux problèmes de calcul de pente à partir d'une matrice d'altitudes ou de courbes de niveau. Dans la littérature, la direction du gradient dans le plan est appelée *exposition* (*aspect* dans la littérature anglaise), autrement dit, c'est la direction de la ligne descendante perpendiculaire aux courbes de niveau, et *pente* (*slope*) représente l'inclinaison du plan par rapport à l'horizontale. [Evans, 72] conclut son analyse du calcul de la pente par ces trois idées :

- la pente doit être mesurée en un point ou sur une surface la plus petite possible ;
- les méthodes de calcul de pente à partir d'un MNT maillé fournissent un large éventail de procédés sans rencontrer de problèmes sérieux dans la programmation ou l'échantillonnage, mis à part le choix de la taille de la maille ;
- l'exposition doit être exprimée en degrés et la distribution de ses fréquences doit être résumée par la moyenne, l'écart type, le biais.

Différentes méthodes de calcul de pente peuvent produire des résultats significativement différents à partir des mêmes données d'altitude. [Skidmore, 89] compare six des méthodes les plus communément rencontrées dans la littérature. Afin de donner de l'assise à l'analyse de ses résultats, il confronte ces six méthodes à une référence dite *sûre*. En application des principes énoncés par Ian Evans, la pente est déterminée par ses gradient et exposition mesurés en un point à partir d'une fenêtre glissante 3×3. L'étude de ces procédés est importante car ils sont repris par la grande majorité des travaux non seulement sur les calculs de pente mais aussi sur les diverses études géomorphométriques. Nous profitons donc de ce chapitre pour expliquer, dans le détail, différentes méthodes pertinentes.

---

[1] Le degré de linéarité, caractère inverse de la courbure, caractérise un réseau hydrographique : il présentera une faible linéarité dans les plaines et une linéarité plus forte en zones montagneuses [Riazanoff, 89:72].

Le gradient de la pente se détermine en restreignant l'espace à $\mathbb{N}^2$, autrement dit on recherche le gradient de z dans le plan (O, i, j), où x et y prennent des valeurs entières positives. D'où :

$$\overrightarrow{\text{grad}}\ z = \frac{\delta z}{\delta x}\overrightarrow{Oi} + \frac{\delta z}{\delta y}\overrightarrow{Oj} \quad \text{: gradient de z} \qquad \textit{Equation (1)}$$

$$\text{expo} \ = \text{arc tg} \frac{\frac{\delta z}{\delta y}}{\frac{\delta z}{\delta x}} \quad \text{: direction du gradient dans le plan} \qquad \textit{Equation (2)}$$

1· La première méthode retenue définit l'exposition comme la direction de la dénivelée maximale descendante calculée à partir du point central vers ses voisins 8-connexes :
grad z = max $\{(z_{i,j} - z_{i-1,j-1})$; … ; $(z_{i,j} - z_{i+1,j+1})\}$, où les indices i, j décrivent respectivement les lignes et les colonnes. L'exposition est alors déterminée par la direction du gradient maximum.

2· La deuxième méthode calque la précédente en généralisant la dénivelée maximale à une recherche vers l'aval et vers l'amont (valeur absolue).

3· La troisième calcule la différence finie du second ordre :

$$\left(\frac{\delta z}{\delta x}\right)_{i,j} = \frac{[z_{i+1,j} - z_{i-1,j}]}{2\Delta x} \quad \text{et} \quad \left(\frac{\delta z}{\delta y}\right)_{i,j} = \frac{[z_{i,j+1} - z_{i,j-1}]}{2\Delta y}$$

où Δx et Δy sont les distances euclidiennes entre les cellules de la fenêtre (pas du MNT).

4· La quatrième calcule la différence finie du troisième ordre :

$$\left(\frac{\delta z}{\delta x}\right)_{i,j} = \frac{[z_{i+1,j+1} + 2z_{i+1,j} + z_{i+1,j-1}] - [z_{i-1,j+1} + 2z_{i-1,j} + z_{i-1,j-1}]}{8\Delta x} \qquad \textit{Equation (3)}$$

$$\left(\frac{\delta z}{\delta y}\right)_{i,j} = \frac{[z_{i+1,j+1} + 2z_{i,j+1} + z_{i-1,j+1}] - [z_{i+1,j-1} + 2z_{i,j-1} + z_{i-1,j-1}]}{8\Delta y} \qquad \textit{Equation (4)}$$

Δx, Δy pas du MNT en m

5· La cinquième est une régression linéaire utilisant les moindres carrés pour minimiser la somme des distances de la surface aux cellules. La fonction de régression est telle que :

$$E(z) = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 y, \qquad \text{où } \beta_1 = \frac{\delta E(z)}{\delta x} \text{ et } \beta_2 = \frac{\delta E(z)}{\delta y}.$$

La pente déduite à partir de l'équation *(2)* et l'exposition définie par la *(3)* s'obtiennent alors en remplaçant les dérivées partielles par β_1 et β_2 :

$$\|\overrightarrow{\text{grad}}\ z\| = \sqrt{\beta_1^2 + \beta_2^2} \quad \text{: norme du gradient} \qquad \textit{Equation (5)}$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \text{arc tan}\left(\frac{\beta_2}{\beta_1}\right) \quad \text{: orientation du gradient} \qquad \textit{Equation (6)}$$

6· La dernière méthode testée par [Skidmore, 89] est aussi une régression linéaire mais la fonction est définie par :

$$E(z) = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 y + \beta_3 x^2 + \beta_4 y^2 + \beta_5 xy.$$

Cette méthode est équivalente à la méthode 4 sans pondération. Par adoption d'un système de coordonnées locales ayant pour origine le point central de la fenêtre, on déduit les six coefficients de la fonction de régression et, notamment, les deux coefficients qui nous intéressent :

$$\left(\frac{\delta E(z)}{\delta x}\right)_{i,j} = \beta_1 + 2\beta_3 x + \beta_5 y \Rightarrow \beta_1 = \frac{[z_{i+1,j+1} + z_{i+1,j} + z_{i+1,j-1}] - [z_{i-1,j+1} + z_{i-1,j} + z_{i-1,j-1}]}{6\Delta x} \quad \textit{Equation (7)}$$

$$\left(\frac{\delta E(z)}{\delta y}\right)_{i,j} = \beta_2 + 2\beta_4 y + \beta_5 x \Rightarrow \beta_2 = \frac{[z_{i+1,j+1} + z_{i,j+1} + z_{i-1,j+1}] - [z_{i+1,j-1} + z_{i,j-1} + z_{i-1,j-1}]}{6\Delta y} \quad \textit{Equation (8)}$$

L'hypothèse que [Skidmore, 89] valide est : *le vrai gradient est corrélé positivement avec le gradient testé.*

Etant donné l'ensemble des paramètres $\Theta = \Theta_0 \cup \Theta_1$, on définit :

l'hypothèse nulle $H_0 = \{\theta \in \Theta_0\}$: X, Y sont indépendantes et la contre hypothèse $H_1 = \{\theta \in \Theta_1\}$: X, Y sont positivement corrélées, avec X représentant le vrai gradient ou la vraie exposition et Y la valeur correspondante calculée.

Soit $w = \{\phi = 1\}$ la région de rejet, où ϕ est la statistique, fonction indicatrice sur Ω. En se donnant pour borne supérieure :
$\alpha = \sup_{\theta \in \Theta_0} P_\theta(w) = 0.05$.

La conclusion des tests de [Skidmore, 89] est que la méthode la plus proche de son modèle de référence est la quatrième, définie par les équations *(3)* et *(4).*

[Weih et Smith, 96] analysent également les effets des divers calculs de pente sur la valeur des points mais, cette fois, en identifiant les variations existant entre les méthodes, et non plus en les comparant à un modèle de référence. Ils introduisent dans leurs travaux des algorithmes non testés par [Skidmore, 89], comme par exemple un calcul d'approximation de la pente à partir d'un triangle rectangle isocèle.

Ces deux travaux permettent d'établir une distinction *a priori* entre trois groupes d'algorithmes de pente. En effet, les méthodes 1 et 2 se fondent sur la sélection d'une pente maximale, les méthodes 3 et 4 moyennent un ensemble de cellules et les méthodes 5 et 6 approximent un ensemble de valeurs. Les méthodes les moins sensibles aux erreurs d'altitude inhérentes au MNT initial sont les méthodes de lissage et la méthode de moyennage 4 repérées par les équations *(3)* à *(8).* En effet, elles sont moins sensibles aux erreurs des cellules individuelles car elles utilisent un grand nombre de valeurs, elles sont moins sensibles aux larges écarts d'altitude car elles ne se basent pas sur une pente maximale, elles sont moins sensibles aux erreurs linéaires car elles ne prennent pas en compte une seule direction privilégiée.

Dans le cadre d'applications visant la description du terrain, des auteurs tels que [Rost, 87] ont plutôt privilégié la méthode 5, proposée par [Sharpnack et Akin, 69], pour débuter leur analyse numérique d'un terrain, privilégiant ainsi la moyenne des variations altimétriques le long des axes planimétriques. Les coefficients β_1 et β_2 à reporter dans les équations *(5)* et *(6)* sont donnés par :

$$\beta_1 = \frac{[z_{i+1,j-1} + z_{i,j-1} + z_{i-1,j-1}] - [z_{i+1,j+1} + z_{i,j+1} + z_{i-1,j+1}]}{6\Delta x}$$

$$\beta_2 = \frac{[z_{i+1,j+1} + z_{i+1,j} + z_{i+1,j-1}] - [z_{i-1,j+1} + z_{i-1,j} + z_{i-1,j-1}]}{6\Delta y}$$

Les méthodes 4 à 6 sont équivalentes en ce qui concerne l'impact de la précision des données, à savoir le déplacement horizontal et l'incrément vertical. [Carter, 92] spécifie qu'elles n'augmentent pas la précision mais diminuent les effets dus à un manque de précision.

Pour conclure cette étude de la pente, il existe trois méthodes donnant des résultats équivalents qui sont la différence finie du troisième ordre pondérée ou non pondérée (moyennages) et la régression linéaire (lissage) [Skidmore, 89]. Nous avons retenu la différence finie du troisième ordre pondérée (méthode 4).

2. 1.2. D'autres indicateurs

Afin de compléter l'information pente dérivée d'un MNT, les auteurs ont proposé un grand nombre d'indicateurs géomorphométriques qui concourent à définir la signature géométrique. Une classification logique, et la plus usitée, revient à distinguer les dimensions *horizontales* et *verticales* de la topographie, ainsi que les relations entre les deux dimensions condensées sous le terme de *convexité régionale* [Evans, 72][Mark, 75]. La pente est reconnue par les auteurs comme étant l'indicateur certainement le plus important de la géomorphométrie. C'est pourquoi il a été traité dans un paragraphe particulier et nous ne reviendrons pas dessus ici. Les méthodes de calcul des indicateurs brièvement présentés ci-dessous sont détaillées dans le chapitre 4.

[Evans, 72] s'est plus particulièrement intéressé à la géomorphologie glaciaire. Il analyse, pour chaque paramètre proposé, les définitions trouvées dans la littérature et propose les siennes. L'écart type est, selon lui, le plus puissant outil statistique et le moins sensible à un changement de zone de calcul (elle doit être suffisamment grande pour fournir un échantillon représentatif de la surface topographique). La dimension verticale est alors correctement mesurée par l'écart type des altitudes. La dimension horizontale est importante dans le sens où elle fournit des grandeurs de zone sur lesquelles appuyer le calcul des autres indicateurs. Mais, les nombreuses techniques d'étude spectrale trouvées dans la littérature pour déterminer cette dimension ne résolvent pas le problème d'une manière pertinente, bien qu'elles soient très importantes dans l'analyse de la rugosité. L'auteur n'exprime pas de préférence dans la détermination d'un indicateur pour mesurer la dimension horizontale. Enfin, la convexité régionale fournit une mesure de l'ouverture du relief par l'érosion. La large utilisation de l'intégrale hypsométrique n'encourage pourtant pas Ian Evans à l'accepter comme la meilleure expression de la convexité régionale : la principale limite pour la comparaison de régions est l'hétérogénéité dans la région mesurée. L'intégrale hypsométrique peut être remplacée utilement par la répartition des altitudes autour de la fréquence moyenne.

La conclusion des travaux de [Mark, 75] montre également que l'information importante sur le terrain est contenue dans certaines mesures. En ce qui concerne l'échelle horizontale, pour une taille de grain donnée, la densité du drainage et la densité des sommets représentent les différents aspects de la texture. Sa densité du drainage est la longueur totale des brins composant les cours d'eau par aire unité de mesure (a.u.). Sa densité des sommets est le nombre de courbes de niveau proches entourant un sommet par a.u. L'échelle verticale est la mieux représentée par la mesure du relief la plus employée, à savoir la dénivelée, différence entre la plus haute et la plus basse des altitudes se trouvant dans l'a.u. Les relations entre dimensions horizontale et verticale s'expriment par la pente (paragraphe précédent). L'interaction tridimensionnelle entre le caractère plus ou moins accentué de la pente et de sa direction s'exprime par un facteur de rugosité ($IR = 100(1 - \cos\alpha)$ où α inclinaison), considéré comme la meilleure mesure du vecteur de dispersion de la rugosité (détermine la convexité régionale).

[Pike, 88] analyse les indicateurs géomorphométriques dans le but d'étudier les possibilités de circulation d'un véhicule sur la lune. Il définit cinq catégories descriptives : statistiques sur l'altitude, le spectre de l'altitude (le long d'un profil du MNT), la pente entre deux lignes caractéristiques (crêtes et thalwegs), la pente locale et la courbure. L'application de ces indicateurs à des données terrain lui permet de différencier deux types de terrain associés à des phénomènes de glissement superficiel du terrain. Il conclut qu'une approche par la signature géométrique, façonnée pour un problème particulier, peut être adaptée dans le but de définir une taxinomie du terrain et de cartographier d'autres régions, sous la condition de certaines améliorations dépendantes des capacités technologiques et des avancées théoriques dans le domaine.

Conclusion

D'une manière générale, les auteurs tendent à insister sur la structure paramétrique de la signature géométrique dans le sens où les paramètres doivent y exprimer des attributs différents mais complémentaires. Ils convergent vers l'idée selon laquelle la pente est le plus important des indicateurs. Il existe deux composantes pour qualifier la pente locale en un point : le gradient et l'exposition. Nous nous intéresserons dans le chapitre 4 au gradient qui décrit la variation des altitudes en fonction de la distance.

Aussi, la signature doit comporter une statistique sur l'altitude (écart type). En ce qui concerne la dimension horizontale, Ian Evans ne donne pas de solution bien qu'il souligne l'importance d'une telle mesure de texture, tandis que David Mark propose d'étudier la densité des éléments structurants du terrain, à savoir les crêtes et thalwegs. Dans le paragraphe suivant, nous nous rapprochons de la géomorphométrie spécifique par l'extraction des réseaux d'éléments caratéristiques (une analyse plus appronfondie figure dans la partie IV).

2. 2. Eléments structurants[1]

Certains points du MNT participent, plus que les autres, à définir les caractéristiques du terrain soit par chaînage avec d'autres points connexes, soit individuellement par comparaison avec leur voisinage. L'information est implicitement contenue dans le modèle et il est important de l'en extraire. En reconstituant la structure même du relief, ces ensembles de points forment une base de calcul pour des indicateurs géomorphométriques (densité du drainage, des sommets…) et une base de connaissance pour la qualification du terrain (les types de relief se caractérisent par leur structure, c'est-à-dire par une combinaison particulière des mêmes éléments géomorphologiques).

---

[1] Ce terme est utilisé sous une autre connotation dans le domaine des morphomathématiques [Schmitt et Mattioli, 94].

2. 2.1. Définitions

Certains points, par leur situation privilégiée, fournissent une information plus riche que leur voisin. Ainsi, un point reconnu en tant que sommet contient implicitement l'information selon laquelle il est situé à une altitude plus élevée que ses voisins. De même, le point cuvette est plus bas que tous ses voisins. Le col est un point où la surface est également horizontale (à normale verticale), mais son altitude n'est ni un maximum, ni un minimum local. [Dufour, 87] définit le col comme étant un point où la pente (mathématique) change (au moins) quatre fois de signe lorsque l'on tourne le long d'un cercle infinitésimal centré en ce point.

De même, certaines lignes fournissent une information sur la structure du relief. Les lignes de crêtes et thalwegs font partie de l'ensemble des lignes caractéristiques relevées sur le terrain par le topographe. Ce sont des lignes de rupture de pente se trouvant dans une zone respectivement convexe ou concave. Pour marquer leur importance, [Douglas, 87] rappelle la définition de Clerk Maxwell (1870) : *Hence each point of the earth's surface has a line slope, which begins at a certain summit and ends in a certain bottom. Districts whose lines of slope run to the same bottom are called Basins or Dales. Those whose lines of slope came from the same summit may be called, for want a better name, Hills.* En conséquence, la terre entière peut être divisée en bassins et en une partition duale, à savoir en collines. Chaque point de la surface se trouve dans un bassin et sur une colline. Les bassins sont définis comme l'ensemble des lignes de pente rayonnant d'une cuvette et les collines, d'un sommet. Beaucoup de méthodes d'extraction ont repris cette idée pour détecter les lignes de crêtes à partir du seuillage des frontières des bassins versants.

Par ailleurs, [Derruau, 90] définit le thalweg en tant que la ligne reliant les points bas d'une vallée. L'interfluve se décrit alors par une crête, assimilée à une ligne, celle où se partagent les eaux tombées, et deux versants. [O'Callaghan et Mark, 84] améliorent la définition précédente : *une vallée est une ligne le long de laquelle le phénomène fluvial agit en transportant eau et matériau minéral à partir d'une région, suivant les processus de gravité de la pente, vers un paysage aux altitudes plus basses*. Ces définitions sont reprises dans la plupart des travaux qui traitent des problèmes d'extraction numérique des crêtes et thalwegs à partir d'un MNT.

2. 2.2. Représentation numérique des réseaux d'éléments structurants

Les éléments caractéristiques linéaires du relief qui sont appréhendés sur toute une région géographique forment des réseaux. Sachant que les rivières coulent au fond des thalwegs, nous ne discernons pas pour l'instant les deux notions, nous parlerons indifféremment de réseau hydrographique et de réseau de drainage, ou réseau de thalwegs. La manière la plus naturelle de modéliser de tels réseaux est d'appliquer la théorie des graphes.

On orientera mentalement les cours d'eau d'amont en aval, c'est pourquoi la modélisation d'un réseau de thalwegs utilise un graphe orienté dans lequel la direction d'écoulement détermine la direction des arcs[1]. Le graphe orienté est alors composé de couples de sommets ordonnés $G = (V, A)$ où A est l'ensemble des arcs et V l'ensemble des sommets (pour *vertex*).

---

[1] Par la suite, on utilisera le terme *lien* pour désigner indifféremment un arc (orienté : représentation d'un thalweg) ou une arête (non orientée : représentation d'une crête).

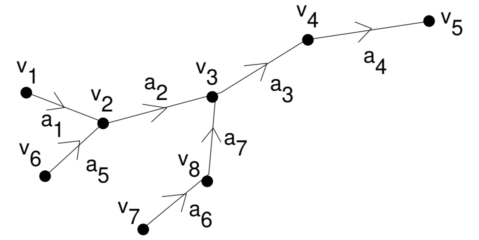


Figure 18 : Un exemple d'arbre : extrait d'un réseau de drainage.

$G = (V, A)$

$A = \{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7\}$

$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8\}$

$A = \{[v_1, v_2], [v_2, v_3], [v_3, v_4], [v_4, v_5], [v_6, v_2], [v_7, v_8], [v_8, v_3]\}$

On peut alors définir la notion de degré. Le nombre d'arcs qui arrivent à un sommet $v \in V$ est le degré intérieur d_v^+ et le nombre d'arcs qui partent du sommet v est le degré extérieur d_v^-. Plus précisément, le réseau de thalwegs se représente numériquement par un arbre (si on ajoute une arête entre deux sommets du graphe, on obtient un cycle). A partir de l'exemple du réseau de thalwegs de la figure 5 et de la matrice d'incidence, on calcule les degrés de chaque sommet :

v	d_v^+	d_v^-	
1	0	1	source
2	2	1	confluence
3	2	1	confluence
4	1	1	
5	1	0	exutoire
6	0	1	source
7	0	1	source
8	1	1	

En théorie des graphes, on appelle nœud un sommet de degrés $d_v^+ \geq 2$ et $d_v^- = 1$ ou un sommet de degrés $d_v^+ = 1$ et $d_v^- \geq 2$. Un tel nœud correspond, en géomorphologie, respectivement à une confluence ou à une diffluence. Une source est un sommet tel que $d_v^+ = 0$ et $d_v^- = 1$ et un exutoire est un sommet tel que $d_v^+ \geq 1$ et $d_v^- = 0$. Les autres points de degrés $d_v^+ = d_v^- = 1$ sont appelés sommets ou points intermédiaires et n'ont pas de signification géomorphologique particulière puisqu'ils indiquent simplement un changement de direction du cours d'eau (ou thalweg).

A ces définitions de base, [Argemiro *et al.*, 92] ajoutent des éléments géographiques tels que le lac, objet hydrographique sans direction d'écoulement où aboutissent et ressortent des cours d'eau, l'île, qui sépare un cours d'eau temporairement en deux cours d'eau distincts qui se rejoignent ensuite, le delta, diffluence en plusieurs cours d'eau, non suivie d'une confluence mais de points exutoires.

L'extraction des éléments caractéristiques du relief fournit, par conséquent, une nouvelle structure de données dont l'unité élémentaire n'est plus le point mais le nœud et le lien formé de l'association de plusieurs noeuds. Le niveau supérieur se compose de l'association de liens (arcs pour les thalwegs, arêtes pour les crêtes) et de nœuds. Enfin, à l'instar des travaux de [Brändli, 94], le dernier niveau est un réseau imbriqué de crêtes et de thalwegs. La figure 6 reprend le schéma proposé dans [Brändli, 94] d'un modèle conceptuel, qui utilise une approche descendante partant, au niveau le plus élevé, d'un champ continu altimétrique (cf. partie II). Les étapes successives correspondent à un enrichissement progressif en éléments structurants (cf. infra 4.2.1). Les propriétés essentielles sont donc le degré croissant de détails et le changement de représentation de la surface vers une vue orientée objet.

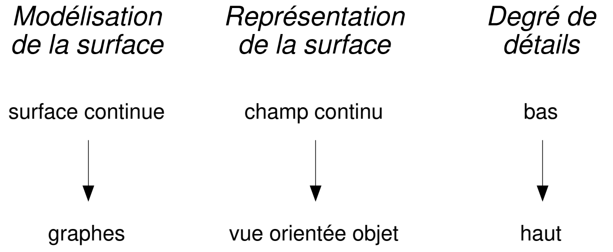


Figure 19 : Une approche descendante selon Martin Brändli (1994).

2. 2.3. Deux familles de méthodes d'extraction

La recherche des réseaux d'éléments structurants du terrain a donné naissance à un grand nombre de travaux, notamment en modélisation hydrologique et en traitement de la qualité de l'eau. Il existe différentes classifications possibles de ces méthodes de détection des lieux de drainage selon les hypothèses formulées *a priori*. [Riazanoff *et al.*, 92] distinguent l'*analyse statistique*, qui s'intéresse à chaque point du MNT de manière individuelle (statistique parce que les calculs décrivent le comportement d'un point dans un échantillon limité à un voisinage du type 3×3), de l'*analyse structuraliste*, inspirée du modèle physique de ruissellement (structuraliste parce que l'étude du terrain extrait directement ses structures linéaires). A partir de ces notions, nous définissons deux familles de procédés.

2. 2.3.1. Démarches statistiques

La première famille recherche les points de thalweg dans une fenêtre mobile par examen des voisins, indépendamment du résultat de l'examen du point précédent. Par exemple, [Haralick, 83] fonde son étude sur l'estimation préalable d'une surface polynomiale cubique autour de chaque point, en tenant compte de ses voisins, afin de déterminer les points de crêtes et thalwegs par étude des dérivées premières et secondes. Pour cela, il part de l'interprétation intuitive selon laquelle une crête numérique (respectivement un thalweg) est le lieu où une séquence de points connexes a des valeurs de gris d'intensité significativement haute (respectivement basse) par rapport aux points qui entourent la séquence.

Localement, ces points significatifs font partie d'un ensemble que [Wood, 96] appelle éléments morphométriques plutôt que géomorphométriques parce qu'ils caractérisent n'importe quelle surface. Cet ensemble se subdivise en cuvettes, cols, sommets, thalwegs, crêtes et plats. En reprenant la méthode 6 analysée par Andrew Skidmore pour le calcul de la pente (cf. supra 2.1.1), la surface locale est approchée par une quadratique d'équation :

$$z = \beta_3 x^2 + \beta_4 y^2 + \beta_5 xy + \beta_1 x + \beta_2 y + \beta_0$$

L'étude du signe des dérivées partielles secondes $2\beta_3 = \delta^2 z/\delta x^2$ et $2\beta_4 = \delta^2 z/\delta y^2$ donne une information largement utilisée dans la littérature pour la détermination de l'ensemble des éléments morphométriques. D'autres informations sur la pente ou les convexités verticale et horizontale permettent d'affiner les résultats et de diminuer les artefacts. La description des éléments est extraite de [Wood, 96] :

- sommet : $\beta_3 > 0$, $\beta_4 > 0$ point sur une convexité locale dans toutes les directions ;

· crête	: $\beta_3 > 0$, $\beta_4 = 0$	point sur une convexité locale orthogonale à une ligne sans convexité/concavité ;
· col	: $\beta_3 > 0$, $\beta_4 < 0$	point sur une convexité locale orthogonale à une concavité locale ;
· plat	: $\beta_3 = 0$, $\beta_4 = 0$	point ni sur une convexité ni sur une concavité de la surface ;
· thalweg	: $\beta_3 < 0$, $\beta_4 < 0$	point sur une concavité locale orthogonale à une ligne sans convexité/concavité ;
· cuvette	: $\beta_3 < 0$, $\beta_4 < 0$	point sur une concavité locale dans toutes les directions.

Cette classe de méthodes pose des problèmes majeurs quant au seuillage des détections et au chaînage des pionts pour former un réseau et quant à leur robustesse par rapport au bruit, c'est pourquoi nous ne l'avons pas plus développée.

2. 2.3.2. Démarches structuralistes

Ce type de démarches s'appuie sur le suivi du chemin d'écoulement des eaux pour détecter les thalwegs. Chaque point reçoit, au début, une même quantité d'eau. Puis, l'écoulement de l'ensemble des quantités d'eau est calculé en constituant une matrice d'accumulation du volume d'eau ayant traversé chaque point. Les thalwegs sont alors les points sur lesquels une quantité importante d'eau est passée. [McCormack *et al.*, 93] se sont intéressés, notamment, aux bruits rencontrés dans le MNT, qu'ils ont limités aux dépressions et aux plateaux. Ils représentent les principales difficultés que doit traiter ce type de méthodes d'extraction, qui sont souvent évaluées dans les SIG selon leur capacité à gérer ces cas.

Un second type de difficultés, décrit dans [Jamet, 95], provient du choix des seuillages et de l'influence de la maille. Ainsi, si le chemin d'écoulement est limité aux directions préférentielles du maillage (8-connexes), de nombreux artefacts apparaissent, principalement sur les zones lisses, puisqu'il ne suit que rarement la plus grande pente. La valeur d'accumulation n'a pas de sens sur un plan incliné, par exemple, parce qu'elle est directement fonction de la longueur du plan et peut donc être aussi élevée que dans un thalweg. Différentes solutions ont été apportées pour éviter ces défauts. Notamment, [Riazanoff *et al.*, 92] prennent en compte la pente *réelle* et apportent ainsi une solution à la discrétisation des directions. [Fairfield et Leymarie, 91] proposent également une solution à ce problème de discrétisation en introduisant une méthode stochastique de détermination du voisin en 8-connexité qui recevra le volume d'eau.

[Freeman, 91] répond à plusieurs problèmes cités précédemment. Il introduit le flot multidirectionnel qui répartit le flot sortant d'un point entre tous ses points receveurs (plus bas) et, en cela, il infirme l'idée selon laquelle le flot sortant d'un point passe seulement par son voisin le plus bas. Il propose également une amélioration de la méthode de [Jenson et Domingue, 88] pour déterminer un chemin de drainage sur les zones plates, utilisant la méthode de flot divergent, et propose une solution pour éliminer les cuvettes par élévation de la surface cuvette à son col le plus bas.

2. 2.3.2. a. Par détection de points remarquables

La première de ces démarches fonde ses méthodes d'extraction sur la détection préalable de points de départ, qui sont des points caractéristiques du relief. Puis, un graphe dérivé est construit, attribuant à chaque point la direction de la maille voisine suivant la plus grande pente. Par exemple, [Dufour, 87] attache une importance particulière aux cols. Il détermine les points remarquables d'un MNT, autrement dit les sommets, cols et cuvettes, avant de tracer les lignes de crêtes et de thalwegs qui en partent. Puis il reproupe les nœuds de la grille dans deux classes, l'une hydrographique et l'autre orographique. Cette méthode de calcul détecte les lignes principales mais certaines anomalies subsistent : crêtes recoupant des thalwegs, thalwegs se jetant dans un col, points remarquables parasites.

Une autre hypothèse testée est qu'un point qui n'est pas un puits draine exactement un et un seul de ses voisins et un point de crête est un point qui n'a pas d'entrée de drainage. [O'Callaghan et Mark, 84] déduisent d'une matrice d'accumulation du drainage un arbre de recouvrement formé des vallées de drainage. La vallée regroupe l'ensemble des points pour lesquels l'écoulement est suffisamment concentré pour que le processus fluvial domine sur l'effet de pente. Par simulation de la concentration de l'écoulement en chaque point, les points ayant un écoulement supérieur à un certain seuil appartiennent au réseau de thalwegs. Cette approche présente un attrait pour les géomorphologues puisqu'elle se fonde sur des conditions physiques relatives aux processus naturels. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle ne peut satisfaire un critère à la fois géomorphologique et cartographique car, selon le seuil d'accumulation, un choix répondant à une appréciation géomorphologique donne, sur les grandes pentes uniformes, des vallées parallèles qui sont souvent indésirables cartographiquement.

2. 2.3.2. b. Par tracé dynamique

Le second groupe de démarches structuralistes procède par un calcul d'écoulement sur toute la surface sans déterminer de points de départ pour les réseaux. [Le Roux, 93] analyse de telles méthodes. Au lieu de suivre les lignes de thalwegs à partir des cols, l'algorithme d'Hervé Le Men, par exemple, traite chaque point en deux étapes. La première analyse en 8-connexité le voisinage et détermine ainsi localement le drainage selon la plus grande pente. La seconde étape suit le fléchage de drainage pour associer à chaque point sa valeur de drainage incrémentée de la somme des superficies drainées par ses prédécesseurs. Un point *fond de thalweg* est un point dont la valeur de drainage est importante dans la hiérarchie des surfaces. Ce type de traitement unidirectionnel ne résout pas le problème du biais faisant apparaître des drains linéaires dans l'une des directions privilégiées et dû au choix d'un seul successeur pour chaque point. Une autre méthode est présentée qui reprend l'algorithme précédent mais en éliminant le problème du biais par l'intégration des résultats de [Freeman, 91] sur le flot multidirectionnel (résultats présentés plus haut).

De même, [Quinn *et al.*, 91] analysent les apports de deux approches, l'une à flot multiple, l'autre à flot unique. Leur modèle est plus proche des phénomènes hydrauliques puisque leur hypothèse *a priori* est : un modèle doit non seulement refléter le chemin de l'écoulement d'une goutte d'eau tombant en n'importe quel point d'un bassin, mais aussi les variations spatiales et temporelles de la vitesse de son écoulement tout au long de son parcours jusqu'au point exutoire. Le facteur pris en compte pour les calculs est la topographie (pente) qui donne une bonne indication du potentiel gravitationnel et fournit ainsi une base utile pour modéliser les variations spatiales du chemin et de la vitesse d'écoulement. La comparaison montre que les tracés sont différents et, par conséquent, les prédictions hydrologiques qui en découlent le seront aussi. L'approche flot multidirectionnel fournit un dessin plus réaliste des surfaces d'accumulation sur la partie amont du bassin mais, dans le fond de la vallée, un flot unidirectionnel apparaît plus adapté. Les auteurs suggèrent d'améliorer leur méthode en forçant le flot multiple à rester dans la vallée pour sortir du bassin versant.

Conclusion

N'apparaissent dans cette présentation qu'un petit nombre de travaux sur l'extraction des crêtes et thalwegs. On pourra trouver d'autres références notamment dans [Mark, 83], [Jenson, 85], [Band, 86], [Chorowicz *et al.*, 89], [Seemuller, 89], [Skidmore, 90], [Chatelain, 92], [Wolf, 92], [Carvalho, 95], [Brändli, 97]. La démarche structuraliste par tracé dynamique paraît la plus proche du phénomène naturel d'écoulement des eaux. D'une part, elle se libère d'une étude restreinte à un voisinage autour de chaque point, d'autre part, elle évite le choix des points de départ, qui peuvent être bruités et introduire ainsi de faux éléments topographiques. L'algorithme que nous utilisons (développé par Olivier Jamet du laboratoire MATIS de l'IGN), décrit dans le paragraphe 4.2.1, combine les résultats de plusieurs travaux présentés ci-dessus.

3 Démarches globales de classification

Nous avons vu dans les chapitres précédents les principes classiques de segmentation et les éléments d'analyse quantitative pour une segmentation à but géomorphologique. Nous étudions, dans ce chapitre, trois exemples de démarches globales de segmentation qui mettent en jeu ces notions. L'intérêt de ces démarches pour nos travaux repose, en partie, sur la méthodologie employée par chacune d'elle. La conclusion synthétise leur apport (limites des démarches et problèmes rencontrés).

[Le Men, 96b] applique l'analyse d'images satellitaires à la cartographie de l'évolution de l'occupation des sols. Les travaux présentés dans [Niemann et Howes, 91] définissent une démarche de caractérisation des zones de glissement potentiel du terrain à partir d'un MNT en adaptant une analyse de clusters non supervisée par des paramètres géomorphométriques. [Weibel et DeLotto, 88] analysent et critiquent différents procédés de classification pour une approche en géomorphométrie générale.

3. 1. Une classification type occupation du sol

La cartographie de l'occupation des sols rend compte des paysages, au travers de la nature de l'organisation et de la répartition du couvert, résultats du milieu physique et de son aménagement par l'homme. *Une carte de paysage vise à définir des unités homogènes dans leur fonctionnement dont la détermination s'appuiera (entre autres choses) sur l'analyse de la répartition et l'organisation de l'occupation du sol* [Le Men, 96b:5]. La principale contrainte provient de la restriction de la représentation graphique à une surface restreinte, ce qui impose l'élimination des objets, ou des détails d'un objet, trop petits (généralisation cartographique, cf. partie V). La classification des pixels de l'image de départ nécessite ainsi l'intégration des contraintes cartographiques. La qualification d'une zone dépend de ce qu'il y a réellement sur le sol et de la possibilité de le représenter. Les travaux de [Le Men, 96b] se décomposent, par conséquent, en trois étapes primordiales :

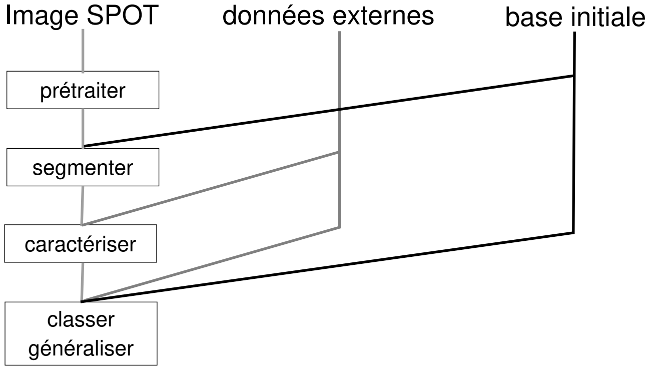
· la segmentation et l'extraction des paramètres ;

· la caractérisation (qu'y a-t-il à cet endroit ?) ;

· la classification avec l'introduction des contraintes spécifiques à l'application.

De plus, une phase de prétraitement est indispensable avant toute analyse d'image de façon à filtrer les données, ici par correction d'éclairement. L'organigramme de la figure 7 résume cette séquence d'opérations. Notre démarche globale de traitement haut-niveau d'un MNT suit la même décomposition en phases successives (cf. partie I). Notre phase de prétraitement est une extraction/interprétation de l'information pertinente en vue du traitement souhaité, *i.e.* une extraction des éléments structurants. Dans notre cas, un MNT est traité et les données externes correspondent à une connaissance structurale et procédurale (cf. partie V). Notre phase de segmentation utilise des techniques empruntées à l'analyse d'image pour subdiviser le MNT en zones homogènes selon un critère à nature topographique. Notre phase de caractérisation se fonde, entre autres, sur les résultats de la segmentation pour qualifier les zones résultantes.

Figure 20 : Enchaînement des traitements pour une classification des évolutions de l'occupation du sol selon Hervé Le Men (1996).



La segmentation de l'image proposée dans [Le Men, 96b] s'effectue par une méthode descendante de détection de contours (une utilisation de la détection de contours par approche dérivative est proposée dans la partie IV). Ensuite, vient une phase de caractérisation. Les paramètres de caractérisation des zones sont choisis parmi la pente, la régularité des contours, le parallélisme des rectangles, les moyennes de l'intensité, la teinte et la saturation, et différents écarts types. La normalisation de ces paramètres est effectuée à partir d'une analyse en composantes principales. La classification consiste alors à introduire des données statistiques considérées comme des probabilités *a priori* de contraintes de généralisation cartographique, avant d'effectuer le choix définitif de classement. L'évaluation des résultats a lieu en comparant avec une référence et en appariant des groupes de régions (évalue la part d'erreurs, comptabilise les excédents, omissions et erreurs d'affectation).

Enfin, il est mis en évidence que le choix de la méthode de classement n'est pas crucial par rapport au choix des informations à classer, qui peuvent être des informations externes ou des vecteurs de paramètres extraits de l'image.

C’est le contexte dans lequel est placée la phase de segmentation et non les traitements appliqués aux données qui s’accorde avec nos travaux (données initiales différentes).

3. 2. Une étude sur la stabilité de la pente

Diverses stratégies pour la construction de zones à forte probabilité d’instabilité du terrain ont été développées, allant de simples inventaires des mouvements existants à la cartographie de multiple facteurs tels que la pente, la géologie, le sol et autres variables. L’inventaire des glissements de terrain étant très limité (interprétation individuelle, limitation de l’extrapolation des résultats à d’autres zones), la stratégie la plus commune pour évaluer les glissements hasardeux utilise une modélisation multidimensionnelle [Niemann et Howes, 91]. L’élément récurrent dans ce type de techniques est le désir de décrire et d’évaluer la morphologie du paysage en respectant les processus dus à la pente. Pour cela, les valeurs mesurées sont classées par groupes spécifiques qui définissent ainsi des zones morphologiques du terrain, ces zones sont elles-mêmes corrélées avec le comportement de processus spécifiques.

L’objectif des travaux de Olaf Nieman et Donald Howes est d’étudier les possibilités d’utilisation d’un MNT et de variables géomorphométriques pour la cartographie des zones de stabilité de la pente. La méthode utilisée se décompose en deux étapes :

- le développement d’un modèle morphologique qui décrit les différentes propriétés du terrain, telle que la pente, la courbure et les aires de drainage ;
- le développement de modèles statistiques pour créer des unités morphologiques pour l’évaluation de la stabilité.

Les auteurs définissent cinq paramètres géomorphométriques qui déterminent le gradient et l’exposition, la courbure horizontale et verticale, utilisant un polynôme du troisième degré pour approximer la surface autour de chaque point. Un cinquième paramètre est la grandeur de la surface drainée par chaque point calculée par la méthode [O’Callaghan et Mark, 84] (pour la description cf. supra 2.2.3).

L’hypothèse, sur laquelle repose l’analyse statistique, est qu’un paysage peut être divisé en un certain nombre de clusters ou de groupements dont l’union décrit entièrement ce paysage. Etant donnée la relation étroite entre formes et processus naturels (connaissance *a priori*), ces groupements sont corrélés avec les processus opérant sur le paysage. Une fois segmenté, le MNT est qualifié par identification des associations entre chaque sous-partie et les processus de stabilité estimés. Quatre classes sont définies plus une classe d’inclassables. Par exemple, la classe d’instabilité la plus forte correspond au taux de glissement le plus haut après déforestation. Elle regroupe trois ensembles de processus : (1) fort gradient, courbure verticale négative, aire de drainage amont large ; (2) petite aire de drainage amont, gradient excessivement haut ; (3) faible gradient (plus des torrents), aire de drainage importante et courbure horizontale concave.

La méthode de classification la plus intéressante (par rapport aux résultats) parmi les deux proposées emploie une analyse de clusters non supervisée. La principale difficulté est la détermination du nombre de clusters présents dans l’ensemble des données. La méthode adoptée est une procédure stratifiée : les mesures morphologiques sont réparties en clusters par analyse des moments d'ordre k. Le premier paramètre découpé en clusters est la pente, puis le drainage à partir des clusters précédents et enfin, simultanément, les deux paramètres de courbure.

La seconde méthode évaluée opère par analyse discriminante à partir d'une connaissance *a priori* sur les glissements naturels du terrain. La correspondance entre la carte référence et la carte calculée est très insatisfaisante, mais les auteurs attendaient un plus mauvais résultat encore du fait de la grande différence de construction entre les deux approches.

Les auteurs concluent qu'un MNT fournit une évaluation rapide et objective des paramètres géomorphologiques pour son utilisation dans la cartographie des risques d'instabilité. Afin d'évaluer la classification numérique, ils la comparent à la méthode traditionnelle multiparamétrique. Les deux cartes obtenues tendent à se rapprocher, mais la carte numérique apparaît plus grossière que la carte traditionnelle, ce qui est dû au nombre et au type de paramètres géomorphologiques utilisés ainsi qu'à la résolution du MNT. La carte traditionnelle incorpore d'autres informations telles que le type de matériau et son épaisseur, et l'absence ou la présence de petites formes locales (petits ravins d'érosion, escarpements profonds), qui ne peuvent pas être détectées par le MNT à cause de sa résolution (50m).

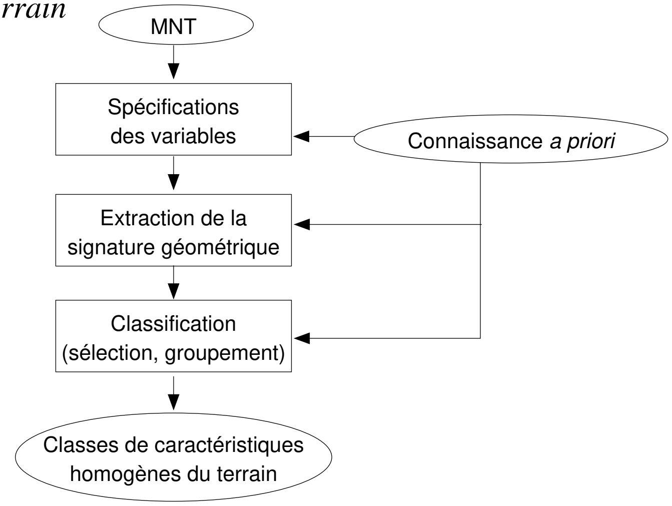
3. 3. Une analyse topographique du terrain

En plus de l'amélioration des modèles représentant des phénomènes naturels, la classification de MNT peut fournir une connaissance pour le guidage d'opérations de manipulation de MNT. Notamment, la généralisation nécessite cette base de connaissance sur les caractéristiques du relief, puisque son but est la conservation d'une représentation reconnaissable d'un élément géographique plutôt qu'une simple réduction mathématique [Weibel, 87] (cf. partie V). L'objectif général d'une telle classification des données terrain se décompose en deux points :

- simplifier une situation complexe modélisée par les données initiales ;
- extraire de nouvelles couches d'information à partir d'un modèle sémantiquement pauvre.

Dans le processus de classification numérique du terrain, [Weibel et DeLotto, 88] distinguent trois étapes principales interdépendantes (cf. figure 8). La première phase, *spécifications des variables*, consiste à choisir des variables pour la classification de façon à ce qu'elles reflètent les propriétés connues du phénomène. L'approche envisagée correspond à utiliser un grand nombre de variables puis les sélectionner ou les transformer selon les résultats. La deuxième phase, *extraction de la signature géométrique*, mesure, en chaque point, la valeur des variables et fournit ainsi une description multivariée. La dernière phase, *classification*, sélectionne les variables pertinentes, ou les transforme, de manière à réduire les corrélations, puis, classe chaque point.

Figure 21 : Séquence de classification du terrain selon Robert Weibel et Joseph DeLotto (1988).



Nous rappelons qu'en analyse du terrain, une méthode courante de classification est le traitement des mesures paramétriques, qui consiste à évaluer les paramètres géomorphométriques, souvent à partir d'un MNT maillé par l'intermédiaire d'une fenêtre mobile uniforme. Chaque point visité par la sous-matrice est caractérisé par une description multidimensionnelle de la géométrie de la surface locale, formant ainsi la signature géométrique (cf. supra 2.1). [Weibel et DeLotto, 88] décrivent ensuite les deux phases de la classification, à savoir la sélection des attributs et le classement (cf. supra 1.2).

Tout d'abord, un prétraitement des variables utilisées permet d'éliminer les multicolinéarités, soit par sélection de variables fondée sur une analyse de corrélation, soit par transformation de variables à partir d'une analyse des composantes principales. En effet, si les variables ne sont pas corrélées, elles participent à la définition de la topographie et sont donc adaptées à la classification. Les auteurs déterminent par analyse des corrélations un ensemble de sept variables, parmi les vingt-cinq qu'ils ont testées, qui se constitue de : la pente, les intervalles d'altitude, un facteur de rugosité, la moyenne des pentes, l'écart type de la convexité, la densité de drainage, le nombre de points plus élevés que le point central.

En second lieu, les auteurs comparent une méthode classique de classification multidimensionnelle, à savoir une analyse discriminante, et la méthode proposée par D. Starr et A.K. Mackworth (1978), qui est un calcul du maximum de vraisemblance combiné à une croissance de régions. Cette dernière permet de classer les éléments par rapport au contexte et non plus seulement par rapport aux caractéristiques des attributs. Les régions pour lesquelles l'interprétation n'est pas ambiguë (forte probabilité d'appartenance à une classe) influent sur l'interprétation des régions ambiguës.

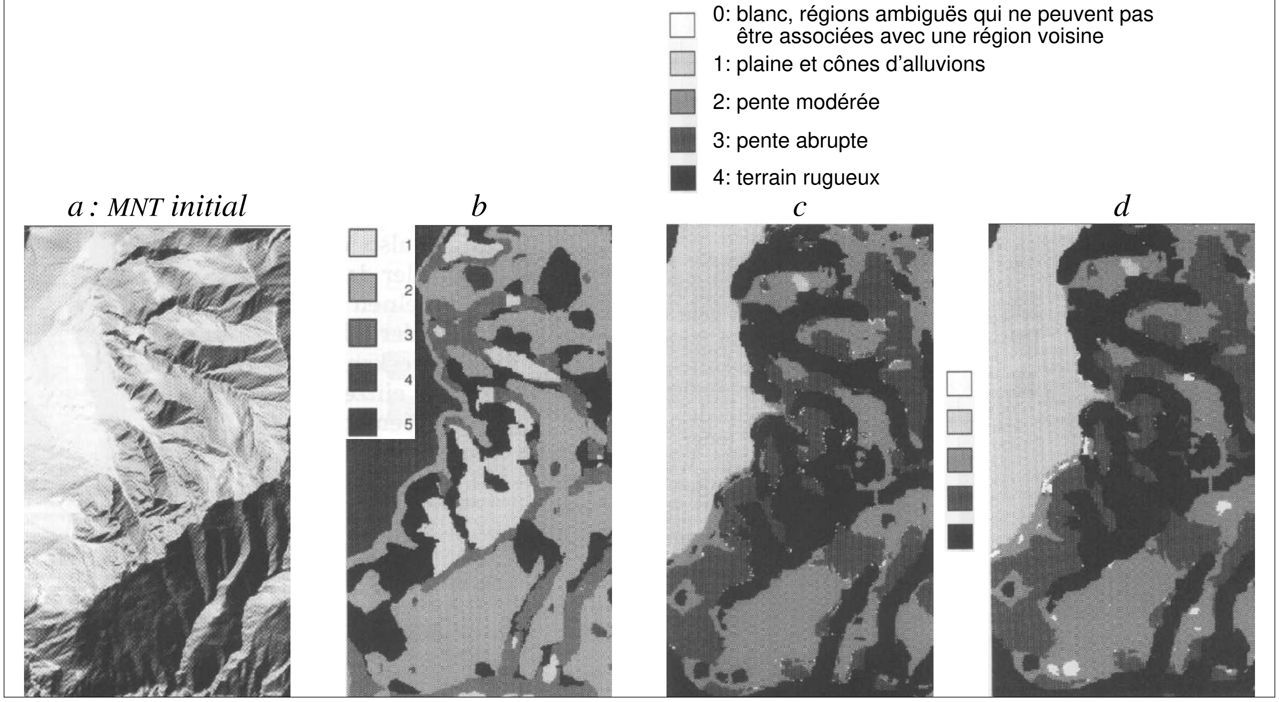
La figure 9 reprend les résultats de leur classification du terrain par une méthode d'analyse discriminante sensible au contexte. Ils montrent que quelques points sont affectés différemment par rapport à la méthode classique et une certaine homogénéisation apparaît, relativement à la partition qui présente un nombre moindre de régions. Cependant, les différences ne sont pas très importantes. En fait, les problèmes majeurs qui limitent les résultats de la classification proviennent de la qualité du MNT, des techniques d'extraction de variables géomorphométriques et de la sélection d'une taille uniforme pour la fenêtre mobile.

Figure 22 : Classification du terrain en régions topographiques homogènes selon Robert Weibel (1989).

b : Partition par analyse de cluster (3 variables: facteur de rugosité pente moyenne, écart type de la convexité verticale ; 5 classes).

c : Partition par analyse discriminante (méthode de recherche du plus proche voisin, mêmes variables ; 4 classes).

d : Partition par analyse discriminante sensible au contexte avec fusion de régions (méthode de D. Starr et A.K. Mackworth, 1978)



a : MNT initial — *b* — *c* — *d*

3. 4. Conclusion

Quel que soit le processus naturel que les auteurs ont cherché à cartographier (évolution de l'occupation du sol, glissements de terrain, caractéristiques géomorphologiques), il s'avère que la qualité de la segmentation est prépondérante : l'objectif est de fournir une description pertinente de tous les éléments d'un MNT ou d'une image numérique par l'accomplissement d'une classification des différentes sous-parties ainsi délimitées selon un critère précis défini *a priori*. La segmentation est, par ailleurs, beaucoup plus conditionnée par le choix des variables (qui entrent dans la constitution de la signature) que par le choix de la méthode du fait de l'introduction d'une connaissance sur le comportement de l'image en fonction du thème cherché. Ce choix doit être suffisamment large pour décrire la signature géométrique puisqu'aucun nombre magique n'existe, qui exprimerait le caractère topographique d'une région [Pike, 88]. Il n'existe pas non plus d'ensemble standard de variables à utiliser pour toute application. Cependant, le choix d'une taille uniforme pour la fenêtre mobile limitent l'élaboration de la signature.

Par conséquent, l'étude de travaux de recherche diversifiés dans le domaine de la qualification numérique du terrain nous amène aux conclusions suivantes :

· l’objectif de la segmentation détermine les critères à respecter ;

· les critères dépendent du processus étudié (connaissances provenant de la discipline associée) et de la nature des données ;

· la signature géométrique se définit par un ensemble d’indicateurs géomorphométriques qui décrivent les variations du relief, la pente en est le plus important ;

· l’utilisation d’une fenêtre glissante limite le calcul des indicateurs géomorphométriques ;

· les réseaux d’éléments caractéristiques forment l’information structurante de base ;

· une stratégie de segmentation se détermine en fonction de l’objectif souhaité, du processus modélisé et des connaissances *a priori*.

4 La méthode de segmentation proposée

Suivant les besoins intrinsèques de l’application visée, existent de nombreux traitements de la segmentation d’un MNT ; nous en avons décrit trois dans le paragraphe précédent. La première chose qu’il convient de déterminer est le but de la segmentation (quel objectif ? quel processus est étudié ? quel ordre de grandeur ?). Ce qui conduit à mettre en place une stratégie globale de segmentation (quel but ? quelles connaissances *a priori* ? selon l’objectif, quelles méthodes conviennent ?).

L’objectif de notre démarche est de déterminer des zones où le relief est homogène, qui nous permettront par la suite de caractériser les formes et les variations du terrain. L’interprétation visuelle et l’analyse géomorphologique de la région entière aboutissent à un découpage en méso-zones homogènes. Dans un contexte de recherche, c’est cette partition intuitive que nous allons essayer d’approcher.

La notion de topographie homogène n’est formellement définie ni dans la littérature, ni dans les spécifications des bases de données géographiques. Les limites d’une zone topographique sont floues naturellement, d’ailleurs deux experts humains ne les feront pas passer exactement par les mêmes lieux. C’est pourquoi il convient mieux d’utiliser une méthode par regroupements de points plutôt qu’une méthode de détection de contours : le contour correspond aux changements de propriétés physiques ou géométriques du phénomène observé à condition que l’information soit présente dans l’image (cf. supra 1).

En accord avec cet objectif, la stratégie vise à déterminer, dans un premier temps, un ensemble de points remarquables du relief par rapport à la structure topographique (réseaux de crêtes et thalwegs). La segmentation s’appuie alors sur des cellules de Voronoï (graphe d’adjacence) associées à ces points caractéristiques, et non plus sur des points de la matrice, en utilisant des indicateurs géomorphométriques (multidimensionnel) choisis dans la littérature et résumés par un indicateur global (monodimensionnel), *i.e.* elle suit une approche descendante (cf. supra 1.3.2).

4. 1. Démarche globale de segmentation

Notre démarche globale de classification doit aboutir à une segmentation du terrain en méso-zones topographiquement homogènes, à partir d'une analyse des réseaux d'éléments structurants et de mesures géomorphométriques. Ces méso-zones pourront ensuite être caractérisées (quelles sont les formes qualificatives de chaque zone ? cf. partie IV) afin d'y appliquer un traitement adapté (quelle opération préserve la morphologie locale ? cf. partie V).

4. 1.1. Objectifs

Une zone topographique est difficilement définissable. En effet, l'œil perçoit des régions à topographie homogène. Les spécialistes convergent, en première approximation, dans leur proposition d'un découpage visuel mais il n'existe pas de définition formelle précise dont on puisse déduire une procédure qui permette de délimiter nettement ces zones. Le contrôle visuel paraît donc primordial pour l'évaluation d'une telle segmentation.

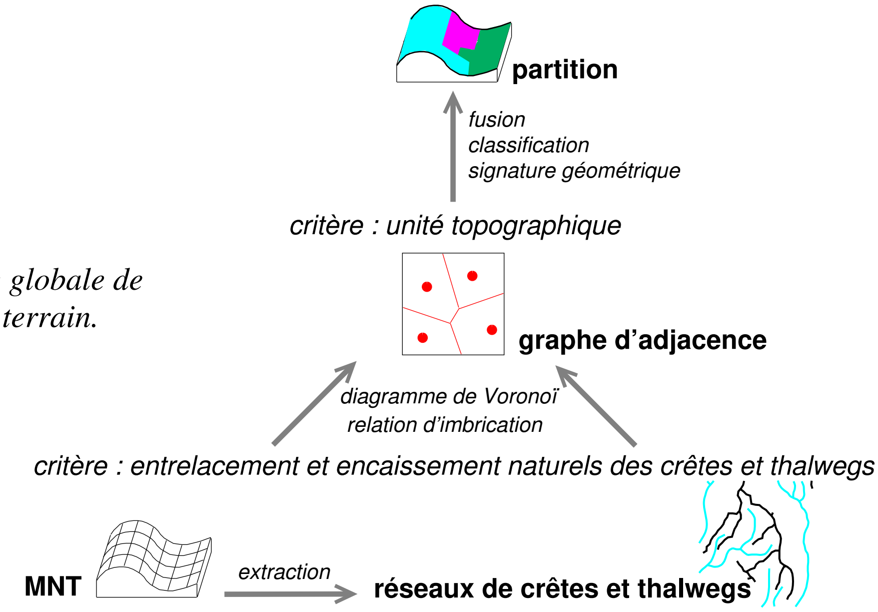
D'autre part, la précision des frontières importe moins que la détermination de la nature géomorphologique de la zone. Le but de la segmentation est d'établir des mesures à nature statistique dans une zone de façon à les qualifier et, par conséquent, un certain degré d'imprécision sur les frontières est tolérable. De plus, le concept de zone topographiquement homogène demeure assez flou, ce qui implique la tolérance d'une part d'arbitraire. Par contre, la segmentation sera considérée bonne si l'on retrouve le même nombre de zones et grossièrement la même répartition sur le plan que celle définie *a priori* par un expert. Par ailleurs, après segmentation et caractérisation, chaque zone subit un traitement numérique qui déborde généralement sur les zones voisines, ne serait-ce que dans le but d'amortir progressivement les effets du traitement, formant ainsi des recouvrements autour des frontières. La gestion des raccords après traitement intègre donc les résultats obtenus sur les zones de recouvrement. Au pire, si le traitement d'une zone exige des limites très précises, il existe des techniques de relaxation pour affiner les contours d'une manière locale.

La segmentation souhaitée correspond à un méso-relief de l'ordre de 10^2km². Elle correspond ainsi à une segmentation dont les sous-parties ont une superficie supérieure aux micro-zones (obtenues par un graphe d'adjacence) et au seuillage des bassins versants extraits (seuls les bassins qui ont une superficie supérieure à 10^5m² sont pris en compte).

4. 1.2. Schéma général

Notre démarche de segmentation, représentée schématiquement par la figure 10, combine deux types de méthodes : une méthode descendante (construction d'un graphe d'adjacence et détection des intérieurs) puis une méthode ascendante (classification/fusion) dont les principes généraux ont été énoncés au paragraphe 1.3. Tout d'abord, une phase de prétraitement permet l'extraction de l'information structurante (réseaux de crêtes et thalwegs) qui sert de base à la définition de deux nouveaux critères utiles de segmentation (entrelacement et encaissement). Une nouvelle partition du MNT en micro-zones est alors créée ; ces micro-zones sont ensuite fusionnées après leur qualification par des indicateurs adaptés.

Figure 23 : Notre démarche globale de classification du terrain.



4. 2. Critère de segmentation

Les éléments caractéristiques du relief concourent à définir le paysage dans le sens où ils forment la base même de sa structure. Leurs particularités physiques et leur répartition spatiale déterminent les types de relief. Les principaux éléments, ceux qui sont les plus repérables et les plus discriminants dans une large gamme de types de relief (mais pas toujours), sont les crêtes et les thalwegs. Ils sont jugés suffisants, à ce stade, pour des paysages français. Par exemple, dans une région alpine, les crêtes typiques sont saillantes, très sinueuses et longues. Elles sont séparées par de nombreux thalwegs très encaissés (cf. partie II).

C'est cette notion physique (et géomorphologique) de variabilité de l'encaissement et de l'entrelacement qui sert de base à la construction d'une première segmentation en micro-zones géomorphologiquement homogènes.

La phase de prétraitement du modèle initial de données, qui précède la phase de segmentation proprement dite, consiste par conséquent en une extraction d'information géomorphologique supplémentaire à partir du modèle : les réseaux de crêtes et thalwegs (cf. infra 4.2.1 et 4.4.1). S'il n'y a pas de cours d'eau, le thalweg n'en existe pas moins puisqu'il est, rappelons-le, la ligne unissant les points bas d'une vallée. L'interfluve se décrit alors par un sommet (assimilé à une ligne, celle où se partagent les eaux tombées) et deux versants [Derruau, 90].

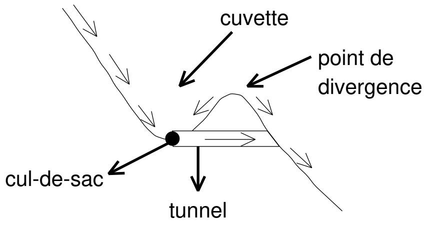
A partir des réseaux extraits, il est alors possible de déterminer leur degré d'encaissement et d'entrelacement.

4. 2.1. Extraction des réseaux de crêtes et thalwegs

Une méthode de simulation de l'écoulement des eaux détecte les réseaux de crêtes et thalwegs, et les bassins versants. Elle a été développée par Olivier Jamet (laboratoire MATIS de l'IGN) : le choix de résolution des différents problèmes est exprimé dans le paragraphe 2.2.3, la description des différentes étapes est extraite de [Monier *et al.*, 96]. Une analyse détaillée de la technique mise en œuvre a été formalisée dans [Delasnerie, 96] et les calculs sont explicités dans [Jamet, 95].

Figure 24 : Tracé de l'écoulement sur une coupe du terrain vue de profil.

↘ sens de l'écoulement des eaux



L'approche que nous utilisons opère par tracé dynamique à flot multidirectionnel approchant un modèle hydraulique, alors que la plupart des procédés trouvés dans la littérature conservent une unique direction d'écoulement en chaque point de la grille, basée sur la direction de la plus grande pente locale dans l'une des huit directions privilégiées. Le problème des cuvettes est résolu par recherche d'un tunnel d'écoulement qui rejoint le point cul-de-sac (au fond de la cuvette) à un point d'un autre bassin versant ayant la même altitude, comme le représente la figure 11. La détermination du chemin sur les zones plates se fait à l'aide d'un calcul de distance entre les points de la zone plate et les points de sortie, et d'une combinaison avec une variable aléatoire dans le cas d'égalité.

Ce type d'approche est asymptotiquement valable lorsque le pas de la grille devient plus petit. Avec une grille au pas de 40m ou plus, des erreurs apparaissent principalement sur des collines à sommet arrondi (écoulement divergent) et le choix d'un flot multiple devient plus performant.

4. 2.1.1. L'extraction des thalwegs

L'extraction du réseau de drainage s'effectue par le biais d'une modélisation de l'écoulement des eaux. Le calcul du régime permanent obtenu en présence d'une pluie continue uniforme fait apparaître les thalwegs comme les lieux où le débit est le plus fort. Du point de vue algorithmique, la méthode employée revient à considérer chaque point du MNT comme alimenté par tous les points d'altitude supérieure. Chaque point représente une surface élémentaire constante qui reçoit un volume d'eau donné par intervalle de temps. Par conséquent, le volume total d'eau reçu (par unité de temps) en un point est la somme de l'apport pluvieux et des volumes transmis par ses prédécesseurs. La transmission est calculée au prorata des pentes locales, puis les valeurs obtenues sont corrigées des effets d'orientation du maillage. La vectorisation des extrema s'effectue en suivant les chemins d'écoulement maximisant le débit. Le seuillage des détections est effectué en fonction de la surface du bassin versant correspondant et de la convexité locale du terrain accessible par calcul du gradient du débit.

4. 2.1.2. Les bassins versants

Les bassins versants sont un sous-produit naturel de la méthode de détection des thalwegs. Dans la modélisation de l’écoulement, chaque point du MNT possède des affluents et des successeurs. Un bassin versant est constitué de l’ensemble des points affluents d’un drain donné du réseau de thalwegs. Cet ensemble est calculé en mode discret (affectation de chaque point à un seul successeur).

4. 2.1.3. L’extraction des crêtes

S’il est plus difficile de donner une définition géomorphologique exacte des lignes de crêtes, on peut les considérer, en première approche, comme un sous-ensemble des frontières des bassins versants. Dans l’approche adoptée, les crêtes sont définies comme les frontières de bassin versant répondant à un critère de concavité minimale du terrain.

4. 2.1.4. Une hiérarchisation des données

Une hiérarchisation naturelle du réseau des thalwegs consiste à exprimer leur ordre d’importance en fonction du débit sortant des bassins versants associés. Le débit calculé ici n’est toutefois pas directement proportionnel au débit réel des cours d’eau effectivement présents sur le terrain (les sources ne sont pas prises en compte). Toutefois, il correspond à la surface (en projection horizontale) des bassins versants associés et garde ainsi une signification géomorphologique.

4. 2.2. Relation d’imbrication

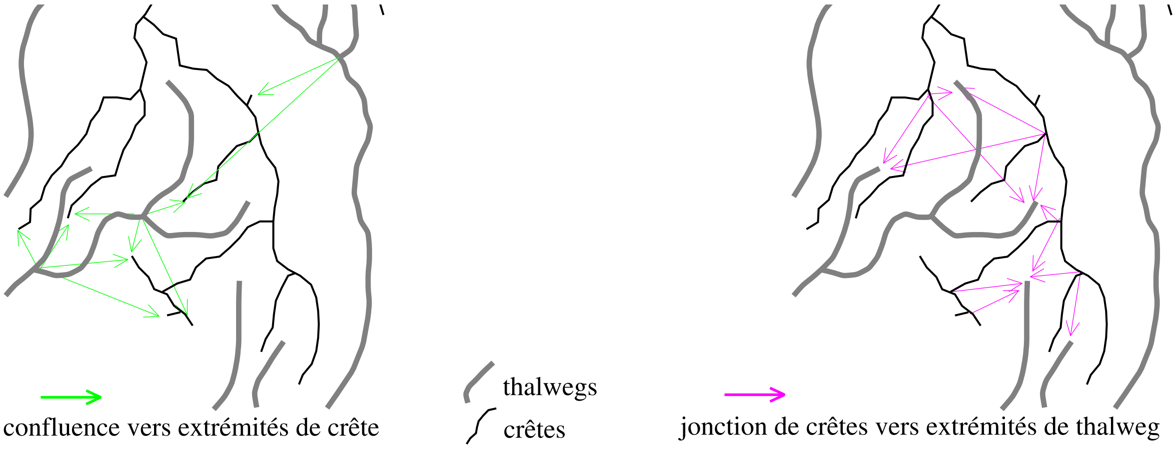
Etant donné que les crêtes et thalwegs s’imbriquent différemment selon la région, notre première idée a été d’étudier les relations qui peuvent exister entre ces éléments structurants. Il existe une relation naturelle puisque les crêtes sont définies dans la littérature comme un sous-graphe des frontières des bassins versants : le prolongement d’une crête vers une confluence de deux thalwegs délimite le bassin versant. De même, on peut estimer que l’éloignement d’une source par rapport aux crêtes qui l’encadrent donne une idée de l’imbrication des deux réseaux.

Par la suite, on note I[s] la valeur (d’altitude ou d’un indicateur) du site s(x, y) de coordonnées $(x, y) \in \mathbb{N}^2$. Dans le cas du MNT initial tel qu’il est défini dans la partie II, on a : I[s] = H(x, y) = z.

4. 2.2.1. Liens d’entrelacement et d’encaissement

Nous sommes donc parti des liens potentiels entre chaque confluence et extrémités de crêtes, et de la relation duale entre jonction de crêtes et extrémités de thalweg. [Riazanoff, 89] définit ces points caractéristiques en tant que point haut, pour un maximum local d’une zone concave, et point bas, pour un minimum local d’une zone convexe. Ses définitions s’appliquant à un certain voisinage (ici 3×3), nous préférons les exprimer en terme d’extrémité, qui suggère davantage l’idée de limite d’un objet continu. D’ailleurs, [Riazanoff, 89] part de l’ensemble des points singuliers pour construire les réseaux ; nous suivons la démarche inverse puisque nous récupérons les points une fois les réseaux construits.

Figure 25 : Des liens d'entrelacement et d'encaissement.



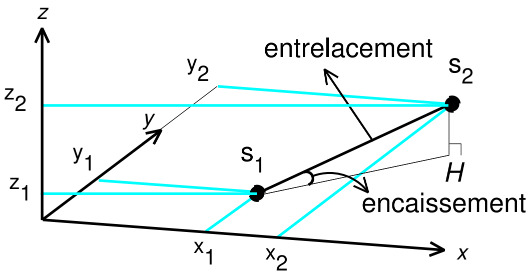
Nous avons donc fondé la définition du lien d'entrelacement et d'encaissement en déterminant les relations existant entre :

· soit une confluence de thalwegs et les extrémités de crêtes voisines ;

· soit une jonction de deux crêtes et les sources de thalwegs voisines.

Certains de ces liens sont illustrés sur la figure 12 : à gauche se trouvent les liens calculés des confluences vers les extrémités de crêtes voisines et, à droite, les liens allant des jonctions vers les sources. Les deux cas sont représentés sur deux graphes distincts pour plus de clarté, mais ils sont en fait calculés simultanément.

Figure 26 : Un lien vu de profil.



Un lien d'entrelacement et d'encaissement se caractérise par une échelle horizontale et une échelle verticale (cf. figure 13). Autrement dit, l'entrelacement est défini par la longueur planimétrique des liens (l'éloignement entre les crêtes et les thalwegs) et l'encaissement par leur inclinaison par rapport au plan horizontal (la profondeur des thalwegs par rapport aux crêtes voisines). Pour un lien donné établi entre deux points $s_1 = (x_1, y_1)$ et $s_2 = (x_2, y_2)$ tels que $\mathtt{I}[s_1] = z_1$ et $\mathtt{I}[s_2] = z_2$, on définit les deux *facteurs d'entrelacement* f_{et} et *d'encaissement* f_{ec} de la manière suivante :

$$\mathrm{dist}(s_1, s_2) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

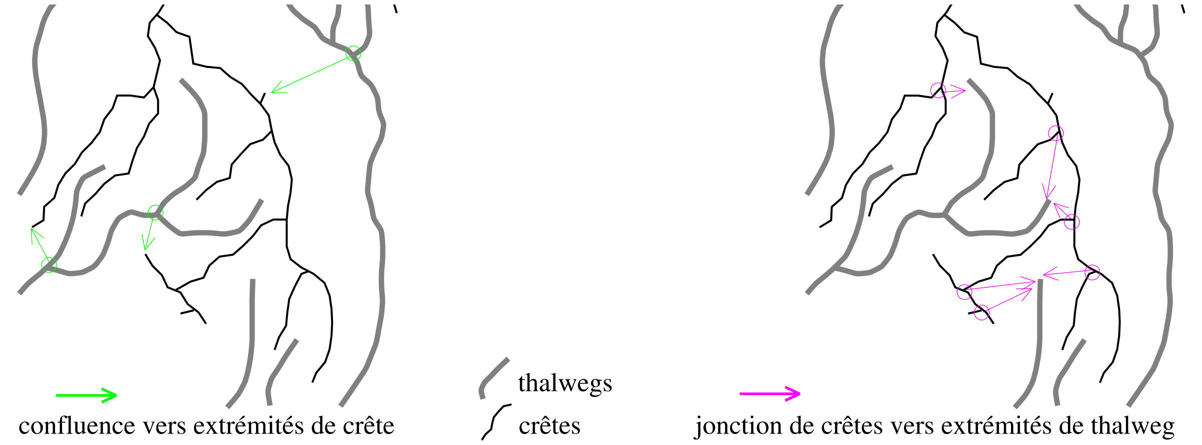
Soit H la projection orthogonale de s_2 sur le plan horizontal passant par s_1.

$$\tan \widehat{Hs_1s_2} = \frac{|z_2 - z_1|}{\mathrm{dist}(s_1, s_2)} \qquad \text{D'où :} \quad \boxed{f_{et} = \frac{1}{\mathrm{dist}(s_1, s_2)} \qquad \text{et} \qquad f_{ec} = \arctan \frac{|z_2 - z_1|}{\mathrm{dist}(s_1, s_2)}}$$

4. 2.2.2. Liens d’imbrication

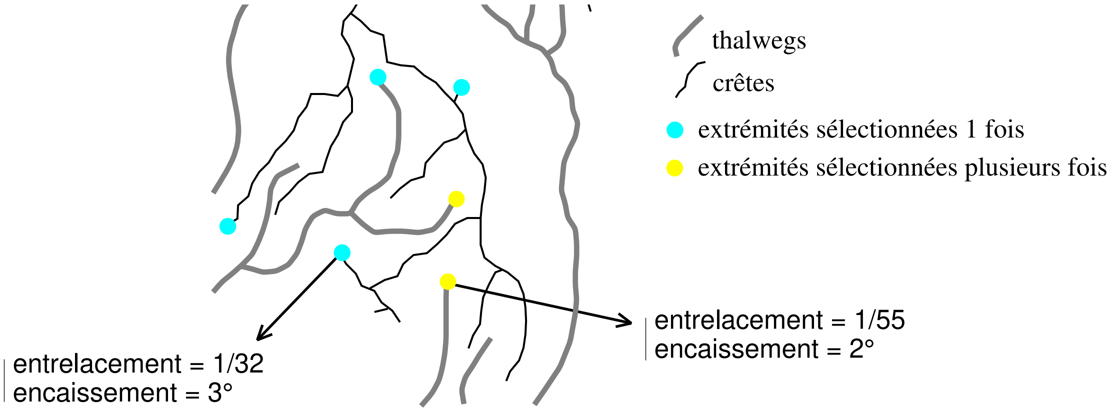
Il existe un grand nombre de liens d’entrelacement et d’encaissement possibles. Ils ne sont pas toujours significatifs et il convient donc d’en limiter le nombre en se restreignant à un certain voisinage autour du point concerné. Pour chaque confluence ou jonction de crêtes, on choisit de sélectionner le lien d’entrelacement et d’encaissement le plus court parmi tous les existants. On obtient ainsi un lien d’imbrication. La figure 14 montre les liens d’imbrication extraits de la figure 12.

Figure 27 : Les liens d’imbrication.



On remarque qu’il aboutit soit zéro, soit un, soit plusieurs liens d’imbrication en chaque extrémité comme le montrent les pastilles de couleur de la figure 15. Chaque lien d’imbrication se caractérise par un facteur d’entrelacement et un facteur d’encaissement, puisque c’est exclusivement un lien d’entrelacement et d’encaissement.

Figure 28 : Sélection des extrémités de crêtes et thalwegs par le lien d’imbrication.



On associe aux nœuds sélectionnés par un ou plusieurs liens d’imbrication les valeurs qui correspondent aux valeurs des facteurs. L’exemple de la figure 15 montre qu’une extrémité non sélectionnée par un lien d’imbrication ne reçoit aucune valeur. Une extrémité sélectionnée une fois se voit attribuer les valeurs des facteurs d’entrelacement et d’encaissement du lien qui l’a choisie. Lorsque plusieurs liens d’imbrication aboutissent à une même extrémité, on calcule les valeurs moyennes des deux facteurs, qui déterminent les liens d’imbrication qui aboutissent à cette extrémité.

Le facteur d'imbrication associé à une extrémité s_2 est alors déterminé par la moyenne des facteurs d'entrelacement et d'encaissement des liens i qui y aboutissent :

Soit $i \in \{1, \ldots, L\}$, L nombre de liens qui aboutissent à l'extrémité s_2.

$$\overline{f}_{et} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{L} \frac{1}{\mathrm{dist}(s_{1_i}, s_2)} \quad \text{et} \quad \overline{f}_{ec} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{L} \arctan \frac{|z_{1_i} - z_2|}{\mathrm{dist}(s_{1_i}, s_2)}$$

4. 2.2.3. Relation d'imbrication

En chaque extrémité sélectionnée, le facteur d'imbrication est défini en tant que combinaison linéaire pondérée des facteurs d'entrelacement et d'encaissement normalisés. Toutes les extrémités de réseaux ne sont pas forcément sélectionnées par un lien d'imbrication ; dans ce cas, la zone de codage réservée pour l'attribut correspondant n'est pas renseignée. Sinon, l'attribut du nœud reçoit la partie entière de la valeur du facteur d'imbrication f_{imb}, qui définit la relation d'imbrication.

$$f_{imb} = \mu . \overline{f}_{et} + \nu . \overline{f}_{ec} \qquad (\mu + \nu = 1) \qquad \textit{Equation (9)}$$

relation d'imbrication : $\mathbb{E}[f_{imb}]$

Le facteur normalisé d'entrelacement représente la plus courte distance planimétrique, il augmente lorsque la longueur moyenne des liens diminue. Le facteur normalisé d'encaissement représente la plus grande dénivelée, il augmente avec l'encaissement. Par conséquent, la relation d'imbrication augmente avec l'encaissement et l'entrelacement et elle hiérarchise les extrémités en fonction de leur participation dans l'imbrication des réseaux. De plus, elle permet de sélectionner les extrémités les plus imbriquées (réduction du nombre de candidats potentiels à la sélection des germes pour la construction du diagramme de Voronoï, cf. infra 4.3.3.1), c'est-à-dire celles qui participent à définir les mouvements du terrain. Plus le terrain sera mouvementé, plus il y aura d'extrémités candidates.

4. 3. Construction de micro-zones

Il est possible de créer une partition du plan à partir d'un ensemble S d'objets quelconques (points, segments, polygones…) de telle sorte que chaque région englobe un unique objet s_i de S. Une telle région est la zone d'influence de l'objet. Ainsi, on va rechercher l'ensemble des points du plan plus proches de chaque objet s_i que de tout autre objet de S. Nous disposons d'un ensemble de points significatifs sélectionnés par la relation d'imbrication. Une façon naturelle de procéder pour obtenir un pavage en zones d'influence consiste à construire un diagramme de Voronoï en prenant comme germes les points significatifs. En plus du passage du modèle initial (MNT maillé) à un niveau plus synthétique, la construction d'un tel graphe d'adjacence permet de déterminer des zones de calcul pertinentes pour les indicateurs. En effet, ces micro-zones forment une partition de l'espace définie à partir d'éléments caractéristiques du relief et ont donc une pertinence géomorphologique.

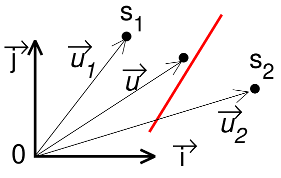
4. 3.1. Les limites de la fenêtre mobile

Le principe de la fenêtre glissante est de fixer la taille d'une sous-matrice que l'on va déplacer sur tout l'espace. En fait, l'espace n'a pas la même granularité partout et la fenêtre est, par contre, uniforme. [Weibel et DeLotto, 88] rappellent les résultats des tests de Kaspar Kundert (1988) pour évaluer la taille optimale d'une fenêtre mobile lors du calcul d'indicateurs géomorphométriques. Une fenêtre de trop petite taille a une signification statistiquement faible car la taille de l'échantillon est alors trop petite. D'autre part, une fenêtre trop grande élimine les petites variations. Il conclut sur la nécessité de coupler une interprétation visuelle avec une analyse quantitative du type semi-variogramme ou analyse spectrale, pour choisir une taille de fenêtre optimale.

De fait, cette taille optimale correspond à un compromis global dès que l'on considère une zone sujette à des variations, ici géomorphologiques, suffisamment marquées. En pratique, cela signifie que pour une taille de fenêtre donnée, il y a toujours des sous-zones sur lesquelles cette taille n'est pas localement optimale. Il est donc préférable de disposer d'une partition en micro-zones de tailles et formes non prédéterminées, micro-zones qui reflètent la géomorphologie locale. La partition que nous proposons répond à cette caractéristique. Il existe plusieurs types de partition *a priori* qui sont associées à des graphes d'adjacence. Nous utilisons un diagramme de Voronoï où chaque région détermine la zone d'influence d'un germe. Ainsi, les limites de chaque région correspondent à une zone de transition (contour), lieu où il y a égalité des influences de deux germes voisins.

4. 3.2. Définition

Si les données initiales forment un ensemble d'au moins deux points, on repère tout point du plan par sa distance euclidienne à ses voisins les plus proches. Il en résulte un pavage planimétrique formé de l'ensemble des régions associées à cet ensemble de points, et appelé diagramme ordinaire de Voronoï dans le plan, généré par l'ensemble de points [Okabe *et al.*, 92]. Mathématiquement, on considère un ensemble fini de n points distribués sur le plan euclidien E^2 avec $2 \leq n \leq \infty$.



Définition. Soient $S = \{s_1, s_2, \dots s_n\}$ *un ensemble de* n *sites dans le plan, où* $2 \leq n \leq \infty$, *et leurs vecteurs associés* $\vec{u}_i$, *où* $\vec{u}_i \neq \vec{u}_j$ *pour* $i \neq j$, $\forall (i,j) \in J^2$.

On appelle région du plan associée au site s_i *la région définie par :*

$R_i = R(s_i) = \{ \vec{u} / \| \vec{u} - \vec{u}_i \| \leq \| \vec{u} - \vec{u}_j \| \text{ pour } i \neq j, j \in J \}$

et diagramme de Voronoï généré par S, *l'ensemble* $V(S) = \{R_1 \dots R_n\}$.

4. 3.3. Description de la méthode

Le procédé que nous utilisons pour calculer le diagramme de Voronoï est celui de Steve Fortune (1987). Il s'agit d'un algorithme de *balayage plan*, c'est-à-dire un algorithme qui résout un problème de dimension 2 en balayant le plan par une droite. Les propriétés de tels algorithmes et la méthode sont décrites dans [Boissonat et Yvinec, 95]. On fait l'hypothèse selon laquelle l'ensemble des n sites $S = \{s_1, s_2, \ldots s_n\}$ de E^2 initial ne contient pas de sous-ensemble de quatre points co-cycliques, ce qui se vérifie ensuite expérimentalement (quitte, le cas échéant, à introduire des micro perturbations).

4. 3.3.1. Détermination des sites du diagramme

Parmi l'ensemble des germes possibles, nous choisissons de construire le diagramme à partir de points caractéristiques sélectionnés sur un critère géomorphométrique, et non de points déterminés d'une manière aléatoire. En effet, tous les points caractéristiques du relief (sommets, cols, cuvettes, confluences…) ne participent pas à l'entrelacement des réseaux de crêtes et thalwegs. Certaines extrémités ne sont pas significatives car souvent les crêtes se terminent par deux brins distincts mais très courts (seuillage de l'algorithme d'extraction) et les drains aux extrémités des thalwegs sont très nombreux (pourquoi en garder deux très proches ? lequel sélectionner ?). La détermination de l'ensemble des sites du diagramme, consiste donc à sélectionner certains points extrémités des réseaux. Le déclenchement de ce choix repose sur l'idée selon laquelle les réseaux s'entrelacent naturellement, d'une manière plus ou moins serrée selon les régions, et cette différence dans le degré d'imbrication des réseaux fournit une information sur la nature du relief, qui se retrouvera dans les morceaux de relief délimités par le diagramme. Chaque cellule délimitée par le diagramme correspond sur le terrain à un bout de relief homogène. Les sites sont donc sélectionnés par le calcul des relations d'imbrication entre crêtes et thalwegs (cf. supra 4.2.2).

Les sites, autour desquels est construit le diagramme de Voronoï, forment par conséquent le sous-ensemble des extrémités de crêtes et de thalwegs pour lesquels il existe une relation d'imbrication déterminée par les facteurs d'entrelacement et d'encaissement.

4. 3.3.2. Diagramme de Voronoï

Le diagramme est construit à partir des coordonnées planimétriques de tous les points appartenant à l'ensemble des sites déterminé précédemment ; l'altitude et la valeur de la relation d'imbrication ne sont pas prises en compte. Il est formé par l'ensemble des frontières et constitue donc le lieu des disparités. Deux points situés de part et d'autre d'une frontière sont hétérogènes car ils sont sous l'influence de deux extrémités différentes (de crête ou de thalweg). Un arc de la frontière peut suivre un bout de crête, un bout de thalweg ou un flanc de montagne. En terrain accidenté, un arc peut traverser une montagne. Une cellule est un morceau de relief délimité par les frontières. Elle peut contenir une petite colline en terrain plat, un bout de massif ou un bout de versant en terrain accidenté.

En examinant la figure 16, une caractéristique intéressante apparaît : la taille des cellules n'est pas identique sur toute la région. En zone de plaine, les cellules sont beaucoup plus grandes qu'en zone de montagne. En fait, la distribution des extrémités de crêtes et thalwegs (leur densité) détermine la taille des cellules : plus il y a de points significatifs, plus les cellules sont petites. De cause à effet, plus il y a de crêtes et thalwegs, plus l'importance de la cellule diminue. Il y a donc une corrélation entre l'aspect général du relief (accidenté ou plat) et la taille des cellules.

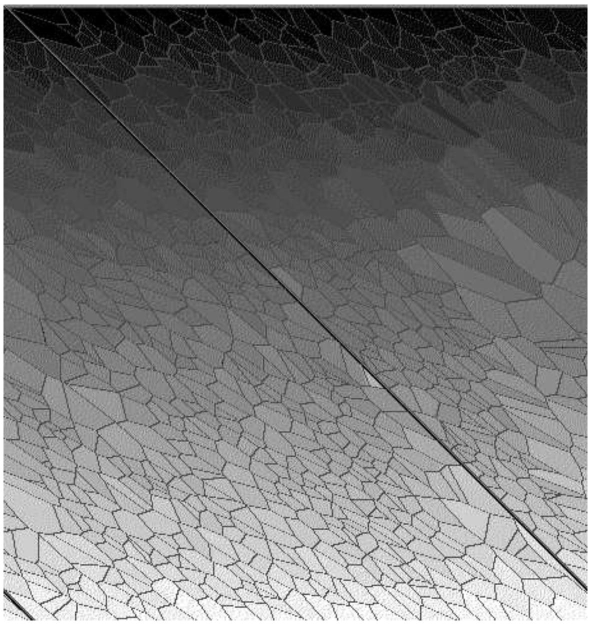


Figure 29 : Diagramme de Voronoï sur toute la région.

Les arcs du diagramme sont dessinés en rouge et les cellules sont teintées en gris par ordre croissant de leur numéro.

4. 3.4. Analyse

La construction du diagramme de Voronoï aboutit à une partition du MNT initial en micro-zones et, en cela, elle crée une nouvelle topologie du plan. Le passage d'une partition en points à une partition de second niveau permet l'intégration de descripteurs du relief plus synoptiques et, par là même, le développement d'attributs plus sophistiqués. Par ailleurs, les polygones ont une forme et une taille non uniformes, ce qui reflète la propriété d'anisotropie[1] et la variabilité de la surface terrestre. Ce diagramme permettra ensuite d'appuyer la classification sur des valeurs calculées pour une micro-zone homogène. Ces micro-zones sont homogènes dans le sens où tous les points sont sous l'influence d'un point caractéristique du terrain (extrémité de crête ou de thalweg) et qu'elles représentent une unité élémentaire de nature géomorphologique.

La mesure du facteur d'imbrication f_{imb} défini par l'équation *(9)* (cf. supra 4.2.2.3) pour chaque extrémité de crête ou de thalweg s'interprète de la manière suivante :

· si f_{imb} est grand, la taille des cellules est petite et on est en présence d'un relief très encaissé ;

· si f_{imb} est petit, la taille des cellules est grande et on se trouve sur un terrain plat avec très peu de crêtes.

La relation d'imbrication nous fournit donc une information géomorphologique à prendre en compte lors de la fusion des cellules.

4. 4. Fusion

On cherche maintenant à fusionner les micro-zones élémentaires. En effet, deux cellules connexes peuvent partager les mêmes caractéristiques. La fusion est guidée par des indicateurs calculés dans chaque cellule (ensemble de points connexes du MNT) qui concourent à définir la signature. Un certain nombre d'expériences ont été conduites pour évaluer l'utilité de diverses variables et méthodes pour la reconnaissance d'une structure globale (estimation du caractère global du terrain et fractionnement du MNT en parcelles correspondant à des types de relief différents, cf. infra 5.2). Nous présentons ici seulement brièvement un ensemble de paramètres testés (le premier étant la relation d'imbrication déjà définie dans le paragraphe 4.2.2). Avant tout, nous préparerons la description des indicateurs proposés en 2.1 en indiquant l'information utilisée dans les mesures.

4. 4.1. Informations numériques sur le terrain

Nous disposons d'un MNT dont l'information en chaque point est une valeur d'altitude. A partir de ce MNT, nous construisons deux autres modèles numériques : un modèle numérique de pente et un modèle numérique de dureté.

4. 4.1.1. Modèle numérique de pente

Afin de choisir certains paramètres lors de notre calcul du gradient, nous reprenons les conclusions de [Evans, 72] sur son analyse du calcul de la pente :

· la pente doit être mesurée en un point ou sur une surface la plus petite possible ;

· l'exposition doit être exprimée en degrés et la distribution de ses fréquences peut être résumée par la moyenne et l'écart type.

Ainsi, nous choisissons de calculer le gradient en chaque point du MNT à partir d'une fenêtre mobile 3×3. La méthode de calcul sélectionnée correspond à la quatrième méthode testée par [Skidmore, 89] et correspond à une différence finie du troisième ordre explicitée par les équations *(3)* et *(4)* (cf. supra 2.1.1). En plus de ses caractéristiques en tant que méthode de moyennage, elle permet de prendre en compte les valeurs d'altitude se trouvant dans le voisinage du point central en les faisant toutes intervenir dans chaque composante.

On note $\beta_1 = \frac{\delta z}{\delta x}$ et $\beta_2 = \frac{\delta z}{\delta y}$ $\Rightarrow ||\overrightarrow{\mathrm{grad}\, z}|| = \sqrt{\beta_1^2 + \beta_2^2}$

avec

$$\beta_1 = \frac{[z_{i+1,\, j+1} + 2z_{i+1,\, j} + z_{i+1,\, j-1}] - [z_{i-1,\, j+1} + 2z_{i-1,\, j} + z_{i-1,\, j-1}]}{8\Delta x}$$

$$\beta_2 = \frac{[z_{i+1,\, j+1} + 2z_{i,\, j+1} + z_{i-1,\, j+1}] - [z_{i+1,\, j-1} + 2z_{i,\, j-1} + z_{i-1,\, j-1}]}{8\Delta y}$$

Δx, Δy pas du MNT en m

4. 4.1.2. Modèle numérique de dureté

Selon la zone géomorphologique dans laquelle sont exécutés les calculs, la pente et l'altitude n'ont pas le même comportement. Ainsi, en haute montagne, les altitudes varient plus rapidement dans une micro-zone qu'en zone de plaine. Les changements de pente y sont aussi plus brutaux et fréquents. L'idée est de prendre en compte dans un même indicateur les deux informations. [Evans, 72] accorde une grande fiabilité à l'outil statistique écart type. Il définit l'échelle verticale par l'écart type de l'altitude mais ne précise pas la statistique à utiliser pour synthétiser l'information sur la pente.

Le facteur conventionnel de dureté en un point s_i du MNT s'exprime par la formule suivante :

$$\text{Dureté} = \sqrt{\frac{\sigma_z \times \sigma_p}{2\pi}},$$

où σ_z et σ_p sont les écarts types, respectivement, de l'altitude et de la pente.

Dans des études de la rugosité des matériaux ou des applications radar (critère de sensibilité), la dureté en un point M_i de coordonnées $(\text{latitude}_s, \text{longitude}_s)$ se calcule à partir du MNT, souvent selon deux directions nord-sud et est-ouest, sur un segment de longueur h et centré en s_i. Selon le mode de calcul de la pente, on dispose sur le segment h de :

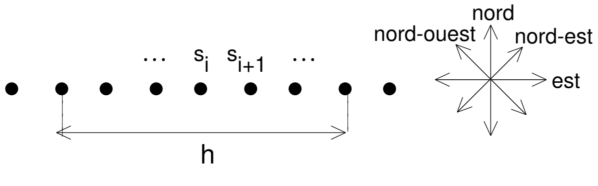
n valeurs d'altitude z_i

k valeurs de pente p_i $(k < n)$

D'où les écarts types respectifs :

$$\sigma_{z_n} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} z_i^2 - \bar{z}^2} \quad \text{où} \quad \bar{z} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} z_i$$

$$\sigma_{p_k} = \sqrt{\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} p_i^2 - \bar{p}^2} \quad \text{où} \quad \bar{p} = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k} p_i$$



La dureté suivant la direction est se détermine par :

$$D_{est} = \sqrt{\frac{\sigma_{z_n} \times \sigma_{p_k}}{2\pi}}$$

De même, on calcule $D_{nord\text{-}est}$, D_{nord} et $D_{nord\text{-}ouest}$ sur des segments orientés respectivement sud-ouest/nord-est, sud/nord et sud-est/nord-ouest de longueur h. La dureté au point central est la moyenne des duretés calculées dans les quatre directions :

$$\text{Dureté : } \frac{D_{est} + D_{nord\text{-}est} + D_{nord} + D_{nord\text{-}ouest}}{4}$$

La dureté est calculée simultanément dans quatre directions[1] sur des segments de longueur suffisamment grande de façon à prendre en compte des ondulations significatives (par rapport au pas du MNT, aux seuillages des bassins versants, à la taille des cellules, à la résolution terrain).

Plus la dureté est grande, plus la zone est fortement rugueuse.

4. 4.2. Qualification de chaque micro-zone

Dans la littérature, il existe un grand nombre d'indicateurs géomorphométriques définissant la signature géométrique (on se reportera au paragraphe 2.1 pour la motivation des choix). Ces indicateurs sont évalués à l'aide d'une fenêtre mobile. Afin de définir la signature du MNT à partir de la nouvelle topologie que nous avons créée, il convient de définir de nouveaux indicateurs en se basant sur les résultats des travaux antérieurs. Pour cela, nous définirons deux groupes d'indicateurs : le premier reflète l'aspect géométrique de la signature et le second l'aspect géomorphométrique.

4. 4.2.1. Indicateurs géométriques

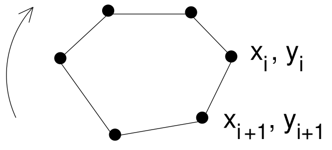
Ce premier groupe d'indicateurs qualifie géométriquement les micro-zones (description de la forme en 2D) en leur attribuant la valeur de leur aire et une valeur qualifiant leur compacité. Il existe d'autres indicateurs géométriques empruntés à l'analyse d'image tels que la direction principale d'inertie, le périmètre, l'élongation du rectangle englobant, le diamètre. Soit ces derniers apportent une information redondante par rapport aux indicateurs que nous avons mesurés, soit ils ne sont pas pertinents du fait de la compacité des cellules.

4. 4.2.1. a. La taille de la cellule

Nous avons remarqué précédemment que plus il y a de germes, plus la taille des cellules est petite. Or, les germes sont sélectionnés à partir d'une relation d'imbrication des réseaux de crêtes et thalwegs qui varie avec les ondulations du terrain. Plus la zone est rugueuse, plus il y a de germes et plus la taille des cellules est petite. Afin d'intégrer cette remarque dans nos indicateurs, nous définissons la taille de la cellule par calcul de sa surface :

$$\text{aire : } \sum_{i=1}^{n+1} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{2}\right) \times \left(x_{i+1} + x_i\right)$$

cellule de Voronoï représentée en mode vectoriel



---

[1] Ce calcul pourrait être effectué sur 8, 16, 32… directions. Il n'a été exécuté que sur 4 directions car, d'une part, cette approximation nous semble suffisante, et d'autre part, cela réduit le temps de calcul de l'algorithme.

On définit alors le facteur taille pour la cellule n par :

$f_t = \max_{1 \leq n \leq N} \{aire_n\} - aire_n$, où N est le nombre total de cellules.

4. 4.2.1. b. La compacité

La compacité de la cellule se qualifie à l'aide d'un indicateur de circularité qui se définit en analyse d'image par la relation :

$$\text{compacité} : \frac{4 \pi \, \text{aire}}{(\text{périmètre})^2}$$

$$\text{périmètre} : \text{péri}_n = \sum_{i=1}^{n+1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}$$

La valeur de la compacité se rapproche de 1 si la cellule est ronde et de 0, si le contour de la cellule est allongé. Il s'avère en fait que la compacité des cellules est relativement homogène et ne sert pas d'indicateur discriminant. Par contre, elle s'avère être un indicateur très utile pour la qualification des bassins versants (cf. partie IV).

$f_{comp} = aire_n \times p_n$

4. 4.2.2. Indicateurs géomorphométriques

Le second groupe d'indicateurs appartient au domaine de la géomorphométrie. Les travaux de la littérature montrent que la pente est l'aspect le plus important, d'où le premier indicateur statistique. La dimension horizontale de la signature géométrique est donnée par les indicateurs géométriques qualifiant la cellule. La dimension verticale est associée à une statistique de l'altitude (écart type, moyenne).

4. 4.2.2. a. Statistiques

Un premier outil statistique fort utilisé est la médiane. Nous la calculons dans chaque cellule de Voronoï à partir des modèles numériques (altitude, pente, dureté). Elle permet de déterminer la valeur centrale du caractère étudié et est plus significative que la moyenne car elle est moins sensible aux valeurs extrêmes. Elle rend compte ainsi de la tendance du phénomène observé dans la cellule.

Soit q_i la fréquence de la mesure m_i.

La médiane est le nombre entier m_j tel que $\begin{cases} q_1 + \ldots + q_{j-1} < ½ \\ q_1 + \ldots + q_j \geq ½ \end{cases}$

On définit alors divers facteurs :

f_p : médiane de la pente

f_z : médiane de l'altitude

f_{dur} : médiane de la dureté

Un autre outil est l'écart type dont l'expression mathématique générale est rappelée pour le calcul de la dureté dans le paragraphe 4.4.1.2. On définit alors les trois facteurs :

$f_{ép}$: écart type de la pente

$f_{éz}$: écart type de l’altitude

$f_{édur}$: écart type de la dureté

4. 4.2.2. b. *Dénivelées*

L’échelle verticale de la signature géométrique peut être définie par le paramètre le plus couramment employé, à savoir la dénivelée. Elle mesure la différence entre le minimum et le maximum de l’altitude dans la cellule R_i.

On note : $\max(z_s) = \max\{z \in R_i / R_i \in V(S)\}$ et $\min(z_s) = \min\{z \in R_i / R_i \in V(S)\}$.

Dans chaque cellule, il est également possible de définir une dénivelée moyenne. Nous avons alors construit la moyenne par rapport à la valeur d’altitude du point le plus significatif de la cellule, c’est-à-dire le site s_0 qui est aussi soit une extrémité de crête (point bas), soit une source de thalweg (point haut). L’expression de la moyenne des dénivelées centrée en s_0 d’altitude z_0 est :

$\bar{d} = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(z_i - z_0)$, où n compte le nombre de points dans la cellule R_i.

Le facteur dénivelée maximale et le facteur dénivelée moyenne sont :

$f_d = \max(z_s) - \min(z_s)$

f_{dm} : dénivelée moyenne centrée sur le site

4. 4.2.2. c. *Intégrale hypsométrique*

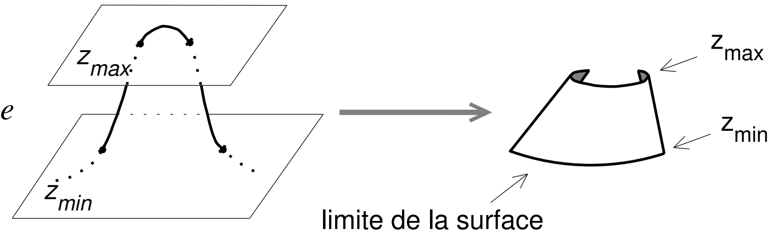
Un autre indicateur très prisé dans la littérature est l’intégrale hypsométrique, qui, par la mesure d’une relation entre surface et altitude, fournit une information sur l’ouverture du relief due à l’érosion. Il existe divers graphes pour reporter les données hypsométriques, dont le plus communément utilisé est la courbe hypsométrique en pourcentage. Le graphe de la fonction hypsométrique $a(h)$ trace l’aire relative située au-dessus d’une hauteur donnée en fonction de l’altitude relative h explicitée par l’expression :

$$h = \frac{z - z_{min}}{z_{max} - z_{min}}$$

L’intégrale hypsométrique IH est alors donnée par la relation :

$$IH = \int_0^1 a(h)\, dh$$

Figure 31 : Interprétation graphique de l’intégrale hypsométrique.



Pour son calcul en mode discret, nous reprenons l’interprétation géométrique de [Mark, 75] selon laquelle la valeur de l’intégrale hypsométrique est égale au rapport du volume compris entre la surface terrestre et un plan passant par z_{min} et du volume d’un solide de référence limité par le périmètre de la surface et les deux plans passant respectivement par z_{min} et z_{max} (cf. figure 18).

Divers travaux ont essayé d'approcher la valeur de cette intégrale et, notamment, démontrent qu'elle équivaut au coefficient de massivité relative (*coefficient of relative massiveness*) E lui-même égal à la moyenne de la hauteur relative $\bar{h}$.

A partir de ces remarques, nous définissons le facteur hypsométrique comme suit :

$$f_{hypso} = E = \frac{\bar{h} - z_{min}}{z_{max} - z_{min}}$$

4. 4.2.2. d. Comptage de points

[Weibel, 89] décrit un indicateur qui consiste à compter le nombre de points dont l'altitude est plus élevée que celle du point central dans une fenêtre glissante. Nous définissons ainsi le facteur de comptage qui récupère le nombre de points plus élevés que le site de la cellule :

f_{nb} : nombre de points plus élevés que s_0

4. 4.2.3. Indicateur global

Les indicateurs géométriques et géomorphométriques qualifiant les micro-zones contribuent à définir la signature. En effet, la dimension horizontale fournit une information sur la densité des crêtes et thalwegs, via la construction des cellules de Voronoï autour des extrémités sélectionnées, et qui répond aux conclusions des travaux de [Mark, 75]. La dimension verticale est donnée par des statistiques sur l'altitude tel que le préconise [Evans, 72]. La pente, reconnue par la majorité des auteurs comme le paramètre le plus important, y figure aussi. Nous avons ajouté un paramètre original prenant en compte simultanément les écarts types de la pente et de l'altitude, qui est la dureté.

Chaque indicateur décrit précédemment est défini indépendamment des autres et chaque axe de représentation est arbitraire. Par conséquent, tous les indicateurs sont ramenés dans l'intervalle $[0,1]$ et représentés par un facteur normalisé, d'une part pour utiliser une distance et, d'autre part, pour les prendre en compte simultanément dans la détermination de la signature. Notons qu'une normalisation par l'écart type, dans le cas du facteur altitude par exemple, reviendrait à donner d'autant plus de signification que la zone est plate, ce qui irait à l'encontre de l'entrelacement et de l'encaissement pour lesquels une zone plate a moins d'importance. Soit i le descripteur des facteurs pris en compte, un indicateur global IG est alors calculé comme combinaison linéaire pondérée des différents facteurs f_i normalisés :

$$IG = \sum_{i=1}^{n} \mu_i \times f_i \text{ avec } \sum_{i=1}^{n} \mu_i = 1.$$

Le choix d'une combinaison linéaire est retenu car, pour l'instant, le choix d'une combinaison plus complexe ne s'impose pas. Ce choix permet de lier les différents facteurs d'une manière simple. Cependant, l'utilisation d'un tel modèle, pour être efficace, nécessite l'orthogonalité des paramètres. La pondération répartit l'importance des facteurs les uns par rapport aux autres. Elle est choisie d'une manière statistique et expérimentale. Une analyse plus approfondie pour déterminer le mode de combinaison des facteurs serait sans doute à mener mais il n'est pas sûr qu'elle permettrait d'améliorer sensiblement le résultat d'ensemble. Pour l'heure, nous avons choisi plutôt d'aller jusqu'au bout de notre approche.

4. 4.3. Première classification : les cellules de Voronoï

Les indicateurs mesurés fournissent des valeurs brutes qui ne sont pas comparables. Le choix des différents paramètres entrant en jeu tels que le nombre de classes, les intervalles (répartition uniforme des valeurs dans chaque classe, répartition uniforme du nombre des représentants de chaque valeur), les critères de classification (hauteur de la topographie, importance de la pente, proximité des crêtes et thalwegs), aboutit à une variabilité de la classification résultante.

Le choix du nombre de classes peut s'estimer *a priori* selon le critère de segmentation. Un nombre trop réduit de classes risque de cacher des exceptions du terrain (par exemple, une colline de faible hauteur au milieu d'une plaine) et de ne pas être suffisamment souple pour faire apparaître des zones de transition qui ne seront pas qualifiées puis traitées de la même façon (entre une plaine et un massif de montagnes, on peut trouver une limite très abrupte ou bien une zone de piémont qui établit un lien progressif entre les deux zones). En revanche un trop grand nombre de classes (une vingtaine) n'est plus perceptible visuellement et fragmente inutilement l'image. Une fragmentation importante peut être utile pour la caractérisation de la région afin de repérer les disparités régionales ; une connaissance très approfondie de la région est alors nécessaire. De plus, ce n'est pas forcément plus performant car le nombre de raccords après un traitement zone par zone croît avec le nombre de classes. Nous avons choisi de limiter le nombre de classes à dix (le double du nombre de zones à différencier sur nos régions tests, cf. infra 5).

Il est à noter qu'à ce stade des recherches, la démarche choisie est un mode supervisé. En effet, en admettant même qu'il soit possible d'établir une classification générale (*i.e.* applicable sur tout type de paysage sans changer de valeurs paramétriques), elle nécessite pour son établissement un très grand nombre de tests sur un grand nombre de types de paysages, ce qui était hors d'atteinte dans le cadre de cette thèse. On peut cependant penser que le paramétrage mis au point pour notre zone d'étude soit une bonne base de travail pour les paysages européens.

Les valeurs d'un indicateur global composé de plusieurs variables, ou les valeurs des indicateurs pris individuellement, peuvent être réparties en classes. Dans le cas d'une répartition des mesures normalisées dans c classes, on a alors la relation suivante :

On note : · IG_n, la valeur prise par l'indicateur IG dans la cellule n ($1 \leq n \leq N$) ;
· c le nombre de classes ;
· $\min = \min_{1 \leq n \leq N}\{IG_n\}$ et $\max = \max_{1 \leq n \leq N}\{IG_n\}$

La constante 0.5 permet de répartir les valeurs dans des classes allant de 1 à c.

$$\text{classe}_{n(IG)} = \left[\, c \times \frac{IG_n - \min}{\max - \min} + 0.5 \,\right]$$: classe à laquelle la cellule n appartient pour l'indicateur IG.

D'une manière générale, le numéro de la classe augmente au fur et à mesure que le relief s'élève et se morcelle. A l'issue de nos premiers tests, le choix des paramètres a plus d'influence sur le résultat que le choix des pondérations.

4. 4.4. Fusion

Nous disposons d'un ensemble de micro-zones pour lesquelles l'indicateur global a été classifié. Il convient maintenant de définir des zones de plus grande emprise. A partir des mesures classées, on applique une règle de fusion :

Si deux cellules connexes appartiennent à la même classe, on fusionne.

Dans la mesure où la segmentation a pour but de fournir des méso-zones homogènes, les quatres règles définies en 3.1 sont utilisées dans la phase de caractérisation de la surface segmentée.

4. 5. Conclusions

En réponse aux conclusions tirées à partir des exemples de démarches globales de segmentation présentées dans le chapitre 3 :

- l'objectif de notre segmentation est de délimiter des zones au relief homogène, les critères sont par conséquent d'ordre topographique (cf. figure 10) :
    - déterminer des micro-zones pour lesquelles l'entrelacement et l'encaissement des crêtes et thalwegs sont homogènes ;
    - déterminer des unités topographiques.
- les unités topographiques se déterminent à l'aide d'une signature géométrique, dont un indicateur est une statistique de la pente ;
- la fenêtre glissante suffit pour un calcul préliminaire de pente mais, pour mesurer les indicateurs de la signature géométrique, on s'appuie sur la création de la nouvelle topologie (diagramme de Voronoï) ;
- ce sont des éléments remarquables des réseaux de crêtes et thalwegs qui forment les germes du diagramme de Voronoï.

La stratégie de segmentation que nous avons suivie est construite à partir de notre objectif, du processus modélisé et des connaissances *a priori*. L'application de notre méthode de segmentation à des données terrain ainsi que la discussion des résultats sont présentées dans le paragraphe suivant.

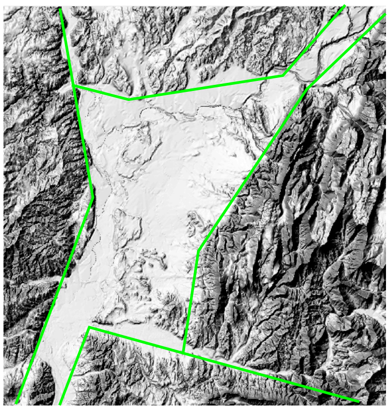
5 Résultats

Dans un premier temps, nous décrivons la zone sur laquelle nous avons effectué la grande majorité de nos tests. L'étude des corrélations entre les indicateurs nous a permis de proposer un indicateur global. L'analyse des résultats obtenus sur la région test nous mène à définir un modèle conceptuel de classification en plusieurs passes fondé sur une analyse régionalisée. Les cartes chromatiques des indicateurs individuels contribuant à définir les indicateurs globaux ne figurent pas ici.

5. 1. Zone test

La région test sur laquelle ont porté nos études de segmentation couvre une surface d'environ 3160km² équivalente à six feuilles au 1:50 000 (54,76km dans la direction est-ouest et 57,68km dans la direction nord-sud) pour une altitude minimale de 74m et une altitude maximale de 1690m. Elle englobe, du nord vers le sud, les régions de Saint-Marcelin, Valence et Die dans le département de la Drôme. Elle est traversée du nord au sud par le Rhône. L'Isère vient du nord-est et rejoint le Rhône au centre de la région. La Drôme, quant à elle, vient de l'est-sud-est et conflue dans la partie sud-ouest.

Figure 32 : Carte géologique de la région test et une segmentation manuelle du MNT initial en cinq zones.



L'intérêt d'un tel choix réside dans la variété des reliefs présents. De l'extrait de carte géologique correspondant à notre région (cf. figure 19), transparaissent trois zones principales délimitées par des traits noirs (limites des domaines orogéniques). De l'ouest vers l'est, on distingue tout d'abord en rouge, le Vivarais, partie du Massif central datant de l'ère primaire. Le Vivarais est constitué par un ensemble de petits massifs produits par les phénomènes volcaniques du Massif central, et bordé, au sud de l'Eyrieux, par des plateaux qui constituent une partie du piémont rhodanien. Ce piémont se termine abruptement sur la plaine rhodanienne par un escarpement de faille dégradé par l'érosion.

En jaune, s'étend donc la plaine rhodanienne. Le sillon provient de l'effondrement de la vallée, puis de son recouvrement par une couverture sédimentaire ployée en cuvette. Au nord de l'Isère, un ensemble de collines montrent des formes très molles coupées de larges vallées. Au sud-ouest du département, le Tricastin est formé de hautes collines (différents tons de jaune) qui séparent la plaine de Montélimar (non visible, au sud de la région test) de la plaine de Valence (en blanc cassé).

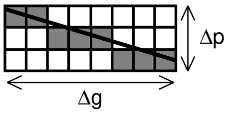
Le Vercors apparaît à l'est de la vallée du Rhône. A l'ouest des Alpes, des couches se sont détachées des massifs centraux pour former les massifs calcaires des Préalpes dont font partie le Vercors (en vert) et le Diois (en bleu ciel). Edifiées au tertiaire, les Préalpes ont subi l'érosion glaciaire quaternaire qui a modelé vallées et sommets alpins. Le Vercors est un haut plateau qui s'étend entre l'Isère et la Drôme. Le Diois se situe au sud du Vercors et présente un ensemble de montagnes plus accidentées.

Notre MNT test permet de valider visuellement la segmentation proposée car les reliefs y sont très disparates : Vivarais, plaine rhodanienne et ses hautes collines, Vercors, Diois. Cependant, il est difficile de délimiter d'une manière précise et absolue certaines zones telle que la zone de transition entre plaine et Vercors. De même, la limite entre le Diois et le Vercors est très floue. Nous cerchons donc à obtenir une segmentation numérique en cinq zones minimum dont le tracé des frontières s'approche de celui dessiné sur la figure 19.

5. 2. Démarche pratique

Notre démarche part d'une classification préalable des méso-zones à l'aide d'indicateurs construits pour qualifier la cellule de Voronoï. Une cellule est alors considérée en tant qu'objet géomorphologique, au sens de [Dikau, 90]. C'est une face délimitée par un cycle d'arcs du diagramme et décrite par des attributs sémantiques (cf. supra 2, figure 4). Il est possible d'établir un lien entre l'espace vectoriel du diagramme et l'espace rasteur du MNT (lien entre l'intérieur d'un cycle d'arcs et les points, figure 20). Ainsi, la valeur sémantique attribuée à une face topologique peut être reportée sur le MNT et affectée à tous les points qui se trouvent dans la face.

Figure 33 : Passage vecteur/rasteur (principe de la méthode utilisée).



On incrémente point par point, le long de l'axe Δp selon la valeur arrondie (après calcul réel) de $\frac{\Delta g}{\Delta p}$.

On en déduit la construction de *cartes chromatiques* en mode rasteur, qui représentent à l'aide d'une couleur la valeur attribuée aux points d'une cellule. Les mesures des différents indicateurs de la signature peuvent ainsi être visualisées.

La construction d'un indicateur global permet l'analyse d'une seule variable mais pose le problème du choix des coefficients de pondération pour chaque variable et des corrélations possibles entre variables. La visualisation des diverses cartes (par indicateurs individuels puis par indicateurs globaux) permet une première validation des résultats : selon nos connaissances géomorphologiques, les résultats rendent-ils bien compte des disparités topographiques de la région ?

Afin de déterminer une segmentation qui corresponde à nos exigences, nous avons défini une démarche expérimentale. Tout d'abord, nous avons réalisé un ensemble de tests sur trois zones du même MNT test (nous ne donnerons ici que les résultats finaux). La zone A est la zone globale présentant des reliefs disparates. Les zones B et C sont des extraits du MNT test : l'un centré sur la plaine (référent plaine) et l'autre sur le Vercors (référent montagne). Chaque zone est découpée en cellules par un diagramme de Voronoï sur lesquelles des mesures géomorphométriques et géométriques sont effectuées. Ces mesures ont deux objectifs : d'une part, l'identification de zones similaires pour la fusion des cellules de Voronoï, et d'autre part, la caractérisation des groupements de cellules en vue de leurs traitements (objet de la partie IV).

Nous essayons donc de construire un indicateur global composé de critères discriminants afin de pouvoir qualifier et regrouper les cellules. Que cherchons-nous à mettre en valeur ? Tout d'abord, distinguer les plaines et les montagnes de façon assez grossière et, à l'intérieur des zones de plaine et de montagne, distinguer des différences orographiques. Parmi les indicateurs mesurés, nous allons chercher ceux qui permettent d'identifier ces zones. Une première étude des corrélations dans les zones A, B et C montre que les corrélations diffèrent selon les zones, ce qui veut dire que les indicateurs sont plus ou moins discriminants selon l'homogénéité orographique des zones étudiées.

5. 3. Un indicateur global

Un indicateur global prenant en compte tous les indicateurs individuels peut être calculé à partir des mesures des indicateurs individuels. Une première approche dans la détermination des pondérations consiste à utiliser une méthode statistique en employant les écarts types $\sigma(f_i)$ des paramètres f_i de la façon suivante :

Indicateur global : $IG = \sum_{i=1}^{f} \mu_i \times f_i$ avec $\sum_{i=1}^{f} \mu_i = 1$

$$\mu_i = \frac{\sigma(f_i)}{\sum_{j=1}^{f} \sigma(f_j)} \quad \Rightarrow \quad \sum_{j=1}^{f} \mu_j = 1$$

f : nombre de facteurs pris en compte

μ_i : pondération du facteur f_i

Définir μ_i à partir de $\sigma(f_i)$ signifie que le poids sera d'autant plus fort que les mesures de l'indicateur sont plus disparates, c'est-à-dire la répartition des poids fait la différence entre les variations des différents indicateurs en accordant plus d'importance à un indicateur qui apporte une information plus discriminante que les autres.

En deuxième approche, la pondération statistique permet de conforter la pondération plus intuitive qui prend en compte une analyse visuelle des cartes individuelles ainsi que leur signification géomorphologique. En fonction des corrélations calculées sur toute la zone (zone A), nous avons choisi trois mesures représentatives de l'orographie en fonction des deux critères suivants :

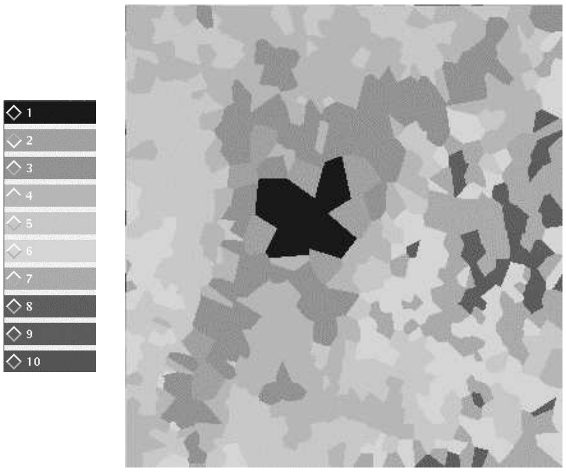
· les mesures doivent avoir un sens physique complémentaire ;

· les mesures ne doivent pas être trop corrélées entre elles.

Ainsi, les mesures retenues sont la médiane de la pente f_p (caractère pentu du terrain), la médiane de la dureté f_{dur} (caractère accidenté du terrain) et la taille de la cellule f_t (liée à la densité des crêtes et thalwegs). Nous avons alors défini un indicateur IG1 tel que :

$$IG1 = \frac{f_p}{3} + \frac{f_{dur}}{3} + \frac{f_t}{3}$$

Figure 34 : Un indicateur global IG1.



Il s’agit ici d’un exemple car, par manque de temps, nous n’avons pas pu examiner rigoureusement la combinaison idéale (choix des paramètres et des poids). Cependant, nous verrons dans le paragraphe suivant qu’il tend vers une reconnaissance des régions qui ont été explicitées dans le paragraphe 5.1.

5. 4. Analyse

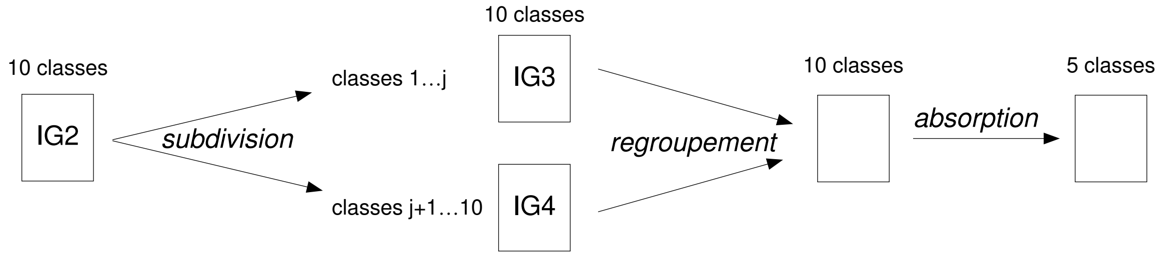
Les résultats d’une application de l’indicateur IG1 sur toute la région test montrent une segmentation numérique intéressante (cf. figure 21) : la vallée rhodanienne se détache des autres zones et forme par fusion de plusieurs classes une méso-partie homogène (classes 1 à 4). De plus, une distinction apparaît entre la zone ouest (classes 4 et 5) et la zone est (classes 4 à 10). En revanche, si les zones sont segmentées, elles ne sont pas caractérisées d’une façon totalement homogène et les zones de transition ne se distinguent pas des zones de collines et du Vivarais. Cependant, il est important de noter que la zone de plaine est en fait perturbée par la présence d’accidents du terrain que l’on cherchera à maintenir dans nos résultats.

A partir de nos résultats expérimentaux, la seconde méthode adoptée consiste à subdiviser l’espace étudié en zone de plaine ou zone de montagne auxquelles s’ajoutent des zones de transition qui peuvent être soit une frontière linéaire, soit une surface. Les deux types de zones à identifier présentent des comportements opposés et, par conséquent, une subdivision permet ensuite d’appuyer la classification sur une analyse régionalisée de la topographie. En fonction de la topographie, on applique ensuite un indicateur global différent selon le caractère de la zone.

Nous avons alors défini une méthode de classification en trois étapes tel que le montre la figure 22 :

- · subdivision de la région en plaine et en montagne par un indicateur IG2
- · application d’indicateurs globaux spécifiques à la topographie régionale en zone de plaine : IG3, et en zone de montagne : IG4
- · absorption des zones ou fusion des classes

Figure 35 : Méthode adaptative de classification fondée sur des indicateurs régionaux.



L’indicateur jugé satisfaisant pour différencier les zones de plaine et de montagne est en fait un indicateur simple : la médiane de la pente (cf. supra 5.2.2). Il s’agit d’une mesure grossière (par exemple, elle ne marque pas les perturbations en plaine) mais assez stable. La classe 1 définit la zone de plaine tandis que les classes 2 à 10 délimitent la zone de relief. On a donc :

$$IG2 = f_p$$

Pour définir la carte des plaines, nous utilisons des indicateurs mis en évidence lors de l’analyse effectuée sur la zone référent plaine (zone B, cf. supra 5.2). Le tableau des corrélations issues du référent est le suivant :

	Dureté	Hypsométrie	Taille
Dureté	1.0	0.2	–0.3
Hypsométrie	0.2	1.0	–0.1
Taille	–0.30	–0.1	1.0

Nous déterminons alors l’indicateur :

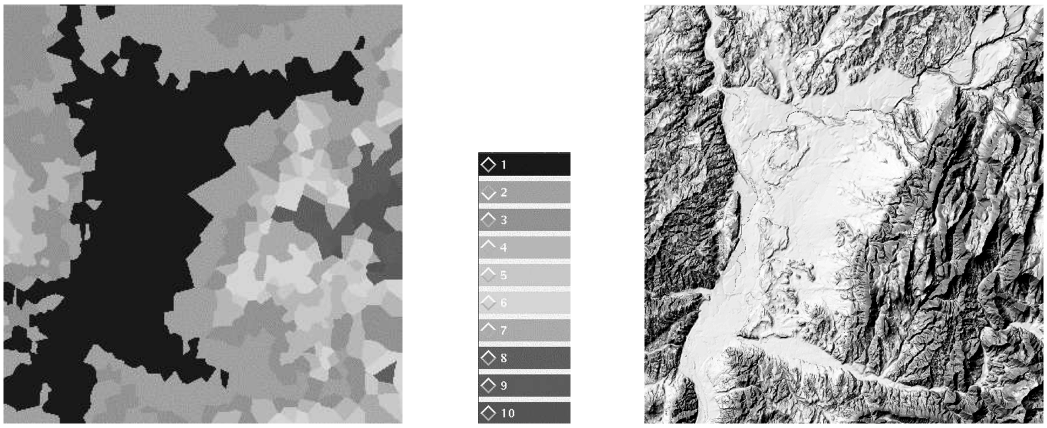
$$IG3 = \frac{f_{dur}}{3} + \frac{f_{hypso}}{3} + \frac{f_t}{3}$$

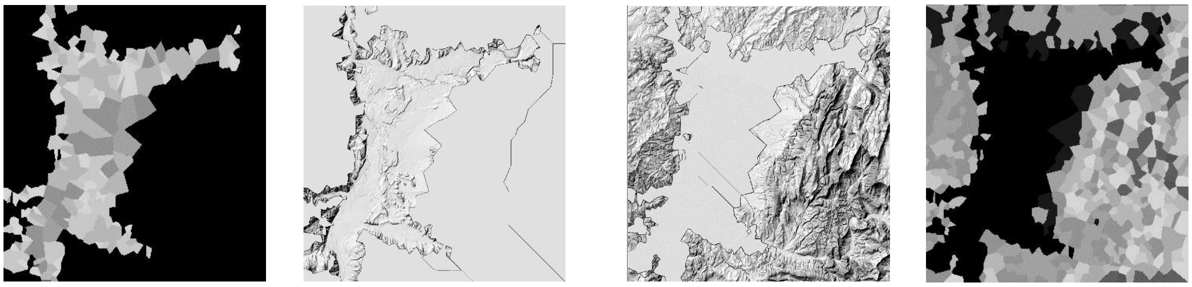
La même méthode est utilisée pour déterminer l’indicateur discriminant des zones de montagne : la médiane de la dureté et la dénivelée sont deux mesures moyennement corrélées (0.7), ce qui est peut-être dû au fait que le référent n’est représentatif que d’un seul type de montagne (Vercors).

$$IG4 = \frac{f_{dur}}{2} + \frac{f_d}{2}$$

Nous avons choisi une pondération identique pour chaque indicateur entrant dans la composition d’un indicateur global car le changement de pondération ne modifie pas les résultats d’une manière radicale. A partir des deux cartes classées, nous déduisons une carte globale après regroupement des résultats dans une seule image et absorption des zones pour une répartition en cinq classes distinctes (méthode empirique).

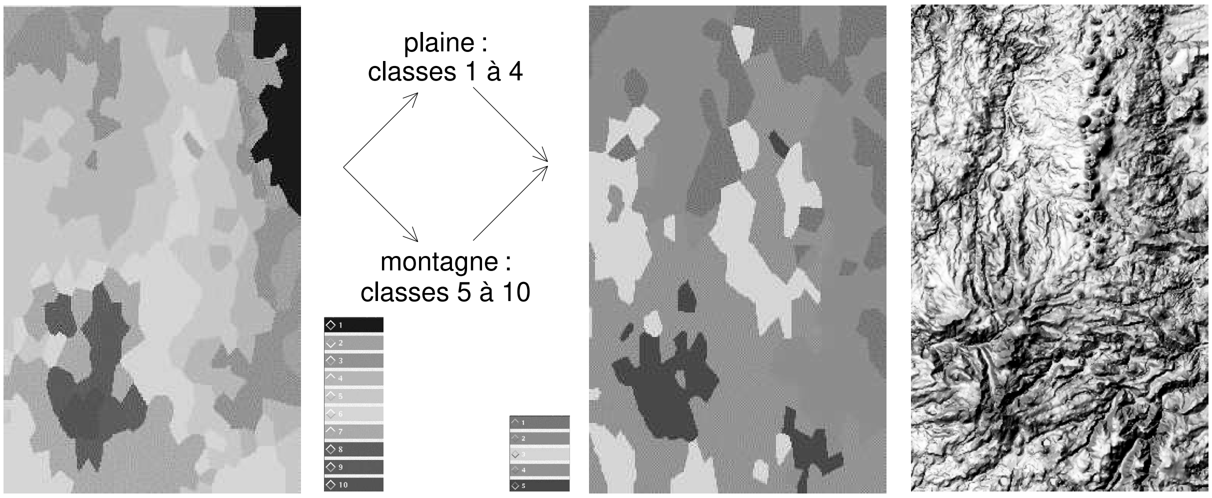
Figure 36 : Classification de la région de Valence (Drôme) en cinq classes.





La classe 1 correspond à la plaine. La classe 2 souligne l'existence soit d'accidents du terrain en terrain plat, soit d'embouchures de cours d'eau. La classe 3 fournit les zones de transition entre plaine et terrain fortement accidenté ou les zones de collines. La classe 4 montre la montagne et la classe 5 la montagne accidentée.

Figure 37 : Une autre région : les volcans d'Auvergne.



Classification résultante de IG2 (10 classes).

Classification finale (5 classes).

MNT entier.

Cette nouvelle méthode de segmentation fondée sur une analyse préalable de la topographie donne un résultat très intéressant et beaucoup plus proche de nos attentes formulées dans le paragraphe 5.1 que le résultat d'une segmentation en une seule passe (cf. supra 5.3). La fusion visuelle des classes 1 et 2 avec les zones de collines situées au nord de l'image et au sud de la Drôme fournit une zone qui correspond, par son allure générale, à la zone géologique jaune de la figure 19. Une idée de la zone géologique en vert est rendue par l'ensemble de la partie est et par les taches isolées au sud de notre carte chromatique (classes 4 et 5). Il est difficile de poursuivre plus loin la comparaison avec la carte géologique. Cependant, elle montre que notre résultat s'approche d'une réalité terrain.

D'une manière générale, l'évaluation des résultats de la segmentation peut répondre à deux critères principaux (Ezio Catanzariti et Alan Mackworth, 1978) :

· l'exactitude de la classification ;

· la lisibilité de la partition créée.

Etant donné que nous n'avons adopté qu'un seul procédé, l'efficacité de la méthode peut difficilement être jugée par comparaison des résultats entre eux. Pour atteindre une précision fine de la classification, il faudrait qualifier les plus petites régions, ce qui conduirait à une image finale visuellement encombrée. Rendre plus lisible une image est une tâche de la généralisation. Or, par la fusion de petites zones en de plus grosses, l'exactitude de la partition diminue [Weibel, 89:92].

Nous avons expliqué dans le premier paragraphe que notre critère de segmentation portait davantage sur le respect de la topographie plutôt que sur la précision des frontières. Par là même, une classification dont l'exactitude s'évaluerait au niveau du point convient moins qu'une classification fournissant un nombre réduit de régions les plus homogènes possible. Par conséquent, la partition grossière que nous obtenons satisfait pleinement les attentes que nous avions formulées. Nous concluons sur la supériorité du critère de lisibilité par rapport à l'exactitude, dans le cadre d'une application liée à la généralisation du relief : *par la classification, les partitions créées doivent être significatives, larges et, dans la mesure du possible, exactes* [Weibel, 89:92].

En effet, nous verrons dans les parties IV et V que la partition du MNT en zones topographiquement homogènes vise ensuite à faciliter le choix d'un procédé de généralisation adapté. Ainsi, pour une même application, les travaux de Robert Weibel (cf. supra 3.3) aboutissent à une partition beaucoup plus fine qui, à notre avis, n'est pas assez généralisée.

6 Conclusion

Un paysage géomorphologique peut être apprécié en termes de formes mesurables, de matériau et de processus qui induisent les caractéristiques géométriques et texturales du terrain. Notre étude s'est établie sur la reconnaissance des lieux d'homogénéité du modelé et sur la structure innée des formes. Afin de construire des outils pour la caractérisation de la surface terrestre, nous avons adopté une démarche théorique de segmentation, *i.e.* nous avons analysé les approches existantes pour fournir notre propre méthode. Un parallèle avec l'analyse d'image nous a permis de définir des procédés de segmentation et une étude de trois modèles conceptuels de la littérature nous a conduit à une démarche cohérente de segmentation.

A partir de la représentation numérique du terrain par un maillage régulier de l'espace, nous avons extrait les informations pertinentes en regard de son application dans le domaine de la cartographie topographique, puis nous les avons traitées et interprétées. Par là même, la première étape a été une phase de prétraitement qui a consisté en l'extraction des réseaux de crêtes et thalwegs et la création des modèles numériques de pente et de dureté. La phase de segmentation proprement dite a combiné deux méthodes :

- · une méthode descendante :
  - · construction du diagramme de Voronoï autour de sites présélectionnés parmi les points bas du réseau de crêtes et les points hauts du réseau de thalwegs selon un critère d'entrelacement et d'encaissement ;
  - · détection des intérieurs en tant qu'unités élémentaires à nature géomorphologique.
- · une méthode ascendante :
  - · qualification des cellules de Voronoï à l'aide de mesures géométriques et géomorphologiques ;
  - · classification des cellules qui utilise une démarche adaptative par analyse régionalisée de la topographie.

L'analyse visuelle des résultats a montré que cette démarche est très intéressante et prometteuse. Elle a été appliquée sur deux MNT provenant de deux régions aux reliefs disparates : la région de Valence dans la Drôme (cf. figure 23) et la région des volcans d'Auvergne (cf. figure 24). Il manque encore dans cette étude un examen approfondi du choix de la méthode de prise en compte des différents paramètres (combinaison linéaire, classification hiérarchique ou analyse de clusters) et de la sélection de ces paramètres.

La caractérisation va consister en une démarche plus empirique dans le sens où des paysages avec des caractéristiques connues sont identifiés. Les outils qui seront proposés essaieront d'identifier ces caractéristiques et leur évaluation sera fondée sur leur efficacité à modéliser les phénomènes connus.

Commune de Gigors-et-Lozeron (Vercors).

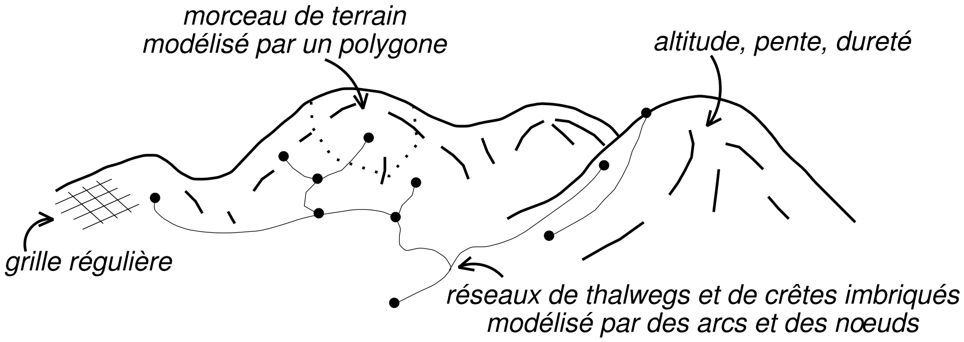
IV La caractérisation du relief

Caractériser le relief, c'est déterminer le caractère prédominant d'un paysage, y distinguer les similitudes et les exceptions, et le qualifier sans hésiter à utiliser la connaissance géomorphologique que l'on a de la région.

La segmentation d'une surface altimétrique en zones topographiquement homogènes aboutit à une partition complète de l'espace en morceaux de surface homogènes vis-à-vis d'un critère prédéterminé, c'est-à-dire ici représentatifs d'un type général de relief (par exemple : plaine, transition, montagne). L'information disponible au départ se compose de champs continus bidimensionnels et de réseaux d'éléments structurants. Dans la citation qui suit, l'emploi de prépositions exprime clairement le contraste entre les deux types de phénomènes naturels : *phenomena that occur on the earth's surface or in the atmosphere from phenomena that are distributed over space* [Laurini et Thomson, 94:87]. Nous disposons, par conséquent, de deux types de représentation des phénomènes naturels hétérogènes, mais complémentaires, dont le premier fournit des images continues du relief (champ continu, cf. partie II) et le second une image discontinue du squelette du relief (vue orientée réseau, cf. partie III). La caractérisation consiste alors à trouver des éléments descriptifs et discriminatoires pour les deux types d'information. Tandis que la modélisation de la surface terrestre en tant que continuum nécessite une représentation par un champ continu, les éléments extraits qui participent à la structure géomorphologique du terrain utilisent une représentation structurée sous le forme de réseaux. Cependant, la nature de certains traitements nécessite la possibilité de passer d'un type de représentation à un autre sans perte d'information.

Cette phase de l'analyse numérique du terrain a été traitée essentiellement d'une manière théorique. Plus précisément, les deux types d'information à qualifier sont les réseaux de crêtes et de thalwegs pour lesquels nous proposons une méthode de hiérarchisation contextuelle (cf. infra 2), et les surfaces numériques d'altitude, de pente et de dureté qui servent d'information de base à la caractérisation de chacune des zones du MNT segmenté (cf. infra 4). De plus, une information à nature géomorphométrique a été calculée lors de la phase de segmentation. La figure 1 illustre une relation possible entre le terrain et les informations disponibles extraites lors de la phase de segmentation. Par un schéma équivalent, [Laurini et Thomson, 94] montrent que certains problèmes spatiaux requièrent une utilisation combinée de plusieurs types d'entités spatiales : réseau de drainage modélisé par des liens et des nœuds ; grille des altitudes ; statistiques associées aux bassins versants… La gestion des relations spatiales est alors très diversifiée et souvent très complexe, voire intraitable. Nous disposons, par conséquent, de plusieurs types d'information spatiale que nous devons combiner à l'aide d'un modèle conceptuel de façon à fournir un MNT caractérisé avec ses éléments structurants sélectionnés (cf. infra 1).

Figure 38 : Combinaison de plusieurs types d'information spatiale.



Cette partie IV se décompose en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, nous définissons le but de la caractérisation, qui est au cœur des décisions de sélection (qualification de l'information selon l'objectif), et nous précisons l'information contenue dans les structures de données disponibles après segmentation. Ceci introduit les chapitres suivants construits sur la présence simultanée de deux types de modélisation. Ainsi, le chapitre 2 est consacré à la caractérisation des éléments structurants qui forment les réseaux de crêtes et thalwegs, c'est-à-dire à leur hiérarchisation et leur qualification. La notion de bassin versant (laissée de côté dans la partie III) ainsi que la notion de zones de crête sont étudiées dans le chapitre 3. Enfin, le chapitre 4 propose des pistes pour la caractérisation des surfaces continues.

1 Information à caractériser

La caractérisation des données terrain dépend des objectifs précis de l'application. En effet, beaucoup de processus spatiaux et de phénomènes physiques dépendent plus ou moins directement du relief. Dans la partie III, trois applications de l'étude quantitative du terrain ont été citées pour trois objectifs divergents : l'analyse numérique en tant qu'outil descriptif, en tant que paramètre pour la modélisation de phénomènes hydrologiques, en tant que base de connaissance pour la manipulation de MNT. Le but que nous visons répond au troisième objectif et, plus précisément, à la recherche de l'adaptation des opérations de *généralisation cartographique*[1] aux éléments géographiques et topographiques (cf. partie V).

Dans la partie II, nous avons exprimé le fait selon lequel le cartographe reconnaît les types de relief d'une région à cartographier de façon à reporter les similitudes et les disparités de texture sur la carte. L'aspect textural de la région est représenté par ses caractéristiques qui doivent se retrouver simplifiées, mais présentes, sur une carte à plus petite échelle. Ainsi, selon le relief identifié dans une région, différentes opérations doivent être appliquées afin de préserver différentes caractéristiques. La stratégie de généralisation doit être orientée par le phénomène à reproduire. Elle doit donc intégrer une phase de détection des éléments géomorphologiques et les décisions de généralisation doivent se fonder sur l'information extraite [Wang et Müller, 91]. Par conséquent, la caractérisation doit aboutir à un niveau correspondant à ce que [Weibel et De Lotto, 88] appellent *classes of homogeneous terrain characteristics* : pour chaque type de terrain, une séquence de méthodes spécifiques de généralisation peut être appliquée (cf. partie V).

Cependant, pour arriver à une telle description numérique du terrain à partir d'un MNT (champ continu de valeurs d'altitude), une première phase est nécessaire pour aboutir à la simplification de la situation initiale par regroupements de points connexes en zones homogènes selon des critères prédéterminés. Cette étape fait l'objet de la partie III où le critère se fonde sur le respect de la nature topographique du terrain, qui aboutit à la régionalisation de l'espace en trois types fondamentaux : plaine, transition plaine/montagne et montagne, qui peuvent être scindés en sous-types selon la région (par exemple, la montagne peut être plus ou moins accidentée). Cette approche repose sur un modèle hiérarchique.

La phase de caractérisation, quant à elle, correspond à une étape d'acquisition et de formalisation de la connaissance pour la généralisation de l'orographie. Elle conduit par là à définir un modèle d'acquisition de l'information sur plusieurs niveaux (cf. figure 2) :

- dont le dernier doit décrire hiérarchiquement les caractéristiques du relief, localisées sur le terrain ;
- dont l'ensemble doit fournir à l'utilisateur des directions de raisonnement à différents niveaux de perception.

La limite à l'ajout de connaissances structurales (géomorphologiques) et géométriques (hiérarchiques, morphologiques et géomorphométriques) dans la formation d'un modèle de terrain enrichi est fixée par notre approche heuristique. Le modèle initial de données est un MNT dont une segmentation est fondée sur l'extraction de deux types de modélisation des données (champ continu et représentation orientée objet), qui se différencient non seulement par l'organisation interne des données mais aussi par l'information que ces données véhiculent.

Dans une représentation orientée champ continu, la continuité est la principale propriété, autrement dit n'importe quelle position a une valeur d'attribut (cf. partie II), tandis que dans une vue orientée objet les attributs sont portés par des objets. [Laurini et Thomson, 94:87] rappellent la modélisation théorique d'une telle représentation :

---

[1] Les notions utilisées ici, qui ont trait à la procédure de généralisation cartographique, sont définies dans la partie V (stratégies, connaissances, opérations…).

> Un champ continu se décrit par l'ensemble {*a, x, y, z, t*} où : *x, y, z* sont les coordonnées conventionnelles ; *t* est le temps et *a* un ensemble d'attributs. Une vue orientée objet représente les phénomènes par l'ensemble {*e, a, s, t*} où : *e* est une entité, *a* un ou plusieurs attributs, *s* une information sur la position (aussi complexe que nécessaire) et *t* le temps.

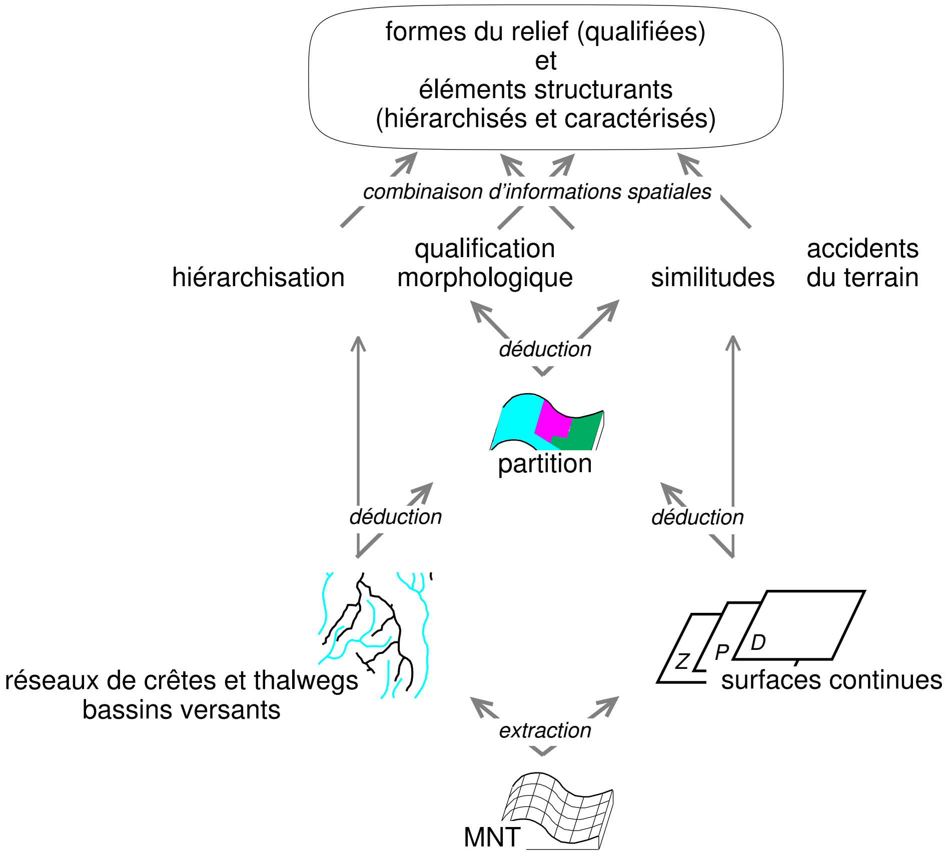
L'accroissement de l'information, dans notre processus de modélisation de l'information spatiale, est organisé par niveaux selon une approche ascendante (cf. figure 2). Le passage du niveau le plus pauvre aux niveaux supérieurs nécessite, par conséquent, deux procédures que nous traitons en parallèle mais qui sont complémentaires :

· la caractérisation orientée réseau d'éléments structurants ;

· la caractérisation surfacique.

Dans un but cartographique, la caractérisation d'éléments structurants sous la forme d'un graphe a pour principal objectif sa hiérarchisation, tandis que la caractérisation des surfaces continues a pour principal objectif la détection des accidents du terrain d'un paysage qualifié (dans une zone de plaine, un accident sera un relief en saillie et, dans une zone montagneuse, un accident sera un plateau) et des zones de transition géomorphologique. L'ultime échelon correspond à un ensemble de formes du relief qualifiées avec un réseau d'éléments structurants hiérarchisés, qui contribuent conjointement à caractériser chaque zone topographique.

Figure 39 : Représentation des niveaux de connaissances et caractérisation de l'information.



Notre modèle conceptuel de caractérisation de la surface terrestre peut être comparé au modèle de [Brändli, 94] qui reprend les différentes vues du monde examinées par P. Burrough et A. Frank (1994). Il utilise une approche descendante (*top-down approach*) dans laquelle le modèle de surface continue occupe le plus haut niveau (cf. partie III). L'enrichissement progressif du modèle a lieu par accroissement du nombre d'éléments structurants. Les deux propriétés essentielles sont : le degré croissant de détails accumulés et le changement de la représentation de la surface terrestre d'un champ continu vers une vue structurée. Le but est de définir un modèle conceptuel qui représente le monde réel décrivant les éléments du terrain ainsi que des aspects texturaux. Au lieu de considérer les surfaces continues au même niveau que les éléments structurants comme nous le faisons, le modèle de [Brändli, 94] établit un passage de l'un à l'autre par enrichissement de la structure de données initiale à l'aide d'objets (degré croissant de structuration). Le modèle que nous proposons, quant à lui, autorise une complémentarité des deux types de structure, *i.e.* champs continus et réseaux structurés, et la progression à travers les niveaux a lieu par accroissement de la connaissance. En cela, notre modélisation est une extension de l'approche présentée dans [Brändli, 94] puisqu'elle va au-delà d'une structuration (orientée réseau) en combinant plusieurs types d'information spatiale.

Les éléments structurants se présentent sous la forme de deux réseaux géomorphologiques que l'on estime, en première approche, duaux. L'extraction des thalwegs par le biais d'une modélisation de l'écoulement des eaux fournit une première caractérisation à nature hydrologique. Les crêtes sont considérées comme un sous-ensemble des frontières des bassins versants (seuillage sur un critère de concavité minimale). A partir des limites du drainage, une mosaïque des bassins versants est créée qui peut être caractérisée à l'aide d'indicateurs géomorphométriques. Au cours de la partie III, nous avons effectivement appuyé la partition du terrain sur une première segmentation en micro-zones, préférant utiliser un critère fondé sur la relation d'imbrication (encaissement et entrelacement des réseaux) plutôt qu'un critère à nature purement hydrologique, de façon à ne pas perdre d'information orographique. Cependant, l'unité élémentaire *bassin versant* définie par les limites de drainage est une source d'information non négligeable même dans le cadre d'une application non spécialisée dans le domaine. Le bassin constitue effectivement une zone d'influence autour de chaque drain d'un réseau de thalwegs. L'analyse des réseaux ne fournit qu'une caractérisation le long des éléments linéaires, elle ne couvre donc pas tout l'espace. On peut alors se demander : que se passe-t-il entre deux éléments structurants ? La caractérisation des bassins versants fournit un élément de réponse à nature hydrologique et géomorphologique.

Le lien entre la procédure de caractérisation et l'objectif final implique la formation d'une stratification de l'information (sélection) qui ne peut s'établir que par une hiérarchisation des éléments. Suivant la sélection dont on a besoin, on ne cherchera pas la même hiérarchisation des éléments. Dans le cadre d'une application orientée vers la généralisation cartographique, nous focalisons notre étude sur la cartographie topographique à moyenne échelle (ce qui motive le choix des extraits de cartes insérés dans cette partie).

Le second type de structure de données est la représentation de l'information sous la forme d'un champ continu. La caractérisation surfacique repose sur l'analyse des quatre modèles numériques qui fournissent chacun une image particulière du relief :

- l'altimétrie Z fournit la hauteur de la topographie ;
- l'image des pentes P représente les variations des altitudes dans le voisinage de chaque point ;

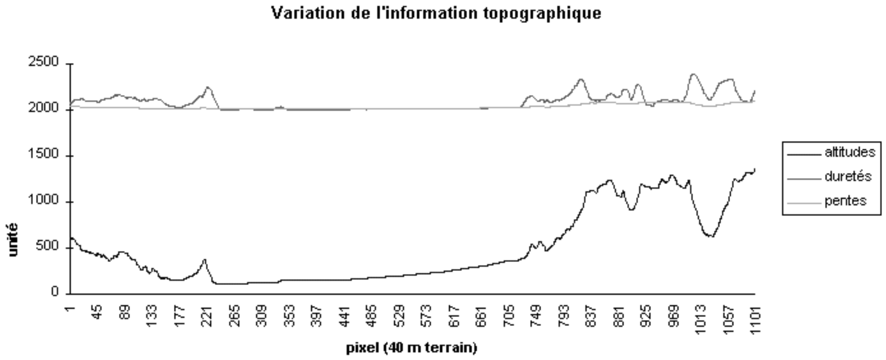
- l'image des duretés D donne l'homogénéité des ondulations du terrain en fonction de la dispersion des pentes et altitudes dans les huit directions priviligiées autour de chaque point ;
- l'image segmentée S se compose de zones à topographie homogène.

Tout l'espace est renseigné car chaque variable est un champ continu, *i.e.* une fonction de l'espace des index I vers un ensemble B :

$$\begin{array}{l} H : I \subset |R^2 \longrightarrow B \subset |R \text{ où } B \in \{Z, P, D, S\} \\ \quad s \qquad\quad \longrightarrow \; H(s) \end{array}$$

Chacun des champs apporte une information sur un aspect du caractère du terrain (cf. figure 3) mais, pris individuellement, ils ne suffisent pas à la caractérisation exigée pour une généralisation de l'orographie. Il manque, en effet, une information essentielle sur les formes du terrain par rapport au contexte dans lequel elles se trouvent.

Figure 40 : Profils de l'information contenue dans les données le long de la ligne 700 du MNT.



L'analyse des deux types de structures de données, champs continus et réseaux structurés, en parallèle, apporte une caractérisation spécifique à chacun. La caractérisation conduit ainsi à un modèle multi-niveau d'accroissement de la connaissance dont le dernier niveau doit procurer une stratification de l'information "terrain".

2 Caractérisation des éléments structurants

La description des éléments locaux de la topographie (formes du paysage) peut être obtenue par la qualification des lignes de structure et de leur région d'influence. Cette description sera d'autant plus intéressante que le relief est rugueux avec des structures linéaires importantes [Weibel, 89]. La région d'influence d'un thalweg est le bassin versant et celle de la crête est la colline (cf. partie II).

Dans le cadre de notre application (cf. partie V), la hiérarchisation des éléments structurants est fondamentale pour la qualification. Quels sont les critères de hiérarchisation par rapport à leur applicabilité ? Nous verrons certains critères purement formels qui ne conviennent pas à un objectif de généralisation cartographique : la décision de sélection doit être fondée sur l'information géomorphologique extraite des données et non sur un critère purement géométrique. La construction d'une hiérarchie et le processus décisionnel sont au cœur du système [Wang et Müller, 91]. Ce chapitre est consacré à l'analyse des besoins en matière d'outils de hiérarchisation adaptée à un but de généralisation (ces outils n'ont pas été implantés).

2. 1. Caractérisation du réseau de drainage

Des applications hydrologiques calculeront, à partir du réseau extrait, les temps de réponse des bassins versants ou d'autres paramètres très spécifiques. Ce qui nous intéresse est de pouvoir qualifier les zones obtenues par la segmentation du MNT en les associant à un type de relief et le réseau de drainage nous apporte une information structurelle indispensable sur les ruptures de pente et la forme locale (concavité/convexité). Cependant, dans un but de généralisation cartographique, un premier pas dans la caractérisation d'un réseau est sa hiérarchisation.

2. 1.1. Hiérarchisation du réseau de drainage

En ce qui concerne les thalwegs, il existe un ensemble de méthodes de classification anciennes et bien connues. Cependant, pour un but cartographique, ces méthodes de hiérarchisation formelles ne tiennent pas forcément suffisamment compte de la nature du réseau et de ses propriétés physiques. Sans amélioration notable, elles ne semblent pas adaptées à notre objectif. D'un autre côté, l'extraction automatique à partir d'un MNT fournit une première hiérarchisation à nature hydrologique intéressante mais qu'il faut malgré tout compléter.

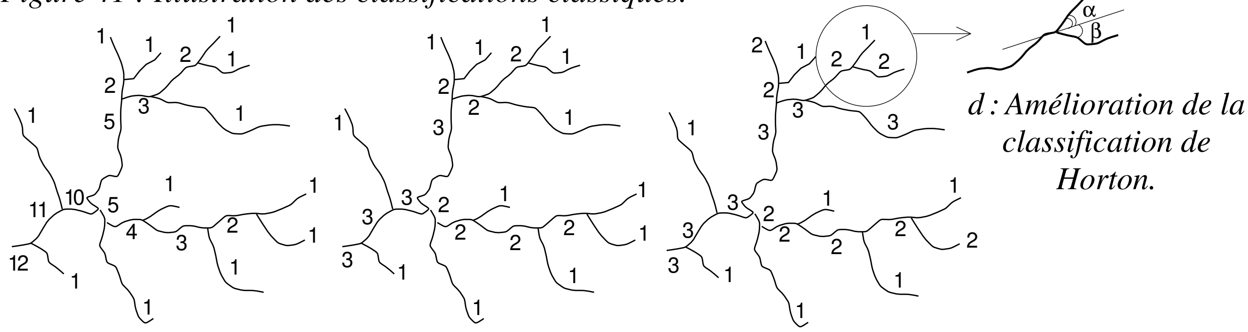
2. 1.1.1. Première hiérarchisation

Un arc est une partie orientée du réseau comprise entre deux noeuds, autrement dit on définit le drain comme un tronçon du réseau de drainage allant d'une source à une confluence, d'une confluence vers une autre confluence en aval, ou d'une confluence vers un exutoire (cf. partie III). Il existe différentes méthodes d'étiquetage des arcs d'un arbre. Les procédés classiques de la théorie des graphes partent de la racine (ici le point exutoire) et parcourent l'arbre soit en largeur (niveau avec une grande cardinalité), soit en profondeur (chemin avec une grande cardinalité). En ce qui concerne l'étiquetage hiérarchique des réseaux de drainage, un tri topologique inverse est préféré. Ainsi, ce sont les drains issus des sources qui sont les premiers étiquetés. Les travaux déjà répertoriés ont recouru à trois méthodes classiques :

- Dans la classification de R.L. Shreve (1966), l'ordre d'un drain est la somme des ordres des drains immédiatement en amont, en posant que l'ordre d'un drain juste en aval d'une source, c'est-à-dire en amont du premier confluent, est égal à 1 (cf. figure 4.a).
- De même, pour la classification de A.N. Strahler (1952), l'ordre d'un drain issu d'une source est de 1. La confluence de deux drains d'ordre n donne un drain d'ordre n+1. La confluence d'un drain d'ordre n et d'un drain d'ordre inférieur à n ne change pas l'ordre qui est égal à n (cf. figure 4.b).

- La classification de R.E. Horton (1945) repose sur le même principe que celle de Strahler à ceci près que tous les drains situés sur le chemin amont le plus long reçoivent l'ordre le plus haut (cf. figure 4.c).

Figure 41 : Illustration des classifications classiques.



d : Amélioration de la classification de Horton.

a: Classification de Shreve.

b: Classification de Strahler.

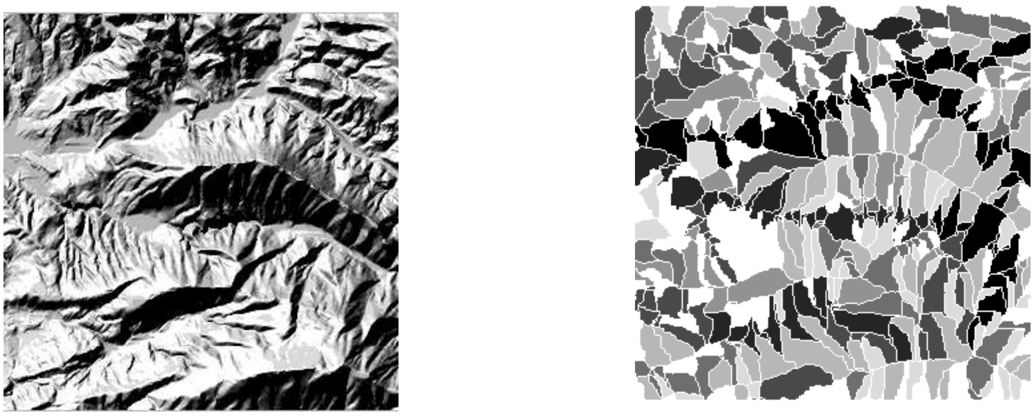
c: Classification de Horton.

Avec la classification de Shreve, l'ordre hiérarchique des segments devient vite très élevé. C'est pourquoi les classifications de Strahler ou de Horton sont en général préférées dans les études de drainage. Cette dernière paraît plus intéressante car elle prend en compte non seulement le niveau hiérarchique dans l'arbre mais aussi un critère géométrique qualifiant le thalweg (sa longueur).

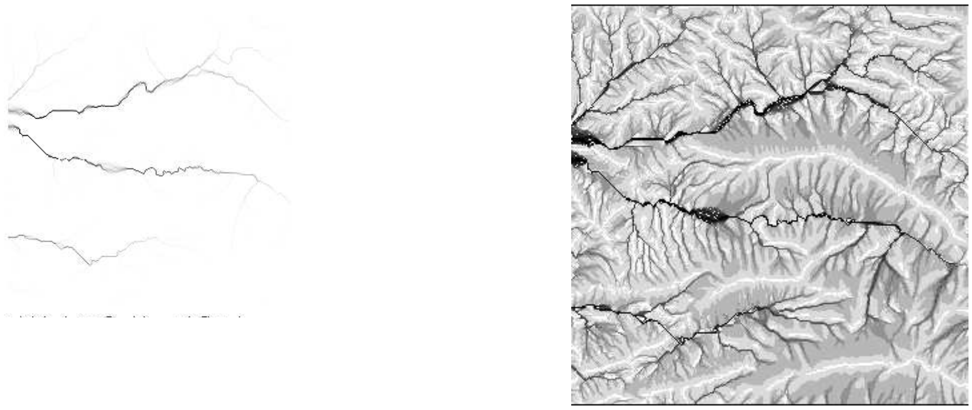
Dans les trois classifications, plus l'ordre est élevé, plus l'importance du tronçon est considérée comme grande. Dans les deux premières, l'importance du tronçon augmente aussi avec la grandeur de la zone drainée en amont sans que l'étiquette soit proportionnelle ou représentative d'une mesure de cette grandeur. La troisième classification accorde plus d'importance à la longueur des drains, qui est un critère intéressant mais restrictif. R.E. Horton (1945) a, par ailleurs, étendu sa hiérarchisation à l'étude des angles de confluence de façon à reconnaître un affluent d'un courant principal (cf. figure 4.d). Le drain rejoignant un drain amont avec le plus grand angle par rapport à la direction du courant juste en aval est l'affluent. A partir de l'exemple de la figure 4.c, on obtient la relation $\beta > \alpha$ signifiant par là que le drain étiqueté avec la plus grande valeur hiérarchique n'appartient pas au courant principal. Toutefois, d'autres critères entrent en jeu. [Wang et Müller, 93] en introduisent de spécifiques, qui peuvent être pris en compte par les hydrologistes pour distinguer un cours d'eau principal de ses affluents (dans l'expérimentation présentée, ils n'utilisent cependant que la longueur et restent ainsi conscients que le critère n'est pas satisfaisant dans certains cas) : longueur, angle, largeur, volume et débit. En complément, des attributs tels que le débit ne peuvent pas être directement dérivés d'une représentation purement planimétrique.

Une classification intéressante pour des applications spécifiques est de considérer le régime permanent obtenu en présence d'une pluie continue uniforme. En effet, les captures et les déversements tendent à une hiérarchisation naturelle du réseau hydrographique dépendante de conditions variables dont, notamment, l'alimentation. Si la caractérisation d'une région réussit à mettre en valeur d'autres causes de différenciation structurale (résistance lithologique…), alors la hiérarchisation se rapprochera de la réalité (cf. infra 2.1.2). Cependant, elle nécessite d'établir les calculs à partir du MNT d'origine de façon à pouvoir calculer la surface des bassins versants associés à chaque drain (cf. partie III). L'écoulement fournit l'importance relative des drains pour une application hydrographique. En effet, une hiérarchisation naturelle des thalwegs consiste à exprimer leur ordre d'importance en fonction du débit sortant des bassins versants associés. Dans notre méthode d'extraction, même si le débit calculé n'est pas strictement le débit réel des cours d'eau effectivement présents sur le terrain, il correspond à la surface (en projection horizontale) des bassins versants associés et garde en ce sens une signification géomorphologique (cf. infra 3.1). Les imagettes 5.c et 5.d[1] montrent une hiérarchisation pour laquelle les débits obtenus ne sont pas numérotés mais représentés sur deux échelles de teintes de gris (plus forts débits en noir).

Figure 42 : Hiérarchisation à nature hydrologique d'un réseau extrait de la région du mont Ventoux.



a : Extrait de MNT. *b : Bassins versants détectés.*



c : Débits en régime permanent (échelle linéaire). *d : Débits en régime permanent (échelle logarithmique).*

2. 1.1.2. Hiérarchisation contextuelle

La hiérarchisation contextuelle prend en compte le contexte dans lequel évoluent les éléments à étiqueter pour déterminer une stratégie de hiérarchisation particulière à cette situation. Ainsi, dans un contexte cartographique tel que le nôtre, la hiérarchisation doit tenir compte de l'aspect culturel, c'est-à-dire de l'appellation des cours d'eau. Par là même, un drain étiqueté à un niveau hiérarchique très bas par une méthode classique ou par simulation de l'écoulement des eaux peut en fait être très important d'un point de vue cartographique. Par exemple, la source de la Seine doit être hiérarchiquement plus élevée que toutes les sources des affluents de ce fleuve.

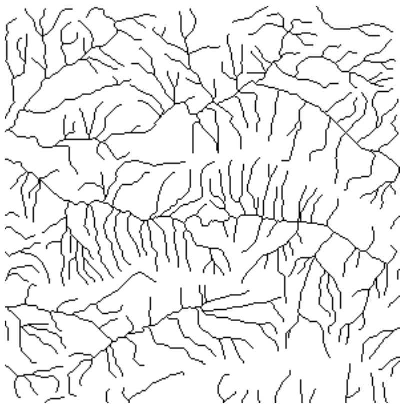
L'extraction numérique des thalwegs fournit un réseau plus dense que le réseau hydrographique réel ou cartographique. La figure 6.a montre un extrait de carte (à une échelle visée par la généra-

---

[1] Les imagettes ont été fournies par Olivier Jamet (laboratoire MATiS, IGN) pour illustrer l'article [Monier *et al.*, 96].

lisation) et la figure 5.a le MNT qui lui correspond. La comparaison du résultat de vectorisation du réseau extrait de la figure 6.b avec le système hydrographique représenté sur la carte met en valeur ce changement important de densité. L'extraction automatique d'un réseau de thalwegs requiert la détermination, en interactif, d'un seuil. Même si le seuil choisi permet d'approcher le plus fidèlement possible le réseau réel, ce réseau hydrographique réel ne sera jamais obtenu avec précision. En effet, beaucoup de facteurs naturels entrent en jeu, qui ne sont pas modélisés, et leur interaction varie avec les régions géographiques (cf. partie II).

Figure 43 : Comparaison d'un réseau cartographique et d'un réseau numérique.



b : Réseau des thalwegs détectés.

a : Extrait de carte au 1:100 000.

Une méthode de qualification du réseau de thalwegs repose sur sa comparaison au réseau hydrographique homologue. Une telle comparaison permet non seulement aux thalwegs dans lesquels coule un cours d'eau de recevoir un ordre plus élevé que les autres, mais aussi d'être nommés. L'appariement automatique des réseaux est un problème difficile à résoudre même si une visualisation des réseaux superposés montre des points communs. [Le Roux, 92] présente un essai d'appariement d'un réseau hydrographique extrait de la BD CARTO® de l'IGN avec un réseau extrait numériquement d'un MNT par recherche des nœuds homologues. Les difficultés majeures résident alors dans :

- la détermination d'une grandeur de voisinage dans laquelle chercher les homologues ;
- le seuillage du réseau extrait du MNT qui fournit des arcs à extrémité libre, de longueurs et en quantité assez variables par rapport à ceux du réseau hydrographique de la carte, lequel ne contient que les écoulements remarquables.

Pour déterminer l'importance de certains thalwegs par comparaison avec un réseau hydrographique, il convient de connaître *a priori* la hiérarchie du réseau cartographique. Par exemple, du glacier des sources de l'Isère jusqu'à sa confluence avec le Rhône, tous les thalwegs seront importants pour une échelle allant jusqu'au 1 : 250 000. Cependant, elle n'est pas suffisante puisque si l'on regarde une carte topographique au 1 : 250 000, on remarque que certains cours d'eau ne sont pas tracés alors que l'estompage marque un bassin versant et la présence de son thalweg. L'existence d'un cours d'eau ne doit pas demeurer l'unique critère de sélection des thalwegs qui doivent, par conséquent, aussi être qualifiés à l'aide d'une information géomorphologique (cf. infra 2.1.2).

Le complètement de la hiérarchisation géométrique par une information cartographique est une procédure fort complexe. Elle doit tenir compte de multiples facteurs (cf. figure 7) tels que :

- l'accessibilité en des sources nommées : en complément des exemples précédents, une rivière prenant sa source dans un lac est topographiquement importante ainsi qu'un torrent dont les sources forment un bassin de réception (la Gresse, cf. figure 7) ;
- la desserte de lieux topographiquement importants :
    - une rivière qui aboutit à un lac (ruisseaux non nommés qui prennent leur source sur la côte Rouge, cf. figure 7) ou une rivière qui traverse un lac (le Drac, cf. figure 7) ;
    - un village est sélectionné avec le cours d'eau qui le draine (St-Paul-les-Monestier sélectionne le cours d'eau qui y coule sans qu'il soit nommé sur la carte, cf. figure 7) ;
    - une ville ne permet pas forcément de sélectionner les rivières qui y passent ; toutes celles qui passent par Grenoble ne sont pas représentées au 1:250 000, un autre critère détermine leur importance comme la source du cours d'eau (le Drac conflue avec l'Isère à Grenoble) ;
    - un col ou une autre lieu géographique : les sources du torrent de Riffol ne forment pas un bassin de réception typique, le fait qu'il parte du col du Fau entraîne au 1:250 000 le maintien d'un seul drain ; un affluent du Riffol est maintenu au 1:250 000 parce qu'il part des montagnes des Chaux (cf. figure 7) ;
    - un site touristique : la table d'orientation de la côte Rouge (cf. figure 7) entraîne le maintien de deux des trois cours d'eau qui se jettent dans le lac dont un d'importance très minime, compte tenu de sa taille et relativement aux deux autres.
- les routes longeant un cours d'eau : La route nationale 75 longe un affluent de la Gresse maintenu au 1:250 000 mais non nommé sur la carte (cf. figure 7) ;
- les ponts construits au-dessus d'un cours d'eau : l'importance du pont peut être historique (par exemple, le pont du Gard) ou pratique (lorsqu'il existe peu de ponts pour passer d'une rive à l'autre) ;
- la navigabilité accroît l'importance d'un cours d'eau en lui attribuant une nature de voie de communication ; le canal est une exception importante ;
- le débit, la présence de centrales électriques et de barrages (barrage de Monteynard, cf. figure 7) ;
- la temporalité : la grande majorité des cours d'eau temporaires disparaissent ;

- la taille de l’embouchure : la simplification du trait de côte entraîne la suppression de petites baies et, inversement, le maintien d’une baie implique le maintien du cours d’eau principal qui s’y jette ;
- la largeur : un cours d’eau représenté par deux traits bleus parallèles et une trame (au lieu d’un simple trait bleu) ou un cours d’eau représenté avec la limite de son lit apparent sont remarquables sur le terrain par leur largeur.

Figure 44 : Extrait de carte au 1:250 000, le lac de Monteynard-Avignonet dans l’Isère.

2,5 km

La complexité de cette procédure découle de la concomitance des facteurs. Il faudra, par conséquent, définir un ordre de priorité puis fixer une pondération adaptée à l’importance relative des critères de sélection. Cependant, nous pensons qu’une première hiérarchisation doit dépendre de l’écoulement, qui doit à son tour être pondérée par des critères de différenciation structurale dans la mesure où certains indicateurs géomorphologiques permettent de les évaluer.

2. 1.2. Qualification géomorphologique

Dans une optique de généralisation cartographique, la caractérisation du réseau de drainage repose en majeure partie sur sa hiérarchisation. Cependant, le but de la caractérisation est aussi de qualifier les régions délimitées lors de la phase de segmentation (cf. partie III) de façon à adapter les décisions de généralisation au type de relief. [Riazanoff, 89] a mis en évidence une corrélation qualitative entre la forme du réseau hydrologique et des caractères géomorphologiques. Il définit six paramètres et montre qu’ils sont très corrélés à la topographie. Chacun des indices peut aussi souligner des anomalies sans doute liées à des éléments structuraux sous-jacents (failles). Pour cela, l’auteur utilise une fenêtre mobile circulaire qui pourrait être remplacée par un calcul localisé dans chaque cellule de Voronoï (cf. partie III).

- direction : les directions des drains sont déterminées, pour chaque nœud du réseau de drainage, en ajustant au mieux une droite minimisant l’écart quadratique moyen aux voisins de ce point. Pour une direction donnée, les longueurs et les densités des segments sont liées à l’étendue des versants. Les segments d’ordre hiérarchique faible sont directement orientés dans le sens des versants (influence de la pente). Les segments d’ordres supérieurs s'affranchissent progressivement de l'effet de la pente pour devenir parallèles aux versants majeurs.

- courbure / linéarité : la courbure se calcule par détermination de coefficients en x et y d'une parabole paramétrique dont la distance aux points échantillons minimise l'écart quadratique moyen. La linéarité des drains est plus forte en zones montagneuses ou de collines qu'en zone de plaine. Les caractères qui agissent sur la courbure sont la pente et la longueur des drains.
- angle de confluence : à chaque confluence, est mesurée la valeur du plus petit angle que forment entre eux deux drains aboutissant à cette confluence. Dans les plaines, collines basses ou zones montagneuses à nature de roches homogènes, les angles sont relativement faibles. Par contre, dans les zones de montagnes ou de collines hétérogènes (structure de plissement ou de faille), les angles sont beaucoup plus grands. Ce paramètre permet donc de différencier les réseaux influencés par les caractères géologiques de ceux qui n'obéissent qu'au principe de descente suivant la plus grande pente.
- longueur : les segments les plus longs se trouvent dans les zones de montagnes ou de collines.
- densité : la densité est le quotient du nombre de points de réseaux présents dans une fenêtre échantillon par l'aire de la fenêtre. La densité de drainage est un indicateur plus important en plaine qu'en montagne.
- indice de parallélisme : l'indice de parallélisme se calcule en deux étapes. Tout d'abord, les coefficients directeurs de la droite de régression par moindres carrés sur tous les points du drain forment une image des drains. L'examen du voisinage dans une fenêtre permet de calculer l'indice de parallélisme à partir des segments présents dans la fenêtre. Il met en évidence les pentes les plus grandes des reliefs les plus forts.

L'indicateur de direction ne convient que dans le cadre d'une application hydrologique locale. L'interprétation des résultats pose un problème de lisibilité si l'utilisateur visualise toutes les directions simultanément. Pour une direction fixée, les segments sont liés à la taille des versants et leur prise en compte n'apporte pas d'information complémentaire pour la qualification des bassins versants (cf. infra 3.1). La courbure et la densité ne présentent pas non plus un intérêt supplémentaire à ce stade de nos travaux puisqu'elles ne permettent de qualifier qu'une opposition entre plaine et montagne sans discriminer des types de montagne et sans qualification plus fine (opposition déjà obtenue lors de la phase de segmentation). De même, le calcul de la longueur des drains donne un résultat similaire au calcul des tailles des cellules de Voronoï (cf. partie III) et n'aboutit pas à différencier les reliefs entre eux mais à isoler la plaine.

En revanche, l'angle de confluence fournit une information sur l'homogénéité de la lithologie ce qui permet de distinguer deux régions montagneuses à nature de roche dissemblable (opposition entre le Vercors et le Vivarais par exemple). L'indice de parallélisme est intéressant pour qualifier une zone de montagne à structure parallèle telle qu'on en trouve dans le Vercors. En effet, la visualisation des bassins versants montre ce parallélisme sans toutefois le mesurer (cf. infra 3.1).

La caractérisation des cours d'eau par le biais d'indices géomorphologiques permet aussi de détecter des comportements exceptionnels. En effet, les cours d'eau obéissent à des lois physiques simples rappelées par [Carvalho, 95] :

· ils s'écoulent de zones hautes vers des zones basses ;

· ils suivent la ligne de plus grande pente topographique.

Toute partie du drainage qui ne suit pas ces lois présente des tracés anormaux guidés par la structure ou la lithologie. Dans une zone homogène, les indices étudiés par [Riazanoff, 89] permettent de mettre en évidence de tels accidents du terrain.

A l'issue de cette brève étude, deux tendances intéressantes se dégagent. D'une part, deux descripteurs, à savoir l'angle de confluence et l'indice de parallélisme, permettent de dégager les tendances comportementales d'une région montagneuse et de qualifier la structure. D'autre part, certains paramètres (courbure, angle de confluence) permettent, dans une région homogène, de détecter des exceptions du terrain. Par exemple, la linéarité plus élevée d'un drain dans un environnement de plaine peut marquer une faille.

2. 2. Caractérisation du réseau de crêtes

Dans la partie III, nous avons défini les crêtes en tant que sous-ensemble des limites de drainage de façon à en faciliter la modélisation et l'extraction automatique. Cependant, la nature réelle des crêtes est plus souvent surfacique que linéaire car l'érosion éolienne est plus diffuse que l'érosion hydrique des thalwegs. L'équivalent du principe d'accumulation des écoulements serait un principe de sommation de l'ensoleillement (fictif) par variation de la position de la source de lumière. Mais cela engendrerait le problème du traitement des zones de crête. C'est pourquoi, par la suite, nous continuons à considérer la crête comme une ligne, ce qui correspond à une première approximation.

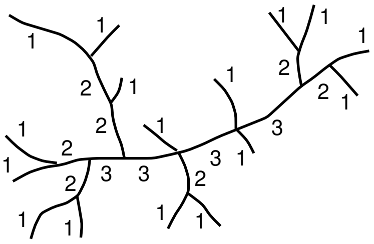
La particularité du réseau de crêtes est qu'il n'est pas connexe mais possède des composantes connexes, *i.e.* des parties maximales connexes. Il est moins évident de donner une orientation aux brins composant une crête qu'aux drains d'un thalweg. On pourrait orienter les arcs vers le bas en partant des sommets ou vers le haut en partant des extrémités, mais le passage par des cols fait que certains arcs doivent recevoir deux directions opposées. En cartographie numérique, l'orientation des crêtes n'est pas une tâche primordiale parce qu'elle n'est pas naturelle, contrairement à celle des thalwegs. Par contre, leur hiérarchisation est indispensable pour une caractérisation du terrain et pose de nouveaux problèmes non résolus par la hiérarchisation des thalwegs. Par opposition avec la multitude des travaux à nature hydrologique sur la caractérisation (hiérarchisation et qualification) des réseaux de drainage, il n'y a que très peu de références en matière de caractérisation des crêtes [Weibel, 89][Brändli, 97]. La méthode que nous proposons, après la synthèse de la méthode décrite dans [Brändli, 97], vise à combler cette lacune.

2. 2.1. La hiérarchisation des crêtes selon Martin Brändli

Dans le cadre des travaux sur la généralisation cartographique, [Brändli, 97] s'intéresse aux structures du terrain qui fournissent une description de la surface terrestre sous la forme d'un squelette. L'objectif est la réduction de la complexité des structures visibles, principalement les crêtes et thalwegs, par sélection et maintien des plus importantes.

La méthode d'extraction des crêtes présentée vise à dégager les lignes ayant une expression topographique. Pour cela, Martin Brändli (1997) analyse les courbures du MNT de façon à déterminer un ensemble de zones contiguës de forme convexe où la probabilité qu'il y ait une ligne de crête est forte. La méthode utilisée est empruntée à L.W. Zevenbergen et C.R. Thorne (1987). Par seuillage (degré avec lequel une zone est considérée convexe), un ensemble de lignes de crête candidates est déterminé dans lequel il faut discerner les lignes principales des lignes secondaires.

L'ordre de Strahler (cf. infra 2.1.1.1) est utilisé pour affecter une hiérarchisation au réseau de crêtes. L'hypothèse implicite appliquée à un réseau de thalwegs implique que les liens d'ordre le plus élevé se trouvent en aval des liens d'ordre le plus faible, ce qui ne s'adapte pas à un réseau de crêtes. Une règle plus générale ne tenant aucun compte de la pente est définie, qui suit cependant les deux propriétés principales : les liens extérieurs reçoivent la valeur 1 ; si deux ou plusieurs liens de même ordre se rencontrent à une bifurcation, l'ordre est augmenté de 1. Sur un exemple, la hiérarchisation obtenue par la méthode décrite dans [Brändli, 97] aboutit au schéma suivant :



Les lignes montrant des ruptures de pente significatives sont mises en valeur par l'attribution d'un ordre hiérarchique élevé. Cependant, la forme d'une composante connexe ne se retrouve pas par sélection des valeurs les plus élevées. L'utilisation de l'ordre d'Horton permet d'étendre une valeur d'ordre élevée aux liens extérieurs (cf. paragraphe suivant). D'autre part, afin de maintenir la présence des accidents du terrain en zone de plaine, le seuillage de l'ordre hiérarchique permettant la sélection des liens les plus importants doit être adapté à la topographie régionale. En effet, l'élimination des liens d'ordre inférieur ou égal à 2 entrainerait la disparition de la plupart des saillies qui sont pourtant des repères topographiques du paysage.

2. 2.2. Une méthode de hiérarchisation des crêtes

Deux critères cartographiques nous ont conduit à la définition d'une méthode de hiérarchisation des réseaux de crêtes : la longueur et la topologie. Par la hiérarchisation, on cherche à donner une valeur élevée aux arêtes les plus longues et à celles qui déterminent le squelette d'une composante connexe (entre autres, par la recherche du chemin le plus long). En effet, pour un cartographe ou un géomorphologue, une crête longue et sinueuse est importante. En zone de plaine, elle marque un accident du terrain remarquable, en zone montagneuse, elle participe à la complexité du terrain. Nous avons aussi essayé de mettre en valeur la complexité de certaines crêtes qui doit se retrouver dans la forme du squelette. Pour cela, nous avons recensé deux cas de figure principaux. Cette complexité peut provenir soit du nombre de sous-graphes secondaires qui s'attachent à un long brin principal (très fréquent en zone accidentée), soit du nombre de brins incidents à un sommet (certains plissements présentent des structures de crête en étoile). Par une première approche de hiérarchisation géométrique, nous avons donc essayé de remplir les deux conditions primordiales : respect de la topologie, prise en compte de la longueur.

La classification de Horton présente l'avantage de donner un ordre hiérarchique élevé à tous les brins qui constituent le chaînage le plus long. La classification que nous proposons est établie sur ce principe :

- la jonction de deux brins d'ordre n donne un brin d'ordre n+1 ;
- la jonction d'un brin d'ordre n et d'un brin d'ordre inférieur à n ne change pas l'ordre qui est égal à n ;
- tous les brins situés sur le chemin qui vient d'être étiqueté le plus long reçoivent l'ordre le plus haut.

Le processus suit une décomposition en plusieurs étapes : initialisation, étiquetage selon un critère d'association, modification de l'étiquetage selon des critères d'exception, étiquetage du chemin le plus long.

(1) Initialisation

Lorsque l'on cherche à affecter une hiérarchie à un réseau de crêtes, le problème majeur vient de la non orientation des drains. La phase d'initialisation permet de démarrer l'étiquetage selon un critère de longueur et d'ordonner le parcours des brins extérieurs vers l'intérieur. Ainsi, la première étape consiste à classer les brins terminaux par ordre décroissant de longueur et à leur affecter la valeur 1. On commence par le plus long brin extrême et on l'associe, si cela est possible, avec un brin adjacent d'ordre 1. On affecte donc la valeur 2 au troisième brin incident ainsi qu'au brin extrême le plus long. Une fois que les associations des brins extrêmes sont effectuées, on classe ceux qui sont étiquetés à 2 par ordre décroissant de longueur dans une liste L_long.

(2) Etiquetage par association

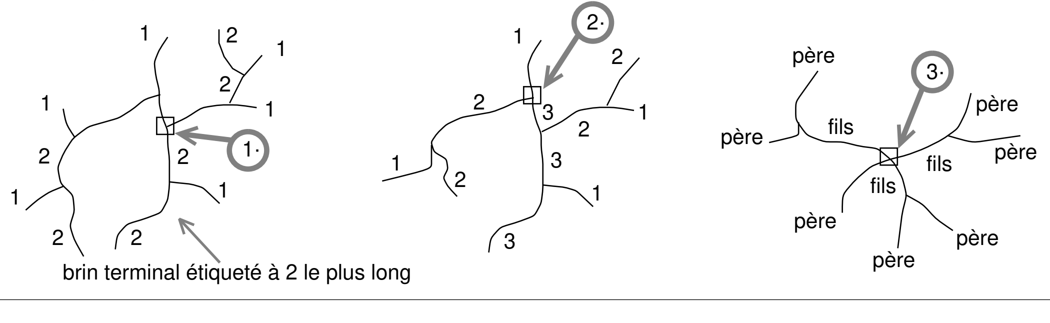
L'orientation faisant défaut, il faut imposer de nouveaux critères qui gèrent la progression de l'étiquetage. Une autre particularité des composantes du réseau vient de leur structure qui ne correspond pas à celle d'un arbre (ce qui permettrait un parcours par niveaux). On applique alors le critère d'étiquetage suivant : une association est possible si parmi trois brins incidents à un sommet, deux sont étiquetés. Les critères d'arrêt des associations sont (cf. figure 8) :

1· il n'existe pas deux brins adjacents étiquetés qui permettent de définir l'étiquette d'un troisième brin ;

2· tous les brins adjacents à un sommet sont déjà étiquetés ;

3· un sommet comporte plus de trois brins incidents.

Figure 45 : Illustration des critères d'arrêt.



On récupère dans L_long les arêtes extrémités successives et on déroule le principe de Horton tant qu'aucun critère d'arrêt n'est vérifié.

(3) Etiquetage des exceptions

Certains sommets peuvent recevoir plus de trois crêtes incidentes. Nous cherchons à démarquer ce type de structure en leur affectant une valeur hiérarchique relativement élevée. Lorsqu'une composante connexe comporte plusieurs sommets recevant quatre brins incidents, des brins de cette composante peuvent ne pas être étiquetés alors que la liste L_long est vide. Lorsque l'algorithme arrive à un sommet à quatre brins, on recherche les chemins continus les plus longs de brins non étiquetés. On classe les chemins par ordre décroissant de longueur. On commence par étiqueter le premier (le plus long) en lui attribuant un ordre hiérarchique tel que :

- · soit k_1 l'ordre maximal des brins incidents à la première extrémité du chemin ;
- · soit k_2 l'ordre maximal des brins incidents à la deuxième extrémité du chemin ;
- · soit k l'ordre à affecter au chemin continu : $k = \max\{k_1, k_2\} + 1$.

Il arrive que des brins extérieurs d'une composante soient longs mais d'ordre hiérarchique faible en fin d'étiquetage. Afin de mettre en valeur les axes principaux autres que le chemin le plus long, on détermine un critère de modification des étiquettes. Ainsi, pendant la phase d'étiquetage par association, les fils des brins terminaux qui ne permettent pas de faire une nouvelle association (et qui gardent une valeur hiérarchique égale à 2) à cause des critères d'arrêt 1· ou 3· sont stockés dans une liste L_pere ainsi que leur père. La création d'une telle liste donne ensuite la possibilité de les re-étiqueter avec un ordre plus élevé.

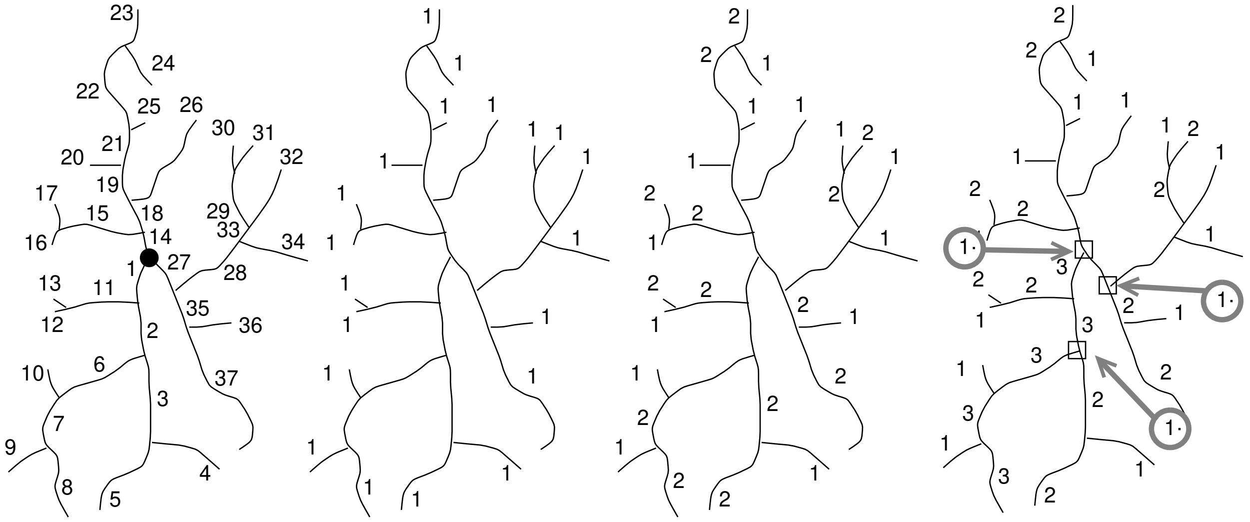
(4) Etiquetage du chemin le plus long

Une composante du réseau de crêtes comporte un ou plusieurs axes principaux. La recherche du chemin continu le plus long détecte l'axe le plus long et lui attribue une valeur hiérarchique élevée.

(5) Exemples

Les figures 9 et 10 montrent deux exemples d'application d'une hiérarchisation géométrique des crêtes telle que nous l'avons proposée. Il ressort que le squelette de la composante est bien dessiné dans le premier cas, tandis que, dans le second cas, on aimerait que le brin 2 étiqueté à 1 soit aussi étiqueté à 3 de façon à mieux respecter la forme générale du squelette de la crête. D'autre part, dans la figure 9, l'étiquetage à 4 ne se prolonge pas au-delà du brin 33 jusqu'à un brin extérieur parce que l'algorithme re-étiquette le chemin le plus en amont et ne cherche pas de prolongement en aval.

Figure 46 : Proposition d'une hiérarchisation du réseau de crêtes.



Premier étiquetage : identification des brins par parcours à gauche.

(1) Initialisation : affectation des brins extérieurs.

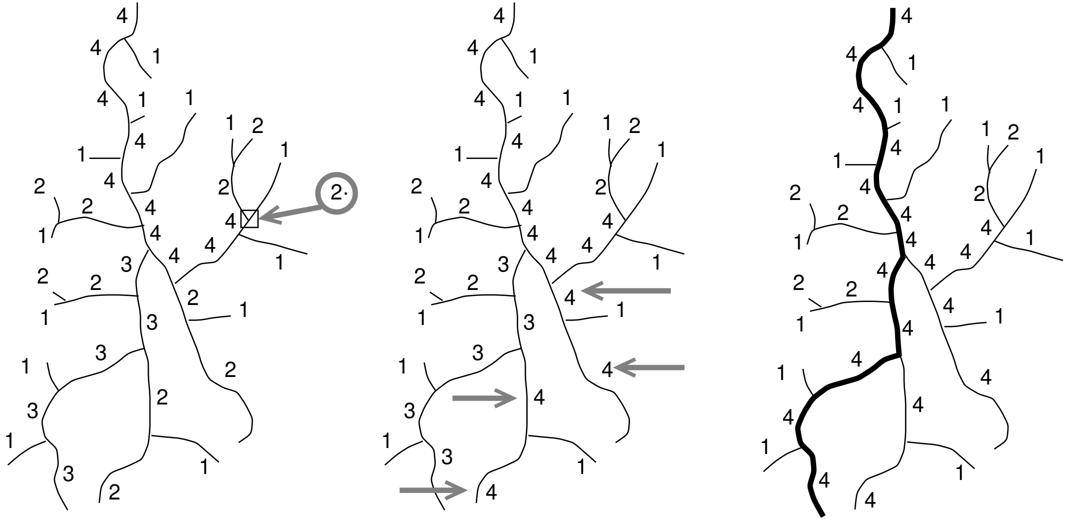
(1) Initialisation : étiquetage à 2.

L_long = {37, 5, 8, 23, 31, 17, 13}

(2) Etiquetage par association à partir du 8.

L_long = {23, 31, 17, 13}

L_pere = {(37,35), (5,3)}



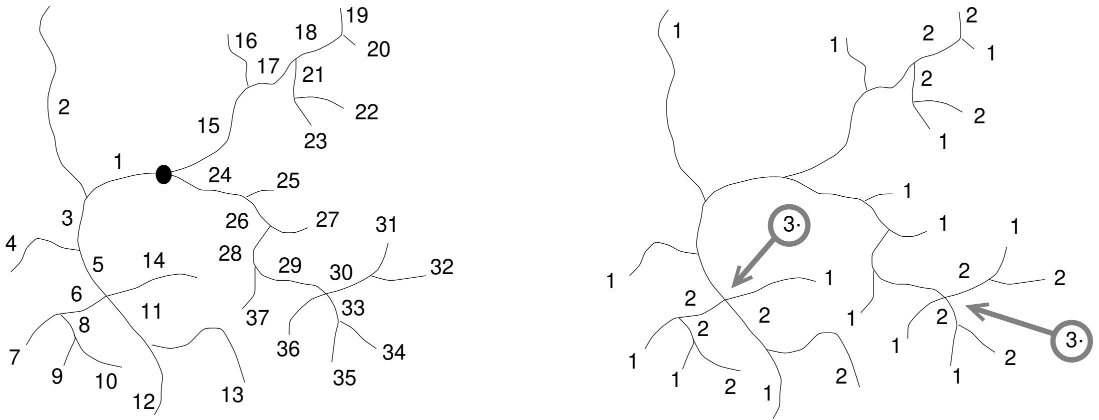
(2) Etiquetage par association à partir du 23.

L_pere = {(37,35), (5,3)}

(3) Modification de l'étiquetage des exceptions listées.

(4) Etiquetage du chemin le plus long (en gras).

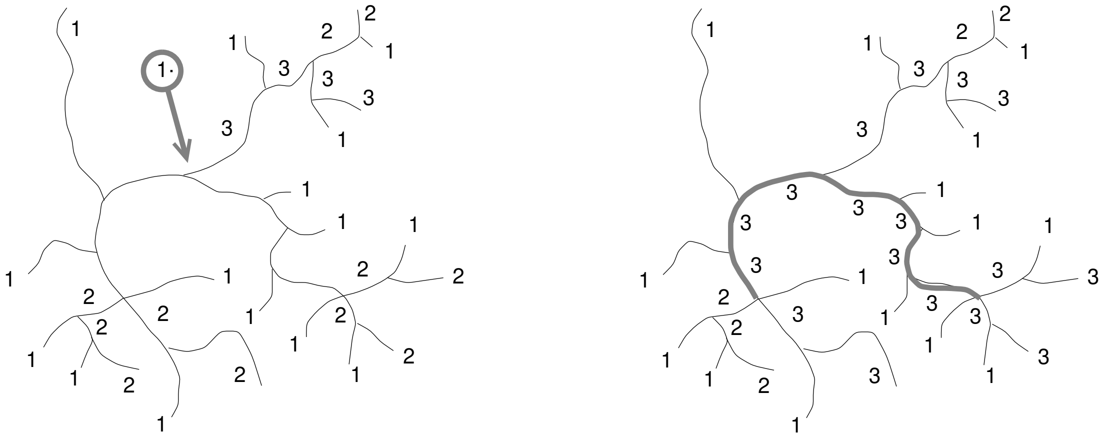
Figure 47 : Cas de recherche d'un chemin continu.



Premier étiquetage : identification des brins.

Initialisation et premières associations.

L_long = {13, 10, 32, 34, 22, 19} → 13, 10, 32, 34
L_pere = {(13,11), (32,30), (34,33)}
L_4 = {(5,6,11,14), (29,30,33,36)}



Fin des associations possibles.

L_long = {22, 19} → 22, 19
L_pere = {(13,11), (32,30), (34,33)}
L_4 = {(5,6,11,14), (29,30,33,36)}

Modification de l'étiquetage des exceptions.

L_pere = {(13,11), (32,30), (34,33)} → 13, 32, 34
L_4 = {(5,6,11,14), (29,30,33,36)} → 5, 29

(6) Améliorations

Afin de finaliser cet algorithme de hiérarchisation des brins de crête, il reste à ajouter des critères de continuité des directions (planimétrique : rechercher un brin pour lequel la direction change le moins) et des altitudes (altimétrique : rechercher un brin le long duquel les altitudes varient le plus progressivement).

A partir de l'étiquetage géométrique final, il est intéressant d'associer deux à deux les critères :

- la longueur et la direction ;
- la longueur et la continuité des altitudes.

Ainsi, par repérage de l'ensemble des brins de valeur hiérarchique la plus élevée, une méthode consiste à construire la droite des moindres carrés aux deux extrémités de tous les brins de cet ensemble, cette droite approchant la direction du brin. On peut alors prendre en compte la longueur du brin qui se trouve dans la direction la plus proche de celle du brin à forte hiérarchie identifié pour lui affecter ou non une autre étiquette. Par exemple, dans la figure 10, une recherche de la continuité des directions à partir du brin 3 permet d'identifier les brins 2 et 5. Le brin 5 est déjà étiqueté à une valeur élevée. Par contre, le brin 2 a une valeur très faible alors qu'il est long et participe à la définition des axes principaux de la composante. Pour l'exemple de la figure 9, la continuité du brin 33 sera donnée par le brin 32.

2. 2.3. Qualification contextuelle

La méthode de hiérarchisation des crêtes que nous proposons forme une première base de qualification qu'il convient d'améliorer. Nous avons en effet présenté quelques problèmes inhérents à une qualification géométrique. A partir du réseau hiérarchisé, l'idée est de pondérer l'ordre hiérarchique de chaque brin par des critères géomorphologiques et contextuels.

Tout d'abord, la crête doit être considérée dans la zone qui l'entoure (cf. infra 3.2). La convexité et la pente de part et d'autre d'une crête déterminent si la crête est saillante ou plutôt arrondie. Ensuite, elle doit être qualifiée par comparaison avec les autres crêtes. Ainsi, l'indicateur de parallélisme tel qu'il a été défini par [Riazanoff, 89] peut compléter l'information structurelle apportée par les formes concaves (thalwegs). En effet, l'indice de parallélisme peut fournir une information discriminatoire entre des régions accidentées. Notre zone test, par exemple, montre de longues crêtes parallèles qui contribuent à caractériser les contreforts du Vercors par opposition au Vivarais. D'autre part, en zone de plaine, il existe beaucoup de brins isolés qui sont parfois particulièrement longs et importants parce qu'ils marquent des accidents du terrain. Or, la méthode de classification géométrique que nous proposons ne leur attribue qu'une faible valeur (1 ou 2). La détermination d'intervalles permet d'affecter un poids entier à chaque intervalle de longueur et un brin long reçoit par ce biais un ordre plus élevé.

De même que pour les thalwegs, il faudrait faire intervenir la topographie par la prise en compte de critères sémantiques, comme l'ordre hiérarchique des thalwegs voisins ou l'importance typologique des sommets par lesquels ces crêtes passent. Les mêmes problèmes apparaissent en ce qui concerne l'appariement de points cotés situés en des sommets (ou tête, cime, but, bec, mont…) ou des cols et assimilés (pas, brèche…) extraits d'une base de données géographiques avec le réseau de crêtes extrait automatiquement.

L'information cartographique qui aiderait à compléter la sélection des crêtes peut prendre plusieurs formes :

- <u>les crêtes nommées</u> : crête, montagne, arête, côte, serre, corniche, roche, rocher, roc… forment une terminologie très diversifiée qui contibue à la dénomination des reliefs en saillie (cf. figure 7).
- <u>les figurés</u> : certaines arêtes saillantes sont soulignées à l'aide d'un figuré spécial (rochers de la Balme, montagnes des Chaux, cf. figure 7).
- <u>les formes spécifiques nommées</u> : les crêtes participent à la structure des formes particulières du terrain (cf. partie II) telles que le plateau, la combe, la gorge, le cirque, le vallon…
- <u>le tracé des chemins</u> : les sentiers de grande randonnée sont représentés à certaines échelles et selon le thème, ils suivent en montagne les lignes de faîte ; la présence d'un symbole par-

ticulier (cf. figure 7) tel qu'une station de sports d'hiver (Gresse-en-Vercors), une table d'orientation (Côte rouge), un refuge (à côté des rochers de la Balme)…

· les limites administratives (région, département, arrondissement, parc naturel tel que le parc régional du Vercors limité par un trait vert épais sur la figure 7) et politiques (état).

Tous les types de repères orographiques cités précédemment sont extraits de l'analyse d'une petite zone géographique, à savoir le Vercors. Pour d'autres types de relief, une autre typologie des formes particulières est à rechercher, ce qui complique davantage la prise en compte de l'information sémantique. Une taxonomie des types de relief et des formes caractéristiques qui les composent devient indispensable : type de relief, caractéristiques, typologie et représentation cartographique (cf. partie II).

2. 2.4. Interaction avec les thalwegs

Tous les éléments caractéristiques du terrain contribuent à servir de squelette à la surface terrestre ou numérique en indiquant ses changements significatifs (dans la plupart des cas seulement car on notera que, dans une vallée large et plate, il peut couler plusieurs cours d'eau sans qu'il y ait de crête démarquée). Le concept de réseaux entrelacés (*interlocking ridge and channel networks*) a aussi été observé et modélisé dans [Brändli, 95]. Ses travaux se focalisent sur la définition d'un modèle conceptuel (présenté dans la partie III) qui définit les relations topologiques et sémantiques entre les thalwegs et les crêtes. Appuyer le processus de délinéation sur un tel modèle doit élargir l'utilisation des résultats à divers domaines d'application. Par exemple, les thalwegs sont les éléments les plus importants en hydrologie, tandis que des sous-tâches du processus de généralisation cartographique se fondent plutôt sur la forme et l'importance des crêtes.

Par notre démarche établie sur la base d'une approche hydrologique pour l'extraction des thalwegs, nous avons extrait les lignes de crête en tant que sous-ensemble des limites de drainage (cf. partie III). L'interaction entre les crêtes et thalwegs a ensuite été mesurée à l'aide de la relation d'imbrication décomposée en un facteur d'entrelacement (proximité planimétrique) et un facteur d'encaissement (dénivelée entre point bas d'une crête et point haut d'un thalweg). Les liens ainsi déterminés doivent aussi être pris en compte de façon à ce qu'une crête et un thalweg en relation reçoivent une même valeur hiérarchique. Ainsi, la sélection de l'un aura lieu en fonction de l'autre, et vice-versa, ce qui permet de maintenir une cohérence topographique par l'imbrication des réseaux et donc la densité apparente.

3 Qualification des zones caractéristiques

Pour des raisons de facilité de la modélisation, nous avons considéré la crête comme une ligne. Cependant, la description d'un massif ancien de montagnes impose la recherche d'une surface de crête et non d'une ligne de crête. L'exemple est aussi flagrant pour la région des volcans d'Auvergne. Au niveau cartographique, la forme des courbes de niveau varie en bordure de crêtes entre les puys d'Auvergne (arrondie) et le Jura (cassante). De même, le thalweg est aussi représenté sur la carte dans son bassin versant. En fait, le dessin des courbes de niveau donne une largeur aux thalwegs et aux crêtes. Selon le type de relief, les courbes seront plus ou moins arrondies et les courbures marquant le passage d'un élément caractéristique seront plus ou moins importantes.

Les deux paragraphes qui composent ce chapitre sont consacrés successivement à la qualification des bassins versants fondée sur une étude hydrologique et une approche plus géomorphologique, et à la détection des zones de crêtes fondée sur la détection des contours d'une image des duretés.

3. 1. Caractérisation des bassins versants

Le bassin versant représente une unité fondamentale de la géomorphologie. C'est la région d'influence d'un thalweg. Nous avons extrait les bassins versants en tant que sous-produit naturel issu du traitement de la méthode de détection des thalwegs. Dans la modélisation de l'écoulement, chaque point du MNT possède des prédécesseurs et des successeurs. Un bassin versant est constitué de l'ensemble des points affluents d'un drain donné du réseau de thalwegs. Cet ensemble peut être calculé en mode discret (affectation de chaque point à un seul successeur, cf. figure 5.b) ou continu (calcul d'une fonction d'appartenance à un bassin versant).

Les études hydrologiques concernent principalement le bassin versant d'un cours d'eau fragmenté en fonction des sous-bassins de ses affluents de façon à préciser l'influence de chacun sur le cours d'eau principal. La définition topographique est rappelée dans [Le Roux, 93:28] : *une étendue de terrain limitée au bassin versant d'un cours d'eau est constituée par l'ensemble des terres, telles que les eaux tombées en n'importe quel point, ruissellent naturellement jusqu'à atteindre finalement le cours d'eau, soit de manière directe, soit par l'intermédiaire de l'un des affluents*.

A partir et en complément des paramètres classiques de qualification d'un bassin versant listés dans [Carvalho, 95] tels que la surface drainée jusqu'à l'exutoire, la longueur cumulée de tous les tronçons de réseau dans le bassin, la longueur du tronçon principal dans le bassin, l'ordre de Strahler pour le point exutoire, *etc.* les hydrologues mesurent d'autres variables caractéristiques du bilan hydrique. Ainsi, pour l'étude des crues, il est intéressant de définir la compacité et la densité de drainage des bassins versants (cf. partie III). En effet, la compacité reflète le temps de réponse d'un bassin : plus il est compact, plus la réponse est brusque du fait que tous les apports arrivent dans un intervalle de temps très court à l'exutoire. Les hydrologues dessinent couramment deux courbes représentatives de la topographie d'un bassin, la courbe hypsométrique et la courbe des fréquences altimétriques qui fournissent respectivement l'altitude moyenne et l'altitude la plus fréquente d'un bassin. Cependant, la détermination de tels paramètres calculés à partir d'un modèle numérique, si elle est nécessaire, ne suffit pas pour des études hydrologiques. En effet, une information topographique du lit du cours d'eau, c'est-à-dire un nivellement précis faisant apparaître les cotes de fond de chaque rive et d'autres lieux stratégiques, est également essentielle [Le Roux, 93].

Alors que des études hydrologiques recherchent une caractérisation d'un bassin versant principal en fonction de ses sous-bassins secondaires, nous avons testé des indicateurs à nature géomorphologique (et hydrologique pour certains) sur tous les bassins détectés pris individuellement. Les méthodes de calcul sont définies dans le rapport de stage de [Delasnerie, 96] et rappelées dans la partie III, à savoir la taille des bassins versants, la médiane des pentes et des duretés, la compacité. Etant donnée la confusion d'une image des bassins versants (cf. figure 5.b), nous avons opté pour une fusion / classification des résultats selon les critères qui ont été explicités dans la partie III. L'analyse visuelle des images obtenues montre, pour chacun des critères énoncés :

- taille des bassins (cf. figure 10.a) : la délinéation des plus grands bassins est favorisée par l'agglomération des plus petits (classe la plus élevée). Ainsi, se démarque une série de trois sous-bassins extraits successivement de la Lyonne, l'Isère et le Rhône (classe 1).

Néanmoins, aucune conclusion d'ordre géomorphologique ne peut être tirée de cette image des tailles car sont ici calculées les tailles de tous les sous-bassins déterminés à partir de la globalité de la région test. Il aurait fallu, tout d'abord, extraire les bassins principaux et en déduire une partition de chaque bassin principal en sous-bassins secondaires afin de créer des zones hydrologiques qui soient comparables et reconstituer ainsi la topologie naturelle qui existe entre les bassins. Les autres indicateurs sont exploitables car le bassin versant représente malgré tout une unité élémentaire à nature hydrologique qu'il est intéressant de qualifier.

- indice de compacité (cf. figure 10.b) : l'indice de compacité prend une valeur faible lorsque le bassin versant est allongé et très découpé, et une valeur forte lorsque le bassin présente une forme arrondie aux frontières lisses. L'image met en valeur les bassins versants qui ont un temps de réponse très long. Notamment, elle permet de suivre visuellement le chemin de drainage des cours d'eau principaux (indice plus adapté que celui des tailles). Ainsi, Le Rhône, l'Isère et la Drôme peuvent être repérés sur toute leur longueur. A l'ouest du Rhône, se trouvent les bassins du Doux et du Duzon ; au nord de l'Isère, l'Herbasse et la Savasse ; au sud de l'Isère, la Lyonne ; à l'est du Rhône, apparemment le Barberolle [1] ; au sud de la Drôme, la Grenette. Nous remarquons que ces bassins sont cartographiquement importants (ils sont représentés au 1:250 000). L'indice de compacité fournit, par conséquent, une information non négligeable.
- médiane des pentes (cf. figure 10.c) : les valeurs de classe croissent dans le même sens que la pente. L'étude de la pente d'un bassin versant permet de déterminer la régularité du cours d'eau qui y coule (fictif ou réel). De notre région se détachent le bassin de Lyonne et la suite des sous-bassins de l'Isère, ceux qui sont situés en zone de plaine juste en amont de sa confluence avec le Rhône. La Drôme est moins régulière car la suite de ses sous-bassins du Rhône vers le Diois change de classe (la pente croît jusqu'à la classe 4).
- médiane des duretés (cf. figure 10.d) : plus la classe est élevée, plus le bassin versant est encaissé, haut et profond. L'image est intéressante dans le sens où elle montre une différence flagrante entre la zone de collines aux bassins larges et très peu profonds (au nord et au sud, classe 2), la zone de montagne régulière qui s'élève progressivement (à l'ouest, classes 2 à 4) et la zone plus haute et chaotique aux petits bassins très encaissés (à l'est).

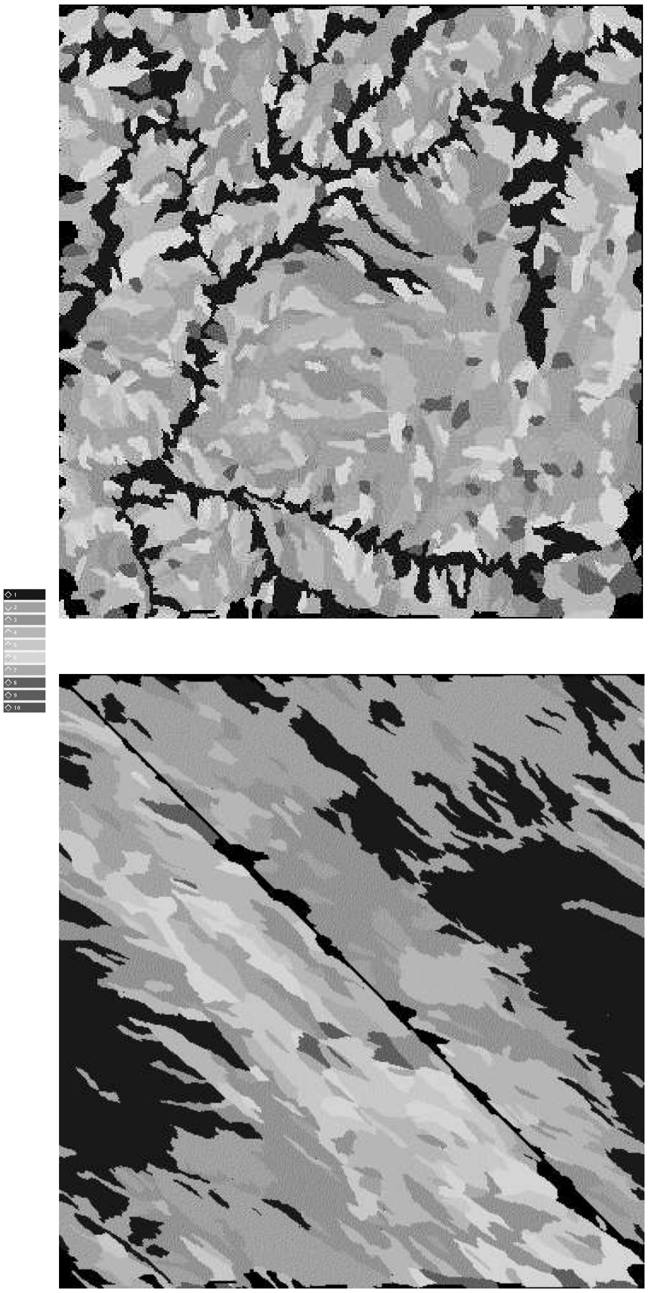
De cette étude des bassins versants, nous retenons deux indicateurs fondamentaux. D'une part, la médiane de la dureté fournit une information de nature géomorphologique sur le degré (relatif à la

---

[1] A cet endroit, se trouve la ville de Valence et les représentations cartographiques ne permettent pas de distinguer nettement les différentes rivières qui la traversent.

région) d’encaissement des bassins versants et la compacité met en valeur les principaux bassins versants (qui devront être préservés sur une carte).

Figure 48 : Cartes des bassins versants qualifiés par des indicateurs géomorphologiques.



a : Taille des bassins versants.

c : Médiane de la pente.

d : Médiane de la dureté.

3. 2. Détection des zones de crête

La visualisation de l’image des duretés fait apparaître des formes géomorphologiques dont l’extraction se prête apparemment à un traitement du type analyse d’image. En effet, l’image des duretés comporte des variations d’intensité qui représentent des changements de propriétés physiques. Ces zones de variation sont des informations essentielles puisque leur visualisation laisse à penser qu'elles constituent les frontières de formes orographiques (cf. figure 12).

Figure 49 : Représentation de l'image des duretés par lignes d'isovaleur (équidistance : 450).

Il existe trois méthodes principales empruntées à l'analyse d'image et présentées dans [Cocquerez et Philipp, 95] qui permettraient de détecter ces frontières :

- les approches dérivatives, qui assimilent les contours aux points de fort gradient ou de dérivée seconde nulle ;
- les approches surfaciques, qui modélisent la transition entre deux régions par un gabarit utilisable de deux manières :
  - lorsque sa mise en correspondance avec une zone de l'image est bonne, un contour est présent ;

  - l’approximation par facettes de la surface fournit une équation analytique locale qui permet de localiser précisément le contour.
- les approches morphologiques, qui travaillent sur les maxima et minima des intensités du voisinage de chaque point.

Nous présentons ici deux techniques de la méthode dérivative facilement implantables. La première consiste à calculer les gradients de l’image et à créer une image des normes des gradients. Ensuite, pour chaque point de l’image des normes, on extrait les maxima locaux et on seuille par hystérésis[1] de façon à éliminer les transitions de faible gradient pouvant être dues au bruit. Un exemple d’opérateur dérivatif du second ordre est la convolution de l’image avec un masque de Prewitt ($c = 1$) ou de Sobel ($c = 2$) [Cocquerez et Philipp, 95]. En reprenant, les notations de la partie III, les dérivées directionnelles s’expriment sous la forme :

$$\left(\frac{\delta z}{\delta x}\right)_{i,j} = h_j * z_{i,j} \quad \text{et} \quad \left(\frac{\delta z}{\delta y}\right)_{i,j} = h_i * z_{i,j}$$

$$\text{avec : } h_j = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ c & 0 & -c \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad h_i = \begin{bmatrix} 1 & c & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -c & -1 \end{bmatrix}$$

La deuxième technique utilise un opérateur dérivatif du deuxième ordre et localise les contours en repérant les passages par zéro du Laplacien, dont une approximation discrète simple correspond au masque :

$$I_4 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

Ces filtres devraient trouver les changements de pente dans les valeurs d’attribut attaché à chaque position d’une image des duretés. Ces changements ont lieu au niveau des lignes de discontinuité. Les filtres de Sobel sont aussi capables de détecter la direction de ces lignes tandis que le filtre de Laplace n’est pas sensible aux directions. Pour une pente nulle ou constante, le laplacien est nul et prend des valeurs négatives ou positives lorsqu’il est centré sur une discontinuité [Molenaar, 95].

Une approche par un simple seuillage des valeurs dépend de l’homogénéité de la zone. Ainsi, appliqué sur notre région test, un simple seuillage par intervalles de valeurs ne permet de distinguer que les lieux de forte discontinuité situés dans la zone de relief accidentée. Cependant, la superposition de la régionalisation obtenue par segmentation du MNT initial et de la carte des duretés permet de déterminer un seuil différent pour chaque zone et montre qu’une détection des contours plus pointue n’est pas insensée. Les exemples de la figure 13 sont extraits de notre zone test. Chaque imagette est décrite par l’intervalle des valeurs de dureté et par le seuil appliqué. Ici, le seuillage a été effectué par répartition des valeurs telle que :

si valeur < (max - min) / seuil, alors valeur = min (classe 1)

si valeur ≥ (max - min) / seuil, alors valeur = max (classe 2)

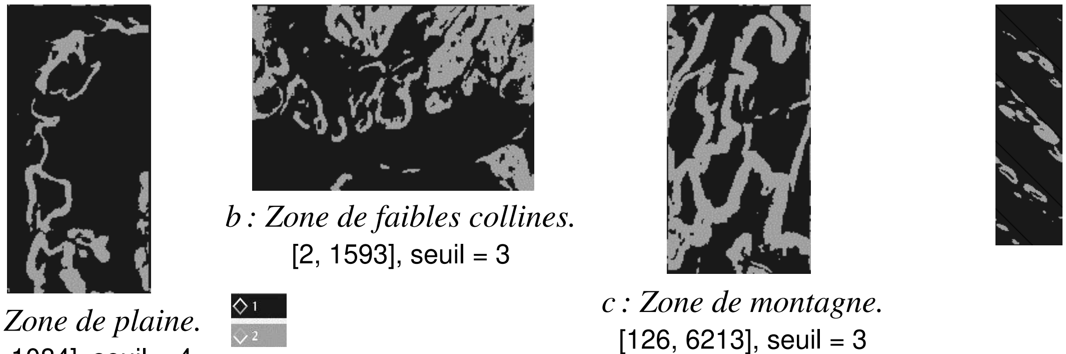
L’imagette 13.a est un extrait d’une zone de plaine (cadre en bas à gauche superposé à la figure 12) qui fait apparaître un alignement courbe de petits accidents du terrain. Si l’opération de généralisation élimine certains accidents, il faudra tout de même préserver cette tendance. L’imagette

---

[1] On détermine deux valeurs de seuil sh > sb. On conserve les maxima locaux dont la valeur est supérieure à sh, et ceux dont la valeur est supérieure à sb et qui appartiennent à une composante connexe comprenant au moins une valeur supérieure à sh.

13.b correspond à une zone de basses collines très arrondies encadrées de vallées relativement larges (cadre situé en haut de la figure 12). Les zones de classe 2 paraissent plutôt arrondies, notamment, une forme plus visible sur l'image des isolignes qui se trouve à la confluence de deux vallées. L'imagette 13.c fait ressortir les zones de crête les plus hautes de la région montagneuse (cadre en bas à droite de la figure 12). Ce dessin formé par les zones les plus saillantes est typique et peut être très facilement localisé sur une carte topographique de la région. Enfin, l'imagette 13.d est dérivée de l'autre région, celle des volcans d'Auvergne (cf. partie III, figure 24). Elle met en valeur l'alignement des monts Dôme ainsi que la forme particulière et la profondeur de certains cratères (le plus grand au centre droit, est le puy de Dôme).

Figure 50 : Premier essai de détection des zones de crête à partir de l'image des duretés.



b : Zone de faibles collines.
[2, 1593], seuil = 3

a : Zone de plaine.
[3, 1084], seuil = 4

c : Zone de montagne.
[126, 6213], seuil = 3

Une analyse de la surface des duretés par détection de contours devraient mettre en valeur des alignements typiques de formes géomorphologiques et des formes particulières du terrain (principalement les formes rondes) par la détection des zones de crête. Appliquée à partir de la surface des duretés extraite d'une surface altimétrique généralisée, elle devrait permettre de contrôler (au moins visuellement) le maintien des alignements remarquables et des formes typiques. Une fois les zones de crête détectées, l'application d'estimateurs géomorphométriques (cf. partie III) permettra de les qualifier comme cela a été fait pour les bassins versants.

4 Caractérisation surfacique

La caractérisation du MNT lui-même revient à qualifier chaque zone de la segmentation en fonction du type de terrain. On dispose de zones avec un ensemble de mesures sur lesquelles s'appuyer, qui rendent compte d'une certaine manière de la réalité géomorphologique. Au-delà, certaines formes locales peuvent être analysées. Par exemple, la circularité des courbes de niveau caractérise des formes de puys. Ou bien une organisation des bassins versants en grandes vallées parallèles et allongées, avec certaines conditions de pente et d'altitude, caractérisent certains plissements jeunes. Enfin, dans l'optique de la représentation graphique, cette connaissance permet de déterminer ce qui doit être préservé et communiqué, comme par exemple, les saillies sur des terrains plats (accidents du terrain).

Nous proposons dans les paragraphes qui suivent des méthodes de caractérisation des trois surfaces continues restantes, la surface des bassins versants et celle des duretés ayant été analysées dans le chapitre 3. Dans le paragraphe 4.1, nous proposons des méthodes de détection des exceptions de façon à achever la segmentation de la surface en zones topographiques. Le paragraphe 4.2 traite la surface des pentes en lui associant la mesure de l'exposition. Enfin, le paragraphe 4.3 aborde successivement la théorie des fractales, en tant qu'outil pour la détermination d'un descripteur du terrain, et l'analyse par les ondelettes, en tant que descripteur de la régularité et localisateur des fortes discontinuités.

4. 1. Etude de la surface segmentée

Nous disposons, en premier lieu, d'une image construite par une classification de haut niveau : au lieu d'une élaboration à partir de la seule analyse des points du MNT initial, la méthode a pris en compte des informations géomorphologiques contenues d'une manière implicite dans les données, à savoir les champs pente et dureté, et les réseaux imbriqués de crêtes et thalwegs.

Dans un but de généralisation cartographique, l'analyse numérique du terrain permet, entre autres, d'obtenir une partition du MNT initial en zones topographiques à qualifier de façon à adopter des opérateurs et des paramètres adaptés. Pour cela, on aimerait obtenir une partition telle que la lisibilité soit plus importante que l'exactitude dans le sens où la carte chromatique associée à la classification résultante montre des régions larges (de l'ordre du méso-relief ou du macro-relief) et représentatives d'une tendance topographique du relief, l'erreur de classification d'un ou de plusieurs points n'étant que secondaire (cf. partie III).

La phase préalable de segmentation a ainsi mis en valeur les plaines, les montagnes, les zones de transition. A la lumière des résultats que nous avons obtenus, une analyse contextuelle devrait permettre de répondre aux questions suivantes :

- Existe-t-il des reliefs marqués dans la plaine ?
- Existe-t-il des plateaux dans la montagne ? Existe-t-il des vallées larges et encaissées ?
- Les zones de transition sont-elles comprises dans une zone de plaine ? dans une zone de montagne ? dans ce cas, il s'agit de variations ou d'exceptions et non de transition géographique.

La localisation des cellules, les relations d'adjacence et les attributs devraient apporter une information à prendre en compte pour répondre à ces questions. La méthode repose sur des analyses d'inclusion, de proximité, de taille et de forme. A partir de la carte finale fusionnée, l'identification des exceptions se fait par calcul d'inclusion et de rapport de taille. De même, une cellule isolée située dans une zone de plaine ou de montagne et classée *zone de transition* doit être considérée comme une variation et non comme une zone de transition géographique. Chaque cellule doit ensuite porter l'attribut qui la qualifie.

Par exemple, la carte chromatique déduite de la région test (Valence dans la Drôme) s'interprète de la manière suivante :

- classe 1 : plaine alluviale ;

· classe 2 : transition entre plaine et colline ; accidents du terrain en zone de plaine (saillies ou échancrures plus profondes) ; embouchures[1] de vallées larges ;

· classe 3 : zone de transition entre plaine et montagne ; zone de collines ; accidents du terrain en zone de montagne ;

· classe 4 : montagne ;

· classe 5 : montagne accidentée.

Plus précisément, et quelle que soit la région, la segmentation permet d'affirmer qu'une zone de classe élevée présente une texture plus rugueuse qu'une zone de classe moins élevée. Mais la qualification dépend de la région. Ainsi, l'interprétation de la classification effectuée à partir de l'autre région (les volcans d'Auvergne) donne :

· classe 1 : bas plateau ;

· classe 2 : zone accidentée ;

· classe 3 : zone de transition entre colline et volcans ; haut plateau ;

· classe 4 : volcans peu élevés; zone de transition entre plateau et volcan ;

· classe 5 : volcans élevés ; volcans striés de gorges.

Une méthode de classification relative telle que la nôtre ne permet pas d'aboutir à l'association d'un type de relief par classe. Par ailleurs, à notre connaissance, aucun travail ne propose de piste pour une classification absolue du terrain. L'intervention d'un opérateur humain demeure toujours nécessaire afin de qualifier chacune des classes de la région traitée en fonction des types de relief présents et de contrôler la phase de détection des accidents du terrain.

L'intérêt des exceptions est particulièrement puissant dans le domaine de la généralisation puisqu'il faudra accentuer, ou tout du moins ne pas éliminer, les caractères exceptionnels d'un paysage géographique. Ce sont tout particulièrement les zones de transition qui doivent être plus finement qualifiées. D'une manière générale, si une petite zone (une cellule) d'une classe quelconque est située dans une zone plus grande d'une autre classe, si ce n'est pas un bruit, elle indique inévitablement un accident du terrain.

Sur l'exemple de la figure 14, la région des volcans d'Auvergne présente une grande zone de classe 4 qui couvre les monts Dôme. Cette zone contient au nord une cellule de classe 5 qui est en réalité centrée sur le puy de Dôme, plus haut et moins lisse que les autres puys. Il s'agit là d'une exception. De même, une zone de classe 5 couvre les monts Dore, elle-même entourée d'une zone de classe 4. Au nord de la zone de classe 5, se trouve une cellule de classe 3 qui correspond, sur le terrain, au puy Mary situé sur un plat de faible emprise et entouré de puys élevés. C'est aussi une exception. Par contre, la cellule de classe 5 qui se trouve à gauche de la cellule centrée sur le puy Mary est un bruit et peut être absorbée.

L'analyse contextuelle nous permet de trouver les petites zones isolées qui sont soit des accidents du terrain, soit du bruit. Il manque une information sémantique et une caractérisation statistique des zones de grande étendue qui fourniraient le type de relief dans lequel se trouvent les accidents du terrain ou le bruit. La sémantique doit être, en partie, définie par un opérateur humain (attribu-

---

[1] On utilise ici le terme *embouchure* dans le sens d'une ouverture vers l'extérieur : embouchure des cours d'eau vers la plaine.

tion d'un type de relief). L'analyse statistique d'une zone isolée détermine s'il s'agit de bruit ou non. Dans le cas de bruit, l'opération d'absorption peut être appliquée (cf. partie III). Dans le cas d'un accident du terrain, la zone doit être préservée.

Dans ce but, une détection des petites zones par un filtrage fréquentiel paraît la plus appropriée. Chaque zone est constituée de cellules de Voronoï. Dans le cas d'un champ continu, la valeur d'attribut est portée par chaque position. Ni la forme des cellules, ni leur relation d'adjacence ne sont explicites. Le passage à une représentation sous la forme d'objets permet de rendre explicite la forme, la position et plusieurs caractéristiques non géométriques pour chaque cellule (la valeur de la classe, l'appartenance à une meso-zone homogène, des mesures géomorphologiques individuelles, le type de relief…) [Molenaar, 95].

Pour chaque zone constituée d'une seule cellule (qui n'appartient pas à une autre zone), la première étape consiste à dresser la liste des cellules adjacentes et le nombre d'occurrences de chaque classe. Deux cas de figure peuvent se présenter :

- soit la cellule isolée est entourée de cellules de classe identique ;
- soit la cellule isolée est entourée de cellules de classes différentes.

Dans le premier cas, la suppression se fera par modification de la classe de la cellule isolée (opération d'absorption). Dans le deuxième cas, la classe de la cellule isolée peut prendre la valeur de la classe dont la fréquence est maximale (absorption). Si toutes les fréquences sont égales, une solution est de repasser à une représentation par un champ continu et d'appliquer un opérateur de destruction / partage. Mais, si la gestion de la suppression est aisée en mode vecteur, l'introduction des limites nécessaires pour la prise en compte des possibilités de destruction / partage est plus délicate [Le Men, 96a:238].

Afin de déterminer si une cellule est un accident du terrain, une méthode est d'étudier la cellule isolée dans son voisinage. On appelle *entourage* la zone constituée de la cellule isolée et de l'ensemble de ses cellules adjacentes. Pour chaque entourage, on calcule l'écart type σ_1 d'un indicateur géomorphologique (la médiane de la pente, par exemple, car il s'agit d'un indicateur déterminant). Puis, on le compare à l'écart type σ_2 de l'entourage sans la valeur d'indicateur de la cellule isolée. Si la différence $\sigma_1 - \sigma_2$ est supérieure à un seuil donné, alors la cellule isolée correspond à un accident du terrain et doit être maintenue. Dans le cas contraire, la cellule isolée peut être supprimée. La détermination du seuil peut s'établir à partir du calcul de l'écart type sur toute la région plaine ou montagne (subdivision effectuée lors de la première segmentation par l'indicateur global IG2, cf. partie III).

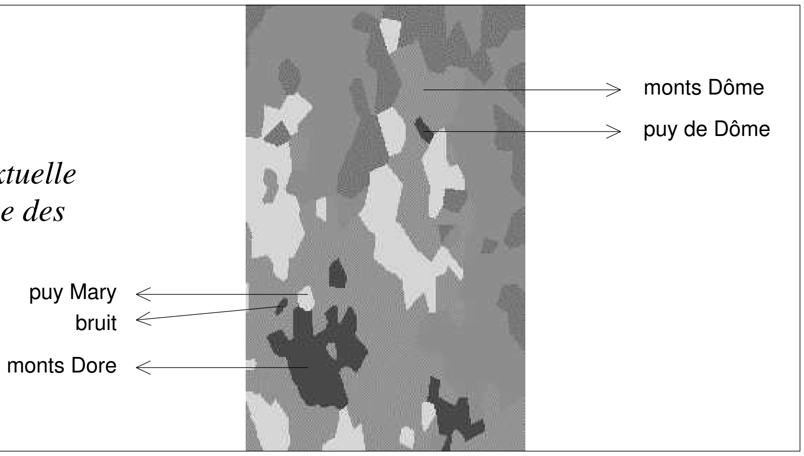


Figure 51 : Exemple d'étude contextuelle et sémantique sur la zone des volcans d'Auvergne.

La caractérisation des zones topographiques d'un MNT segmenté reste un problème ouvert en ce qui concerne leur qualification par l'attribution d'un type particulier de relief. Par contre, nous avons proposé une méthode de discrimination des accidents du terrain face au bruit qui n'a pas été expérimentée.

4. 2. Etude surfacique des pentes

Nous avons présenté une analyse des méthodes de calcul de l'une des composantes de la pente dans la partie III. D'autres études axées principalement sur les calculs de pente et de mesures dérivées ont montré que, pris individuellement, de tels paramètres permettent d'apporter une information pertinente. Comme nous l'avons vu, la pente au sens large du terme se décrit par deux composantes : gradient et exposition, que nous avons calculées en chaque point de la surface altimétrique dans une fenêtre glissante 3×3. Le gradient indique un changement moyen des altitudes le long des directions x et y tandis que l'exposition détermine la direction azimutale dans laquelle la surface est orientée en chaque point.

Les travaux de [Rost, 87] établissent un calcul plus précis de l'exposition que celui que nous avons juste évoqué. En reprenant nos notations (cf. partie III), gradient et exposition se définissent d'une manière générale par :

$$\|\overrightarrow{\text{grad}}\ z\| = \sqrt{\beta_1^2 + \beta_2^2} \quad \text{: norme du gradient}$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{\beta_2}{\beta_1}\right) \quad \text{: exposition}$$

Etant donné que la fonction arctangente varie dans l'intervalle $[-\pi/2, +\pi/2]$, une correction doit être appliquée pour chaque quadrant trigonométrique :

$$\text{si } \beta_1 > 0 \text{ et } \beta_2 < 0 : \theta \leftarrow \theta + \frac{\pi}{2}$$

$$\text{si } \beta_1 > 0 \text{ et } \beta_2 > 0 : \theta \leftarrow \theta + \pi$$

$$\text{si } \beta_1 < 0 \text{ et } \beta_2 > 0 : \theta \leftarrow \theta + \frac{3\pi}{2}$$

[Rost, 87] définit un autre indicateur : la longueur de la pente est la distance euclidienne du point central de la cellule centrale de la fenêtre mobile au point central de la cellule voisine qui se trouve le plus proche possible de la direction ascendante de la pente.

Ainsi, quatre attributs (altitude, gradient, exposition, longueur) qualifient les pixels de l'image. Par l'application d'opérations booléennes, comme unions ou intersections, on aboutit à des conclusions intéressantes pour des applications variées (ingénierie, militaire…). Par exemple, ce système de paramètres peut être utilisé lors de la planification de la construction des routes. Ainsi, si la loi impose un maximum sur la pente des routes, il est possible d'ôter des résultats tous les sites présentant une pente supérieure. De plus, les sites orientés vers le nord sont souvent évités dans les pays nordiques parce qu'ils sont exposés à la rigueur du climat et gardent plus longtemps neige et glace. L'ajout d'une information auxiliaire comme la couverture végétale ou le type de sol permet de caractériser plus finement les sites sélectionnés.

La qualification de la pente est importante pour une application en cartographie. En effet, il existe une interaction d'une part entre le terrain et le réseau routier, qui sera reprise dans la partie V et, d'autre part, entre le terrain et le réseau hydrographique qui a été explicitée dans le paragraphe 2.1.2 (et qui doit aussi apparaître sur la carte).

4. 3. Etude surfacique de l'altimétrie

Dans ce paragraphe, nous passons en revue deux théories relativement récentes : la théorie des fractales et l'analyse par les ondelettes. La rareté[1] des travaux applicatifs en généralisation cartographique ne nous permet pas de conclure vraiment sur leur adaptabilité ; ils fournissent cependant des outils qui devraient être efficaces pour mesurer la complexité du terrain.

4. 3.1. Les fractales

Une théorie s'est développée ces vingt dernières années fondée sur la ressemblance texturale entre les courbes de niveau et les profils du terrain allant d'une courbe à l'autre. Il s'agit de la géométrie fractale inventée par Benoît Mandelbrot et adaptée ensuite aux éléments naturels tels que les zones de lacs et d'îles, le relief [Mandelbrot, 83] et les traits de côte (Richardson, 1961).

We ought not... to believe that the banks of the ocean are really deformed, because they have not the form of a regular bulwark; nor that the mountains are out of shape, because they are not exact pyramids or cones [Mandelbrot, 83:6].

On estime qu'une dimension fractale approchant la valeur trois indique une surface très complexe et rugueuse tandis qu'une surface simple et presque planaire a une dimension fractale proche de deux. Clairement, la mesure de la dimension fractale sur une grande région présentant des reliefs disparates ne donnera pas la même valeur que si elle est mesurée sur des sous-parties homogènes. Il paraît donc intéressant d'utiliser cet outil mathématique pour caractériser la complexité de par-

---

[1] La grande majorité de ces travaux concernent l'étude des objets géographiques linéaires (hydrographie, trait de côte, routier).

ties homogènes issues d'une segmentation. Des travaux ont notamment eu lieu sur la caractérisation des formes géographiques linéaires, qui concluent à une adéquation plus forte pour traiter l'hydrographie et le trait de côte plutôt que le réseau routier [Plazanet, 96]. Cependant, ces pistes restent à creuser.

La propriété fondamentale de la théorie des fractales est l'auto-similitude, dont une définition imagée consiste à dire qu'une fractale est une forme faite de sous-parties de forme identique au tout.

Propriété. Un objet présente la propriété d'auto-similitude lorsqu'il est invariant par une similitude, c'est-à-dire lorsque chacune de ses parties est semblable à son ensemble.

Quatre contextes permettent de définir les fractales : déterministe ou stochastique, auto-similaire ou auto-affine. Les fractales déterministes peuvent être définies par une fonction mathématique, appliquée récursivement sur toute une gamme d'échelles. Le résultat est un objet géométrique qui contient des copies de lui-même à plus petite échelle. Si ces copies sont identiques par échelonnage isotropique et rotation, la fractale est auto-similaire. Si le processus de réduction d'échelle est lui-même anisotropique mais linéaire, la fractale est auto-affine [Wood, 96].

En ce qui concerne le terrain, cette invariance n'est jamais exacte mais elle est souvent stochastique. Comme nous l'avons précisé précédemment, la dimension fractale, notée D, varie continûment de 2.0 pour une surface plane vers 3.0 pour des surfaces de plus en plus accidentées. D'une manière générale, un objet fractal constitué de p copies de lui-même q fois plus petites que lui a pour dimension fractale :

$$D = \frac{\ln(p)}{\ln(q)}$$

Le terrain n'étant que stochastiquement auto-similaire, sa dimension fractale se calcule difficilement. Diverses méthodes sont proposées dans la littérature. Il a été suggéré, par exemple, qu'une véritable surface fractale de dimension D contiendra des profils de dimension D-1. Ces profils peuvent être pris sur le plan horizontal, et il s'agit alors de fourchettes d'altitudes, ou par coupe verticale [Wood, 96]. [Polidori, 91], quant à lui, propose de l'estimer à partir de celle d'un modèle numérique de terrain utilisant deux approches : l'une de type topologique, l'autre dit du *mouvement brownien fractionnaire*. La plupart des travaux appliqués à la caractérisation géomorphologique des paysages et à la synthèse de scènes tridimensionnelles se sont appuyés sur une modélisation du terrain par la seconde approche. Si l'on appelle $z(x, y)$ la surface, il existe une relation entre la distance horizontale et la variation des altitudes attendue sur cette distance donnée par l'expression :

$$E[\,|\,z(x+\Delta x, y+\Delta y) - z(x, y)\,|\,] = \sigma.\sqrt{2/\pi}.\sqrt{\Delta x^{2H} + \Delta y^{2H}}$$

où σ, facteur d'échelle verticale lié à la pente locale, et H, indicateur de la complexité de la surface, sont deux constantes pour un paysage donné.

La représentation du terrain par une surface fractale paraît inutilisable, ou plutôt très difficile à traiter, d'autant plus que le terrain naturel ne suit pas directement la propriété d'auto-similitude. Au demeurant, des auteurs tels que [Polidori et Chorowicz, 93] ont mis en évidence qu'il était plus aisé de travailler à partir d'un modèle numérique de terrain à maille régulière pour calculer sa dimension fractale que de partir d'un échantillon irrégulier de données brutes.

Cependant, la question de savoir si la topographie est effectivement fractale demeure. L'approximation d'une surface topographique à l'aide de fractales ne fournit un descripteur de caractérisation du terrain que pour quelques types de paysage, descripteur qui doit être complété par d'autres indices tels que l'amplitude [Klinkenberg et Goodchild, 88]. Le résultat des nombreux calculs empiriques menés pour différentes régions montre qu'une dimension fractale isolée n'est pas une mesure complète. Cet outil permet de distinguer des topographies très contrastées mais sa mesure elle-même dépend de la procédure utilisée pour la calculer et de l'échelle.

[Wood, 96] constate alors que, puisque les processus géomorphiques varient avec l'échelle, le modelé de la surface produit par de tels procédés en fait autant. La topographie est fractale au mieux dans un intervalle d'échelle limité. Il conclut :

- l'échelle à laquelle la surface est modélisée et analysée détermine en partie la caractérisation ;
- l'absence d'indépendance par rapport à l'échelle est un diagnostic utile à travers les changements systématiques de comportement fractal ou en tant qu'échelle caractéristique de changement (les échelles auxquelles D change représentent le changement de prédominance d'un processus géomorphique sur un autre).

La dimension fractale est une valeur calculée pouvant servir de mesure de la complexité du terrain et pouvant ainsi entrer en jeu dans la caractérisation, si elle est couplée à d'autres indicateurs. A la lumière des travaux de [Klinkenberg et Goodchild, 88], le problème majeur réside dans son inadéquation à discriminer tous les types de terrain et dans la pluralité des méthodes envisageables. Cependant, la détermination de la signature géométrique montre les mêmes particularités (non unicité de ses composantes et des méthodes d'approximation). Nous pensons que, dans un cadre bien défini, la théorie des fractales fournit un outil qu'il serait intéressant d'exploiter.

4. 3.2. Les ondelettes

Dans le cadre des changements de systèmes de représentation, l'idée d'analyse spectrale d'une image se calque sur les travaux entrepris actuellement dans le domaine de la télédétection, comme, par exemple, l'étude du relief et de l'érosion sur la surface terrestre à très petite échelle [Raffy, 94a]. D'une manière générale, [Raffy, 94b:2359] définit la notion de modèle comme une fonction qui associe une valeur réelle à un ensemble de n paramètres mesurables. Les données caractérisent les paramètres distribués spatialement et mesurables par un ou plusieurs instruments à résolution locale ou globale. Une analogie apparaît alors avec la recherche de modèle de représentation du terrain si le nombre de paramètres étudiés se réduit à deux paramètres, *i.e.* les valeurs planimétriques x et y.

L'analyse et la synthèse par les ondelettes ont été proposées en 1983 par J. Morlet, procédé révolutionnaire qui permet de caractériser efficacement des signaux où se combinent des phénomènes d'échelles très différentes. A l'origine créée pour résoudre des problèmes posés par la sismique-réflexion, la transformation en ondelettes a été ensuite adaptée à l'analyse des images [Meyer *et al.*, 87].

La transformée en ondelettes est une décomposition spatiale par échelle d'un signal. L'intérêt d'une telle démarche repose sur sa capacité à repérer différentes textures dans une image et surtout à trouver où elles apparaissent, contrairement à une transformée de Fourier ou une analyse par variogrammes [Besnus *et al.*, 90]. Les ondelettes forment une famille de fonctions $\Psi_{a,b}$, décompositions les plus courtes et les plus élémentaires parmi l'ensemble des possibles. Il existe diverses familles correspondant à des décompositions différentes, ayant des propriétés et permettant des analyses différentes, la structure des calculs restant la même. La base de décomposition se définit par :

Définition. A partir d'une fonction de base Ψ, *appelée ondelette-mère, on construit une famille de fonctions élémentaires :*

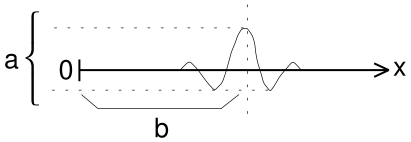
$$\Psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}}\Psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \text{ où } b \in \mathbb{R},\ a > 0.$$

A partir de l'ondelette-mère, les coefficients d'un signal f sont les nombres définis par :

$$C_f(a,b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\,\overline{\Psi_{a,b}}(x)\,dx.$$

L'indice a est un paramètre de *dilatation* ou de facteur d'échelle, et b un paramètre de *translation* ou de situation sur l'axe (cf. figure 15). Ainsi, pour reprendre l'analogie de [Meyer *et al.*, 87], il suffit de *jouer de l'accordéon* avec l'ondelette-mère pour obtenir la famille des ondelettes. En faisant varier a et b, l'ondelette permet de se focaliser sur un phénomène local du signal au voisinage du point considéré. Le coefficient d'ondelette du signal f, noté plus rapidement $C_{a,b}$, dépend donc de la forme de celui-ci au voisinage de la position b. Ainsi, le coefficient d'ondelette $C_{a,b}$ sera d'autant plus petit que la zone étudiée autour de b est régulière.

Figure 52 : Illustration d'une ondelette en chapeau mexicain.



Il existe divers types d'ondelettes, la plupart sont décrits dans [Gasquet et Witomski, 90]. L'ancêtre des ondelettes est l'*ondelette de Morlet* mais celle-ci ne fournit pas une famille orthogonale d'ondelettes (décomposition unique et ondelettes indépendantes). L'*ondelette de Haar* n'est pas idéale pour représenter une surface continue puisqu'elle n'est pas elle-même continue [Vidakovic et Müller, 91]. Une ondelette affine par morceaux n'est pas non plus adaptée du fait de son irrégularité. Une ondelette en forme de *chapeau mexicain* paraît plus conforme à fournir une modélisation du relief.

Des applications ont été proposées pour l'analyse des objets géographiques et, notamment, dans le domaine de la généralisation cartographique (cf. partie V).

Les travaux de certains spécialistes de la vision suggèrent que l'œil et le cerveau acquièrent l'information lumineuse sour forme de coefficients d'ondelettes [Meyer *et al.*, 87:34], ce qui expliquerait pourquoi on distingue nettement les contours dans une image. Ce sont tout particulièrement les coefficients de hautes fréquences qui permettent de détecter les zones significatives d'une image. Calculés à partir d'un MNT, ces coefficients seront très petits si la zone est règulière (en zone de petites collines), tandis qu'une discontinuité du terrain sera marquée par un coefficient très élevé (en zone très accidentée). L'analyse par les ondelettes contribue à localiser et caractériser les systèmes géologiques régulièrement répartis. Cependant, il n'est pas toujours aisé ni de sélectionner le type d'ondelettes, ni d'extraire l'information pertinente pour un objectif particulier, c'est-à-dire les fréquences les plus significatives pour le signal donné. De plus, dans le cadre de la généralisation cartographique, l'information aide au choix des traitements. Or, le rapprochement entre un coefficient d'ondelette et l'information qu'il représente est loin d'être apparent.

5 Conclusion

La caractérisation numérique du terrain peut suivre plusieurs chemins selon le but de l'application envisagée. Ainsi, deux types de critères se distinguent : des critères physiques, qui s'intéressent à la nature de la topographie en termes généraux (rugosité[1] du terrain) ; des critères spécifiques, qui sont donnés par des applications telles que l'hydrologie ou l'agriculture, et qui visent une qualification dans le domaine (caractérisation des bassins versants ou de la pente). L'objectif que nous visons est l'adaptation des opérations de généralisation cartographique aux différents types de relief. Pour cela, nous avons défini un modèle conceptuel d'enrichissement des des données initiales (éléments structurants et surfaces continues) par leur hiérarchisation contextuelle et leur qualification géomorphologique. Des pistes de recherche ont été proposées qui malheureusement n'ont pas pu être implantées dans le cadre de cette thèse.

L'information disponible se constitue de deux types de modèles : champs continus et réseaux structurés. Nous avons établi une démarche de caractérisation de l'information fondée sur ces deux représentations dissemblables mais complémentaires.

Dans un premier temps, nous nous sommes intéressés à la hiérarchisation des réseaux de crêtes et thalwegs, à leur imbrication et à la caractérisation de leurs zones d'influence, selon des critères géométriques et géomorphologiques. Ainsi, en première approche, la hiérarchisation des thalwegs doit refléter le principe de l'écoulement des eaux. Une comparaison avec le réseau hydrographique homologue apporte une information complémentaire sur l'importance relative des tronçons du réseau et sur leur qualification sémantique. De plus, la qualification géomorphologique des thalwegs permet entre autres de détecter les tracés anormaux. La zone d'influence d'un thalweg est le bassin versant et sa qualification géomorphologique apporte une information sur son encaissement. L'étude de la compacité des bassins permet de distinguer les plus importants, cartographiquement parlant.

De même, nous avons proposé une méthode de hiérarchisation géométrique des crêtes qui doit être améliorée par la considération de facteurs géomorphologiques locaux et contextuels (convexité, parallélisme). Une information sémantique aide aussi à la qualification des crêtes. La vraie nature de la crête peut être dévoilée à partir de la surface des duretés à l'aide d'une détection des zones de discontinuité, qui met notamment en valeur des formes et des alignements géomorphologiques particuliers.

Dans un deuxième temps, la caractérisation surfacique s'attache à donner une méthode de détection des accidents du terrain, dont l'intérêt est aussi puissant, dans le domaine de la généralisation cartographique, que la hiérarchisation des éléments structurants. D'autre part, nous avons vu que la qualification des pentes était utile pour assurer une interaction cohérente entre le relief et les

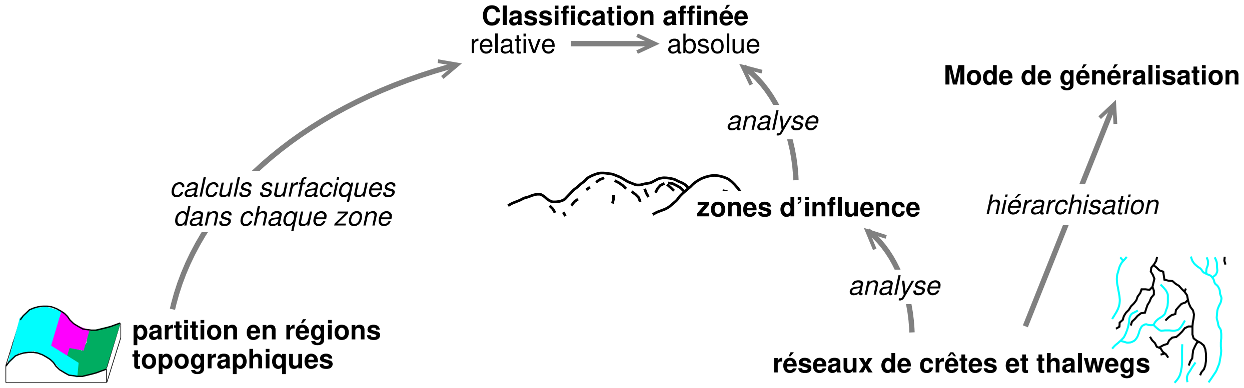
---

[1] La rugosité est ici employée au sens général du terme : plus la surface terrestre est accidentée, plus elle est rugueuse.

autres couches d'information géographique. Enfin, nous avons présenté deux théories relativement récentes, à savoir la théorie des fractales et l'analyse des ondelettes, dont l'application à la caractérisation du relief mériterait d'être approfondie.

La phase de caractérisation est fondée sur l'extraction préalable d'une information surfacique. Or, les calculs surfaciques doivent également avoir lieu après la caractérisation des zones. Le calcul d'estimateurs zone par zone, en fonction de l'information que l'on a extraite, doit permettre d'affiner progressivement la caractérisation, ce qui peut conduire à affiner la segmentation initiale. Des outils adaptés aux structures de représentation ont été décrits dans la partie III (relation d'imbrication, diagramme de Voronoï, champs continus, indicateurs géomorphométriques…). L'importance de l'utilisation combinée de plusieurs représentations aboutit à une première démarche de segmentation qui peut être complétée (cf. figure 16).

Figure 53 : Vers une segmentation plus fine.



Puy de la Gagère (Vercors).

V Une application : La généralisation

Les problèmes d'avenir de la cartographie automatique ne seront résolus, en donnant satisfaction aux auteurs, aux réalisateurs et aux utilisateurs, que dans la mesure où des règles et des principes auront codifié la généralisation sous ses multiples aspects. L'établissement de cette méthodologie sera une des tâches essentielles du cartographe de demain [Cuenin, 72].

Les cartographes considèrent la généralisation comme l'une des procédures de création cartographique à la fois la plus intellectuelle et la plus technique. Le développement de la cartographie numérique pose de nouveaux problèmes à résoudre qui demandent de nouvelles définitions, des modélisations et des techniques adaptées [McMaster et Shea, 92]. Les procédures manuelles et numériques diffèrent en effet sur plusieurs points. Nous avons évoqué dans la partie II, l'effort scientifique et le savoir-faire artistique exigés pour la conception d'une carte, quel qu'en soit le thème. Le cartographe traite les couches d'information séparément tout en conservant un souci d'harmonisation qui fournisse à la carte une apparence de tout indivisible. La nature du processus de sélection des objets à représenter et du choix des procédés de représentation donne une part de subjectivité à la représentation cartographique traditionnelle.

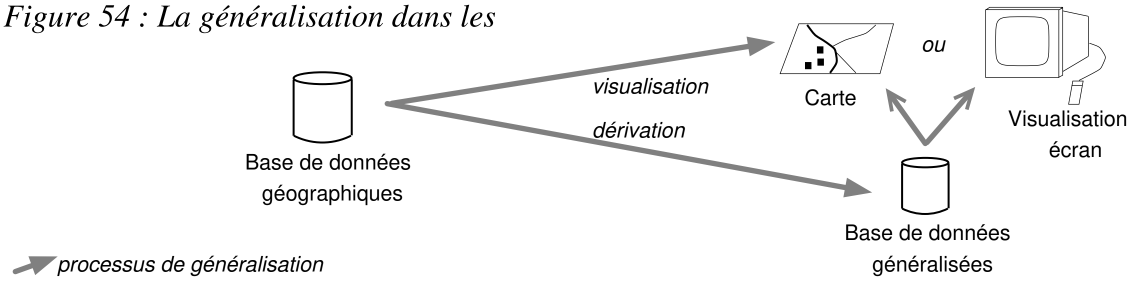
De même, l'opération de généralisation cartographique manuelle demande une grande quantité de travail, un choix subjectif des méthodes de généralisation et de leur degré d'application, une vue holiste dans la perception et l'exécution de la procédure. Par contre, une procédure de généralisation numérique s'efforce de libérer le cartographe des activités manuelles en les substituant à des manipulations conduites sur ordinateur. Elle vise une application cohérente de ces manipulations en suivant une séquence d'instructions (prédéterminée ou non). La logique du numérique est difficilement compatible avec la nature holiste et simultanée de la généralisation traditionnelle. En effet, l'exploitation des technologies existantes ne permet pas encore de percevoir la carte comme un tout et, par ailleurs, les systèmes informatiques actuels ne sont pas fondamentalement initialisables pour évaluer l'impact d'une décision de généralisation pour un élément cartographique sur les autres éléments [McMaster et Shea, 92]. La procédure de généralisation doit intégrer une exploitation intelligente de la compréhension des phénomènes géographiques de façon à créer une représentation cohérente avec la réalité physique. Le succès d'une telle procédure est, par conséquent, limité par l'implication de la connaissance dans le système qu'elle soit spécifique à une couche d'information (pour le relief, la géomorphologie) ou cartographique et géographique.

Cette partie vient en application des procédures de segmentation et de caractérisation analysées dans les parties III et IV de cette thèse. Dans un premier chapitre, nous redonnons les principes fondamentaux de généralisation manuelle et ce, dans le cas particulier du relief. Le chapitre 2 est consacré au passage de la généralisation du traditionnel vers le domaine numérique. Les problèmes rencontrés y sont évoqués. Etant donnée la complexité de la procédure, les premiers travaux se sont focalisés principalement sur les objets cartographiques linéaires et un grand nombre d'entre eux se sont plutôt intéressés à la généralisation du réseau routier. Le chapitre 3, sans être exhaustif, présente des essais antérieurs en matière de généralisation automatique du relief, notre démarche globale, des opérations de généralisation nécessaires et des pistes pour l'évaluation des résultats.

1 Principes de généralisation

La généralisation est entrée au cœur des SIG et est devenue un processus indispensable : lorsqu'un volume de données géographiques doit être réduit, lorsqu'une application thématique doit être produite, lorsqu'un changement d'échelle ou de résolution doit être opéré, ou lorsque différentes bases de données de résolution différente doivent être combinées, les principes de généralisation entrent en jeu. Deux applications fondamentales de généralisation sont la visualisation et la dérivation de bases de données (cf. figure 1), dont le but commun est de réduire les données tout en préservant le plus d'informations possible [Monier, 96].

Figure 54 : La généralisation dans les



Avant de cerner les problèmes de généralisation numérique, nous revenons à la cartographie manuelle afin de définir cette opération. La seule observation de cartes topographiques montre l'évolution de la représentation du relief à travers différentes échelles (cf. infra 1.1). Cependant, elle ne permet pas de formaliser des règles de généralisation qui sont pourtant nécessaires à la transposition de cette opération dans le domaine du numérique. A l'aide de son savoir-faire et sa connaissance en géographie physique, le cartographe adapte son dessin à l'échelle et au but souhaités, et aux spécifications imposées (cf. partie II). Il existe malheureusement très peu d'études approfondies exposant les parangons de la représentation cartographique de l'orographie [Cuenin, 72] [Imhof, 82]. Grâce aux travaux d'Eduard Imhof (1965), c'est principalement l'école suisse-allemande qui est à l'origine des fondements théoriques (cf. infra 1.2).

1. 1. Définition

La généralisation est la procédure cartographique ayant pour but de synthétiser l'information géographique afin de la représenter dans un espace restreint, tout en maximisant la qualité de l'information transmise selon le niveau de perception souhaité [Monier *et al.*, 96]. En cela, elle vise à modifier les objets d'un thème cartographique particulier, tout en conservant leurs caractéristiques les plus significatives, qui subissent ainsi des modifications géométriques et sémantiques pour assurer le changement d'échelle [Lagrange et Ruas, 94].

Plus spécifiquement, nous avons constaté dans la partie II que le terrain participe au rendu de la carte sous une forme simplifiée. *It is impossible to represent completely and with absolute fidelity the myriads of formations present on the earth's surface and in its land cover on a small piece of paper* [Imhof, 82:327]. La généralisation de l'orographie consiste par conséquent à abstraire davantage la description des ondulations du paysage tout en préservant les formes et les éléments caractéristiques les plus importants. Selon l'échelle et l'objectif de la carte, divers procédés de représentation sont utilisés. Sur les cartes topographiques de l'IGN, le passage du 1:50 000 au 1:100 000 n'exige pas un changement radical des techniques de représentation. Les courbes de niveau sont cependant deux fois moins nombreuses, l'équidistance passe de 20m à 40m. Au 1:250 000 par contre, il n'y a plus de courbes de niveau mais un estompage figuratif et les changements de texture, dans le cas des glaciers par exemple, sont marqués par un changement de couleur de l'estompage strié de hachures. Il n'y a plus de figurés spécifiques non plus (rochers, crevasses), hormis les lignes principales de rupture de pente. Quelques points cotés permettent d'évaluer l'altitude de certains lieux. Cette description est spécifique aux produits IGN. L'institut cartographique de Catalogne, par exemple, maintient les courbes de niveau au 1:250 000.

La seule observation de cartes à différentes échelles, comme par exemple les extraits de la figure 2, ne permet pas de dégager des règles très claires de généralisation du relief pour passer du 1:50 000 au 1:100 000 ou au 1:250 000. Un savoir cartographique et physique est nécessaire à la compréhension de la procédure. D'une manière générale, l'accroissement de l'espacement entre les courbes de niveau et la simplification de leur forme générale (moins de petites concavités et, pour celles qui sont maintenues, un écartement plus grand des bords) sont des faits notables. Les petites courbes fermées encadrant un sommet local sont préservées ou remplacées par un symbole. Avec la réduction du degré de crénelure[1], un grand nombre de thalwegs disparaissent ainsi que les crêtes secondaires contiguës. Aussi, le suivi précis d'un thalweg secondaire est moins aisé sur le 1:100 000 du fait du lissage des courbes et de la disparition de certains petits cours d'eau.

---

[1] A l'image des crénelures de la feuille de chêne, on dira d'une courbe qu'elle est très crénelée si elle présente des petits créneaux locaux très rapprochés. Inversement, la courbe est lisse si les sinuosités sont larges et espacées.

La position planimétrique des petits thalwegs conservés sur la carte importe moins que l'effet d'ensemble produit par un groupe d'isohypses. Par contre, par le maintien du réseau routier, les crêtes sont plus facilement visualisables car soit la route suit un bord de crête, soit elle redessine le contour de la montagne par son ascension progressive vers les sommets. Le passage au 1:250 000 (cf. figure 2.b) ne permet plus d'apprécier les formes locales d'un massif de montagnes car disparaissent les courbes de niveau et la plupart des cours d'eau, et l'estompage ne rend pas compte du plissement du terrain de façon précise.

Figure 55 : Deux extraits de carte à des échelles différentes, la corniche de l'Eyrieux (Drôme).

b : Au 1:250 000.

1 km

a : Au 1:100 000. 1 km

Par conséquent, le contexte cartographique (réseau hydrographique, infrastructure) aide à comprendre et à apprécier la topographie d'un lieu (cf. figure 2). Le procédé graphique de représentation du relief est simplifié jusqu'à devenir très réduit et, en certains endroits, inefficace au 1:250 000. En effet, le lecteur ne peut plus distinguer clairement les formes locales (à l'échelle de la carte) du paysage. Malgré l'élimination de nombreux cours d'eau entre le 1:50 000 et le 1:100 000, des thalwegs et donc des crêtes secondaires sont maintenus sans que des objets cartographiques d'un autre thème les mettent forcément en valeur. Seul un traitement correct du relief aboutit à restituer les ondulations du terrain à une plus petite échelle, dont le caractère est porté par les éléments structurels (principalement les crêtes et thalwegs). Or, suivant la région traitée, le réseau est plus ou moins dense (cf. partie II). La généralisation du terrain doit s'appliquer d'une part à simplifier les structures, et d'autre part à lisser le terrain entre ces structures. Autrement dit, la généralisation du relief est guidée par la connaissance géomorphologique.

1. 2. La généralisation manuelle du relief

Si un cartographe a la tâche de généraliser une carte topographique pour une échelle donnée, il commencera par la généralisation de la surface terrestre avant de se tourner vers la représentation généralisée des objets topographiques tels que le routier, le bâti *etc.* La généralisation manuelle est réalisée à partir de calques de courbes de niveau réduits à l'échelle finale, sur lesquels le cartographe redessine les ondulations du terrain tout en simplifiant la plupart et en exagérant certaines, s'attachant à prendre en compte les caractéristiques naturelles de chaque type de relief. Le choix de l'équidistance entre les courbes de niveau conduit le cartographe à s'appuyer sur les spécifications de contenu du réseau officiel de cartes. Cependant, cette description de la procédure n'est qu'une réduction de la réalité puisqu'en fait, le cartographe généralise les couches tout en gardant possible un réajustement des courbes de niveau.

Dans certaines parties étroites, le déplacement nécessaire des courbes est entrepris en fonction de la représentation du routier, du réseau ferroviaire ou de l'hydrographie. Le processus consiste donc à simplifier des formes et à déplacer des courbes tout en considérant le contexte cartographique et les courbes avoisinantes, autrement dit à modifier la taille des mouvements du terrain par l'ouverture de vallées ou l'élimination des thalwegs (cf. infra 3.1.1). Le cartographe n'est pas dans la situation de pouvoir donner une indication exacte sur le résultat géométrique de telles opérations.

1. 2.1. Une synthèse du problème

Toute généralisation en cartographie vise la création d'une image plus facile à lire par l'application d'une simplification intellectuelle traduite ensuite d'une manière graphique à partir d'une image source. Une image dont la taille a été réduite, mais non le contenu, préserve tous les détails mais devient rapidement illisible. Pour accomplir une amélioration de la clarté, des détails doivent être fusionnés, éliminés, accentués ou transformés (cf. infra 3). [Imhof, 82] pose alors la question suivante : est-ce que les courbes de niveau doivent être généralisées ou non ? Certains répondent oui, d'autres non. Un argument utilisé revient à se demander pourquoi lever le terrain avec précision s'il s'agit ensuite de perdre cette précision par la généralisation ? Cependant, il n'existe pas de représentation du relief qui ne soit pas généralisée. La question primordiale devient donc : comment et avec quel degré ?

Eduard Imhof (1982) sépare par intervalles d'échelles cartographiques l'analyse des causes et effets de la distortion. Dans les moyennes échelles (1:10 000 à 1:100 000), la simplification des courbes de niveau dépend du procédé d'acquisition (cf. partie II). Par exemple, la restitution photogrammétrique rend les plus petits détails du terrain ce qui conduit à des lignes trop crénelées, trop inégales et parfois entremêlées aux endroits très pentus. Dans ce cas, les lignes doivent être lissées et séparées. Parfois, un petit mouvement accidentel ayant lieu sur une courbe peut être maintenu. De plus, les détails des lignes sont souvent caractéristiques d'un certain type de terrain et doivent donc être préservés si possible (exemple : langues glaciaires). Le problème revient ici à distinguer le bruit du détail à préserver.

Dans les échelles plus petites (à partir du 1:100 000), les cartes sont obtenues par généralisation d'autres cartes à plus grande échelle. La règle exige un accroissement de l'équidistance par rapport à la carte de base entraînant une disparition des petites ondulations du terrain. Plus l'échelle décroît, plus l'épaisseur des lignes (relative au terrain) augmente respectant certaines courbures et torsions de telle sorte que beaucoup de petits détails sont finalement absorbés par la ligne elle-même (cf. infra 2.3). Dans de telles circonstances, la généralisation est inévitable pour maintenir la clarté. A des petites échelles, la simplification s'étend à toute la carte et pas seulement à des endroits particuliers.

E. Imhof aboutit à la conclusion : *the smaller the scale, the more the contours are deformed*. Les formes naturelles du terrain sont remplacées petit à petit par des expressions graphiques moins sophistiquées mais leur forme générale demeure grâce au style du cartographe. Bien généraliser, c'est-à-dire permettre à la forme simplifiée et réduite de présenter un caractère "correct", requiert des observations fréquentes du paysage et une étude intensive des cartes plus riches en courbes de niveau et en détails (par exemple à très grandes échelles ou thématiques). Une connaissance en géomorphologie aidera le cartographe à développer sa perception des formes caractéristiques.

Les huit règles qui tentent de résumer la philosophie suivie par la généralisation des courbes de niveau vers une plus petite échelle sont les suivantes [Imhof, 82:132] :

1· la surface est représentée par des lignes. Or, une ligne ne définit pas une surface. Il ne faut donc pas dessiner une ligne sans considérer les lignes de part et d'autre et, pour chaque morceau de terrain traité, il faut créer un système linéaire complet.

2· les petits détails qui ne se retrouvent pas d'une ligne à l'autre doivent être éliminés. La direction des lignes individuelles doit être considérée avec respect de l'équidistance. Seulement en terrain plat ou dans le cas d'une configuration géomorphologique particulière (formation karstique, langue glaciaire, dune…), les lignes individuelles peuvent suivre leur propre course.

3· mis à part des cas spéciaux (surplomb…), des courbes voisines ne doivent pas se toucher.

4· Dans leur ensemble, les courbes généralisées ne doivent pas toutes apparaître mollement ondulées ni trop torturées.

5· avant d'entamer une généralisation des courbes de niveau, il faut transférer toutes les ruptures de pente ou les crêtes saillantes significatives sur la feuille pour qu'elles servent de guide et soient prises en considération dans le dessin des courbes.

6· si une petite vague apparaît sur plusieurs courbes de la carte généralisée, elle doit être traitée comme un tout, autrement dit, soit elle est laissée telle quelle, soit elle est éliminée sur toutes les lignes.

7· les parties proéminentes du terrain doivent être si possible préservées, à partir du moment où elles déterminent par leur apparence des éléments massifs par une extension significative des directions de pente et des profils.

8· les lignes doivent rester si possible inchangées par rapport à leur position originale et ne doivent être altérées que si cela est exigé par la lisibilité et la clarté de la carte, et par la compatibilité avec les autres éléments.

Nous verrons dans le paragraphe 3.1.1 que beaucoup de travaux se sont fondés sur ces huit contraintes pour adapter la généralisation du relief au numérique. En fait, il n'existe que très peu d'écrits qui synthétisent les problèmes spécifiques de la généralisation du relief tels que [Imhof, 82]. D'autre part, ces règles deviennent d'autant plus compréhensibles si l'on se réfère à la continuité des formes du terrain. L'intérêt de ce système de règles réside dans sa possible adaptation à un modèle de champ ou à des réseaux d'éléments structurants qui le libère d'une restriction à un simple jeu de courbes de niveau (cf. infra 3.2.3).

1. 2.2. Relations entre les objets cartographiques

Comme le souligne [Imhof, 82], si les courbes de niveau sont présentées d'une manière détaillée, il est alors déconseillé de trop simplifier les autres couches d'information telles que les réseaux de communication, le bâti… Le contraire ne serait pas plus judicieux puisque chaque partie de la carte doit être cohérente dans sa présentation graphique et son degré de généralisation. De plus, les objets cartographiques linéaires (réseaux routier, ferroviaire, hydrographique…), une fois élargis et simplifiés, nécessitent des ajustements locaux des courbes de niveau à petites échelles.

L'importance de la généralisation des courbes de niveau dépend considérablement du degré de généralisation du reste du contenu de la carte et, en conséquence, du but et du caractère que l'on cherche à communiquer à la carte dans son ensemble. L'image cartographique contient beaucoup d'éléments dont l'interaction est aussi importante qu'un bon graphisme des éléments pris individuellement. [Imhof, 82] définit l'interaction à l'aide de ses deux aspects : *la combinaison*, qui est la fusion de plusieurs choses pour former un tout nouveau et planifié, et *la coordination*, qui gère leur arrangement de façon à constituer une structure. Une combinaison correcte et une bonne coordination sont d'une grande importance, voire décisive, pour la lisibilité d'une carte et la compréhension du message transmis. En effet, le but suivi par la généralisation se résume en des termes que [Weibel, 89:2] rappelle : *Jedes kartographische Generalisieren verfolgt das Ziel, ein durch formtreue (…) bis zur Unleserlichkeit zusammengeschrumpftes Bild durch begriffliches und graphisches Vereinfachen, das heißt durch Zusammenfassen Weglassen, Hervorheben und Umformen von Einzelheiten, leichter lesbar zu machen*[1].

L'interaction des éléments de la carte couvre trois notions fondamentales :

· l'interaction conceptuelle : suivant le but et l'échelle de la carte, il faut considérer ce qui est approprié et faisable en tant que contenu cartographique, ce qui peut-être ajouté, quels éléments ont une signification incertaine quant au but de la carte. Une carte avec un contenu limité mais sélectionné avec attention réussira bien mieux à transmettre son information au lecteur que le ferait une feuille surchargée de détails (informations secondaires).

· l'interaction graphique : le chaos graphique détruit toute valeur de n'importe quelle combinaison d'éléments, même s'ils ont été soigneusement sélectionnés. Une interaction satisfaisante des éléments graphiques d'une carte simplifie grandement sa lecture et le message cartographique en ressort éclairci.

· l'interaction technique : une image graphique réussie dépend également des procédés techniques de dessin et de reproduction.

Bien qu'il existe certaines conventions et des symboles idéalisés, une grande part de la rédaction de la carte est laissée à la considération, au jugement géographique et graphique, à l'expérience du topographe et du cartographe. Même les meilleures règles ne peuvent guider la main du cartographe. Ainsi, le contenu d'une carte topographique paraîtra harmonieux et cohérent si les composantes ont été levées d'un bout à l'autre par le même topographe. L'incohérence interne perturbe davantage les cartes à plus petites échelles car elles sont issues par transfert de l'information

---

[1] *Toute procédure de généralisation cartographique poursuit le but de rendre plus lisible une image réduite à la limite de l'illisibilité et dont la fidélité des formes est respectée, à l'aide de procédés de simplification conceptuels et graphiques, c'est-à-dire par l'élimination, par l'exagération et par la transformation de détails.*

graphique à partir d'une carte à plus grande échelle. Les procédés modernes traitent chaque calque séparément les uns des autres (réseau hydrographique, courbes de niveau, estompage…). Afin qu'une couche d'information ne soit pas plus généralisée qu'une autre, il est impératif que les interactions graphiques et perceptuelles de tous les éléments guident et organisent toute la procédure de généralisation.

2 Automatisation de la généralisation

Bien que de nombreux algorithmes de généralisation existent, et ce, particulièrement pour simplifier des données planimétriques, l'automatisation de la procédure est loin d'être achevée. Les données sont, en effet, trop diverses dans leur forme, leur taille et leur configuration[1] pour pouvoir appliquer un procédé *a priori* qui donnerait un résultat cartographiquement correct sur toute région à généraliser. En recherche, la démarche actuelle consiste à caractériser davantage l'espace géographique en repérant les différentes configurations qui le composent, afin de choisir une séquence d'opérations qui leur soit adaptée [Ruas et Plazanet, 96]. Les descripteurs géométriques et sémantiques ne qualifiant que des objets individuels, la détermination des configurations nécessite une analyse spatiale préalable. Cette qualification vise en quelque sorte à remplacer l'œil du cartographe, qui sait distinguer l'information importante à conserver voire à amplifier, de l'information secondaire à éventuellement éliminer.

L'Association cartographique internationale définit la généralisation comme suit : *Dans le contexte numérique, elle peut aussi être définie comme une réduction contrôlée et une simplification de données géographiques, de telle sorte que l'information demeure claire et non encombrée* [ACI, 73].

Dans un premier temps, nous présentons une évolution des modèles conceptuels fondée sur une connaissance plus juste des besoins en matière de généralisation automatique. Puis, nous identifions la connaissance nécessaire au fonctionnement de telles procédures. Les paragraphes 3 et 4 se concentrent sur des problèmes plus procéduraux puisqu'ils concernent respectivement les déclencheurs et les opérateurs de généralisation.

2. 1. Des modèles conceptuels de généralisation automatique

[Imhof, 82] affirme qu'aucun projet cartographique sérieux ne peut être entrepris sans tout d'abord tester et établir exactement le contenu et la forme graphique par une modélisation qui devra être suivie pendant l'exécution du travail. Un processus aussi complexe ne peut aboutir que s'il est décomposé en sous-tâches cohérentes qui répondent à des besoins bien définis. Depuis une quarantaine d'années, des travaux variés se sont efforcés d'analyser ces besoins et de définir un modèle de généralisation conceptuel décomposé selon des étapes de progression réfléchie. Dans

---

[1] Configuration exprime l'ensemble des relations spatiales et contextuelles d'un objet géographique avec les autres objets de son voisinage plus ou moins proche.

les paragraphes, qui suivent nous présentons une chronologie des principaux modèles inspirée de [McMaster et Shea, 92], qui part de modèles très abstraits pour finir avec des modèles qui s'intéressent davantage à l'ordonnancement des tâches ou au contrôle [Lagrange, 97].

2. 1.1. Des modèles abstraits

Les SIG contiennent des données représentatives des phénomènes géographiques et offrent de multiples outils de création, manipulation, visualisation ou stockage de ces données spatiales. La perception du monde réel, par le jeu de processus cognitifs (sélection, généralisation, synthèse), fournit au cartographe une information qu'il devra partager d'une manière compréhensible pour le lecteur. Les représentations physiques de ces informations (les données) constituent un modèle brut des phénomènes entreposés dans la base de données. Différents arrangements de ces données forment des messages distincts. Par principe, l'organisation de l'information géographique nécessite un modèle conceptuel dont la formalisation requiert l'expertise humaine [Laurini et Thompson, 94]. Nous présentons dans ce paragraphe les principaux modèles qui ont marqué leur temps.

En 1960, Arthur Robinson a identifié deux composantes primordiales au processus de généralisation cartographique :

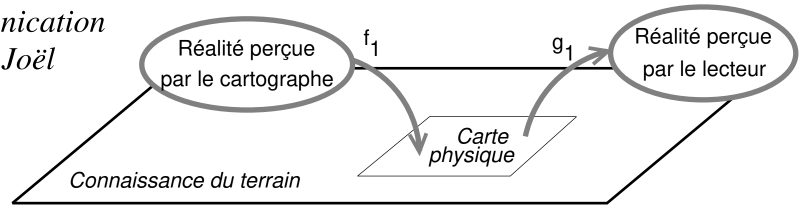
- la sélection en tant que pré-processus : décider quelle information est nécessaire, sans modification de celle-ci ;
- la généralisation : modification de données spécifiques dans le but d'augmenter l'efficacité de la communication, en neutralisant les conséquences indésirables par simplification des formes et évaluation de l'importance relative des éléments afin d'adapter la représentation.

La phase de sélection demeure, de nos jours, la première tâche que doit gérer un processus de généralisation qu'elle intervienne au niveau global par rapport au but et à l'échelle de la carte ou au niveau d'une seule couche d'information. C'est un peu plus tard qu'A. Robinson définit quatre opérations de généralisation :

- classification : ordonnancement ou classement et groupement des données ;
- simplification : détermination des caractéristiques importantes trouvées dans les données, la conservation et une éventuelle amplification de ces caractéristiques, et l'élimination des détails indésirables ;
- symbolisation : codage graphique des caractéristiques classées ;
- induction : processus logique de déduction (du lecteur).

En 1974, Joël Morrison a formalisé les relations entre les quatre opérations élémentaires définies par Arthur Robinson et Randall Sale (1969). Son modèle de généralisation est l'un des premiers à se fonder sur un modèle de communication, inspiré de la théorie des ensembles.

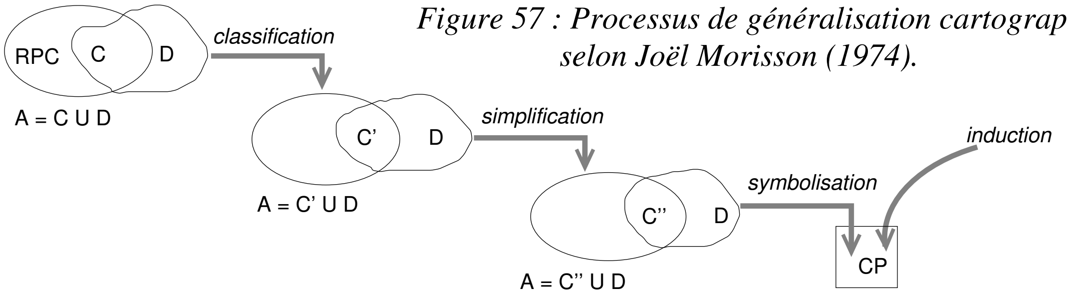
Figure 56 : Le chemin de communication cartographique selon Joël Morrison (1974).



Le chemin de communication cartographique, décomposable dans la théorie des ensembles, aide à mieux comprendre le procédé cartographique (cf. figure 3). Dans un premier temps, l'ensemble *réalité perçue par le cartographe* est transformé en une carte par f_1, le processus de réalisation d'une carte. Dans un second temps, la transformation g_1, processus de lecture d'une carte, établit le passage entre la carte et la *réalité perçue par le lecteur*. La communication existante entre la réalité perçue par le cartographe et l'environnement physique implique une transformation effective (par exemple, la partie II de cette thèse a étudié cette transformation dans le cas particulier du relief).

Dans le modèle de généralisation de J. Morrison (cf. figure 4), l'ensemble RPC dénote la réalité perçue par le cartographe et CP la carte physique (objet physique qui traduit une connaissance sur le terrain). On considère alors C une partie de la réalité perçue par le cartographe et D l'ensemble des informations sélectionnées et connues sur la carte (données physiques : objets, attributs).

Figure 57 : Processus de généralisation cartographique selon Joël Morisson (1974).



Cet exercice académique a servi de référence pendant des années mais la plupart des opérations ne sont pas inversibles, ce qui mit fin à la poursuite des travaux dans cette direction bien que ce modèle renferme une part d'intuition [COGIT, 94].

Notre interprétation des deux composantes principales (sélection et généralisation) définies dans les modèles proposés aboutit au découpage suivant, hormis la symbolisation et l'induction :

- sélection d'une ou de plusieurs couches d'informations qui contiennent des objets géographiques et cartographiques ;
- segmentation et classification des objets ;
- caractérisation des objets classe par classe ;
- application d'opérateurs de généralisation (décisions prises par rapport aux caractéristiques des objets).

Il est possible d'établir un parallèle avec notre modèle (cf. infra 3.2.2) grâce à la distinction des trois phases : sélection d'un modèle initial de données (premier point), classification de haut-niveau des données (deuxième et troisième points), simplification fondée sur la classification (dernier point).

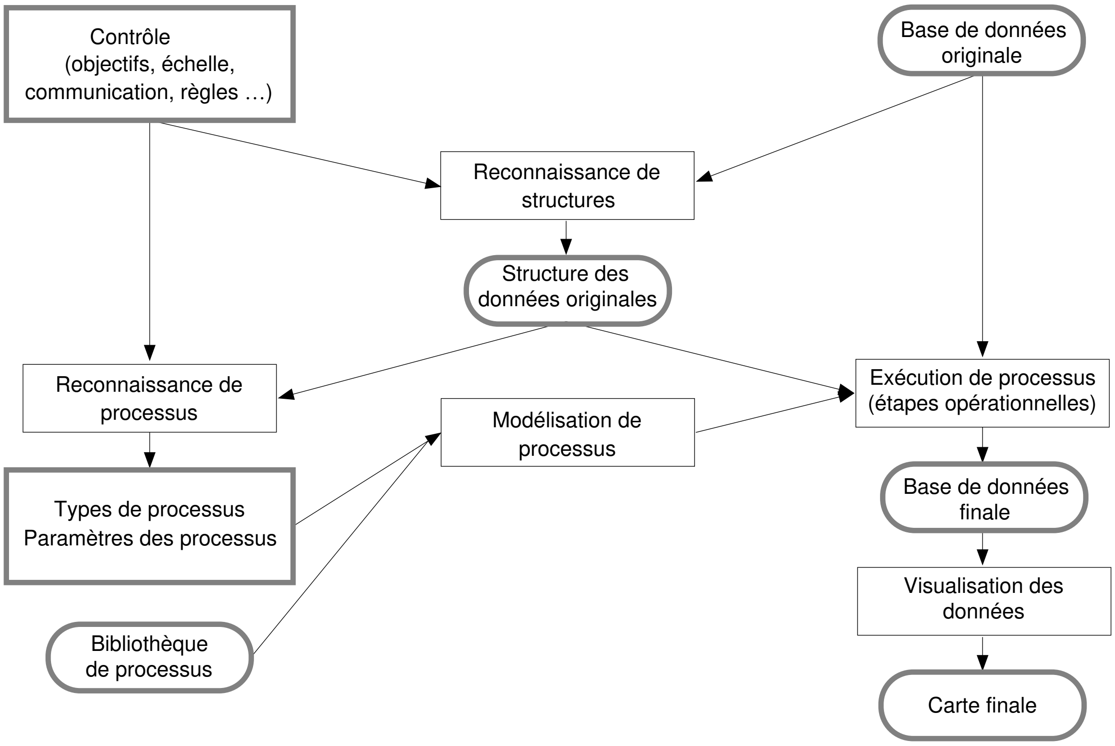
2. 1.2. Le modèle de Kurt Brassel et Robert Weibel (1988)

Dans [Brassel et Weibel, 88], les auteurs présentent un modèle très détaillé applicable à divers types d'information, et notamment une application au relief est présentée dans [Weibel, 89] (cf. infra 3.1.2.1). Leur modèle souligne le besoin d'une procédure fondée sur une compréhension doctrinale en matière de généralisation automatique : les structures essentielles des données cartographiques d'origine (dans les domaines thématique, spatial et temporel) doivent être extraites, les procédures essentielles pour la modification de ces structures doivent être identifiées et formalisées d'une manière adéquate en un certain nombre d'étapes opérationnelles. Deux objectifs de généralisation différents sont également discernés. D'une part, la généralisation cartographique améliore l'efficacité perceptuelle (utilisée uniquement pour la visualisation graphique) et, d'autre part, la généralisation statistique procède à la réduction des données sous contrôle statistique (filtrage), par exemple pour obtenir le sous-ensemble des éléments les plus significatifs de la base de données originale dans un but analytique.

La procédure, dans son ensemble, se décompose en cinq étapes (cf. figure 5) auxquelles nous associons les types de connaissance nécessaires qui sont abordés dans le paragraphe suivant :

- reconnaissance de structures : activité pendant laquelle des objets cartographiques spécifiques (ou agrégats d'objets), les relations spatiales et leur degré d'importance relative sont identifiés (connaissance géométrique rendant compte de la connaissance structurale) ;
- reconnaissance de processus : identification des processus exacts de généralisation, c'est-à-dire les types de modification des données et les paramètres des structures finales nécessaires (connaissance procédurale) ;
- modélisation des processus : modélisation des méthodes par une compilation des règles et processus à partir de la bibliothèque (connaissance procédurale) ;
- exécution des processus : mise en place de la généralisation proprement dite par l'application des règles et processus à la base de données originale afin de créer une sortie généralisée (connaissance géométrique) ;
- visualisation des données : conversion des données finales en une carte (connaissance géométrique).

Figure 58 : Les cinq étapes de la procédure de généralisation de Kurt Brassel et Robert Weibel.



2. 1.3. Le modèle de Robert McMaster et Stuart Shea (1992)

Robert McMaster et Stuart Shea ont créé un modèle novateur qui s'appuie sur la concrétisation de la procédure de généralisation dans un environnement numérique [McMaster et Shea, 92]. Ils définissent la généralisation en tant qu'*application de transformations spatiales et sémantiques afin de maintenir la clarté, tout en gardant un contenu approprié, à une échelle donnée, dans un but cartographique déterminé et pour un certain public*. Cette définition fournit les trois traits principaux pour la conception d'une implantation, explicités dans le diagramme de la figure 6 :

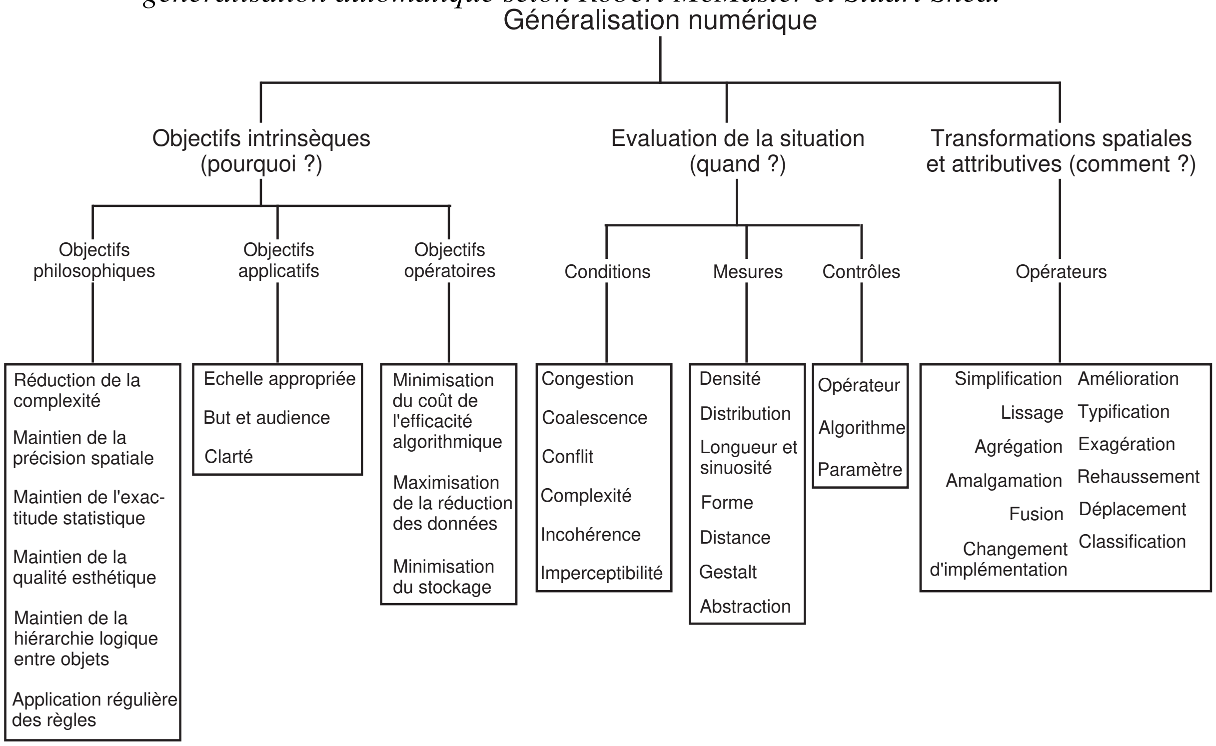
· les objectifs intrinsèques : pourquoi ?

· l'évaluation des situations : quand ?

· les transformations spatiales et sémantiques : comment ?

Dans ce modèle conceptuel, il conviendrait d'ajouter la possibilité d'un retour en arrière (passage continu entre *contrôles* et *opérateurs* qui serait un témoin parmi les opérateurs de généralisation). En effet, des contrôles s'imposent aussi après l'application de certains opérateurs. Des algorithmes tels que celui explicité dans [Douglas et Peucker, 73] ne peuvent pas contrôler intrinsèquement les implications de leur modification (cf. infra 3.3.1.2.a). Après les opérations, la validation et un éventuel retour en arrière sont nécessaires afin de maintenir la cohérence entre les données. A ce propos, seule la connaissance à identifier apparaît clairement dans ce modèle, il faudrait le compléter par un modèle de données.

Figure 59 : Un modèle conceptuel fondé sur la compréhension de la procédure de généralisation automatique selon Robert McMaster et Stuart Shea.



2. 2. La connaissance

La philosophie de la généralisation repose sur la conception des tâches de généralisation et de leur séquence. Dans ce but, [Armstrong, 91] propose une classification des catégories de connaissance[1] qui supportent les décisions de généralisation. La généralisation appartient au domaine artistique de la cartographie, dans lequel le cartographe intègre un savoir sur les conventions cartographiques et une connaissance des processus cognitifs humains dans le but de dessiner l'information d'une manière compréhensible. Ces processus, cependant, sont difficilement décomposables en un ensemble de faits atomiques et de règles déterministes. Les buts et résultats de la généralisation sont très souvent mal définis et la généralisation peut s'opérer à l'aide de méthodes variées empruntant des chemins différents sans que l'un soit préférable aux autres. La connaissance doit donc être structurée afin d'assumer la construction d'une séquence et la paramétrisation des étapes de chaque modèle (cf. infra 3.1) [Ruas, 95].

La généralisation remplit un ensemble d'objectifs philosophiques, applicatifs et informatiques (cf. supra 2.1.3) qui doivent être combinés avant le début de la généralisation elle-même, et qui pourront être éventuellement remis en cause. Le traitement d'une base de connaissance aussi complexe ne peut se faire que par la décomposition du problème de représentation de la connaissance

---

[1] [Laurini et Thompson, 94:4] distinguent les notions de *donnée*, *information* et *connaissance* dans le sens où l'information (implicite) est dérivée des éléments individuels (explicites) d'une base de données. Elle est produite à partir des données par notre pensée et fondée sur notre connaissance. La connaissance est nécessaire pour déduire la réalité d'un objet représenté.

en un ensemble de catégories qui facilite la collecte, l'ordonnancement et l'application de cette connaissance sur la généralisation.

[Armstrong, 91] constate que la connaissance peut prendre des formes variées qui peuvent être stockées puis utilisées de différentes façons. *For this reason, a conscious effort must be made to structure the representation of knowledge so that it can be used to support map generalization decisions.* Il discerne trois types de connaissance pour implanter des systèmes de généralisation cartographique qui sont décrits dans les paragraphes suivants.

2. 2.1. Connaissance structurale

La connaissance structurale apporte une expertise développée par le cartographe et intégrée au processus de généralisation automatique. Une telle expertise peut être dérivée de la géomorphologie ou de l'hydrologie et peut être conditionnée par des expériences passées et des pratiques adoptées par les agences de cartographie. En regard de ces principes, la connaissance structurale traite deux aspects :

- la forme que doit avoir un objet cartographique ou un ensemble d'objets en fonction de leur nature ;
- les détails importants en fonction de la nature de l'objet.

Les éléments géographiques dessinés sur une carte proviennent de nombreux processus, certains naturels (volcanisme), d'autres humains (grille des rues) et d'autres intermédiaires (canaux). La connaissance structurale est utilisée pour décrire le contrôle sous-jacent de la représentation cartographique numérique d'un objet. Elle apparaît à partir des processus de génération d'un objet et est utilisée pour fournir un guide à la généralisation automatique car cette opération, en agissant sur la géométrie des objets, détermine en partie la façon dont un élément est ensuite représenté (une forme géomorphologique implique une description géométrique qui implique une représentation graphique, cf. partie II).

Par exemple, les processus géomorphologiques et lithologiques influencent nettement la structure du drainage d'une région. Ils donneront une information sur la façon dont les drains devront être figurés à travers les différentes échelles (linéaires, méandriques). De plus, la marque visible de l'érosion fluviale est le modelé, qui fournit ainsi un contrôle structural par sa relative stabilité. Un autre exemple est celui des torrents, cours d'eau linéaires à pente forte qui travaillent dans des matériaux faciles à affouiller. Sur la carte, [Derruau, 62] compare le torrent complet (bassin de réception, canal d'écoulement, cône de déjection) à un diabolo dont les caractéristiques devront donc être visibles quelle que soit l'échelle (cf. figure 7).

Figure 60 : Un torrent alpin du massif du Chablais (Haute-Savoie) au 1:100 000 (à gauche) et au 1:250 000 (à droite).

2. 2.2. Connaissance géométrique

La connaissance géométrique est similaire à ce que les cartographes qualifieraient d'ensemble de descripteurs incluant les positions absolues et relatives des éléments aussi bien que d'autres aspects (descripteurs géométriques et géomorphologiques tels ceux analysés dans la partie III) importants pour la généralisation. Les éléments qui correspondent à un phénomène du monde réel (un processus naturel comme, par exemple, le réseau de drainage) et à une description numérique (objet ou champ continu) sont regroupés dans une classe. Tel, un morceau de paysage qui consiste en un champ continu de dimension 2D½ dont la géométrie élémentaire est le point, et où le réseau hydrographique qui l'irrigue se compose d'entités linéaires (cf. partie IV).

En fait, la connaissance géométrique s'étend au-delà d'une simple description des objets cartographiques et de leurs relations topologiques. D'une part, elle permet de caractériser les objets pour des évaluations après traitement (par exemple, le calcul de distance entre une ligne initiale et son homologue généralisé). D'autre part, dans le cas du relief, elle est le reflet de la connaissance structurale. En effet, la géomorphologie est une connaissance structurale (générique qui intervient dans l'interprétation des mesures) et la géomorphométrie est une connaissance géométrique (ensemble de variables qui décrivent les formes géomorphologiques) qui rend compte de la géomorphologie.

2. 2.3. Connaissance procédurale

La connaissance procédurale est utilisée pour sélectionner des opérateurs adéquats dans le but de résoudre des tâches de généralisation. Elle implique une décision sur la façon dont un élément sera traité. Ainsi en s'appuyant sur le modèle conceptuel proposé dans [Brassel et Weibel, 88], la connaissance procédurale est typiquement contenue dans les deux boîtes Bibliothèque de processus et Types et paramètres des processus (cf. supra 2.1.2). En fait, elle n'intervient pas seulement pendant la phase de généralisation proprement dite, mais elle apparaît à toutes les étapes de la démarche globale.

En effet, l'identification des structures du relief, par exemple, utilise une procédure complexe dont les différentes étapes ont été décrites dans la partie III. L'analyse des différentes approches a fourni un ensemble de méthodes avec leurs caractéristiques, qui forme par là même une bibliothèque complète de procédures dans laquelle l'utilisateur peut piocher selon ses besoins. De même, la connaissance procédurale comporte des informations sur le procédé d'obtention du modèle initial de données, qui influe ensuite sur le choix des algorithmes de traitement, et intervient lors du choix d'une procédure d'interpolation (cf. partie II). D'une certaine manière, la validation d'un MNT fournit une connaissance procédurale (procédures d'interpolation et de détection/correction des erreurs) qui rend compte de la connaissance structurale (est-ce que la visualisation du MNT final reflète correctement les formes géomorphologiques de la région ?).

Au stade de la simplification d'une forme géométrique, il y a déjà eu interprétation numérique de la connaissance structurale : par exemple, on appliquera un algorithme de structuration sur le cône de déjection d'un torrent parce qu'il maintient sa structure générale (en forme de petit delta).

2. 3. Les conflits

Lors de la transformation d'un ensemble de données, des conflits apparaissent inévitablement qui doivent être résolus. Qu'est-ce qu'un conflit ? Un conflit indique une situation dans laquelle la représentation spatiale d'un objet cartographique est incompatible avec son contexte. Des travaux existent qui en recensent les différents types et qui proposent des méthodes de détection et de résolution tels que [Monmonier, 87], [Müller, 90], [Jones *et al.*, 92], [Zahn et Mark, 93]…

Par exemple, lorsque deux courbes de niveau se touchent, il y a un conflit contextuel par la violation de la contrainte de lisiblité (règle 3 de généralisation des courbes de niveau, cf. supra 1.2.1). Un opérateur de généralisation (par exemple, le déplacement) est alors déclenché. Cependant, l'effet de ce déplacement sur les lignes voisines doit être évalué qui validera ou non l'opération. De même, la simplification numérique d'un réseau de lignes caractéristiques du relief entraîne, parfois, des déplacements dont il faut maîtriser les effets sur le contexte (cf. infra 3.1.1.2.b). Ces exemples montrent que la détection des conflits et leur résolution nécessitent une décomposition en sous-tâches jusqu'à la validation des opérations.

[Armstrong, 91] distingue deux causes principales au déclenchement d'une procédure de généralisation :

- métrique : l'élimination de détails devenus indésirables lors du changement d'échelle ;
- sémantique : l'élimination de détails inutiles en cartographie thématique.

Partant d'une représentation cartographique de la réalité à grande échelle qui contient une grande quantité de détails, le problème revient à éliminer les détails superflus et à réorganiser les éléments conservés sur la carte afin d'éviter les conflits lors de l'affichage de la plus petite échelle. Dans cette optique, on distingue deux types génériques de conflits :

- conflit interne : lorsque les objets sont trop petits, ils deviennent illisibles du fait de leur taille ;
- conflit contextuel : lorsque plusieurs objets sont trop proches, cette proximité spatiale empêche la lisibilité (recouvrement ou confusion d'interprétation).

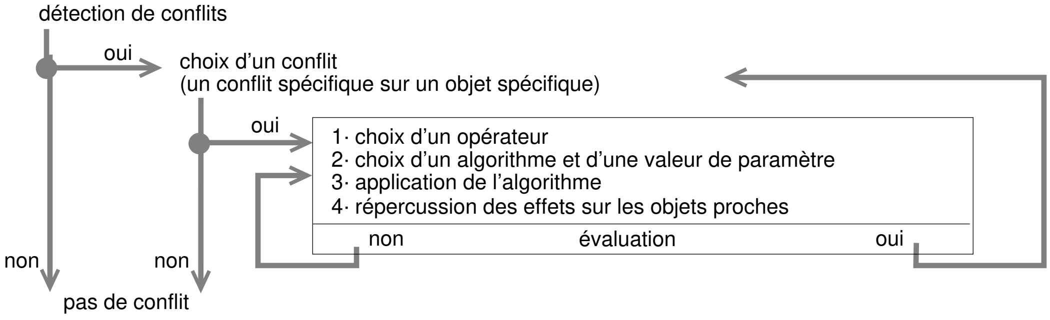
Mais, cette définition générale doit être complétée par trois règles [COGIT, 94] :

- un conflit peut apparaître entre des objets de nature différente (point, ligne, surface, symbole, texte) ou au sein même d'un objet ;
- un conflit dépend de la géométrie des objets et de leur proximité, de la symbolisation de l'objet (la largeur entraîne plus ou moins de conflit) et de la résolution (la faculté de perception est une limite à la lisibilité) ;
- un conflit peut être la combinaison d'un ensemble de conflits (très complexe).

La détection d'un conflit va au-delà d'un simple comptage d'objets ou d'une mesure des distances entre objets. Une analyse cartométrique détaillée devient indispensable pour chaque objet entrant dans le conflit, aussi bien que pour la carte dans son ensemble, afin de déterminer la sévérité du conflit. [Mackaness, 94] établit les principes qui composent une analyse cartométrique[1], tout d'abord sur la base d'une classification du conflit selon ses attributs, puis sur la base d'une classification selon sa nature visuelle (certaines situations conflictuelles sont répertoriées dans la figure 6) :

- contenu et gestaltisme : nombre total d'objets composant le conflit, nombre de types de données différents, structure (orthogonal, sinueux, cluster, aléatoire, régulier) ;
- complexité de la relation : complexité topologique à l'intérieur et entre les objets ;
- degré de proximité : étendue surfacique et degré de groupement ;
- encombrement local : groupe d'éléments suffisamment proches pour encombrer une petite région de la carte ;
- fusion d'éléments : superposition ou proximité qui empêche la discrimination des objets ;
- imperceptibilité : réduction en taille jusqu'au point de disparition (trop petit, trop court, trop étroit).

L'analyse cartométrique qualifie la situation géographique donc, entre autres, détermine les conflits présents dans la situation. Connaître le but de la carte et la nature d'un conflit aide à sélectionner les opérateurs appropriés. Dans [COGIT, 94], un processus de détection et de résolution des conflits est décrit :



La plate-forme de généralisation Stratège développée au laboratoire COGIT de l'IGN permet d'intégrer différentes étapes du processus proposé et de traiter la détection de conflits, de choisir un conflit spécifique, de choisir un opérateur et de valider l'opération [Hangouët et Regnauld, 96][Ruas, 97].

---

[1] D'une manière générale, l'analyse cartométrique correspond à l'étude d'une situation cartographique globale et décrit les aspects géométriques (localisation, forme), sémantiques (nature) et spatiaux (distribution, relations).

Un conflit se manifeste quand il y a transgression d'une ou plusieurs contraintes. La contrainte décrit le prédicat d'une règle sans imposer une action à suivre et du fait des spécifications géométriques et sémantiques, beaucoup de contraintes ne sont pas respectées et la meilleure action de généralisation est alors celle qui minimise ces violations. Potentiellement, des conflits peuvent exister entre les contraintes, ce qui rend indispensable l'établissement de priorités selon le produit souhaité (bases de données, cartes) [Ruas et Plazanet, 96]. Divers types d'information sont alors nécessaires pour généraliser les données. Nous leur associons les quatre grandes contraintes distinguées dans [Weibel, 96] :

· les contraintes sémantiques : la sémantique décrit les objets et les relations entre ceux-ci. Le comportement d'un même opérateur sera différent selon la nature de l'objet, ce qui détermine des priorités entre les natures possibles des objets. Les contraintes sémantiques relèvent de la modélisation sémantique (conservation de la classe d'appartenance, domaine d'existence dans le contexte spatial) ;

· les contraintes géométriques : la géométrie fournit l'information contenue dans la base de données sous la forme de coordonnées (x, y). La qualification de la géométrie des objets permet de choisir un algorithme approprié et les valeurs de paramètres, et de détecter les formes à préserver (par exemple : [Plazanet, 96]). Les contraintes de formes regroupent des contraintes sur la forme générale d'un objet individuel ;

· les contraintes spatiales : les relations spatiales donnent la position relative des différents éléments les uns par rapport aux autres. Les contraintes métriques sont principalement influencées par des aspects de perceptibilité (séparabilité, taille ou largeur minimales) et les contraintes topologiques concernent le maintien de la cohérence topologique (boucles fermées, chevauchement mutuel). L'arrangement spatial répond aux critères perceptifs de la théorie de la Gestalt[1] (maintien du caractère d'une ligne, conservation de la distribution et de l'arrangement des éléments d'une carte).

2. 4. Les opérations

Les opérateurs de généralisation sont les transformations fondamentales utilisées pour résoudre les conflits et réduire la complexité des données. Le problème majeur rencontré dans la littérature est qu'il n'existe pas un consensus qui définisse clairement le vocable utilisé : les différents auteurs utilisent des définitions différentes pour le même terme ou des termes différents ayant la même définition [Rieger et Coulson, 93]. C'est pourquoi un groupe de travail, l'Organisation européenne d'Etudes photogrammétriques expérimentales (OEEPE), s'est constitué récemment qui propose une taxonomie des opérations utilisables comme base d'une terminologie commune [OEEPE, 97] :

- la classification change la nature de l'objet (classe ou valeur d'attribut) ;
- Réduction du nombre d'objets

---

[1] La théorie de la Gestalt se fonde sur le principe selon lequel la perception visuelle permet aux gens de regrouper des objets similaires dans une même classe. Les deux assertions les plus connues sont : on regroupera deux objets proches et on regroupera deux objets de forme, de taille ou de couleur identique [Thórisson, 94].

  - l'opération de sélection/élimination prend en compte la nature d'un objet et sa géométrie. Dans le cas d'objets surfaciques, la suppression comporte deux opérateurs (hors OEEPE, cf. partie III) :
    - la destruction/partage supprime un objet trop petit en répartissant la surface correspondante sur les objets voisins (élimination d'objet) ;
    - l'absorption change la classe d'un objet trop petit (élimination de classe), soit inclus entièrement dans un objet plus grand, soit adjacent à un objet plus grand.
    - Agrégation de surfaces
      - la fusion correspond à deux types d'opérations :
        - l'agglomération regroupe plusieurs petits objets adjacents de même classe pour former un seul objet de surface assez grande ;
        - la jonction regroupe deux objets de classe identique mais non adjacents.
      - l'agrégation regroupe deux objets proches mais non adjacents et de classes différentes.
    - la structuration (ou *typification*) généralise un ensemble de petits objets non adjacents en un nouvel ensemble d'objets. Cette transformation complexe se compose d'une séquence d'opérateurs de base (sélection, déplacement…) qui ne permet pas de connaître précisément quels sont les objets source qui ont été conservés.
- Transformations géométriques d'objets individuels (nature, symbolisation et résolution)
  - la simplification élimine des petites formes sur une ligne ;
  - Amélioration de la géométrie :
    - le lissage change la position de chaque point d'une ligne par moyennage des positions des points voisins ;
    - la fractalisation permet de préserver la tendance caractéristique d'une ligne très crénelée lors d'un changement de résolution ;
    - l'équarrissage tend à orthogonaliser un coude ou un coin de bâtiment.
  - Augmentation de la taille d'un détail ou d'un objet trop petit pour être perceptible et trop important pour être éliminé : l'amplification s'applique sur une portion de ligne et la dilatation augmente la taille d'un objet surfacique. Les opérateurs qui leur sont associés sont :
    - l'exagération accroît une forme également dans toutes les directions (homothétie) ;
    - la caricature accroît une forme le long d'une direction prédéfinie (affinité).
  - un changement de dimension géométrique a lieu lorsqu'un objet est trop grand pour être représenté de la même façon, cela dépend de l'espace disponible ;
  - le déplacement change la position d'un objet ou d'un tronçon d'objet linéaire.

Conclusion

Il existe dans la littérature des modèles conceptuels de généralisation. Cependant, l'expert humain reste actuellement toujours indispensable pour en régler et planifier le déroulement. Des opérations ont été implantées dans le domaine du numérique mais aucun système ne gère vraiment l'enchaînement des tâches [Lagrange, 97]. Des plateformes expérimentales existent (par exemple Stratège) qui commencent à intégrer la gestion des séquences.

En outre, nous avons étudié les trois aspects au cœur de toute procédure de généralisation :

· les types de connaissance nécessaires qui entrent en jeu à chaque étape de la procédure ;

· les conflits qui violent des contraintes préalablement formalisées ;

· les opérations qui s'appliquent à modifier la géométrie des phénomènes représentés.

3 La généralisation automatique du relief

En matière de généralisation automatique du relief, l'idéal serait d'ériger une boîte noire qui traiterait l'information orographique en adaptant le choix des opérations de traitement selon le caractère du terrain rencontré. La boîte repérerait les transitions du terrain et adopterait un comportement différent en changeant de type de relief. En effet, une région fortement accidentée ne doit pas être simplifiée sur les mêmes critères qu'une plaine, dans le souci de maintenir le caractère dominant des deux types de zone. Une plaine, si elle est totalement homogène, peut être directement lissée. Par contre, le traitement d'une région montagneuse sera plus délicat car il agira sur la structure interne de la zone tout en respectant ses caractéristiques inhérentes (élimination de thalwegs et de crêtes, lissage des versants). Cependant, la conception d'un tel outil n'est pas triviale. Une procédure de généralisation se fonde nécessairement sur la compréhension des phénomènes à traiter et dont le caractère dominant doit être extrait des données cartographiques. La généralisation du terrain est un problème spécifique dû à la complexité naturelle du phénomène à traiter.

Nous avons vu dans la partie II que la représentation cartographique du relief dépend principalement du thème et de l'échelle de la carte souhaitée. Dans un but topographique, les procédés utilisés concourent à mettre en valeur la structure du terrain quelle que soit l'échelle (cf. supra 1.1). Ainsi, un modèle global de généralisation du relief doit considérer la structure comme une information primordiale et doit donc comporter une procédure de reconnaissance automatique du type de terrain et de ses éléments structurants.

3. 1. Des démarches globales

Etant donnée la complexité de l'opération, toute procédure de généralisation du relief doit être guidée par la connaissance structurale (géomorphologie, cf. supra 2.2) et respecter des contraintes spécifiques (règles énoncées par [Imhof, 82], cf. supra 1.2). [Wu, 81] reprend une citation de

J. Volkert (1978) pour exprimer la complexité d'un cheminement vers l'automatisation de la généralisation cartographique malgré le savoir croissant dans le domaine : *Da die Kartographie jedoch eine historisch gewachsene Wissenschaft ist, sind viele Teile der Generalisierung nicht unmittelbar algorithmisierbar. Sicher schwieriger, wenn nicht sogar unmöglich, ist eine automatische Auswahl nach Objektkomplexen*[1]. Les formes du relief appartiennent à cette catégorie d'objets qui doivent être appréhendés d'une manière contextuelle.

Nous verrons des démarches de généralisation du relief qui s'appuient sur diverses modélisations du terrain et qui mettent en avant l'importance d'une adaptabilité des processus à l'information implicite contenue dans les modèles. C'est pourquoi, au lieu de reprendre la classification proposée par [Schweinfurth, 84], nous scindons l'ensemble des études selon le modèle de données traité. Tout d'abord, seront abordés des travaux sur le traitement des courbes de niveau, représentation empruntée à la cartographie traditionnelle (cf. partie II). Puis, une démarche de généralisation qui s'appuie sur une grille régulière mais qui pourrait être étendue à d'autres modélisations de la surface. La généralisation d'une surface modélisée par une triangulation irrégulière ne sera pas abordée ici car il n'y a eu que très peu de travaux sur le sujet [Bjørke et Midtbø, 93] et, bien qu'elle soit un outil puissant de modélisation, ce n'est pas une représentation parfaitement apte à supporter les opérations de généralisation.

3. 1.1. Généralisation des courbes de niveau

La surface terrestre est continue bien qu'elle soit représentée traditionnellement à l'aide de courbes de niveau. [Imhof, 82] définit les courbes de niveau comme les lignes de la carte correspondant aux positions métriques des points de la surface terrestre à la même altitude au-dessus du niveau de la mer. La logique voudrait donc que, pour représenter correctement le relief, le plus petit intervalle possible soit choisi. En pratique, un intervalle plus grand est utilisé pour plus de lisibilité et pour laisser un espace libre pour les autres objets. Il apparaît alors que la discrétisation du moyen (procédé de représentation) est une approximation de la continuité de la surface terrestre (le phénomène à représenter).

Il existe beaucoup de travaux sur la généralisation des courbes de niveau dans la littérature allemande fondés sur les principes énoncés par [Imhof, 82]. La plupart de ces travaux convergent vers l'idée selon laquelle l'ensemble des isohypses ne doit pas être traité d'un bloc par application d'une opération de simplification sur les lignes individuelles, mais par groupes de lignes en prenant en compte le comportement du voisinage de chaque ligne (cf. infra 3.1.1.2). En cartographie manuelle, la prise en compte du contexte de chaque courbe de niveau est facilitée par le fait que le cartographe a une vue d'ensemble sur toute la carte. Dans le numérique, les lignes seules sont facilement repérables. Il est notablement plus compliqué de mener une généralisation contextuelle.

---

[1] *La cartographie est une science historique de haut-niveau, dont beaucoup de tâches de généralisation ne sont pas directement traduisibles sous la forme d'algorithmes. Un choix automatique d'un ensemble d'objets est certainement plus difficile à réaliser, lorsqu'il n'est pas impossible.*

3. 1.1.1. La généralisation selon Gerhard Schweinfurth

Reprenant les notions développées par Günter Hake (1975), [Schweinfurth, 84] comprend la généralisation dans le sens d'une reproduction cartographique et distingue des types de généralisation selon plusieurs points :

· d'après les catégories de l'énoncé cartographique ;

· selon les domaines d'application ;

· selon les opérations élémentaires à partir desquelles chaque généralisation est composée.

L'auteur s'intéresse ici aux problèmes de généralisation cartographique : sous généralisation cartographique, on comprend une simplification graphique et de contenu d'une forme d'expression cartographique, en fonction de l'échelle et du thème, par le biais de la sélection d'objets, de la fusion qualitative et quantitative, et d'une simplification des formes représentatives.

Figure 61 : Cohérence entre les notions de généralisation selon Gerhard Schweinfurth (1984).

domaine d'application catégories		Généralisation objets							Généralisation cartographique						
Généralisation géométrique		○	○	○	○	○	○	○	●	●	●	●	●	●	●
Généralisation conceptuelle	qualitative				○	○	○	○				●	●	●	●
	quantitative				○	○	○					●	●	●	
Généralisation temporelle		*elle ne joue aucun rôle en cartographie topographique à partir du moment où il s'agit de la représentation d'une situation*													
Catégories	processus élémentaires	simplifier	agrandir	déplacer	sélectionner	grouper	typifier (classifier)	évaluer	simplifier	agrandir	déplacer	sélectionner	grouper	typifier (classifier)	évaluer

La figure 8 montre que, par généralisation cartographique, l'auteur se restreint à l'un des domaines d'application de la généralisation, qui induit toutes les opérations de généralisation intervenant dans la production de la carte finale, à partir d'une carte donnée en entrée.

Il reprend la classification des méthodes de généralisation automatique du relief édifiée par Wigand Weber (1982) :

· généralisation orientée information (pour exemple voir les travaux de [Bjørke et Midtbø, 93]) ;

· généralisation orientée filtrage (cf. infra 3.1.1.2) ;

· généralisation heuristique (cf. infra 3.1.1.2).

La généralisation fondée sur la transformation de l'information serait certainement la plus adaptée conceptuellement, mais elle est techniquement la plus dure à réaliser. Par nature, la majeure partie des opérations jusque-là développées, et certainement aussi la généralisation manuelle, relèvent de la généralisation heuristique, qui intègre des concepts de généralisation orientée information et de généralisation orientée filtrage.

La généralisation des courbes de niveau est la représentation du paysage d'une carte donnée adaptée à la carte souhaitée. La détermination d'une équidistance plus grande en est la première opération : ne sont acceptées à l'échelle finale que les courbes initiales explicitement sélectionnées. A partir de ce choix, un processus de lissage des lignes conduit à une simplification des formes. Cette opération doit cependant maintenir une représentation expressive des formes géomorphologiques et doit faire ressortir les caractéristiques des grandes formes du paysage à travers l'image des courbes de niveau.

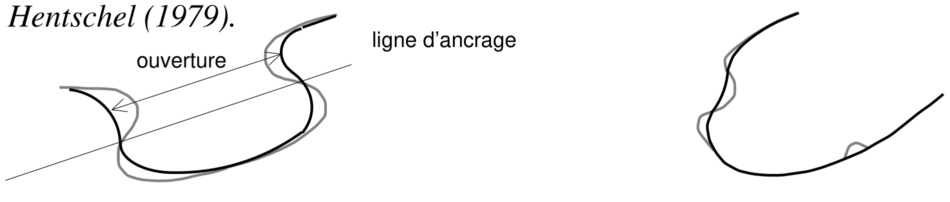
3. 1.1.2. Des opérations de généralisation des courbes de niveau

[Hentschel, 79] résume la généralisation de courbes de niveau par la réunion de plusieurs opérations élémentaires :

- le changement d'équidistance par élimination de certaines lignes ;
- la simplification des formes ;
- le déplacement des objets topographiques.

Il présente pour cela un ensemble d'opérations de généralisation des courbes de niveau. En accord avec les opérations principales de simplification manuelle des courbes de niveau (cf. supra 1.2), les algorithmes de simplification de forme doivent être en mesure de lisser les courbures. De par sa nature, la simplification a pour conséquence que les points d'inflexion principaux restent maintenus et que de faibles flexions disparaissent tandis que d'autres s'ouvrent selon les directions des lignes d'ancrage (cf. figure 9.a). Les algorithmes doivent aussi être en mesure d'atténuer les petites formes à forte courbure et, le cas échéant, de les éliminer (cf. figure 9.b). Les figures 9 à 11 montrent en gris les lignes initiales et en noir les tracés lissés ou exagérés obtenus avec les principes énoncés précédemment.

Figure 62 : Opérations de simplification de la forme d'une courbe de niveau selon Wolfgang Hentschel (1979).

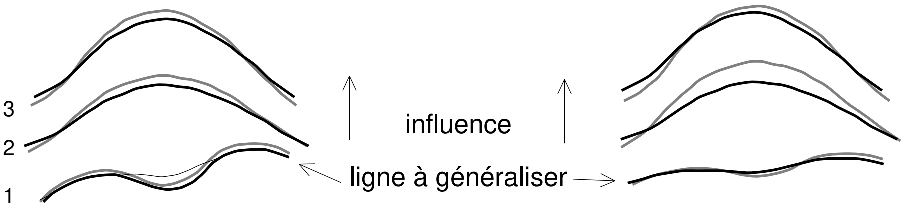


a : Atténuation des courbures dans le sens des maxima de courbure.

b : Généralisation des petites formes.

Cependant, il ne suffit pas de sommer l'information que l'on a sur les courbes de niveau traitées individuellement. La représentation par courbes de niveau décrit une surface. Il est donc raisonnable en plus de l'influence de la propre courbure d'une courbe, de prendre en compte la configuration des lignes avoisinantes dans la généralisation. Lorsque l'équidistance visée n'est plus respectée, une partie du contenu de l'information doit être transmise vers la ligne à généraliser. Ainsi, la conservation des écarts entre lignes voisines pour préserver la pente influe sur la forme des courbes individuelles (cf. figure 10.a).

Figure 63 : Influence du voisinage sur la forme finale des courbes de niveau.



a : Influence du voisinage par conservation de l'écart. *b : Influence du voisinage en vertu de la forme.*

L'exemple de la figure 10.a montre, sur la ligne 1, qu'à l'endroit de la petite forme la courbe n'est pas généralisée telle que l'envisage le trait fin (ce qu'on aurait obtenu sans la conservation de l'écartement) et que le creux est accentué. En outre, la forme de cette ligne renforce un peu le degré de généralisation de la ligne du milieu, ce qui va à l'encontre d'une reproduction la plus fidèle possible des formes du paysage. En fait, l'affaiblissement du degré de généralisation de la ligne 1 en faveur du maintien de la forme est préférable (cf. figure 10.b). Ainsi, les formes spécifiques peuvent être représentées à l'échelle finale d'une manière satisfaisante.

La différence de courbure entre une courbe de niveau et ses voisines (différence entre les rayons de courbure) permet de renforcer une forme locale et d'atténuer, par là même, le degré de simplification de la ligne. Ainsi, avec la diminution de la pente, et donc l'accroissement de l'équidistance entre les courbes de niveau, la ressemblance des formes simples augmente et par conséquent l'influence des lignes voisines ne se justifie plus.

Figure 64 : Influence du voisinage sur la sélection des petits thalwegs.

a : Elargissement d'un thalweg. *b : Elimination d'un petit thalweg.*

La détection des petites vallées à supprimer doit aussi être assurée par les algorithmes de généralisation (cf. figure 11.b). En généralisation manuelle, le cartographe repère visuellement les thalwegs et choisit le degré de généralisation par expérience. Il convient de traduire en un critère numérique la connaissance du cartographe. La mesure de la courbure doit permettre de généraliser plus fort les petits thalwegs qui présentent un rayon de courbure plus petit (cf. figure 11.a).

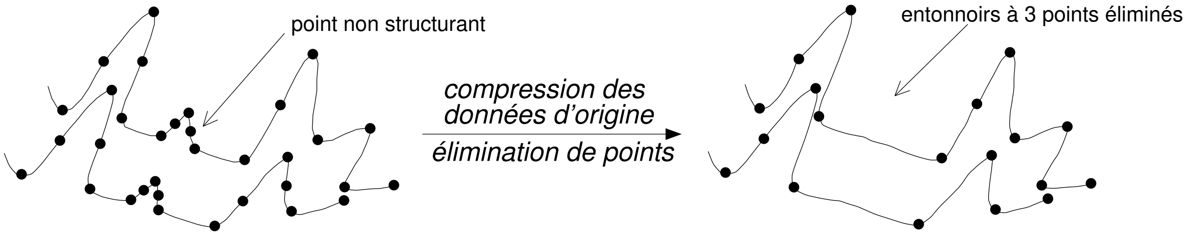
Enfin, dans le cas où les lignes avoisinant une courbe à généraliser ne possèdent pas de petite flexion alors qu'elle-même en a une (comme sur la figure 11.b), cette flexion sera considérée en tant que petite forme. Par conséquent, elle paraîtra soit affaiblie, soit éliminée à l'échelle finale.

Dans le cadre de la généralisation des courbes de niveau, [Wu, 81] a proposé une autre approche fondée sur la recherche des lignes de structure. Dans cette optique, il part de la constatation suivante : les lignes de structure (thalwegs et crêtes) jouent en généralisation traditionnelle du relief un rôle très important. En effet, de par leur nature (lignes à propriété géomorphologique et perpendiculaires aux isolignes), elles retracent la cohésion entre les courbes de niveau et forment ainsi le squelette de la représentation des formes du paysage. L'information du passage d'une telle ligne est contenue dans les courbes de niveau et doit être utilisée dans les processus numériques. Les différentes discontinuités du terrain pourront alors être repérées et donneront une structure à l'ensemble des courbes.

La stratégie proposée par He-Haï Wu (1981) se décompose en sept étapes :

- numérisation des courbes de niveau ;
- compression des données ;
- normalisation des données d'origine, création d'une grille irrégulière à mailles quadrangulaires et interpolation des valeurs d'altitude aux nouveaux points d'intersection ;
- recherche, poursuite et élimination (critère de longueur) des lignes de structure secondaires ;
- effacement de tous les points qui ne sont pas des points de structure dans les données d'origine (cf. figure 12) ;
- identification de tous les petits thalwegs (entonnoirs) et élimination des points associés ;
- contrôle des données généralisées.

Figure 65 : Réduction du nombre de points d'une polyligne selon He-Haï Wu (1981).



3. 1.2. Généralisation d'une grille régulière

Le deuxième type de représentation numérique du terrain étudié dans le cadre de la généralisation a fait l'objet de peu de travaux. La complexité du problème vient en partie du fait qu'il n'existe aucune règle équivalente à celles décrites par [Imhof, 82] qui provienne de la cartographie traditionnelle et sur laquelle s'appuieraient les décisions de généralisation. Ce sont en effet les courbes de niveau qui sont ordinairement traitées par le cartographe et l'estompage est ensuite ajouté pour redonner une impression de continuité entre les courbes et les volumes. La méthode de généralisation envisageable pour la généralisation d'un MNT à maillage régulier est une démarche heuristique dont une étape obligée est l'extraction d'informations géomorphologiques. Des travaux ont été menés qui visent la généralisation d'un MNT dans un but cartographique par filtrage dans le domaine fréquentiel [Schmid-McGibbon, 95]. Cependant, une distinction est faite entre analyse géomorphologique et cartographie qui pourtant sont indissociables pour une représentation fidèle des formes du paysage.

En regard de notre analyse des informations spatiales disponibles (cf. partie IV), les opérations de généralisation peuvent agir sur deux types de structure des données : orientée objet comme représentation numérique des réseaux d'éléments caractéristiques et champ continu comme représentation de la topographie.

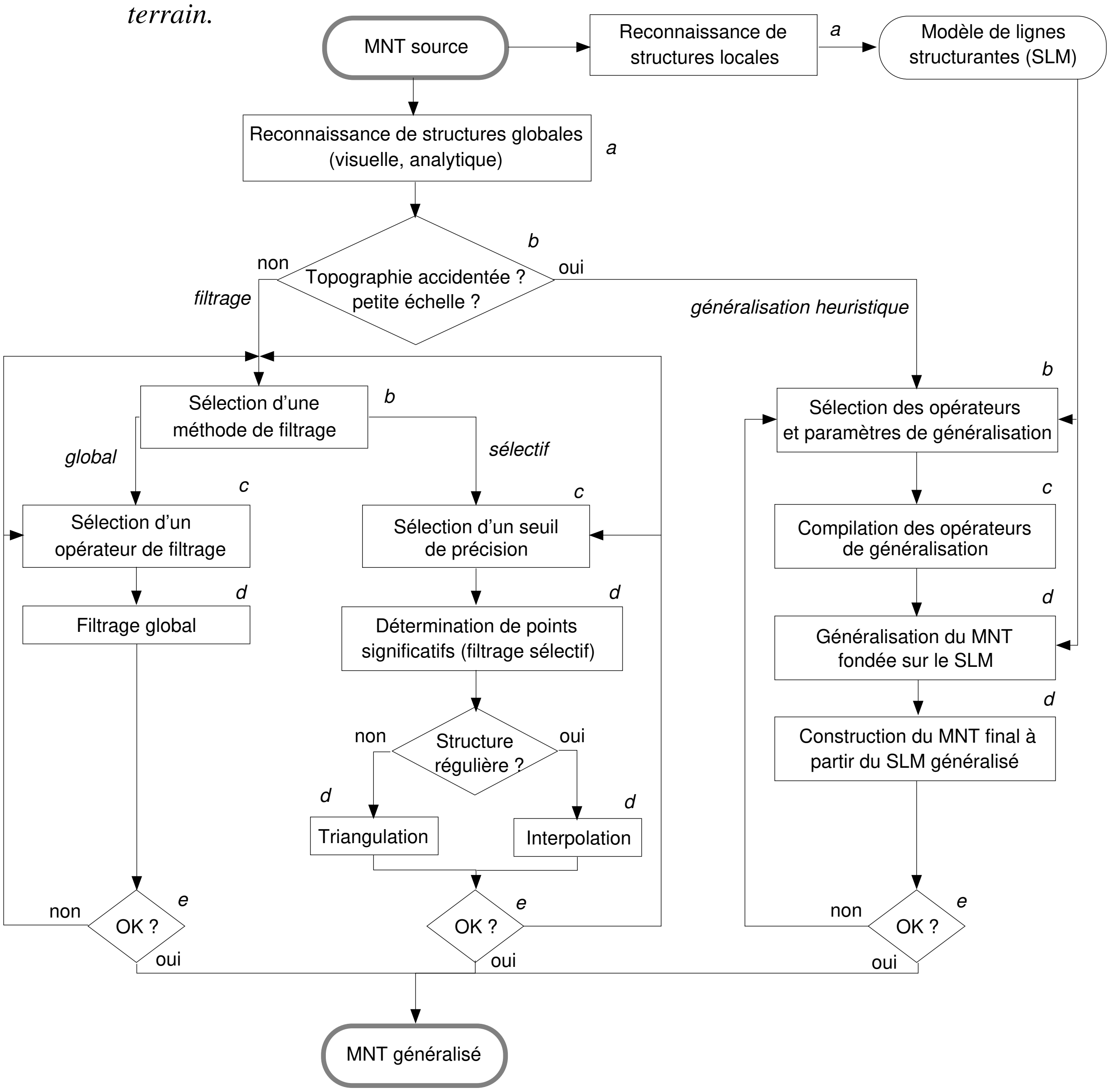
3. 1.2.1. La généralisation selon Robert Weibel

La démarche de Robert Weibel (1989) se fonde sur une progression en cinq étapes représentée par le diagramme de la figure 13 : *(a)* reconnaissance de structure, *(b)* reconnaissance de processus, *(c)* modélisation des processus, *(d)* exécution des processus, *(e)* visualisation et validation des résultats. L'auteur propose un choix de trois méthodes de généralisation exprimées par les trois chemins possibles.

La reconnaissance de structures consiste en l'extraction de la structure contenue dans la base de données cartographiques source. Elle détermine la géométrie, la topologie et la signification des objets cartographiques (ou des agrégats). D'après la classification des tâches de généralisation définie par [Armstrong, 91], cette reconnaissance relève de l'extraction d'une connaissance géométrique et procédurale (cf. supra 2.2). Il existe au moins deux niveaux d'analyse, local et global. La reconnaissance de structure globale revient à évaluer le caractère global du terrain et éventuellement à sous-diviser le MNT en morceaux soumis à des méthodes de traitement différentes. Il s'agit ici d'appliquer les principes de géomorphométrie générale (principes développés dans la partie III). Pour la généralisation, une classification grossière suffit (cf. parties III et IV). L'une des tâches principales détectées par l'auteur est de subdiviser par partition le MNT en régions : celles qui sont le mieux traitées par une généralisation heuristique et celles qui nécessitent une autre méthode. La reconnaissance de structures locales détermine les structures essentielles du terrain. Les formes sont ici représentées par leurs lignes structurantes et des points significatifs. Il est ainsi créé un modèle de lignes de structures (SLM pour *Structure Line Model*, dont certaines méthodes d'extraction ont été analysées dans la partie III).

La reconnaissance de processus sert à identifier les opérateurs et les paramètres appropriés pour résoudre une certaine tâche de généralisation. En cela, cette tâche détermine comment la source doit être modifiée, les types de conflits à résoudre, les types d'objets et de structure qui doivent être préservés.

Figure 66 : La stratégie de Robert Weibel (1989) pour une généralisation automatique du terrain.



3. 1.2.2. Des opérations de généralisation heuristique

En regard des douze opérations applicables à des données planimétriques décrites dans [McMaster et Shea, 92] (cf. supra 2.1.3), [Weibel, 92] sélectionne un ensemble de cinq méthodes. Chacune prise individuellement possède différentes propriétés selon les opérateurs qu'elle utilise. Ainsi, le filtrage global (première branche du diagramme de la figure 13) se fonde sur la simplification et la caricature ; le filtrage sélectif (deuxième chemin) sur la sélection et la généralisation heuristique est habilitée à combiner les cinq méthodes. Nous distinguons deux types de traitement : orienté surfacique (application de masques discrets à une grille régulière) et orienté réseau (application d'opérateurs empruntés au linéaire sur les réseaux d'éléments structurants), qui peuvent être combinés. L'intérêt d'une différenciation des types de traitement repose sur leur adaptabilité à traiter des reliefs disparates. D'une manière générale, un traitement orienté objet sera plus efficace s'il est appliqué sur une zone à forte densité d'éléments structurants (montagne). Inversement, un traitement surfacique est plus adapté à la simplification d'une zone de plaine. Les modèles utilisés pour ces opérations simulent, en première approche, les principes de la cartographie manuelle [Weibel, 92] :

· sélection : la sélection permet de clairsemer l'espace cartographique ; les éléments jugés non importants sont éliminés pour laisser de la place aux plus importants ;

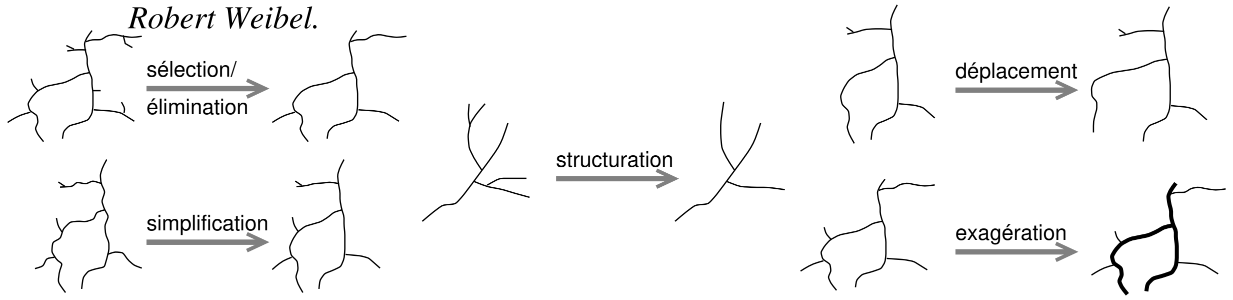
· simplification : la simplification s'applique sur les lignes de structure ou les surfaces qui deviendraient bien trop détaillées sur la carte finale ; les seuils peuvent ainsi être déterminés par rapport aux limites graphiques et au facteur de réduction d'échelle ;

· structuration : avant la sélection et la simplification, les lignes de structure d'un même type (thalweg ou crête) peuvent être typifiées si elles encombrent trop densément l'espace ;

· déplacement : le déplacement suit une simplification et une structuration ;

· exagération: l'exagération permet d'élargir les formes particulières (petites mais importantes) en les modélisant en tant que ligne de rupture de la topographie (par exemple, par exagération verticale).

Figure 67 : La représentation des cinq opérateurs de généralisation du relief empruntés à Robert Weibel.



3. 1.2.2. a. Opérateurs de simplification des réseaux

Trois des opérateurs cités ci-dessus sont purement orientés réseau : la sélection, la structuration, le déplacement (cf. figure 14). Le critère de sélection des éléments caractéristiques repose sur la hiérarchisation des réseaux d'éléments structurants (une proposition est mentionnée dans la partie IV ainsi que certaines propriétés à respecter). La sélection ne consiste cependant pas à éliminer le plus possible de liens de faible valeur hiérarchique. Un nombre de liens est fixé qui devrait être éliminé par rapport à la classification hiérarchique de tous les liens. Le principe de la loi par radical (*Radical Law*) énoncé dans [Töpfer et Pillewizer, 66] est une propriété de généralisation cartographique reconnue intuitivement, qui n'a tout d'abord pas poussé les cartographes à rechercher une expression mathématique pour la modéliser. Dans sa forme simplifiée adaptée aux cartes à échelle topographique[1], le principe s'exprime par :

$$n_f = n_a \sqrt{\frac{M_a}{M_f}}$$

où n_f est le nombre d'objets qui peuvent être montrés à l'échelle finale, n_a est le nombre d'objets montrés sur la carte source, M_a et M_f sont les dénominateurs des échelles source et dérivée.

---

[1] Le détail est figuré par un symbole sur la source, qui est plus ou moins conforme à la vraie dimension des objets et qui fournit une représentation "complète" du terrain.

[Wang et Müller, 91] estiment que l'application directe de cette formule pour estimer la réduction du réseau de rivières (et par ailleurs du réseau de crêtes) n'est pas réaliste. La solution pratique adoptée est de trier les cours d'eau après évaluation de leur longueur. Une rivière est composée de tronçons dont le premier en amont est comparé avec le seuil : le quotient de la somme des longueurs des drains éliminés sur la longueur totale initiale fournit le pourcentage d'informations éliminées. Une fois que le pourcentage est proche de celui requis par la loi de Töpfer, le seuil peut être utilisé comme critère d'élimination.

La structuration est une opération très utile pour éliminer les petites fourches composées de deux liens qui apparaissent aux extrémités des réseaux (cf. partie III). Etant donnée qu'elle opère avant la sélection, il est important de mettre à jour les attributs hiérarchiques après son utilisation. En fait, le terme employé par [Weibel, 89:178] est *zusammenfassen*. En rapport à la taxonomie proposée par l'OEEPE (cf. supra 2.4), cette opération correspond plutôt à une structuration si l'on considère chaque lien pris séparément et à une simplification de réseaux si l'on considère l'objet complexe constitué de plusieurs liens. C'est pourquoi, plutôt que traduire l'opération par *combinaison* ou *fusion*, nous avons plutôt choisi *structuration*.

La structuration agit sur deux liens extérieurs de même type qui sont incidents à un même nœud. Dans [Weibel, 92], le seuil est déterminé par l'utilisateur et comparé au calcul d'une distance D entre eux telle que D soit le ratio de l'aire comprise entre les deux liens par la longueur du lien le plus long. Les coordonnées du nouveau lien sont déterminées par la moyenne des x, y, z des deux liens (avec ou sans pondération). Si le nombre de points n'est pas égal pour les deux liens, le plus court est densifié par interpolation linéaire. Une méthode de structuration est proposée plus loin qui évite la densification du lien le plus court et certains effets indésirables (conflit contextuel : proximité) qui conduisent ensuite à une correction par déplacement (cf. infra 3.2.1).

Comme la structuration, le déplacement est un opérateur délicat qui exige une prise en compte du contexte. Par exemple, si une crête est déplacée, il faut veiller à ce que la nouvelle position de la crête ne crée pas une situation conflictuelle avec un thalweg voisin (cf. supra 2.2). En général, le déplacement est utilisé en conséquence d'une autre opération : on parle alors de *déplacement réactif* [Ruas, 97]. Pour déterminer la priorité parmi les objets à déplacer, [Weibel, 92] considère que les lignes sont prioritaires sur les points ; la ligne avec la plus grande emprise a priorité ; le thalweg bouge et la crête reste à la même place. L'emprise d'un lien peut être calculée, par exemple, à l'aide du diagramme de Voronoï construit autour des segments et des nœuds du réseau (cf. infra 3.2.1).

La simplification est une opération qui a la particularité d'être adaptée au traitement des deux types de structure de données. Dans le cas de réseaux, une distinction est faite entre simplification planimétrique d'une ligne et simplification le long du profil de la ligne. La simplification planimétrique peut utiliser un algorithme de filtrage ou de lissage. Cependant, dans le cas d'un filtrage, des points sont supprimés qui pourtant seraient utiles lors de la phase subséquente d'interpolation du SLM en un MNT. Une discussion à propos des opérateurs de filtrage et de lissage apparaît dans le paragraphe 3.2.1. D'après [Weibel, 92], la simplification le long du profil des lignes structurantes n'a lieu que si la réduction d'échelle est importante et, dans ce cas, les altitudes sont lissées par moyennage.

Les opérations de généralisation appliquées sur un SLM conduisent à un SLM généralisé, le MNT résultant se construisant à partir des éléments du SLM généralisés. [Weibel, 92] fonde l'étape de reconstruction sur une triangulation de Delaunay pour générer un TIN approchant la topographie et à partir duquel peut être interpolé un maillage régulier (cf. partie II). L'exagération de réseaux intervient au moment de la reconstruction en traitant certaines lignes comme des lieux de fortes discontinuités. Nous analysons les effets d'une exagération dans le paragraphe 3.3.1.

3. 1.2.2. b. Opérateurs surfaciques

Nous considérons ici les opérateurs de simplification et de caricature qui sont, en fait, soit utilisés pour traiter la surface isolément, soit en combinaison avec les éléments structurants. La simplification surfacique est un lissage des valeurs d'altitude. La caricature, quant à elle, correspond alors à un masque de lissage contraint par les lignes de structure : si le masque n'est pas centré sur un élément caractéristique, alors les valeurs sont lissées par convolution avec le masque, sinon on opère un rehaussement des crêtes et un abaissement des thalwegs (caricature par exagération verticale), ou bien on maintient les valeurs initiales (caricature par un lissage des versants).

L'expression mathématique générale du traitement global d'un MNT à maillage régulier par un masque mobile $n \times n$ est donnée par :

$z(x, y)$: description du MNT
n : côté de la fenêtre
$k = \frac{n-1}{2}$

La convolution avec un masque $h(u,v)$ transforme z en z' par la formule :

$$z'(x, y) = \frac{1}{n^2} \sum_{u=0}^{n-1} \sum_{v=0}^{n-1} z(x+k-u, y+k-v)\, h(u, v)$$

Parmi les masques applicables, une distinction est faite entre les masques de lissage où la somme des poids égale 1 et les masques différentiels où elle égale 0. Dans [Weibel, 89], sont présentés des masques classiques tels que:

· le filtrage binomial (forme d'une gaussienne) :

$$C(d) = e^{a^2 d^2}$$

où $C(d)$ fournit la valeur des poids dans le voisinage *d* du centre du masque et *a* est un paramètre qui est évalué empiriquement par $a = 0.83$. Le masque qui en découle est donné par la matrice :

$$G = \frac{1}{16} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

· l'opérateur de Laplace s'exprime dans le domaine continu par :

$$\frac{d^2h(x, y)}{dx^2} + \frac{d^2h(x, y)}{dy^2} = 0$$

et le masque qui lui correspond est donné par : $H = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$

D'une manière générale, plus les masques sont grands, plus l'aplatissement des formes du terrain est important. De même, le lissage augmente avec le nombre d'itérations. Nous présenterons un nouvel opérateur de lissage dans le paragraphe 3.3.2.

En outre, [Weibel, 89] propose un filtrage sélectif construit à partir de l'algorithme de filtrage ATM (*Adaptative Triangular Mesh*) défini dans [Heller, 90] intéressant pour le traitement de régions pas réellement lisses (et donc non candidates à un traitement par convolution avec un masque) et non érodées par le système hydrique (non candidates pour une généralisation heuristique).

Actuellement, des travaux ont lieu qui étudient les possibilités de manipulation géométrique des surfaces topographiques par la création d'un ensemble d'opérateurs régionaux [Westort, 96]. Quatre composantes sont identifiées qui participent à la constitution d'un ensemble d'opérations de sculpture du terrain :

- des opérateurs de généralisation : lisser / rendre rugueux, perforer / tirer, couper / joindre…
- une bibliothèque de primitives géométriques : collines, bassins…
- des opérateurs dynamiques: tordre / rendre droit, amincir / élargir, élever / abaisser…
- des fonctions génériques empruntées au dessin assisté par ordinateur (CAD pour *Computer aided Design*) : transformations (rotation…), sélection, placement…

L'implantation d'une telle plateforme est prometteuse pour le traitement des MNT. Il serait notamment intéressant d'y intégrer des fonctions d'analyse numérique du terrain de façon à définir des régions de travail à nature géomorphologique.

3. 2. Notre démarche

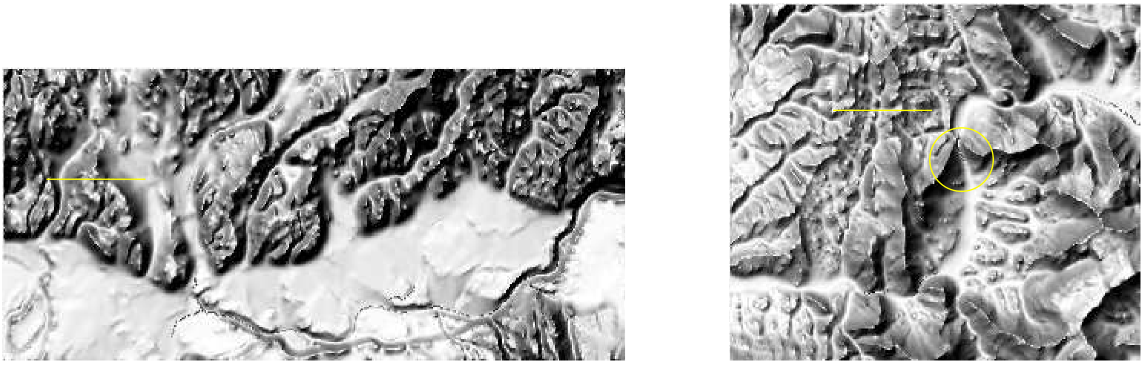
En regard de notre analyse des travaux antérieurs, la généralisation du relief doit être dépendante de la structure du phénomène traité et du but de la carte (cf. supra 1). Parmi les formes du relief, certaines doivent être adressables en tant qu'objet pour permettre l'application de certaines opérations locales telles que le déplacement sur des formes individuelles. D'autres peuvent être traitées à l'aide d'un opérateur plus global tel qu'un lissage. Aussi, la définition de notre stratégie de généralisation doit être suffisamment souple et cohérente pour faciliter l'intégration d'un large éventail de méthodes aux caractéristiques complémentaires. La sélection de la méthode la plus appropriée aux cas de figures rencontrés doit être guidée par la reconnaissance de structure et le type de topographie.

Afin de remplir ces exigences, la modélisation des données source doit être adaptée aux différentes manipulations engendrées par le processus global de généralisation automatique. Ces données contiennent une information sémantique et géométrique dont l'organisation dépend de son utilisation. Nous avons établi dans la partie IV que nous disposons de deux types de structure pour modéliser nos données : des champs continus en tant que représentations des variations de la topographie et une vue structurée pour représenter les crêtes et les thalwegs.

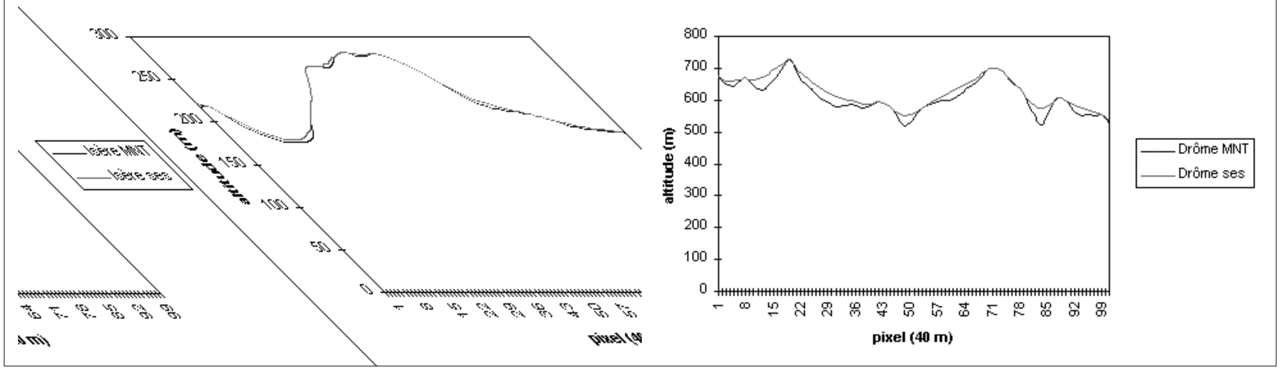
3. 2.1. Limitations d'une démarche non adaptative

Une démarche de généralisation non adaptative consisterait à traiter toutes les données contenues dans un MNT ou un jeu de courbes de niveau par la même opération, un même algorithme ou une même séquence d'algorithmes avec les mêmes paramètres, indépendamment des disparités de relief présentes dans la région. Cette solution n'est pas satisfaisante puisque, intuitivement, une plaine homogène sera lissée tout en maintenant les chemins de drainage principaux, par exemple un bassin sédimentaire au relief plat coupé d'échancrures marquant le passage d'une rivière. Un massif montagneux, par contre, sera simplifié en fonction de sa structure composée essentiellement de crêtes et thalwegs et qui diffère selon le type du plissement (massif jeune, ancien ou à nature volcanique, cf. partie II). Le même lissage appliqué en plaine et en montagne donne généralement un résultat catastrophique pour l'une des deux régions (cf. figure 15).

Figure 68 : Application du même opérateur avec les mêmes paramètres sur deux reliefs disparates : la surface enveloppe sommitale (3 itérations, fenêtre 5×5).



a : Zone de faibles collines. *b : Zone de montagne.*



L'application d'une même opération avec le même algorithme et les mêmes paramètres entraînent non seulement la disparition de formes caractéristiques, mais en plus, des déviations importantes en planimétrie ou en altimétrie des points caractéristiques. Le cercle apposé sur l'imagette 15.b désigne le lieu où il y a une modification majeure du cours de la Drôme, qui se trouve déconnecté au niveau de la confluence avec la Sure. Les faux sommets qui apparaissent sur la même imagette sont en fait des vestiges de crêtes mal lissées (voir le profil correspondant).

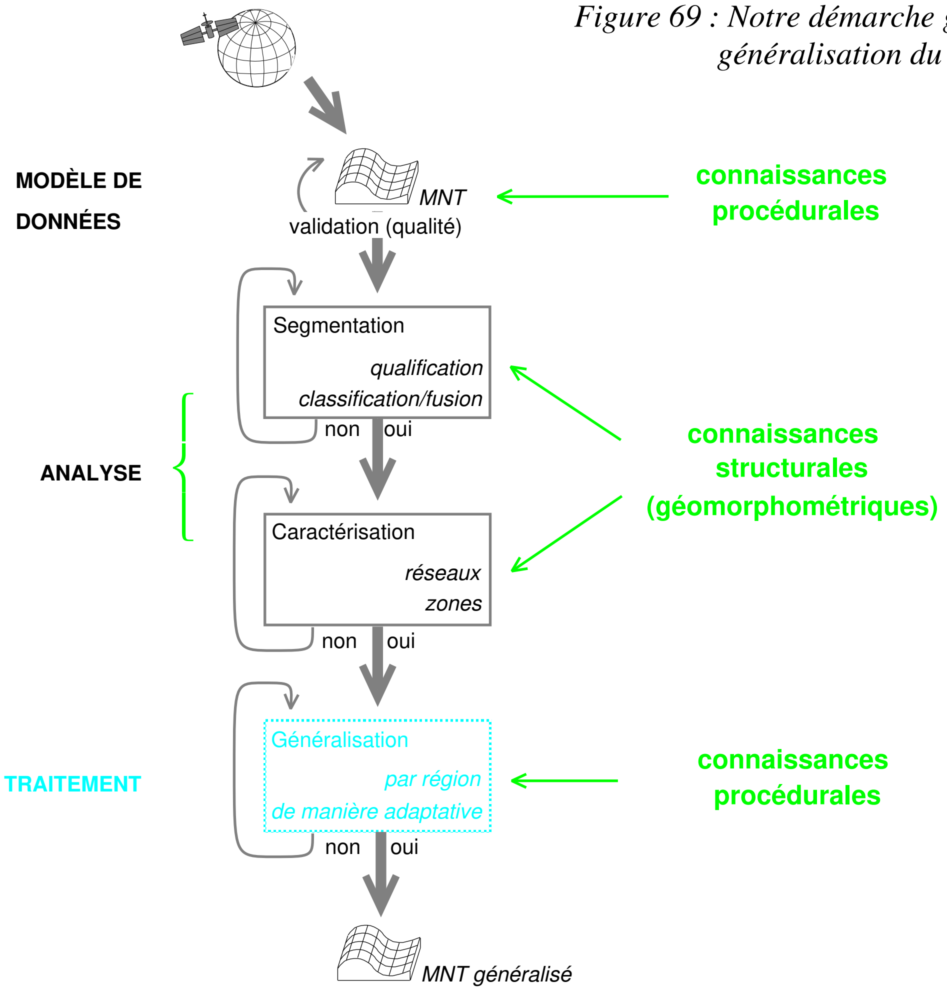
La modélisation des données terrain sous la forme d'un MNT ne permet, en première approche, qu'un traitement global de bas-niveau car il ne fournit explicitement aucune information sur la structure ou le type de terrain, l'information altitude étant portée très localement par le point. Une telle représentation ne suffit par conséquent pas à adapter les méthodes de généralisation aux types de relief implicitement contenus dans les données. Il manque donc une information qui peut être extraite du MNT initial, plus précisément les réseaux de crêtes et thalwegs, les zones où le relief est homogène, les formes particulières et les accidents du terrain.

3. 2.2. Démarche locale et contextuelle

Le message orographique porté par la carte est constitué de l'ensemble des formes du paysage. Ces formes sont discernables par leurs particularités, caractère similaire dans un type de relief et accidents du terrain. Ainsi, dans le domaine du numérique, il est important de pouvoir appliquer des traitements globaux sur toute une région homogène et locaux sur une forme individuelle. L'application globale d'un traitement n'est possible que s'il est très doux, ce qui limite également son intérêt puisqu'il faut ensuite regénéraliser les zones de façon locale. Toutefois, un traitement global peut être intéressant en fin de traitement pour harmoniser le résultat final.

Notre hypothèse est d'ajouter des éléments qui qualifient mieux le relief et qui peuvent être pris en compte soit pour le choix des méthodes, soit par un algorithme.

Figure 69 : Notre démarche globale de généralisation du relief.



Notre démarche conceptuelle de généralisation du relief se décompose en plusieurs phases dont la première s'appuie sur un modèle initial de données structuré par un maillage régulier de l'espace (cf. figure 16). Il existe divers procédés de construction d'un modèle numérique de terrain qui dépendent des techniques d'acquisition des données brutes et de la méthode d'interpolation, et qui s'appuient sur une connaissance procédurale complexe. La validation du MNT nécessite, en outre, une connaissance structurale qui permet de vérifier la fidélité des formes géomorphologiques, dont le procédé le plus commun est la visualisation.

Le MNT initial ne contient *a priori* aucune information topographique explicite qui constituerait la connaissance géométrique sur laquelle agissent les opérateurs de généralisation. Le premier objectif d'une démarche globale est de fournir une analyse quantitative qui extrait, traite et interprète l'information pertinente et nécessaire. Cette analyse requiert deux phases fondamentales : la première étape définit une segmentation de l'espace en zones à topographie homogène et la seconde caractérise chacune des zones préalablement délimitées. Le but est d'adapter une méthode globale de généralisation par type de relief identifié.

La démarche dans son ensemble ne sera validée que si elle est appliquée d'un bout à l'autre. D'une manière plus algorithmique, elle se décrit par huit étapes représentées par le diagramme de la figure 17 emprunté au modèle de [Weibel, 89] :

· *a* : extraction des réseaux d'éléments structurants ;

· *b* : segmentation du MNT source en zones topographiquement homogènes, fondée sur une sélection de points bas et de points hauts selon un critère d'entrelacement et d'encaissement des réseaux ;

· *c* : hiérarchisation et qualification des réseaux, caractérisation des zones topographiques avec détection des accidents du terrain et des transitions géomorphologiques ;

· *d* : choix d'une méthode de généralisation en fonction de la topographie globale (d'une zone homogène) et locale (accidents du terrain, densité d'éléments) ;

· *e* : application d'une séquence d'opérations (choix des algorithmes et des paramètres) ;

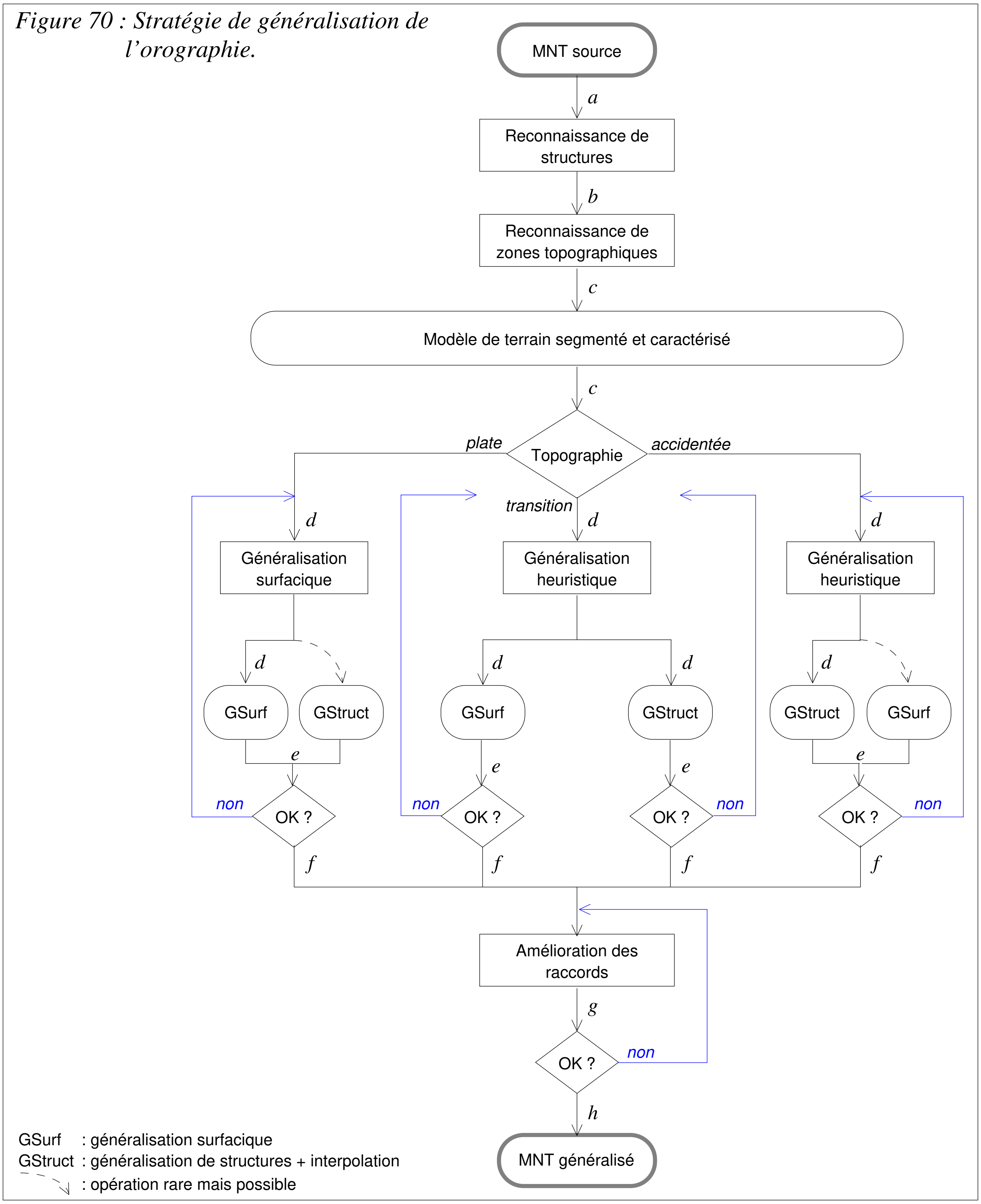
· *f* : validation de la séquence d'opérations et du résultat obtenu pour chaque opération (satisfaction des contraintes) ;

· *g* : harmonisation du résultat par le lissage des zones de raccord (lieu de changements de topographie) ;

· *h* : validation du MNT dans sa globalité.

L'objectif des paragraphes qui suivent est de décrire les différentes branches du diagramme. Les premières étapes *a*, *b* et *c* ont été décrites dans les parties III (segmentation) et IV (caractérisation). La généralisation proprement dite intervient à partir de l'étape *d*. Après avoir défini les déclencheurs de la généralisation du relief et les avoir traduits pour nos modélisations, nous présenterons les opérations dont le choix dépend de la topographie. Puis nous conclurons sur des méthodes d'évaluation possible (*f* et *h*).

Figure 70 : Stratégie de généralisation de l'orographie.



3. 2.3. Contraintes de généralisation du relief

Les règles, qui doivent être appliquées lors du passage d'une échelle cartographique à une échelle plus petite, sont empruntées d'une part à la cartographie traditionnelle (cf. partie II et supra 1.2.1) et d'autre part à la géomorphologie (cf. partie II). Les règles doivent tendre à guider la généralisation de l'orographie. Elles sont ensuite adaptées à la représentation cartographique ou numérique. [Imhof, 82] a ainsi énoncé un ensemble de règles qui ont été traduites pour une vue du terrain en courbes de niveau.

L'objectif majeur de la généralisation du relief est la conservation des formes caractéristiques, dont la géométrie est donnée par les réseaux, par les points caractéristiques et par les surfaces, à une échelle plus petite que l'échelle initiale. La résolution étant modifiée, la conservation des formes entre inévitablement en concurrence avec la contrainte de taille minimale imposée par la clarté et la lisibilité du produit final. Par exemple, une forme du réseau d'éléments structurants devant être maintenue parce qu'elle est importante, sera caricaturée si sa taille est inférieure à la taille minimale requise par la nouvelle résolution. De même, deux éléments linéaires de même nature seront traités à l'aide d'une structuration si leur écartement est inférieur au seuil de séparabilité. Nous avons établi un ensemble de contraintes de généralisation adaptées au traitement d'un MNT, dont la problématique est, pour chacune, traduite par nos modélisations. Il est en effet difficile de combiner des traitements simultanés sur une grille régulière et sur des vecteurs ; nous avons choisi d'exposer les deux types de modélisation séparément malgré leur complémentarité.

3. 2.3.1. Contraintes surfaciques

Ce type de contraintes s'appuie sur une représentation du terrain sous la forme d'un champ continu, duquel est extrait une information structurale.

- *Respect de la granularité :* le caractère géomorphologique d'une région doit être visible. Le choix des opérateurs, des algorithmes et des paramètres de généralisation doit être adapté à la topographie. Ainsi, en zone de montagne, on travaillera plutôt sur les structures et, en zone de plaine, sur la surface.
- *Homogénéité :* le contexte orographique définit le type de relief (caractère commun des formes). Toutes les formes appartenant au même contexte doivent être traitées avec le même degré de généralisation : si deux formes sont semblables avant généralisation, elles doivent se ressembler après généralisation. La segmentation du MNT initial en zones topographiquement homogènes permet de sélectionner un contexte. Dans une zone de plaine, on appliquera le même lissage global.
- *Conservation des accidents du terrain :* les accidents de terrain, tels qu'une colline dans la plaine ou un plat dans un massif montagneux, doivent être maintenus à partir du moment où leur emprise spatiale est suffisamment large. La taille minimale d'un accident à préserver sera déterminée en fonction de l'équidistance des courbes de niveau donnée par l'échelle finale et de la possibilité d'ajouter des courbes intercalaires dans la représentation.
- *Conservation de la cohérence morphologique :* l'application d'un opérateur de généralisation ne doit pas introduire de nouveaux artefacts dans les données généralisées (fausses ruptures de pente, fausses cuvettes, faux sommets, faux cols).

3. 2.3.2. Contraintes sur les éléments structurants

Ce type de contraintes concerne le traitement des réseaux d'éléments structurants.

- *Sélection des éléments :* la hiérarchisation préalable des éléments doit tenir compte de facteurs à nature géomorphologique et cartographique. Nous avons proposé une méthode de sélection des éléments linéaires dans la partie IV. Une sélection identique (contextuelle) doit avoir lieu pour les points caractéristiques, notamment par la prise en compte des points cotés. La hiérarchisation permet de donner un ordre d'importance aux éléments autrement que sur un critère de taille.
- *Maintien de la topologie :* la simplification des réseaux d'éléments structurants ne doit pas les déconnecter et doit donc préserver la connexité initiale. Pour cela, les opérations d'élimination ou de structuration doivent partir des liens extérieurs.
- *Taille et distance :* les formes doivent être visibles à la résolution finale (emprise et espacement). On déplacera ou on structurera deux éléments trop proches, on éliminera ou on agrandira une forme trop petite.

3. 2.3.3. Contraintes sur les interactions

Il existe des relations étroites entre le relief et tous les éléments géographiques qui apparaissent sur la surface terrestre (et aussi avec les éléments du sous-sol). L'interaction agit à double sens :

- le relief par rapport aux autres éléments géographiques ;
- les autres éléments géographiques par rapport au relief.

Les formes du paysage fournissent une information à prendre en compte lors de la sélection des autres objets. Par exemple, étant données deux collines dont l'importance est *a priori* équivalente et qui doivent être toutes deux éliminées, si un village est construit sur l'une des collines, cette dernière sera maintenue (caractère spécifique du village : *sur une colline*).

En outre, la généralisation des autres couches d'information doit être formalisée par un ensemble de règles qui contienne des contraintes quant à la position des objets sur le relief. Par exemple, la construction du réseau routier est contraint par la pente (cf. partie IV). De même, les cours d'eau obéissent à des lois physiques gouvernées par la pente. D'ailleurs, il faudrait qu'un même opérateur humain traite toutes les couches de façon à maintenir la cohérence et l'harmonie du produit final. L'harmonie du contenu sera aussi améliorée par une sélection préalable et globale des objets (et non pas seulement couche par couche) par rapport au but et à l'échelle de la carte visée.

Les interactions sont très difficiles à traiter du fait de l'importance des facteurs qui doivent être pris en compte ; elles correspondent à de nouveaux axes de recherche.

3. 3. Opérateurs de généralisation de l'orographie

La caractérisation du relief permet d'optimiser le choix des traitements. Dans la mesure où certains opérateurs agissent sur les structures linéaires des réseaux de crêtes et thalwegs et d'autres sur le MNT, ces deux types d'information sont qualifiés pour répondre aux besoins de la généralisation. Par là même, le mécanisme de généralisation repose sur :

- le choix d'une méthode de généralisation locale en fonction des caractéristiques de la zone ;
- sa réalisation avec propagation (gestion des frontières) ;
- son contrôle en fonction d'indicateurs quantitatifs et qualitatifs, et un contrôle de cohérence.

Nous donnons, dans les paragraphes qui suivent, une réponse aux questions fondamentales qui gèrent la procédure de généralisation et qui ont été posées dans [McMaster et Shea, 92] : quand et comment généralise-t-on l'orographie ?

3. 3.1. Généralisation de réseaux

La généralisation des structures repose sur l'extraction des éléments structurants du terrain, leur qualification puis leur simplification. L'extraction des réseaux d'éléments caractéristiques linéaires a été traitée dans la partie III (crêtes et thalwegs) et leur qualification dans la partie IV. Il convient maintenant de généraliser les réseaux de crêtes et thalwegs hiérarchisés. L'interpolation des réseaux généralisés permet ensuite de déduite un MNT généralisé (cf. partie II).

La généralisation de structures est une méthode pour traiter localement le MNT. Des opérateurs d'élimination, de simplification, de caricature ou de déplacement sont en effet appliqués sur les structures, soit planimétriquement, soit altimétriquement, afin de rendre la représentation du relief plus lisible. Les modifications géométriques appliquées sur les structures sont ensuite répercutées sur le MNT, grâce à des fonctions de propagation et d'amortissement le long de ces structures (par interpolation, par exemple).

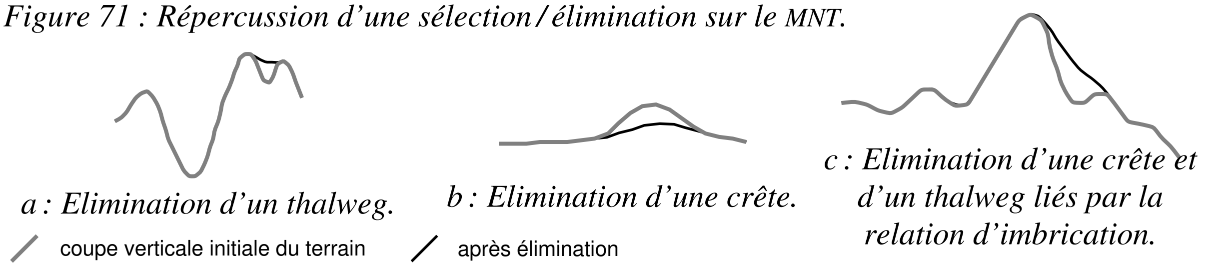
3. 3.1.1. Sélection

L'opération de sélection / élimination est déclenchée lorsque des éléments structurants sont trop petits ou trop proches, et peu importants.

La hiérarchisation des réseaux proposée dans la partie IV peut servir de base pour l'élimination des liens non importants. Elle se fonde sur l'imbrication des réseaux de crêtes et thalwegs ainsi que sur des critères géométriques et géomorphologiques. Lorsqu'on élimine une structure, il faut étudier sa signification sur l'orographie, *i.e.* le MNT.

Quelle répercusion l'élimination d'un lien a-t-elle sur le MNT (cf. figure 18) ? L'élimination d'un thalweg entraîne une élévation du terrain jusqu'à une hauteur moyenne, et ce, sur toute la longueur de l'ex-thalweg (équivalent à l'application d'une surface enveloppe sommitale localisée sur un thalweg, cf. infra 3.3.3). L'élimination d'une crête entraîne aussi des perturbations sur le MNT. Les valeurs d'altitude sont abaissées à une valeur moyenne, ce qui correspond à l'application d'une surface enveloppe anticlinale localisée le long d'une crête. Cependant, en certains endroits, l'élimination d'un thalweg peut engendrer l'élimination d'une crête voisine, et vice-versa, d'où l'importance de la relation d'imbrication (cf. partie III).

Figure 71 : Répercussion d'une sélection / élimination sur le MNT.



a : Elimination d'un thalweg.

b : Elimination d'une crête.

c : Elimination d'une crête et d'un thalweg liés par la relation d'imbrication.

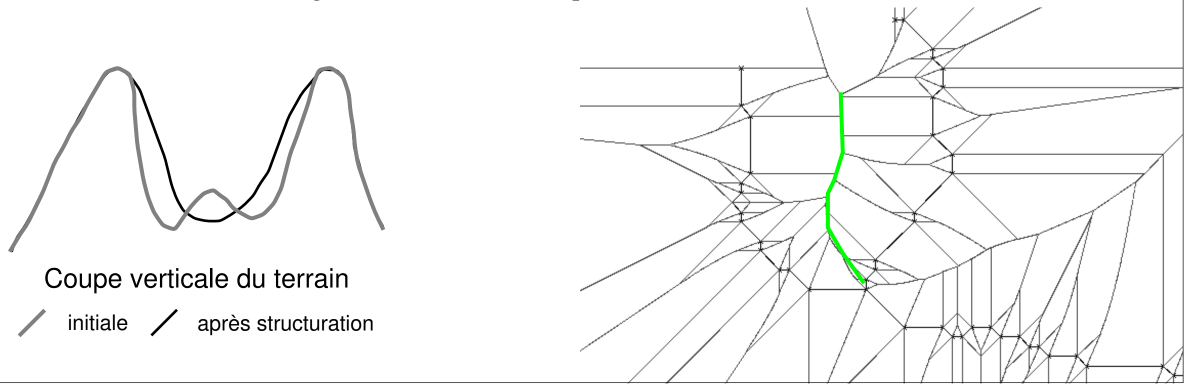
3. 3.1.2. Structuration

La structuration des réseaux a lieu lorsque deux éléments qui ont le même niveau hiérarchique sont trop près ou trop courts (souvent aux extrémités de crêtes).

Dans le cadre d'une généralisation contextuelle, la structuration de deux liens doit avoir lieu en fonction des autres liens présents dans le voisinage. Un outil puissant est le diagramme de Voronoï qui fournit une évaluation des relations de voisinage autour d'un élément. Il peut être calculé à partir d'un ensemble de segments (une méthode est détaillée dans [Hangouët et Djadri, 97]). Par exemple, sur la figure 19, deux drains du réseau de thalwegs à structurer apparaissent en noir, le diagramme est dessiné en rouge et le résultat de la structuration en vert. Construit autour de deux éléments à structurer, il permet de définir s'il existe un espace suffisant pour combiner les éléments et, le cas échéant, il fournit le tracé du nouvel élément sans ajouter de conflit de proximité.

Traduite en terme de surface, la structuration entraîne la formation d'un thalweg (ou d'une crête) dont la largeur occupe la place laissée par les deux thalwegs structurés. En cela, son action est équivalente à une élimination suivie d'une caricature planimétrique (élimination d'un thalweg et élargissement de l'autre thalweg).

Figure 72 : Utilisation du diagramme de Voronoï pour déterminer le site d'une structuration.



3. 3.1.3. Opérateurs pour la simplification

La simplification d'un tracé peut s'effectuer planimétriquement et altimétriquement ; elle est déclenchée lorsque les formes le long d'une structure sont trop petites et non importantes (cf. figure 9.b). On distingue ici deux groupes d'opérateurs de simplification. Les filtrages le long d'une ligne ont pour effet l'élimination de certains points et, par conséquent, l'élimination des formes de faible ampleur. Les lissages éliminent les petites formes par modification des courbures. Dans notre cas, un filtrage est utilisé dans l'objectif d'éliminer des formes et non des points puisqu'ensuite on cherchera à retrouver un MNT, les structures n'étant qu'une information intermédiaire. La répercursion de telles modification sur le MNT doit être étudiée.

Entre ces deux types d'opérateurs, on utilisera plutôt un filtrage dans des régions fortement accidentées, puisque tout filtrage accentue le caractère anguleux d'une ligne, et un lissage dans des régions aux formes plus molles. Pour cela, nous disposons d'outils provenant de la généralisation planimétrique du linéaire, et principalement du routier, dont la plupart sont répertoriés dans [OEEPE, 97]. Quelques essais ont été effectués sur l'altimétrie [Smith, 93], essais qu'il faudra davantage développer.

Les figures qui accompagnent la description du comportement planimétrique et altimétrique des opérateurs montrent des exemples d'application d'un algorithme classique qui n'est en aucun cas un choix décisif de l'algorithme idéal à utiliser. Le principe de l'algorithme est schématisé de la façon suivante : les lignes originales apparaissent en trait épais gris, les lignes simplifiées en trait épais noir, et les traits de construction en trait fin noir. Les résultats illustrent le comportement planimétrique des algorithmes : les crêtes et thalwegs sont représentés respectivement en vert et en mauve, et les positions initiales en pointillé noir.

3. 3.1.3. a. Filtrages

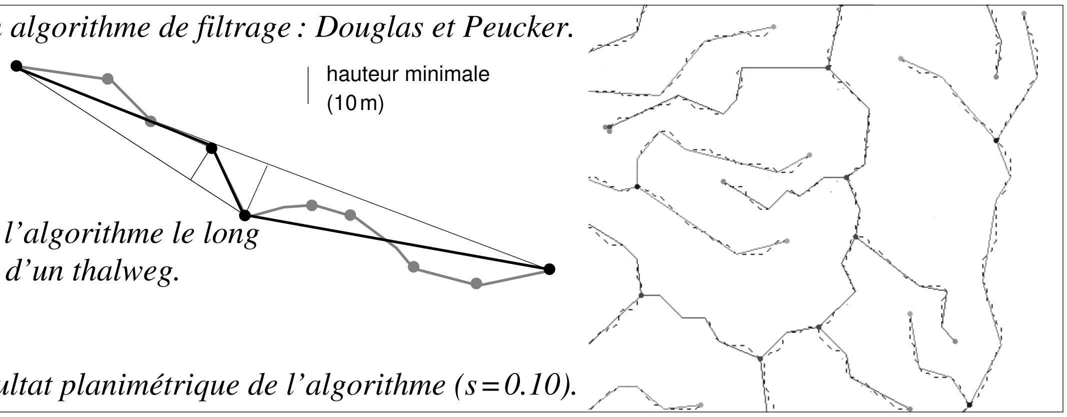
D'une manière générale, un filtrage appliqué sur une ligne supprime certains points intermédiaires (algorithmes de Lang, Thapa, Wall et Danielson…[OEEPE, 97]). Il entraîne, par conséquent, l'élimination des petites formes (bruit). Un équivalent existe pour les courbes de niveau, qui correspond à la suppression des petits entonnoirs formés de trois points telle qu'elle a été proposée dans [Wu, 81] (cf. supra 3.1.1.2).

Parmi les algorithmes de filtrage, nous avons retenu le plus connu qui est l'algorithme de Douglas et Peucker décrit dans [Douglas et Peucker, 73]. Pour chaque arc, les deux extrémités sont reliées par une ligne d'ancrage (cf. figure 20.a). On détermine la plus grande projection des points de l'arc sur l'ancrage. Si la longueur de la projection est supérieure à un seuil donné alors, l'ancrage est divisé en deux et l'opération est réitérée sur les deux tronçons ainsi créés, sinon tous les points entre les deux extrêmes sont éliminés. Cet algorithme est apprécié en généralisation car il examine une ligne dans son ensemble avant de la filtrer et il conserve les principaux sommets. Cependant, l'aspect courbe des sinuosités disparaît. Les formes sont dégradées et fournissent des lignes trop anguleuses si les valeurs paramétriques sont mal choisies. Pour cette raison, l'application d'une version améliorée de cet algorithme est préférable [OEEPE, 97].

Appliqué sur un profil (cf. figure 20.a), l'évaluation visuelle montre que les lignes filtrées n'ont plus une apparence naturelle. Les changements de pente deviennent anguleux et, entre deux ruptures de pente, le tracé est rectiligne. Ce qui correspond, après suppression de points, à une interpolation linéaire. Une autre fonction d'interpolation pourrait être choisie pour approximer le nouveau profil du thalweg ou de la crête qui lui rendrait une apparence plus naturelle (cf. partie II). En fait, le choix de l'interpolation le long d'un profil dépend grandement de la caractérisation locale. Existe-t-il de fortes ruptures de pente le long du profil initial ? Par exemple, le filtrage d'un torrent entrecoupé de cascades suffira sans adaptation de l'interpolation car un polynôme de degré supérieur arrondirait beaucoup trop le profil.

Appliqué sur la planimétrie, le filtrage est suffisant pour traiter un ensemble d'éléments naturellement anguleux avec des crêtes qui découpent le relief d'une manière très marquée et tranchante. D'autre part, après la simplification planimétrique des lignes de structure, on doit pouvoir retrouver facilement les valeurs d'altitude. Or, après élimination de points, la correspondance entre le réseau généralisé et le MNT devient difficilement gérable.

Figure 73 : Un algorithme de filtrage : Douglas et Peucker.



a : Principe de l'algorithme le long du profil d'un thalweg.

b : Résultat planimétrique de l'algorithme (s = 0.10).

3. 3.1.3. b. Lissages

Un algorithme de lissage agit sur les points ou les courbures (algorithmes de van Horn...). Nous avons choisi de décrire l'algorithme de Gauss (cf. figure 21). D'une manière théorique, il s'agit d'une convolution avec une fonction exponentielle :

$$g_k = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}}\, e^{-\frac{1}{2s^2}k^2}$$

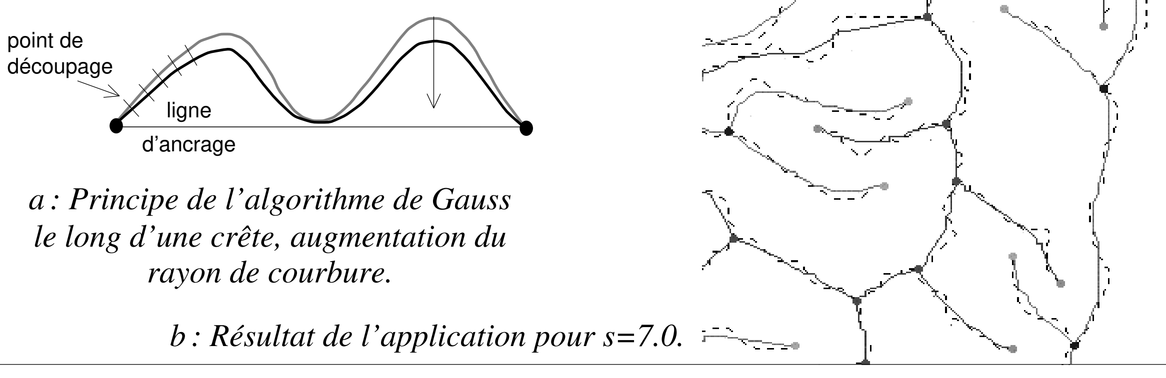
s : nombre de points de découpage sur lesquels s'appuie le calcul
k : compteur tel que 0≤k≤s

Chaque lien du réseau est découpé régulièrement d'un bout à l'autre en petits intervalles dont les extrémités sont des points de découpage. Les nouvelles coordonnées X_i et Y_i de chaque point de découpage sont déterminées à partir des coordonnées des points de découpage de la ligne originale de part et d'autre du point dont la position est recalculée :

$$\begin{cases} X_i = \sum_{0 \le k \le s} g_k\,(x_{i-k} + x_{i+k}) \\ Y_i = \sum_{0 \le k \le s} g_k\,(y_{i-k} + y_{i+k}) \end{cases}$$

L'algorithme accroît les rayons de courbure. Les petits détails sont éliminés et l'on obtient une courbe régulière.

Figure 74 : Comportement de l'algorithme de Gauss.



a : Principe de l'algorithme de Gauss le long d'une crête, augmentation du rayon de courbure.

b : Résultat de l'application pour s=7.0.

Le lissage le long du profil d'un élément structurant maintient une allure naturelle au profil, ce qui permet d'éviter le choix d'une fonction d'interpolation dans les régions où un filtrage classique ne convient pas. Appliqué le long d'un thalweg, il aplatit les valeurs d'altitude au fond du lit. Cependant, appliqué sur une crête, il a tendance à l'éroder du fait de l'augmentation du rayon de courbure.

Du point de vue planimétrique, la position des nœuds n'est pas modifiée et les points intermédiaires sont déplacés sans être éliminés. Ceci permet de retrouver les valeurs d'altitude en chaque point intermédiaire par comparaison entre le réseau initial et le réseau simplifié puis par superposition au MNT. En revanche, certaines courbures sont décalées vers l'intérieur, ce qui peut créer un conflit de proximité.

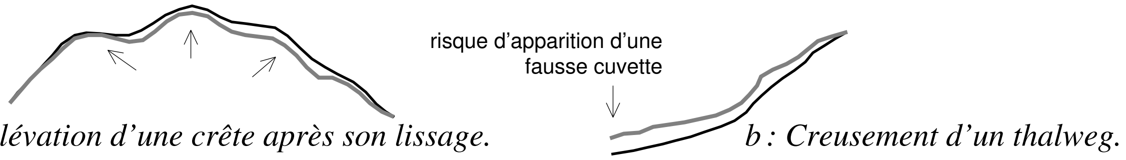
3. 3.1.4. Caricature

La caricature intervient lorsque des éléments ne sont pas assez marqués et risquent de disparaître alors qu'ils sont importants (algorithme de Lowe, algorithme Plâtre décrits dans [OEEPE, 97]...). En cela, elle vise à accentuer une forme soit planimétriquement, soit altimétriquement. Le même principe que précédemment s'applique : une forme le long d'une structure est amplifiée, ce qui a des répercussions sur le MNT.

D'un point de vue altimétrique, le principe repose sur le creusement d'un thalweg ou le rehaussement d'une crête. Une opération de caricature permet donc d'accentuer localement les formes du terrain et, par conséquent, de les rendre plus perceptibles. Cependant, le déclenchement d'une telle opération ne peut se faire que si les formes importantes de faible ampleur ont été préalablement identifiées par une analyse des zones caractéristiques de crête et de thalweg (cf. partie IV).

Par exemple, nous avons vu qu'un algorithme de lissage tel que celui de Gauss érode les crêtes. Après lissage, il est possible d'appliquer un algorithme de caricature par une correction de Lowe qui rehausse la crête à son niveau original, voire le dépasse (cf. figure 22.a). Par contre, la gestion du creusement d'un thalweg paraît moins triviale. En effet, l'abaissement des valeurs d'altitude le long du profil d'un thalweg aboutit à l'abaissement du point exutoire, sinon il y a risque d'apparition d'une fausse cuvette sur le tracé du thalweg (cf. figure 22.b). Or, ce point exutoire est en fait une confluence. Si le thalweg dans lequel se jette le thalweg caricaturé n'est pas aussi creusé, alors il y aura apparition d'une fausse cuvette.

Figure 75 : Action d'une exagération le long des profils des éléments structurants.



a : Elévation d'une crête après son lissage. *b : Creusement d'un thalweg.*

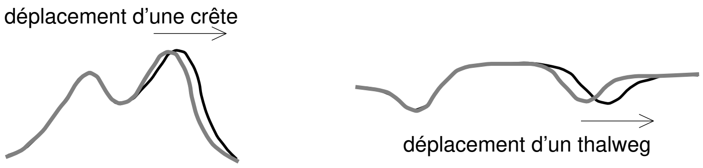
Planimétriquement, la caricature opère sur la forme locale d'une ligne en l'ouvrant pour accentuer le tracé d'un mouvement du terrain (cf. figure 9.a).

3. 3.1.5. Déplacement

Le déplacement est déclenché lorsque l'écartement entre deux éléments est trop petit. Par exemple, lorsque deux structures importantes sont proches, le mouvement du terrain entre ces structures n'est pas discernable. L'opération de déplacement décale l'une des structures de façon à agrandir ce mouvement. Elle dépend d'un seuil, de l'amplitude et du contexte topographique. Afin de ne pas créer un nouveau conflit de proximité, la construction d'un diagramme de Voronoï localisée aux structures trop proches permet de déterminer une zone des possibilités de déplacement.

Le déplacement planimétrique d'un thalweg ou d'une crête va élargir le versant qui les sépare. Ainsi, le déplacement d'une crête ouvre un thalweg et le déplacement d'un thalweg agrandit l'emprise d'une forme en saillie (cf. figure 23).

Figure 76 : Répercusion sur le MNT du déplacement d'un élément structurant.



3. 3.2. Généralisation fréquentielle

Des études ont été menées sur la généralisation des objets géographiques dans le domaine fréquentiel, notamment sur l'utilisation de filtrages passe-bas, passe-haut et passe-bande [Weibel, 89][Weibel, 92]. L'objectif des travaux de [Fritsch et Lagrange, 95] est de développer un algorithme de caricature. Les objets caricaturés à l'aide d'une analyse par ondelettes font partie du linéaire routier. Les auteurs déterminent un seuil expérimental pour chaque fréquence. A partir de la représentation par ondelettes d'une route, ils tronquent les hautes fréquences en gardant toutes les valeurs supérieures aux seuils et reconstituent le signal. Cette technique permet de supprimer les détails qui correspondent aux petits coefficients. Cependant, on ne peut pas garantir qu'un détail corresponde à un seul coefficient. Dans le cas où le détail est représenté par plusieurs fréquences, le coefficient d'ondelette correspondant au détail peut être supérieur au seuil à une fréquence et inférieur au seuil à une autre fréquence. La reconstitution du signal après troncature des hautes fréquences maintient une trace du détail. Ou bien, le détail est représenté par plusieurs coefficients d'une même fréquence, sa représentation est alors diluée et son interprétation faussée. Le résultat de la caricature est satisfaisant car les grands virages sont accentués.

Malgré les difficultés que présente l'utilisation d'une décomposition par ondelettes, il peut être intéressant de développer un tel outil de lissage et de caricature pour le traitement de l'orographie. Il permettrait d'échapper au choix restrictif d'outils ne traitant que du linéaire et à l'interpolation du réseau de structures généralisé.

3. 3.3. Généralisation surfacique

Nous nous sommes inspirés de concept de *surface enveloppe* (*sommitale ou anticlinale*), qui simule une dégradation du relief afin d'analyser les traces laissées sur le paysage par les différentes actions internes et externes [Carvalho, 95], pour l'utiliser dans une méthode particulière de lissage. Dans un contexte d'analyse morphostructurale, une surface enveloppe est *un modèle généraliste, schématique et théorique du relief permettant dans certains cas de définir les grandes lignes d'un état de maturité du relief et d'aborder les questions relatives aux rapports entre topographie actuelle et topographie ancienne* [Carvalho, 95:54], autrement dit il propose un modèle d'érosion.

D'une manière intuitive, la surface enveloppe sommitale est équivalente à un drap virtuel que l'on poserait sur le relief et que l'on tendrait plus ou moins fort, selon la quantité de crêtes qui doit apparaître sous le drap et la quantité d'irrégularités provenant de l'érosion des cours d'eau qui doivent disparaître.

Il existe divers procédés d'automatisation pour la construction d'une surface enveloppe sommitale dont certains empruntent à la méthode traditionnelle. L'approche manuelle se fonde sur la sélection préalable de points hauts cotés ou extraits de courbes de niveau, situés à proximité de la ligne de partage des eaux et sur une surface subhorizontale haute, de pente inférieure à 5% et d'aire minimale (définie en fonction de l'échelle), à partir de cartes topographique (Deffontaines, 1990). Puis, les altitudes sont interpolées de façon manuelle et les courbes de niveau sont tracées. Il apparaît clairement que les critères pour le choix des points est essentiel et déterminent en grande partie la qualité du résultat. Ainsi, parmi les méthodes proposées, nous en avons choisi une qui a l'avantage de ne pas nécessiter de sélection automatique de points ni d'interpolation, ce qui neutralise les erreurs dues à ce type de procédures.

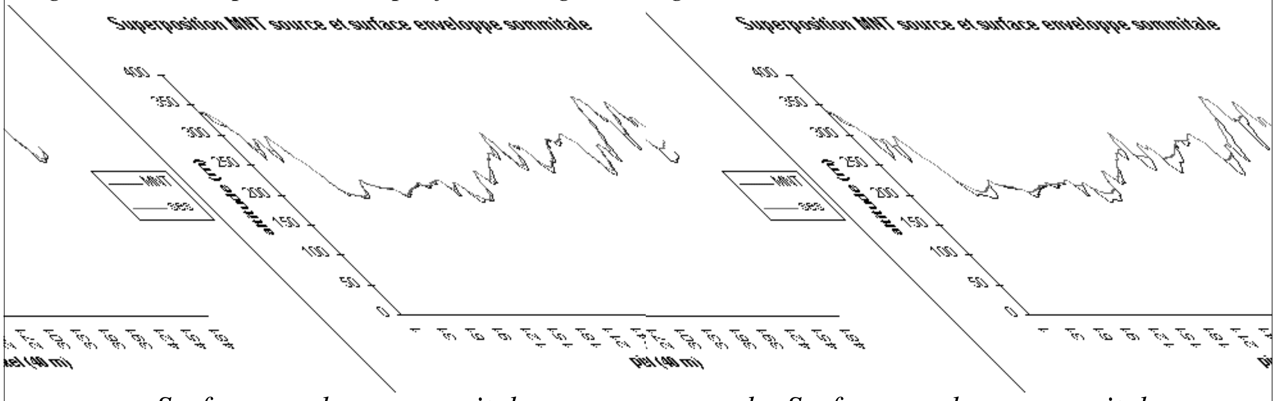
Le principe du fonctionnement de la méthode retenue suit une dégradation du terrain à partir de l'application de *moyennes mobiles conditionnées, successives et centrées sur un voisinage constant* : par le glissement d'une fenêtre n×n, on affecte au point central le résultat de la moyenne arithmétique des valeurs voisines en n-connexité sous certaines conditions. Pour que l'affectation ait lieu, il faut que cette moyenne $\bar{z}$ soit supérieure à l'altitude z_0 du point central :

$$\text{si } \bar{z} > z_0 \Rightarrow z_{0\,(\text{final})} = \bar{z} \text{ sinon } z_{0\,(\text{final})} = z_0.$$

La surface résultante peut, à son tour, être soumise à ce lissage. Ainsi, cet opérateur se règle par l'intermédiaire de deux paramètres : la taille de la fenêtre et le nombre d'itérations.

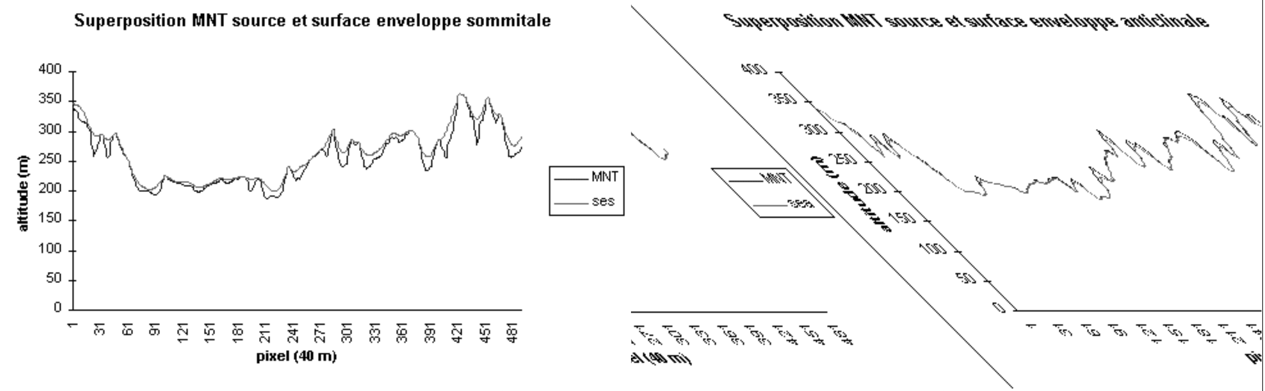
La taille de la fenêtre influe sur le remplissage des vallées. Une taille trop grande fait apparaître des discontinuités notoires qui n'existent pas sur la surface initiale (cf. figure 24.b). Une taille de l'ordre de 3×3 ou 5×5 semble plus adaptée car elle lisse le terrain d'une manière continue et marque davantage le passage des vallées (cf. figure 24.a). Pour un lissage plus important, il vaut mieux demander un grand nombre d'itérations plutôt qu'une grande largeur de fenêtre (cf. figure 24.c). Le gain en qualité justifie l'utilisation d'un petit voisinage.

Figure 77 : Comparaison de profils le long de la ligne 80 du MNT.



a : Surface enveloppe sommitale (3 itérations, fenêtre 5×5).

b : Surface enveloppe sommitale (1 itération, fenêtre 23×23).



c : Surface enveloppe sommitale (11 itérations, fenêtre 5×5).

d : Surface enveloppe anticlinale (3 itérations, fenêtre 5×5).

La surface enveloppe sommitale semble bien schématiser la topographie du terrain par l'élimination des petites irrégularités tout en conservant la tendance générale. De plus, cet opérateur préserve les sommets principaux et élimine certains sommets secondaires, en laissant apparaître les thalwegs les plus longs et les plus larges. Cependant, dans le voisinage des crêtes les plus élevées, la généralisation est beaucoup moins correcte. Des faux sommets apparaissent et, par l'élévation de certains thalwegs, des cols sont modifiés (éliminés ou ajoutés) ce qui a pour effet de détourner des thalwegs de leur tracé originel. Il convient, par conséquent, pour une zone de collines.

Les mêmes principes s'appliquent pour la construction de la surface enveloppe anticlinale. Elle fait ressortir les fortes pentes d'un réseau de thalwegs (cf. figure 24.d). Pour que le résultat de la moyenne mobile soit affecté au point central, il faut que cette moyenne soit inférieure à l'altitude centrale.

L'intérêt principal de cet opérateur est qu'il est adaptatif. La convolution du MNT source avec un masque ne s'adapte pas aux structures rencontrées. En effet, le masque contient des coefficients fixes quelle que soit la zone sur laquelle il est centré (cf. supra 3.1.2.2.b). L'utilisation d'une surface enveloppe permet donc de maintenir les principales discontinuités du terrain.

3. 4. Evaluation

Dans un processus dynamique, tel celui que nous proposons, il est nécessaire de contrôler dynamiquement les résultats. On peut constater ainsi qu'un lissage non contrôlé peut déplacer de façon considérable des thalwegs ou des cols, voire modifier des confluences. L'évaluation a lieu à deux niveaux : d'une part, localement après l'application d'une méthode de généralisation et, d'autre part, sur le MNT généralisé. Au premier niveau, les contraintes servent à la fois de déclencheur d'une action de généralisation et de valideur du résultat obtenu (mécanisme de remontée de notre stratégie, cf. figure 17). Ainsi, la validation permet de juger si le résultat est suffisant et s'il n'y a pas de conflit. L'avantage d'une méthode adaptative et locale fondée sur des évaluations dynamiques est qu'il devient possible d'annuler une opération (de revenir à un état précédent) sans pour autant remettre en cause les autres opérations réalisées. Le conflit correspond à une violation de contrainte qui peut prendre la forme suivante :

· déformation trop importante, on ne reconnaît plus la topographie : ce qui se traduit par un changement de classe et, à l'extrême, par le fait qu'une zone classée en topographie plate avant généralisation devient une zone accidentée après généralisation ou inversement (segmentation par un indicateur global, cf. partie III : 5.4) ;

· non homogénéité des formes appartenant à un même type de relief, certaines ont été lissées plus que d'autres ce qui donne l'impression d'une différence de texture alors que la topographie est homogène : dans ce cas, une segmentation de la surface altimétrique généralisée risque de fournir un plus grand nombre de méso-zones que la segmentation initiale (classification finale après regroupement et absorption, cf. partie III : 5.4) ;

· disparition de structures importantes : par exemple, la détection de contours de la surface généralisée des duretés ne montre pas les mêmes alignements particuliers ou les mêmes formes géomorphologiques (caractérisation des zones caractéristiques, cf. partie IV: 3.2) ;

· apparition de faux éléments du terrain : par exemple, la visualisation des courbes de niveau peut montrer des petites courbes fermées isolées (cuvettes ou sommets) ;

· non respect de la hiérarchisation : par exemple, un réseau de drainage généralisé dont la hiérarchisation par l'écoulement et la compacité des bassins versants ne permettent pas de retrouver les drains principaux (caractérisation des réseaux et des zones caractéristiques, cf. partie IV: 2.1 et IV: 3.1) ;

· déplacement des points caractéristiques : par exemple, le déplacement altimétrique de points caractéristiques risque d'entraîner un détournement d'une partie d'un réseau, qui peut être détecter par un appariement entre le réseau généralisé et un sous-graphe des liens hiérarchiquement élevés du réseau initial ;

· maintien de détails à éliminer (sous-généralisation) : le bruit restant peut être repéré par une segmentation de la surface généralisée et détection des cellules isolées (étude de la surface segmentée, cf. partie IV: 4.1) ;

· interaction impossible : par exemple, la caractérisation de la surface généralisée des pentes fournit une information sur la localisation possible des routes et sur les chemins que peuvent emprunter les cours d'eau (étude de la surface des pentes, cf. partie IV: 4.2).

D'une manière théorique, la réalisation d'une grille des déformations altimétriques en chaque nœud des réseaux extraits du MNT permet de s'assurer que les déformations sont acceptables en fonction de la résolution finale. En cas d'insatisfaction, on peut modifier dans chaque zone segmentée les valeurs des paramètres du lissage utilisé. Cependant, l'objectif est de fournir une information géographique cohérente avec l'information initiale. Pour s'en assurer, on peut recalculer les éléments structurants à partir du MNT final, qui doivent constituer un sous-ensemble des éléments initiaux dans le sens où leur géométrie planimétrique est proche. L'avantage de la segmentation est, qu'en cas d'erreur ou de déformation trop importante, il est possible de reprendre localement les traitements.

De plus, notre méthode de segmentation par zones topographiquement homogènes et les indicateurs de caractérisation proposés fournissent une base nouvelle pour l'évaluation des résultats. En effet, après généralisation adaptative, si les mêmes indicateurs sont à nouveau mesurés zone par zone, leur variation après traitement fournit une indication à deux niveaux : quantitative (seuil de variation) et qualitative (maintien dans une classe).

Il existe diverses méthodes quantitatives d'évaluation de la qualité interne d'un MNT [Beauvillain *et al.*, 95] qui sont insuffisantes car trop locales. Comme nous l'avons vu dans la partie II, elles sont cependant indispensables car elles permettent de détecter si des artefacts sont apparus. L'extraction des courbes de niveau (suivant l'équidistance) donnerait de fausses cuvettes ou de faux sommets, qui n'existent pas sur la surface réelle.

De même, la comparaison de deux modèles par le biais de mesures statistiques fournit les écarts entre le modèle source et le modèle généralisé (moyenne, écart type, erreur moyenne quadratique, ratio de la précision entre différentes échelles spatiales…). Ces techniques sont utilisées pour rechercher la variation des données produites par rapport à un référent dit sûr, ici il s'agirait du MNT initial.

La recherche des propagations spatiales des variations peut s'effectuer par la visualisation d'une surface résiduelle [Weibel, 89:188]. Une surface résiduelle présente la propagation des valeurs de la différence ($z_{\text{généralisé}} - z_{\text{source}}$) sur une région. Une différence positive montre que l'estimation du modèle final par rapport au modèle source est plus haute et une différence négative indique que les valeurs estimées sont plus basses. On s'attendra à obtenir les plus grandes différences au voisinage des lignes de structure, là où il y a eu un traitement du réseau structuré (élimination, simplification, caricature, structuration, déplacement).

Nous venons de passer en revue des méthodes pour évaluer les effets d'une méthode de généralisation, et, d'une manière plus globale, pour apprécier le degré de généralisation et la propagation des effets. Par la généralisation cartographique d'un modèle de terrain, l'ensemble des données source sera simplifié. Pour une évaluation de la qualité du résultat obtenu, l'impression visuelle rendue par un estompage du MNT généralisé et la conservation des formes géomorphologiques sont plus importants que le maintien de l'exactitude numérique (par exemple, par comparaison avec le travail d'un cartographe).

4 Conclusion

La généralisation est une opération cartographique complexe qui exige la définition d'une stratégie souple et cohérente dont la première phase est la reconnaissance de l'information implicite portée par les données. Dans le cadre de la généralisation de l'orographie, nous avons proposé un modèle conceptuel fondé sur la reconnaissance de structures et de zones topographiquement homogènes, et sur leur caractérisation. Nous avons également défini un ensemble de contraintes que nous avons adapté à nos modélisations (champ continu et réseau d'éléments structurants).

Selon la topographie des zones, différentes opérations ont été retenues qui dépendent en fait de la modélisation des données adoptée :

- topographie plate : la surface enveloppe sommitale présente l'avantage de lisser le terrain en maintenant les structures locales principales. Dans le cas d'un plateau karstique entrecoupé de gorges profondes, la surface enveloppe anticlinale semble plus adaptée car elle préserve les thalwegs ;
- topographie de transition : selon la densité en éléments structurants, on travaillera soit par lissage de la surface, soit par simplification du réseau ;
- topographie accidentée : diverses opérations ont été empruntées à la généralisation du linéaire [Weibel, 92] et nous avons analysé le comportement de certaines d'entre elles :
  - la sélection doit s'effectuer à partir d'une hiérarchisation géomorphologique et contextuelle des éléments structurants ;
  - la simplification doit être adaptée à la topographie locale : le filtrage est possible pour des zones à fortes discontinuités et à ruptures de pente cassantes, sinon un lissage est préférable ;
  - la combinaison d'une caricature altimétrique et d'un déplacement planimétrique d'une forme locale permet de creuser un thalweg et d'élargir son bassin versant ou de rehausser une crête et d'élargir la zone de crête ;
  - la structuration est déclenchée lorsque deux liens de même nature et de même ordre hiérarchique sont trop proches. Une méthode est de remplacer ces deux liens par un nouveau lien ensemble des points équidistants.

Les contraintes jouent un double rôle déclencheur et valideur. Nous avons proposé un ensemble de méthodes de validation fondé sur la reconnaissance d'une violation des contraintes préalablement définies.

Afin de montrer des exemples d'opérateurs de généralisation, nous avons utilisé la plateforme de généralisation du linéaire Plage du laboratoire COGIT de l'IGN ainsi qu'un algorithme de calcul du diagramme de Voronoï à partir de segments. La surface enveloppe ainsi qu'un outil de visualisation de la propagation des variations ont aussi fait l'objet d'une implantation.

Cependant, la plateforme existante ne permet pas de traiter les profils des éléments structurants. Les propositions avancées ne sont que des réflexions sur le traitement altimétrique. Ainsi, de nouveaux algorithmes devront être implantés qui prennent en compte la planimétrie et l'altimétrie. De plus, de nombreux tests doivent avoir lieu afin de mieux étudier la corrélation entre types de relief et opérateurs de généralisation, et pour mettre au point les déclencheurs et valideurs des opérations.

Nos propositions s'étendent à :

- l'implémentation d'opérateurs altimétriques, de méthodes de propagation des effets de l'application d'un opérateur aux structures, d'une décomposition par ondelettes ;
- la validation des opérations et le retour à un état précédent ;
- l'évaluation de la démarche globale.

Le Mont-Dore (volcans d'Auvergne).

VI Conclusion

La manipulation de MNT doit s'appuyer sur une analyse numérique du terrain (segmentation / classification et caractérisation). Par exemple, la généralisation cartographique est une opération qui peut être améliorée par l'utilisation d'informations sur la nature de la surface, notamment par l'adaptation des opérateurs et des paramètres aux types de relief.

Sur la surface terrestre, les paysages présentent une grande variété dans le modelé du relief, par suite de la diversité des processus qui engendrent ce modelé :

- le morcellement de l'écorce terrestre en plaques rigides ou mobiles par des forces tectoniques ;
- l'édification active de relief ;
- l'édification de relief due aux facteurs lithologiques et érosifs ;
- la combinaison de matériaux très anciens et de mouvements d'exhaussement plus récents ;
- le volcanisme ;
- le système bioclimatique ;
- ...

Les types de relief dépendent de la structure et des caractéristiques naturelles des modelés, provenant de l'entrée en jeu de ces processus de formation. Pour la description des types "physiographiques" français, nous avons construit un début de typologie empirique fondée sur une analyse géomorphologique et une étude des représentations cartographiques. On distingue quatre grands groupes :

- volcans : éminences à structure grossièrement de cône tronqué ou saillies présentant une alternance de crêtes et de vallées disposées en étoile, et résultant de volcanisme ; les dômes sont repérables par leur concentricité locale des contours et les monts en étoile par la direction des axes principaux des crêtes ;
- chaînes jeunes : structures de relief datant des époques hercynienne et ultérieures, marquées par des altitudes élevées et une très grande rugosité du relief ; ce sont des zones de segmentation dans lesquelles les paramètres caractéristiques sont les plus élevés (médiane de la pente, médiane de la dureté) ;
- massifs anciens : reliefs composés de matériau de l'ère primaire, mais exhaussés par des mouvements plus récents, caractérisés par une certaine régularité de formes aplanies ; en comparaison avec les chaînes jeunes, les paramètres y sont moins élevés et les zones de crêtes sont plus larges ;
- bassins sédimentaires : domaines datant de l'ère précambrienne dissimulés sous une couverture sédimentaire ployée en cuvette, montrant un relief plat interrompu par des échancrures de rivières ; ils sont discernables par une faible densité de crêtes et des bassins versants peu compacts et à pente régulière.

La carte topographique doit transmettre une information suffisamment abondante pour permettre à l'utilisateur d'apprécier ces paysages. Le cartographe analyse le terrain afin de fournir une représentation graphique cohérente avec la réalité. La connaissance en géomorphologie du cartographe l'aide à dessiner des formes géométriques, à donner une image des relations entre les éléments géographiques et à abstraire leur forme réelle. Parmi la palette de techniques de représentation, le cartographe choisit les procédés en fonction de leur aptitude à mettre en valeur les formes caractéristiques d'une région, en fonction du thème et de l'échelle souhaités.

La carte est, par conséquent, un objet qui symbolise tout un savoir, une compétence artistique et une connaissance géographique. Le passage de la cartographie traditionnelle au numérique nécessite en plus des connaissances en géographie physique, de nouvelles connaissances (*computational geometry*, processus de numérisation, évaluation de la qualité des données). Une surface numérique se construit en plusieurs étapes :

- les procédés de numérisation dépendent de la source de données :
    - planches de courbes de niveau : scannage ;
    - photographies aériennes : photorestitution, corrélation automatique.
- les données brutes sont stockées dans une base de données altimétriques sous la forme de courbes de niveau ou d'échantillon de points. La qualité des données peut s'estimer sur plusieurs plans dont les principaux pour nous sont la cohérence logique et la précision géométrique.
- la construction d'une surface numérique à partir des données brutes par interpolation peut fournir différentes modélisations, dont les principales ont été passées en revue. Nous considérons le MNT à maillage régulier en tant que champ continu : chaque position (x, y) a une valeur d'altitude z. Il sert de structure pivot dans un système de modélisation numérique du

terrain souple et adaptatif. Un MNT approxime la surface terrestre suivant ses limites conceptuelles et la qualité des données source.

Dans un cadre de cartographie topographique, la segmentation du terrain vise le regroupement des points du MNT source fondé sur la nature de la topographie par reconnaissance de la granularité du terrain, et non par détection des frontières. En effet, il n'existe pas de définition théorique ou pratique de la zone topographique. D'ailleurs, l'existence sur le terrain de zones de transition entre deux types de relief réduit l'importance d'une délimitation précise.

Il existe deux manières d'aborder la segmentation empruntées à l'analyse d'image : en recherchant les contours, lieux des disparités, ou en exploitant l'homogénéité de groupements connexes de pixels. Nous avons établi notre démarche de segmentation en la fondant sur un critère de regroupement de points, qui combine une méthode descendante (construction d'un graphe d'adjacence et détection des intérieurs) puis une méthode ascendante (classification / fusion).

- Une phase de prétraitement consiste en l'extraction des éléments structurants qui forment des réseaux imbriqués de crêtes et thalwegs.
- Sur cette base, nous avons défini deux nouveaux critères géomorphologiques de segmentation dont les informations sont agrégées en un paramètre appelé *relation d'imbrication* :
  - l'entrelacement représente le degré d'espacement planimétrique entre les crêtes et thalwegs ;
  - l'encaissement est la dénivelée entre crêtes et thalwegs.
- La relation d'imbrication sélectionne un ensemble de points significatifs parmi les points hauts des thalwegs et les points bas des crêtes. Une façon naturelle de procéder pour obtenir un pavage en zones d'influence consiste à construire un diagramme de Voronoï en prenant comme germes les points significatifs. En plus du passage du modèle initial (MNT maillé) à un niveau plus synthétique, la construction d'un tel graphe d'adjacence permet de déterminer des zones de calcul pertinentes pour les indicateurs géométriques et géomorphométriques (statistiques sur la pente, la dureté et l'altitude, dénivelées, intégrale hypsométrique, comptage de points). En effet, ces micro-zones forment une partition de l'espace définie à partir d'éléments caractéristiques du relief et ont donc une pertinence géomorphologique.
- La fusion de cellules de Voronoï connexes est guidée par des indicateurs calculés dans chaque cellule, qui concourent à définir la signature géométrique, et aboutit à une classification des points du MNT source. Nous avons retenu une démarche de classification adaptative :
  - l'espace est subdivisé en zone plate et zone accidentée par un indice de différenciation topographique constitué par la médiane de la pente calculée dans chaque cellule de Voronoï ;
  - une analyse régionalisée de la topographie entraîne la détermination de deux indicateurs globaux :
    - pour la zone plate, un indice local de rugosité composé de la médiane de la dureté, de l'intégrale hypsométrique et de la taille de la cellule ;
    - pour la zone accidentée, un indice de topographie globalement accidentée composé de la médiane de la dureté et de la dénivelée.
  - regroupement des classifications régionalisées ;

— absorption des micro-zones (cellules) en méso-zones.

La carte chromatique obtenue présente cinq classes interprétables selon la région segmentée et dont l'ordre croît de plate à très accidentée. Les tests effectuées sur deux régions géomorphologiquement disparates ont montré des résultats satisfaisants qui déterminent des zones à topographie homogène répondant à nos attentes, mais dont la validation nécessite une extension à d'autres régions qui, *a priori*, devrait convenir pour des types français de relief, les deux zones tests couvrant déjà des reliefs différents. De plus, il manque encore dans cette étude un examen approfondi du choix de la méthode de prise en compte des différents paramètres (combinaison linéaire, classification hiérarchique ou *clustering*) et de la sélection de ces paramètres.

La caractérisation doit déterminer le caractère prédominant des zones, c'est-à-dire y distinguer similitudes et exceptions, et les qualifier. Elle se fonde sur deux types de représentations de l'information différents mais complémentaires, à savoir un réseau structuré et un ensemble de champs continus :

- les éléments caractéristiques du relief ; ces éléments doivent être hiérarchisés et qualifiés contextuellement :
    - les thalwegs dont l'écoulement fournit une première hiérarchisation d'origine hydrologique ;
    - les bassins versants qui sont qualifiés par des indicateurs géomorphologiques ;
    - les crêtes pour lesquelles nous proposons une première hiérarchisation géométrique qui doit être améliorée par la prise en compte de critères à nature géomorphologique ;
    - les zones de crêtes dont nous proposons une méthode de détection et qui devraient être qualifiées par des indicateurs géomorphologiques.
- un ensemble de champs continus
    - les zones topographiques : l'étude de la surface résultant de la phase de segmentation fournit une partition en zones topographiquement homogènes. Ces zones doivent être qualifiées par un type de relief, tout du moins par un opérateur humain. De plus, on doit y discerner bruit et accident du terrain. Nous proposons une méthode contextuelle qui repère les petites zones isolées dans une zone homogène et qui discrimine selon un critère statistique celles qui peuvent être absorbées de celles qui doivent être maintenues.
    - les pentes : l'étude surfacique des pentes par des indices complémentaires de la norme du gradient, c'est-à-dire l'exposition et la longueur de la pente, est proposée pour guider le positionnement des autres objets cartographiques (routier, hydrographie) sur le terrain.
    - les altitudes : l'étude surfacique des altitudes n'a donné lieu qu'à un exposé d'outils mathématiques récents (théorie des fractales, analyse par les ondelettes) qui pourraient fournir une mesure de la complexité du terrain.

A partir de la caractérisation des zones topographiques et de la hiérarchisation des éléments structurants, nous proposons une stratégie de généralisation de l'orographie fondée sur la sélection d'une méthode la plus appropriée possible, *i.e.* guidée par la reconnaissance de structure et le type de topographie.

Notre démarche globale de généralisation se fonde sur une décomposition du processus en plusieurs étapes dont la description est la suivante :

- extraction des réseaux d'éléments structurants (prétraitement de la segmentation) ;
- segmentation du MNT source en zones topographiquement homogènes (segmentation / classification) ;
- hiérarchisation et qualification des réseaux, caractérisation des zones topographiques avec détection des accidents du terrain et des transitions géomorphologiques (caractérisation) ;
- choix d'une méthode de généralisation en fonction de la topographie globale (d'une classe) et locale (accidents du terrain, densité d'éléments) ;
- application d'une séquence d'opérations (choix des algorithmes et des paramètres) ;
- validation de la séquence d'opérations et du résultat obtenu pour chaque opération (satisfaction des contraintes) ;
- harmonisation du résultat par le lissage des zones de raccord (lieu de changements de topographie) ;
- validation du MNT dans sa globalité.

Afin de déclencher et de valider les opérations de généralisation, nous définissons un ensemble de contraintes empruntées à la cartographie traditionnelle et à la géomorphologie, et adaptées à nos modèles de représentation de l'information (surfaciques, éléments structurants et interactions). Nous analysons les répercussions sur le MNT de cinq opérations de généralisation de réseaux en proposant leur adaptation au traitement des profils des structures (sélection, simplification, structuration, caricature et déplacement) et présentons un opérateur surfacique.

Dans un processus dynamique tel que le nôtre, la validation des opérations permet de juger si le résultat est satisfaisant et s'il n'y a pas de conflit, ou bien si l'on doit revenir à un état antérieur. Nous indiquons pour cela des méthodes qui reposent sur une caractérisation localisée de la zone topographique qui a été modifiée. Des pistes pour la validation globale du MNT généralisé sont également proposées.

Les puys Gros, Loup et Mary (volcans d'Auvergne).

VII Pistes de recherche

Afin de guider l'exposé des pistes de recherche qui devraient prolonger le travail effectué pendant cette thèse, nous définissons une chaîne :

Segmentation (II et III) ⟶	*Caractérisation (IV)* ⟶	*Transformation (V)*
· typologie · définition de zones homogènes · indicateur global des types de relief (variation = inhomogénéité) · indicateurs de type de relief géomorphométriques et géométriques	· classes des zones · indicateurs locaux d'appartenance à une classe ; détection et identification de formes locales · indicateurs plus spécifiques (géomorphologiques, statistiques)	· liens entre classe et mode de transformation · développement d'algorithmes spécifiques

- Segmentation

Le début de typologie des formes du relief que nous proposons permet de structurer la connaissance géomorphologique et fournit une base de réflexion utilisable pour diverses applications cartographiques. Il serait intéressant de compléter cette typologie en la maintenant dans un cadre de cartographie automatique :

· l'association entre un type de relief et les formes particulières qui le caractérisent ;

· l'association entre les formes et les représentations analogiques à différentes échelles (carte topographique ou thématique) ;

· une bibliothèque de formes et de modèles de représentation numérique (méthodes de détection).

L'idéal serait d'aboutir à une bibliothèque qui fournisse, en plus des méthodes de détection, les transformations possibles pour différentes échelles et différents thèmes. Cependant, on peut se demander si la détection doit ne s'appuyer que sur des gabarits ou s'il n'est pas possible d'avoir des modèles de réponse à certaines mesures.

La définition de la zone topographique demeure une question ouverte et le contrôle de la délimitation est laissé à l'appréciation visuelle. La notion de topographie étant particulièrement floue, l'utilisation d'un autre graphe d'adjacence (*quadtree* à base de triangles) peut modifier les résultats de la segmentation plus ou moins sensiblement. Par ailleurs, la validation des résultats, même s'ils sont expertisés par un cartographe, n'est pas totalement objective surtout entre deux types de relief où apparaît une zone de transition.

Afin de déterminer ces zones à topographie homogènes, nous utilisons un ensemble de paramètres qu'il faudrait enrichir. Comment valider le choix de ces paramètres ? De plus, nous proposons de compléter la bibliothèque des indicateurs géomorphométriques trouvés dans la littérature par un groupe d'indicateurs géométriques (forme de la cellule) et par un indicateur de rugosité des matériaux (statistique sur la dureté). Doit-on rechercher d'autres paramètres significatifs pour une segmentation en zones topographiques ?

De même, un indicateur global est défini. Mais une classification directe par une analyse de nuées dynamiques, par exemple, à partir d'un ensemble de paramètres peut être préférable à une combinaison linéaire pondérée. Il existe un grand nombre de méthodes de classification et une comparaison de plusieurs méthodes permettrait éventuellement d'en établir le choix. Par ailleurs, la construction de notre indicateur global ne peut fournir qu'une classification relative entre autres parce que la normalisation est effectuée en fonction du minimum et du maximum des valeurs sur la région, ce qui permet une bonne discrimination locale uniquement.

Les résultats que nous obtenons sur nos zones tests sont satisfaisants car ils correspondent à nos attentes. Cependant, on peut se demander dans quelle mesure la fusion des cellules et des zones est un point réglé ou bien s'il ne faut pas l'améliorer par la prise en compte de nouvelles règles. A ce propos, des tests effectués sur un plus grand nombre de régions permettront de valider notre méthode de classification.

- Caractérisation

L'intérêt d'une caractérisation des classes repose sur la constitution d'un ensemble universel de classes (un référent) pour classifier tout type de paysages et pour toute application. Une classification telle que la nôtre ne peut pas aboutir à ce résultat. D'ailleurs, pour deux régions tests données, l'interprétation des classes diffère. La question du choix des classes devrait être approfondie.

D'autre part, la caractérisation, telle que nous la définissons, s'appuie pour une grande part sur la hiérarchisation des éléments structurants. L'appariement des réseaux extraits avec les éléments cartographiques homologues reste un sujet ouvert qu'il faudrait approfondir étant donnée l'importance du contexte dans une application telle que la généralisation.

Enfin, la définition d'un ensemble d'indicateurs spécifiques pour la qualification des éléments caractéristiques (linéaires ou surfaciques) doit être complétée, notamment la détection et la caractérisation des zones de crêtes. De même, la détection des accidents du terrain ne fait l'objet que d'une proposition qui peut être améliorée par une analyse contextuelle des classes (proximité).

- Transformation

Nous avons besoin de nouveaux opérateurs de généralisation surfacique tel qu'un lissage contraint, autrement dit, un lissage plus fort entre les lignes de structure et progressivement moins important au fur et à mesure que la fenêtre mobile se rapproche d'une ligne de structure. L'utilisation d'une décomposition par ondelettes pourrait également fournir un opérateur fréquentiel de lissage et de caricature. Enfin, le traitement des structures doit se faire aussi bien planimétriquement qu'altimétriquement et nécessite pour cela l'adaptation d'opérateurs empruntés à la généralisation du linéaire ou la création de nouveaux opérateurs.

Le problème des raccords et de l'harmonisation du résultat n'est pas traité. Or, après l'application d'un processus de généralisation adaptatif, il apparaît des zones de transition ou de chevauchement entre deux zones traitées différemment. A l'heure actuelle, nous n'avons pas d'outils qui permettent de traiter correctement ces zones de raccord.

Le contrôle de la qualité des résultats se pratique principalement d'une manière visuelle. Cependant, une classification du MNT généralisé et sa comparaison avec le MNT initial fournit une base pour la validation. L'ensemble des contraintes sert de critère pour la validation (en plus de son rôle déclencheur d'une opération de généralisation) mais est-il exhaustif ? La contribution des indicateurs de classification et de caractérisation utilisés dans les étapes précédentes est à approfondir. De plus, un contrôle de la cohérence doit évaluer les décalages de points caractéristiques entre les deux états du MNT.

Enfin, l'interaction, *i.e.* la prise en compte de l'orographie pour le placement des objets planimétriques et vice-versa, doit faire l'objet d'une recherche plus approfondie.

Le puy de Dôme (volcans d'Auvergne).

Bibliographie

[ACI, 73] Association cartographique internationale. *Glossaire des termes en cartographie assistée par ordinateur*, J. Denègre et D.T. Edson, 1973.

[Argemiro *et al.*, 92]
J. Argemiro de Carvalho Paiva, M.J. Egenhofer and A.U. Frank. *Spatial reasoning about flow directions: Towards an ontology for river network*, p. 318-324. *Proceedings of the 17th ISPRS congress meeting*, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, August 2-14, 1992. Washington DC.

[Armstrong, 91] M.P. Armstrong. *Knowledge classification and organization*, in *Map generalization: Making rules for knowledge representation*, Barbara Buttenfield and Robert McMaster ed., Longman Scientific & Technical, p. 86-102, 1991.

[Band, 86] L.E. Band. *Topographic partition of watersheds with digital elevation models*, Water Resources Research, 22(1):15-24, 1986.

[Barsky, 93] B.A. Barsky. *Rational beta-splines for representing curves and surfaces*, Computer Graphics & Applications, p. 24-32, November 1993.

[Baudot, 91] Y. Baudot. *A comparison of different methods used to generate digital elevation models*, IGARSS, p. 2435−2438, 1991.

[Beauvillain *et al.*, 95]
E. Beauvillain, P. Guiavarc'h et O. Jamet. *Evaluation d'un processus automatique de production de courbes de niveau*, p. 1344-1353. *Proceedings of the 17th International Cartographic Conference*, International Cartographic Association, September 3-9, 1995. Barcelona, Spain.

[Bertin, 68] J. Bertin. *La Cartographie dans la "civilisation de l'informatique"*, rapport technique, Association cartographique internationale, décembre 1968.

[Besnus *et al.*, 90]
Y. Besnus, JC. Pion, M. Raffy, G. Ramstein et M. Deynoux. *Traitement d'image appliqué à la cartographie des formations dunaires de l'erg à Akchar (Mauritanie). Apport des données thématiques Mapper de Landsat et de l'analyse par ondelettes d'une image Spot panchromatique*, p. 253−269. *Outils microinformatiques et télédétection de l'évolution des milieux*, 3ème journée scientifique du réseau de télédétection de l'UREF, 13-16 novembre 1990. Toulouse, France.

[Bjørke et Midtbø, 93]
J.T. Bjørke and T. Midtbø. *Generalization of digital surface models*, p. 363-371. *Proceedings of the 16th International Cartographic Conference*, International Cartographic Association, Peter Mesenburg ed., May 3-9, 1993. Cologne, Germany.

[Boissonat et Yvinec, 95]
J.D. Boissonat et M. Yvinec. *Géométrie algorithmique*, Ediscience international éd., 1995.

[Brändli, 94] M. Brändli. *Hierarchical models for the definition and extraction of terrain features*, in *Natural objects with indeterminate boundaries*, P. Burrough and A. Frank ed., GISDATA Series, vol. 3, Taylor and Francis, London, 1994.

[Brändli, 95] M. Brändli. *Extraction of terrain features from DTMs based on the concept of interlocking ridge and channel networks*, p. 96−101. *Proceedings of the Joint European Conference on geographical information*, March 26−31, 1995. The Hague, The Netherlands.

[Brändli, 97] M. Brändli. *Modelle und Algorithmen für die Extraktion geomorphologischer une hydrologischer Objekte aus digitalen Geländemodellen*, 200 p., Dissertation zur Erlangung des Doktor Grades, Geographisches Institut, Universität Zürich, 1997.

[Brändli et Schneider, 94]
M. Brändli and B. Schneider. *Shape modeling and analysis of terrain*, International Journal of Shape Modeling, 1(2) : 167–189, 1994.

[Brassel et Weibel, 88]
K.E. Brassel and R. Weibel. *A review and framework of automated map generalization*, International Journal of Geographical Information Systems, 2(3) : 229–273, 1988.

[Caron, 77] R. Caron. *La Cartographie comme rhétorique ou Eléments pour un éloge du cartographe*, bulletin d'information de l'Institut géographique national, 80/1 : 3-14, août 1977.

[Carter, 92] J.R. Carter. *The Effect of data precision on the calculation of slope and aspect using gridded DEMs*, Cartographica, 29(1) : 22–34, spring 1992.

[Carvalho, 95] J. Carvalho. *Extraction automatique d'informations géomorphométriques (réseaux et surfaces enveloppes) à partir de modèles numériques de terrain*, thèse de doctorat en Sciences de l'Information géographique, Université de Paris 7, 7 avril 1995.

[Cebrian *et al.*, 85]
J.A. Cebrian, J.E. Mower and D.M. Mark. *Analysis and display of digital elevation models within a quadtree-based Geographic Information System*, p. 55-65. *Auto-Carto 7: Digital representations of spatial knowledge*, March 11-14, 1985. London, U.K.

[Chantraine, 96] J. Chantraine. *Carte géologique de la France au 1/1 000 000 - 6ème édition*, Géochronique, (59) : 11-12, août 1996.

[Chassery et Montanvert, 91]
J.M. Chassery et A. Montanvert. *Géométrie discrète en analyse d'image*, Hermès éd., 1991.

[Chatelain, 92] O. Chatelain. *Contrôle de la qualité des MNT par l'extraction des réseaux de talwegs*, mémoire de DEA en Sciences de l'Information géographique, Ecole nationale des Sciences géographiques et Cellule d'Etude en Géographie numérique, 4 septembre 1992.

[Cheng et Idesawa, 86]
K. Cheng and M. Idesawa. *A simplified method of data form conversion from contour line surface model to mesh surface model*, p. 582–585. *Proceedings of the 8th international conference on pattern recognition*, October 27–31, 1986. Paris, France.

[Chenuet, 93] G. Chenuet. *Atlas de la France et de ses régions*, Reader's Digest, 1993.

[Chorowicz *et al.*, 89]
J. Chorowicz, J. Kim, S. Manoussis, J.P. Rudant, P. Foin and I. Veillet. *A new technique for recognition of geological and geomorphological patterns in Digital Terrain Models*, Remote Sensing of Environment, 29(3) : 229-239, 1989.

[Cocquerez et Philipp, 95]
Ph. Bolon, J.M. Chassery, J.P. Cocquerez, D. Demigny, C. Graffigne, A. Montanvert, S. Philipp, R. Zéboudj et J. Zérubia. *Analyse d'images: filtrage et segmentation*, enseignement de la physique, Masson éd., 1995.

[COGIT, 94] Collectif COGIT. *Minutes du séjour du professeur R.B. McMaster (Université du Minnesota à Minnéapolis)*, Institut géographique national, IGN DT 950417, 22 novembre - 15 décembre 1994.

[Cuenin, 72] R. Cuenin. *Cartographie générale*, Eyrolles éd., 1972.

[Delasnerie, 96] Y. Delasnerie. *Segmentation du relief par agrégation de bassins versants*, rapport de stage, Institut géographique national, IGN SR 960031/S-STA, DESS Application de l'informatique aux Sciences de la Terre, Université Paris 6, octobre 1996.

[Derruau, 62] M. Derruau. *Précis de géomorphologie*, Masson et Cie éd., 1962.

[Derruau, 90] M. Derruau. *Les Formes du relief terrestre. Notions de géomorphologie*, Masson éd., 1990.

[Dikau, 90] R. Dikau. *Geometric landform modelling based on hierarchy theory,* p. 230-239. *Proceedings of the 4th international symposium on Spatial Data Handling*, SDH, July 23-27, 1990. Zürich, Swiss.

[Douglas, 87] D.H. Douglas. *Experiments to locate ridges and channels to create a new type of digital elevation model*, The Canadian Surveyor-Le Géomètre canadien, 41(3):373-406, autumn 1987.

[Douglas et Peucker, 73]
D.H. Douglas and T.K. Peucker. *Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature*, The Canadian Cartographer, 10(2):112–122, December 1973.

[Dufour, 87] H.M. Dufour. *Partition en versants d'un terrain défini par un modèle numérique maillé, structure orohydrographique*, rapport technique, Institut géographique national, juin 1987.

[Duquenne, 92] H. Duquenne. *The New Digital Terrain Model of France*, 14 p. *First continental workshop on the geoïd in Europe*, May 11-14, 1992. Prague, Czechoslovakia.

[Dutton et Buttenfield, 93]
G. Dutton and B. Buttenfield. *Scale change via hierarchical coarsening: Cartographic properties of quaternary triangular meshes*, p. 847-862. *Proceedings of the 16th International Cartographic Conference*, International Cartographic Association, Peter Mesenburg ed., May 3–9, 1993. Cologne, Germany.

[Eckert, 21] M. Eckert. *Die Kartenwissenschaft. Forschung und Grundlagen zu einer Kartographie als Wissenschaft*, Vereinigung wissenschaftlicher Verleger, Walter de Gruyter & Co, 1921.

[Evans, 72] I.S. Evans. *General geomorphometry, derivatives of altitude and descriptive statistics*, in *Spatial analysis in geomorphology*, R.J. Chorley ed., Harper & Row, p. 17-90, 1972.

[Fairfield et Leymarie, 91]
J. Fairfield and P. Leymarie. *Drainage networks from grid elevation models*, Water Resources Research, 27(5):709-717, May 1991.

[Falcidieno *et al.*, 92]
B. Falcidieno, C. Pienovi and M. Spagnuolo. *Discrete surface models: Constraint-based generation and understanding*, in *Computer Graphics and mathematics, focus on Computer Graphics Series*, Falcidieno, Herman and Pienovi ed., Springer-Verlag, p. 245-261, 1992.

[Foucault et Raoult, 84]
A. Foucault et JF. Raoult. *Dictionnaire de géologie*, Masson éd., 1984.

[Freeman, 91] T.G. Freeman. *Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid*, Computers & Geosciences, 17(3):413-422, 1991.

[Fritsch et Lagrange, 95]
E. Fritsch and JP. Lagrange. *Spectral representations of linear features for generalisation*, p. 157–171. *Spatial information theory: A theoretical basis for GIS, International conference COSIT'95*, September 21–23, 1995. Semmering, Austria.

[Gasquet et Witomski, 90]
C. Gasquet et P. Witomski. *Analyse de Fourier et applications*, Masson éd., 1990.

[Gloriod, 69] M. Gloriod. *Eléments de géomorphologie, topologie*, cours de l'Institut géographique national, 1969.

[Hangouët et Regnauld, 96]
JF. Hangouët et N. Regnauld. *Analyse des îlots urbains pour la généralisation contextuelle*, Revue internationale de géomatique, 6(2-3) : 219-226, 1996.

[Hangouët et Djadri, 97]
JF. Hangouët and R. Djadri. *Voronoï diagrams on line segments: Measurements for contextual generalization purposes*, accepted at COSIT'97, October 15-18, 1997. Laurel Highlands, Pennsylvania.

[Haralick, 83] R.M. Haralick. *Ridges and valleys on digital images*, Computer Vision, Graphics and Image Processing, 22 : 28-38, 1983.

[Heller, 90] M. Heller. *Triangulation algorithms for adaptative terrain modeling*, p. 163-174. *Proceedings of the 4th international symposium on Spatial Data Handling*, SDH, July 23-27, 1990. Zurich, Switzerland.

[Hentschel, 79] W. Hentschel. *Zur automatischen Höhenliniengeneralisierung in topographischen Karten*, Dissertation zur Erlangung des Doktor-Ingenieurs Grades, Universität Hannover, Hannover, 1979.

[Imhof, 82] E. Imhof. *Cartographic relief presentation*, H.J. Steward ed., de Gruyter, 1982.

[ISO 8402, 94] ISO 8402 : 1994 (E/F/R). *Management de la qualité et assurance de la qualité*, norme internationale, 2ème éd., 1994.

[Jamet, 95] O. Jamet. *Extraction du réseau des thalwegs sur un MNT*, bulletin d'information de l'Institut géographique national, (64) : 11−18, août 1995.

[Jenson, 85] S.K. Jenson. *Automated derivation of hydrolic basin characteristics from digital elevation model data*, p. 301-310. *Auto-Carto 7: Digital representations of spatial knowledge*, March 11-14, 1985. London, U.K.

[Jenson et Domingue, 88]
S.K. Jenson and J.O. Domingue. *Extracting topographic structure from digital elevation data for Geographic Information Systems analysis*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 54(11) : 1593-1600, 1988.

[Jones *et al.*, 92] Ch. Jones, J.M. Ware and G. Bundy. *Multiscale spatial modelling with triangulated surfaces*, p. 612-621. *Proceedings of the 5th international symposium on Spatial Data Handling*, International Geographical Union commission on GIS, August 3-7, 1992. Charleston, South Carolina.

[Julien, 94] P. Julien. *Traitements altimétriques (modèles numériques de terrain)*, cours du DEA des Sciences de l'Information géographique, Ecole nationale des sciences géographiques, 1994.

[Jurvillier et Thom, 96]
I. Jurvillier and Ch. Thom. *IGN new digital frame camera for photogrammetry*, p. 156−164. *Proceedings of the 2nd international Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*, ERIM / Airborne conference, June 24-27, 1996. San Francisco, California.

[Kidner, 96] D.B. Kidner. *Site selection and visibility analysis for a wind farm development: A problem for GIS*, p. 220-237. *Proceedings of the 1st international conference on Geographic Information Systems in urban regional and environmental planning*, April 19-21, 1996. Island of Samos, Greece.

[Klinkenberg et Goodchild, 88]
B. Klinkenberg and M.F. Goodchild. *Tests of a fractal model of topography*, Earth Surface Processes and Landforms, 17(3) : 217–234, 1992.

[Lagrange, 97] JP. Lagrange. *Generalisation: Where are we? Where should we go?*, in *Geographic information research. Bridging the Atlantic*, Massimo Craglia and Helen Couclelis ed., Taylor & Francis, p. 187–204, 1997.

[Lagrange et Ruas, 94]
JP. Lagrange and A. Ruas. *Geographic information modelling: GIS and generalization*, p. 1099-1117. *Proceedings of the 6th international symposium on Spatial Data Handling*, Thomas C. Waugh and Richard G. Healey ed., Taylor & Francis, September 5-9, 1994. Edinburgh, Scotland.

[Lam, 83] N.SN. Lam. *Spatial interpolation methods: A review*, The American Cartographer, 10(2) :129–149, October 1983.

[Laurini et Müller, 96]
R. Laurini et JC. Müller. *La Cartographie de l'an 2000*, Revue de géomatique, 7(1) :87–106, mars 1997.

[Laurini et Thompson, 94]
R. Laurini and D. Thompson. *Fundamentals of spatial information systems*, Academic Press ed., Harcourt Brace & Company pub., The Apic Series, 1994.

[Le Men, 96a] H. Le Men. *Généralisation cartographique pour l'occupation du sol : application au passage v1 à v2 pour la BD Carto®*, Revue internationale de géomatique, 6(2-3) : 227-248, 1996.

[Le Men, 96b] H. Le Men. *Cartographie semi-automatique de l'évolution de l'occupation des sols par télédétection*, thèse d'habilitation à diriger des recherches, Université Paris 5-René Descartes, 13 décembre 1996.

[Le Roux, 92] D. Le Roux. *Contrôle de la cohérence d'un réseau hydrographique avec un modèle numérique de terrain*, rapport de stage, Conservatoire national des Arts et Métiers et Ecole supérieure des Géomètres et Topographes, octobre 1992.

[Le Roux, 93] D. Le Roux. *Modélisation des écoulements sur un modèle numérique de terrain. Application aux crues et inondations du 22 septembre 1992 à Vaison-la-Romaine*, mémoire d'ingénieur, Ecole supérieure des Géomètres et Topographes, 6 juillet 1993.

[Li, 90] Zl. Li. *Sampling strategy and accuracy assessment for Digital Terrain Modeling*, thesis for the degree of Doctor of Philosophy in Topographic Science, Faculty of Science at the University of Glasgow, March 1990.

[Mackaness, 94] W.A. Mackaness. *Issues in resolving visual spatial conflicts in automated map design*, p. 325-340. *Proceedings of the 6th international symposium on Spatial Data Handling*, Thomas C. Waugh and Richard G. Healey ed., Taylor & Francis, September 5-9, 1994. Edinburgh, Scotland.

[Mandelbrot, 83] BB. Mandelbrot. *The Fractal geometry of nature*, Freeman ed., 1983.

[Mark, 75] D.M. Mark. *Geomorphometric parameters: A review and evaluation*, Geografiska Annaler, 57a(3-4) : 165-177, 1975.

[Mark, 83] D.M. Mark. *Automated detection of drainage networks from digital elevation models*, p. 288-298. *Auto-Carto 6: Proceedings of the international symposium on Automated Cartography*, October 16-21, 1983. Ottawa, Canada.

[Mark, 86] D.M. Mark. *The Use of quadtrees in Geographic Information Systems and Spatial Data Handling*,

p. 517-526. *Proceedings of the international conference on the Acquisition, Management and Presentation of Spatial Data*, International Cartographic Association, Michael Blakemore ed., September 14-19, 1986. London, U.K.

[Masson d'Autume, 78]
G. de Masson d'Autume. *Construction du modèle numérique d'une surface par approximations successives. Application aux modèles numériques de terrain (MNT)*, bulletin de la Société française de Photogrammétrie et de Télédétection, 3/4(71-72) :33-41, 1978.

[McCormack *et al.*, 93]
J.E. McCormack, M.N. Gahegan, S.A. Roberts, J. Hogg and B.S. Hoyle. *Feature-based derivation of drainage network*, Geographical Information Systems, 7(3) : 263-279, 1993.

[McMaster et Shea, 92]
R.B. McMaster and K.S. Shea. *Generalization in digital cartography*, Association of American Cartographers ed., 1992.

[Meyer *et al.*, 87]
Y. Meyer, S. Jaffard et O. Rioul. *L'Analyse par ondelettes*, Pour la science, p. 28–37, septembre 1987.

[Ministère *et al.*, 85]
Ministère de l'Education nationale, Ministère de la Recherche et de la Technologie, CNRS. *Nouvel atlas des formes du relief*, Nathan, 1985.

[Molenaar, 95] M. Molenaar. *Spatial concepts as implemented in GIS*, in *Geographic Information Systems: Materials for a post-graduate course*, Andrew U. Frank ed., p. 91–154, 1995.

[Monier, 96] P. Monier. *Automated generalization of relief in the GIS environment*, p.167-177. *Proceedings of the 1st international conference on Geographic Information Systems in urban regional and environmental planning*, April 19-21, 1996. Island of Samos, Greece.

[Monier *et al.*, 96]
P. Monier, E. Beauvillain et O. Jamet. *Extraction d'éléments caractéristiques pour une généralisation automatique du relief*, Revue internationale de géomatique, 6(2-3) : 191-201, 1996.

[Monmonier, 87] M. Monmonier. *Displacement in vector and raster mode graphics*, Cartographica, 4(24) : 25-36, 1987.

[Morad *et al.*, 96]
M. Morad, A.I. Chalmers and P.R. O'Regan. *The Role of root-mean-square error in the geotransformation of images in GIS*, International Journal of Geographical Information Systems, 10(3) :347–353, April-May 1996.

[Moreau, 92] E. Moreau. *Application à la cartographie des modèles numériques de terrain, calculés par la méthode de la "grille élastique"*, mémoire de soutenance de diplôme d'ingénieur, spécialité topographie, Ecole nationale supérieure des Arts et Industries de Strasbourg, octobre 1992.

[Müller, 90] JC. Müller. *The Removal of spatial conflicts in line generalization*, Cartography and GIS, 2(17) : 141-149, 1990.

[Müller *et al.*, 95]
JC. Müller, R. Weibel, JP. Lagrange and F. Salgé. *Generalization: State of the art and issues*, in *GIS and generalization, methodology and practice*, JC. Müller, JP. Lagrange and R. Weibel ed., I. Masser and F. Salgé GISDATA Series ed., Taylor & Francis, pages 3-17, 1995.

[Muraki *et al.*, 90]
S. Muraki, N. Yokoya and K. Yamamoto. *3D surface reconstruction from contour line image by a regularization method*, SPIE, 1395: 226–233, 1990.

[Niemann et Howes, 91]
K.O. Niemann and D.E. Howes. *Applicability of Digital Terrain Models for slope stability assessment*, ITC Journal, 3:127-137, 1991.

[O'Callaghan et Mark, 84]
J.F. O'Callaghan and D.M. Mark. *The Extraction of drainage networks from digital elevation data*, Computer Graphics and Image Processing, 28 : 323-344, 1984.

[OEEPE, 97] OEEPE Working Group on Generalisation. *Generalisation algorithms templates*, Anne Ruas, Institut géographique national, April 3, 1997.

[Okabe *et al.*, 92]
A. Okabe, B. Boots and K. Sugihara. *Spatial tessellations. Concepts and applications of Voronoï diagrams*, John Wiley & Sons ed., 1992.

[Pariente, 94] D. Pariente. *Geographic interpolation and extrapolation by means of neural networks*, p. 684-693. *Proceedings of the 5th European conference and exhibition on Geographical Information Systems EGIS*, EGIS / MARI, March 29-April 1st, 1994. Paris, France.

[Pienovi et Spagnuolo, 94]
C. Pienovi and M. Spagnuolo. *Handling discrete surfaces by analysis and simulation*, Comput. & Graphics, 18(6):785-793, 1994.

[Pike, 88] R.J. Pike. *The Geometric signature: Quantifying landslide-terrain types from digital elevation models*, Mathematical Geology, 20(5) : 491-511, 1988.

[Plazanet, 96] C. Plazanet. *Enrichissement des bases de données géographiques : analyse de la géométrie des objets linéaires pour la généralisation cartographique (application aux routes)*, thèse de doctorat en Sciences de l'Information géographique, Université de Marne-la-Vallée, 3 octobre 1996.

[Plazanet *et al.*, 95]
C. Plazanet, J.G. Affholder and E. Fritsch. *The Importance of geometry modelling in linear feature generalisation*, Cartography and Geographic Information Systems, 22(4) : 291-305, October 1995.

[Polidori, 91] L. Polidori. *Validation de modèles numériques de terrain. Application à la cartographie des risques géologiques*, thèse de doctorat en Méthodes physiques en télédétection, Université de Paris 7, 19 décembre 1991.

[Polidori et Chorowicz, 93]
L. Polidori and J. Chorowicz. *Comparison of bilinear and Brownian interpolation for digital elevation models*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 48(2) : 18–23, 1993.

[PQBD, 95] P. Fasquel. *Qualité interne d'une base de données géographiques : concepts et terminologie*, Benoît David ed., Projet Qualité des Bases de Données géographiques, rapport technique, Institut géographique national, IGN DT/95-0667, 13 juillet 1995.

[Quinn *et al.*, 91]
P. Quinn, K. Beven, P. Chevallier and O. Planchon. *The Prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using Digital Terrain Models*, Hydrological Processes, 5:59-79, 1991.

[Raffy, 94a] M. Raffy. *Change of scale theory: A capital challenge for space observation of earth*, International Journal of Remote Sensing, 15(12) : 2353-2357, August 1994.

[Raffy, 94b] M. Raffy. *Heterogeneity and change of scale in models of Remote Sensing. Spatialization of multispectral models*, International Journal of Remote Sensing, 15(12) : 2359-2380, August 1994.

[Raper et Kelk, 91]
J.F. Raper and B. Kelk. *Three-dimensional GIS*, in *Geographical Information Systems: Principles and applications*, D.J. Maguire, M.F. Goodchild and D.W. Rhind ed., Longman Scientific & Technical, 1: 299-316, 1991.

[Riazanoff, 89] S. Riazanoff. *Extraction et analyse automatiques de réseaux à partir de modèles numériques de terrain. Contributions à l'analyse d'images de télédétection*, thèse de doctorat en Méthodes physiques en télédétection, Université Paris 7, 18 octobre 1989.

[Riazanoff *et al.*, 92]
S. Riazanoff, P. Julien, B. Cervelle et J. Chorowicz. *Extraction et analyse d'un réseau hiérarchisé de thalwegs. Application à un modèle numérique de terrain dérivé d'un couple stéréoscopique SPOT*, International Journal of Remote Sensing, 13(2) : 337-364, 1992.

[Rieger et Coulson, 93]
M.K. Rieger and M.R.C. Coulson. *Consensus or confusion: Cartographers' knowledge of generalization*, Cartographica, 30(2-3) : 69-80, 1993.

[Rogers et Adams, 90]
D.F Rogers and J.A. Adams. *Mathematical elements for Computer Graphics*, McGraw-Hill int. ed., 1990.

[Rossi, 96] Ph. Rossi. *Evolution des idées sur la tectonique, le métamorphisme et le magmatisme et leur représentation sous l'angle cartographique*, Géochronique, (59) :13-14, août 1996.

[Rost, 87] A.A. Rost. *Digital terrain analysis employing x-y-z point vectors as input data*, p. 228-237. *Auto-Carto 8: Proceedings of the international symposium on computer-assisted cartography*, March 29-April 3, 1987. Baltimore, Maryland.

[Ruas, 95] A. Ruas. *Multiple representation and generalization*, cours de l'Institut géographique national, IGN DT 95/1037, 1995.

[Ruas, 97] A. Ruas. *An algorithm for reactive displacement in automated map generalisation*, rapport technique, Institut géographique national, IGN DT 970026/S-RAP, 1997.

[Ruas et Plazanet, 96]
A. Ruas and C. Plazanet. *Strategies for automated generalization*, p. 6.1-18. *Proceedings of the 7th international symposium on Spatial Data Handling*, M.J. Kraak and M. Molenaar ed., August 12-16, 1996. Delft, the Netherlands.

[Schmitt et Mattioli, 94]
M. Schmitt et J. Mattioli. *Morphologie mathématique*, série Logique mathématiques informatique, Masson éd., 1994

[Schmid-McGibbon, 95]
G. Schmid-McGibbon. *Generalization of Digital Terrain Models for use in landform mapping*, Cartographica, 32(3) : 26-38, 1995.

[Schylberg, 93] L. Schylberg. *Computational methods for generalization of cartographic data in a raster environment*, thesis for the degree of Doctor of Philosophy, Royal Institute of Technology (Stockholm, Sweden), 1993.

[Schweinfurth, 84]
G. Schweinfurth. *Höhenliniengeneralisierung mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung*, Disser-

tation zur Erlangung des Doktor-Ingenieurs Grades, Universität Karlsruhe, München, 1984.

[Seemuller, 89] W.W. Seemuller. *The Extraction of ordered vector drainage networks from elevation data*, Computer Vision, Graphics and Image Processing, 47:45-58, 1989.

[Sharpnack et Akin, 69]
D.A. Sharpnack and G. Akin. *An algorithm for computing slope and aspect from elevations*, Photogrammetric Engineering, Journal of the ASP, 35(3):247-248, 1969.

[Skidmore, 89] A.K. Skidmore. *A comparison of techniques for calculating gradient and aspect from a gridded digital elevation model*, International Journal of Geographical Information Systems, 3(4):323-334, October-December 1989.

[Skidmore, 90] A.K. Skidmore. *Terrain position as mapped from a gridded digital elevation model*, International Journal of Geographical Information Systems, 4(1) : 33–49, 1990.

[Smith, 93] B.E. Smith. *Line simplification in three dimension*, p. 1041-1048. *Proceedings of the 16th International Cartographic Conference*, International Cartographic Association, Peter Mesenburg ed., May 3-9, 1993. Cologne, Germany.

[Thórisson, 94] K.R. Thórisson. *Simulated perceptual grouping: An application to human-computer interaction*, p. 876-881. *Proceedings of the 16th annual conference of the Cognitive Science Society*, CSS, August 13-16, 1994. Atlanta, Georgia.

[Töpfer et Pillewizer, 66]
F. Töpfer and W. Pillewizer. *The Principles of selection*, The Cartographic Journal, 3(1):10–16, 1966.

[Urabe, 92] B. Urabe. *Automatic compilation of contour lines by local DTM method*, p. 861-867. *Proceedings of the 17th ISPRS congress meeting*, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, August 2-14, 1992. Washington DC.

[van Kreveld, 94]
M. van Kreveld. *Efficient methods for isoline extraction from a digital elevation model based on triangulated irregular networks*, p. 835-847. *Proceedings of the 6th international symposium on Spatial Data Handling*, Thomas C. Waugh and Richard G. Healey ed., Taylor & Francis, September 5-9, 1994. Edinburgh, Scotland.

[Vauglin, 96] F. Vauglin. *Qualité des données géographiques. La Qualité géométrique, un état, des concepts, des outils*, cours du DEA des Sciences de l'Information géographique, Université de Marne-la-Vallée, février 1996.

[Vauglin, 97] F. Vauglin. *Modèles statistiques des imprécisions géométriques des objets géographiques linéaires*, thèse de doctorat en Sciences de l'Information géographique, Université de Marne-la-Vallée, 21 avril 1997.

[Vckovski, 95] A. Vckovski. *Representation of continuous fields*, p. 127-136. *Auto-Carto 12: Proceedings of the 12th international symposium on computer-assisted cartography*, February 24–29, 1995. Charlotte, North Carolina.

[Vidakovic et Müller, 91]
B. Vidakovic and P. Müller. *Wavelets for kids, a tutorial introduction*, technical report of the Duke University, 1991.

[Viers, 67] G. Viers. *Eléments de géomorphologie*, Nathan-université, 1967.

[Wang et Müller, 91]
Zs. Wang et JC. Müller. *Coast line generalization*, technical report, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), 1991.

[Wang et Müller, 93]
Zs. Wang et JC. Müller. *Complex coastline generalization*, Cartography and Geographic Information Systems, 20(2): 96–106, 1993.

[Weibel, 87] R. Weibel. *An adaptative methodology for automated relief generalization*, p. 42-49. *Auto-Carto 8: Proceedings of the international symposium on computer-assisted cartography*, March 29-April 3, 1987. Baltimore, Maryland.

[Weibel, 89] R. Weibel. *Konzepte und Experimente zur Automatisierung der Reliefgeneralisierung*, Dissertation zur Erlangung des Doktor Grades, Geographisches Institut, Universität Zürich, 1989.

[Weibel, 92] R. Weibel. *Models and experiments for adaptive computer-assisted terrain generalization*, Cartography and GIS, 19(3): 133-153, 1992.

[Weibel, 93] R. Weibel. *From fields to three-dimensional modelling*, manuscript, xx pages, Geographisches Institut Universität Zürich, Winterthurerstrasse 190, CH - 8057 Zürich, 1993.

[Weibel, 96] R. Weibel. *A typology of constraints to line simplification*, p. 9A.1-14. *Proceedings of the 7th international symposium on Spatial Data Handling*, M.J. Kraak and M. Molenaar ed., August 12-16, 1996. Delft, the Netherlands.

[Weibel et DeLotto, 88]
R. Weibel and J.S. DeLotto. *Automated terrain classification for GIS modeling*, p. 618-627. *Proceedings of GIS/LIS'88*, ASPRS/ACSM, November 1988. Falls Church, Virginia.

[Weibel et DeLotto, 89]
R. Weibel and J.S. DeLotto. *Automated terrain classification for GIS modeling*, in *Contributions to Digital Terrain Modeling and display*, Robert Weibel ed., 12: 25–50, 1989.

[Weibel et Heller, 90]
R. Weibel and M. Heller. *A framework for Digital Terrain Modeling*, p. 219–229. *Proceedings of the 4th international symposium on Spatial Data Handling*, SDH, July 23-27, 1990. Zürich, Swiss.

[Weibel et Heller, 91]
R. Weibel and M. Heller. *Digital Terrain Modelling*, in *Geographical Information Systems: Principles*, D.J. Maguire, M.F. Goodchild and D.W. Rhind ed., Longman Scientific & Technical, 1: 269-297, 1991.

[Weih et Smith, 96]
R.C. Weih and J.L. Smith. *The Influence of cell slope computation algorithms on a common forest management decision*, p. 13A.29-48. *Proceedings of the 7th international symposium on Spatial Data Handling*, M.J. Kraak and M. Molenaar ed., August 12-16, 1996. Delft, the Netherlands.

[Westort, 96] C. Westort. *Generalized operators for sculpting digital topographic surfaces*, p. 8B.1-14. *Proceedings of the 7th international symposium on Spatial Data Handling*, Association for Geographic Information, International Geographical Union, M.J. Kraak and M. Molenaar ed., August 12–16, 1996. Delft, The Netherlands.

[Wolf, 92] G.W. Wolf. *Hydrologic applications of weighted surface networks*, p. 567-579b. *Proceedings of the 5th international symposium on Spatial Data Handling*, International Geographical Union, August 3–7, 1992. Charleston, South Carolina.

[Wood, 96] J. Wood. *The Geomorphological characterisation of digital elevation models*, thesis for the degree of Doctor of Philosophy in Geography, University of Leicester, United Kingdom.

[Wu, 81] HH. Wu. *Prinzip und Methode der automatischen Generalisierung der Reliefformen*, Nachrichten aus dem Kartem & Vermessungswesen, (85) : 163-174, 1981.

[Zahn et Mark, 93]
F. Zahn et D. Mark. *Conflict resolution in map generalization: A cognitive study*, p. 406-413. *Auto-Carto 11: Technical papers on 11th international symposium on computer-assisted cartography*, ACSM & ASPRS, Robert B. McMaster and Marc P. Armstrong ed., October 30-November 1st, 1993. Minneapolis, Minnesota.

Références contextuelles

P. Burrough et A. Frank, ed. (1994) in [Brändli, 94]
Geographic objects with indeterminate boundaries, GISDATA Series, Taylor & Francis, vol. 3., à paraître.

Ezio Catanzariti et Alan K. Mackworth (1978) in [Weibel, 89]
Forests and pyramids: Hierarchies to understand Landsat images, p. 284–291. *Proceedings of the 5th Canadian symposium on Remote Sensing*. Victoria, B.C.

B. Deffontaines (1990) in [Carvalho, 95]
Développement d'une méthodologie morphonéotectonique et morphostructurale. Analyse des surfaces enveloppes du réseau hydrographique et des modèles numériques de terrain. Application au nord-est de la France, thèse de doctorat 05–60, Université de Paris 6.

Steve Fortune (1987)
A sweepline algorithm for Voronoï diagrams, Algorithmica, 2 : 153–174.

Günter Hake (1975) in [Schweinfurth, 84]
Zum Begriffssystem der Generalisierung, Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen, Sonderheft, Frankfurt am Main, s. 53-62.

R.E. Horton (1945) in [Wang et Müller, 91]
Erosional development of streams and their drainage basins, Bulletin of the Geological Society of America, 56 : 275–370.

Eduard Imhof (1965) in [Weibel, 89]
Kartographische Geländedarstellung, Berlin : de Gruyter.

Kaspar Kundert (1988) in [Weibel et DeLotto, 88]
Untersuchungen zur automatischen Klassifikation von raümliche Einheinten, Geoprocessing Reihe, 7, Geographisches Institut der Universität Zürich.

Joël Morrison (1974) in [McMaster et Shea, 92]
A theoretical framework for cartographic generalization with emphasis on the process of symbolization, International Yearbook of Cartography, 14 : 115-127.

L.F. Richardson (1961) in [Vauglin, 97]
The Problem of contiguity: An appendix of statistics of deadly quarrels, General Systems Yearbook 6, 139–187.

Arthur Robinson (1960) in [McMaster et Shea, 92]
Elements of cartography. 2nd ed., New York: John Wiley & Sons, Inc..

Arthur Robinson et Randall D. Sale (1969) in [McMaster et Shea, 92]
Elements of cartography. 3rd ed., New York: John Wiley & Sons, Inc..

D. Starr et A.K. Mackworth (1978) in [Weibel et DeLotto, 88]
Exploiting spectral, spatial and semantic constraints in the segmentation of Landsat images, Canadian Journal of Remote Sensing, 4(2) : 101-107.

J. Volkert (1978) in [Wu, 81]
Algorithmen zur Generalisierung, Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen, Reihe I/75, Frankfurt am Main, s. 111-132.

Wigand Weber (1982) in [Schweinfurth, 84]
Raster-Datenverarbeitung in der Kartographie, Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen, Reihe I/88, Frankfurt am Main, s. 77-109.

L.W. Zevenbergen et C.R. Thorne (1987) in [Brändli, 97]
Quantitative analysis of land surface topography, Earth Surf. Processes and Landforms, 12, s. 47-56.

Annexe

Cette annexe a pour but de présenter le détail des algorithmes. En voici les principales notations:

`i` et `j` décrivent respectivement les colonnes et les lignes
`z(i,j)` fournit la valeur d'altitude du MNT au point `(i,j)`
`z(k,l)` décrit les valeurs d'altitude du MNT comprises dans une fenêtre mobile `n×n`
`tablo_out(i,j)` donne la valeur au point `(i,j)` du MNT en sortie
Le pas du MNT est de 40 m, d'où l'utilisation de cette constante dans les algorithmes.

i. Détection des erreurs linéaires

En chaque point du MNT, on calcule dans une fenêtre mobile la moyenne et la variance selon quatre voisinages de part et d'autre des droites:

```
k=0
l=0
k=-l
k=l
```

Le calcul de la variance s'effectue par application de la formule:

$$var=E(z^2)-E(z)^2$$

On recherche la plus petite des quatre variances `var_min` et on la compare à un seuil entré interactivement. `z0` désigne le point central de la fenêtre mobile.

```
si var_min<seuil, alors valeur de z0=var_min
sinon z0=1.5
```

Cette procédure permet de repérer, par visualisation de l'image en sortie, les erreurs linéaires.

ii. Algorithmes de calcul de pente (fortran 90)

Les différents algorithmes de calcul de pente présentés dans la thèse sont ici répertoriés (calcul à partir d'une fenêtre mobile 3×3 puis détermination de la valeur des bords). Pour tous les algorithmes qui suivent, les points contenus dans une fenêtre mobile 3×3 sont repérés par:

```
zi(1)=z(i-1,j-1)
zi(2)=z(i,j-1)
zi(3)=z(i+1,j-1)
zi(4)=z(i-1,j)
zi(5)=z(i,j)
zi(6)=z(i+1,j)
zi(7)=z(i-1,j+1)
zi(8)=z(i,j+1)
zi(9)=z(i+1,j+1)
```

Algorithme 1: dénivelée maximale descendante

Le principe repose sur la recherche de l'altitude la plus basse dans la fenêtre: soit le min est un voisin de `zi(5)`; soit le min est un voisin de `zi(5)` mais a la même valeur (`grad=0`); soit le min est `zi(5)` lui-même (`grad=0`).

```
do m=1,9
     if (zi(m).le.z_min) then
         z_min=zi(m)
         drapo=m
     endif
enddo
```

```
if (m.eq.5) then grad=0.0
else
     if (jmod(drapo,2).eq.1) grad=(z-z_min)/(40.0*sqrt(2.0))
     if (jmod(drapo,2).eq.0) grad=(z-z_min)/40.0
endif
tablo_out(i,j)=iint(grad+0.5)
```

Algorithme 2: dénivelée maximale par recherche vers l'aval et vers l'amont

On recherche le maximum `z_max` et le minimum `z_min` dans le voisinage du point central de la fenêtre mobile.

```
ind1: indice du minimum
ind2: indice du maximum
z1=z(5)-z_min
z2=z_max-z(5)
if (z1.ne.0 .or. z2.ne.0) then
         if (z1.lt.z2) then
         if (jmod(ind2,2).eq.1) grad=(z2/(40.0*sqrt(2.0)))
         if (jmod(ind2,2).eq.0) grad=z2/40.0
     elseif (z2.lt.z1) then
         if (jmod(ind1,2).eq.1) grad=(z1/(40.0*sqrt(2.0)))
         if (jmod(ind1,2).eq.0) grad=z1/40.0
     endif
else grad=0.0
endif
tablo_out(i,j)=iint(grad+0.5)
```

Algorithme 3: différence finie du second ordre

Cet algorithme repose sur une moyenne pondérée des points situés dans la fenêtre mobile.

```
do i=2,nb_colonnes-2
     do j=2,nb_lignes-2
         dx=(z(i+1,j)-z(i-1,j))/(2*40)
         dy=(z(i,j+1)-z(i,j-1))/(2*40)
         tablo_out(i,j)=iint(sqrt(dx**2+dy**2)+0.5)
     enddo
enddo
```

Algorithme 4: différence finie du troisième ordre

L'algorithme 4 répond au même principe que le précédent.

```
do i=2,nb_colonnes-2
     do j=2,nb_lignes-2
         b1=(zi(9)+2*zi(6)+zi(3))/8.0
         b2=(zi(7)+2*zi(4)+zi(1))/8.0
         dx=b1-b2/40.0
         b1=(zi(9)+2*zi(8)+zi(7))/8.0
         b2=(zi(3)+2*zi(2)+zi(1))/8.0
         dy=b1-b2/40.0
         tablo_out(i,j)=iint(sqrt(dx**2+dy**2)+0.5)
     enddo
enddo
```

Algorithme 5: régression linéaire

Cet algorithme approxime un ensemble de valeurs.

```
do i=2,nb_colonnes-2
     do j=2,nb_lignes-2
         b1=(zi(9)+zi(6)+zi(3))/6.0
         b2=(zi(7)+zi(4)+zi(1))/6.0
         dx=b1-b2/40.0
         b1=(zi(9)+zi(8)+zi(7))/6.0
```

```
            b2=(zi(3)+zi(2)+zi(1))/6.0
            dy=b1-b2/40.0
            tablo_out(i,j)=iint(sqrt(dx**2+dy**2)+0.5)
        enddo
    enddo
```

Algorithme 6: détermination de l'exposition par différence finie du troisième ordre

```
    do i=2,nb_colonnes-2
        do j=2,nb_lignes-2
            b1=(zi(9)+2*zi(6)+zi(3))/8.0
            b2=(zi(7)+2*zi(4)+zi(1))/8.0
            dx=b1-b2/40.0
            b1=(zi(9)+2*zi(8)+zi(7))/8.0
            b2=(zi(3)+2*zi(2)+zi(1))/8.0
            dy=b1-b2/40.0
            tg=dx/dy
            tablo_out(i,j)=iint(atand(tg)+0.5)
        enddo
    enddo
```

Algorithme 7: détermination de l'exposition par régression linéaire

```
    do i=2,nb_colonnes-2
        do j=2,nb_lignes-2
            b1=(zi(9)+zi(6)+zi(3))/6.0
            b2=(zi(7)+zi(4)+zi(1))/6.0
            dx=b1-b2/40.0
            if (dx.eq.0) dx=1
            b1=(zi(9)+zi(8)+zi(7))/6.0
            b2=(zi(3)+zi(2)+zi(1))/6.0
            dy=b1-b2/40.0
            if (dy.eq.0) dy=1
            orient=atand(abs(dx)/abs(dy))
            if (dx.gt.0 .and. dy.lt.0) epsilon=90
            if (dx.gt.0 .and. dy.gt.0) epsilon=180
            if (dx.lt.0 .and. dy.gt.0) epsilon=270
            if (dx.lt.0 .and. dy.lt.0) epsilon=0
            tablo_out(i,j)=iint(orient+epsilon)
        enddo
    enddo
```

Traitement des bords de l'image

```
    do i=1,nb_colonnes
        tablo_out(i,1)=0
        tablo_out(i,nb_lignes-1)=tablo_out(i,nb_lignes-2)
        tablo_out(i,nb_lignes)=0
    enddo
    do j=1,nb_lignes
        tablo_out(1,j)=0
        tablo_out(nb_colonnes-1,j)=tablo_out(nb_colonnes-2,j)
        tablo_out(nb_colonnes,j)=0
    enddo
```

iii. Détermination de la dureté (fortran 90)

La dureté se calcule sur un segment de longueur `long` entrée interactivement.

```
On associe à chaque point (i,j) du MNT, les valeurs calculées à partir
des points appartenant aux 4 segments de longueur long centrés en (i,j)
horizontal, vertical, diagonal NO-SE, diagonal SO-NE:
    moyenne des z: moy_z
    moyenne des z²: car_z
```

```
          écart type: ecart_z=sqrt(car_z-moy_z**2)
          moyenne des pentes: moy_pen
          moyenne des pentes²: car_pen
          écart type: ecart_pen=sqrt(car_pen-moy_pen**2)
          dureté pour chaque segment: dur=sqrt((ecart_z*ecart_pen)/(2*pi))
     On calcule la dureté finale en chaque point (i,j) que l'on reporte dans
     tablo_out(i,j):
     durete=(dur_horiz+dur_verti+dur_no_se+dur_so_ne)/4
```

iv. Imbrication et sélection des sites du digramme (fortran 90)

```
     Choix des noeuds:
     a. Jonction de deux crêtes
     b. Extrémité de crête
     c. Confluence de deux thalwegs
     d. Source de thalweg
     1er type d'élément ? donne la valeur d'attribut de noeud1
     2ème type d'élément ? donne la valeur d'attribut de noeud2
```

La valeur des noeuds est portée par les attributs comme suit:

```
     val=1: Jonction de crêtes
     val=2: Extrémité de crête
     val=3: Confluence de thalwegs
     val=4: Source de thalweg
     sinon, non codé
```

Le tableau des distances entre deux noeuds se remplit par:

```
     min(noeud1,noeud2)=DIST_POINTAPOINT(y1,x1,y2,x2): carré de la distance
     euclidienne entre 2 noeuds noeud1 et noeud2.
```

Dans le tableau `min(noeud1,noeudj)`, on ne garde que la distance minimale entre `noeud1` et le `noeudj` le plus proche.

Le choix des sites du diagramme de Voronoï s'effectue par un seuillage du tableau:

```
     select(noeudi)=nb_min, où nb_min est le nombre de sélections du noeud
     noeudi.
```

Le calcul de la relation d'imbrication suit la formule:

```
     imbrication=a.longueur+b.denivelee, où a et b sont 2 constantes réelles
     entrées interactivement telles que a+b=1.
```

Pour chaque distance répertoriée dans le tableau `min(noeudi,noeud2)`, on calcule et on associe à `noeud2` la valeur de imbrication tel que:

```
     pour chaque noeud1 en relation avec noeud2:
          diff_z=dflotj(jiabs(z1-z2)
          diff_x=dflotj((x1-x2)**2)
          diff_y=dflotj((y1-y2)**2)
          long=40*dsqrt(diff_x+diff_y)
          arctan=datan2d(diff_z,longueur)
     pour tous les noeudi en relation avec noeud2:
          longueur=moyenne des long
          denivelee=moyenne des arctan
          imbrication=a.longueur+b.denivelee
```

v. Reconstitution du diagramme de Voronoï

L'algorithme de calcul du diagramme de Voronoï a été importé d'un site Internet (écrit en C). Il lit un fichier texte constitué d'un ensemble de points du plan et retourne un fichier texte constitué des informations nécessaires à la construction du diagramme de Voronoï. En entrée, chaque ligne du fichier consiste en deux nombres réels (les coordonnées x et y ramenées entre 0 et 1), séparés par un espace. En sortie, le fichier présente quatre types de données:

- `s a b` indique qu'un site et ses coordonnées `(a,b)` ont été repérés;
- `l a b c` indique une droite d'équation `ax+by=c`;
- `v a b` indique un sommet `v` en `(a,b)`;
- `e l v1 v2` indique une arête de Voronoï qui est un segment de la droite numéro `l` et dont les extrémités sont numérotées par `v1` et `v2`. Si `v1` ou `v2` est égal à -1, cela signifie que l'arête s'étend vers l'infini.

Le diagramme est ensuite reconstitué et stocké (6 fichiers: descripteur, arcs, faces, liens, noeuds, points intermédiaires, sommets isolés) à partir des informations contenues dans le fichier en sortie.

vi. Indicateurs géométriques et géomorphométriques (fortran 90)

Certaines fonctions et procédures sont utilisées dont on ne donne qu'une brève description:

`DIST_POINTAPOINT(yA,xA,yB,xB)`: calcule le carré de la distance euclidienne entre deux points A et B

`GVM_ARCLENGTH(Igraphe,Iarc,long)`: retourne la longueur `long` de l'arc `Iarc`

`GVM_ARCOFCYCL(Igraphe,Iface,Icycle,taille_liste,liste,nb_arcs):` liste des arcs formant un cycle associés à la face `Iface`

`GVM_SURFENV(Igraphe,Iface,surf):` surface d'une face `Iface`

Nous présentons ci-dessous les algorithmes qui calculent les différents indicateurs géométriques et géomorphologiques dans chaque cellule du diagramme de Voronoï (une cellule est définie par une face Iface).

`inf:` valeur d'altitude, de pente ou de dureté minimale d'une face
`sup:` valeur d'altitude, de pente ou de dureté maximale d'une face
`z(i,j), pen(i,j), dur(i,j):` valeur d'altitude, de pente, de dureté au point de coordonnée `(i,j)`

Médianes de la pente, de la dureté , de l'altitude

```
Pour (i,j) dans la face Iface, compter le nombre de valeurs nb_val de
pente pen(i,j)
do val=inf,sup
     if (pen(i,j).eq.val) tri(val)=tri(val)+1
enddo
val=inf
n=0
do while (n.le.nb_val/2)
   val=val+1
   n=n+tri(val)
enddo
mediane_pente=val

Médiane de la dureté: même déroulement en utilisant dur(i,j)
Médiane de l'altitude: même déroulement en utilisant z(i,j)
```

Ecarts types de la pente, de la dureté , de l'altitude

```
Pour (i,j) dans la face Iface, compter le nombre de points nb_points
Pour (i,j) dans la face Iface:
     s1=s1+pen(i,j)
     s2=s2+pen(i,j)**2
moyenne1=s1/nb_points
moyenne2=s2/nb_points
```

```
variance=moyenne2-moyenne1**2
ecart_type=jint(sqrt(variance+1.5))

Ecart type de la dureté: même déroulement en utilisant dur(i,j)
Ecart type de l'altitude: même déroulement en utilisant z(i,j)
```

Approximation de l'intégrale hypsométrique

```
Pour (i,j) dans la face Iface:
     compter le nombre de points nb_points
     som=som+z(i,j)
moyenne=som/nb_points
val=floatj(moyenne-inf)/floatj(sup-inf)
hypsometrie=jint(val*100)
```

Dénivelée maximale

```
denivelee_max=sup-inf
```

Dénivelée moyenne

```
Recherche des coordonnées (w,h) du site de la cellule
Pour (i,j) dans la face Iface:
     if (j.ne.h .or. i.ne.w) then
         diff=diff+iiabs(z(i,j)-z(w,h))
         nb_points=nb_points+1
     endif
denivelee_moyenne=jifix((floatj(diff)/floatj(nb_points))+1.5)
```

Nombre de points plus élevés que le site

```
Recherche des coordonnées (w,h) du site de la cellule
Pour (i,j) dans la face Iface:
     if (z(i,j).ge.z(w,h)) nb_val=nb_val+1
nombre_z=nb_val
```

Compacité de la face

```
status=GVM_ARCOFCYCL(Igraphe,Iface,1,30,arc(1),nb_arcs)
do i=1,nb_arcs
     j=jiabs(arc(i))
     status=GVM_ARCLENGTH(Igraphe,j,long)
     perimetre=perimetre+long
enddo
status=GVM_SURFENV(Igraphe,Iface,surf)
compacite=(4*pi*surf)/(perimetre**2)
```

Taille de la face

```
status=GVM_SURFENV(Igraphe,Iface,surf)
taille_cellule=surf
Pour prendre en compte cet indicateur, calculer la taille maximale
taille_max de toutes les cellules et, pour chaque face Iface:
taille_cellule=taille_max-taille_cellule
```

vii. Algorithmes de calcul des surfaces enveloppes (fortran 90)

Deux paramètres sont entrés interactivement par l'utilisateur. La taille de fenêtre la plus appropriée doit être de l'ordre de 3×3 ou 5×5; pour un lissage plus important, il faut augmenter le nombre d'itérations.

- `nb_iterations:` nombre d'itérations pour le calcul de la surface enveloppe
- `largeur:` largeur de la fenêtre mobile
- `z0:` point central de la fenêtre mobile

Surface enveloppe sommitale

Comparaison de `z0` avec la moyenne arithmétique des altitudes comprises dans la fenêtre: Si l'altitude du point central `z0` est plus petite que la moyenne, alors le point central prend la valeur de la moyenne. Si la moyenne est inférieure à l'altitude du point central, alors l'altitude du point central reste inchangée.

```
n=0
do while (n.ne.nb_iterations)
    n=n+1
    do i=(largeur+1)/2,nb_colonnes-(largeur-1)/2
        do j=(largeur+1)/2,nb_lignes-(largeur-1)/2
            z0=z(i,j)
            som=0
            do k=-(largeur-1)/2,(largeur-1)/2
                do l=-(largeur-1)/2,(largeur-1)/2
                    som=som+z(i+k,j+l)
                enddo
            enddo
            moy=dflotj(som)/dflotj(largeur**2)
            if (z0.lt.int(moy)) tablo_out(i,j)=iidint(moy)
            if (z0.ge.int(moy)) tablo_out(i,j)=z
        enddo
    enddo
enddo
```

Surface enveloppe moyenne

Le résultat de la moyenne mobile est affecté au point central sans condition.

```
n=0
do while (n.ne.nb_iterations)
    n=n+1
    do i=(largeur+1)/2,nb_colonnes-(largeur-1)/2
        do j=(largeur+1)/2,nb_lignes-(largeur-1)/2
            z0=z(i,j)
            som=0
            do k=-(largeur-1)/2,(largeur-1)/2
                do l=-(largeur-1)/2,(largeur-1)/2
                    som=som+z(i+k,j+l)
                enddo
            enddo
            moy=dflotj(som)/dflotj(largeur**2)
           tablo_out(i,j)=int(moy)
        enddo
    enddo
enddo
```

Surface enveloppe anticlinale

Comparaison de `z0` avec la moyenne mobile : Si la moyenne arithmétique des altitudes comprises dans la fenêtre est inférieure à l'altitude du point central `z0`, alors `z0` devient la moyenne arithmétique des altitudes. Si la moyenne est supérieure à l'altitude du point central `z0`, alors l'altitude du point central reste inchangée.

```
n=0
do while (n.ne.nb_iterations)
    n=n+1
    do i=(largeur+1)/2,nb_colonnes-(largeur-1)/2
        do j=(largeur+1)/2,nb_lignes-(largeur-1)/2
            z0=z(i,j)
            som=0
            do k=-(largeur-1)/2,(largeur-1)/2
                do l=-(largeur-1)/2,(largeur-1)/2
                    som=som+z(i+k,j+l)
```

```
                    enddo
                 enddo
                 moy=dflotj(som)/dflotj(largeur**2)
                 if (int(moy).lt.z0) tablo_out(i,j)=int(moy)
                 if (int(moy).ge.z0) tablo_out(i,j)=z
              enddo
           enddo
       enddo
```

viii. Construction d'une surface virtuelle

En entrée, on dispose de deux MNT `z1(i,j)` et `z2(i,j)` dont `z1` est le MNT référence. On calcule les différences d'altitude:

```
z3(i,j)=z2(i,j)-z1(i,j)
```

La visualisation de la surface finale construite à partir de `z3(i,j)` montre:

```
si z3(i,j)>0 alors le MNT référence a été surestimé dans z2
si z3(i,j)<0 alors le MNT référence a été sous-estimé dans z2
```

La visualisation de la surface construite à partir de la valeur absolue des différences d'altitude ne montre que les lieux de disparité entre le MNT référence et son estimation.

Résumé

Cette thèse se situe dans le domaine des Systèmes d'Information géographique (SIG) ; le cadre des recherches concerne la caractérisation automatique du terrain à partir d'un Modèle numérique de Terrain (MNT) à maillage régulier en vue d'une utilisation cartographique du MNT. Le cas de traitement envisagé concerne la généralisation cartographique de l'orographie. En cela, cette démarche s'inscrit dans la filiation de celle proposée par Robert Weibel (Institut géographique de l'université de Zurich) pour la généralisation de l'orographie [Weibel, 89], et celle du COGIT pour la généralisation des routes [Plazanet *et al.*, 95]. Elle fournit une démarche générique et des outils permettant une première adéquation entre types de relief et types de mesure à caractère géomorphologique. Elle se limite, dans sa partie expérimentale, à une méthode de segmentation du modèle initial de données en zones topographiquement homogènes, bien que les autres aspects aient aussi été abordés d'une manière essentiellement théorique. Les essais ont couvert une grande zone qui couvre la région de Valence dans la Drôme et qui a l'avantage de présenter des reliefs variés.

Le modelé du paysage dépend de divers facteurs qui contribuent ensemble à la diversification de la surface terrestre et à sa grande complexité. La géomorphologie subaérienne française réunit quatre grands domaines structuraux : les chaînes de montagnes récentes, les massifs anciens, les bassins sédimentaires et les volcans. Ils fournissent déjà une grande diversité de formes locales réparties en vallée, plaine, plateau, colline, crête, col, *etc.* Afin de décrire le relief d'une zone géographique, il convient de qualifier ces formes. Par exemple, une vallée peut alors être une auge, une vallée fluviale, une vallée encaissée… Plus largement, les formes locales partagent des similitudes géomorphologiques qui définissent cette zone.

Notre démarche conceptuelle se compose de trois phases essentielles : la segmentation du modèle initial de données altimétriques en zones homogènes, la caractérisation de chaque zone et son traitement par des opérations de généralisation.

Dans les SIG, le relief est souvent représenté numériquement par un MNT, composé d'un champ continu de valeurs donnant uniquement l'altitude de la topographie. Le nombre des applications ayant besoin d'une caractérisation du terrain plus poussée qu'un simple modèle de visualisation s'accroît : recherche des sites optimaux pour l'implantation de fermes à vent [Kidner, 96], étude des crues et inondations fondée sur un modèle d'écoulement des eaux [Le Roux, 93], connaissance des formes locales pour la cartographie topographique d'une région [Weibel, 89]…

Segmenter l'espace revient à créer une nouvelle topologie afin de définir une partition à nature géomorphologique plus adaptée aux traitements envisagés (dans notre cas, la généralisation). Selon l'application, et donc selon le traitement que l'on veut faire subir au MNT initial, on doit se poser les questions suivantes : quelle segmentation ? pour quel but ? Dans notre cas, nous cherchons à définir des zones au type de relief homogène, pour aider un processus de généralisation cartographique du relief.

Deux types principaux de méthodes de segmentation se distinguent : les méthodes ascendantes partent de données locales qui sont assemblées tant qu'elles partagent des caractéristiques communes, et les méthodes descendantes considèrent une segmentation *a priori* en tant qu'état initial et déterminent les intérieurs. Notre principe de segmentation est une combinaison de ces deux ty-

pes. Tout d'abord, il repose sur l'identification de points caractéristiques du relief (appelés sites) sur lesquels est construit un diagramme de Voronoï (méthode descendante). Ces micro-zones sont ensuite caractérisées, puis fusionnées lorsqu'elles partagent des caractéristiques géomorphométriques semblables afin de définir des méso-parties homogènes dans le MNT (méthode ascendante).

La phase de caractérisation a été traitée essentiellement d'une manière théorique. Le choix des indicateurs dépend du principe adopté : distinguer le caractère prédominant, les similitudes et les exceptions. Les deux types d'information pour lesquels nous indiquons des méthodes de caractérisation sont les réseaux (crêtes et thalwegs), et des champs continus (MNT segmenté, duretés, pentes, altitudes) puisqu'ils représentent, d'une part, la structure du relief et, d'autre part, la continuité du terrain. Nous avons également proposé des descripteurs des bassins versants (zones d'influence des thalwegs) et une méthode de détection des zones de crête.

Ce travail de recherche a été abordé en vue de la généralisation cartographique de l'orographie. C'est une procédure cartographique ayant pour but de synthétiser l'information géographique afin de la représenter dans un espace restreint, tout en maximisant la qualité de l'information transmise selon le niveau de perception souhaité. En cela, elle vise à modifier les objets d'un thème cartographique particulier, tout en conservant leurs caractéristiques les plus significatives, qui subissent ainsi des modifications géométriques et sémantiques pour assurer le changement d'échelle. Dans le cadre de la cartographie traditionnelle, la généralisation manuelle est réalisée à partir de calques réduits à l'échelle finale, sur lesquels le cartographe redessine les ondulations du terrain tout en les simplifiant, s'attachant à prendre en compte les caractéristiques naturelles de chaque type de relief. Dans nos travaux, nous définissons un ensemble de contraintes empruntées à la cartographie traditionnelle et adaptées à la généralisation de MNT ainsi qu'un modèle de généralisation du relief qui prolonge le travail de [Weibel, 89].

La caractérisation du relief permet d'optimiser le choix des traitements. Dans la mesure où certains opérateurs agissent sur les structures linéaires des réseaux de crêtes et thalwegs et d'autres sur le MNT, ces deux types d'information sont qualifiés pour répondre aux besoins de la généralisation. Par là même, le mécanisme de généralisation repose sur :

· le choix d'une méthode de généralisation locale en fonction des caractéristiques de la zone ;

· sa réalisation avec une éventuelle propagation (gestion des frontières) ;

· son contrôle en fonction d'indicateurs quantitatifs et qualitatifs et un contrôle de cohérence.

Un certain nombre d'opérateurs existent dans la littérature, auxquels nous avons ajouté deux nouvelles propositions. D'une part, nous avons détourné le concept de *surface enveloppe*, qui simule une dégradation orientée du relief afin d'analyser les traces laissées sur le paysage par les différentes actions internes et externes [Carvalho, 95], pour l'utiliser en tant que méthode de lissage particulière. D'autre part, nous avons abordé au niveau théorique, un mécanisme de généralisation fondé sur les structures linéaires. La méthode consiste, dans un premier temps, en l'élimination d'éléments secondaires définis par les critères de hiérarchisation explicités pendant la phase de caractérisation. Dans un second temps, il s'agit de généraliser les lignes maintenues afin qu'elles restent perceptibles après un changement de résolution. Nous avons étudié la propagation de ces déformations de réseaux sur le MNT.

Dans un processus dynamique, tel que celui que nous proposons, il est nécessaire de contrôler les résultats. Nous constatons ainsi qu'un lissage non contrôlé peut déplacer de façon considérable des thalwegs ou des cols, voire modifier les confluences. Il existe diverses méthodes quantitatives d'évaluation de la qualité d'un MNT [Beauvillain *et al.*, 95], qui sont insuffisantes car trop locales ou au contraire trop globales et statistiques. Notre méthode de segmentation par zones topographiquement homogènes et les indicateurs de caractérisation calculés sur les méso-zones homogènes fournissent une base nouvelle pour l'évaluation des résultats. En effet, après généralisation adaptative, si les mêmes indicateurs sont à nouveau mesurés zone par zone, leur variation après traitement fournit une indication à deux niveaux : quantitative (variation) et qualitative (maintien dans une classe). Par conséquent, la qualité des résultats peut être évaluée en fonction des deux types d'information pris en compte, à savoir les réseaux (de crêtes et thalwegs) et le MNT segmenté.

Abstract

This PhD thesis takes place within a range of researches in the field of Geographical Information Systems. To be more precise, our works aims at characterising automatically terrain from a Digital Terrain Model (DTM), for a subsequent cartographic use of the DTM. The target processing that we have considered as a test-bed case study is the cartographic generalisation of terrain. Our process follows the process proposed by Robert Weibel (Geographical Institute of the University of Zurich) for relief generalisation [Weibel, 89] and the process of the COGIT laboratory for linear features generalisation [Plazanet *et al.*, 95].

We propose a global process and some tools which provide a first relationship between relief types and geomorphologic measurements. The experimental part is so far limited to a segmentation of the initial data model into topographically homogeneous areas plus a set of measurements computed for these areas (but not a proper classification). Tests were done on a wide region which encompasses a geomorphologically varied area (Drôme, France).

The landscape character depends on several natural phenomena, each of them contributing to the terrestrial surface diversification and complexity. The French territory relief is composed of four principal structural types: recent mountain ranges, old massifs, sedimentary basins, volcanoes. Altogether, they present various local forms (valley, plateau, plain, hill, ridge…). The qualification of these forms provide an analytical description of each topographic area. For example, a valley may be fluvial, glacial, deeply embanked… At a broader level, local shapes may share common geomorphologic characteristics, and define then a given meso-area.

Our conceptual process is composed of three fundamental steps: segmentation of the initial elevation data model into homogeneous areas, characterisation of each area and adaptive processing using generalisation operations.

In GISs, relief is most of the time represented by means of a DTM, that is a continuous field of precise heights. Today, more and more applications need a thorough terrain characterisation instead of a classical model for visualisation: determination of the best sites for wind farms implantation [Kidner, 96]; flood studies [Le Roux, 93]; geomorphologic knowledge for topographical mapping [Weibel, 89]…

The purpose of our DTM segmentation step lies in the determination of topographically homogeneous areas in order to create a new topology better suited for cartographic generalisation. Depending on the target (*i.e.* the processing of the DTM), we consider: which segmentation, for which purpose? Our aim is to define homogeneous relief areas. We distinguish two kinds of method:

- ascending methods start with local data joined together as long as they share common characteristics;
- descending methods start with an *a priori* segmentation and determine sub parts.

Our segmentation principle combines both approaches. First, the principle lies on the identification of characteristic relief points from which a Voronoï diagram is computed (descending method). Then the created cells are qualified and joined together if they share the same geomorphometric character, in order to define homogeneous meso-areas (ascending method).

The characterisation step is tackled at the theoretical level and different methods are proposed according to information nature. The choice of the description measurements depends on three main objectives: determination of the prevalent character of an area, distinction of similarities and exceptions.

Information types for which we indicate qualification methods are the interlocking ridge and channel networks, and several continuous fields. For example, the networks may be characterised by a context sensitive hierarchy and geomorphologic parameters. Further, the partitioned DTM may be thoroughly qualified by the detection of characteristic irregularities (a hill in a flat area, a plateau in a rough area). We also suggest a set of parameters to describe watersheds (influence areas of the drains) and an approach to detect the ridge influence areas which provide interesting information on planimetric shapes of hills.

Our research has been initiated to contribute to relief cartographic generalisation. Cartographic generalisation is a process which aims at abstracting geographical information so that it may fit into a limited space representation, while maximising the conveyed information quality. Consequently, it aims at geometrically and semantically modifying cartographic objects while preserving their main characteristic features in order to ensure a scale reduction. In the traditional cartography domain, manual generalisation proceeds by redrawing generalised maps that are later reduced at the target scale. The cartographer redraws terrain shapes while simplifying them by preserving the natural characteristics of each identified terrain type. In our works, we define a set of suitable constraints which are derived from traditional cartography and adapted to DTM generalisation, as well as a generalisation model which we have elaborate starting with the proposal of [Weibel, 89].

Relief characterisation supplies information for the processing optimisation. Both types of information described above are qualified to fulfil the needs of generalisation insofar as some operators modify the linear structures of the ridge and channel networks and others the DTM itself. The generalisation mechanism relies on:

· choices of local methods according to areas characteristics;

· application of these methods plus propagation when needed (border management);

· control according to quantitative and qualitative parameters.

We add two new ideas to the algorithms which are already listed in the literature. First, we change the concept of *envelop surface*, which primarily simulates an oriented erosion of relief [Carvalho, 95], in order to use it as a smoothing method. Second, we analyse theoretically a mechanism based on linear structures processing. This method begins with the elimination of secondary features defined during the characterisation step according to a hierarchy criteria. Then, the preserved lines are generalised, to maintain their legibility after scale reduction. The propagation of these distortions on the DTM is then discussed.

In our dynamic process, it becomes necessary to control the results. An uncontrolled smoothing process may perceptibly displace drains or passes, and may modify confluences. There are various quantitative methods to assess DTM quality [Beauvillain et al., 95] but they are generally inadequate (too statistical and numerical). We have tried to bring in new proposals. Most notably our segmentation method (providing topographically homogeneous areas and the proposed characterisation parameters) establishes a new base for result evaluation. After adaptive generalisation, relief parameters may be measured and compared area by area. The variations provide an indication about quantitative (numerical variations) and qualitative (maintenance of the classification) assessment. Quality of the final result may finally be assessed according to both types of information, *i.e.* ridge and channel networks and the DTM.