



Synthèse de paysages réalistes par simulation de processus d'érosion

Pascale Roudier

► To cite this version:

Pascale Roudier. Synthèse de paysages réalistes par simulation de processus d'érosion. Graphics [cs.GR]. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne; Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 1993. French. <NNT : 1993STET4011>. <tel-00835373>

HAL Id: tel-00835373

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00835373>

Submitted on 18 Jun 2013

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

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

THESE

présentée par

Pascale ROUDIER

pour obtenir le titre de

DOCTEUR en INFORMATIQUE

de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne
et de l'Université Jean Monnet de Saint-Etienne

spécialité

Images

SYNTHESE DE PAYSAGES REALISTES PAR SIMULATION DE PROCESSUS D'EROSION

- soutenue à Saint-Etienne le 8 Juin 1993 -

COMPOSITION DU JURY

Messieurs B. PEROCHE *Président*
 D. ARQUES *Rapporteurs*
 R. CAUBET

Mesdames Y. AHRONOVITZ *Examinateurs*
 S. COQUILLART

Monsieur D. FAUDOT
 M. PERRIN

THESE

présentée par

Pascale ROUDIER

pour obtenir le titre de

DOCTEUR en INFORMATIQUE

de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne
et de l'Université Jean Monnet de Saint-Etienne

spécialité

Images

SYNTHESE DE PAYSAGES REALISTES PAR SIMULATION DE PROCESSUS D'EROSION

- soutenue à Saint-Etienne le 8 Juin 1993 -

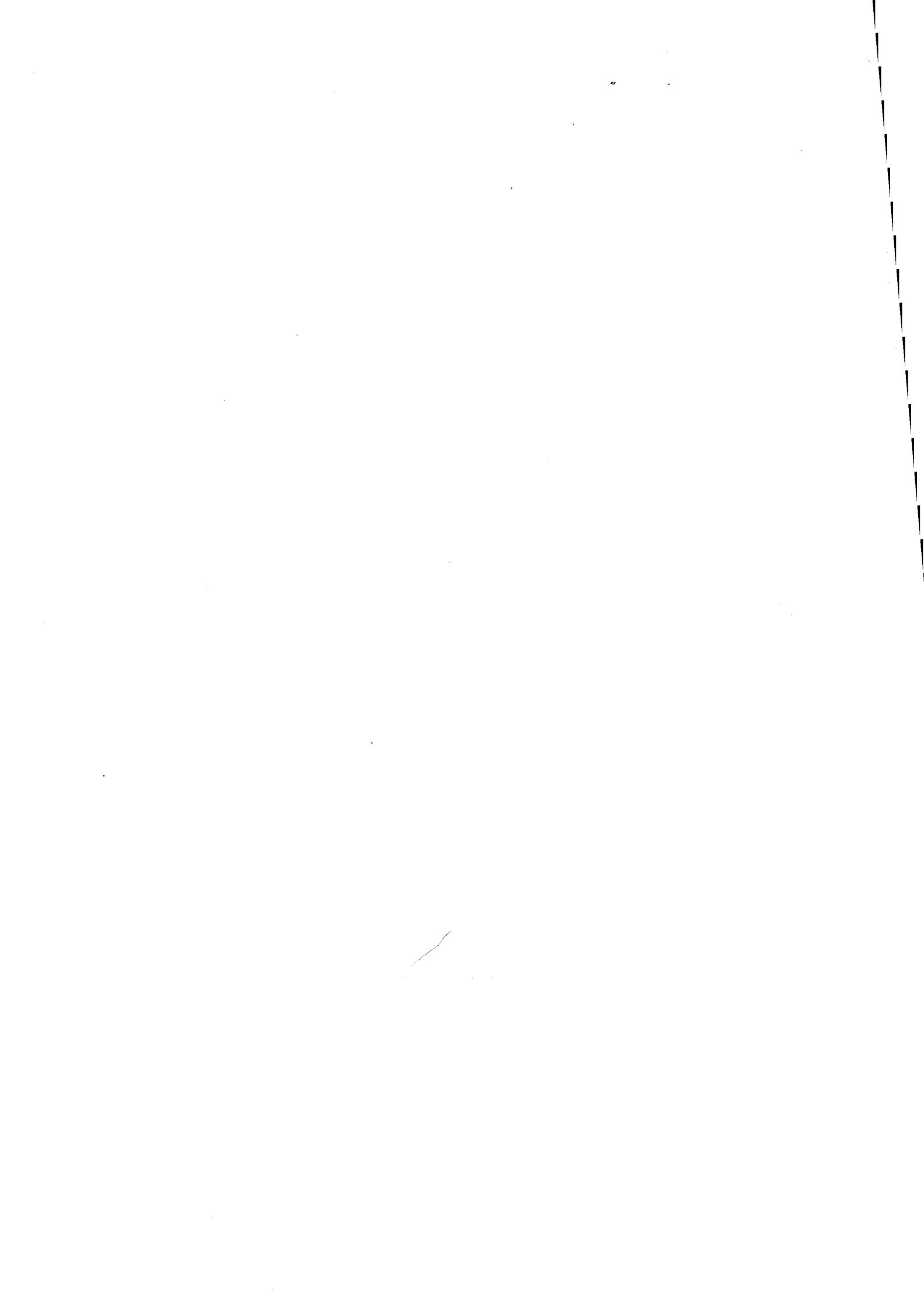
—

COMPOSITION DU JURY

Messieurs B. PEROCHE *Président*
 D. ARQUES *Rapporteurs*
 R. CAUBET

Mesdames Y. AHRONOVITZ *Examinateurs*
 S. COQUILLART

Monsieur D. FAUDOT
 M. PERRIN



Remerciements

Je tiens ici à remercier les membres du jury ainsi que toutes les personnes qui, sur un plan professionnel ou personnel, m'ont aidée durant ces années de thèse :

Monsieur Bernard Peroche, Professeur et Directeur du Département Informatique de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, pour m'avoir accueillie dans son laboratoire et m'avoir fait l'honneur de présider le jury de ma thèse. Je le remercie aussi pour ses conseils judicieux apportés au cours de l'encadrement de ma recherche.

Messieurs Didier Arquès, Professeur à l'Université de Besançon et René Caubet, Professeur à l'IRIT de Montpellier, pour avoir accepté de juger mon travail.

Monsieur Michel Perrin, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris pour m'avoir initiée au domaine de la géologie et m'avoir largement guidée tout au long de cette étude. Ses suggestions et ses nombreuses remarques ont été extrêmement profitables à l'aboutissement de ce travail.

Mesdames Sabine Coquillart, Maître de Recherche à l'INRIA Rocquencourt et Dominique Faudot, Maître de Conférences à l'Université de Bourgogne pour leurs remarques pertinentes sur le rapport.

Madame Yolande Ahronovitz, Maître de Conférences à l'Université de Saint-Etienne, pour sa participation au jury.

Les personnes du Département Informatique :

Marie-Line, Florence, Annie, Hélène et Véronique pour leur gentillesse et leur disponibilité, Philippe, Marc, Michel, Dominique, François pour leur aide amicale, Mohand-Ourabah, Jean-Luc, Gilles, Gauthier, Sami, Jean-Michel, Ehoud, Daniel et JJ et tous les autres pour leur sympathique présence, et surtout Gabriel pour son soutien.

Le personnel du service de reprographie pour avoir assurer la reproduction de ce rapport.

Mes parents, Geneviève, Denis et Elisabeth pour leur affection et leur confiance tout au long de mes années d'études.

Sommaire

Introduction	7
I Etat de l'art en modélisation de paysages	11
1 Les modèles intuitifs	13
1.1 Modèles issus de données réelles	13
1.1.1 Modèles numériques de terrains	14
1.1.1.1 Modèle irrégulier	14
1.1.1.2 Modèle maillé	15
1.1.2 Techniques d'acquisition	16
1.1.2.1 Lever de terrain	16
1.1.2.2 Numérisation des cartes topographiques	16
1.1.2.3 Photogrammétrie	17
1.1.3 Méthodes de visualisation	18
1.1.3.1 Visualisation par facettes	18
1.1.3.2 Visualisation par grille	18
1.2 Modèles synthétiques	20
1.2.1 Primitives employées	20
1.2.2 Techniques de simulation visuelle	20
1.3 Conclusion	21
2 Les modèles stochastiques	23
2.1 Fractales stochastiques	24
2.1.1 Processus stochastiques	25
2.1.2 Mouvement Brownien fractionnaire	25
2.2 Méthodes de génération de fractales stochastiques	26
2.2.1 Modélisation par subdivision récursive	26
2.2.2 Modélisation par surfaces paramétriques stochastiques	28

SOMMAIRE

2.3	Autres types de modélisations avec fractales	29
2.4	Visualisation	29
2.5	Conclusion	30
3	Les modèles de simulation	33
3.1	Principes de géomorphologie	33
3.2	Modélisation par simulation statique	35
3.2.1	Modèle de Kelley et al.	36
3.2.2	Modèle d'Arquès et Janey	37
3.3	Modélisation par approche dynamique	38
3.4	Conclusion	39
II	La modélisation de terrains	41
4	Le modèle d'érosion et de sédimentation	43
4.1	Etude géomorphologique	44
4.1.1	Processus actifs	44
4.1.1.1	Processus érosifs	44
4.1.1.2	Moteurs des processus érosifs	45
4.1.1.3	Influence du sous-sol	46
4.1.1.4	Réseau hydrographique	46
4.1.1.5	Echelles de temps	46
4.1.2	Différentes approches	47
4.1.2.1	Modèle d'Ahnert	48
4.1.2.2	Modèle de Kirkby	49
4.2	Description de notre modèle	50
4.2.1	Modélisation du relief	51
4.2.1.1	Structure spatiale	52
4.2.1.2	Altimétrie de la surface	53
4.2.2	Représentation du sous-sol	55
4.2.2.1	Modèle polyplissé et polyfaillé	56
4.2.2.2	Paramètres géologiques	60
4.2.2.3	Définition de la végétation	61
4.2.3	Lois de la simulation	62
4.2.3.1	Loi d'érosion gravitaire	63
4.2.3.2	Loi d'érosion mécanique	64

SOMMAIRE

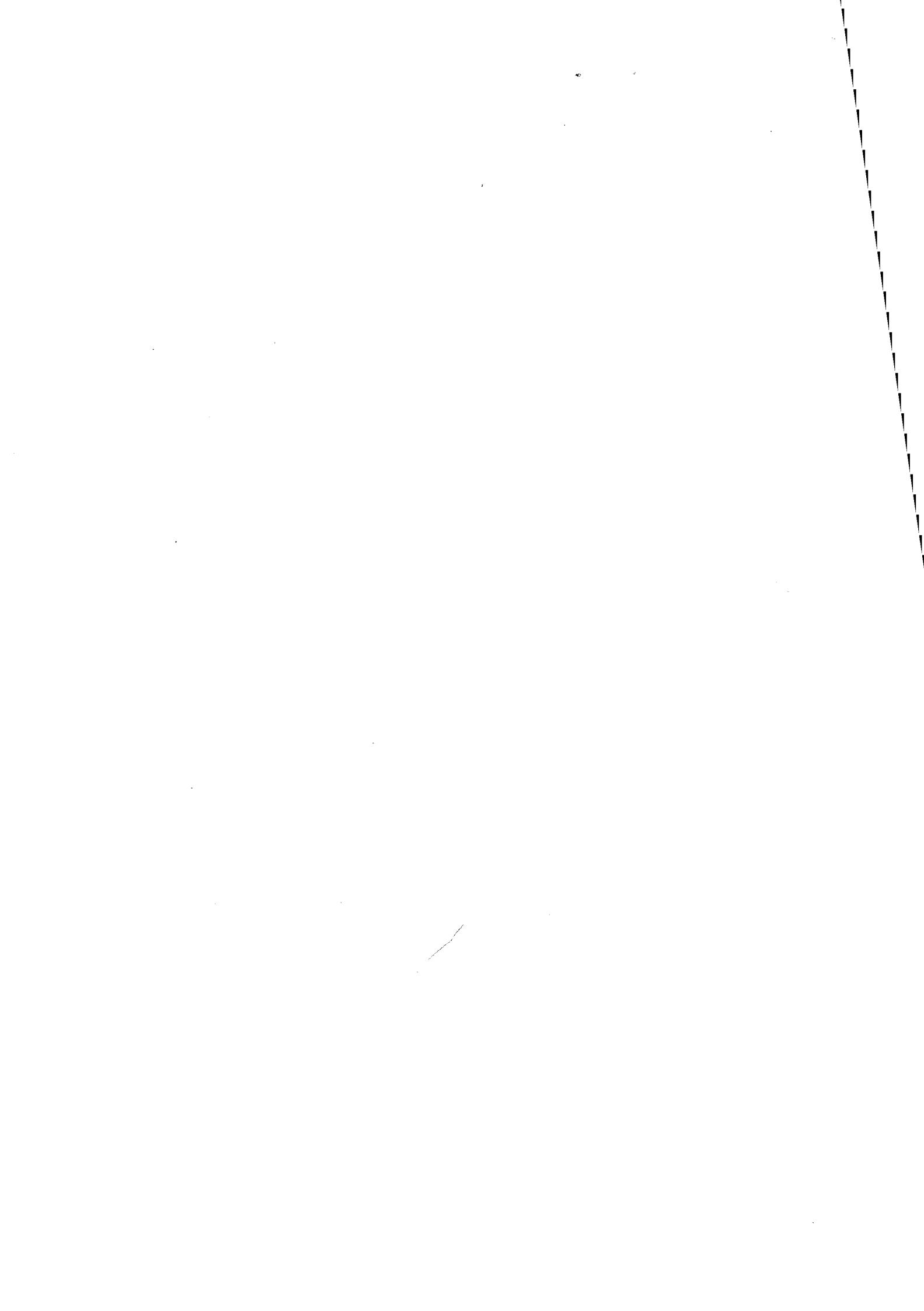
4.2.3.3	Loi d'érosion chimique	65
4.2.3.4	Loi de sédimentation	66
4.2.4	Mise en œuvre du processus itératif	67
4.2.4.1	Moteurs des processus	67
4.2.4.2	Echelles de temps et d'espace	68
4.2.4.3	Arborescence du réseau	69
4.2.5	Mises à jour	72
4.2.5.1	Modifications d'altitude	72
4.2.5.2	Evolution des paramètres géologiques	73
4.2.5.3	Paramètres de la simulation	73
4.3	Conclusion	75
5	Les reliefs et les réseaux	77
5.1	Spécificités du modèle	77
5.1.1	Traits de relief	78
5.1.1.1	Influence du sous-sol	78
5.1.1.2	Paramétrage des lois et des données	80
5.1.2	Réseau hydrographique	84
5.1.2.1	Evolution du réseau	85
5.1.2.2	Lignes de crête	86
5.2	Points de discussion	87
5.2.1	Phénomènes liés à l'écoulement	87
5.2.1.1	Direction d'écoulement	87
5.2.1.2	Creusement des vallées	88
5.2.2	Problème des cuvettes	89
5.3	Conclusion	90
III	La visualisation de terrains	93
6	La visualisation et le rendu	95
6.1	Visualisation du relief	95
6.1.1	Technique du tampon de profondeur	95
6.1.2	Calcul de l'éclaircissement	96
6.1.2.1	Lissage	97
6.1.2.2	Lignes de crête	97
6.2	Visualisation du réseau hydrographique	98

SOMMAIRE

6.2.1	Création des facettes	98
6.2.2	Lissage des cours d'eau	99
6.2.2.1	Interpolation	100
6.2.2.2	Calcul des altitudes	101
6.3	Définition de textures naturelles	101
6.3.1	Quelques méthodes de génération	102
6.3.1.1	Textures 2D	102
6.3.1.2	Textures 3D	103
6.3.2	Choix d'une méthode	104
6.3.3	Création des textures	105
6.3.3.1	Présentation de spot noise	105
6.3.3.2	Optimisation de la méthode	106
6.3.4	Application aux textures naturelles	108
6.3.4.1	Textures de végétation	109
6.3.4.2	Plaquage des textures	110
6.4	Quelques effets visuels	113
6.4.1	Visualisation des coupes	113
6.4.2	Ciel, neige et bleu atmosphérique	114
6.5	Conclusion	115
7	Le tracé de rayons	117
7.1	Présentation générale	117
7.1.1	Principe de l'algorithme	118
7.1.2	Tracé de rayons existant	120
7.2	Représentation des terrains	121
7.2.1	Intersection avec une grille altimétrique	121
7.2.1.1	Grille carrée	122
7.2.1.2	Extension à la grille hexagonale	124
7.3	Conclusion	125
Conclusion		127
A	Ecoulement et capacité de transport le long d'une pente	131
A.1	Ecoulement le long d'une pente	131
A.2	Le transport le long d'une pente	132
B	Détermination des directions d'écoulement : proposition	135

SOMMAIRE

B.1 Flux d'eau efficace	135
B.2 Calcul des abaissements	136
B.3 Ecoulement résultant	136
C Photographies	139



Introduction

En synthèse d'images, la simulation réaliste de scènes d'extérieur présente des champs d'études et d'applications importants. Parmi ces derniers, on peut citer les secteurs d'activités concernant la cartographie, l'aménagement de sur-sols ou la simulation de conduite. Selon leurs utilisations, les images demandées seront des vues d'ensemble ou de détail de paysages où l'on s'intéressera plus au réalisme qu'à l'efficacité. Inversement, d'autres applications se contenteront de vues plus schématiques mais avec une génération en temps réel. Outre les nombreux domaines d'application, la synthèse de scènes d'extérieur est intéressante en soi pour les aspects de représentation et de compréhension des phénomènes. Une telle simulation peut offrir à la fois un moyen de comprendre les processus de création de paysages et de créer des images les plus réalistes possibles.

La génération d'images de paysages nécessite deux étapes, classiques en synthèse d'images : la partie modélisation de l'objet que l'on veut représenter et la partie visualisation permettant d'effectuer le rendu de l'objet modélisé. Au niveau visualisation, les techniques habituelles de synthèse sont souvent applicables moyennant certaines modifications. Au contraire l'étape de modélisation demande une étude plus poussée, du fait de la complexité des phénomènes à modéliser.

Un paysage est souvent composé d'un ensemble d'objets artificiels qui s'inscrivent dans un relief de nature différente. Si la modélisation de tels objets est, à l'heure actuelle, en grande partie résolue, celle concernant le relief n'a pas été encore très étudiée. Aussi les méthodes de génération de reliefs sont peu nombreuses. Globalement, elles correspondent aux approches suivantes : une modélisation simple avec une visualisation la plus réaliste possible, des techniques fractales de génération de reliefs et, récemment, des modèles de simulation. Cette dernière approche suit un courant assez général en synthèse d'images qui consiste à comprendre puis à simuler les processus générateurs de phénomènes naturels, dans l'optique d'un meilleur réalisme.

L'objectif de notre étude est la synthèse d'images de paysages réalistes s'appuyant sur une modélisation par simulation de processus naturels. Le nouveau modèle que nous proposons peut donc se classer dans la catégorie sus-citée des modélisations par simulation. La restitution des processus réels agissant sur la création et l'évolution des reliefs nous semble en effet un des moyens les plus sûrs pour obtenir des paysages réalistes.

Notre approche consiste à générer des reliefs en prenant en compte les processus géologiques actifs au niveau du sol. Ces processus, agissant sur des roches présentant des

caractéristiques géologiques contrastées, sont responsables des formes du relief ; ils conditionnent en particulier la morphologie du réseau hydrographique correspondant. Ce sont ces principes qui ont été mis en œuvre dans notre modèle : une représentation du relief incluant des données géologiques et une simulation des processus agissant sur ce relief. Ils permettent une simulation de l'évolution topographique, géologique et hydrologique du relief.

Le choix des processus à simuler s'est porté sur les actions de l'érosion et de la sédimentation par les eaux de ruissellement dans le cadre de reliefs montagneux en climat semi-tempéré. Ces processus sont jugés suffisants pour la génération et l'évolution des reliefs ; ils sont formalisés par des équations traduisant les effets de l'écoulement et du transport de matière.

La mise en œuvre d'une telle modélisation est donc le fruit d'une étude liant les domaines de la géomorphologie et de la synthèse d'images classique. Une fois le relief modélisé, l'étape de visualisation peut inclure différentes techniques afin de restituer le maximum de réalisme (textures, visualisation du réseau hydrographique, effets visuels).

Ce rapport se décompose en trois grandes parties et détaille les principes exposés dans [RPP93] :

La première partie présente l'état de l'art en modélisation de paysages. Elle permet de faire le point sur les différentes méthodes utilisées en génération de reliefs et d'introduire les principes de notre modèle. Nous présentons aussi brièvement les techniques de visualisation associées. Celles-ci ne font pas partie d'un chapitre précis car elles sont parfois liées au modèle choisi. Par ailleurs, notre étude se distingue essentiellement par l'originalité de la modélisation mise en œuvre.

- Le chapitre 1 traite des modélisations issues de données réelles (modèles numériques de terrains) et des modèles utilisant des primitives simples et une visualisation adaptée (textures de végétation, effets visuels)
- Le chapitre 2 présente les techniques de génération de reliefs par fractales stochastiques en insistant sur les particularités d'une telle modélisation.
- Le chapitre 3 récapitule les modèles de simulation, en distinguant les modèles statiques où le relief est généré à partir du réseau hydrographique et les modèles dynamiques simulant des équations de transport.

La seconde partie explique la nouvelle modélisation proposée ; c'est le cœur de l'étude. Elle se partage en deux chapitres correspondant à l'étude théorique du modèle et aux résultats obtenus.

- Le chapitre 4 présente en détail la modélisation proposée. Les résultats de l'étude géomorphologique sont exposés et servent de base au modèle qui est décrit ensuite. Nous expliquons comment est représenté le relief (avec ses caractéristiques géologiques), sous quelle forme sont définies les lois de la simulation et comment elles agissent.

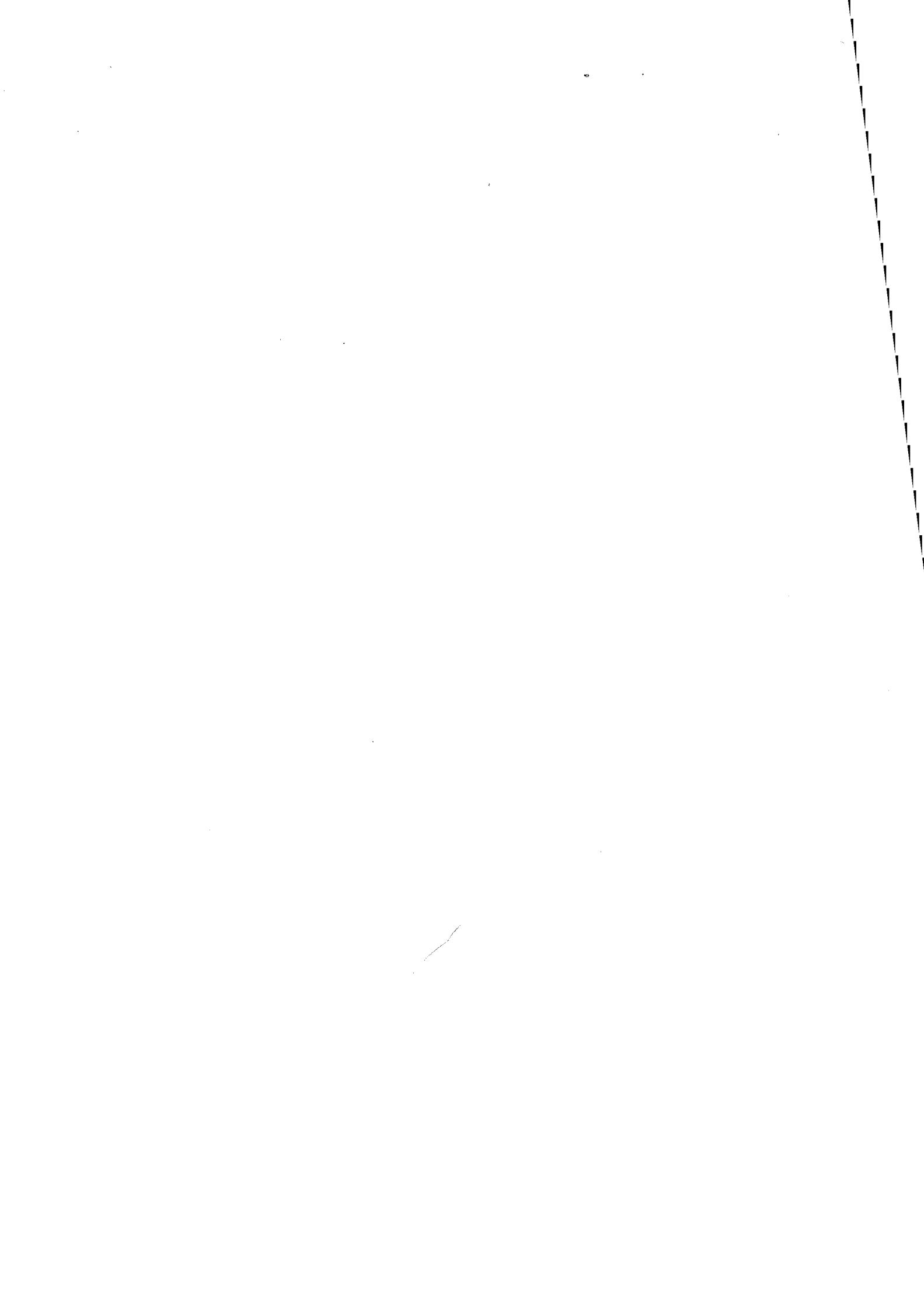
Introduction

- Le chapitre 5 montre à l'aide d'exemples les spécificités du modèle et aborde un certain nombre de points de discussion qui lui sont associés.

La troisième partie est consacrée aux techniques de rendu mises en œuvre pour la visualisation des terrains modélisés.

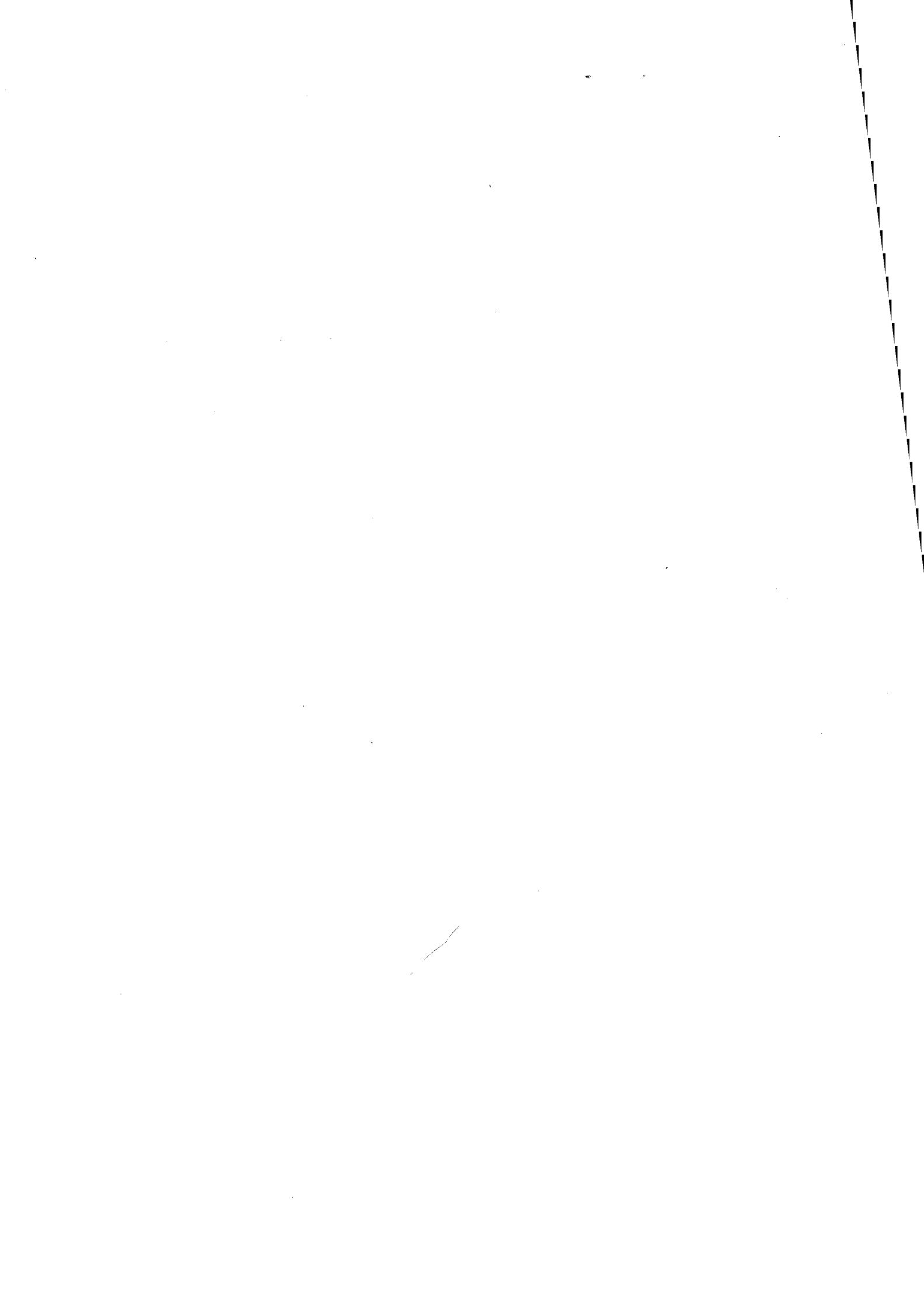
- Le chapitre 6 expose en détail les méthodes utilisées pour effectuer un rendu réaliste des reliefs simulés. En particulier, nous présentons les solutions retenues permettant la visualisation de textures adaptées aux reliefs montagneux, la représentation du réseau hydrographique et la simulation d'effets visuels.
- Le chapitre 7 propose un rendu de terrains par tracé de rayons, concernant en particulier le calcul d'intersection entre une primitive "terrain" et un rayon.

En conclusion, nous présentons les intérêts et les particularités de notre simulation et les points futurs pouvant être développés.



Partie I

Etat de l'art en modélisation de paysages



Les modèles intuitifs

1

L'approche la plus simple lorsqu'il s'agit de modéliser et de représenter un paysage est d'utiliser des données existantes sur des reliefs naturels. Dans ce cas, la modélisation se résume plus à des méthodes d'acquisition et de restitution qu'à une modélisation proprement dite. L'étape de visualisation est alors importante pour reproduire les reliefs originaux. Notons que cette approche correspond bien à des applications liées aux domaines de la cartographie, de l'aménagement de sols ou de la simulation de conduite.

Dans cette même optique, d'autres modélisations préfèrent s'attacher à restituer une apparence réaliste de paysages en utilisant une modélisation simple des reliefs. Ces deux approches, que nous allons présenter plus en détail dans ce chapitre, ne cherchent pas à modéliser par des techniques complexes la forme des reliefs mais plus à rendre un aspect global de paysage. Il s'agit des modèles utilisant des données réelles de terrains digitalisés et des modèles simulant des effets visuels sur une représentation simple du relief.

1.1 Modèles issus de données réelles

La génération d'images de paysages naturels est fondée sur le concept de *Modèle Numérique de Terrain* (MNT ou *Modèle Digital de Terrain*). Il provient des travaux de Miller et LaFlamme [ML58] au Massachusset Institute of Technology vers la fin des années soixante. Leur objectif était de développer une méthode de conception assistée par ordinateur pour optimiser le tracé de routes. Cette représentation permet une modélisation simple de paysages effectuée en deux grandes étapes : l'acquisition des données et leur visualisation plus ou moins réaliste.

1.1.1 Modèles numériques de terrains

Par définition, les MNT correspondent à la représentation simplifiée de la distribution spatiale d'une propriété d'une surface topographique. Généralement la propriété représentée est l'altitude mais d'autres informations peuvent être désirées (par exemple, la perméabilité d'un sol ou sa salinité).

Dans un MNT, l'ensemble des données obtenues modélise l'aspect géométrique du terrain. Le modèle correspond à la forme explicite de la propriété p_k du terrain, discrétisée aux noeuds k d'une grille plane qu'il a pour base. L'étape de discréétisation et de digitalisation est effectuée par différentes techniques qui seront exposées par la suite.

Les mesures sont ensuite regroupées dans des fichiers informatiques, généralement sous forme de matrice et sont directement manipulables. C'est le cas des fichiers de données DMA (*Defense Mapping Agency*) de l'Institut National de la Géographie, utilisés en cartographie ou pour des logiciels de simulation de conduite. Il faut noter que du fait de leur caractère numérique, les fichiers MNT peuvent atteindre des tailles impressionnantes dès que l'on représente un terrain conséquent. Des techniques de compression de données sont alors nécessaires.

Au niveau du type de grille de discréétisation, plusieurs choix sont possibles [PK87]. Pour la synthèse d'images, ce choix est important car il détermine l'utilisation ultérieure des données. Deux grandes catégories de grille s'opposent : la grille régulière et la grille irrégulière.

1.1.1.1 Modèle irrégulier

Dans ce modèle, la grille de discréétisation choisie est irrégulière ; ce qui signifie que les données ne sont pas ordonnées régulièrement dans l'espace. La surface au sol peut être modélisée par un réseau de facettes polygonales planes. On peut aussi considérer des polygones quelconques, des quadrilatères ou des surfaces de Bézier mais, en général, ce sont des facettes triangulaires qui sont utilisées pour simplifier la modélisation et la visualisation. Dans ce cas, le modèle est appelé *Triangular Irregular Network*. La représentation de la topographie est obtenue par des points de mesure choisis par l'opérateur pour leur représentativité (par exemple un point de rupture de pente, une ligne de crête) ou par digitalisation des courbes de niveaux. On cherche ensuite à associer les points et les lignes choisis à des sommets et des arêtes des faces.

Ce modèle possède plusieurs avantages :

- La densité d'informations est adaptative car la discréétisation prend en compte les caractéristiques locales du terrain. Ainsi, une région accidentée sera modélisée par un ensemble de petites facettes alors qu'une zone de plaine sera représentée par quelques grandes faces. Ce modèle garde donc une certaine fidélité structurale mais oblige à expliciter le voisinage d'un point.
- Le découpage en facettes peut être réalisé avec plusieurs niveaux de détail. En effet, il est possible de modéliser un terrain, de façon schématique, avec très peu de facettes

1.1 – Modèles issus de données réelles

et de construire des structures hiérarchiques pour les différentes précisions.

Fowler et Little [FL79] utilisent ce principe pour représenter des terrains utilisables en analyse et en cartographie. Ils constituent, à partir du modèle en grille issu de la digitalisation de photographies, un ensemble de facettes contiguës de formes et de tailles différentes. Elles résultent du choix de points (pics, fosses, défilés) et de lignes (crêtes, canaux) spécifiques. Ceux-ci forment l'épine dorsale de la surface et sont reliés par une triangulation automatique de Delaunay. Ils comparent alors le modèle triangulé avec la grille et ajoutent progressivement des points de support pour assurer la fidélité statistique (même densité de points).

1.1.1.2 Modèle maillé

Dans ce cas, les coordonnées en X et Y de la grille sont régulièrement espacées. En général, la maille utilisée est carrée pour simplifier les traitements mais elle peut être aussi triangulaire, rectangulaire ou hexagonale. Une maquette de terrain est ainsi définie par les altitudes a_{ij} aux nœuds (i, j) , par le nombre de nœuds de la grille (i_{max}, j_{max}) et par la dimension (Δ_i, Δ_j) de la maille .

Le modèle maillé présente deux propriétés très intéressantes qui expliquent l'attrait des utilisateurs pour cette représentation :

- La grille étant représentée de façon implicite, l'accès aux informations d'un nœud quelconque de la grille est simplifié. De même, la régularité et la symétrie de la description facilitent les algorithmes de visualisation.
- Il est possible de définir plusieurs types de surfaces comme des surfaces gauches (quadriques, bi-cubiques) ou des surfaces fractales sur les éléments de la grille. Ces dernières pourront ainsi représenter différents niveaux de détail.

L'utilisation d'un tel modèle implique le traitement d'un grand nombre de faces. Par ailleurs, la représentation d'un terrain par un ensemble de mailles uniformes s'adapte mal à un relief mi-accidenté mi-vallonné. En effet, pour représenter les particularités du terrain, il faut augmenter la densité des points ; ce qui implique alors une surabondance de données dans les régions monotones. Des techniques d'échantillonnage progressif sont alors envisageables pour optimiser la discréétisation [Mak73]. Elles consistent, à partir de l'analyse du terrain, à diviser récursivement certaines mailles de la grille et à augmenter ainsi la densité de points dans les reliefs. Ceci explique que cette représentation soit plutôt adaptée à des modélisations de paysages où les vues sont effectuées à très haute altitude (simulateurs de vol).

Lorsque la visualisation s'effectue pour un observateur situé à proximité du terrain (études d'impact), la maille uniforme utilisée devient trop grande pour les faces proches de l'œil et inversement trop petite pour les faces éloignées. Kaneda et al. [KKN⁺89] proposent alors la création d'un maillage radial qui prend en compte la position de l'observateur (figure 1.1). Ils définissent, à partir de la position de vue, une pyramide de visée dont la

base est une grille rectangulaire donnant la précision du maillage. L'intersection des lignes œil-nœuds de la grille avec un plan horizontal de référence donne les points du maillage radial. Ainsi, les lignes de la nouvelle grille sont ordonnées en fonction de la distance à l'œil. Evidemment, ce maillage doit être recalculé à chaque changement de position de l'observateur.

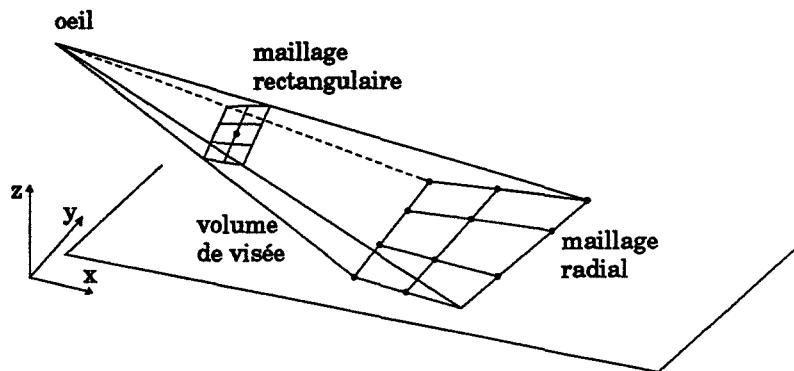


FIG. 1.1 : *Création d'un maillage radial*

1.1.2 Techniques d'acquisition

L'obtention des modèles pré-cités nécessite une étape antérieure d'acquisition des données. Celle-ci crée des modèles différents selon la technique utilisée.

1.1.2.1 Lever de terrain

Il est effectué au stadia et procure un modèle irrégulier. Ce genre de technique est souvent utilisé pour des relevés de terrains réduits ou pour des cartographies à grande échelle. Les données peuvent être stockées sur place et ensuite transférées vers un centre d'acquisition.

1.1.2.2 Numérisation des cartes topographiques

C'est une technique simple qui consiste à utiliser des cartes topographiques existantes. A l'origine, les données étaient acquises à l'aide d'une table de numérisation où l'opérateur suivait manuellement les courbes de niveau de la carte. Cette méthode était évidemment fastidieuse et engendrait un certain nombre d'erreurs (duplication ou omission d'informations). C'est pourquoi, souvent seuls les terrains de faible étendue étaient numérisés de cette façon. Aujourd'hui, des techniques automatiques utilisant un scanner sont mises en œuvre. Elles nécessitent un traitement ultérieur pour attribuer une valeur d'altitude aux points numérisés. L'acquisition directe à partir d'une carte demande que les coordonnées issues du digitaliseur soient transformées en coordonnées projectées puis en coordonnées

1.1 – Modèles issus de données réelles

géographiques¹. Celles-ci permettent d'obtenir des bases de données cohérentes pour différentes régions.

Les contours du terrain servent ensuite à définir des modèles irréguliers ou maillés (figure 1.2). Dans le premier cas, la transformation consiste à trianguler chaque zone comprise entre deux contours. Pour cela, des points le long des lignes de contour sont sélectionnés à des intervalles appropriés (la densité des points est fonction du relief) puis sont reliés par triangulation (avec la contrainte que chaque triangle ne coupe pas une ligne de contour). Pour obtenir un modèle maillé, on peut alors interpoler des valeurs d'altitude d'une grille régulière à partir du réseau triangulé [Cul78]. Cependant, la méthode la plus rapide est de calculer directement les mesures d'altitude aux nœuds d'une grille de digitalisation, en interpolant les élévations des deux contours voisins.

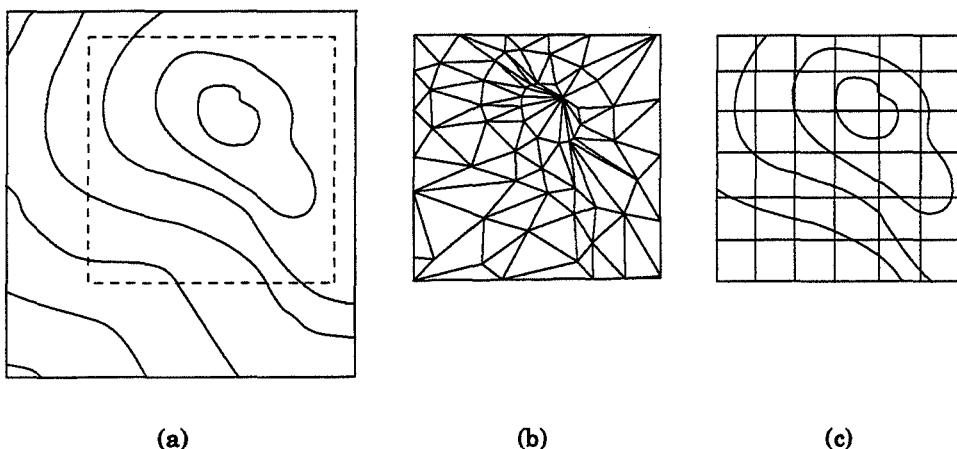


FIG. 1.2 : (a) carte de contours, (b) modèle irrégulier, (c) grille régulière

1.1.2.3 Photogrammétrie

La photogrammétrie est la technique la plus développée de nos jours. Elle consiste à prélever des mesures sur des photographies stéréographiques aériennes ou sur des images satellites². Des satellites équipés de radars ou d'altimètres à laser sont aussi disponibles pour acquérir des données.

Celles-ci sont ensuite utilisables à l'aide d'un appareil spécialisé, le restituteur qui fait appel à la vision d'un opérateur ou par des instruments de photogrammétrie automatique. Ces derniers fonctionnent avec des corrélateurs d'images qui calculent des mesures de parallaxe par des techniques optiques, analogiques ou digitales.

¹il existe des MNT commercialisés par l'IGN et des *Systèmes d'Informations Géographiques* qui permettent de remonter aux coordonnées géographiques (longitude, latitude)

²par exemple, les images numériques du satellite français SPOT.

1.1.3 Méthodes de visualisation

Afin d'apprécier plus justement l'aspect 3D du terrain digitalisé, une étape de mise en perspective et de visualisation est nécessaire [Hüg80]. Plusieurs techniques sont alors possibles qui dépendent du domaine d'application et de la qualité des images désirées. Pour obtenir des images de paysages réalistes, il ne suffit pas d'avoir l'altimétrie de la région mais il faut aussi la description surfacique du sol : parcelles de culture, voies, cours d'eau... Ceci implique la définition géométrique des frontières entre les zones et les informations relatives à la couleur ou à la texture de chaque zone. Ainsi, la visualisation dépend des données disponibles et des traitements possibles.

D'autre part, les images peuvent inclure des éléments volumiques reposant sur le sol tels que : bâtiments, arbres ou des éléments naturels comme des nuages, du feu... Leur modélisation comporte alors une description plus ou moins complète car, si la représentation de solides géométriques est assez courante, elle est plus complexe pour des objets naturels. Enfin, les calculs d'éclaircements (ombres, réflexions,...) et les effets spéciaux (brume, nuages, flou dans le lointain,...) sont des facteurs importants dans la représentation réaliste de paysages. Ils permettent une meilleure qualité des images et une appréciation plus fine des distances.

Il apparaît donc que l'étape de visualisation des paysages sous-entend différentes méthodes, adaptées à la représentation choisie. Nous allons présenter brièvement des techniques de visualisation pour des modélisations par réseau de facettes et par grille altimétrique.

1.1.3.1 Visualisation par facettes

Lorsque le terrain à visualiser est modélisé par un ensemble de facettes (souvent triangulaires), les techniques classiques de mise en perspective et d'élimination de parties cachées sont applicables. Certaines optimisations sont possibles comme celle de Robertson [Rob87] qui utilise des opérations 1D rapides pour la génération de vues perspectives avec élimination des faces cachées.

1.1.3.2 Visualisation par grille

La visualisation d'un relief défini par une grille peut être effectuée par des algorithmes généraux ou par des techniques adaptées à la représentation. Dans cette dernière catégorie, on peut citer des méthodes utilisant une liste de priorité ou celles faisant référence au tracé de rayons.

Liste de priorité Cette notion est induite par la régularité de la grille définissant l'altimétrie. La définition d'un ordre de balayage de la grille permet d'établir une liste de priorité entre les différentes mailles. Pour chaque point de vue, la base de données peut être ensuite partitionnée par les zones définies par le cône de vision [CG84]. Ceci permet de ne pas traiter certains éléments de la grille, au niveau du fenêtrage ou de la visuali-

1.1 – Modèles issus de données réelles

sation. Dungan [Dun79] utilise aussi cette méthode pour visualiser la grille altimétrique d'un fichier DMA de terrain. L'algorithme de liste de priorité utilisé ne dépend pas de la position de l'observateur et ne nécessite pas de fenêtrage. Il recherche, pour chaque pixel, le long de la direction de visée, le point dont la valeur d'altitude correspond au rayon. Pour optimiser ce calcul, il utilise deux plans horizontaux, passant respectivement par la plus basse et la plus haute élévation, qui permettent d'éliminer certains rayons. Le réalisme des images est ensuite accentué par un ajout d'ombres, une atténuation atmosphérique (fonction de la direction de visée) et un plaquage de texture. Les informations de texture sont extraites à partir de la photographie du terrain. Elles servent à la création d'une carte de réflectance qui est ensuite utilisée comme texture 2D.

Sur le même principe, Kaneda et al. [KKN⁺89] plaquent, comme texture, des photographies aériennes d'un terrain sur les relevés topographiques correspondants. Ces photographies ont d'abord été digitalisées puis les teintes ajustées en fonction des zones du terrain à visualiser. Pour éviter que l'utilisation d'une simple texture n'entraîne une résolution trop grande pour les régions éloignées, ils utilisent une hiérarchie des textures qui dépend de la distance à l'œil. De plus, la hauteur des arbres est prise en compte en modifiant le modèle par rehaussement des facettes contenant des arbres. Ensuite, de nouvelles faces verticales sont ajoutées à la limite des zones d'arbres et une texture appropriée est plaquée sur celles-ci. Enfin, des constructions peuvent être introduites avec gestion des ombres portées.

Cette approche correspond à une sorte de mixage d'images réelles et d'images de synthèse. L'utilisation d'une telle technique permet d'accentuer le réalisme des images. Ceci pose le problème de combiner différents types d'images en conservant une apparence naturelle.

Tracé de rayons Attirés par qualité des images que génère le tracé de rayons malgré de longs temps de calcul, certains auteurs ont développé des méthodes d'optimisation pour la visualisation de terrains. L'approche de Coquillart et Gangnet [CG84] consiste à sélectionner les éléments de grille traversés par la projection du rayon courant de façon incrémentale. La projection de chaque rayon sur le plan $z = 0$ intersecte les cellules de la grille pouvant contenir le point d'intersection. Elles sont déterminées incrémentalement en utilisant un algorithme de type Bresenham DDA (*Digital Differential Analyzer*). Les points d'intersection sont calculés à partir de la projection du rayon sur le plan. L'exploitation de la cohérence verticale des données (en supposant qu'il n'existe pas de surplombs) permet ainsi de réduire le nombre de tests d'intersection entre les rayons et les mailles de la grille (complexité de l'algorithme en $O(n)$).

Musgrave [Mus88] utilise aussi une technique de type Bresenham pour déterminer les cellules d'une grille altimétrique qui sont traversées par le rayon courant. La différence réside dans le fait qu'il n'utilise pas la projection du rayon pour le test d'intersection mais les altitudes des quatres coins de la cellule. Le point d'intersection est calculé si l'altitude du rayon est comprise entre ces bornes.

Chez ces deux auteurs, une technique de boîte englobante du terrain est utilisée pour éliminer les rayons (primaires ou secondaires) qui ne l'intersectent pas.

1.2 Modèles synthétiques

La modélisation par facettes planes demande un grand nombre d'éléments pour représenter la complexité non linéaire d'un paysage réel. Il en résulte un coût de stockage important et un grand nombre d'opérations de tri, de calcul de visibilité ou d'anti-aliasage à effectuer. Ces inconvénients ont conduit à chercher une façon automatique de modéliser des paysages. Elle s'appuie sur une approche intuitive qui s'attache plus à rendre l'apparence globale d'un paysage qu'à en représenter les détails. De tels modèles sont parfois appelés impressionnistes. Il s'agit alors de déconnecter la modélisation de toute représentation physique ; aucune donnée réelle n'est alors utilisée et le modèle est construit artificiellement. La forme générale du terrain est définie par un ensemble restreint de primitives simples, faciles à manipuler intuitivement. Différentes techniques sont ensuite appliquées sur les éléments du modèle pour restituer l'impression de relief et de couleur.

1.2.1 Primitives employées

La méthode la plus connue est celle de Gardner [Gar84] qui utilise des quadriques comme primitives. Les surfaces quadriques sont la forme mathématique la plus simple permettant de représenter des courbes topographiques naturelles sans une approximation linéaire par morceaux. Ceci permet de simplifier la modélisation et de réduire le nombre d'éléments nécessaires à la définition d'une scène complexe. Il modélise ainsi un paysage composé (relief, arbres, nuages) par un ensemble de surfaces quadriques vérifiant l'équation suivante : $Q_1x^2 + Q_2y^2 + Q_3z^2 + Q_4xy + Q_5yz + Q_6zx + Q_7x + Q_8y + Q_9z + Q_0 = 0$. En fait, dans la pratique, ce sont surtout des hyperboloides et des ellipsoïdes qui sont utilisés. Chacune des surfaces peut être limitée par un ou plusieurs plans. Ceci permet, à la fois d'obtenir une grande variété topographique et d'éviter des calculs coûteux de recoulements entre surfaces.

Une autre approche, très différente de la précédente, est celle de Marshall et al. [MWC80] qui utilisent une modélisation du paysage de type procédurale. Ils définissent une hiérarchie de tous les éléments présents comme : paysage est donné par chaîne de montagnes et forêts, chaîne de montagnes par montagne, forêt par arbre. Chacun des éléments de base de la hiérarchie est défini entièrement par un ensemble de paramètres. Ces valeurs servent à la conception et à la visualisation de l'élément ; par exemple, la description d'une colline est spécifiée par un maillage topographique. Des opérations géométriques sont disponibles pour modifier la paramétrisation.

1.2.2 Techniques de simulation visuelle

Comme la modélisation du terrain est assez simple, le réalisme dépend essentiellement des techniques de rendu qui lui sont appliquées. Les techniques de visualisation sont souvent une généralisation aux quadriques de méthodes travaillant sur des polygones en 2D, donc des algorithmes de type balayage de lignes [Mah72]. Après l'étape de visualisation, des textures 2D sont plaquées ; elles vont rendre l'impression de relief, des détails éventuels

1.3 – Conclusion

et la colorimétrie du paysage. Les textures utilisées peuvent être issues d'une digitalisation, (paragraphe 1.1.3.2) ou d'un calcul.

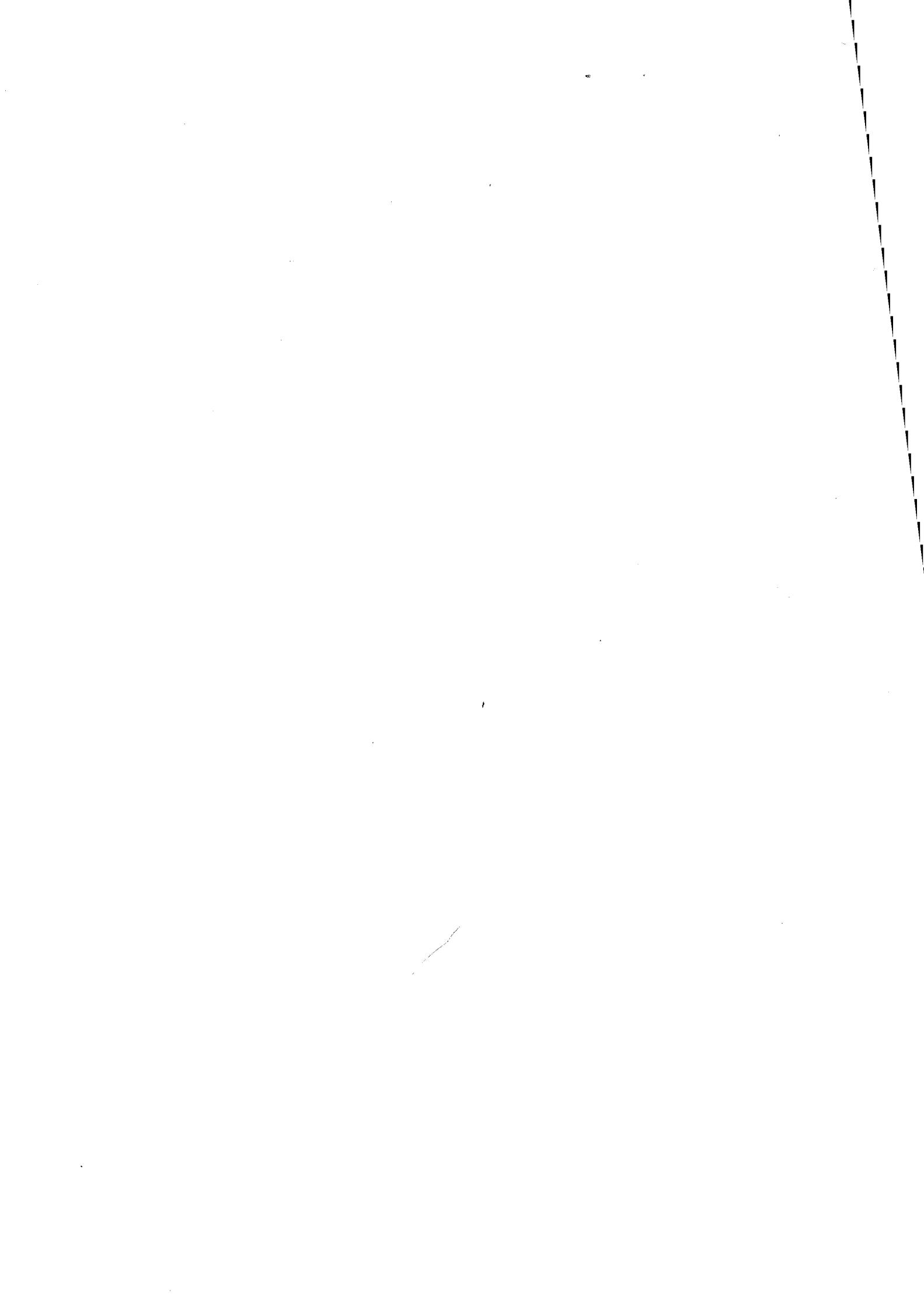
C'est le cas de Gardner [Gar84] qui utilise des textures mathématiques de terrain, d'arbres et de nuages permettant un rendu plus réaliste, la réalisation de gros plans et d'animation. Les textures mathématiques demandent une base de données minimale pour produire une grande variété de textures, chacune pouvant couvrir une région illimitée de la scène. De plus, le contrôle inhérent de la fonction de texture permet de gérer simplement l'aliassage et de simuler un certain nombre d'effets dynamiques (mouvements de nuages, ruissellement de l'eau...). La fonction de texture utilisée est déduite du principe de l'expansion de Fourier pour représenter les détails physiques d'une manière statistique. La gestion des détails est effectuée par le calcul de la moyenne pondérée de l'intensité de la surface et de la fonction de texture à chaque point visible. De même, les irrégularités de frontières sont exprimées par la manipulation de textures noires donnant l'illusion de trous dans les objets.

1.3 Conclusion

Il apparaît que l'utilisation de données réelles est la méthode la plus simple pour générer des modèles de terrain. Elle possède l'avantage de travailler sur des données correctes, avec un large choix au niveau des bases de données disponibles, même si une étape d'acquisition est parfois nécessaire. A partir de ces données, le choix des primitives de modélisation est important et peut être facilement intégré dans un système de rendu. Des techniques simples peuvent être utilisées pour avoir une visualisation minimum, avec la possibilité de plaquage de textures digitalisées.

Cependant, ces modèles demandent un stockage important de données et ne sont pas flexibles dans le sens où ils ne permettent pas de modifications et d'ajouts. De plus, la gestion de différents niveaux de détail est difficile et réduit le nombre d'applications possibles. La création non automatique du terrain élimine des possibilités de modification ou d'évolution du relief. En fait, les images obtenues sont, par leur nature, plutôt mieux adaptées à des vues éloignées.

Les modèles impressionnistes présentent l'avantage d'utiliser un ensemble réduit de primitives en général assez simples. Les niveaux de détail ne sont pas gérés par la modélisation mais par le plaquage de textures. Les reliefs sont plutôt vallonnés et les images de paysages obtenues présentent une apparence assez réaliste. Cependant, l'étape de visualisation peut s'avérer difficile sur des primitives peu adaptées pour cela. De plus, peu de paramètres sont disponibles pour définir les primitives de base, ce qui réduit le nombre de variations possibles.



Les modèles stochastiques 2

Actuellement, lorsque l'on parle de génération de relief, ce sont les méthodes *fractales* qui sont les premières citées. La théorie mathématique des fractales, introduite par Mandelbrot [Man75, Man77] est une approche intuitive et très efficace pour la création d'images réalistes d'objets naturels complexes. Cette théorie a conduit à une véritable science mathématique et à de nombreux travaux que nous ne détaillerons pas ici (voir [BDM⁺86]). Voyons cependant brièvement les notions et les principes essentiels.

Théorie fractale. Elle est fondée sur la constatation que la plupart des objets rencontrés dans la nature offrent une réplique exacte de leur forme à plusieurs échelles. C'est le cas des montagnes, des arbres, des nuages, des rivages. En fait, un objet fractal est la conséquence de la transformation récursive de l'objet par n copies de lui-même, à l'échelle r . Ceci définit la notion d'*auto-similarité*. Ces transformations peuvent s'effectuer en dimension un ou plus (figure 2.1), par exemple, en dimension deux pour la génération de reliefs.

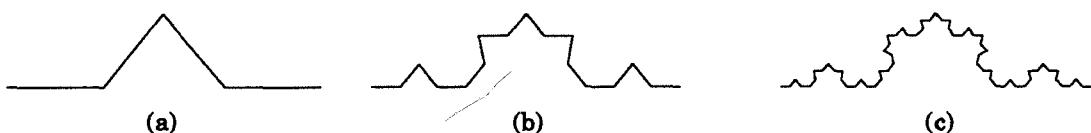


FIG. 2.1 : *Objet fractal à une dimension : courbes de Von Koch avec $n = 4$, $r = \frac{1}{3}$*

En fait, seuls les objets générés par des processus récursifs infinis sont vraiment fractals (auto-similarité exacte). Cependant, ceux générés par un ensemble fini de processus sont considérés aussi comme fractals car, après une certaine étape du processus, aucun nouveau détail visible n'apparaît (auto-similarité statistique).

Associé à la notion d'auto-similarité, l'objet fractal se définit aussi par un paramètre

numérique D appelé *dimension fractale*. D caractérise la façon selon laquelle une fractale évolue dans la dimension où elle est considérée. Elle correspond à $\frac{\log(n)}{\log(1/r)}$ et peut prendre des valeurs fractionnaires, voire irrationnelles. Elle permet de définir des objets naturels complexes qui ne pourraient pas être définis en dimension euclidienne. Intuitivement, une dimension fractale comprise entre 1 et 2 caractérise un objet plus étalé qu'une courbe mais plus effilé qu'une surface¹. En faisant varier D , on obtient une grande variété de formes : des rivages pour $D = 1.2$ en dimension 1, des reliefs pour $D = 2.2$ en dimension 2. On remarque que plus la valeur de D croît, plus la ligne ou la surface générée devient chaotique et irrégulière.

Ces quelques notions montrent que la théorie des fractales s'applique tout à fait à la création d'objets naturels complexes (comme des reliefs) en permettant de générer une représentation à différentes échelles. En fait, le même objet, observé à des distances de plus en plus petites, reste caractérisé par une certaine homothétie interne. Il est alors défini, non par un ensemble de valeurs, mais par un processus de génération récursif. Pour éviter que les objets créés par le processus apparaissent trop réguliers pour être naturels, des variations sont introduites par des éléments *stochastiques*². Ce sont ces fractales stochastiques que nous allons présenter plus en détail.

2.1 Fractales stochastiques

Les fractales stochastiques introduisent la notion de hasard dans la représentation récursive des objets. Le recours à l'aléatoire permet de représenter l'irrégularité des objets naturels (sans en décrire tous les détails) et la récursivité traduit la notion d'autosimilarité. C'est la méthode appliquée par Catmull [Cat75] et Carpenter [Car80] pour générer des terrains naturels (figure 2.2). Au premier degré, le relief est un plateau horizontal ; à chaque ordre supérieur, tout plateau de l'ordre directement inférieur est coupé en deux sous-plateaux selon une droite quelconque et leur altitude est modifiée aléatoirement. On obtient un objet stochastique.

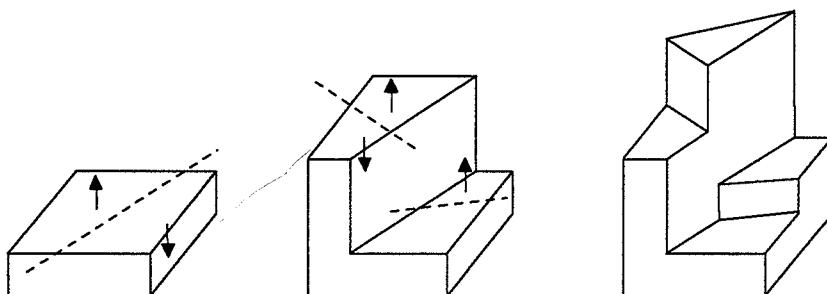


FIG. 2.2 : Relief obtenu par subdivision récursive

¹l'image d'un tel objet pourrait être un fil infiniment long mais extrêmement replié sur lui-même

²propriété qui est non prévisible pour une occurrence mais dont la moyenne après de nombreuses observations peut être quantifiée

2.1.1 Processus stochastiques

Un objet stochastique est défini par l'ensemble d'échantillons calculés par un processus stochastique à plusieurs variables. Comme dans une méthode déterministe, ces objets peuvent être construits à partir de primitives stochastiques ; seul le processus de génération est alors mémorisé, les échantillons étant directement utilisés. Ce type de processus présente deux propriétés intéressantes :

- les caractéristiques du processus sont indépendantes du temps (ou de l'espace) où elles sont échantillonnées ; on peut donc simuler un processus sans tenir compte de l'origine.
- l'état d'un processus à un instant donné est suffisant pour déterminer complètement sa distribution aux instants suivants ; cette propriété est utile pour les calculs car seul l'état courant est nécessaire.

La distribution aléatoire des échantillons peut être uniforme, de loi normale ou gaussienne. En fait, le processus utilisé dans la génération de fractales stochastiques est un *mouvement Brownien fractionnaire*, c'est à dire une fonction aléatoire d'incrément gauSSIENS indépendants.

2.1.2 Mouvement Brownien fractionnaire

Si l'on considère la génération de la courbe d'un rivage, chaque nouvelle position de l'échantillon est déterminée par un déplacement aléatoire indépendant des autres et isotrope : c'est le mouvement Brownien [MN68]. Or, le résultat obtenu présente des points en double et ne vérifie pas la notion d'auto-similarité. Pour éviter cette présence de boucles, le mouvement Brownien est modifié de façon à empêcher le processus "de revenir en arrière"³. Le mouvement Brownien est régularisé en rendant les accroissements persistants fonction d'un paramètre H . Le processus est noté $B_H(t)$ avec H variant de 0 à 1, t étant le temps. Lorsque H varie de 0.5 à 1, la persistance augmente progressivement ; pour $H = 0.5$, le mouvement Brownien est normal. Pour conserver l'auto-similarité, les coordonnées du point courant sont calculées par des fonctions Browniennes fractionnaires statistiquement indépendantes et de même valeur pour H : c'est le mouvement Brownien fractionnaire (*fBm*). Sa dimension fractale est de $\frac{1}{H}$.

Mathématiquement, un mouvement Brownien normal est défini par une fonction aléatoire d'incrément gauSSIENS indépendants. Cette fonction est telle que :

- $B(u + d_u, w) - B(u, w)$ a une moyenne nulle
- $B(u_2, w) - B(u_1, w), B(u_3, w) - B(u_4, w)$ sont indépendants pour des intervalles disjoints.

³dans le cas d'une droite, il suffit de prendre des déplacements aléatoires de signe constant

Le paramètre u est un réel et w est une valeur aléatoire. Le mouvement Brownien fractionnaire est alors défini par :

$$\begin{aligned} B_H(0, w) &= b_0 \\ B_H(u, w) - B_H(0, w) &= \frac{1}{(H+0.5)} \int_{-\infty}^u [(u-s)^{H-0.5} - (-s)^{H-0.5}] dB(s, w) \\ &\quad + \int_0^u (u-s)^{H-0.5} dB(s, w) \end{aligned}$$

avec H un réel sur $]0, 1[$, b_0 un réel quelconque. On remarque que $B_H(u, v)$ est une moyenne de $B(u, v)$ pondérée par $(u-s)^{H-0.5}$. Ces fonctions ont des valeurs en u qui dépendent des valeurs des u précédents et elles se classent dans la famille des bruits en $\frac{1}{f}$.

Ce mouvement a pour propriété l'*auto-affinité* dans le sens où deux parties quelconques de la courbe se ressemblent et la courbe elle-même garde toujours son aspect, même après une mise à l'échelle de r sur le temps et de r^H sur $B_H(t)$. L'objet fractal peut se représenter alors comme un *fBm* avec H tel que la dimension fractale D de l'objet s'exprime par $D = E + 1 - H$ où E est le nombre de variables de la fonction *fBm*.

Lorsque l'on étend le processus à des dimensions supérieures, on peut alors modéliser un grand nombre d'objets naturels, comme des reliefs. Pour cela, le paramètre t du temps est remplacé par un couple (x, y) de coordonnées indiquant la position d'un point dans le plan. La valeur de $B_H(x, y)$ donne alors l'altitude du point.

2.2 Méthodes de génération de fractales stochastiques

La création de fractales stochastiques consiste à définir un processus de génération basé sur un mouvement brownien fractionnaire. Plusieurs techniques sont possibles pour approximer un *fBm* multidimensionnel ; par exemple, en générant des bruits blancs gaussiens où toutes les fréquences sont également représentées et filtrées par FFT (*Fast Fourier Transform*). Ceci permet de diminuer les fréquences selon la valeur H du bruit fractionnaire désiré. Cette méthode, difficile à mettre en œuvre, peut demander des temps de calcul importants.

D'autres techniques peuvent être proposées ; elles sont fondées soit sur une subdivision récursive, soit sur la définition paramétrique d'une surface.

2.2.1 Modélisation par subdivision récursive

Fournier, Fussel et Carpenter [FFC82] ont développé une technique de subdivision récursive pour la génération de surfaces fractales. A partir d'une primitive triangulaire, ils appliquent une subdivision polygonale qui génère quatre nouveaux triangles en joignant les milieux des côtés. Les milieux sont alors déplacés aléatoirement avec une amplitude et une direction choisie (correspondant à l'information d'altitude). En appliquant récursivement cet algorithme sur chaque nouveau triangle, on conçoit facilement une surface fractale (figure 2.3). Cette technique est aussi connue sous le terme anglais de *random midpoint displacement*.

2.2 – Méthodes de génération de fractales stochastiques

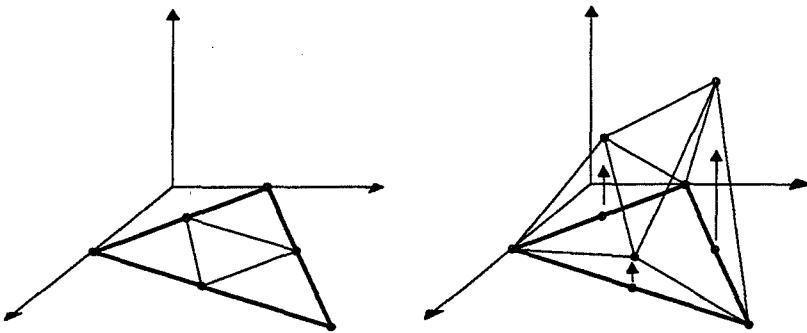


FIG. 2.3 : Subdivision d'un triangle en quatre sous triangles

Pour conserver les propriétés de continuité de la surface, les fonctions aléatoires doivent être choisies pour que les points générés soient invariants (sur un segment commun à deux triangles adjacents, les milieux à créer doivent être les mêmes). Par ailleurs, pour garder une certaine cohérence, les valeurs de ces fonctions doivent être générées à chaque nouveau niveau (fonctions pseudo-aléatoires). La direction de déplacement choisie peut être simplement la normale au polygone ou la moyenne des normales de deux polygones consécutifs. Enfin, selon le résultat voulu (plus ou moins détaillé et rugeux), la récursivité est arrêtée à une étape donnée.

D'autres primitives, comme des quadrillatères, peuvent être utilisées selon la technique de subdivision récursive de Catmull [Cat75] développée pour le rendu de surfaces paramétriques. A partir d'un quadrillatère, il génère les milieux des côtés avec un certain déplacement aléatoire. Pour chaque couple de milieux opposés, il crée alors, de la même façon, leur milieu puis détermine le milieu du segment qui les joint. Ce point est alors le centre d'une nouvelle subdivision du quadrillatère en quatre sous-quadrillatères.

D'autres techniques de subdivision sont envisageables. Voss [Vos85] propose une version modifiée de l'algorithme en ajoutant un déplacement aléatoire aux milieux des côtés. Il évite ainsi l'aspect parfois trop régulier de la structure obtenue. Lewis [Lew86], sur le principe de la subdivision, n'utilise pas un déplacement indépendant mais un bruit gaussien. Fournier et al. [FFC82] proposent de choisir comme nouveau point le centre d'une facette plutôt que le milieu d'un côté. Ce principe permet de considérer la forme de la surface au voisinage d'un point. Miller [Mil86] expose les problèmes d'une subdivision en triangle ou en diamant (figure 2.4a) où le choix de la primitive influe sur le résultat. Ainsi le motif est reconnaissable sur le relief obtenu. Il choisit alors, sur une décomposition en carrés, de transformer les quatres faces adjacentes par neuf autres (figure 2.4b).

Enfin, Mandelbrot [Man83] présente une version plus performante pour réduire l'effet de symétrie qui produit des vallées ayant la même structure que les reliefs. Il utilise une loi binomiale de distribution pour caractériser les déplacements aléatoires et choisit une méthode de subdivision sur des hexagones. Comme la subdivision est effectuée sur des côtés, il modifie la topologie du réseau et crée trois nouveaux hexagones par hexagone initial. Le côté central est calculé par la moyenne des côtés voisins de l'hexagone original

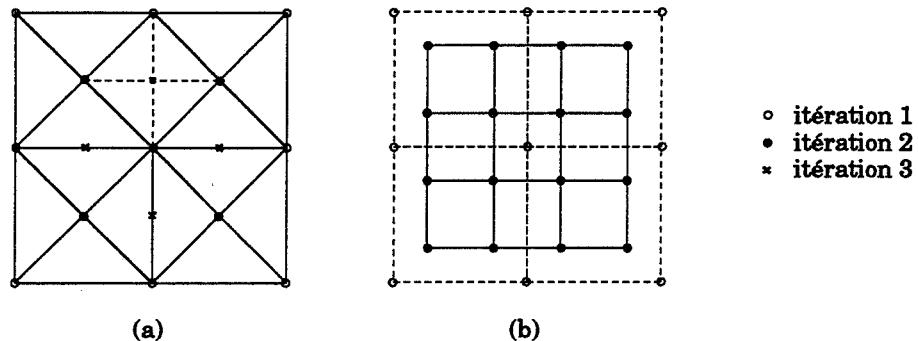


FIG. 2.4 : (a) subdivision en diamant en choisissant le centre d'une face comme point de subdivision, (b) avec une décomposition en neuf carrés

ajoutée à un certain déplacement. Les six autres côtés sont déterminés par la moyenne pondérée des six côtés initiaux. L'amélioration des reliefs obtenus repose sur le fait qu'un côté initial de l'hexagone est déformé en de nombreux petits côtés.

La figure (2.5) montre un exemple de terrain fractal généré par un algorithme de subdivision récursive.

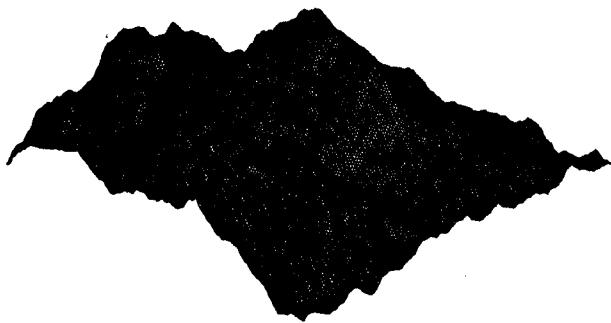


FIG. 2.5 : Terrain fractal de dimension $D = 2.5$, généré par une technique de subdivision récursive

2.2.2 Modélisation par surfaces paramétriques stochastiques

Cette méthode consiste à définir une surface paramétrique par l'expression $S(u, v) = P(u, v) + R(u, v, w)$ où le premier terme est un vecteur polynômial en u et le deuxième terme un vecteur aléatoire de la variable w sur un échantillon W . En fait, P définit

2.3 – Autres types de modélisations avec fractales

l'aspect macroscopique de la surface et peut correspondre à une fonction paramétrique bidimensionnelle quelconque. R représente l'aspect bruité microscopique ; c'est un vecteur normal à la surface ayant pour module un scalaire aléatoire $q(u, v, w)$. Cette technique est la généralisation de l'interpolation stochastique sur des courbes B-splines [FFC82]. Elle permet de générer des courbes fractales à partir d'un nombre limité de points de contrôle. C'est ainsi que Mandelbrot a obtenu la fameuse carte de l'Australie avec seulement huit points d'échantillons.

2.3 Autres types de modélisations avec fractales

D'autres méthodes ont été développées à partir de la théorie des fractales. C'est le cas de Szeliski [ST89] qui propose une technique mettant en œuvre splines déterministes et fractales stochastiques. Il utilise ce modèle de *fractales contraintes* pour générer des terrains à partir d'une grille comportant des données réelles échantillonnées. Ce modèle cherche à bénéficier des propriétés spécifiques de ces deux représentations. En effet, la modélisation par splines permet de générer des formes douces avec un contrôle local mais sans les détails réalistes que produisent les fractales. A partir des points échantillonés, il génère des splines à continuité contrôlée, en appliquant des contraintes locales de position et d'orientation sur des points arbitraires. Ceci permet de créer des discontinuités (sauts, creux) à ces points. Puis il introduit un composant stochastique qui permet de brouiller la surface et de moduler des détails de rugosité.

L'approche de Anjyo [Anj91] utilise un modèle uniifié pour la génération d'un ensemble d'objets naturels (terrains, nuages, vagues). Le modèle se compose d'un ensemble de primitives stochastiques combinées par des opérations fonctionnelles (transformations affines, somme, soustraction, ...). Chaque primitive stochastique est la représentation 2D de l'objet et se définit par des caractéristiques spectrales et des contraintes géométriques (position 3D de l'objet, points maxima). Les caractéristiques spectrales de la primitive comportent une information de *direction* et une autre de *silhouette*. La première donne la forme globale du modèle, la deuxième, les caractéristiques de surface. En fait, une primitive est la somme finie de plusieurs fonctions stochastiques. Une fonction stochastique est le produit de deux fonctions dites de *silhouettes*. Celles-ci sont déterminées comme des processus stochastiques dont le déplacement aléatoire suit un certain vecteur de direction.

Pour la génération d'un terrain, l'auteur utilise une seule primitive composée de quatre fonctions stochastiques dont les vecteurs de direction sont choisis aléatoirement. Les fonctions de silhouettes correspondantes appartiennent à la famille des fonctions spectrales en $\frac{1}{f^D}$ où D détermine l'irrégularité du relief.

2.4 Visualisation

La visualisation des fractales n'est pas triviale. La méthode du tampon de profondeur n'est pas envisageable car, considérant tous les polygones, elle implique un temps de calcul prohibitif. Les algorithmes en balayage de ligne, parfois utilisés ([NW87]), présentent le

même problème : ils nécessitent le tri de tous les polygones pour déterminer seulement ceux qui intersectent la ligne de balayage courante. La technique du tracé de rayons est aussi difficile à mettre en œuvre puisqu'il faut considérer l'intersection de chaque rayon avec chacun des milliers de polygones existants.

Kajiya [Kaj83] propose une optimisation du tracé de rayons adaptée à des objets fractals définis par subdivision récursive. En considérant un triangle initial, si le déplacement des points des côtés est vertical, l'objet résultat est compris dans un prisme triangulaire infini dont la base est le triangle initial. Ainsi, si les déplacements sont assez petits, leur somme est finie et l'objet est alors contenu dans une “portion” (figure 2.6). Ce volume est défini pour chaque triangle initial et sert alors de boîte englobante pour le calcul de l'intersection avec le rayon. Si, pour un triangle, aucune intersection n'est possible, alors le processus s'arrête; sinon, d'autres portions sont définies pour les triangles de l'étape suivante et le test est réitéré. Cette technique, même si elle requiert de l'espace pour la création des portions, optimise les calculs d'intersection. Par contre, la recherche de l'intersection possible du rayon avec une portion demande le calcul des intersections du rayon avec plusieurs plans. D'autre part, l'utilisation d'une portion comme volume englobant n'est pas optimale.

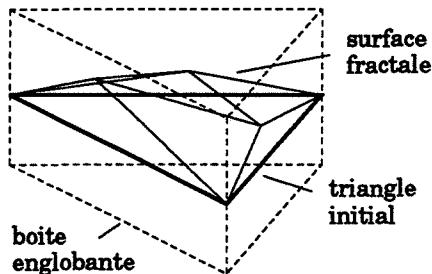


FIG. 2.6 : Boîte englobante d'une surface fractale

Bouville [Bou85] propose une version améliorée en utilisant des ellipsoïdes comme volumes englobants. En effet, quand un triangle est subdivisé, ses côtés restent fixes. Il suggère alors d'englober le triangle subdivisé par un ellipsoïde dont l'équateur est défini par les trois côtés initiaux. Tant que les côtés subdivisés restent compris dans l'ellipsoïde, l'optimisation est importante ; elle l'est moins si l'ellipsoïde doit être choisi large pour assurer cette condition. Le test d'intersection entre un rayon et un ellipsoïde se résume à une équation quadratique ; ce qui avantage cette méthode par rapport à celle de Kajiya. Par ailleurs, ce type de volume englobant étant “plus proche” de l'objet, le nombre de niveaux de récursion est réduit.

2.5 Conclusion

La multitude de travaux illustrant la théorie des fractales montre bien l'efficacité de cette approche pour la création d'images réalistes d'objets naturels et en particulier de reliefs. Le réalisme obtenu, le processus de croissance des données, les niveaux de détail

2.5 – Conclusion

modulables sont autant de points favorables à ce type de modélisation. Cependant, au fil des études, des inconvénients apparaissent. On peut citer l'effet visuel de plissement du relief résultant de l'indépendance du contexte sur la génération (emboîtement des différents éléments) et la difficulté à estimer la dimension fractale.

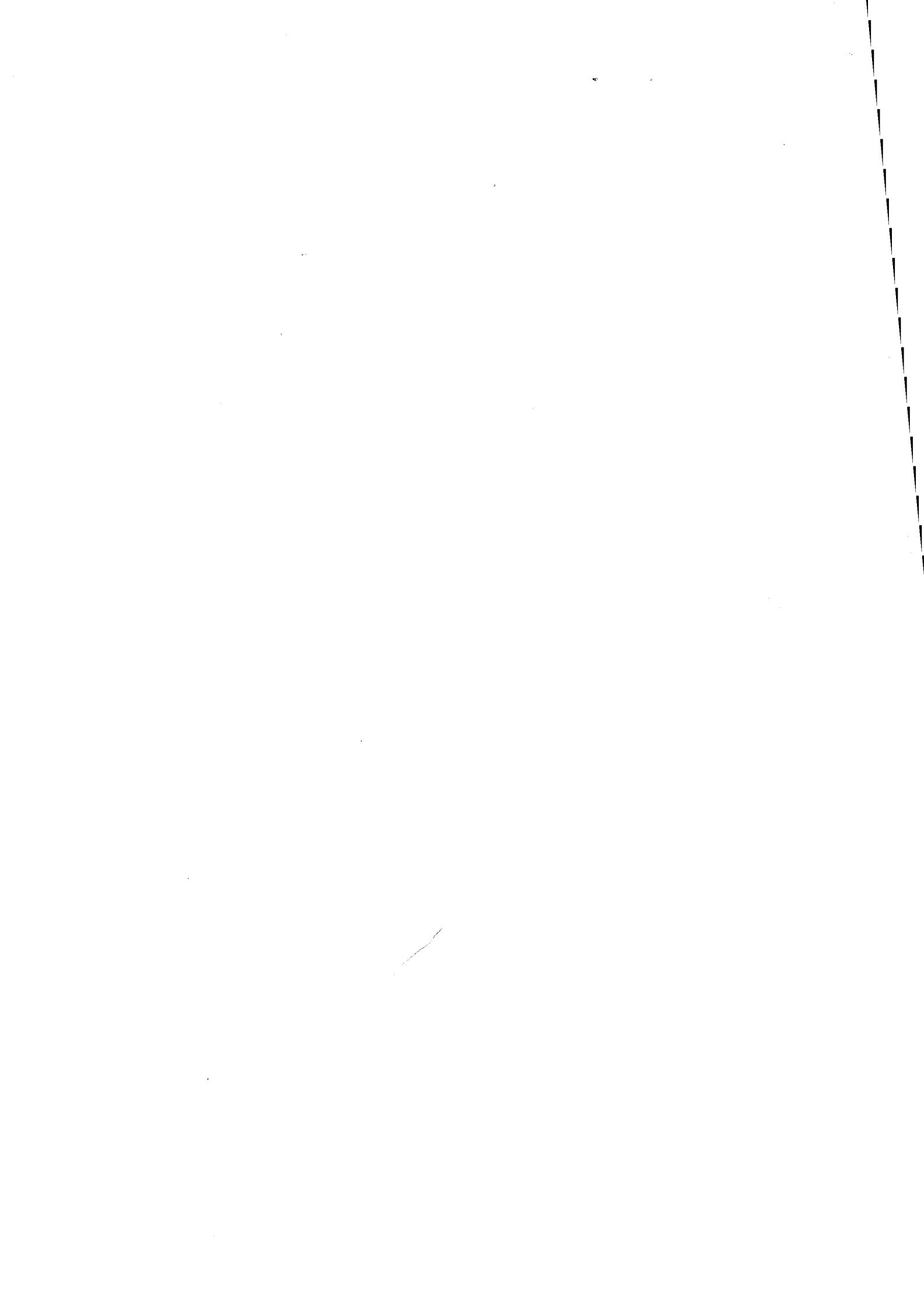
D'autre part, la théorie fractale soulève le problème des phénomènes d'échelle. La propriété d'homothétie interne des fractales implique que la part d'aléatoire a la même importance quelque soit l'échelle. Il est donc difficile d'approximer, par une technique fractale, un terrain naturel dont la dimension n'est pas stable à tous les niveaux de détail. En fait, l'irrégularité introduite est trop idéale pour modéliser des formes terrestres.

Mais le défaut principal, déjà observé par Mandelbrot, est l'absence de toute approche géomorphologique dans la génération de terrains fractals. En fait, on constate qu'un paysage fractal présente une symétrie non naturelle entre les cimes de ses montagnes et ses vallées. Ceci est le résultat de l'utilisation d'une loi additive aléatoire. Or, les phénomènes naturels de l'érosion provoquent, au contraire, une totale dissymétrie entre les reliefs et les vallées. Leur action varie selon l'échelle considérée ; ce qui est contraire au modèle fractal. En fait, il faudrait pouvoir déterminer les dimensions fractales des différents objets géologiques. Ces dimensions sont liées à des paramètres divers intrinsèques à l'objet et dépendants des processus auquel il a été soumis.

Pour marquer les différents traits de relief, il faudrait alors modéliser le réseau hydrographique⁴ du paysage et rendre compte des nombreux processus qui façonnent un relief : transformations tectoniques, érosion fluviale, éolienne, glaciaire, sédimentation,... sans oublier l'influence du sous-sol. En réalité, un modèle de simulation global incluant tous ces phénomènes est difficilement envisageable mais quelques processus peuvent être pris en compte comme la création du réseau hydrographique.

Mandelbrot [Man83] expose une solution possible par la création récursive de deux fractales représentant, l'une le réseau fluvial, l'autre les lignes de partage des eaux. Puis, il propose le calcul du relief à partir des lignes de partage. Pour cela, il relève les altitudes récursivement par une technique de subdivision prenant en compte les contraintes de relief : altitudes maximales pour les points en amont du réseau, altitudes décroissantes des points le long des cours d'eau. Cette nouvelle approche ouvre d'autres perspectives de modélisations, plus axées sur la compréhension des phénomènes naturels agissant sur les paysages.

⁴le réseau hydrographique est l'ensemble des fleuves et de leurs affluents drainant une région



Les modèles de simulation

3

Comme nous l'avons présenté, les images de paysages créés par des modélisations totalement artificielles montrent des aspects parfois invraisemblables comme des effets de symétrie du relief. Les résultats sont impressionnantes mais pas toujours très réalistes. En effet, un paysage est le résultat de nombreux processus géomorphologiques, complexes, très étendus dans le temps et agissant différemment selon les échelles. On peut citer les transformations tectoniques des terrains et les modifications des reliefs dues aux processus d'érosion, de sédimentation, aux changements de climat ou de végétation... Or, tous ces processus ne sont pas pris en compte dans les modélisations que nous venons d'exposer. La compréhension des phénomènes agissant sur la génèse et l'évolution des paysages permettrait sans doute une approche plus réaliste.

Cette remarque, déjà formulée par Mandelbrot, incite à utiliser des connaissances géomorphologiques sur la création des paysages pour définir de nouvelles modélisations. Elles sont fondées sur une approche simplifiée des phénomènes géologiques modelant un paysage. Le phénomène géomorphologique le plus présent dans le façonnage d'un relief est sans aucun doute l'influence de son réseau hydrographique. Les récentes modélisations s'inspirent de cette constatation cherchant à reproduire le réseau hydrographique et les informations qui lui sont liées. Pour mieux comprendre les caractéristiques de ces modélisations, nous allons d'abord présenter quelques principes fondamentaux de géomorphologie.

3.1 Principes de géomorphologie

Nous allons simplement ici effectuer un survol des principes de géomorphologie et les quelques définitions nécessaires pour la compréhension des modélisations futures. Tous les compléments, les explications des processus et leur quantification sont disponibles dans des ouvrages spécialisés (voir par exemple [CSS84]).

La *géomorphologie* est la science qui étudie les formes du terrain en relation avec les processus géologiques qui opèrent sur ce terrain. Parmi ces processus, nous allons nous intéresser plus particulièrement aux phénomènes d'érosion et de sédimentation, dans le contexte de terrains en climat semi-tempéré. Ainsi, nous n'expliquerons pas les processus d'érosion glaciaire ou éolienne qui n'apparaissent pas dans les modélisations.

La surface terrestre subit une transformation incessante provoquée par de multiples facteurs externes qui impliquent l'érosion, le transport et la sédimentation en d'autres points des matériaux de la surface. La majeure partie de ces processus conduisent au nivellement des reliefs en opposition aux phénomènes éruptifs, tectoniques ou sismiques qui en produisent de nouveaux.

Au niveau des facteurs externes, on peut citer la gravité qui entraîne la dégradation des reliefs par production d'éboulis et de glissements en masse, les eaux de ruissellement qui composent le réseau hydrographique et ravinent les roches¹ et les eaux souterraines qui donnent lieu à des phénomènes de dissolution des roches. Les effets de la gravité et du ruissellement provoquent une érosion *mécanique* des roches alors que les eaux souterraines impliquent une érosion *chimique*. L'ensemble des processus qui composent ces deux formes d'érosion sera détaillé par la suite.

Les eaux de ruissellement formant le réseau hydrographique sont des facteurs importants d'érosion. Elles sont constituées de la fraction non évaporée et non infiltrée des précipitations et dépendent d'un nombre important de paramètres : quantité des pluies, pente de la surface du sol, perméabilité, porosité, résistance à l'érosion et orientation des roches, nature et densité de la végétation, type de climat.

Les eaux de ruissellement d'une région (*bassin de drainage*) sont concentrées par des pentes convergentes dans les chemins les plus courts et vers les points les plus bas. Chaque cours d'eau possède sa force maximum au bas du versant et creuse en ce point que l'on appelle *niveau de base local*. L'érosion se manifeste alors, de l'aval vers l'amont, de façon régressive. Les matériaux enlevés au bassin de drainage usent le relief (érosion verticale) et s'évacuent en aval pour former un *cône de déjection*. L'évolution de plusieurs cours d'eau conduit à l'instauration d'un réseau hydrographique qui aboutit au *niveau de base global*, en général la mer.

Chaque cours d'eau dissipe une partie de son énergie fluviale en frictions sur les rives et le fond (érosion latérale), le reste servant à transporter la *charge sédimentaire*, c'est à dire la quantité de sédiments en suspension. La charge maximum que peut supporter un cours d'eau définit sa *capacité*. Plusieurs variables interviennent au niveau de la force érosive ou sédimentaire d'un cours d'eau : le débit, la vitesse, le gradient et le type de roche. Lorsque la charge d'un cours d'eau est atteinte, par la modification d'un des facteurs précédents, l'excédent se dépose et le matériaux s'accumulent sous forme de sédiments.

On remarque une tendance à l'équilibre en chaque point d'un réseau fluvial qui se représente par la similitude de son *profil en long*. Un profil en long est défini en portant en ordonnée, l'altitude d'un certain nombre de points échantillonés sur le cours d'eau

¹on appellera *roche* tout matériau constitutif de la surface terrestre sans prendre en compte son aspect cristallin, son état physique ou son degré de cohésion

3.2 – Modélisation par simulation statique

et, en abscisse, leurs distances à l'embouchure (pour un fleuve) ou au confluent (pour un affluent). La courbe joignant les points obtenus est globalement de forme concave ; elle traduit une diminution progressive du gradient vers l'aval.

Les géomorphologues ont développé quelques modèles de simulation des phénomènes d'érosion fluviale qu'ils classent en trois grandes catégories :

- *par convergence de flot*: un cours d'eau est positionné aléatoirement sur une grille ; sa croissance et sa direction sont contrôlées par des déplacements successifs aléatoires vers des zones adjacentes de la grille ; il continue de croître jusqu'à ce qu'il rencontre un autre cours d'eau ou qu'il sorte de la grille. Cette technique donne une bonne représentation statistique des cours d'eau naturels mais ne représente pas leur aspect physique. Les affluents sont parfois éparpillés et les bassins de drainage présentent des irrégularités géométriques importantes.
- *par croissance d'affluents*: à partir d'un grille représentant une surface non érodée, le réseau est construit par ajouts successifs d'affluents. Un ajout est effectué lorsque la longueur d'un cours d'eau dépasse une longueur prédéfinie et sa croissance se termine lorsqu'il coupe un autre cours d'eau. Cette approche simule mieux la création physique des cours d'eau et les résultats semblent satisfaisants.
- *par transport de matière*: ces modèles simulent l'évolution d'un relief complet en utilisant des équations de transport de matière. Cette méthode correspond à simuler des processus géomorphologiques réels et permet de contrôler l'évolution des systèmes de drainage. Cependant il est parfois difficile de définir des équations de transport appropriées.

Nous ne présenterons pas ici les travaux des géomorphologues au niveau de la simulation des processus mais lors de la présentation de notre modèle car notre approche s'appuie sur les résultats de leurs études. Nous allons maintenant considérer l'apport des théories géomorphologiques dans les modélisations de paysages artificiels en synthèse d'images. Les modèles proposés peuvent se classifier dans l'une des trois catégories des modèles de simulation sus-citées ; ils peuvent aussi être différenciés par l'aspect statique ou dynamique de leur représentation.

3.2 Modélisation par simulation statique

La première approche consiste à définir artificiellement un réseau hydrographique et à créer le relief qu'il supporte. Cette méthode est évidemment statique dans le sens où aucune évolution du réseau (et donc du relief) n'est envisagée dans le temps. Elle correspond à la définition géomorphologiste d'un modèle par croissance d'affluents. Les deux exemples suivants de modélisations appliquent ce principe pour la création de reliefs.

3.2.1 Modèle de Kelley et al.

Le modèle de Kelley, Malin et Nielson [KMN88] est fondé sur une structure topographique du *système de drainage* (arbre binaire) comprenant l'ensemble des cours d'eau et des bassins de drainage. Chaque cours d'eau est représenté par un lien du réseau. Il est déterminé par les points de départ et d'arrivée du lien, un numéro d'ordre dans l'arbre (ordre de Shreve²), les polygones de drainage (à droite et gauche du lien) et l'aire de drainage associée (réunion des deux polygones). Le réseau est construit récursivement par ajout d'affluents, en application des principes géomorphologiques de l'écoulement [Abr84] [Shr66]. La surface supportée par le réseau est construite en même temps, par ajout des facettes correspondant aux aires de drainage des affluents nouvellement créés. Le relief final est ensuite façonné par un processus d'élévation et de lissage à partir de la représentation plane du réseau et de la surface.

Le bassin de drainage initial est défini par un ensemble de points représentant le contour. Un premier cours d'eau d'ordre 1 est spécifié qui partage le bassin en deux polygones de drainage. Ces données sont définies en 3D mais la construction du réseau est effectuée en 2D par projection sur le plan horizontal des points (figure 3.1a). L'ajout d'un affluent sur un lien est déclenché récursivement en fonction d'un paramètre $C = \frac{A}{L}$ calculé pour chaque lien. A représente l'aire de drainage du cours d'eau et L sa longueur ; C est homogène à une quantité d'eau par longueur. Aussi, lorsque la capacité C devient supérieure à un seuil moyen pour l'aire de drainage, cela signifie que pour une longueur donnée, la charge à drainer est trop grande : il faut un affluent supplémentaire. La création physique du nouveau lien se fait par ajout de deux nouveaux nœuds dans l'arbre, un nœud de jonction sur l'ancien lien et un nœud pour l'extrémité du nouveau lien. La longueur du nouvel affluent, sa position, l'angle de la position et l'orientation sont déterminés par différentes lois simplifiées de géomorphologie. Lorsque plus aucun ajout n'est possible pour chacun des cours d'eau, le processus s'arrête (figure 3.1b).

La représentation 3D du réseau et des aires de drainage est alors effectuée en calculant les altitudes des nœuds de l'arbre. L'altitude du niveau de base est déterminée comme référence puis chaque altitude des nœuds est calculée en fonction de la pente et de la longueur du lien, de l'aval vers l'amont. Les formulations utilisées permettent de reproduire le profil concave du réseau. Le calcul de l'angle que font les versants avec l'horizontale permet de déterminer les élévations des sommets des polygones de drainage. On obtient alors une surface polygonale recouvrant tout le réseau qui va être interpolée par une *surface spline sous tension*. Cette interpolation respecte le paysage sous-jacent, passe par les nœuds et n'introduit pas de courbures extravagantes.

Le rendu du paysage est alors réalisé par l'affectation d'une couleur à chaque facette en fonction de son altitude, de sa position et de sa pente.

²Le *Shreve order* est un numéro d'ordre précisant l'importance du cours d'eau dans le réseau hydrographique. Il se calcule ainsi : les affluents extérieurs du réseau ont pour numéro 1 ; la jonction de deux affluents de numéro n et m donne un cours d'eau de numéro $n + m$.

3.2 – Modélisation par simulation statique

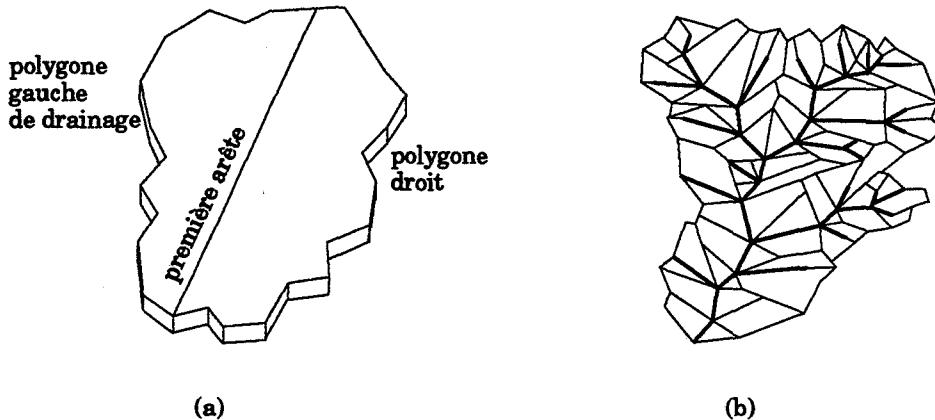


FIG. 3.1 : (a) bassin de drainage initial, (b) surface polygonale recouvrant le réseau

3.2.2 Modèle d'Arquès et Janey

La modélisation d'Arquès et Janey [AJ92] est aussi fondée sur le principe de création d'un relief à partir de son réseau hydrographique mais avec des aspects topologiques et géométriques différents lors de la conception du réseau fluvial. En deux passes successives, une *carte planaire quasi-triangulaire* est modélisée. Elle admet comme arbre binaire recouvrant l'arborescence que forme le réseau hydrographique et est représentée par des segments de droite dans le plan. La modélisation géométrique du relief et du bassin fluvial est obtenue par calcul des altitudes des sommets de la carte. Au niveau de la visualisation, les images présentent un réalisme important en introduisant de la végétation (incrastation d'images d'arbres).

La création d'un bassin fluvial s'effectue en deux étapes distinctes :

- *niveau topologique*. Un arbre binaire est associé à un réseau fluvial en ne gardant que la topologie. La carte planaire quasi-triangulaire est construite en ajoutant successivement les sommets et les arêtes correspondant aux nœuds de l'arborescence par un parcours en largeur de l'arbre. Cette modélisation topologique est ensuite modifiée pour prendre en compte les lignes de crête (nouvelles arêtes) et pour rendre l'aspect escarpé des régions les plus en amont (subdivision d'une facette en plusieurs).
- *niveau géométrique*. La modélisation géométrique correspond alors à un dessin automatique de la carte planaire en respectant des contraintes de densité de nœuds par régions. L'algorithme proposé construit la carte en traitant de manière récursive chaque sous arbre dans le secteur angulaire qui lui correspond. Le dessin final par segments de droite de la carte est réalisé en triangulant l'arbre dessiné ainsi que les facettes s'appuyant sur les lignes de crête. D'autres étapes de triangulation sont envisageables pour affiner les zones élevées.

Il s'agit ensuite de calculer les altitudes de chacun des sommets de la carte. Les altitudes des nœuds de l'arbre sont contraintes par leur ordre dans l'arborescence

(ordre de Strahler³) et celles des sommets des lignes de crête par les altitudes des sommets du réseau, déterminé en simulant le sens de l'écoulement (figure 3.2).

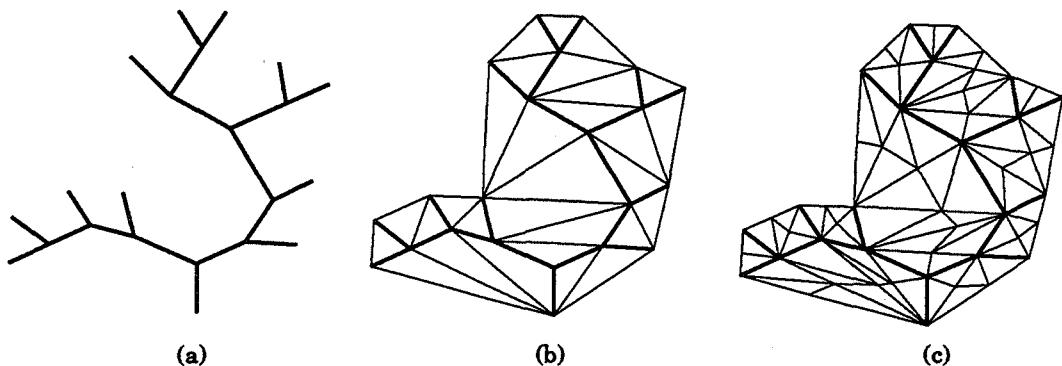


FIG. 3.2 : (a) arbre binaire du réseau, (b) carte topologique planaire quasi-triangulaire, (c) avec les lignes de crête et une triangulation supplémentaire

Les images du relief et du réseau sont obtenues par des techniques classiques de rendu, associant une couleur à chaque face en fonction de son altitude et de son exposition. Le réalisme est accru par l'incrustation d'images d'arbres dans le paysage. L'unité de cette approche réside dans l'utilisation d'une même modélisation pour construire l'arborescence sous-jacente du bassin fluvial et pour créer les arbres.

3.3 Modélisation par approche dynamique

Une approche différente consiste à modéliser l'évolution d'un relief en simulant des phénomènes de transport de matière dus à l'existence d'un réseau fluvial. Cette méthode reproduit le processus d'érosion par une démarche inverse des modélisations exposées auparavant. Dans celles-ci, le relief créé était la conséquence de la modélisation d'un réseau ; le modèle correspondait à l'application de lois topologiques et géométriques qui simulaient l'action d'un processus d'érosion. Ici, la méthode utilise un relief initial existant et crée le réseau correspondant. L'évolution du réseau en fonction des lois d'érosion modifie ensuite le terrain.

Musgrave et al. [MKM89] appliquent ce principe à la génération de paysages. Ils créent un relief par une méthode fractale faisant varier deux paramètres en fonction de l'altitude et de la position dans le plan. Le premier facteur est la dimension fractale qui permet de jouer sur l'aspect plus ou moins perturbé des reliefs (par exemple, pour donner un aspect plus vallonné aux régions de plaine). Le deuxième facteur est un paramètre d'échelle (*crossover scale*) qui représente la valeur maximale de déplacement d'une distance dans le plan pour une même valeur de différence d'altitude (pente). Ce paramètre permet de

³L'ordre de Strahler définit, comme l'ordre de Shreve, un numéro d'ordre pour chaque noeud de l'arbre. Les affluents extérieurs ont pour numéro 1. La jonction de deux affluents d'ordre n et m donne un cours d'eau d'ordre : $n + 1$ si $n = m$, $\max(n, m)$ sinon.

3.4 – Conclusion

moduler l'amplitude du relief dans certaines zones ; par exemple, il peut varier en fonction de l'altitude et de la position horizontale d'une ligne de crête.

Le relief fractal généré se présente comme un ensemble de facettes en 3D. Une simulation simple d'un processus d'érosion par les eaux de ruissellement est alors appliquée pour atténuer les effets de symétrie du relief. Elle correspond à un processus itératif qui évalue, à chaque étape et pour une facette, la quantité de matière à enlever ou à ajouter. L'excès d'eau et de matière est ensuite distribué aux facettes adjacentes de plus basse altitude, en proportion de leur différence d'élévation. La quantité d'eau ruisselante est fonction de l'altitude de la facette et de la quantité d'eau précipitée reçue. Le volume de matière détritique est calculé en fonction de la quantité d'eau à ruisseler et du cumul des sédiments apportés par les faces adjacentes. Les précipitations sont représentées comme une fonction linéaire de l'altitude et sont introduites dans le modèle à des intervalles de temps réguliers. Les altitudes des facettes sont recalculées à chaque étape, en fonction des sédiments ajoutés ou des quantités de matière enlevées. Enfin, un processus de nivellement des différences d'altitude est effectué de façon à obtenir des reliefs vallonnés.

La visualisation est réalisée par un algorithme de tracé de rayons adapté à la représentation du relief en grille. Cette méthode utilise la cohérence de la grille et a déjà été exposée dans le paragraphe (1.1.3.2).

3.4 Conclusion

Les modélisations que nous venons de présenter se distinguent des précédentes par leur approche géomorphologique des phénomènes engendrant le relief. Elles sont fondées sur les théories de création et d'évolution des paysages en fonction des processus d'érosion. En fait, elles supposent que la représentation conjointe d'un réseau hydrographique et des bassins de drainage correspondants suffit à modéliser un paysage montagneux (en climat tempéré). Les images de paysages obtenus présentent un aspect très naturel et leur réalisme est souvent accentué par des effets de simulation visuelle. Ces techniques offrent des résultats encourageants pour d'autres modélisations de ce style. Cependant, certaines restrictions sont à signaler au niveau de ces modélisations. Elles concernent plus particulièrement les points suivants.

Les phénomènes aussi complexes que ceux de l'érosion sont difficiles à modéliser par des lois simples. Au risque d'abandonner certains aspects, une simplification importante des processus est nécessaire. Ceci implique une étude assez fine de l'ensemble des phénomènes géomorphologiques pour dégager les principes essentiels à une modélisation cohérente. On peut noter que les modélisations présentées ont surtout cherché l'efficacité. Les lois utilisées, dans une approche dynamique, sont très simples et le réseau est le plus souvent défini comme une arborescence binaire. Les hypothèses de départ, que ce soit le choix du premier cours d'eau ou de la surface initiale conditionnent beaucoup les résultats obtenus.

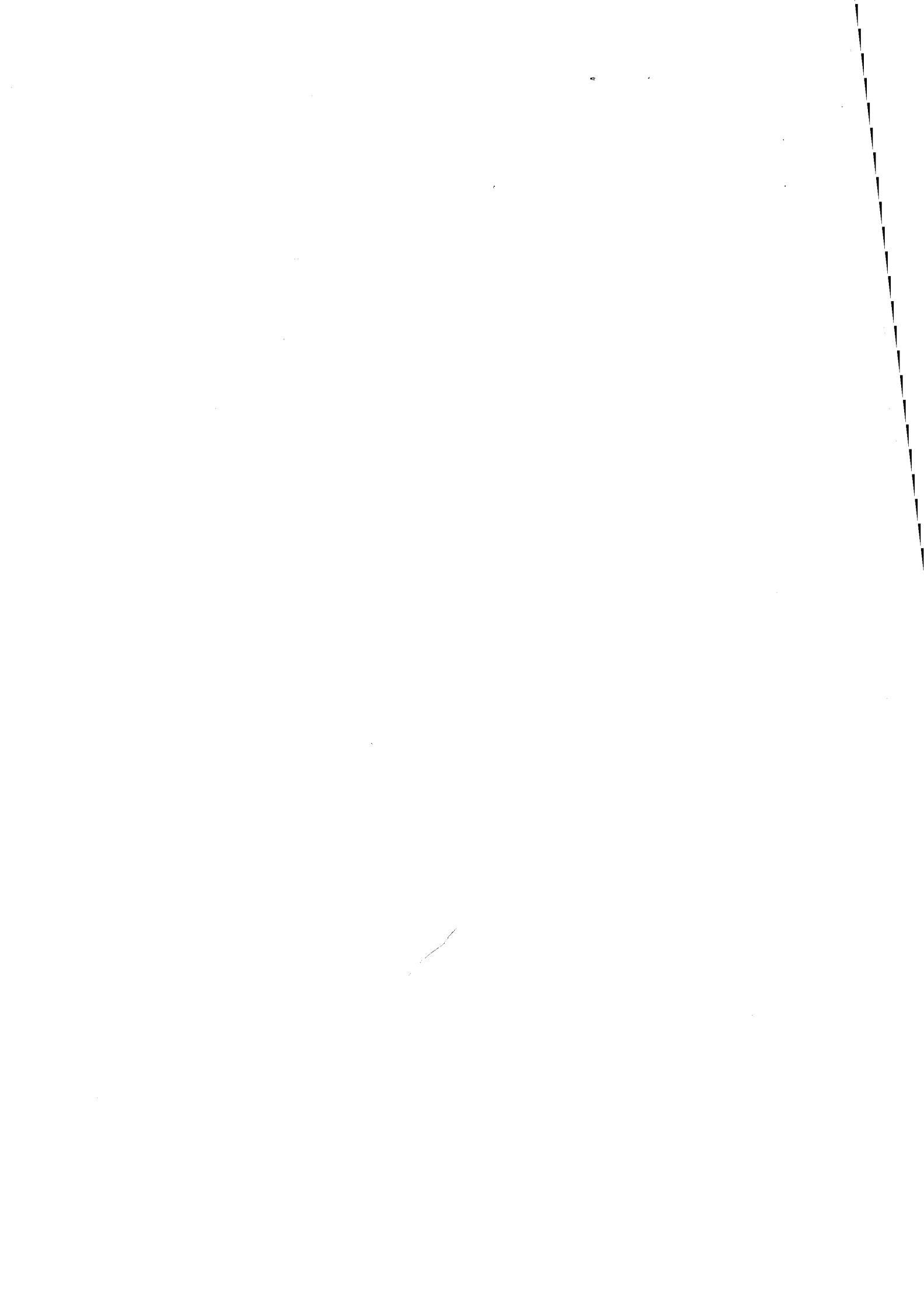
D'autre part, aucune notion d'héritage n'apparaît dans ces simulations. L'approche statique définit un relief fixe, sans possibilité d'évolutions. La méthode dynamique permet une évolution du paysage mais sans prendre en compte l'état antérieur. Or, un relief est

3 – LES MODÈLES DE SIMULATION

autant marqué par des érosions anciennes que par celles agissant sur le réseau actuel. Ceci est accentué par l'absence de toute modélisation du sous-sol du paysage considéré. Son influence est pourtant primordiale sur l'action des processus modelant le relief car il permet d'obtenir, par la diversité de sa structure, une différenciation du terrain.

Partie II

La modélisation de terrains



Le modèle d'érosion et de sédimentation

4

Les différentes modélisations que nous venons de présenter montrent que plusieurs approches sont possibles pour la création réaliste d'images de paysages. Rappelons brièvement les avantages et les inconvénients de ces modèles.

La génération de reliefs issus de données réelles offre l'avantage de reproduire des terrains réalistes mais le coût de stockage et la difficulté de modification des données restent des inconvénients majeurs. La création de paysages par simulation d'effets visuels sur une modélisation simple réduit le nombre de primitives mais limite aussi les possibilités de création de reliefs très différents. Enfin, la puissance des techniques fractales pour la génération de terrains semble séduisante mais les reliefs obtenus présentent parfois des aspects irréalistes.

Ces constatations nous ont conduit à s'intéresser à une compréhension plus fine des phénomènes réels de création des paysages. De nouvelles modélisations ont été étudiées : elles cherchent à simuler des processus géomorphologiques pour la création de reliefs. Cette récente approche ouvre des perspectives intéressantes dans la génération de paysages variés et réalistes [Aub88]. En particulier, la simulation des processus d'érosion, agissant sur le relief par le biais du réseau hydrographique, semble une technique efficace pour obtenir des modélisés naturels. On remarque qu'une modélisation, fondée sur des lois de transport de matière, agissant sur un relief existant, permet d'obtenir des résultats satisfaisants. Cependant, certains points ne sont pas considérés, comme une simulation dynamique plus exacte des processus et une modélisation volumique du sous-sol.

Notre modèle peut se classer dans la catégorie des modélisations de paysages par simulation de processus géomorphologiques. Nous avons cherché à prendre en compte les processus nécessaires à la création et à l'évolution des reliefs et permettant un rendu réaliste des phénomènes naturels.

4.1 Etude géomorphologique

Il est clair que tous les phénomènes contribuant à la création et à l'évolution d'un relief ne peuvent être pris en compte. Outre leur diversité, certains d'entre eux sont trop complexes pour être simulés par de simples lois. Afin de choisir les principes généraux du modèle de simulation, il faut donc, dans un premier temps, limiter le problème. Cette étape nous a conduit à étudier les processus géologiques naturels agissant sur un relief [CSS84], [HMW76], [CJ69].

4.1.1 Processus actifs

L'étude effectuée ne considère que les phénomènes géologiques agissant dans des régions semi-tempérées. Avec cette hypothèse, seule l'érosion par les eaux de ruissellement et d'infiltration est décrite ; les autres types d'érosion (érosion éolienne et érosion glaciaire) sont considérés comme négligeables.

4.1.1.1 Processus érosifs

On distingue en général le processus d'érosion chimique qui correspond à une mise en solution des éléments solubles inclus dans la roche et le processus d'érosion mécanique qui correspond à des déplacements de matière. Ce déplacement s'effectue vers le bas sous l'effet de la gravité ou du transport de particules par les eaux de ruissellement.

Les deux types de phénomènes se traduisent par une diminution de l'altitude du relief sur lequel ils opèrent, dans la mesure où ils traduisent un départ de matière. On peut remarquer qu'ils se conditionnent mutuellement.

Erosion in situ. Elle correspond à la fragmentation et à l'altération de la roche saine qui se transforme en roche dégradée. Cette érosion chimique est étroitement conditionnée par la proportion d'éléments solubles contenus dans la roche et donc par la lithologie. Ainsi, chaque roche, selon ses caractéristiques, réagit différemment face au processus d'altération chimique. Celle-ci résulte de la proportion infiltrée d'eau de pluie, qui, chargée en CO_2 , dissout les composés solubles de la roche saine. L'altération chimique est donc d'autant plus active que le volume d'eau souterraine est élevé (conséquence de la perméabilité¹ du sol) et que la porosité² de la roche est grande. Lorsque l'altération est suffisamment poussée, elle aboutit à une rupture de la trame solide de la roche et donc à une perte de cohésion.

Dénudation des versants. Ce phénomène correspond à l'ensemble des processus de destruction et de transport s'appliquant le long des pentes. Ils sont directement liés à la valeur de la pente et au volume d'eau ruisselée qui arrache puis transporte des particules

¹aptitude du terrain à laisser s'infiltrer un volume d'eau ; elle dépend des dimensions et de la connexion des vides entre les grains minéraux

²elle évalue le volume total des vides présents entre les grains de la roche

4.1 – Etude géomorphologique

de matière. Le déplacement s'effectue toujours en aval des versants, même pour des pentes faibles. Le phénomène global de dénudation se divise en plusieurs processus :

- *la saltation* correspond au déplacement des petites particules, par sauts successifs, sous l'impact des précipitations. Ce processus dépend de l'intensité des précipitations et de la pente au point considéré.
- *l'écoulement visqueux* ou *reptation* est un déplacement lent de la matière dans le sens des pentes sous l'effet de la gravité. Il est constitué d'un mélange *eau + sol* formant un fluide plus ou moins visqueux en fonction du gradient.
- *l'écoulement plastique* intervient lorsque la densité du mélange eau plus sol dépasse un certain seuil. Il se comporte alors comme un corps plastique et peut produire des déplacements de matière importants (glissements de terrains).
- *le ruissellement* est formé par la proportion d'eau de pluie qui reste en surface et qui ruisselle le long des versants. Son action érode le sol et transporte les sédiments en suspension le long des pentes jusqu'à un niveau de base local ou global où il y a sédimentation. Il est clair que ce processus a une importance primordiale dans le phénomène de dénudation. Il est variable selon la pente, les caractéristiques du sol (résistance à l'érosion) et le volume d'eau ruisselée.

Les phénomènes décrits ci-dessus s'appliquent à des terrains présentant une épaisseur non nulle de sol. Ils nécessiteraient une étude plus complexe dans le cas de terrains à très grande pente comme des falaises où influent l'importance des cycles de gel-dégel, l'angle d'orientation des couches et la résistance des roches.

Processus de fond de cours d'eau Il faut dissocier du cas précédent l'érosion mécanique qui s'effectue au fond d'un cours d'eau. En effet, le ruissellement y est particulier et de caractère permanent. L'action de la pente est considérée comme négligeable. L'érosion est alors horizontale et sa représentation est plus complexe (évolution de méandres, de gorges).

Sédimentation Quand la charge de matière en suspension dans les eaux de ruissellement dépasse celle que le cours d'eau peut admettre, l'excédent se dépose et les matériaux s'accumulent. La sédimentation est due, soit à une charge excessive, soit à une réduction de la pente, soit à une diminution du débit. Les alluvions forment alors une nouvelle couche qui se superpose au sol et qui possède ses caractéristiques propres.

4.1.1.2 Moteurs des processus érosifs

Le premier des deux phénomènes à l'origine des processus d'érosion est la modification des niveaux de base. La dénudation fait converger la matière vers les niveaux de base locaux (cuvettes, confluents, lacs) ou globaux (mers, océans). Lorsque un soulèvement en masse des terrains ou un abaissement du niveau de la mer se produit, un nouveau processus

d’érosion commence. La succession de phases de soulèvement (ou d’abaissement) et de phases d’érosion constitue un cycle d’érosion. L’ensemble des cycles écrit l’histoire du paysage.

Le deuxième facteur est le volume et la répartition des pluies. En général, on suppose un volume constant et une chute uniforme sur l’ensemble du terrain. En fait, selon la nature des précipitations (pluie fine, orage), l’importance de la dénudation peut varier. Le volume d’eau précipitée se distribue à la surface du sol de la façon suivante : une partie est évaporée (influence du climat), une autre retenue par la végétation (influence de la densité du couvert végétal), le reste se partage en eau infiltrée (selon le type de sol) et en eau de ruissellement. La végétation diminue le volume d’eau infiltrée en stockant une certaine partie des précipitations. Ceci a pour effet de réduire faiblement l’action de l’érosion chimique et de gêner le ruissellement.

4.1.1.3 Influence du sous-sol

Le sous-sol joue un rôle primordial dans les phénomènes d’érosion. Au niveau de l’altération, il intervient par la nature chimique des roches qui comportent des différences de composition. Le même processus entraîne alors des résultats variés selon la région considérée. Par ailleurs, des accidents de terrains ou des inclinaisons de couches différentes influencent l’action des processus. Ceci implique une modification locale de la forme du terrain. Chacun des processus d’érosion décrits précédemment se comporte de plusieurs manières selon le type de roche sur lequel il s’applique. La représentation du sous-sol dans la simulation de processus est donc très importante et rarement prise en compte.

4.1.1.4 Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est fortement lié aux processus d’érosion et de sédimentation. Il correspond à la convergence des eaux de ruissellement vers l’aval, par le chemin le plus court. Chaque affluent du réseau réunit les écoulements d’eau d’une aire de drainage ; c’est un phénomène qui n’est pas une fonction linéaire du ruissellement. En fait, l’évolution du réseau a tendance à creuser le relief alors que les processus de saltation et de reptation ont plutôt tendance à combler les petites cuvettes et à adoucir les modélisés.

4.1.1.5 Echelles de temps

Lorsqu’il s’agit de quantifier les taux d’érosion et leur action sur la modification du relief, il faut prendre en compte les échelles de temps. Chaque processus n’agit pas avec la même intensité pour une période fixe (par exemple, l’écoulement plastique agit sur une durée très courte). D’autre part, l’évolution des climats et des végétations modifie les taux d’érosion pour une période donnée. En fait, l’échelle de temps sur laquelle agit l’érosion est directement liée au problème de la stabilité globale du paysage. Il faut donc moduler l’action des processus pour conserver l’équilibre naturel.

Un deuxième facteur important est la notion d’héritage. Si la succession des cycles

4.1 – Etude géomorphologique

d'érosion a tendance à éliminer les évolutions antérieures, il demeure cependant des structures formées à des dates éloignées qui conditionnent encore le relief. Ce facteur est évidemment difficile à représenter ; la modélisation du sous-sol peut peut-être apporter une compensation.

4.1.2 Différentes approches

Maintenant que les principaux phénomènes relatifs à l'érosion ont été présentés, nous allons étudier les simulations déjà réalisées

Les échelles de temps, sur lesquelles les phénomènes géomorphologiques aboutissent à des résultats observables, sont très importantes. Aussi, des travaux ont été mis en œuvre pour construire des modèles informatiques de simulation permettant de vérifier les théories avancées sur l'évolution des reliefs. Le but de ces modèles est de fournir un outil de vérification et de compréhension. Ils simulent les processus d'érosion et de sédimentation.

En général, les modèles simulent seulement l'évolution unidimensionnelle d'un profil de pente (figure 4.1) sous l'effet simultané de quelques processus. Cependant, deux modélisations ont fait l'objet d'une simulation en 2D et leurs résultats encourageants permettent d'envisager des applications possibles.

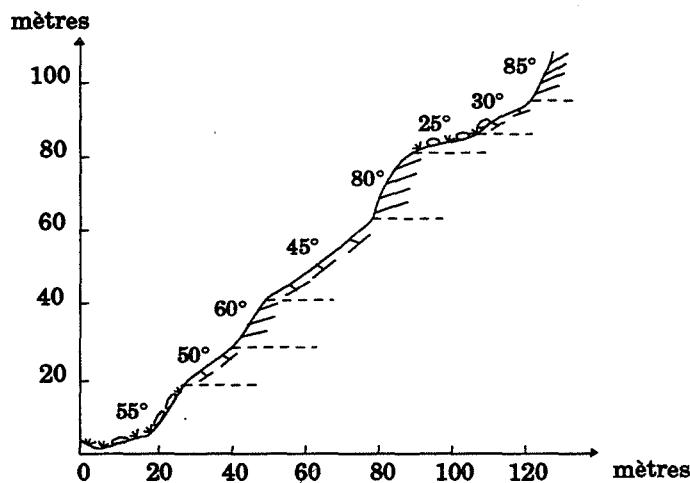


FIG. 4.1 : Profil de pente où le sous-sol est constitué d'une superposition de couches (Armstrong)

La modélisation d'Ahnert [Ahn76] est générale et fait intervenir la quasi-totalité des processus évoqués ci-dessus. Celle de Kirkby [Kir86] modélise la création et l'évolution d'un réseau hydrographique. L'objectif de ces deux simulations est d'étudier l'évolution d'une région (versants, plateaux, crêtes), à l'aide d'un modèle travaillant point par point et par itérations successives. Nous allons présenter ces deux modèles.

4.1.2.1 Modèle d'Ahnert

L'originalité de ce modèle est de distinguer la surface du sol de celle de la roche non altérée (*bedrock*). Ainsi, le sous-sol est défini comme plus ou moins uniforme dans sa résistance à l'érosion et le sol est défini par son épaisseur. Les processus sont simulés par une méthode itérative et correspondent à une dégradation du sous-sol, une dénudation de la surface et une modification du niveau de base. Ces trois processus, qui agissent simultanément dans la nature, sont ici simulés séquentiellement. Une itération correspond au traitement de chaque point de la surface ; elle définit une unité de temps. Le relief obtenu à la fin de chaque itération sert de terrain initial pour l'étape suivante.

Génération des surfaces. La surface de départ est une grille altimétrique carrée où les altitudes sont définies par un plan (horizontal ou incliné) ou par la distribution réelle d'un terrain. Le sous-sol est déterminé par une superposition de couches représentées par les équations 3D de leurs plans frontières. Chaque couche possède des coefficients caractéristiques de son comportement face à l'érosion.

Simulation des processus. Les processus suivants sont présentés dans l'ordre dans lequel ils apparaissent dans la simulation.

- Chaque point est affecté d'une certaine altération, paramétrée par un coefficient caractéristique de la porosité de la roche. Elle est simulée par la variation, selon une fonction exponentielle négative, de l'épaisseur du sol.
- La modification du niveau de base est traitée comme un facteur extérieur au modèle. Deux points aux coins de la grille définissent deux niveaux de base qui permettent de modéliser un développement de pente. Ces niveaux peuvent varier en altitude avec un taux croissant, décroissant ou stationnaire.
- Le phénomène de saltation est simulé par un taux de débris transmis par un point à son voisin pendant une unité de temps. Ce taux est proportionnel à la pente et peut être modulé par un exposant.
- Le processus de ruissellement est ici fonction de la hauteur de ruissellement et non, comme habituellement, de l'aire de drainage. En effet, dans un modèle de profil linéaire, la hauteur du flot de surface en un point du profil est fonction de la distance de ce point à la crête de la pente. Pour des modèles en 2D, cette distance est remplacée par la mesure de l'aire de drainage à ce point. La hauteur de ruissellement est calculée en fonction de la quantité de pluie et des caractéristiques locales d'infiltration ; elle sert ensuite à déterminer le taux de dénudation.
- La dénudation s'effectue par des transports sur la grille de certaines quantités de débris calculées par des équations de transport de matière. La direction de déplacement est déterminée, pour chaque point, par la différence d'altitude qu'il a avec ses quatre voisins. Le transfert est effectué point par point ou par suspension (transfert direct de masse vers le bas du versant) vers tous les voisins situés en aval de lui.

4.1 – Etude géomorphologique

- Le processus de l'écoulement plastique est défini comme un transport de matière point à point, en fonction de la pente et de la profondeur du sol. L'écoulement visqueux est simulé de façon identique.

Conclusion Les résultats de la simulation sont présentés par des courbes d'évolution de profil de pente et des représentations topographiques des surfaces. Aucune visualisation réaliste n'est fournie.

Les surfaces initiales employées sont de taille très réduite et, généralement, sont constituées par un simple plan incliné. Le modèle offre l'avantage de modéliser le sous-sol mais d'une façon assez simple. Le sous-sol est représenté par un empilement de plans parallèles de même direction et il n'est pas possible d'introduire des structures plus complexes (couches d'épaisseurs irrégulières, couches plissées). Par ailleurs, il n'y a pas de réseau hydrographique apparent ; cela est sans doute dû au fait qu'un écoulement vers l'aval dans plusieurs directions est autorisé.

4.1.2.2 Modèle de Kirkby

Ce modèle, à l'inverse du précédent, cherche à reconstituer la création d'un réseau hydrographique. La simulation s'effectue sur une grille altimétrique, de pente uniforme et légèrement perturbée par la superposition d'une surface pseudo-fractale. Il n'y a pas de modélisation du sous-sol ; les processus agissent donc de façon uniforme à chaque point.

Surface initiale Elle est représentée par une grille carrée ou hexagonale³. Dans le premier cas, l'écoulement peut s'effectuer dans les huit directions, dans le deuxième, dans six directions. La surface fractale est générée par une technique de subdivision récursive en carré puis inclinée pour obtenir des gradients importants.

Simulation des processus. Le modèle considère les phénomènes de saltation, de ruissellement et de déplacement gravitaire. Il suppose que ces trois processus sont suffisants pour expliquer la création d'un réseau hydrographique. Ceux-ci sont rassemblés en une seule formulation qui rend compte de l'influence de la pente, du volume de ruissellement et des caractéristiques du sol. En fait, il est plus pratique, dans le cas de pluies uniformément réparties, de représenter le ruissellement par l'aire de drainage équivalente. Une explication plus complète est fournie dans l'annexe A.

L'aire de drainage d'un point est calculée par un processus itératif de dénombrement. Au départ, chaque point aval des versants (et les fonds de cuvettes) possède une valeur d'aire de drainage initialisée à 1. Puis, à chaque itération, on remonte le long des pentes, jusqu'à la ligne de crête, en incrémentant chaque aire de drainage de 1 (figure 4.2). Cette progression aboutit à l'initialisation d'un réseau hydrographique de caractère dentritique⁴.

³la représentation est plutôt *triangulaire-hexagonale*: chaque ligne impaire de la grille est décalée vers la droite d'une demi-maille et tous les points sont reliés entre eux, formant des triangles

⁴dont la forme ressemble aux ramifications des branches d'un arbre. Aucune création de delta n'apparaît

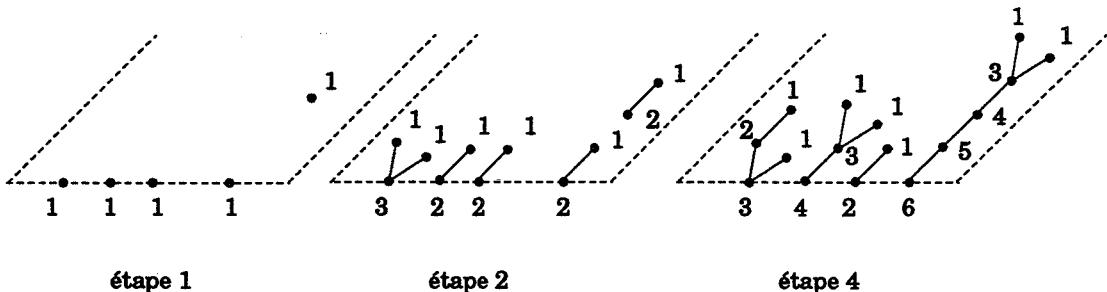


FIG. 4.2 : Calcul de l'aire de drainage

La simulation des processus s'écrit par la formulation suivante : $S = k(1 + \frac{a^2}{u^2})g$ où g est le gradient, a l'aire de drainage. Le paramètre u définit la distance minimum au-delà de laquelle les processus de ruissellement dépassent en intensité ceux de saltation et de reptation, avec k la constante de proportionnalité entre ces deux phénomènes. Les processus de saltation et de reptation ne dépendent pas de l'aire de drainage mais de la pente ; leurs actions conduisent à combler les cuvettes. Le processus de ruissellement dépend au contraire linéairement du taux de transport de l'aire de drainage ; il aboutit au creusement des vallées. Il y a action de l'un ou l'autre des phénomènes selon la valeur de u , qui caractérise l'influence du climat et de la végétation.

Cette expression s'applique surtout pour des terrains en climat semi-aride où il n'y a pas d'effet de saturation en eau des sols proches des embouchures.

Conclusion Ce modèle permet la création d'un réseau hydrographique, calculé en chaque point d'une grille 2D. La visualisation du relief résultat est très simple. Il apparaît comme une nouvelle grille altimétrique où sont tracés les cours d'eau. A l'inverse d'Ahnert, le nombre de processus simulés est faible mais suffisant pour obtenir un effet d'érosion du relief. Ici, les phénomènes de transport sont supposés être affectés par la végétation et non par la nature du sous-sol. L'utilisation d'une surface pseudo-fractale limite les effets d'échelle et permet au processus de démarrer la différenciation du terrain.

D'autres formalisations de processus d'érosion ont été effectuées mais elles ne seront pas décrites ici car leurs résultats ne sont pas exploitables pour une simulation. Ce sont des modèles analytiques (résolutions directes d'équations de transport différentielles [CRIV82] [Cra80]) ou des modèles simplifiés de simulation comme celui d'Armstrong [Arm76].

4.2 Description de notre modèle

Notre modélisation de paysages, présentée dans [Rou91, PRP93], s'inspire des travaux cités précédemment. Les quelques simulations déjà effectuées par les géomorphologues montrent le potentiel de telles méthodes dans la création de paysages réalistes. Nous avons

et en cas de flots divergents, on remarque une forte densité des têtes d'écoulement

4.2 – Description de notre modèle

vu que le but de ces modèles était de vérifier et de quantifier des théories géomorphologiques. Ceci nous a conduit à concevoir une nouvelle modélisation adaptée à la synthèse de paysages.

Tout en reprenant quelques caractéristiques de base des modèles de simulation existants (représentation par grille, simulation par des lois, création du réseau hydrographique), notre approche se différencie par de nombreux points. En particulier, on peut citer une simulation dynamique avec modélisation volumique du sous-sol, la définition de lois simples et très paramétrables pour des processus d'érosion efficaces, des hypothèses de transport adaptées à la création d'un réseau hydrographique.

Objectifs Comme nous l'avons vu, le nombre et la complexité des processus à prendre en compte est important. Il s'agit donc de déterminer ceux qui doivent et peuvent être simulés dans l'optique d'un traitement informatique. De même, les représentations des données et les formulations des processus doivent être simples mais efficaces.

Il est important que le modèle soit assez paramétrable pour permettre de réaliser une grande variété de paysages mais aussi facile d'utilisation. La modélisation doit être dynamique pour faire évoluer les reliefs au cours de la simulation et considérer l'influence capitale du sous-sol. Enfin, il faut prendre garde de ne pas utiliser des lois trop rigides, ni de choisir arbitrairement les données de départ.

Nous allons maintenant présenter les différents éléments du modèle, au niveau de la représentation des reliefs et des processus d'érosion qui vont agir.

4.2.1 Modélisation du relief

La modélisation du relief doit prendre en compte la surface topographique et la représentation du sous-sol et répondre à deux objectifs. Le premier est de sous-entendre une certaine simplicité de calcul ; le deuxième est de définir une surface initiale qui ne conditionne pas trop l'évolution du relief (au contraire, les surfaces érodées entraînent l'évolution ultérieure puisqu'elles reflètent en partie les conditions du sous-sol). Ceci implique de prendre garde aux problèmes des échelles.

Le relief est constitué de la mise en correspondance d'une grille altimétrique et d'une modélisation volumique d'un sous-sol. Cette représentation est utilisée aussi bien pour un relief initial que pour un relief érodé. L'unicité du format permet d'utiliser un relief déjà évolué comme point de départ d'une nouvelle simulation.

La distinction entre surface et sous-sol permet de jouer à la fois sur l'altimétrie et la taille de la région initiale et sur la grande variété de sous-sols à lui associer. C'est la clé de voûte du modèle de simulation. Une telle représentation offre l'avantage d'être souple et bien adaptée à la mise en œuvre des processus.

4.2.1.1 Structure spatiale

Deux choix sont possibles au niveau de la structure spatiale : une grille altimétrique ou un réseau de facettes. L’utilisation de facettes permet de limiter le nombre de points où le calcul des quantités est nécessaire (un calcul par facette) ; néanmoins il faut envisager des facettes déformables au cours du temps. En effet, une variation d’altitude entraîne une variation d’inclinaison et un problème de jonction entre les facettes. Il faut aussi moduler la définition des facettes selon les régions considérées : petites dans les zones accidentées, grandes pour les zones uniformes.

Pour éviter ces inconvénients, il est plus simple d’utiliser une représentation en grille altimétrique. Celle-ci offre l’avantage d’un accès rapide aux points et simplifie la simulation des processus (en particulier, le calcul de l’aire de drainage). Comme dans le modèle de Kirkby, la possibilité d’utiliser une grille carrée ou hexagonale est intéressante. Par contre, pour que le traitement soit cohérent pour les deux représentations, il apparaît plus juste de ne considérer, pour un point d’une grille carrée, que quatre voisins possibles et non huit. En effet, utiliser une 8-connexité signifie que deux chemins entre deux points côté à côté et leur voisin respectif peuvent se croiser ; ce qui n’a pas de signification au niveau d’une trajectoire de ruissellement.

La structure spatiale de la surface correspond à un modèle maillé où les coordonnées en X et Y de chaque noeud sont régulièrement espacées. La maille utilisée peut être carrée ou hexagonale, indépendamment de la surface et permet ainsi de moduler la finesse de la modélisation (figure 4.3).

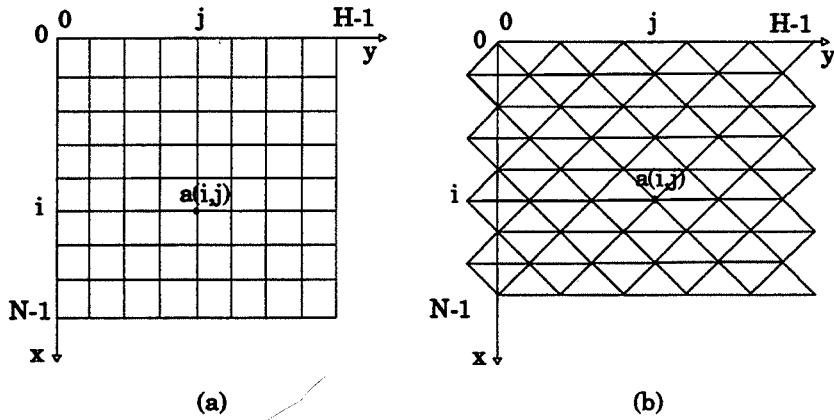


FIG. 4.3 : Représentation d’une grille (a) carrée et (b) hexagonale

Une maille carrée permet d’obtenir une évaluation plus grossière mais plus rapide du résultat et, éventuellement, d’utiliser des données réelles (fichiers DMA) comme point de départ. La représentation en grille hexagonale offre une plus grande précision (chaque point a six possibilités d’écoulement). Chaque point de la grille altimétrique possède quatre ou six voisins, considérés à égale distance. La dimension globale de la grille est donnée par le nombre de points (selon les axes X et Y) et par la taille de la maille. Celle-ci est fixe pour l’ensemble de la grille et est définie en fonction du dimensionnement désiré.

4.2 – Description de notre modèle

Maille carrée Dans un maillage carré, les coordonnées en X et Y de chaque point sont disponibles implicitement par l'indication de la grille ; les altitudes selon l'axe Z sont calculées. Cette représentation est très classiquement manipulable sous forme d'un tableau d'altitudes M de dimension $N \times H$ où N est le nombre de points selon l'axe X et H selon l'axe Y . Chaque nœud (i, j) définit une altitude : $M[i, j] = altitude_{(i,j)}$, avec i selon X et j selon Y .

Chaque nœud interne de la grille a quatre voisins, les nœuds externes (situés aux bords) trois voisins et les nœuds des coins, seulement deux. Les quatre voisins d'un nœud quelconque (i, j) à l'intérieur de la grille sont les suivants : $(i, j+1)$ "est", $(i-1, j)$ "nord", $(i, j-1)$ "ouest", $(i+1, j)$ "sud".

Maille hexagonale L'utilisation de la grille hexagonale offre un degré de précision supplémentaire par rapport à un maillage carré. La connexité naturelle associée à la grille (chaque point a pour voisin les six points les plus proches) permet qu'aucun chemin ne se croise sans se toucher.

La représentation est effectuée par un tableau d'altitude de même structure que pour une maille carrée. Cependant, le voisinage d'un point n'est pas immédiat à déterminer puisqu'il varie selon les lignes. En fait, cela revient à considérer que toutes les lignes impaires sont décalées d'une demi-maille vers la gauche. En considérant la parité de la ligne du point, les points voisins sont définis par la formulation unique suivante :

$$\begin{array}{ll} i-1, j - (i \bmod 2) & i-1, j+1 - (i \bmod 2) \\ i, j-1 & i, j & i, j+1 \\ i+1, j - (i \bmod 2) & i+1, j+1 - (i \bmod 2) \end{array}$$

Ils correspondent aux directions "est", "nord-est", "nord-ouest", "ouest", "sud-ouest", "sud-est". Cette formulation permet de représenter la grille hexagonale par un tableau, sans stocker les coordonnées en X et Y et de trouver facilement le voisinage d'un point (figure 4.4). Elle est très utilisée en analyse d'images. Les points situés aux bords de la grille ont trois voisins (bords est et ouest, lignes impaires) ou quatre (bords sud et nord) ou cinq (bords est et ouest, lignes paires). Les points extrêmes possèdent deux voisins sauf le point nord-ouest qui en a trois.

Réellement, la distance entre les voisins d'une même ligne et celle entre les points situés sur les lignes adjacentes ne sont pas identiques, si on considère que les indices correspondent à leurs coordonnées en X et Y . Cela n'a pas d'incidence au niveau de la simulation puisque seuls le voisinage d'un point et les élévations sont nécessaires. Chaque point est supposé se trouver à égale distance de ses voisins. Cette particularité devra cependant être prise en compte lors de la visualisation.

4.2.1.2 Altimétrie de la surface

L'altimétrie de la surface peut être, comme chez Kirkby, une simple perturbation fractale nécessaire pour amorcer les phénomènes d'érosion et la formation d'un réseau hydro-

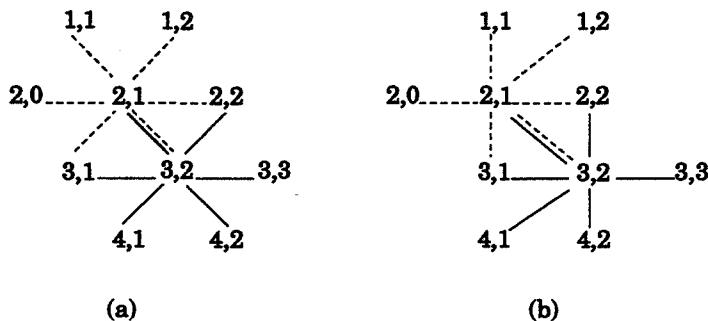


FIG. 4.4 : Voisinage d'un point en maille hexagonale: (a) en réalité, (b) avec une structure de tableau

graphique. La création de vraies surfaces fractales nous paraît inutilement compliquée et risque de conditionner par la suite trop fortement l'allure des reliefs. De même, l'utilisation de données altimétriques réelles, tout en introduisant un certain héritage, serait incorrecte car elle ne correspondrait en rien à la géologie d'un sous-sol. Il semble donc plus opportun de choisir une altimétrie plane ou légèrement perturbée, avec d'éventuels dômes, cuvettes ou plaines et de laisser agir la différenciation du relief par le sous-sol.

La technique de perturbation suit une fonction aléatoire. Cette transformation altimétrique permet de lancer plus rapidement le processus d'érosion car la direction d'écoulement de départ est plus diverse. Elle évite également que les paysages résultants ne paraissent trop réguliers. En effet, les hauteurs érodées calculées sont identiques pour une série de points voisins ayant même géologie, disposés sur une pente uniforme. Ni une modification du gradient, ni des caractéristiques géologiques différentes n'interviennent alors pour moduler l'action érosive en ces points. Dans le cas de surfaces planes, la différenciation s'effectuera au départ uniquement à partir des caractéristiques géologiques du sol.

L'évolution de la surface topographique est liée à celle du réseau hydrographique et de ses bassins versants. Les trajectoires de ruissellement doivent donc favoriser la formation d'un réseau consistant. Il apparaît alors que si les pentes locales du relief sont opposées, de nombreuses trajectoires seront fermées, stoppant ainsi tout ruissellement vers l'exutoire⁵ du bassin. Dans ce cas, une suite de processus d'érosion et de sédimentation sera nécessaire pour former, progressivement, des trajectoires plus consistantes.

La définition d'un *niveau de base* permet de résoudre en partie ce problème. La surface est inclinée dans une ou plusieurs directions, influençant ainsi les trajectoires de ruissellement (figure 4.5). L'ensemble des points les moins élevés de la surface inclinée détermine le niveau de base. Ils correspondent en général à des points du bord (une seule direction d'inclinaison) ou à des points extrêmes de la grille (deux directions d'inclinaison). Ils sont reconnaissables par un identificateur propre. Les points des bords de la grille qui ne sont pas des niveaux de base sont aussi spécifiés, car tous ces points réagiront différemment lors de la simulation (pas d'écoulement, ni de transport vers un voisin).

⁵point le plus bas du bassin où convergent tous les ruissellements

4.2 – Description de notre modèle

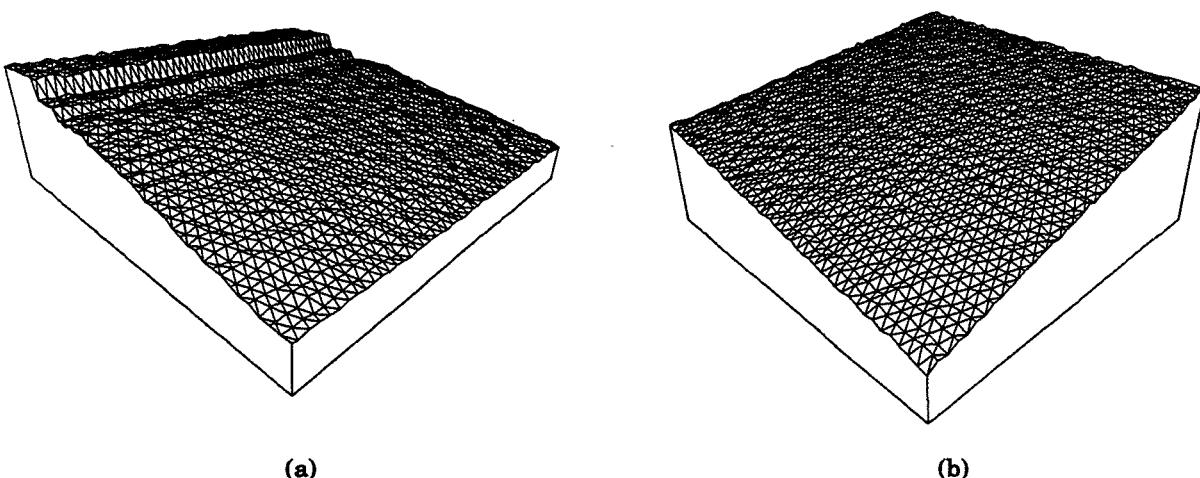


FIG. 4.5 : Représentation d'une surface perturbée et inclinée selon (a) une direction, (b) deux directions

4.2.2 Représentation du sous-sol

Il s'agit de prendre en compte les caractéristiques lithologiques du sous-sol pour simuler plus fidèlement les phénomènes de l'érosion. Les travaux d'Ahnert montrent bien l'importance primordiale de la lithologie dans l'évolution d'un paysage. C'est par cette approche que notre modèle se différencie principalement. Il apparaît que des couches de sol avec des caractéristiques et des pendages (orientation des couches) différents marquent des traits de reliefs variés. Il est donc important d'avoir une modélisation des terrains sous-jacents la plus complète et plus modulable possible.

Il est adéquat de disposer d'une structure en couches superposées, offrant chacune des caractéristiques différentes et auxquelles il soit possible de faire subir des déformations (ce qui n'est pas le cas chez Ahnert). Les propriétés de chaque roche permettent de moduler l'action des processus d'érosion. Il est indispensable que la modélisation du sous-sol soit 3D pour permettre d'attribuer à chaque point de la surface topographique la roche qui correspond à l'évolution de son altitude.

Certaines contraintes de définition des couches existent : elles ne doivent pas être trop minces, pour éviter des calculs importants et sans-doute inutiles et ne doivent pas présenter de grandes discontinuités, pour éviter une structure de paysage trop simplifiée. Par ailleurs, les définitions séparées de la surface et du sous-sol permettent d'associer, à échelles correspondantes, plusieurs lithologies à une même altimétrie initiale.

Nous nous appuyons donc sur une modélisation 3D de terrains géologiques polyplissés et polyfaillés réalisée antérieurement. Le logiciel *POLYPLI* correspondant est intégré à notre simulation. Nous allons exposer les principes de cette représentation ; ils sont détaillés dans [PORP87] et plus récemment dans [PCBT93].

Le logiciel permet de simuler l’architecture de terrains stratifiés déformés par des plis et des failles, ce qui correspond à de nombreux environnements géologiques (bassins sédimentaires, couches sédimentaires ou métamorphiques). Une faille correspond à un décalage subi par deux portions de terrain de part et d’autre d’un plan de faille. Un pli est une déformation souple, répandue dans des régions ayant subi des transformations en profondeur.

4.2.2.1 Modèle polyplissé et polyfaillé

Tout pli ou faille qui déforme un empilement sédimentaire est défini comme l’application, à un ensemble de strates planes, d’une transformation décrivant les mouvements subis par chacun des points. Ainsi la déformation globale du terrain polyplissé et polyfaillé peut se décomposer en une succession de déformations élémentaires de type pli ou faille.

La réalisation d’un modèle polyplissé et polyfaillé se traduit par l’application à une stratification initiale horizontale (superposition de différentes couches) d’une suite ordonnée de transformations géométriques représentant chacune une déformation élémentaire. Chaque déformation correspond à un déplacement simple des terrains (pli, basculement d’ensemble, mouvement différentiel le long d’un plan de faille).

Une déformation élémentaire Géométriquement, elle se traduit par des déplacements de plans orientés dans une direction particulière : *le plan axial*. Ces différents plans glissent les uns par rapport aux autres parallèlement à une direction unique : *la direction de glissement*. Le taux de glissement des plans est déterminé à l’aide d’une fonction f dite *fonction profil* (figure 4.6).

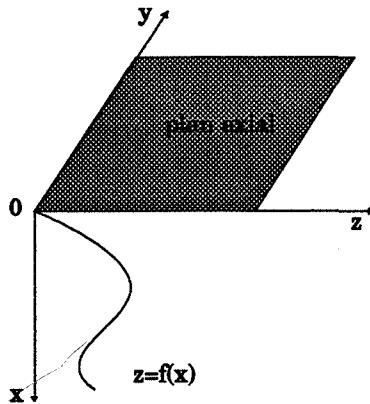


FIG. 4.6 : Espace des déformations

Le déplacement des points, parallèlement à une certaine direction, a la même valeur qu’il s’agisse d’une déformation de type pli ou de type faille. Dans le cas d’une faille, le déplacement est identique pour tous les points appartenant au même demi-espace désigné par le plan de faille. Dans le cas d’un pli, la condition est vérifiée pour tous les points d’un même plan de glissement.

4.2 – Description de notre modèle

En considérant un repère orthonormé où l'axe Z correspond à la direction de glissement et le plan YZ à celle du plan axial ou du plan de faille, on peut faire correspondre à chaque point $M(x, y, z)$ du terrain, un point $M'(x', y', z')$ tel que :

$$\begin{aligned}x' &= x \\y' &= y \\z' &= z + f(x)\end{aligned}$$

Ce type de transformation correspond à des déplacements qui, dans un repère lié aux directions caractéristiques de la transformation, se traduisent simplement par des changements d'altitude. La valeur des déplacements ne dépend que de l'abscisse des points M considérés. Ces transformations sont appelées *altimétriques cylindriques (TAC)*. Leur combinaison n'est pas commutative. Chacune est définie complètement par les trois éléments suivants :

- le plan axial de direction YZ . Il est défini par les trois composantes : l'azimuth ou direction (angle entre la droite horizontale du plan et la composante horizontale du champ magnétique terrestre, compris entre 0 et 180 degrés), le sens (point cardinal vers lequel plonge le plan) et le pendage (angle entre la ligne de plus grande pente et le plan horizontal, compris entre 0 et 90 degrés).
- la droite de glissement de direction contenue dans le plan axial selon Z . Un sens et une valeur de plongement complète cette définition.
- la fonction profil, définie selon la direction X perpendiculaire au plan axial. La fonction est aussi déterminée par une amplitude A , une longueur d'onde L et un décalage d et s'écrit : $f(x) = A \sin(2\pi(x - d)/L)$.

Fonctions profil Elles sont classées dans deux catégories : les profils simples et les profils complexes ou manuels (figure 4.7). Plusieurs types de profils simples sont prédéfinis :

- ensemble de failles montantes ou descendantes ayant même orientation de plan axial. Dans ce cas, le profil est défini par une fonction en paliers.
- un basculement. La fonction profil est du type $f(x) = ax$.
- un pli simple ou composé avec un basculement. La fonction profil par défaut est représentée par une sinusoïde de longueur d'onde et d'amplitude choisies.

Un profil manuel ou complexe est défini par l'utilisateur par saisie de la courbe désirée. Cependant pour que la fonction profil soit acceptable, il faut que pour tout x , la valeur $z = f(x)$ soit unique. D'autre part, on peut additionner des profils simples (par exemple une faille et un profil manuel) afin d'obtenir un profil complexe.

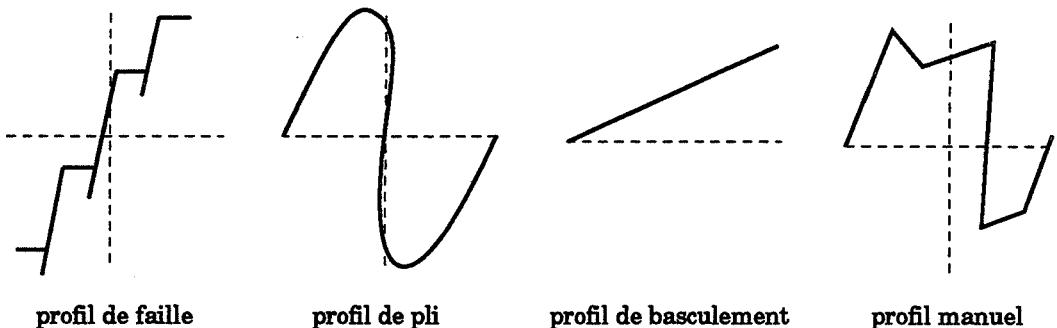


FIG. 4.7 : Les différents types de profils

Représentation du modèle volumique La stratification initiale représente un ensemble de couches horizontales, de nombre et d'épaisseur variables. Au niveau de la visualisation, chaque couche se différencie par une couleur. Le modèle volumique ainsi créé peut être visualisé sous forme de sections planes ou de blocs diagrammes, avec différentes orientations. Un bloc diagramme étant constitué d'un empilement de sections planes parallèles s'occultant partiellement les unes aux autres, la méthode se réduit à la construction d'une section plane d'orientation quelconque.

Le plan de la section cherchée est confondu avec le plan de l'écran sur laquelle elle est représentée. Il s'agit alors d'attribuer à chacun des points de l'écran, la couleur de la couche de laquelle il est issu. Le principe est de situer ce point dans le repère du monde, de lui appliquer la transformation globale inverse de la transformation (définie comme la suite des *TAC* inverses) et de déduire ses coordonnées originelles dans le monde. La couleur est alors celle de la couche à laquelle il appartient.

La matrice M de passage du repère du monde à celui de la *TAC* est la suivante :

$$M = \begin{pmatrix} d_1 & c_1 & g_1 \\ d_2 & c_2 & g_2 \\ d_3 & c_3 & g_3 \end{pmatrix}$$

avec (d_1, d_2, d_3) définissant la normale au plan axial, (g_1, g_2, g_3) la direction de la droite de glissement et (c_1, c_2, c_3) le vecteur orthogonal aux deux premiers vecteurs. Un point P de coordonnées (x, y, z) dans le repère du monde sera transformé en un point P_1 dans ce même repère avec (f désigne la fonction de profil) :

$$\begin{aligned} x_1 &= x + g_1 f(d_1 x + d_2 y + d_3 z) \\ y_1 &= y + g_2 f(d_1 x + d_2 y + d_3 z) \\ z_1 &= z + g_3 f(d_1 x + d_2 y + d_3 z) \end{aligned}$$

La *TAC* inverse diffère simplement au niveau de son amplitude qui est multipliée par -1 . Tous les autres paramètres sont identiques.

La figure (4.8) présente la visualisation des transformations successives appliquées à une stratification initiale horizontale. Elles permettent de constituer un modèle 3D po-

4.2 – Description de notre modèle

lyplissé et polyfaillé. Les paramètres de définition sont répertoriés dans le tableau (4.1). La stratification initiale comporte six couches de quatre types différents et d'épaisseur variable.

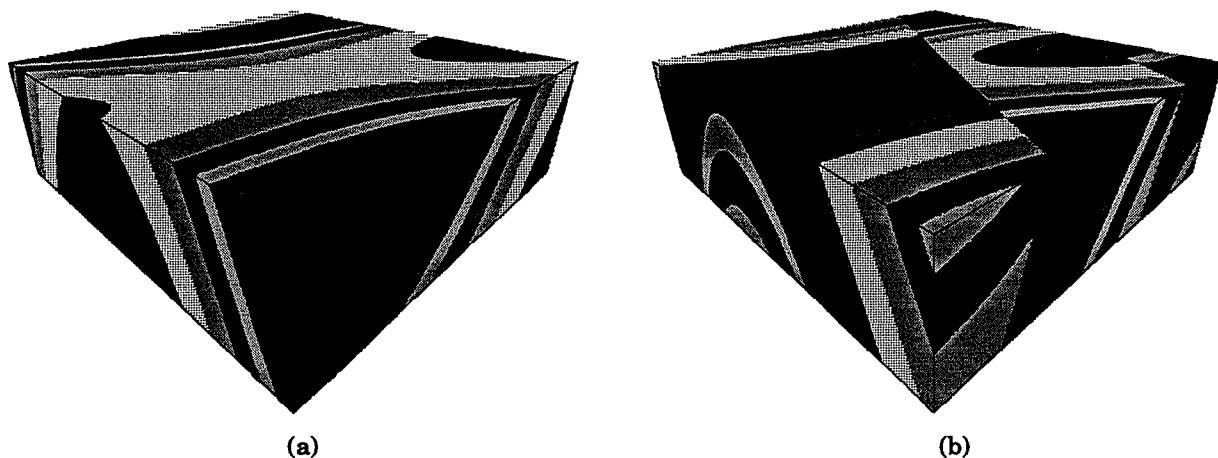


FIG. 4.8 : La représentation de différentes déformations : (a) avec seulement les deux phases de plis, (b) avec toutes les phases

Phases	Plan axial			Droite de glissement			Profil
	direction	sens	pendage	direction	sens	plongement	
1	20	est	90	110	est	90	sinus
2	90	sud	90	60	est	90	sinus
3	120	sud	75	30	est	75	faille mont.

Profil	amplitude	longueur d'onde	décalage
1	1.2	3.	0.
2	0.3	3.	0.
3	1.	0.8	0.

TAB. 4.1 : Paramètres du modèle

En fait, pour notre application, une visualisation différente est préférable. Il s'agit, en effet, d'associer à chaque point de notre relief une appartenance à une des couches du modèle volumique. Ainsi nous appliquons la transformation inverse directement aux points du relief définis dans le repère du monde. La visualisation correspond à une vue perspective du relief, associé au modèle volumique (l'épaisseur de visualisation est arbitraire). Elle permet de représenter la géologie de surface et en coupe de la grille altimétrique. Un exemple de surface avec deux géologies associées est présenté dans la figure (4.9).

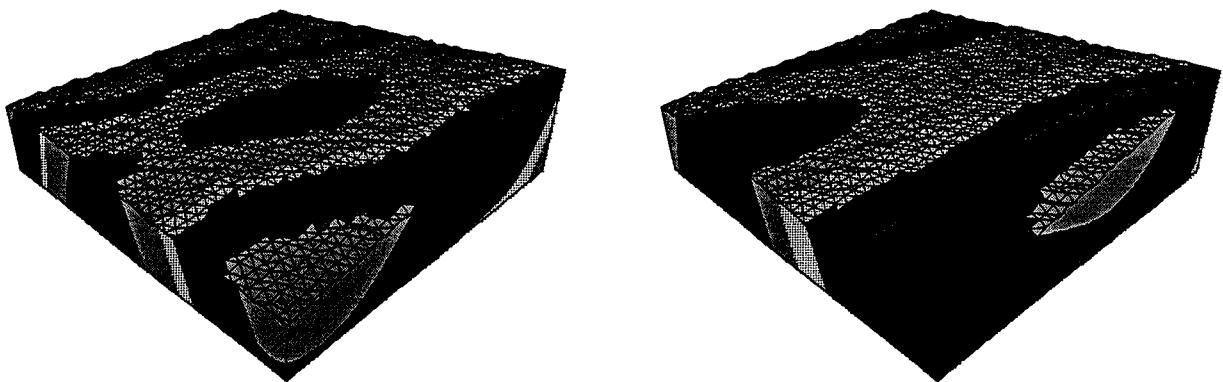


FIG. 4.9 : Une même surface avec deux sous-sols différents

4.2.2.2 Paramètres géologiques

La définition d'un tel modèle volumique permet d'associer à la surface topographique un sous-sol 3D structuré sous forme de couches déformées. Chaque point de la grille appartient à une couche précise du modèle. Pour la déterminer, nous appliquons le même principe que celui utilisé pour la visualisation. Chaque point subit la transformation globale inverse des déformations ce qui permet de trouver la couche à laquelle il appartient. En effectuant ce calcul pour tous les nœuds de la grille, on dispose de la définition exacte du sous-sol. Ceci revient simplement à attribuer à chaque point un identificateur significatif de la couche dont il dépend.

Pour notre application, il s'agit alors d'associer à chaque couche ses caractéristiques géologiques. Ce sont elles qui entrent en jeu dans la simulation des processus. Tous les points appartenant à une couche possèdent l'ensemble de ses propriétés. Celles-ci se traduisent par trois coefficients qui servent à quantifier les trois paramètres géologiques suivants : dureté, porosité, aptitude à la dissolution par l'eau infiltrée. A ceux-ci s'ajoute une propriété de surface correspondant à la nature et à la densité du couvert végétal.

Le tableau (4.2) donne quelques exemples de valeurs de coefficients pour un certain nombre de couches. Elles sont indiquées sans unité et correspondent à des proportions (comprises entre 0 et 1). Elles sont déterminées par les principes suivants :

- K_d : coefficient d'érosion mécanique, de valeur élevée pour des couches tendres, faible pour des couches dures.
- K_f : coefficient d'infiltration, de valeur élevée pour des couches perméables, faible pour des couches imperméables.
- K_c : coefficient de dissolution chimique, de valeur importante pour des couches riches en éléments solubles, faible dans le cas contraire.

4.2 – Description de notre modèle

	K_d	K_f	K_c
Argile	0.95	0.10	0.10
Quartzite	0.10	0.30	0.10
Calcaire fissuré	0.30	0.50	0.95
Sable de rivière	0.90	0.50	0.10
Grès tendre	0.50	0.75	0.10

TAB. 4.2 : Quelques valeurs de paramètres géologiques

Si l'altitude du point est modifiée, par enlèvement ou dépôt de matière, il peut alors appartenir à une couche différente. Par exemple, un point dans une couche tendre va subir une forte érosion qui va abaisser son altitude ; il peut alors se retrouver dans une couche inférieure, plus dure, qui réagira différemment à la simulation. Il est donc primordial de pouvoir, à tout moment (en particulier à chaque itération), connaître les caractéristiques géologiques des points, en fonction de leur évolution. La définition d'un modèle volumique offre cet avantage.

Remarque

Un dépôt de sédiments sera représenté par une couche différente avec des coefficients propres. Elle n'est pas incluse dans la définition du modèle mais est "superposée" au sous-sol (identificateur caractéristique au niveau des points sédimentés). Ceci permet d'éroder d'abord la couche de sédiments avant de considérer la couche supérieure du sol. Les caractéristiques attribuées à cette nouvelle formation sont proches de celles des sables de rivière avec un coefficient K_c pouvant être nul.

4.2.2.3 Définition de la végétation

Au niveau du couvert végétal, l'importance de la végétation est formalisée par un coefficient K_v , agissant comme les autres coefficients. En nous limitant au cas de climats tempérés humides, nous proposons les règles suivantes:

- $K_v = 0$
 - pour les points situés à une altitude supérieure ou égale à celle de l'étage nival,
 - pour toute pente $\geq 60^\circ$ sur laquelle la végétation est considérée comme quasi inexistante,
 - pour tous les points appartenant à des lits de cours d'eau. Il est bien entendu qu'il existe en tout point une certaine hauteur d'eau calculée. Il faudra donc fixer un seuil à partir duquel un point appartient à un lit de cours d'eau.
- $K_v = v = \text{constante}$ pour toute pente $\leq 30^\circ$ (avec $v \leq 1$).
- $0 \leq K_v \leq v$ pour toute pente comprise entre 30° et 60° (et v variant linéairement).

Le fait que K_v soit nul pour les points situés aux fonds de rivière doit permettre de stabiliser le réseau hydrographique. En effet, la quantité d'eau ruisselée calculée en ces points là n'est pas réduite par une retenue végétale. La quantité de matière enlevée est alors plus conséquente.

4.2.3 Lois de la simulation

La méthode est itérative et consiste à calculer, pour chaque noeud de la grille, les quantités de matière à extraire ou à déposer et en conséquence, les modifications de l'altitude des points. Ceci revient à faire agir un certain nombre de processus en chacun des points. L'ordre dans lequel ils apparaissent est séquentiel et fixé arbitrairement. Les calculs sont fonction des caractéristiques géologiques de la roche en ce point, disponibles grâce à la modélisation du sous-sol.

La mise en oeuvre des processus suppose le calcul préalable d'un graphe de jonction entre les points à partir de la topographie existante. En effet, avant de considérer un point de la grille, il faut avoir traité tous les points situés en amont de lui, puisqu'il y a transport d'eau et de matière. En pratique, les points sont donc regroupés en plusieurs ensembles, par analogie aux courbes de niveaux du terrain. Les points appartenant à un même ensemble présentent un même numéro d'ordre dans le parcours de l'arborescence du réseau. La création du graphe sera expliquée par la suite.

Les points correspondant à chaque courbe de niveau sont traités un par un, de la courbe la plus en amont vers celle la plus en aval (niveau de base global). Le déplacement des quantités calculées est effectué selon une direction d'écoulement et un type de transport. Quand tous les points ont été traités, on obtient à la fin de l'itération un nouveau graphe qui va servir d'ordre de parcours pour l'étape suivante. La mise à jour des altitudes et des types de roche est effectuée et le processus est réitéré.

Direction d'écoulement Certains auteurs (Musgrave, Ahnert) autorisent une direction d'écoulement d'un point vers tous les voisins situés en aval de lui. L'intensité de l'écoulement est alors proportionnelle à la différence d'altitude entre le point considéré et chacun des points avals. On observe alors une difficulté à obtenir un réseau consistant. Or, ceci ne reflète pas la réalité. En effet, si la distance entre les points est relativement faible, le flux arrivant en un point est canalisé, dans sa totalité, vers le point situé le plus en aval.

En conséquence, nous avons choisi une direction d'écoulement vers le seul voisin le plus en aval (par contre un point peut recevoir les écoulements de plusieurs points situés en amont de lui). S'il n'existe pas de points en aval (cas des cuvettes), il n'y a évidemment pas d'écoulement. Dans le cas où tous les voisins sont à une même altitude (cas d'un plateau), nous imposons une direction. Ceci permet de simuler, même pour une pente nulle, un phénomène de transport, car un relief absolument plat n'existe pas dans la nature.

Type de transport Ce peut être un transport point par point ou un déplacement en masse. Mais la simulation d'un transfert en masse ne suit pas l'ordre de parcours des

4.2 – Description de notre modèle

points, de l'amont vers l'aval, successivement. Aussi avons-nous préféré un transport point par point, le jeu des paramètres permettant par ailleurs d'accentuer l'action d'un processus.

Globalement, les phénomènes de la simulation se résument ainsi :

- chaque point de la grille reçoit une quantité d'eau déterminée représentant les précipitations ;
- une certaine proportion de cette eau s'infiltra, une autre partie ruisselle vers le point voisin le plus en aval ou forme une cuvette si tous ses voisins le dominent ;
- l'eau qui ruisselle enlève une certaine quantité de matériaux rocheux qu'elle va ensuite déposer en aval ou dans les cuvettes sous forme d'alluvions ;
- l'eau qui s'infiltra dissout une certaine quantité de matière qui est mise en solution.

Les différentes quantités d'eau sont déterminées en fonction de la loi suivante :

$$\text{Précipitations} = \text{Evaporation} + \text{Infiltration} + \text{Ruisseaulement}$$

et sont calculées en chaque point, selon les propriétés de la roche à laquelle il appartient.

C'est au niveau du volume d'eau évaporée qu'intervient la représentation de la végétation. Celle-ci est simulée par un paramètre agissant sur l'écoulement de surface. Il est aussi possible de prévoir une absence de végétation dans certaines zones (escarpées, en haute altitude) pour renforcer les effets de la dénudation.

Le processus est réalisé en tout point, du plus en amont vers le plus en aval jusqu'au niveau de base. On aboutit ainsi, à chaque itération, à un nouveau modèle et à un nouveau réseau hydrographique. Nous allons maintenant détailler les différentes lois modélisant les actions de l'érosion et de la sédimentation.

Il semble que la simulation des processus de reptation et de ruissellement soit suffisante pour une érosion réaliste des reliefs. Le phénomène de saltation a une action assez faible et l'écoulement plastique a un caractère exceptionnel. Pour pouvoir moduler l'importance des processus, une loi propre à chacun semble plus appropriée qu'une seule formulation. Chacune d'entre elles correspond au traitement d'un nœud P quelconque de la grille.

4.2.3.1 Loi d'érosion gravitaire

On suppose que joue en chaque point une loi gravitaire responsable d'un déplacement lent des terrains dans le sens des pentes. Cette loi traduit que la diminution d'altitude Δz_g en un point donné est proportionnelle à la pente et à un coefficient caractéristique du terrain considéré. On obtient :

$$\Delta z_g = K_d \tan(\theta) \quad (4.1)$$

avec K_d coefficient de dureté de la roche

et $\tan(\theta)$: angle entre le segment joignant le point P et son voisin le plus bas, et le plan horizontal.

L’altitude du point considéré est abaissée de Δz_s , et celle du voisin le plus bas est augmentée de la même quantité. Le calcul est effectué des points les plus hauts jusqu’aux points les plus bas. En un point correspondant à un fond de cuvette il y a seulement augmentation d’altitude. Ce phénomène agit sur les altitudes mais ne produit pas de matériaux détritiques. Il est complètement indépendant du volume d’eau précipitée (et donc ruisselée).

4.2.3.2 Loi d’érosion mécanique

C’est une loi d’usure des roches par production de matériaux détritiques. L’abaissement de l’altitude est lié dans ce cas à un transfert de matière. La quantité S de matériaux produite en un point donné peut se traduire par une hauteur S de produits altérés. Par retrait de ces produits, l’altitude du point est alors diminuée d’une variation de :

$$\Delta z_w = -S \quad (4.2)$$

Elle dépend de la quantité d’eau ruisselée arrivant au point considéré, de la pente et du coefficient d’érosion caractéristique du terrain. Tout comme le coefficient de dureté K_d , le coefficient d’érosion définit le caractère plus ou moins tendre de la roche. On peut donc supposer que ces deux coefficients sont proportionnels d’un paramètre α .

Si on désigne par q la quantité globale d’eau ruisselée disponible au point considéré, on obtient la loi suivante :

$$S = \alpha K_d \tan(\theta) q \quad (4.3)$$

Cette formulation peut s’appliquer aussi bien à des points localisés sur un versant qu’au fond d’un lit de rivière. Dans ce cas, on considère que l’eau de ruissellement est portée par le cours d’eau.

Eaux de ruissellement aboutissant en un point On suppose que la quantité d’eau précipitée du ciel est uniforme et égale en chaque point. La quantité d’eau w_r disponible pour ruisseler ne représente qu’une fraction de l’eau précipitée ; le reste est infiltré ou retenu par la végétation. Ceci s’exprime par :

$$w_r = [1 - (K_f + K_v)]w$$

avec w la quantité d’eau précipitée, w_r la proportion d’eau ruisselée, K_f le coefficient d’infiltration et K_v le coefficient de végétation

En fait, la quantité d’eau qui est disponible en un point i n’est pas seulement la fraction de l’eau précipitée en ce point. Il faut y ajouter aussi la somme cumulée des eaux de ruissellement issues des points j situés en amont. Cette quantité est égale à :

$$q^i = \sum_{j=1}^i [1 - (K_f^j + K_v^j)]w \quad (4.4)$$

avec K_f^j coefficient d’infiltration et K_v^j coefficient de végétation au point j .

4.2 – Description de notre modèle

Cette condition implique évidemment de traiter un par un tous les points j situés dans le bassin versant du cours d'eau contenant i , dans le sens amont vers aval. Il est alors impératif d'avoir un ordre de parcours des points. L'eau ruisselée aboutissant en chacun des points entraîne l'érosion de la couche rocheuse existante.

Quantité de sédiments détritiques La quantité de matériaux détritiques produite en un point est évaluée en fonction de la quantité totale du ruissellement. A cette quantité doit s'ajouter, de la même façon que pour le ruissellement, le cumul des matériaux détritiques produits par les points appartenant au même bassin versant.

La hauteur de matériaux détritiques produite en amont du point j et au point i lui-même s'écrit alors :

$$S^i = \alpha \sum_{j=1}^i K_d^j \tan(\theta^j) \sum_{k=1}^j q^k \quad (4.5)$$

et en remplaçant q^k par l'expression donnée en (4.4), on obtient :

$$S^i = \alpha W \sum_{j=1}^i K_d^j \tan(\theta^j) \left[j - \sum_{k=1}^j (K_f^k + K_v^k) \right] \quad (4.6)$$

Les quantités de sédiments détritiques évaluées en chaque point sont considérées en suspension dans les eaux de ruissellement et vont être traitées ensuite par la loi de sédimentation.

4.2.3.3 Loi d'érosion chimique

Cette loi traduit la mise en solution d'une fraction des matériaux rocheux percolés par les eaux d'infiltration. Celles-ci fragilisent les roches en provoquant une perte de cohésion au niveau des grains minéraux. Le retrait des éléments solubles provoque l'apparition de fissures dans les roches et entraîne leur érosion. Au sein des produits érodés, les vides ainsi créés disparaissent, traduisant une diminution de l'altitude Δz_c des points considérés.

La loi traduisant ce phénomène ne prend pas en compte les transformations chimiques induites par les eaux d'infiltration car leur modélisation serait trop complexe et inadaptée à notre problème. La formulation repose donc essentiellement sur le volume des eaux souterraines.

Pour déterminer la proportion d'eau q' qui s'infiltra au point considéré, on suppose que la vitesse d'écoulement des eaux de ruissellement est suffisamment faible pour permettre une infiltration. En effet, si le débit des eaux en surface est trop important, la proportion d'eau qui peut s'infiltrer devient très faible, limitant l'érosion chimique. La quantité des eaux infiltrées s'exprime donc par :

$$q' = K_f q$$

La diminution d'altitude, traduisant une perte de matière, est alors donnée par la formule :

$$\Delta z_c = \gamma K_c q' \quad (4.7)$$

avec K_c le coefficient de dissolution chimique,
et q' la quantité d'eau qui s'infiltre au point considéré.

Le coefficient γ permet de pondérer l'action de l'érosion chimique par rapport à celle de l'érosion mécanique. Il a été introduit au vu des premiers résultats pour accentuer les effets de la dissolution. Il permet de forcer le processus d'érosion chimique par rapport à l'érosion mécanique d'où un abaissement des altitudes sans production de sédiments.

La matière mise en solution n'est pas déposée en aval puisqu'elle correspond à des éléments dissous. Il y a seulement abaissement de l'altitude sans calcul ni transport des matières. Ceci correspond à une évacuation jusqu'au niveau de base global, hors du modèle.

4.2.3.4 Loi de sédimentation

La sédimentation est un phénomène important dans la transformation des reliefs. Cependant elle n'apparaît pas clairement dans la plupart des modélisations présentées. Notre modèle suppose qu'il y a sédimentation en un point donné si celui-ci a une altitude inférieure à celle de tous ses voisins (fond de cuvette), ou si la charge du cours d'eau devient trop importante le long des versants. Cette condition traduit le fait qu'en ce point, l'eau chargée de sédiments détritiques cesse de perdre de l'énergie potentielle et donc de la vitesse. Comme il est difficile de modéliser la vitesse sans compliquer les calculs, nous supposons qu'elle dépend directement de la pente au point considéré.

Nous définissons une constante r dite *rapport de transport* qui évalue la proportion de sédiments à déposer et celle des sédiments mis en suspension. Ce seuil représente la capacité maximale de portage des sédiments détritiques en suspension par les eaux de ruissellement. Son utilité se fait surtout sentir dans les cas où le taux d'infiltration est important, entraînant des diminutions brusques de la quantité d'eau ruisselée (couches calcaires). Dans les autres cas, la quantité de sédiments est contrôlée par le volume d'eau ruisselée (équation 4.3).

Il n'y a pas de sédimentation quand :

$$\frac{S}{q} \leq \frac{r}{\cos \theta}$$

sinon il y a sédimentation d'une hauteur :

$$\Delta z_d = h_s = q \frac{r}{\cos \theta} \quad (4.8)$$

et transport en aval de la quantité $S - h$, de sédiments en suspension. θ est l'angle entre la verticale et la normale à la surface au point considéré.

Les sédiments déposés correspondent à une formation géologique spécifique (alluvions) qui se superpose aux formations initiales. Dans le cas où le point considéré est un fond de cuvette, on cherche alors à déposer autant de sédiments détritiques qu'il est nécessaire pour combler la cuvette (hauteur δh). Si cela n'est pas possible, on dépose la totalité de la hauteur de sédiments. Ceci correspond alors à : $\min(-\delta h, S)$.

4.2 – Description de notre modèle

Cas des fonds de cours d'eau Théoriquement, l'érosion agissant le long des versants se différencie de celle agissant au fond des cours d'eau. En effet, la réputation n'a de sens que le long des versants car, dans le cas de fonds de cours d'eau, la pente est très faible. D'autre part, le ruissellement d'un lit de rivière n'est pas de même nature puisqu'il ne dépend pas directement de la pente. La mise en œuvre concurrente d'un modèle de versants et d'un modèle d'évolution de cours d'eau correspond à ces différences.

La définition de deux modèles séparés demande alors de pouvoir distinguer les points appartenant à des versants de ceux appartenant à des lits de cours d'eau. La recherche de critères précisant cette différence n'est pas facile. En effet, le tracé automatique d'un réseau hydrographique à partir d'une topographie ne fournit pas toujours ce genre d'informations.

Un modèle unique évite ce problème sans présenter d'illogismes. En effet, la loi gravitaire appliquée aux fonds de rivière n'aura pratiquement pas d'effet car la pente y est presque nulle. De même, la loi d'érosion mécanique, définie pour les versants, pourra s'appliquer aux fonds des cours d'eau en modulant l'ordre de grandeur de l'eau ruisselée.

L'emploi d'un modèle unique, plus simple à mettre en œuvre, semble donc justifiable. C'est le choix que nous avons fait.

Variation d'altitude en un point Finalement, en cumulant les différents processus (équations 4.1, 4.6, 4.7, 4.8), la différence d'altitude en chaque point (et pour une étape de la simulation) est donnée par :

$$z' = -\Delta z_g - \Delta z_w - \Delta z_c + \Delta z_d$$

4.2.4 Mise en œuvre du processus itératif

Nous venons de définir les différentes lois s'appliquant à chacun des points de la surface topographique en relation avec le sous-sol. Maintenant, nous allons nous intéresser à la mise en œuvre de la simulation, qui permet, à partir d'un relief initial, de créer un relief érodé et le réseau hydrographique correspondant.

4.2.4.1 Moteurs des processus

Comme nous l'avons déjà exposé, les deux principaux acteurs des phénomènes de l'érosion sont le volume et l'intensité des précipitations et la variation du niveau de base. Le premier agit au cours d'un cycle d'érosion (phase d'évolution du relief), le second provoque souvent le début d'un nouveau cycle.

Modélisation des pluies La modélisation de pluies d'intensité variable (orages, courtes averses, pluies uniformes) est assez complexe. Nous modélisons alors un taux de précipitations uniforme sur l'ensemble du modèle. Les capacités différentes d'infiltration et d'évaporation des aires de drainage permettent de moduler l'action de ce taux.

Variation des niveaux de base Pour faire varier le niveau de base global, des points ou des zones de la surface topographique sont définis comme niveaux de base. Ils réagissent différemment face aux processus d’érosion et de sédimentation (écoulement et transport de matière hors du modèle). La variation du niveau de base permet d’accélérer ou de maintenir l’action des phénomènes simulés. Pour cela, plusieurs types de mouvements sont possibles : soulèvement, abaissement et état stationnaire (par défaut).

4.2.4.2 Echelles de temps et d'espace

Dans toutes les modélisations fondées sur la simulation de phénomènes géologiques réels, se pose le problème du dimensionnement. Il est présent dans la définition spatiale du terrain, dans le processus itératif de simulation et dans les grandeurs des paramètres définissant le modèle :

Echelle de temps La définition d'une échelle de temps consiste à associer une itération du processus à une durée de temps d'érosion. Il semble raisonnable de considérer une itération comme le temps mis pour traiter tous les points du modèle. Cette hypothèse n'a pas de sens réel au niveau d'une durée mais elle permet de rester dans la même échelle de temps d'une itération à une autre. Pour permettre la convergence du modèle, il faut prendre garde à l'interaction entre le nombre d'itérations et les données de la simulation. Dans tous les cas, un nombre assez important d'itérations est nécessaire.

Echelle spatiale Pour fixer la dimension spatiale du modèle, il faut définir la correspondance entre la taille d'une maille de la grille et une grandeur réelle. Il semble qu'une maille d'une résolution de dix mètres soit raisonnable. Cette distance correspond, en moyenne, à la largeur d'un cours d'eau. Ceci signifie qu'il ne peut pas y avoir création d'un cours d'eau entre deux points voisins de la grille ; l'écoulement de l'aire comprise entre ces deux points s'effectue obligatoirement vers l'un d'entre eux. La variation de la taille de la maille implique une modification des hypothèses d'écoulement et de transport. D'autre part, la représentation du sous-sol doit suivre le dimensionnement de la grille. La structure sous-jacente (nombre et épaisseur des couches, transformations éventuelles) fixe le dimensionnement du relief au cours des itérations.

Paramètres Les ordres de grandeur des paramètres mis en jeu sont à ajuster les uns par rapport aux autres en fonction de leur utilisation. Des mesures réelles effectuées sont disponibles dans des ouvrages spécialisés de géomorphologie. Cependant, ils sont souvent très dépendants du processus ou de la région considérée. Dans un premier temps, aucune unité ne sera fixée ; l'ordre de grandeur de chaque paramètre sera ajusté globalement aux autres, en fonction de son importance (pourcentage). En fait, ceci correspond à définir le champ d'action de chaque paramètre.

4.2 – Description de notre modèle

4.2.4.3 Arborescence du réseau

Avant de considérer un point de la grille, il faut traiter tous les points situés en amont car les quantités déterminées en ces points interviennent dans le calcul. La structure de base de la simulation correspond à l'ordre de parcours des points. C'est elle qui permet de simuler les effets d'écoulement et de transport aboutissant à une évolution du relief. Ceci suppose la création préalable d'un *graphe de jonction* entre les points à partir de la topographie existante. Il définit l'ordre de parcours et vérifie la condition précédente. Son calcul est évidemment réeffectué à la fin de chaque étape, de façon à rendre compte des modifications d'altitude.

Création du graphe de parcours En considérant la topographie de la surface, les points sont regroupés en plusieurs ensembles, par analogie aux courbes de niveaux du terrain. Chaque ensemble est différencié par un numéro. Ceci revient à dire que les points appartenant à un même ensemble possèdent un même numéro dans l'ordre de parcours. Ce graphe représente en fait les directions d'écoulement de chaque point, c'est à dire la définition sous-jacente complète du réseau hydrographique.

Nous avons vu que les ordres de Shreve [Shr66] et de Strahler [Str52] sont souvent utilisés pour la définition du niveau hiérarchique des points d'un réseau. Ils sont fondés sur les travaux d'Horton [Hor45] qui le premier, a proposé un modèle génétique dont on peut dériver des lois statistiques observables sur tous les réseaux. Ainsi, les réseaux de drainage sont considérés comme des structures quantitatives pouvant être mesurées.

La classification s'effectue toujours progressivement des sources vers l'extrémité du réseau. Celle de Strahler privilégie les rivières de même ordre comme élément de base, celle de Shreve repose sur les jonctions des affluents. Leurs théories s'appliquent surtout à des arborescences parfaites où seule la jonction de deux affluents est considérée. Dans notre cas, un point peut recevoir les écoulements de plus de deux voisins, aussi la numérotation doit prendre en compte le nombre d'affluents sans pour autant provoquer de brusques augmentations de numéro, d'un niveau à un autre.

Si l'on considère l'ordre de Shreve, le nœud de jonction de deux affluents de numéros n et m prend le numéro $n+m$. On remarque que dans le cas où le point possède de nombreux affluents, l'ordre du nœud de jonction – somme de tous les numéros – devient alors très grand. Cette formule implique alors une augmentation de plus en plus forte des numéros le long de l'arborescence.

La représentation de Strahler semble donc mieux correspondre. Elle définit que le point de jonction de deux affluents de numéros n et m est de numéro $n+1$ si $n = m$ et $\max(n, m)$ sinon. Dans ce cas, elle assure une progression plus réaliste de l'ordre. Cependant, elle ne restitue pas le fait que le nœud de jonction (quand $n = m$) est de niveau supérieur, puisqu'il possède alors le même numéro que l'un des deux affluents. Dans notre application, une telle numérotation ne permettrait pas de faire la différence entre ces deux cours d'eau et donc de connaître le sens d'écoulement.

En conséquence, il faut que le numéro d'ordre attribué à chaque tronçon corresponde à son importance dans le réseau et définisse, sans ambiguïté, les sens d'écoulement et de

transport. Notre choix est le suivant :

- chaque feuille de l’arborescence (le point n’a pas d’affluents) a pour numéro 1.
- chaque nœud en aval d’un seul nœud de numéro n (pas de jonction) prend le numéro $n + 1$.
- chaque nœud de jonction 2 à p affluents de numéros n_1, n_2, \dots, n_p a pour numéro : $\max(n_1, n_2, \dots, n_p) + 1$ (lorsque les p affluents ont un même numéro n , cela revient à prendre $n + 1$).

On remarque qu’une telle numérotation ne représente pas un niveau de profondeur dans l’arborescence mais la hiérarchie de chaque cours d’eau dans le réseau hydrographique tout entier (figure 4.10).

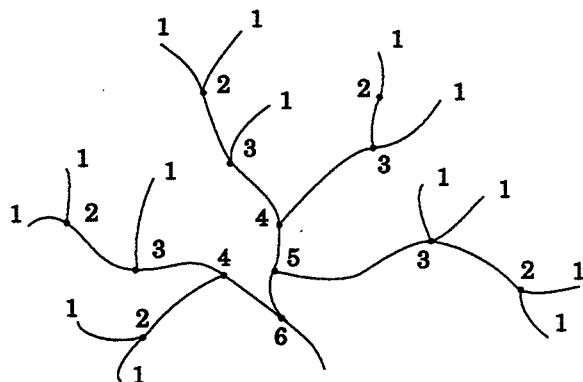


FIG. 4.10 : Numérotation d’une arborescence

La création de l’arborescence à partir des points de la grille peut se résumer par la numérotation des nœuds dans un certain ordre. On note T le tableau représentant la grille. Chaque élément (i, j) de la grille possède un numéro d’ordre, que nous appelons plus simplement niveau. Il faut préciser que puisque l’on fixe un ordre de parcours de la grille (supposons, en I puis en J), un point (i, j) peut être traité avant d’avoir considéré un de ses points amont – le point $(i, j+1)$ par exemple –. Ainsi, lors du traitement du point $(i, j+1)$, il faudra remettre à jour les numéros du point (i, j) et de ses points aval.

4.2 – Description de notre modèle

Création du graphe de parcours

```
initialisation de tous les niveaux de T(i, j) à 1
pour chaque (i, j) faire
    chercher son voisin (k, l) le plus bas
    s'il existe
        le point en aval de (i, j) = (k, l)
        si le niveau de (k, l) est ≤ au niveau de (i, j) alors
            niveau de (k, l) = niveau de (i, j) +1
            niveau courant est celui de (k, l)
            tant qu'il existe un point en aval de (k, l)
            et de niveau ≤ au niveau courant faire
                remplacer son niveau par celui du niveau courant +1
                niveau courant = niveau courant +1
            fin
        fin si
    sinon
        (i, j) n'a pas de point aval (cuvette)
    fin si
fin pour
```

La détermination du point voisin situé en aval est différente selon le type de grille. Elle consiste à comparer les altitudes du point (i, j) avec celles des points voisins, selon les directions définies au paragraphe (4.2.1.1). Les points considérés comme niveaux de base ne sont pas traités puisqu'aucun écoulement n'est effectué à partir d'eux (par contre, ils apparaissent comme points avals et ont, en général, un niveau d'ordre maximum).

Si aucun voisin d'altitude inférieure n'est trouvé, le point représente une cuvette et son numéro dépend des numéros des voisins en amont qui s'écoulent vers lui. Si les voisins ont tous une altitude identique, il faut alors choisir l'un d'entre eux comme point aval pour éviter des cours d'eau non constants et refléter la réalité (les zones vraiment planes n'existent pas). Dans un premier temps, nous avons choisi comme direction la direction globale d'inclinaison de la surface. Le recours à l'aléatoire pour choisir une direction ne nous a pas semblé adapté car il est susceptible d'engendrer des chemins d'écoulement incohérents.

Par ailleurs, dans le cas de zones planes ou presque, il faut s'assurer que les chemins d'écoulement ainsi définis n'aboutissent pas à la création de cycles, ce qui n'aurait aucune signification. Cette condition oblige à effectuer certains tests lors de la recherche du point aval.

A chaque nouvelle itération, les numéros d'ordre de chaque point sont remis à 1, les liens point amont-point aval sont supprimés et le graphe est recalculé. On peut noter que tous les points dont le niveau est 1 correspondent aux maxima locaux ; ils définissent les points des lignes de partage entre les bassins versants.

Remarque

Lorsque tous les voisins d'un point de cuvette n'ont pas pour "voisin le plus bas" ce point alors aucun écoulement ne se fait dans cette cuvette; elle est considérée comme *non réceptrice* et sera traitée différemment.

Parcours des points Une fois qu'un numéro d'ordre a été attribué à chaque point, le processus de simulation peut réellement commencer, en appliquant les lois définies ci-avant à chaque point. Cela correspond à un parcours de l'arborescence, niveau par niveau, en partant des feuilles jusqu'à la racine. Pour effectuer ce parcours, nous utilisons un tableau unidimensionnel, indicé par les différents numéros d'ordre et dont chaque élément contient la liste des points correspondant à un niveau. Cette structure permet un traitement facile et éventuellement sélectif (ne traiter que les points à partir d'un certain niveau). L'information de "point aval" d'un point est stockée au niveau de la structure propre à chacun des noeuds de la grille.

A la fin d'une étape, les altitudes des points peuvent avoir été modifiées, aussi y-a-t-il de nouveau détermination des points avals et des niveaux associés à chaque point. Le nouveau graphe de parcours est calculé de la même façon que lors de sa création.

4.2.5 Mises à jour

L'étape de mise à jour permet de rendre compte de l'évolution du relief. Elle revient à effectuer le transport des matières vers l'aval puis la sédimentation éventuelle. Des modifications apparaissent au niveau de l'altimétrie de la surface et, par conséquence, au niveau du graphe de parcours et des caractéristiques géologiques des points.

4.2.5.1 Modifications d'altitude

Elles sont dues aux phénomènes de transport de matière, représentés comme des hauteurs à soustraire ou à ajouter aux altitudes. Les processus que nous avons simulés interviennent simultanément dans la nature, mais ici il faut fixer un ordre arbitraire.

Chaque point du parcours subit les différents processus selon cette séquence : érosion gravitaire, dissolution chimique, érosion par les eaux de ruissellement et sédimentation. Autrement dit, lorsqu'un point est soumis à la fois à un phénomène d'érosion et de dépôt, il y a d'abord érosion de la couche supérieure puis ajout d'une hauteur de débris. L'utilisation de tel ou tel ordre des processus donne la même différence d'altitude mais pas toujours la même hauteur de sédiments déposés. Cet ordre séquentiel est, à notre avis, le plus cohérent.

En résumé, l'altitude d'un point peut s'abaisser par dissolution de la roche, par perte de matériaux détritiques dus au ruissellement et au phénomène de glissement du terrain. Elle peut, au contraire, s'élever par sédimentation ou par ajout de la matière issue de la refection des points amont.

Dans le cas de sédimentation, il faut bien entendu conserver la hauteur des alluvions apportées, afin de considérer cette nouvelle couche à l'étape suivante. Dans le cas d'un

4.2 – Description de notre modèle

apport de matière par la reptation des points situés en amont, cette hauteur n'est pas conservée car on suppose un dépôt de même nature de roche que celle existante.

Les points de la surface subissent les effets des différents processus à des degrés divers. Ainsi, les points des fonds des cuvettes sont caractérisés par l'absence d'écoulement vers un point aval. Ils subissent donc essentiellement une sédimentation. Pour les points situés sur les bords du modèle, deux solutions sont possibles. Soit il y a écoulement et transport vers un point voisin en aval, soit il y a évacuation des quantités hors du modèle. La première possibilité revient à considérer que le relief modélisé est fini, la deuxième, que le relief simulé n'est qu'une partie d'un plus grand ensemble. Les deux choix sont réalisables. Quant aux points de niveaux de base, ils subissent l'ensemble des lois décrites mais n'induisent pas d'écoulement et de transport de matière vers des points en aval.

La mise à jour s'effectue au fur et à mesure du parcours de l'arborescence puisqu'on ne traite qu'une seule fois chaque point au cours d'une itération.

4.2.5.2 Evolution des paramètres géologiques

Chacune des étapes de la simulation entraîne une modification des altitudes. Cette mise à jour altimétrique implique alors d'éventuels changements au niveau de la définition du sous-sol. Deux phénomènes sont susceptibles de provoquer ces variations : un changement de l'altitude du point ou une sédimentation.

Dans le premier cas, le point n'appartient plus à une certaine roche mais à la couche inférieure. Les caractéristiques géologiques du point sont alors celles de la nouvelle couche. En conséquence, à l'étape suivante, les lois appliquées au point n'ont pas la même action. Cette variation possible des paramètres correspond à un processus naturel et accentue le modelage du relief.

Lorsqu'il y a sédimentation en un point, nous avons vu qu'il y avait création d'une nouvelle couche, superposée au modèle volumique du sous-sol. Elle possède des propriétés qui lui sont propres. Dans ce cas aussi, l'évolution ultérieure du point est différente. Une érosion future agit d'abord sur la couche de sédiments avant, éventuellement, d'agir sur la couche supérieure du sous-sol.

4.2.5.3 Paramètres de la simulation

Au niveau de la simulation des phénomènes, plusieurs paramètres entrent en jeu pour moduler l'action des lois. Ils s'ajoutent aux coefficients caractéristiques des roches et interviennent plutôt au niveau du processus itératif. Ce sont :

- *le nombre d'itérations.* Il définit le nombre d'étapes du processus itératif en terme de parcours de la grille. Une itération correspond donc au traitement de tous les points de la grille par parcours du graphe. Elle n'a donc pas de signification en terme de durée réelle d'un phénomène géologique car aucune donnée n'est envisageable pour faire la correspondance.

- *le volume des précipitations.* C'est la quantité d'eau de pluie qui est attribuée à chaque point du modèle. Cette valeur est fixe pour l'ensemble du processus et identique pour tous les points, mais pourrait être modifiée aisément. Elle agit concurremment avec le nombre d'itérations. La variation du taux des précipitations peut se faire entre deux processus de simulation où, plus simplement, par les différentes caractéristiques du sous-sol (taux d'infiltration et d'évaporation). Les valeurs de nos tests sont comprises entre 0 (aucune influence) et 5.
- *le rapport érosion chimique/érosion mécanique.* Il intervient au niveau de la loi d'érosion chimique et permet d'accentuer l'effet de cette loi par rapport au phénomène de dénudation et inversement. Ce rapport doit être évalué en fonction de la quantité d'eau précipitée car celle-ci détermine l'action érosive du ruissellement. Ainsi l'ordre de grandeur du rapport doit être le même que celui du volume des précipitations. Par ailleurs, nous avons aussi défini un paramètre influant sur l'action de l'*érosion gravitaire*. Nous proposons donc deux paramètres définissant l'influence de chaque érosion et dont les valeurs peuvent osciller entre 0 (aucune influence) et 5.
- *le seuil de sédimentation.* Il fixe la quantité de sédiments à laisser en suspension et celle à déposer. Sa valeur correspond à un pourcentage et varie entre 0 et 1. Ceci permet d'effectuer des simulations pouvant autoriser une forte sédimentation, créant ainsi des reliefs adoucis, ou, au contraire, aucune sédimentation, provoquant une érosion importante. Ce seuil peut varier d'une simulation à une autre et permet de jouer facilement sur l'évolution du relief.
- *la variation du niveau de base.* Elle permet de modifier l'action des processus d'érosion en provoquant un changement important de l'altitude des points de niveaux de base. Un abaissement de ces points crée de fortes pentes à leur voisinage et donc une accentuation des phénomènes d'érosion (gravitaire et mécanique). D'itération en itération et de voisinage en voisinage, le processus va se propager vers l'amont, modifiant les altitudes. Une élévation des points de base présente moins d'intérêt car elle inverse alors le sens de l'écoulement au voisinage de ces points là qui ne sont plus considérés alors comme des minima locaux. De la même façon que pour un abaissement, le phénomène va se propager vers l'amont mais, cette fois-ci, en niveling les altitudes.

Cette variation des points de base peut s'effectuer à une itération quelconque du processus et d'une valeur positive ou négative sur l'ensemble des points. Il semble préférable de provoquer ce phénomène lorsque le relief est déjà un peu constitué et de continuer la simulation pendant quelques étapes pour permettre au relief de se stabiliser (propagation des modifications).

Le nouveau relief, obtenu à la fin du processus itératif, possède la même structure sous forme de surface altimétrique. L'information du sous-sol, sous-jacent à cette surface et qui a été utilisé pour la simulation, peut être stockée ou pas. En général, l'altimétrie et le sous-sol sont conservés mutuellement pour réaliser, sur ces données, une nouvelle simulation.

4.3 – Conclusion

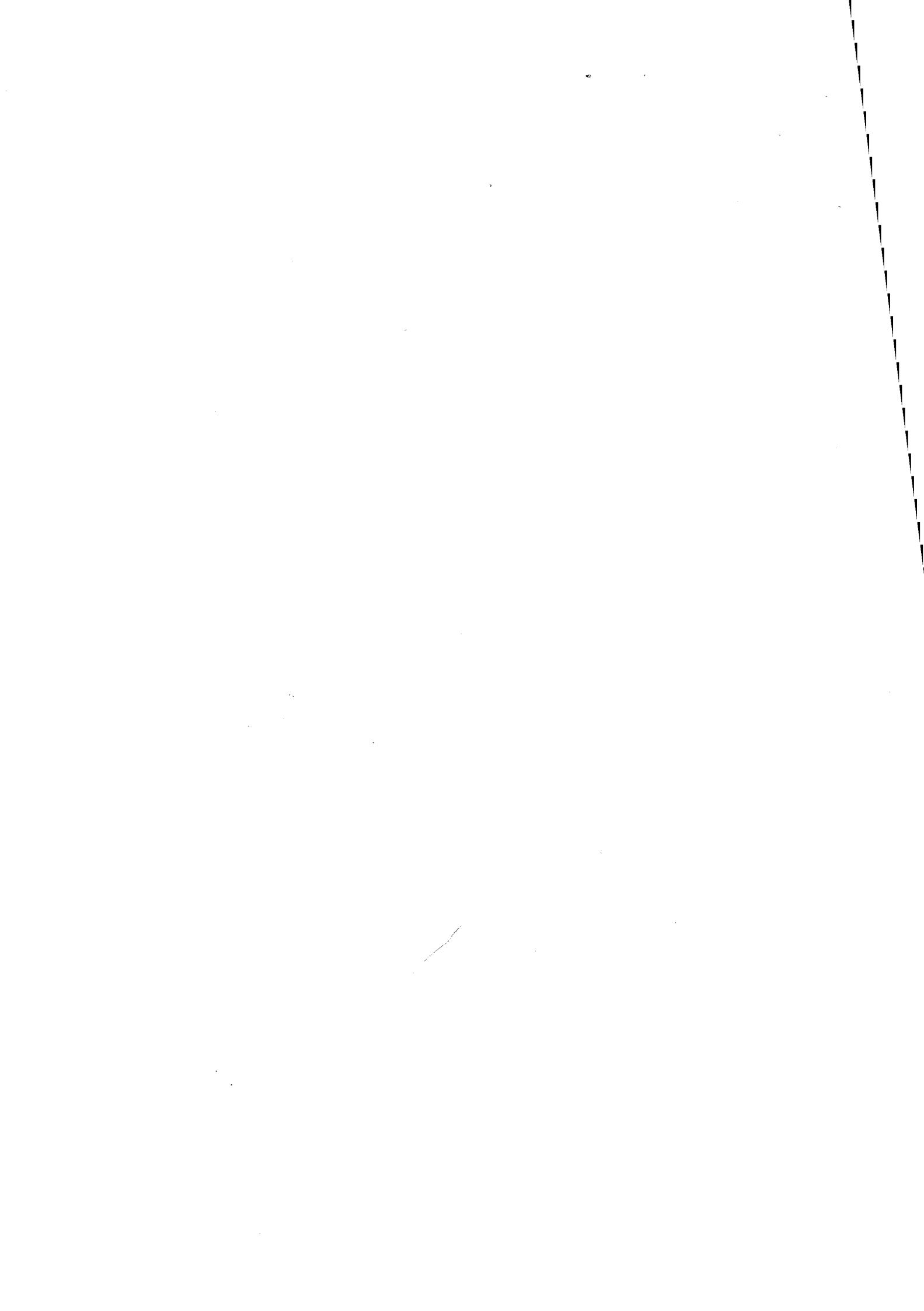
Le relief est stocké sous forme de fichier où chaque enregistrement correspond à un point de la grille. Chacun possède les informations d'altitude, du type de roche à laquelle il appartient, du numéro d'ordre dans le réseau et des quantités d'eau ruisselée et de matériaux détritiques. Tous ces éléments permettent de relancer une nouvelle simulation sans perdre les informations d'écoulement et de transport. Par ailleurs, les données communes au relief sont conservées. Il s'agit de la dimension de la grille, de son type, de la taille de la maille, du numéro maximum d'ordre dans le réseau et du nom de la géologie associée.

4.3 Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre les principes de notre modèle de simulation, détaillé les lois mises en œuvre et présenté la méthode de parcours itératif. On peut remarquer que ce modèle a nécessité une étude fine de l'action des phénomènes géomorphologiques agissant dans la nature. L'étude des modèles de simulation déjà réalisés dans les domaines de la synthèse de paysage et de la géomorphologie a permis de cerner les problèmes à considérer.

Selon notre objectif, nous avons cherché à effectuer une simulation dynamique simple mais efficace fondée sur les processus d'écoulement et de transport de matière. Le principe de cette simulation repose sur la modélisation du sous-sol de la surface topographique. Les caractéristiques géologiques, propres à chaque point et variables au cours des étapes, sont les paramètres indispensables à l'action des lois. C'est la structure du réseau hydrographique, représentant le graphe de parcours des points de la surface, qui modélise les effets de la simulation. On peut noter les facilités fournies pour paramétrier la simulation des phénomènes selon la forme du relief désirée ainsi que la simplicité de la représentation du relief et du réseau.

Il apparaît que l'utilisation de lois simples mais appropriées doit permettre de créer une large variété de paysages. D'autre part, la non linéarité des processus simulés doit permettre d'atteindre la complexité des reliefs réels. Ceci est accentué par la formation du réseau hydrographique. Le couplage des différents phénomènes avec une lithologie modulable doit éviter l'apparence d'une dimension fractale fixe (comme dans un modèle statique). Au contraire, plusieurs structures de dimensions fractales variées, doivent apparaître, réhaussant ainsi le réalisme des paysages.



Les reliefs et les réseaux

5

Nous allons maintenant présenter les résultats obtenus au niveau de la modélisation dont nous venons d'exposer les principes. Elle s'appuie sur une méthode itérative de simulation de phénomènes d'érosion et de sédimentation par des lois déterministes agissant sur une surface topographique. A celle-ci est associée la représentation du sous-sol, permettant ainsi une meilleure simulation des processus réels.

La simulation d'un paysage, telle que nous l'avons envisagée, doit permettre de créer des reliefs réalistes, à la fois au niveau de l'altimétrie et du réseau hydrographique associé. Nous allons d'abord présenter la forme des reliefs obtenus sans visualiser le réseau hydrographique correspondant. Des exemples de réseaux seront donnés par la suite. Cependant, il ne faut pas oublier que la génèse de chaque relief est due à la simulation des phénomènes d'écoulement et de transport. Aussi, pour tous les modélisés présentés, le réseau hydrographique correspondant pourrait être visualisé.

De nombreux essais de simulation ont été effectués. Nous allons décrire quelques uns des plus significatifs. Ceux-ci permettent de mieux comprendre l'action des différents processus et de montrer les particularités de la modélisation. Par ailleurs, ils vérifient les hypothèses faites au niveau des lois de la simulation.

5.1 Spécificités du modèle

Les reliefs montrés en exemple sont simples mais significatifs des spécificités de notre modèle. Pour une meilleure compréhension, ils sont représentés par des surfaces topographiques réduites. Les grilles altimétriques choisies sont en général de taille 50×50 avec une maille hexagonale de 10. L'affichage est réalisé en fil de fer (par triangulation de la surface) pour la visualisation de l'altimétrie du relief. Pour la visualisation des coupes, nous avons associé des couleurs (ou des motifs) aux différentes roches. Ces motifs sont

répertoriés dans la figure (5.1). Pour mieux comprendre les reliefs obtenus en fonction de ces roches sous-jacentes, leurs caractéristiques géologiques sont brièvement rappelées.

-  couche de type quartzite : roche très dure et peu perméable
-  couche de type grès tendre : roche de dureté moyenne et assez perméable
-  couche de type calcaire fissuré : roche dure, moyennement perméable et sensible à la dissolution chimique
-  couche de type argile : roche de dureté moyenne et assez perméable

FIG. 5.1 : *Les différentes roches et leur motif associé*

La visualisation en perspective des terrains est effectuée sous forme de maquette, ce qui permet de voir l'inclinaison du relief et la composition du sous-sol. L'altitude du socle est fonction de l'altitude minimale de la surface qui correspond, en général, à un point du niveau de base.

5.1.1 Traits de relief

Les modélisés obtenus se rapprochent de ceux effectivement observés dans la nature, en particulier dans des zones qui sont géologiquement différenciées. On remarque l'apparition de traits de reliefs tels que sommets, pentes, plateaux, escarpements, ruptures de pentes. Ils traduisent la nature géologique des terrains sous-jacents et les accidents (failles, plis) qui les affectent éventuellement.

5.1.1.1 Influence du sous-sol

Les terrains présentés ci-après montrent l'influence primordiale des paramètres géologiques dans la simulation. L'action seule des différentes lois sur une surface (même plane) géologiquement différenciée suffit à faire surgir un relief.

La série de figures qui suit le prouve. Dans cette simulation, la surface topographique initiale est légèrement perturbée et inclinée vers un point de niveau de base (figure 5.2). La géologie associée est visualisée au niveau des coupes. Les coefficients caractéristiques des roches sont ceux définis dans le tableau (4.2) du paragraphe (4.2.2.2). Ils resteront fixes pour l'ensemble des tests suivants. Les paramètres de la simulation sont fournis dans le tableau (5.1).

On remarque que dès la première série d'itérations (figure 5.3a), un certain nombre de traits de relief sont discernables. En particulier, les zones peu sensibles à l'érosion ont tendance à ressortir par rapport aux régions plus tendres ou plus perméables. On peut noter aussi que la perturbation initiale reste apparente dans les zones escarpées alors qu'elle disparaît dans les zones planes plus réceptives à l'érosion. Sur cet exemple, aucune sédimentation n'a été demandée.

5.1 – Spécificités du modèle

NOMBRE D'ITÉRATIONS	:	50,100
VOLUME DES PRÉCIPITATIONS	:	0.5
IMPORTANCE ÉROSION GRAVITAIRE	:	1.
RAPPORT CHIMIQUE/MÉCANIQUE	:	2.
SEUIL DE SÉDIMENTATION	:	1.
VARIATION DU NIVEAU DE BASE	:	non

TAB. 5.1 : Paramètres de la simulation

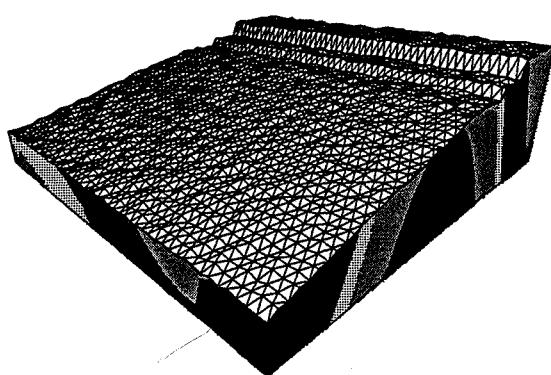


FIG. 5.2 : Relief initial : altimétrie de la surface et géologie associée

Par ailleurs, on distingue effectivement un phénomène d'écoulement vers le niveau de base. Les structures de failles et de plis du sous-sol associées aux reliefs apparaissent nettement (figure 5.3). La vue en coupe du terrain montre bien la relation entre les différentes couches et le relief qui en résulte.

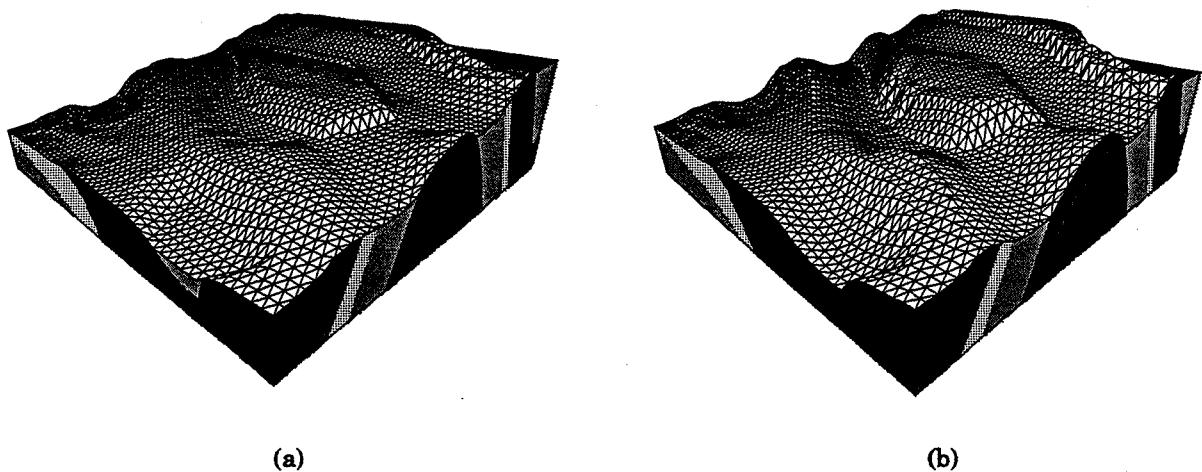


FIG. 5.3 : Relief obtenu (a) après 50 itérations, (b) après 100

La série de figures (5.4) suivante décrit une simulation sur une surface topographique identique mais dont la modélisation du sous-sol varie. Les paramètres de la simulation étant les mêmes (tableau 5.1), on prouve ainsi que, comme on pouvait s'y attendre, la différence de relief est obtenue grâce à la diversité du sous-sol. Cet exemple présente aussi des aspects tout à fait réalistes de terrains observables dans la nature.

Dans ces exemples de simulation, nous avons fait varier uniquement les géologies des terrains en supposant que les caractéristiques de chaque couche étaient fixes. En fait, on peut aussi faire varier les différents coefficients K_c , K_f , K_d , K_v de chacune des roches pour obtenir une autre simulation. Dans les exemples présentés, nous avons toujours considéré les mêmes coefficients afin de cerner plus facilement l'influence des paramètres de la simulation.

5.1.1.2 Paramétrage des lois et des données

Nous venons de voir l'influence de la lithologie sur l'évolution des terrains. Maintenant, nous allons distinguer les différents effets que produisent la variation des paramètres de la simulation. Plusieurs simulations sont appliquées sur le relief exposé dans les figures (5.5a et 5.5b). Les valeurs courantes des paramètres sont celles fournies par le tableau (5.1). La variation de chaque paramètre est illustrée par un exemple.

5.1 – Spécificités du modèle

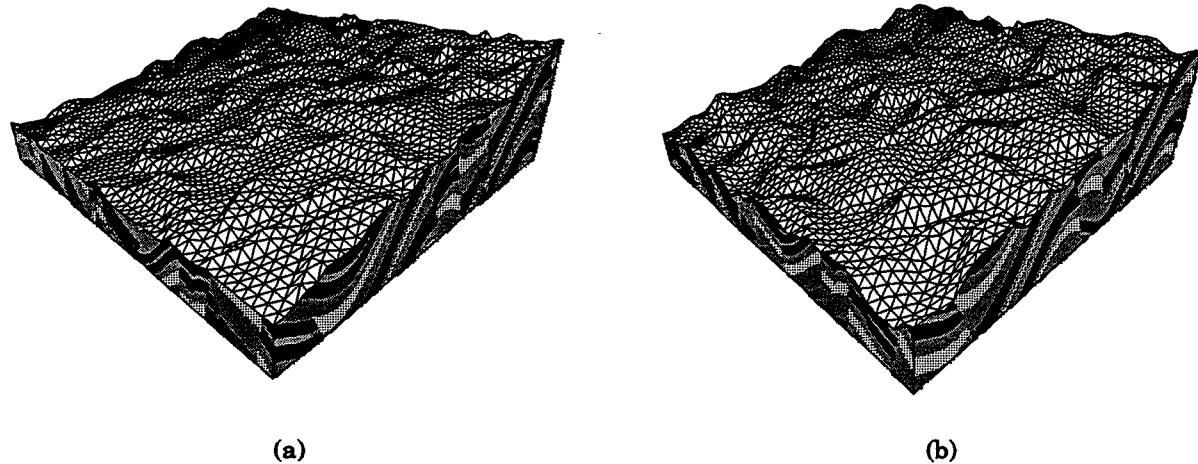


FIG. 5.4 : Relief obtenu avec : (a) 50 itérations, (b) 100 itérations

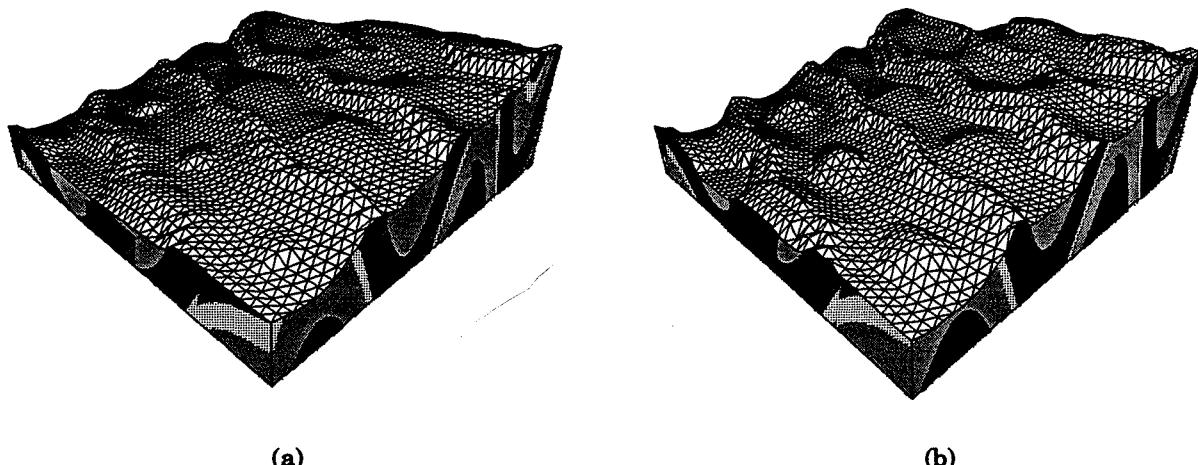


FIG. 5.5 : Relief simulé avec : (a) 50 itérations, (b) 100 itérations

Nombre d'itérations La figure (5.5b) montre un modèle obtenu avec 100 itérations. Si on le compare avec celui obtenu avec 50 étapes (figure 5.5b), il apparaît logiquement que le relief est plus accentué. La variation du nombre d'itérations est l'outil le plus simple et le plus efficace pour simuler une transformation du terrain de style “évolution dans le temps”.

Volume des précipitations Même si l'augmentation du nombre d'itérations semble la plus efficace pour une évolution normale, la variation du volume des précipitations peut permettre une simulation plus rapide. C'est le cas du relief illustré par la figure (5.6a) où la quantité d'eau précipitée est de 1 (au lieu de 0.5 pour la figure 5.5b). On remarque que l'on obtient aussi un effet d'accentuation du relief mais légèrement différent que du cas précédent. En effet, l'augmentation du nombre d'étapes ne fait pas varier l'action des lois à une étape mais seulement l'importance cumulée des processus. Par contre, l'augmentation de l'eau précipitée modifie les valeurs des quantités d'eau ruisselée et infiltrée et donc l'action de certaines lois (érosion par ruissellement et érosion chimique) ; les couches dures apparaissent mieux dégagées. C'est pourquoi la figure (5.6b) ne donne pas le même relief que la figure (5.6a).

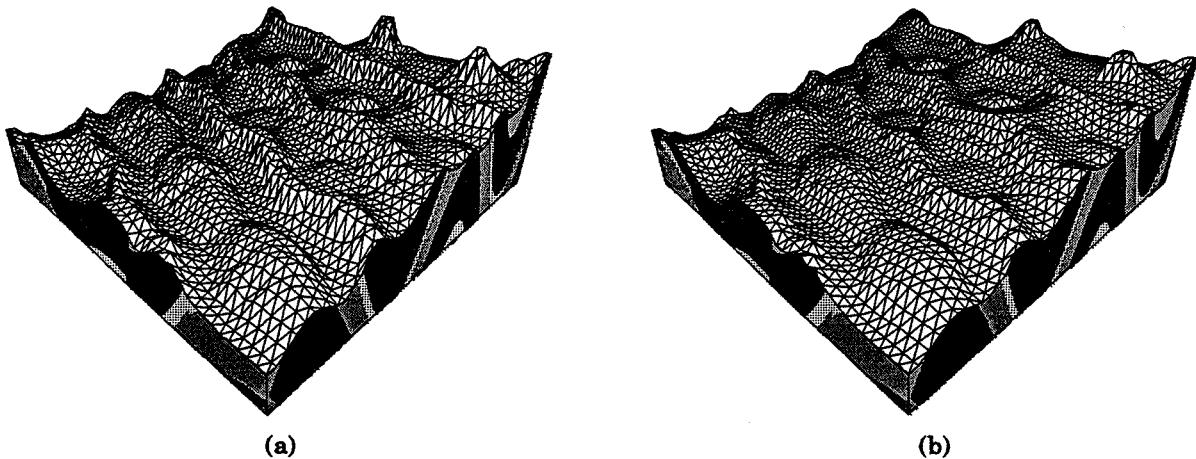


FIG. 5.6 : Relief simulé: (a) avec 100 itérations et un volume d'eau de 1, (b) avec 200 itérations et un volume de 0.5

Rapport érosion chimique/érosion mécanique, importance érosion gravitaire Au vu des figures (5.7a et 5.7b), on peut noter l'influence de ces paramètres sur l'action des différentes érosions. En fait, il est possible de faire varier les processus d'érosion chimique (vis à vis de l'érosion mécanique) et de l'érosion gravitaire. En particulier, on peut accentuer un effet d'érosion par dissolution chimique dans les zones perméables où les pentes sont faibles (donc peu sensibles à l'érosion gravitaire et mécanique) ou supprimer l'action de l'érosion gravitaire qui a tendance à niveler les altitudes.

5.1 – Spécificités du modèle

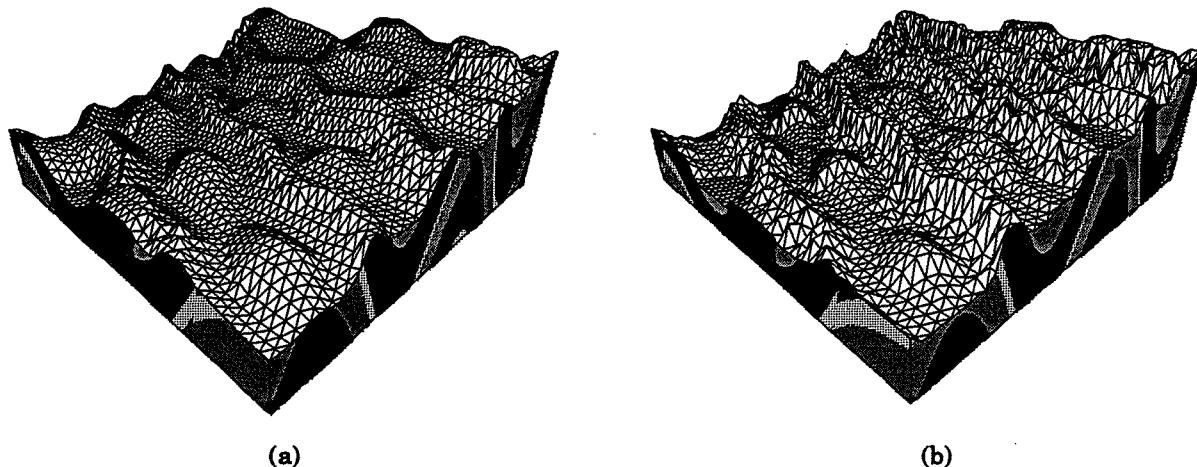


FIG. 5.7 : Simulation effectuée avec : (a) un rapport érosion chimique de 3, (b) un rapport érosion gravitaire de 0

Seuil de sédimentation Le relief présenté en référence (5.5b), n'avait subi aucune sédimentation (modélisé plutôt escarpé et persistance de petites perturbations initiales). Par contre, le terrain de la figure (5.8a), calculé avec un taux de sédimentation de 0.8, apparaît plus vallonné. Ceci est surtout visible dans les zones planes, proches du niveau de base (la sédimentation est plus forte dans les zones de plus faible pente et dans celles les plus en aval du bassin versant). Si on fixe un taux faible (0.6), on remarque que le relief devient rapidement très doux (figure 5.8b). Il peut même, dans certaines simulations extrêmes, devenir complètement plat.

Niveau de base La variation du niveau de base est plus difficile à évaluer car elle nécessite de considérer les conséquences de la modification après un certain nombre d'étapes. En effet, au départ, seuls les points de base voient leur altitude changer, ce qui se traduit par un effet de "pics" au niveau de la surface. Il faut simuler alors quelques itérations supplémentaires pour que le processus se propage vers l'amont par l'action des phénomènes d'érosion et de sédimentation.

Les différents exemples prouvent que chaque paramètre a une importance différente au niveau de la simulation qui peut être modulée. La variation des données permet de vérifier l'action de telle ou telle loi et ainsi d'influer sur le relief résultant.

Il est clair qu'une variation d'un paramètre peut agir sur les autres et que la modification importante d'une valeur risque de donner des paysages irréalistes. C'est le cas, par exemple, du volume de précipitations qui doit être modulé au risque d'éroder trop le relief initial. En fait, la fourchette de valeurs de chaque paramètre a été définie en fonction des équations simulant les processus puis adaptée au vu des premiers résultats.

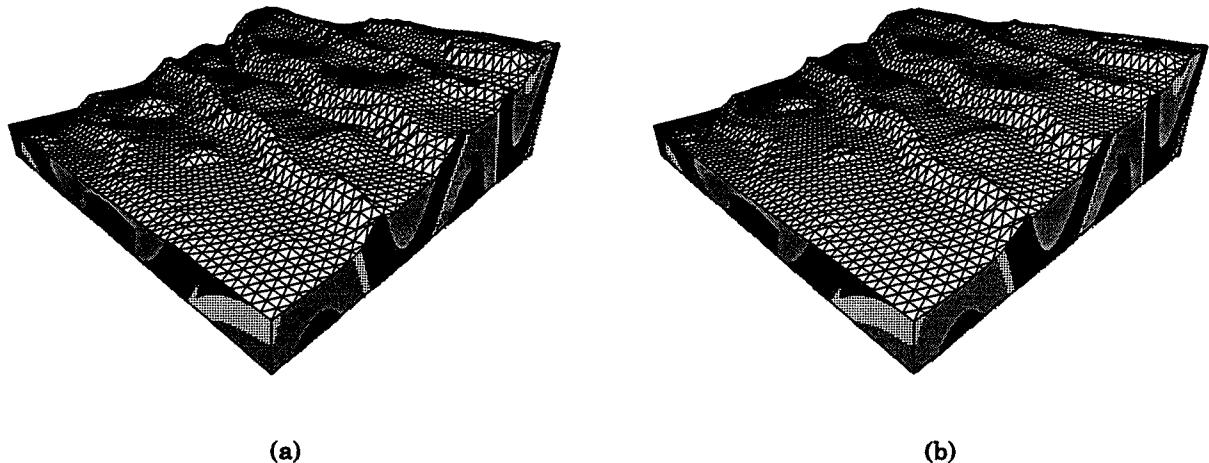


FIG. 5.8 : Simulation effectuée avec : (a) un seuil de sédimentation de 0.8, (b) un seuil de 0.6

5.1.2 Réseau hydrographique

Nous venons de voir quelques exemples des reliefs obtenus à l'aide de notre modélisation. L'évolution de ces modèles est due à celle du réseau hydrographique sous-jacent, par simulation des phénomènes d'écoulement et de transport. Nous allons maintenant nous intéresser aux différents réseaux créés, à leur évolution et aux problèmes qui leur sont liés.

Le réseau hydrographique est constitué par l'ensemble des lignes d'écoulement reliant les points de la surface. Il est donc représentable comme des traits de jonction entre les différents nœuds de la grille. Seuls les points appartenant à des cuvettes non réceptrices ne font pas partie du réseau. En fait, ces petites cuvettes sont en général comblées dès les premières étapes.

Pour l'affichage du réseau, un certain seuil doit être fixé. En effet, chaque point de la grille appartient au réseau ; une visualisation complète ne serait donc pas très claire. Nous utilisons alors un seuil qui définit un pourcentage d'affichage des cours d'eau selon les numéros d'ordre de chaque tronçon dans l'arborescence. En fonction du numéro d'ordre maximal du réseau n_{max} et de celui du tronçon courant n , si $\frac{n}{n_{max}} \geq \text{pourcentage}$, alors le tronçon est visualisé. Ce seuil permet de ne pas afficher les cours d'eau de faible importance et de ne garder que les affluents principaux du réseau ; il varie entre 0 et 1. Ce seuil pourrait être déterminé en fonction des quantités d'eau ruisselée mais, pour un résultat analogue, la distinction entre les affluents selon les numéros d'ordre est plus simple.

5.1 – Spécificités du modèle

5.1.2.1 Evolution du réseau

On peut noter que, sur l'ensemble des tests effectués (qui ne sont pas tous exposés ici), la forme des réseaux obtenus semble tout à fait réaliste. L'agencement des cours d'eau correspond, comme on pouvait s'y attendre, à la structure géologique du terrain.

De la même façon que pour le relief, le réseau hydrographique doit sa création et son évolution à la géologie de la surface. Les lignes d'écoulement déduites des lois de la simulation forment les cours d'eau du réseau. Selon la lithologie de la surface, elles vont varier, impliquant des structures de réseau différentes et donc un modèle différent. La figure (5.9) montre deux exemples de réseaux obtenus par une simulation sur deux surfaces initiales de même altimétrie mais de géologie différente. Les réseaux sont affichés avec un pourcentage identique de 0.8.

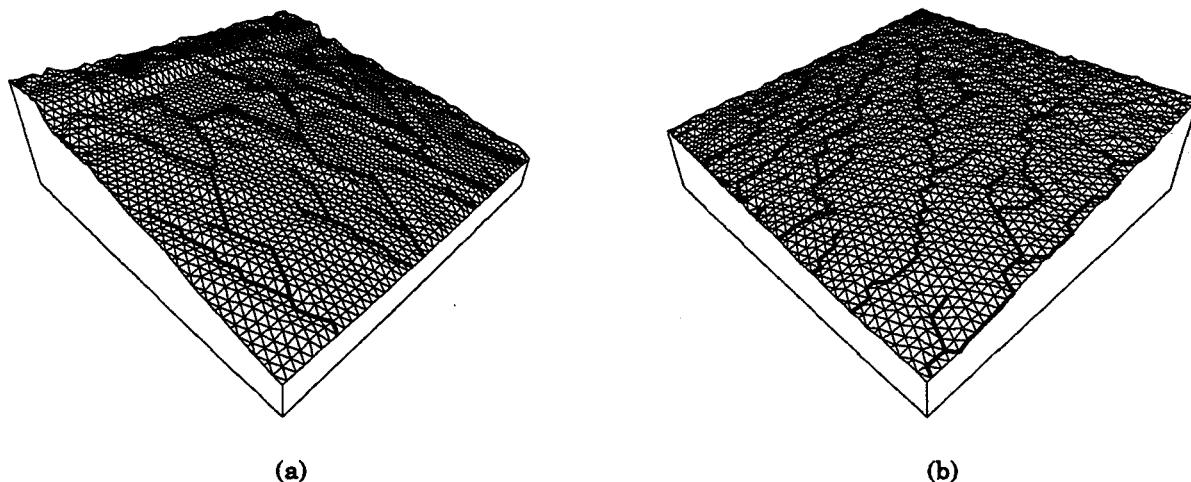


FIG. 5.9 : Réseaux d'un terrain simulé avec deux géologies différentes

L'évolution du réseau dépend aussi de la quantité de précipitations qui influe sur le développement de cours d'eau plus importants. Ce phénomène est mis en valeur par la figure (5.10) où on a simulé un volume de précipitations différent sur un relief initial identique et des paramètres de simulation égaux. On remarque, que pour un même pourcentage d'affichage de 0.8, le réseau de la deuxième figure est plus complexe.

Sur ces quelques exemples, on peut noter que les variations des paramètres influent sur la forme des réseaux et donc, comme nous l'avons vu, sur l'altimétrie du relief. Les réseaux présentés ici apparaissent consistants avec une forme arborescente. En fait, ils présentent parfois des affluents non raccordés en raison de la présence de cuvettes. Nous verrons ce problème par la suite.

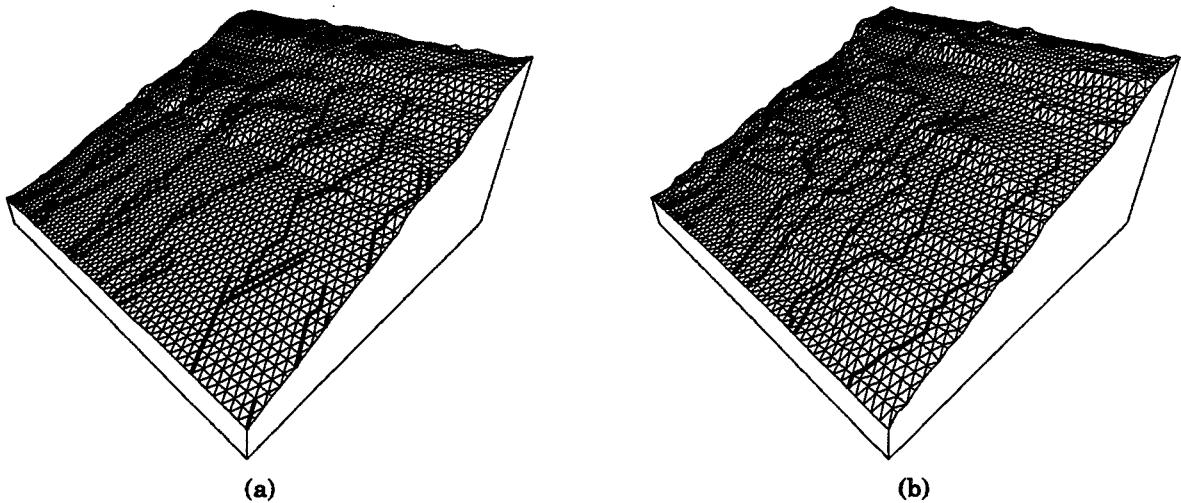


FIG. 5.10 : Réseaux d'un terrain simulé avec : (a) un volume de précipitations de 0.4, (b) et de 0.8

5.1.2.2 Lignes de crête

Associées à la formation d'un réseau hydrographique, les lignes de crête sont aussi des indicateurs de l'évolution du relief. Nous verrons que pour une visualisation réaliste de paysages, il est nécessaire de les prendre en compte.

Ici, au niveau de la modélisation, elles permettent de vérifier la structure des réseaux au niveau des aires de drainage de chaque affluent. En effet, puisque les lignes de crête partagent les bassins versants, elles ne peuvent couper un cours d'eau. D'autre part, leur représentation corrobore l'information fournie par le réseau au niveau du modèle du relief. En effet, la densité des lignes de partage des eaux est plus importante dans les zones escarpées que dans les régions de plaine. Les lignes de crête sont déterminées en considérant les points de la surface dont le numéro d'ordre est de 1, indiquant les points les plus en amont. La figure (5.11) montre la dualité entre le réseau et les lignes de crête.

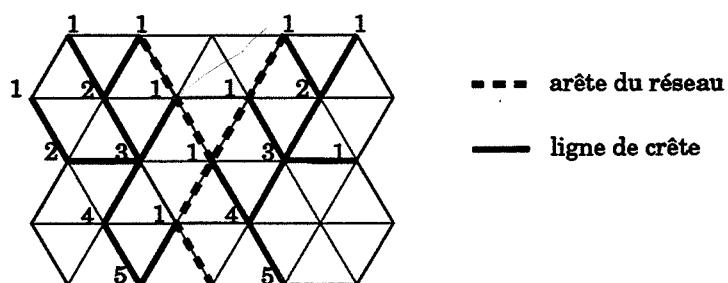


FIG. 5.11 : Représentation de cours d'eau et des lignes de crête associées

5.2 Points de discussion

Les reliefs et les réseaux hydrographiques que nous venons de présenter paraissent réalistes et correspondent à des résultats intuitifs. Les paysages créés (avec des paramètres corrects) présentent la plupart du temps un modèle naturel sans structure aberrante au niveau des différents traits de relief.

Par contre, le réseau hydrographique présente parfois des incohérences. Il s'agit en particulier de cours d'eau trop rectilignes et d'interruptions de l'écoulement en raison de l'existence de cuvettes. Dans le premier cas, le réseau montre un aspect peu réaliste (deux tronçons voisins peuvent être rectilignes) ; dans le deuxième cas, le réseau est inconsistant car certains cours d'eau n'aboutissent pas à un confluent ou à une embouchure. La figure (5.12) illustre un exemple de ces deux problèmes.

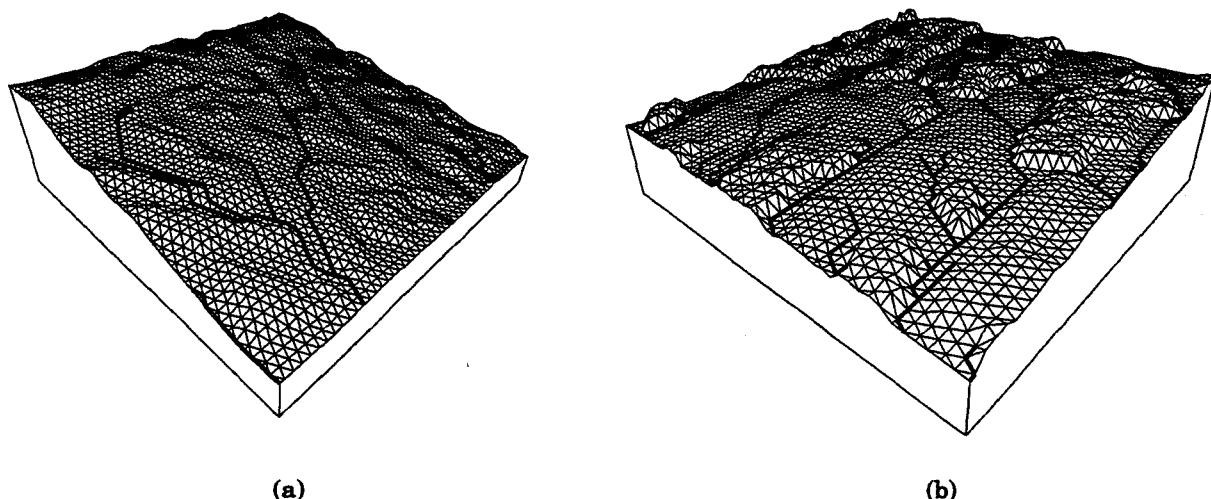


FIG. 5.12 : Réseaux incohérents : (a) cours d'eau de direction rectiligne, (b) cours d'eau interrompus par des cuvettes

5.2.1 Phénomènes liés à l'écoulement

5.2.1.1 Direction d'écoulement

La direction d'écoulement choisie correspond à des trajectoires de ruissellement de l'amont vers l'aval selon le critère de "point en aval situé plus bas que...". Il existe deux cas où ce choix provoque des directions régulières et irréalistes dans le réseau.

Le premier cas correspond à un plateau où les directions de l'écoulement sont choisies arbitrairement et identiques pour tous les points situés à même altitude. Il est possible de corriger le résultat en choisissant entre les différentes directions possibles celle conduisant au point dont l'ordre de parcours est le plus grand (s'il existe).

Le deuxième cas correspond à des pentes inclinées possédant la même géologie ; il n'y a alors aucune différenciation par le sous-sol et la perturbation altimétrique introduite est souvent régulée par le processus d'érosion. Aussi, comme les hauteurs érodées calculées sont proches, les pentes restent globalement identiques. Ceci conduit à des trajectoires plus ou moins rectilignes. Or cet agencement des cours d'eau n'est pas vraiment observable dans la nature. Nous proposons donc une modification au niveau du choix du ruissellement ; elle n'est, pour l'instant, que théorique.

Notion de flux efficace Il s'agit de calculer une quantité vectorielle \vec{U} correspondant à un *flux efficace* et prenant en compte les quantités d'eau arrivant en ce point (exprimées elles-aussi sous forme vectorielle). Cette quantité \vec{U} permet de calculer certains abaissements aux points voisins plus bas et, en fonction de ces changements d'altitude, de déterminer la direction d'écoulement vers l'un d'entre eux.

Cette nouvelle proposition diffère de celle choisie actuellement par le fait que les abaissements sont calculés pour tous les points plus bas d'un point donné et que la direction d'écoulement n'est choisie qu'après cette étape. Ceci devrait permettre une détermination plus juste de la direction sans modifier les calculs propres aux processus de simulation. Le détail de cette étude est fourni en annexe B.

Cas des points de base Par ailleurs, il est nécessaire de définir une direction d'écoulement pour les points considérés comme points de base. Ces points n'ont pas de voisin car la matière est supposée être évacuée hors du terrain. Cependant, un voisin fictif est nécessaire au niveau des calculs (détermination de la pente) pour simuler, là aussi, les processus d'érosion et de sédimentation. Il est défini alors seulement par une altitude fonction du point traité (sa position n'intervient pas).

5.2.1.2 Creusement des vallées

Il apparaît que, dans notre modèle, le creusement des vallées au niveau des fonds de rivières est faible. Dans la nature, le creusement est plus fort et dû, non seulement à puissance érosive du cours d'eau mais aussi à l'absence de végétation.

Dans un premier temps, nos essais ont porté sur l'action du ruissellement. Ainsi, la loi définie par l'équation (4.3) : $S = \alpha K_d \tan(\theta)q$ (voir 4.2.3.2) a été légèrement modifiée en augmentant la valeur de l'eau ruisselée q lorsque le point traité appartient à un lit de rivière important. Puisque tous les points appartiennent à un cours d'eau, la distinction entre les points appartenant ou non à des affluents principaux est effectuée par un seuillage sur les numéros d'ordre. Ce calcul est modulé au fur et à mesure du parcours (q augmente progressivement).

Cette solution a été abandonnée car les résultats se sont révélés décevants. Le creusement des vallées n'était observé que partiellement et son amplitude était faible. L'explication réside sans doute dans le fait que la loi de ruissellement est dépendante d'autres paramètres (pente, dureté du sol) qui impliquent une variation des quantités calculées le

5.2 – Points de discussion

long d'un cours d'eau.

C'est donc sur le facteur de végétation que nous avons préférer jouer pour accentuer l'effet de creusement. Le coefficient K_v , représentant le couvert végétal est alors considéré comme nul pour les points situés dans les lits de rivières. Par conséquence, les lois d'érosion agissent plus fortement pour ces points là, provoquant un abaissement d'altitude plus important. De la même façon que pour la première solution, la distinction entre les points est effectuée en fonction des numéros d'ordre.

Cette technique permet effectivement d'augmenter le creusement des lits de rivières (figure 5.13 à comparer avec la figure 5.9a). Pour que le résultat soit plus efficace, il est cependant nécessaire d'agir sur un relief dont le réseau est stable.

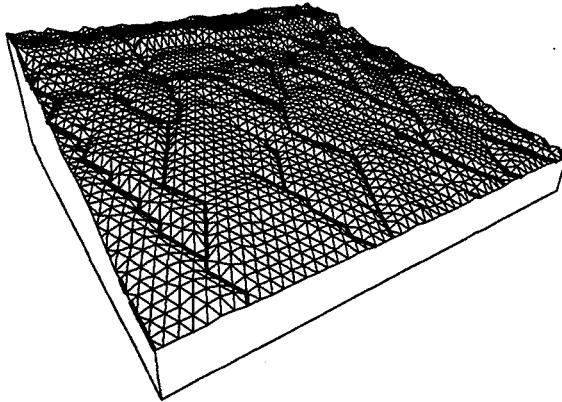


FIG. 5.13 : Relief présentant un creusement des vallées

5.2.2 Problème des cuvettes

Le point le plus délicat à traiter au niveau de la simulation est le phénomène des cuvettes. Au départ, le relief initial comporte des cuvettes plus ou moins importantes mais le processus d'érosion et de sédimentation doit être capable de les combler petit à petit, permettant ainsi de créer une réseau consistant. Or, même si de nombreuses cuvettes sont remplies, il demeure souvent sur les reliefs simulés des dépressions qui provoquent des coupures dans les trajectoires de ruissellement.

La première raison peut être que le processus n'est pas assez avancé pour produire un remplissage suffisant des cuvettes. Cependant, même après quelques étapes supplémentaires, certaines cuvettes restent ou se sont déplacées. Par ailleurs, une forte sédimentation, tout en résolvant certains problèmes, provoque parfois un aplatissement non désiré du relief.

Le phénomène de propagation des cuvettes explique alors que le réseau reste inconsistant. En effet, dans le cas d'un point situé au fond d'une cuvette, il y a dépôt de sédiments

d'une certaine hauteur h . Celle-ci ne doit pas excéder la différence de hauteurs (δz) du point avec celui situé immédiatement plus haut que lui, au risque de créer d'autres petites cuvettes (figure 5.14). C'est le choix que nous avons fait en sédimentant d'une hauteur de h si $h \leq \delta z$ ou de δz sinon.

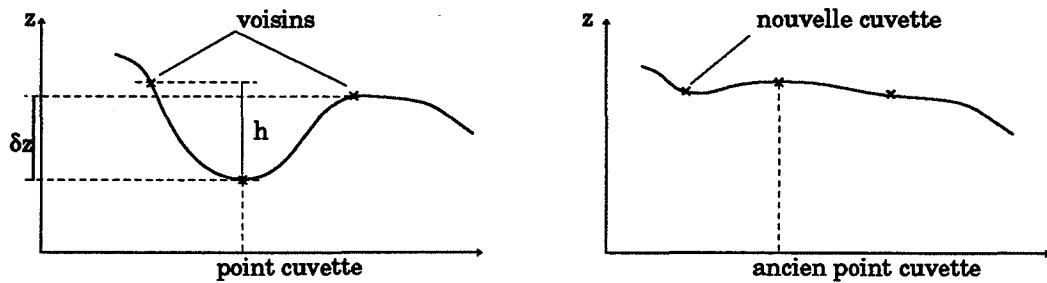


FIG. 5.14 : Phénomènes de propagation des cuvettes

Mais cette solution ne suffit pas pour combler totalement la cuvette lorsque celle-ci cumule les écoulements de tous ses points voisins ou d'un voisinage plus étendu (cuvette plus ou moins large). Par ailleurs, la couche de sédiments déposés pour combler la cuvette est tendre et donc sensible à l'érosion. Aussi, à l'étape suivante, une autre cuvette peut se reformer qu'il faudra, à son tour, combler (problème de l'équilibre entre érosion et sédimentation).

Nous proposons alors une méthode plus générale pour combler les cuvettes en prenant en compte un voisinage plus grand autour du point de cuvette. Il s'agit d'éroder le point voisin (situé en amont du point cuvette M) le moins haut et le bassin versant qui lui correspond. Cette méthode permet alors de créer une direction d'écoulement à partir du point de cuvette vers un point du bassin versant considéré.

Une telle solution demande un certain nombre de calculs supplémentaires puisqu'il faut déterminer le voisinage du point M et appliquer le même principe dans le cas où ce voisinage comprend aussi des cuvettes (processus récursif). Même si les temps de calculs n'augmentent pas fortement (seuls les points de cuvettes sont traités de cette façon), nous offrons la possibilité de n'appliquer cette solution qu'à partir d'une certaine étape de la simulation. En fait, toutes les petites cuvettes peuvent être remplies par le processus de sédimentation.

Les tests effectués sur un voisinage restreint montre qu'environ presque toutes les cuvettes sont comblées tout en gardant la même structure générale du réseau. Nous pouvons voir le résultat de cette technique sur la figure (5.15) où sont présentés deux réseaux simulés avec et sans le remplissage des cuvettes.

5.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé quelques reliefs obtenus par notre modèle de simulation. Certains points sont importants à signaler.

5.3 – Conclusion

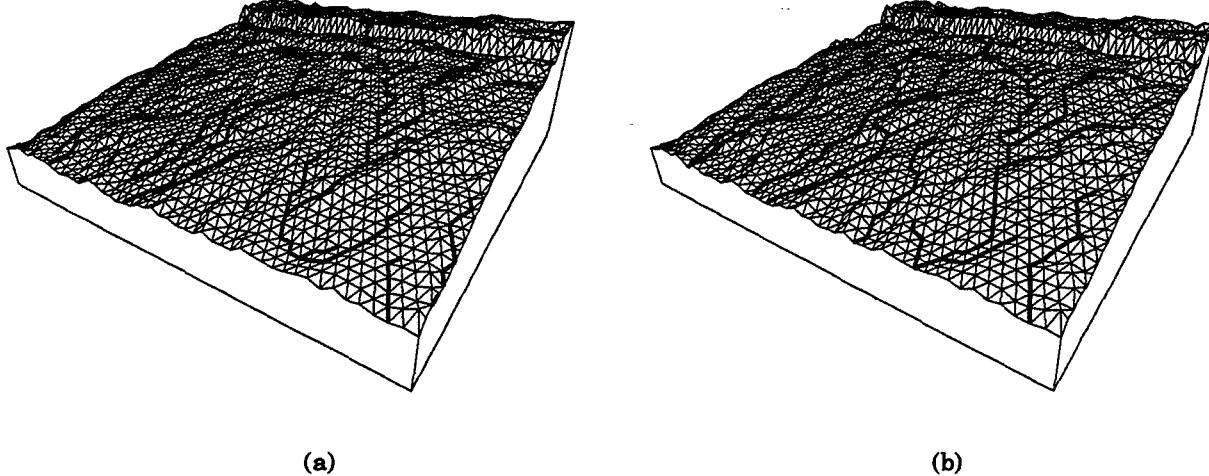


FIG. 5.15 : Réseaux simulés (a) sans remplissage des cuvettes, (b) avec remplissage

L'originalité de la simulation réside dans la modélisation géologique des terrains et dans les lois d'érosion et de sédimentation utilisées pour faire évoluer le relief.

Les exemples de modélisations qui ont été présentés prouvent l'efficacité de la simulation pour la création de reliefs variés et d'aspect naturel. L'avantage de cette méthode est de fournir un paramétrage simple et intuitif pour simuler une grande diversité de paysages. Les reliefs observés montrent des traits caractéristiques de la géologie sous-jacente et sont tout à fait réalistes. Les réseaux hydrographiques correspondants présentent une forme arborescente naturelle et permettent une meilleure appréciation du relief.

Par ailleurs peu d'itérations sont nécessaires pour faire ressortir les différences géologiques, même pour une surface initialement plane. On obtient rapidement des dénivellés importants dès lors que l'on introduit des pluviosités conséquentes. Dans ces conditions, il n'est pas utile de générer des surfaces initiales complexes.

Cependant, comme dans toute modélisation fondée sur des processus naturels simulés, une certaine adaptation est nécessaire pour l'utiliser de façon optimale. On pense en particulier, aux valeurs des paramètres qu'il faut moduler pour l'obtention d'un relief précis. L'ajustement des valeurs se fait le plus souvent au vu des résultats jusqu'à obtenir un modèle visuellement correct.

Notons que le temps de calcul demandé pour une simulation est raisonnable. Il est bien entendu fonction du nombre d'étapes et de la taille de la surface puisque le traitement s'effectue itérativement point par point. Globalement, on peut citer les chiffres suivants : sur une station *HP-Apollo 9433S*, une simulation de 50 itérations sur un terrain de 100×100 prend environ quatre minutes en temps utilisateur (moins de trois minutes si on élimine le remplissage systématique des cuvettes). Ce temps inclut la lecture et l'écriture de données. Les calculs les plus importants interviennent au niveau des équations et de la recherche

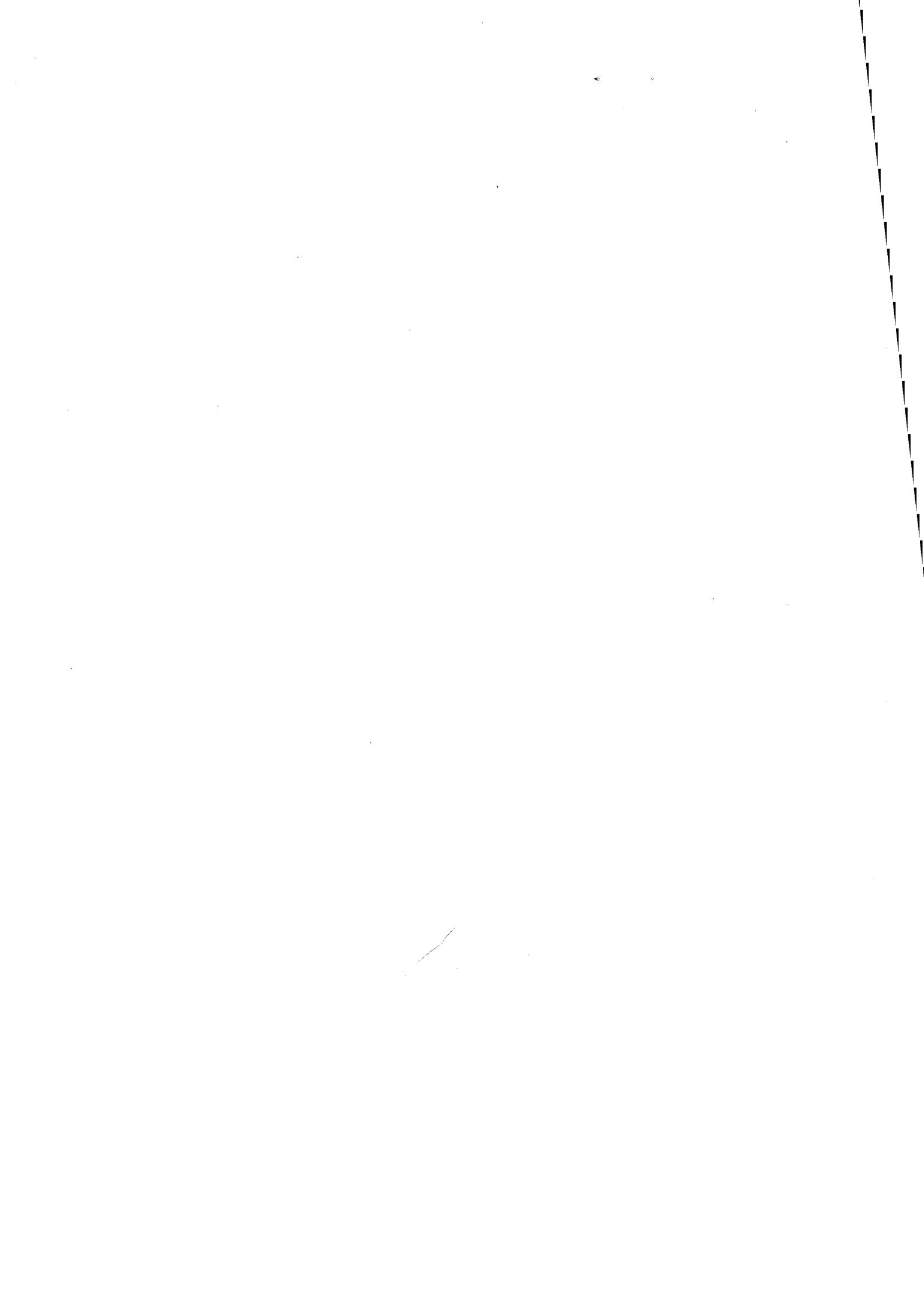
5 – LES RELIEFS ET LES RÉSEAUX

du type de roche d'un point dans le modèle volumique (multiplication de matrices).

Les exemples de reliefs ont permis de donner un aperçu des paysages que l'on pouvait générer avec une visualisation simple. Pour une synthèse complète de paysages, il faut maintenant poursuivre la modélisation par une étape de visualisation réaliste.

Partie III

La visualisation de terrains



La visualisation et le rendu

6

Ce chapitre traite des techniques mises en œuvre pour effectuer un rendu réaliste des reliefs simulés. Ce sont celles couramment utilisées en synthèse d'images. La première technique utilisée pour la visualisation est le tampon de profondeur. Nous allons exposer brièvement les principes de l'algorithme puis nous présenterons les effets visuels qui ont été ajoutés pour accroître le réalisme des paysages. Nous expliquerons la méthode de génération des textures naturelles employées pour simuler l'aspect de végétation puis la visualisation du réseau hydrographique et l'ajout d'effets visuels (neige, bleu atmosphérique, etc.).

6.1 Visualisation du relief

La visualisation s'effectue par la technique classique du tampon de profondeur (ou *z-buffer*) qui est une méthode simple utilisant une structure de polygones. Le choix d'une telle technique résulte dans le fait qu'aucun tri préalable sur les polygones n'est nécessaire et que l'implémentation est rapide pour obtenir un premier résultat. Nous verrons par la suite que l'usage d'une telle méthode permet d'adapter la visualisation du réseau hydrographique.

6.1.1 Technique du tampon de profondeur

La description altimétrique du relief au moyen d'une grille rectangulaire ou hexagonale permet d'obtenir très facilement des facettes planes. Dans le cas d'une maille hexagonale, on dispose immédiatement d'une description en triangles en joignant les nœuds de la grille. Pour une maille carrée, on crée deux triangles en joignant, pour chacun des carrés, trois des sommets de la maille. Le relief à visualiser se constitue donc, dans les deux cas, d'une description en triangles dans l'espace objet.

Après un calcul de mise en perspective, on réalise un fenêtrage de la scène par les plans délimitant la pyramide de vision. Il s'effectue en éliminant les triangles situés complètement à l'extérieur de la fenêtre et en ne considérant, pour les triangles situés aux frontières, que les pixels appartenant à la fenêtre.

On applique ensuite la méthode du tampon de profondeur [PAGM88]. Rappelons-en brièvement le principe. Cet algorithme travaille simultanément dans l'espace objet et dans l'espace image. Il consiste à n'écrire un pixel dans la mémoire d'image que si la profondeur du point qui se projette en ce pixel est inférieure aux profondeurs des points qui ont la même projection. La profondeur correspond à la distance entre l'œil de l'observateur et le point de l'objet visible que représente le pixel. Cet algorithme suppose de disposer d'une mémoire des profondeurs pour y stocker la valeur minimale et d'une mémoire d'images. Il se résume ainsi :

```

Initialisation d'une mémoire de profondeur à de grandes valeurs
Pour chaque facette de la scène faire
    pour chaque pixel de la facette projetée faire
        calcul de la profondeur  $z$  du point projeté
        si  $z$  est inférieur à  $z$  conservé dans la mémoire
            remplacer la valeur dans la mémoire par  $z$ 
            écrire la couleur du pixel dans la mémoire d'image
        fin si
    fin pour
fin pour

```

Il est clair que l'efficacité de cet algorithme dépend du calcul de la profondeur. Ceci suppose des techniques de type incrémental. Celles-ci sont capables d'interpoler les profondeurs de chaque pixel d'un objet à partir de quelques points si l'objet est plan, ce qui est notre cas.

Le traitement des points intérieurs au polygone est donc réalisé par interpolation. Il est simplifié par le fait de ne manipuler que des triangles. Pour chaque ligne horizontale y variant entre les bornes y_{min} et y_{max} du polygone, on calcule les abscisses x_1 et x_2 des points d'intersection de y avec les côtés. Par interpolation des profondeurs des extrémités, on calcule aussi les profondeurs des points dont ils sont les projections. La profondeur de chaque point du segment $[x_1, x_2]$ est ensuite déterminée par interpolation.

6.1.2 Calcul de l'éclairement

La technique du tampon de profondeur permet de réaliser l'élimination des parties cachées. Un aspect plus réaliste est obtenu en effectuant un calcul d'éclairement avec lissage.

L'éclairement suit la technique classique issue des travaux de Lambert. L'éclairement en un point illuminé par une source ponctuelle dépend de l'angle entre le rayon lumineux et la normale à la surface en ce point. Lorsque l'angle est nul, l'éclairement est maximal ; pour un angle de 90 degrés, il est nul. Lorsque l'angle dépasse 90 degrés, le point n'est

6.1 – Visualisation du relief

pas éclairé. Pratiquement, cela revient à déterminer le cosinus de l'angle par le calcul du produit scalaire entre les deux vecteurs normés.

6.1.2.1 Lissage

L'étape de lissage est obligatoire si l'on veut un minimum de réalisme, surtout si les facettes planes affichées sont grandes. En effet, tous les points d'une même facette admettent comme normale celle du plan de la facette, sauf ceux situés sur les arêtes le long desquelles la surface polyédrique n'est pas dérivable. Il s'ensuit une discontinuité de l'éclairage par brusques changements de la direction de la normale. Pour résoudre ce problème, différentes techniques de lissage sont possibles.

Notre choix s'est porté sur un lissage de Gouraud, plus simple et plus rapide qu'un lissage de Phong et suffisant pour notre application. Il consiste à calculer la composante de lumière de chaque point de la face. Pour cela, on évalue la normale à une courbe fictive passant par les sommets de la surface polyédrique par une moyenne des normales aux faces partageant le point. Puis, on effectue le calcul de l'intensité lumineuse en chacun des sommets par application du modèle d'éclairage. La couleur des pixels de l'intérieur de la face projetée est déterminée par une double interpolation des couleurs selon y et x (figure 6.1).

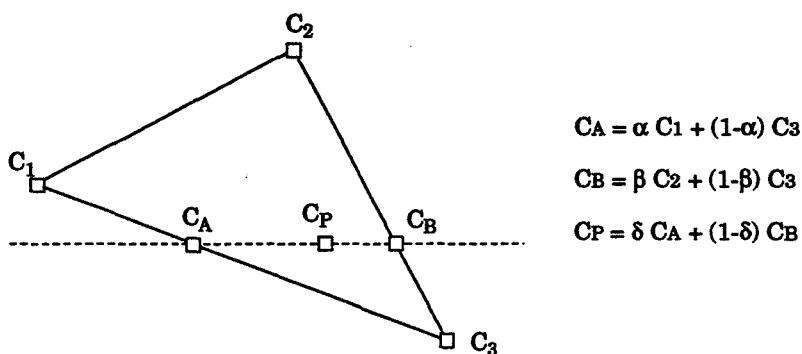


FIG. 6.1 : Calcul de la couleur d'un point par lissage de Gouraud

Il est donc nécessaire de calculer une normale pour chaque sommet des triangles de la grille. La normale à un sommet d'un triangle correspond à la moyenne des normales des faces qui se partagent ce sommet. Ce calcul demande de distinguer le cas d'une grille rectangulaire d'une grille hexagonale.

6.1.2.2 Lignes de crête

Le lissage permet de rendre invisible la frontière entre deux faces adjacentes. Dans ce cas, le relief apparaît très atténué, simplement perceptible par les différences de luminosité entre les facettes. Il est donc souhaitable de visualiser plus nettement les traits de relief, comme les lignes de crête.

Une ligne de crête est déterminée par une suite de segments reliant certains points du maillage. Une solution simple et efficace consiste à attribuer aux sommets des segments de chaque ligne de crête, une normale à gauche et une normale à droite de la ligne. Chaque normale est définie comme la moyenne des normales des faces situées sur le même côté et partageant le sommet (figure 6.2).

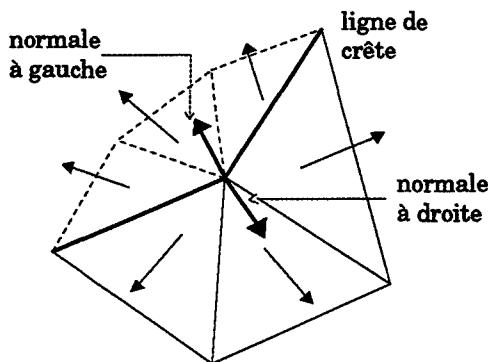


FIG. 6.2 : Normales à gauche et à droite d'une ligne de crête

Lorsque la ligne de crête se réduit à un seul point, le calcul des deux normales donne le même résultat car toutes les faces interviennent dans les deux cas. Plutôt que d'effectuer un traitement particulier, nous préférons ne pas considérer les lignes réduites à un point. Ainsi, le calcul est réalisé pour des lignes d'au moins un segment. Cette restriction n'est pas gênante car elle traduit le fait que seuls les traits de relief significatifs sont visualisés.

Nous obtenons à la fin de ces étapes une visualisation simple du relief du paysage. L'apport de quelques effets visuels est alors nécessaire pour réaliser une image d'un paysage plus réel, en particulier, la visualisation du réseau hydrographique.

6.2 Visualisation du réseau hydrographique

Le réalisme des paysages peut être grandement amélioré par l'introduction du réseau hydrographique dans la visualisation. Pour rester cohérent avec le type de méthode utilisé pour le relief (algorithme du tampon de profondeur), le réseau doit être structuré comme un ensemble de facettes (ici, des triangles). Comme pour l'affichage en fil de fer, seuls les cours d'eau dont l'importance est supérieure à un certain seuil sont visualisés. Cette condition permet de moduler la visualisation en évitant un affichage trop complexe (voire d'annuler la visualisation du réseau). Le seuil agit sur les numéros d'ordre attribués aux points du graphe.

6.2.1 Crédation des facettes

La méthode la plus simple est d'attribuer à chaque lien de l'arborescence une facette. Elle est créée par l'arête formée entre deux points délimitant un lien et sa largeur dépend des numéros d'ordre des points. La largeur de la facette augmente entre les deux

6.2 – Visualisation du réseau hydrographique

points puisque les numéros suivent un ordre croissant. La jonction entre deux facettes correspondant à deux arêtes successives pose un petit problème de recollement qui est négligeable. Ensuite chaque facette est coupée arbitrairement en deux pour former deux triangles (figure 6.3).

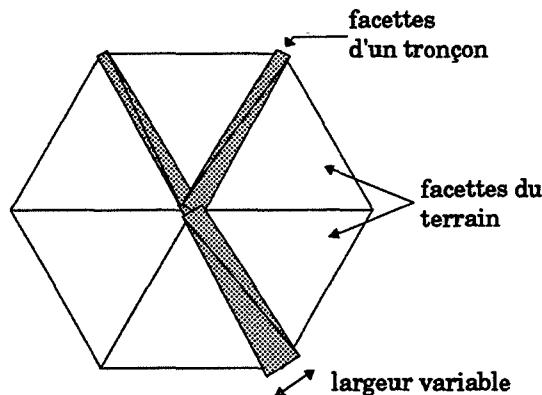


FIG. 6.3 : Triangles formés sur un lien du réseau

En appliquant ce principe, le réseau visualisé apparaît un peu trop hiératique, surtout au niveau des jonctions de cours d'eau. Nous appliquons alors une méthode de lissage pour atténuer cet effet.

6.2.2 Lissage des cours d'eau

Le lissage est effectué selon une technique d'interpolation par splines cardinales. La courbe totale est obtenue par une suite de splines (courbes par morceaux). Les propriétés qu'elles présentent correspondent à notre utilisation ; en particulier, le fait que la courbe passe par les points de contrôle.

Splines cardinales Ce type de spline est construit à partir de quatre points de contrôle avec des polynômes d'ordre trois. L'expression générale peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$P_i(u) = \begin{pmatrix} u^3 & u^2 & u & 1 \end{pmatrix} M_{\text{spline}} \begin{pmatrix} P_i \\ P_{i+1} \\ P_{i+2} \\ P_{i+3} \end{pmatrix}$$

où la matrice M_{spline} contient les coefficients des quatre polynômes d'interpolation. Elle dépend du type de courbe choisi.

Pour une spline cardinale, la courbe passe par les points P_{i+1} et P_{i+2} ; les points P_i et P_{i+3} déterminent la demi-tangente à droite en P_{i+1} et la demi-tangente à gauche en P_{i+2} .

La tangente à droite en P_{i+1} est $D_{i+1} = \alpha(P_{i+2} - P_i)$. La tangente à gauche en P_{i+2} est $G_{i+2} = \alpha(P_{i+1} - P_{i+3})$. Le paramètre α permet d'influer sur le module des tangentes,

ce qui se traduit géométriquement par une variation de la tension de la courbe. Notre application utilise $\alpha = \frac{1}{2}$ (splines de Catmull-Rom). La matrice M_{spline} s'écrit :

$$M_{\text{spline}} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{3}{2} & -\frac{3}{2} & \frac{1}{2} \\ 1 & -\frac{5}{2} & 2 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

6.2.2.1 Interpolation

Il s'agit d'effectuer l'interpolation, non pour chaque arête du cours d'eau indépendamment, mais pour tout un tronçon. On appelle *tronçon* la suite d'arêtes d'un cours d'eau comprise entre deux jonctions ou une extrémité d'un cours d'eau et une jonction (figure 6.4a). Les points du maillage le long de ces tronçons définissent les points de contrôle de l'interpolation. Comme la courbe ne passe pas par les points de contrôle extrêmes, deux tronçons dont les lignes polygonales se joignent, peuvent ne plus se joindre.

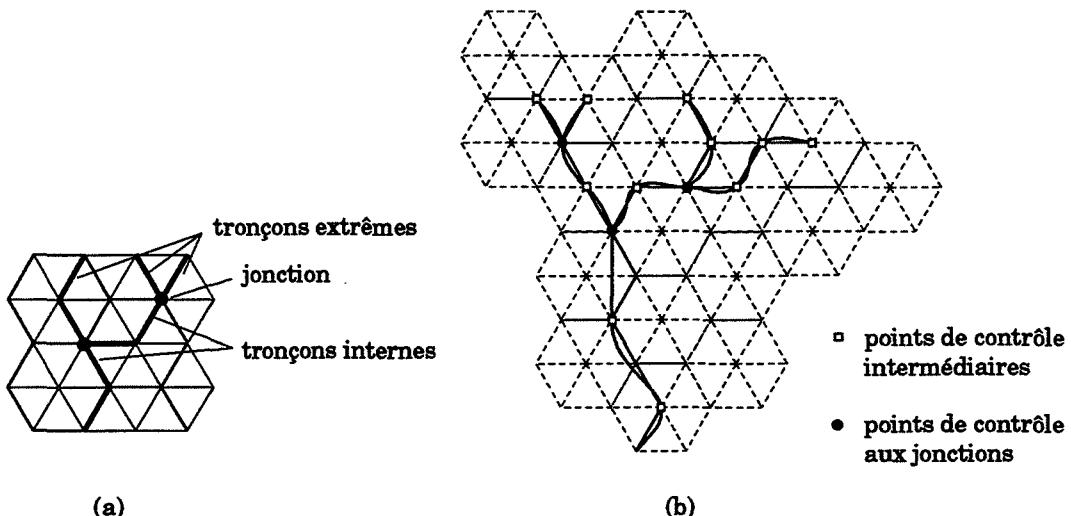


FIG. 6.4 : (a) suite des tronçons formant le réseau, (b) splines avec un nombre variable de points de contrôle

Pour que l'interpolation prenne en compte tous les points de contrôle, on ajoute alors un point fictif à chaque extrémité de la courbe, à l'opposé du point terminal. La courbe passe ainsi par les deux points de contrôle extrêmes d'un tronçon, et assure le recollement des deux splines à la confluence de deux cours d'eau. Ensuite, sur chaque spline, un certain nombre de points d'interpolation sont définis selon un pas d'échantillonnage et les triangles correspondants sont créés.

Nous offrons ensuite la possibilité de choisir comme points de contrôle des points du maillage plus ou moins espacés en fonction d'un pas déterminé par l'utilisateur. Si le pas choisi est supérieur à 1, on ne prend pas tous les points du maillage formant un tronçon

6.3 – Définition de textures naturelles

comme point de contrôle (figure 6.4b).

Ceci permet d'effectuer un lissage plus ou moins important selon la longueur du tronçon (nombre de points du maillage). Ainsi les petits affluents seront peu lissés par rapport aux cours d'eau principaux. Ceci donne un aspect plus réaliste et permet de ne pas visualiser un cours d'eau trop lissé par rapport au relief qui le supporte. Les petits affluents, surtout présents dans les reliefs escarpés, sont plus proches de la ligne polygonale initiale ; les cours d'eau plus importants, apparaissant dans les zones de plaines, en sont plus éloignés.

6.2.2.2 Calcul des altitudes

Habituellement, pour supprimer le cas des intersections entre les triangles du relief et ceux du réseau (figure 6.5), les triangles constituant le réseau sont positionnés à une altitude légèrement supérieure de celle des triangles du relief.

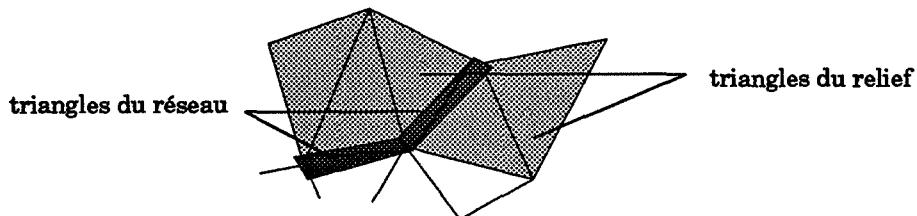


FIG. 6.5 : Intersection entre un triangle du réseau et un triangle du relief

Pour résoudre tout à fait le problème, nous proposons de calculer les altitudes des sommets des triangles du réseau pour qu'elles correspondent à celles des triangles du relief. Cela revient à trouver, pour chaque sommet du triangle du réseau, le triangle du relief qui correspond.

Pour cela, on utilise une formule paramétrée par les coordonnées x et y du sommet, le type et la taille de la grille. Ceci permet de déterminer quelles sont la ligne et la colonne les plus proches du point et donc le triangle du relief qui le contient (en 2D). Les triangles du relief sont en effet ordonnés, par le processus de création, en lignes et colonnes. Ensuite la nouvelle altitude du sommet est donnée par l'intersection entre la facette du relief (équation d'un plan) et le vecteur vertical partant de ce sommet.

La combinaison d'un relief et du réseau associé est visualisée sur la photographie (C.1) en annexe C.

6.3 Définition de textures naturelles

Pour rendre l'aspect réaliste d'un paysage, il est important de simuler un effet de végétation ou de rochers sur le relief généré. Il faut donc utiliser l'application de textures naturelles telles qu'elles sont définies en synthèse d'images. Les études relatives aux textures ont fait l'objet de nombreux travaux. Nous allons présenter les principes fondamentaux et les méthodes de création les plus courantes.

Classiquement, on distingue les textures planes et les textures volumiques. Les premières sont définies en 2D puis plaquées sur les faces d'un objet ; les deuxièmes sont définies pour tous les points de l'espace et l'objet est ensuite taillé dans l'espace de la texture.

6.3.1 Quelques méthodes de génération

La plupart des travaux de génération de textures appartiennent au domaine de l'analyse d'images mais certains de leurs principes sont repris et appliqués en synthèse d'images. Des modèles de génération de textures sont développés pour des applications propres à la synthèse. Ils se classent en des modèles de génération de textures 2D ou de textures 3D.

6.3.1.1 Textures 2D

Les techniques de génération de textures planes sont nombreuses et souvent utilisées. Nous allons en présenter quelques unes.

Numérisation de textures réelles C'est une méthode très intuitive et largement utilisée pour la génération de textures naturelles [Cat74]. Elle consiste à numériser un échantillon réel de la texture voulue et à plaquer cette information 2D sur l'objet à texturer. Lorsque la texture est déterministe (c'est le cas de la végétation), ce procédé est intéressant car il permet d'obtenir un effet réaliste.

Cependant la méthode présente deux difficultés, surtout gênantes pour des textures aléatoires. L'étape de numérisation est un peu fastidieuse et il n'est pas toujours possible d'acquérir une large surface de texture. Dans ce cas, seule une vignette est numérisée. Se posent alors les problèmes de périodicité et de visibilité des frontières entre les vignettes.

Cette méthode est plus adaptée pour texturer des surfaces de taille réduite. Elle nécessite une place mémoire importante si on veut disposer simultanément de plusieurs textures numérisées de taille importante. C'est la méthode utilisée par Dungan et al. [DSS78] pour la génération de textures d'herbes et de forêts. C'est aussi le choix de Kaneda et al. [KKN⁺89] qui plaquent des textures naturelles sur des relevés topographiques.

Technique structurelle Ce modèle de génération suppose que la texture regroupe des motifs élémentaires se répétant selon une organisation quasi-régulière. Cette structure est représentée par un ensemble de primitives et de règles de positionnement qui leur sont appliquées. Par exemple, on peut citer les textures fondées sur des grammaires de formes ou sur des syntaxes de graphes.

Cette méthode est bien adaptée à des textures présentant une structure régulière comme les murs de briques, les mosaïques, les trames de tissu. Elle a fait l'objet de nombreux travaux [Zuc76] [YH78] [Smi84].

6.3 – Définition de textures naturelles

Technique stochastique Contrairement à la précédente, cette méthode correspond bien à des textures peu structurées de style éléments naturels (herbe, sable).

Elle suppose que tout échantillon de texture représente une réalisation d'un processus aléatoire bi-dimensionnel de statistiques données. Deux échantillons différents illustrent la même texture s'ils définissent la réalisation d'un processus identique. A partir de statistiques définies par l'analyse, on synthétise un échantillon représentant la réalisation du processus aléatoire bi-dimensionnel [Gag83] [Mas82].

Technique spectrale Une vignette de texture est analysée pour en extraire les paramètres caractéristiques de son spectre. La taille de la vignette doit être choisie de telle sorte qu'elle représente les propriétés de la texture. L'analyse du spectre aboutit à un modèle de génération à base d'une somme de plusieurs sinusoïdes de fréquences et d'amplitude variables. Une propriété intéressante de cette méthode est la possibilité d'un traitement direct de l'aliassage grâce à l'utilisation des cosinus.

Les résultats obtenus sont satisfaisants dans le cas de textures structurées et aussi pour certaines textures aléatoires (surface de l'eau) [Sch80]. Gardner [Gar84] utilise aussi cette méthode pour la génération de textures de nuages.

Technique fractale Comme nous l'avons signalé auparavant, les objets fractals sont souvent utilisés pour la définition de phénomènes naturels. Des modèles de génération de texture mettent en œuvre des algorithmes de synthèse de textures fractales. La création d'un champ fractal permet d'attribuer une valeur aléatoire à chaque point d'une grille. Ces valeurs interviennent dans le calcul de la couleur du point et une interpolation entre les nœuds permet de traiter l'ensemble. Le processus est récursif. C'est la méthode présentée par Fournier et al. [FFC82] sur les travaux de Mandelbrot [Man82] et utilisée par Coquillart [Coq85] pour générer des textures fractales de ciels nuageux.

Un tel procédé évite les problèmes de raccords et simplifie la technique de résolution variable en fonction de la distance à l'observateur (grâce à la propriété d'homothétie interne).

6.3.1.2 Textures 3D

Le plaquage d'une texture 2D sur une surface 3D introduit des distorsions. On perd l'information de volume et selon le rapport entre la texture plane et la surface, le résultat présente parfois des effets de textures allongées ou comprimées. Par ailleurs, comme la texture est le plus souvent numérisée de face, une mise en perspective est nécessaire pour plaquer la texture sur une face d'orientation quelconque. L'emploi d'une texture 3D supprime ces inconvénients.

La texture 3D est définie comme une application du domaine 3D de l'objet vers le domaine 3D de la texture. La texture est engendrée, pour tous les points de l'espace et pour un matériau donné, par une certaine fonction. En fait, cela revient à associer à l'objet un repère local correspondant au repère de la texture. Ce procédé permet de représenter

de façon exacte un volume “sculpté” dans le matériau. L'avantage primordial de cette technique est l'indépendance entre la texture et l'objet. Par ailleurs, il est possible de rendre la texture périodique et d'éviter les problèmes de raccordements et de continuité entre deux surfaces contiguës.

Certaines fonctions de textures 2D peuvent être généralisées au cas tridimensionnel, comme la décomposition en série de Fourier [Sch80], pour la définition de textures périodiques par somme de sinusoïdes (texture de marbre). Perlin [Per80] propose des méthodes à base de bruit blanc. Il définit des fonctions stochastiques et de turbulence qui permettent d'engendrer un certain nombre de textures (marbre, feu, nuage, surface de l'eau). Peachey [Pea85] définit aussi des textures naturelles de bois et de granite.

On peut aussi combiner des fonctions de texture 3D simples pour aboutir à des fonctions plus complexes comme projeter une texture 2D orthogonalement sur la surface à texturer. La méthode de texture 3D est plus gourmande en place mémoire et temps de calcul par rapport à un plaquage 2D. Il est alors possible d'utiliser une technique intermédiaire en calculant une texture 3D en certains points de contrôle de la surface puis de plaquer, sur les morceaux de surface définis par ces points, une texture 2D.

6.3.2 Choix d'une méthode

Dans l'optique de créer des textures naturelles de type végétation, il nous a fallu choisir une méthode appropriée. Il apparaît que l'utilisation de textures 3D résout de nombreux problèmes des textures 2D en offrant un réalisme appréciable. Cependant, le temps de calcul nécessaire pour texturer un objet est important et la fonction de texture adéquate n'est pas toujours facile à définir.

Pour notre application, nous désirons texturer le relief créé, disponible sous forme de facettes, avec des textures dépendantes de l'altitude de ces facettes. La visualisation s'effectuant d'assez loin, les textures doivent plus rendre l'aspect de végétation que des détails. Comme l'objet à texturer est important et qu'il s'agit de facettes planes, il semble alors suffisant de générer un certain nombre de textures 2D à plaquer sur les faces. Par ailleurs, il est plus intuitif de générer des textures 2D de végétation que de trouver un modèle 3D capable de générer facilement une grande variété de textures.

Il faut ensuite choisir le type de méthode de génération de textures qui correspond le mieux à notre problème. Pour cela, un certain nombre de critères sont à considérer :

- *le temps de calcul et la place mémoire* mise en œuvre.
- *le réalisme*. Il s'agit de donner une impression de réalité même si elle n'est pas fidèle à un certain modèle. En fait, le relief final texturé doit permettre de simuler une apparence de paysage avec des variations de végétation.
- *les raccords*. Selon la méthode employée, la texture n'est pas toujours de taille suffisante et des raccords sont alors nécessaires. Ils correspondent au pavage de la surface par duplication de la vignette de texture.

6.3 – Définition de textures naturelles

- *l'aliassage.* C'est un inconvénient souvent rencontré puisque la texture subit le plus souvent des transformations géométriques. Le problème se pose aussi dans les zones fortement comprimées.
- *la résolution variable.* Selon les zones de l'image, il est possible de se dispenser du calcul d'une texture plus fine. Il est donc appréciable de pouvoir générer une texture avec des résolutions variables.
- *la variété.* Le modèle choisi doit être suffisamment souple pour fournir des textures variées avec un minimum de modifications au niveau des paramètres. L'aptitude à générer d'une façon intuitive des textures d'un certain type est aussi importante.

Au vu de ces critères, il semble qu'une technique simple et souple mettant en œuvre peu de paramètres est nécessaire. Il paraît intéressant de pouvoir manipuler ces paramètres en fonction de la texture désirée. Le modèle doit permettre de générer un certain nombre de textures qui seront plaquées sur le relief, en fonction d'un étagement de la végétation. On peut remarquer que si la texture subit une transformation géométrique (comme recouvrir une surface irrégulière comme des montagnes), sa périodicité devient moins visible.

6.3.3 Crédit des textures

Le modèle de génération de textures que nous avons choisi met en œuvre la méthode de *spot noise* introduite par van Wijk [vW91]. La texture est synthétisée par l'addition de spots, positionnés aléatoirement sur un plan, de poids et de forme variable. Cette technique est bien adaptée à notre application car elle offre l'avantage de relier fortement la forme du spot aux caractéristiques de la texture. On peut envisager la création d'un nombre important de textures en jouant sur le choix et la combinaison des spots.

6.3.3.1 Présentation de spot noise

La technique de spot noise est l'équivalent spatial de la technique de *shot noise*. Celui-ci est produit par la répétition, à des intervalles aléatoires, d'impulsions indépendantes. Si chaque impulsion est de la forme $a_i h(t - t_i)$, la fonction résultat $f(t)$ s'exprime par :

$$f(t) = \sum_i a_i h(t - t_i)$$

où les valeurs t_i de la variable t forment une séquence aléatoire.

Le spectre de puissance de $f(t)$ est alors directement lié au spectre d'énergie S_h de $h(t)$ par :

$$P_f(\omega) = \nu < a^2 > S_h(\omega)$$

avec $S_h(\omega) = |H(\omega)|^2$ ($H(\omega)$ est la transformée de Fourier de $h(t)$), a_i de moyenne nulle et ν répétitions en moyenne par unité de temps.

Par analogie, dans l'espace, l'impulsion est considérée comme étant un spot $h(x)$ qu'on "laisse tomber" en un point du plan (d'où le nom de la méthode). La taille du spot est

limitée et relativement petite par rapport à la taille de la texture et plusieurs spots peuvent se superposer. On définit alors :

$$f(x) = \sum_i a_i h(x - x_i)$$

où les x_i représentent l'ensemble des positions aléatoires sur le plan. S'il y a en moyenne ν répétitions par unité de temps, alors :

$$P_f(k) = \nu < a^2 > S_h(k)$$

où k est le vecteur de fréquence. Le spectre de puissance de la texture et le spectre d'énergie du spot sont identiques à un facteur d'échelle près.

Réalisation Une des possibilités est de s'inspirer du domaine fréquentiel. La réalisation est effectuée par la multiplication de la transformée de Fourier $H(x)$ (à laquelle on ajoute un déphasage aléatoire $\alpha(k)$) par le facteur $W(k) = e^{i\alpha_k}$. La multiplication dans le domaine fréquentiel correspond à une convolution dans le domaine spatial. Ainsi, la texture peut être synthétisée par la convolution de $h(x)$ par un bruit blanc $w(x)$.

Dans le domaine spatial, le bruit blanc correspond à un ensemble de valeurs aléatoires sur une grille. La génération de la texture s'effectue alors par une sorte de filtrage de la grille par le spot. Il se définit par l'utilisation d'une variable spot $h(p, x)$ dont les propriétés sont contrôlées par un ensemble de paramètres m . Ceux-ci sont déterminés par l'application d'une fonction m à un ensemble $d(x)$ de données appartenant à la texture. La fonction spot noise s'écrit alors :

$$f(x) = \sum_i a_i h(m(d(x)), x - x_i)$$

et en considérant le principe de convolution, on obtient la formule finale :

$$f(x, y) = \sum_i \sum_j h(m(d(x)), x + i, y + j) \text{Noise}(x + i, y + j)$$

Pratiquement, la méthode se résume ainsi : pour chaque point (i, j) de la texture plane à générer, pour chaque élément (x, y) du bruit blanc (position aléatoire), est-ce que (i, j) appartient au spot B centré en (x, y) ? Cette méthode d'implémentation de la convolution est coûteuse en temps de calcul. La complexité est en $O(nb d_x d_y)$ avec nb le nombre de positions aléatoires et d_x, d_y les dimensions de la grille. Nous proposons alors l'optimisation suivante.

6.3.3.2 Optimisation de la méthode

Nous considérons un rectangle englobant du spot de dimension (t_x, t_y) et nous effectuons le calcul en sens inverse. Ainsi, nous considérons seulement les points du bruit blanc et pour chaque point de la texture appartenant au rectangle, nous appliquons la fonction de transition. Le spot est en général centré dans le rectangle et défini par un ensemble

6.3 – Définition de textures naturelles

de points ; aussi peut-il être de forme quelconque et pas seulement d'une forme facilement représentable (figure 6.6). Ceci correspond à l'algorithme :

```

Pour tout  $(x, y)$  du bruit blanc faire
    pour  $i$  de  $x - \frac{t_x}{2}$  à  $x + \frac{t_x}{2}$  faire
        pour  $j$  de  $y - \frac{t_y}{2}$  à  $y + \frac{t_y}{2}$  faire
            addition de  $B(i, j)$  à  $texture(x + i, y + j)$ 
        fin pour
    fin pour
fin pour

```

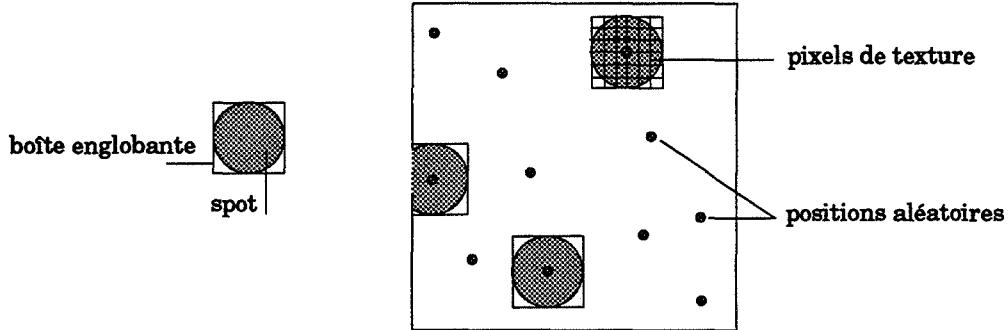


FIG. 6.6 : Principe de notre méthode d'optimisation

Comme la taille du spot est réduite par rapport à celle de la grille, on obtient une complexité $O(nb t_x t_y)$ inférieure à la précédente, ce qui réduit considérablement les temps de calcul. Par exemple, une texture de dimensions 200×200 avec un spot cylindrique de rectangle englobant de taille 5×5 et 5000 positions aléatoires se calcule en 3.5 secondes en temps utilisateur.

Paramètres La génération de textures différentes est possible en faisant varier plusieurs paramètres. Outre le fait de jouer sur le nombre de positions aléatoires, certaines modifications sont envisageables par la méthode proposée par l'auteur :

- *la forme du spot* – Il définit plusieurs formes de base possibles : disque, carré, croix, arc de cercle,.... Selon le résultat désiré, on peut privilégier une forme plus ou moins rectiligne, le résultat étant fortement lié à la forme du spot. La définition de motifs (cercles concentriques, grille) est aussi possible.
- *la déformation* – Certaines fonctions de déformation peuvent être effectuées sur la forme de base pour rompre l'effet d'isotropie. Ce peut être un changement d'échelle selon une ou deux directions pour la création d'une ellipse (ou d'un rectangle) ou une rotation pour créer un losange.

- *la taille* – La variation de la taille du spot a son importance : petite, les différentes positions sont peu corrélées et l'on obtient une sorte de bruit blanc, grande, la superposition des spots est fréquente et aboutit à une apparence fractale d'amas ou d'effilochements.
- *le type de transition* – Le dernier facteur est la fonction de transition choisie entre l'intérieur et l'extérieur du spot. Elle peut être simplement brutale (marche), linéaire (coupe triangulaire) ou gaussienne. Chacune de ces fonctions donne un niveau de détail plus ou moins précis et permet de moduler les résultats.

Dans notre cas, la forme, la taille et la déformation du spot sont directement définies par l'utilisation d'un rectangle englobant qui permet toutes les variations possibles puisque le spot est représenté par un ensemble de points. La fonction de transition est alors explicitée en chaque point du rectangle et peut être de différents types. Par exemple, dans le cas d'une fonction de type "marche", les points appartenant au spot ont pour valeur 1 et les autres, 0. Les points peuvent prendre des valeurs réelles pour simuler des fonctions plus complexes (triangulaire, gaussienne). Outre une optimisation en temps, notre variante de la méthode offre aussi une définition plus facile.

Quelques exemples de textures obtenues par notre variante de la méthode sont présentés avec des spots de formes et de dimensions variées et diverses fonctions de transition. Les figures (6.7) présentent l'influence de la forme et de la taille du spot sur la texture générée. La série de figures (6.8) montre le résultat d'une variation du nombre de positions aléatoires. Les figures (6.9) résultent de l'utilisation de plusieurs fonctions de transitions.

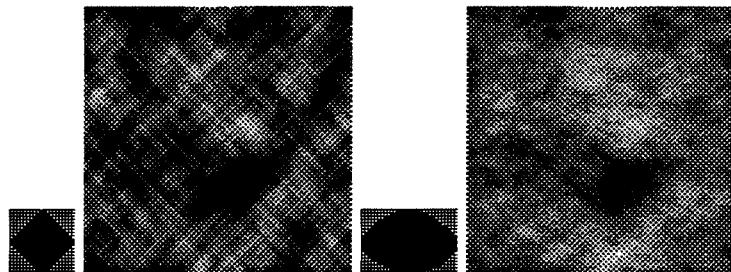


FIG. 6.7 : Spots initiaux et textures engendrées (transition de type marche, nombre de positions = 1000)

6.3.4 Application aux textures naturelles

Il s'agit tout d'abord de déterminer quels sont les différents types de textures qui sont nécessaires. Généralement, la végétation dépend du sol, du climat et de l'altitude de la région considérée et non de la structure sous-jacente des roches. Notre simulation nous a permis de modéliser des paysages d'aspect montagneux, sous l'hypothèse d'un climat semi-tempéré. Il semble alors raisonnable de définir les textures de végétation suivant un étagement fonction de l'altitude.

6.3 – Définition de textures naturelles



FIG. 6.8 : Variation du nombre de positions aléatoires avec 500 positions et 1500 positions (transition de type marche)

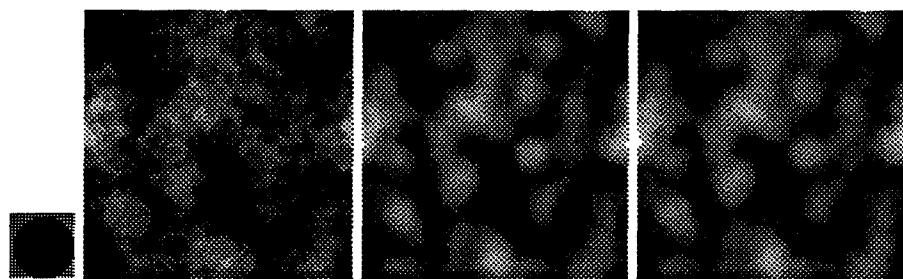


FIG. 6.9 : Utilisation d'une fonction de transition de type marche, triangulaire et gaussienne (nombre de positions = 200)

6.3.4.1 Textures de végétation

Les textures à définir correspondent typiquement aux couverts végétaux des reliefs alpins, soit :

- *plaine et colline de faible altitude,*
- *forêt mixte (conifères et feuillus),*
- *forêt de conifères,*
- *pelouse alpine,*
- *rochers/neige.*

La transition entre ces différents étages se fait à peu près selon des lignes de niveau. Cependant, il faut éviter, du moins à petite échelle, une trop grande impression de régularité. Pour cela, il est possible de jouer sur plusieurs facteurs simulant des variations réelles. La transition entre les végétations de forêts est souvent assez floue, aussi peut-on introduire une frontière plus aléatoire. D'autre part, il est réaliste de restreindre la densité végétale lorsque les zones à texturer présentent de fortes pentes. C'est le cas pour des pentes excédant 40% dans des régions de conifères et de pelouse alpine. Lorsque les pentes dépassent 60%, la végétation se rarifie et laisse apparaître des zones de rochers.

Une texture plane est créée pour chaque zone de végétation par la technique de *spot noise*. Pratiquement, elle correspond à un tableau de couleurs à deux dimensions. La taille

de la texture est fonction de la taille moyenne des faces à texturer. Comme plusieurs textures sont en mémoire en même temps, leurs dimensions doivent rester raisonnables.

Pour la texture de plaine, nous avons choisi un type de spot circulaire, de petite taille avec une nombre important de positions aléatoires et une fonction de transition de type marche. La taille réduite du spot permet d'obtenir un effet assez perturbé. C'est un spot de forme circulaire qui a été choisi pour générer une texture de forêt mixte avec une taille du spot plus importante, un nombre plus restreint de positions aléatoires et une fonctions de transition triangulaire. La texture de forêt de conifères est obtenue par un spot de forme triangulaire avec une fonction de transition de type marche et peu de positions aléatoires. La texture d'alpage est réalisée avec une spot de forme elliptique et une fonction de type triangulaire. La texture de rochers est obtenue par un spot en forme d'arc de cercle qui rend assez bien l'impression de relief avec un nombre important de positions aléatoires.

Il n'y a pas de création de texture pour la neige ; par contre, une texture simulant la surface de l'eau a été générée pour être plaquée sur les facettes du réseau hydrographique. Elle est définie par un spot formé d'une petite vague avec une transition gaussienne.

Pour toutes ces textures, les motifs ont été choisis à la suite d'essais en fonction des textures souhaitées. Les paramètres utilisés pour leur création sont récapitulés dans le tableau (6.1). Les échelles de couleurs correspondent aux teintes que l'on observe généralement dans la nature.

Texture	Taille	Forme du spot	Rectangle	Nb positions	Transition
Plaine	200 × 200	circulaire	10 × 10	5000	marche
Forêt mixte	200 × 200	circulaire	15 × 15	3000	triangulaire
Forêt conifères	200 × 200	triangulaire	15 × 15	3000	marche
Pelouse alpine	200 × 200	elliptique	20 × 20	2000	triangulaire
Rochers	200 × 200	arc de cercle	10 × 10	5000	marche
Eau	20 × 20	vague	5 × 5	200	gaussienne

TAB. 6.1 : Paramètres de création des textures

6.3.4.2 Plaquage des textures

Les textures naturelles ainsi créées sont ensuite plaquées sur les faces du terrain selon leur altitude et leur pente. Rappelons brièvement la technique classique de plaquage et de mise en perspective.

La scène est définie dans un espace 3D de coordonnées (X, Y, Z) , la texture et l'image finale dans un espace 2D de coordonnées respectivement (u, v) et (x, y) . Le plaquage et la mise en perspective de la texture correspondent à un changement de variables dans le domaine spatial. La transformation inverse F transforme un point (x, y) de l'image finale en un point (u, v) de la texture, soient les relations suivantes :

$$F : \mathcal{R}^2 \longrightarrow \mathcal{R}^2$$

6.3 – Définition de textures naturelles

$$(x, y) \longrightarrow (u, v) = (f(x, y), g(x, y))$$

Si l'intensité du point (x, y) de l'image finale est définie par I et celle de (u, v) par T sous leur forme analogique, pour chaque point (x, y) où F est définie, on a :

$$I(x, y) = T(u, v) = T(f(x, y), g(x, y))$$

Par cette relation, l'image finale est représentée sous sa forme analogique. Ceci engendre le phénomène bien connu de l'aliassage puisque cette image est en fait définie sur la grille régulière de la mémoire d'images. Le nombre d'échantillons de l'image finale est fixé par la définition de la mémoire d'images. Il est donc nécessaire d'effectuer un filtrage passe-bas pour éliminer les hautes fréquences non représentables. Nous ne détaillerons pas ici tous les travaux effectués dans le domaine de l'aliassage. Un facteur cependant important à prendre en compte est le taux de compression de la texture. Il résulte d'un élargissement des zones de hautes fréquences de la texture provoquées par la transformation géométrique F .

Traitements de l'aliassage Une technique simple de filtrage simultané a été mise en œuvre. Dans ce cas, les calculs de la transformation F et le filtrage sont effectués en même temps.

La méthode utilisée ([PAGM88]) emploie des sur-échantillonnages locaux. L'image inverse des quatre voisins du pixel (i, j) de l'écran correspond dans l'espace de la texture aux sommets d'un quadrilatère. Ce quadrilatère est formé d'un ensemble de sous-pixels et approximé par un rectangle englobant. L'intensité du pixel (i, j) est alors obtenue par la moyenne des intensités de l'ensemble des sous-pixels en pondérant chacune par la fraction du sous-pixel appartenant au quadrilatère (figure 6.10). Lorsque l'image inverse du pixel (i, j) correspond à un pixel de la texture, ce calcul n'est pas effectué.

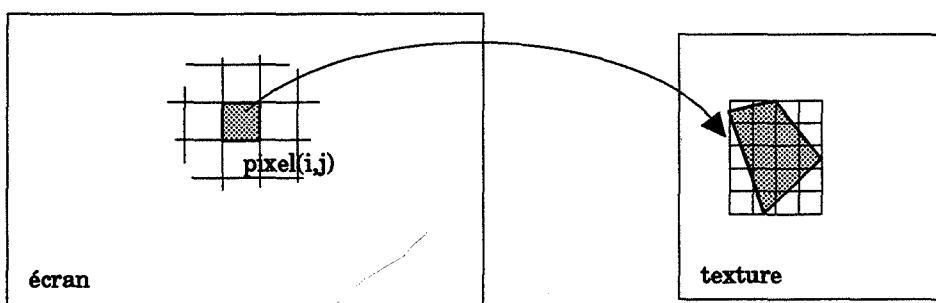


FIG. 6.10 : Traitement de l'aliassage par sur-échantillonnage

Mélange de textures Le plaquage de telle ou telle texture de végétation sur les facettes du terrain est effectué, sauf pour les facettes du réseau, en fonction de l'altitude de chacun des points les constituant. Lorsque la pente de la face à texturer est forte (supérieure à 60 degrés), il y a plaquage d'une texture de rochers.

Il est donc nécessaire de définir des seuils d'altitude qui permettent de séparer les différents étages de végétation et de rochers. L'altitude de chacun des points affichés est calculée au cours de la phase d'interpolation du z-buffer. Ces seuils sont fixés par l'utilisateur et peuvent être étalonnés en fonction de l'altitude maximale du terrain afin de varier les textures même pour un relief peu accentué.

Un tel choix implique évidemment des frontières brusques entre les différentes zones. Il peut être légèrement réduit en modulant par un facteur aléatoire le choix de telle ou telle texture à la frontière de deux étages. Pour diminuer encore plus cet effet, nous avons mis en œuvre une technique de mélange de textures.

Elle est effectuée lors du calcul de la couleur de chaque point écran (i, j) appartenant à une facette (ici, un triangle). Il faut alors connaître si le point P dans le monde, correspondant au pixel (i, j) appartient à un triangle *homogène* ou non. Un triangle est considéré comme *non homogène* s'il contient la frontière de deux (ou plusieurs) zones, i.e. si ses sommets A , B et C (dans le repère du monde) n'appartiennent pas à un même étage. Ce calcul est effectué une seule fois, avant le calcul des intensités, et permet d'éviter le mélange de textures si le triangle est homogène.

Si le point P (de coordonnées x, y dans le repère écran) appartient à un triangle contenant une frontière, on détermine alors les trois valeurs de texture en ce point P dans les trois textures correspondant aux étages respectifs des trois sommets (le plus souvent, seules deux textures sont concernées). La valeur de texture finale est alors donnée par la somme pondérée suivante :

$$T_P(x, y) = \alpha T_A(x, y) + \beta T_B(x, y) + \gamma T_C(x, y)$$

Les valeurs de α, β, γ correspondent à la proportion d'intensité contribuant à la couleur du point. Elles sont définies comme les distances relatives de P avec les trois sommets (figure 6.11).

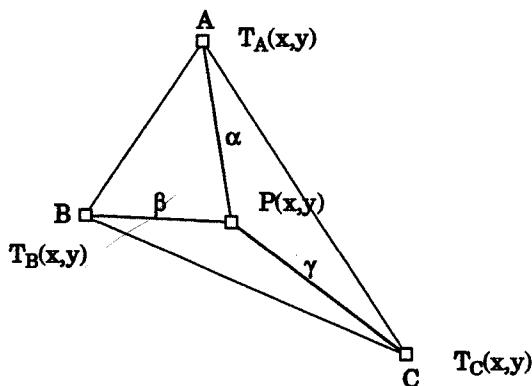


FIG. 6.11 : Calcul de l'intensité d'un point appartenant à un triangle non homogène

Cette technique pourrait être améliorée en utilisant un calcul incrémental pour déterminer l'intensité de P , ce qui réduirait les temps de calcul. Cette optimisation n'a pas été

6.4 – Quelques effets visuels

effectuée pour l'instant car le nombre de triangles non homogènes est en fait assez réduit par rapport au nombre total de faces.

6.4 Quelques effets visuels

L'importance donnée à l'aspect réaliste et aux détails implique une simulation de phénomènes naturels. C'est surtout le cas pour des images de scènes d'extérieurs comme les paysages. Les nombreuses recherches effectuées dans ce domaine permettent de synthétiser de façon satisfaisante certains de ces phénomènes [CBG⁺83]. L'image d'un paysage peut apparaître encore plus réaliste en ajoutant quelques effets visuels. En particulier, on peut visualiser une vue du terrain avec une coupe des couches du sous-sol, un peu comme sous la forme d'une maquette. Il est aussi possible de vouloir une vue plus rasante du paysage, de type "survol". Dans ce cas, la simulation d'un ciel et un effet de bleu atmosphérique est souhaitable.

6.4.1 Visualisation des coupes

Comme la création du paysage s'appuie sur une simulation de processus agissant sur une surface et son sous-sol, il peut être intéressant de visualiser la structure des couches. La visualisation du relief reste identique mais elle est complétée par la vue des coupes du terrain. Il faut alors générer un ensemble de triangles représentant une coupe (pour utiliser l'algorithme du tampon de profondeur).

Pour chaque noeud des bords, une liste de points est ainsi créée puis les points situés sur deux verticales voisines sont reliés pour former des triangles (figure 6.12). Le nombre de points est déterminé par l'altitude minimale de la coupe et par la taille des triangles. Nous choisissons le pas Δz constant et d'une valeur proche à la taille de la maille de la surface. Ainsi les nouveaux triangles sont du même ordre de grandeur que ceux du relief. Lorsque, entre deux noeuds voisins d'un même bord, la différence d'altitude est grande, les triangles créés par les points situés à leur verticale, présentent un aspect allongé.

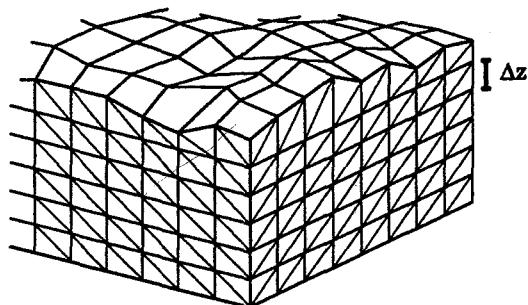


FIG. 6.12 : *Création des triangles constituant les coupes du terrain*

La couleur des points d'un triangle résulte, soit de l'interpolation linéaire des couleurs des sommets soit d'un calcul spécifique (donc plus précis). En fonction des coordonnées

de chaque point, on détermine la couche du modèle volumique à laquelle il appartient. La méthode employée est la même que celle utilisée pour déterminer les coefficients géologiques des noeuds de la surface (en appliquant la suite des transformations inverses, voir paragraphe 4.2.2.2). Suivant le type de roche, une certaine couleur¹ sera attribuée au point.

Pour simplifier les calculs et éviter un stockage supplémentaire de données, seuls les triangles des bords visibles sont calculés. Par ailleurs, les sommets des nouveaux triangles ont pour normale celle de la face. Cela ne pose pas de problème lorsque la surface est définie par une grille carrée car tous les triangles d'un même bord présentent une direction de normale identique. Mais, lorsque la surface est de maille hexagonale, les points situés sur les bords “ouest” et “est” ne sont pas alignés. Il en résulte une discontinuité de luminosité à la frontière de deux rangées voisines de triangles.

Pour pallier cet inconvénient, nous modifions la surface de maille hexagonale afin d'obtenir des bords rectilignes. Les coordonnées en X des points des lignes impaires du bord ouest sont recalées à 0 ; celles des points des lignes paires du bord est sont recalées à $H - 1$ (H est la taille de la grille en X).

Les photos (C.2, C.3) en annexe C présentent deux exemples de relief (de maillage hexagonal) avec représentation des coupes du terrain. On note que la définition et l'agencement des couches correspondent à la structure du relief.

6.4.2 Ciel, neige et bleu atmosphérique

Quelques effets visuels ont été ajoutés.

Ciel Il peut s'agir simplement d'un fond de l'image en dégradé de bleu et tel que la valeur minimale corresponde à l'horizon. Ceci implique une vue assez proche du paysage pour qu'il occupe totalement le premier plan de l'image et qu'il présente une ligne d'horizon complète.

Une texture de ciel nuageux peut être aussi utilisée. Elle correspond à un plaquage sur un polygone situé en arrière plan d'une texture 2D calculée avec la méthode de spot noise expliquée précédemment. Le motif utilisé est une ellipse plus ou moins allongée et le nombre de positions aléatoires est variable.

Neige Lorsque le paysage présente des montagnes escarpées, il est possible de simuler un couvert de neige à la place d'une texture de végétation ou de rochers. La neige n'est pas représentée par une texture et aucun mélange de couleurs n'est effectué entre deux couverts différents. Ceci permet de simuler un effet de superposition sur le couvert existant. L'attribution d'une couleur de neige est modulable en fonction de l'altitude, de la pente et de l'exposition de la facette (plus de neige sur les versants non exposés au soleil).

¹Par choix, les couleurs des roches suivent un dégradé du marron au beige, en fonction de leur résistance à l'érosion mécanique ; les couches plutôt sensibles à l'érosion chimique sont de couleur grise

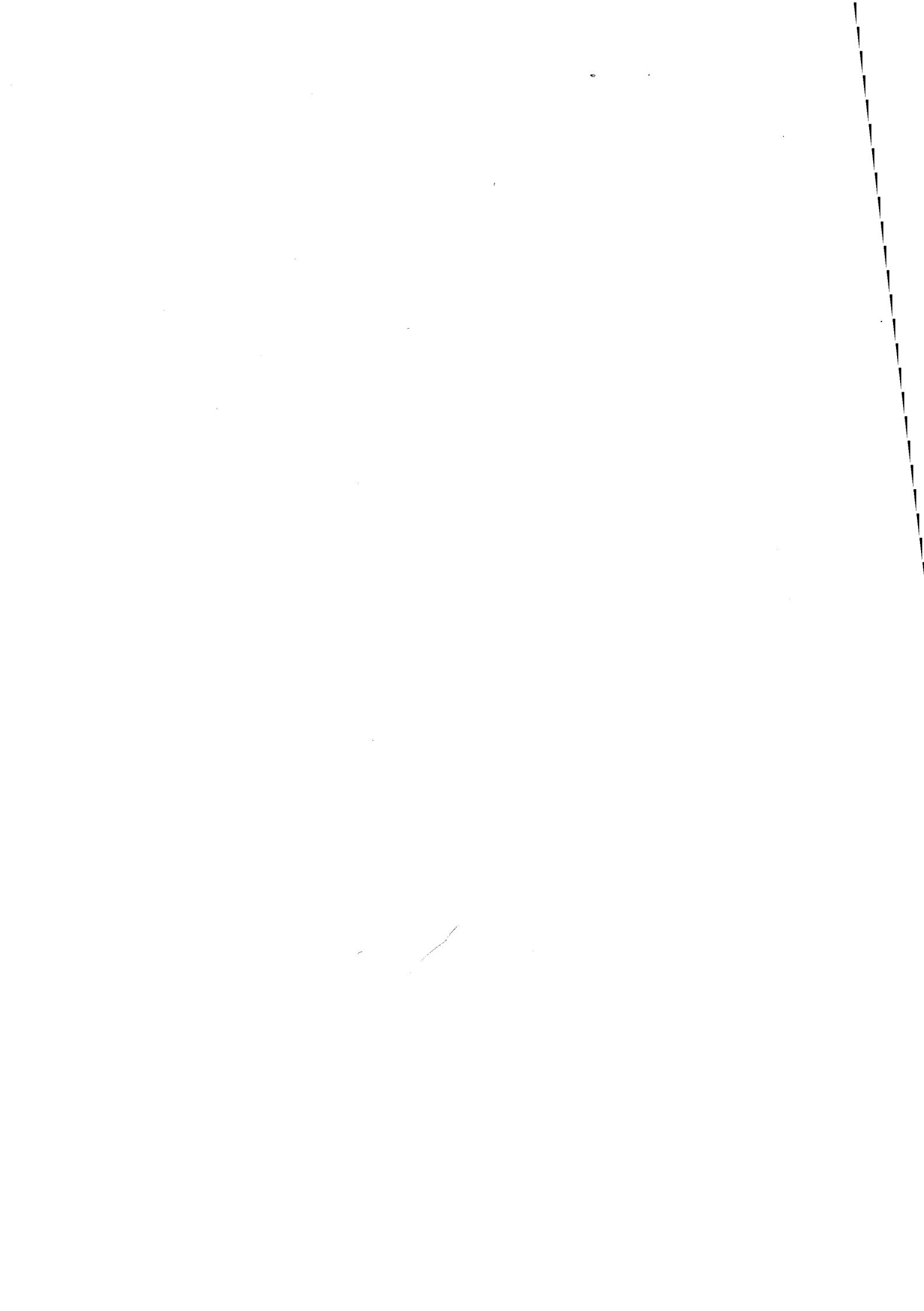
6.5 – Conclusion

Bleu atmosphérique Il rend une impression de profondeur au paysage en atténuant l'intensité des couleurs en fonction de la distance à l'observateur. La proportion d'atténuation peut être une fonction linéaire ou exponentielle selon l'effet recherché. L'ajout de bleu à l'intensité des pixels des faces éloignées permet de simuler l'épaisseur de l'air; l'ajout de blanc simule plutôt un effet de brume ou de flou dans le lointain.

6.5 Conclusion

Nous venons d'exposer les techniques utilisées pour la visualisation réaliste des paysages obtenus par notre simulation. A partir d'un algorithme simple de rendu, nous avons cherché à accentuer le réalisme des images en effectuant la visualisation du réseau et des lignes de crête, le plaquage de textures et l'ajout d'effets visuels.

Les photos (C.4, C.5, C.6) en annexe C présentent des vues de paysages illustrant le résultat de ces réalisations. En particulier, on peut distinguer des vues de terrains avec la coupe de leurs sous-sols associés (C.2, C.3), des paysages plus ou moins escarpés, avec visualisation éventuelle du réseau ainsi que des lignes de crête, ajouts de neige et autres effets visuels.



Le tracé de rayons

7

Nous venons de décrire dans le chapitre précédent les techniques mises en œuvre pour une visualisation réaliste des paysages créés par notre modèle. Même si un certain soin a été apporté pour accentuer l'authenticité du rendu (textures, visualisation du réseau hydrographique et des lignes de crêtes,...), certains effets ne sont pas simulés. On pense en particulier aux effets que peuvent apporter une visualisation par tracé de rayons : réflexion sur les zones de neige et sur les faces du réseau et ombres portées. Il semble alors intéressant de permettre ce type de visualisation pour simuler de tels effets.

Ce chapitre traite d'une telle application. Le résultat de ces travaux s'inscrit dans un travail existant réalisé sur le tracé de rayons par Roelens [Roe93]. Ceci permet de compléter la version disponible en ajoutant la représentation de terrains ; d'autres applications peuvent être envisagées utilisant la visualisation d'un paysage de fond (incrustations de bâtiments). Les idées principales ont été dégagées des travaux effectués par Coquillart [Coq84] sur la représentation de paysages par tracé de rayons.

Nous allons d'abord exposer les principes fondamentaux du tracé de rayons qui est sous-jacent à notre application. Les nombreux travaux effectués dans le domaine ne seront pas décrits ; un état de l'art complet est disponible dans [PAGM88]. Ensuite nous expliquerons la méthode utilisée pour la représentation de paysages et nous proposerons une extension possible pour la visualisation des terrains définis par une grille hexagonale. Les effets de rendu (textures, lignes de crête, réseau...) seront aussi abordés.

7.1 Présentation générale

Le tracé de rayons connaît un fort développement depuis les travaux précurseurs de Whitted [Whi80] où il présentait des images très réalistes créées par cette méthode (effets de réflexions multiples, de réfractions et d'ombres). Le nombre et la qualité des effets

visuels restitués place cette technique en tête des méthodes utilisées pour la création d'images de synthèse [Gla89]. En contrepartie, elle demande d'importants temps de calcul dont l'optimisation est le sujet de nombreuses études que nous n'aborderons pas ici.

7.1.1 Principe de l'algorithme

Le tracé de rayons fait partie des méthodes d'élimination des parties cachées travaillant dans l'espace objet. L'idée repose sur le fait qu'un observateur voit un objet grâce à la lumière émise d'une source et arrivant sur l'objet. Cette lumière peut parvenir à l'observateur après réflexion, réfraction ou transmission. Si on trace alors les rayons émis par la source, peu d'entre eux arrivent jusqu'à l'œil. L'originalité de la méthode consiste donc à reproduire le trajet de la lumière à l'intérieur d'une scène, dans le sens inverse de son parcours (figure 7.1).

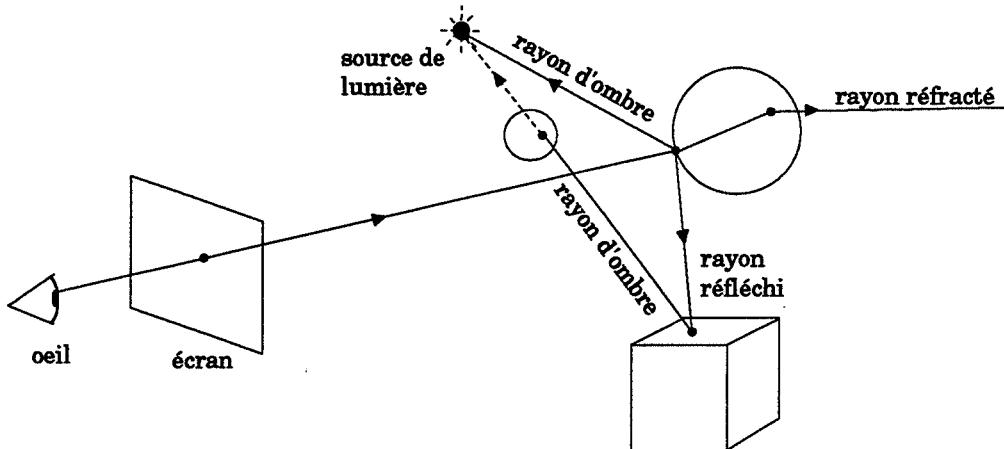


FIG. 7.1 : Principe du tracé de rayons

On définit un rayon lumineux partant de l'œil et traversant un point de l'écran et on détermine quels sont les objets intersectés par ce rayon. Ces objets sont ordonnés selon leur distance respective à l'œil, ce qui permet de trouver le point le plus proche. On calcule alors l'éclairement en ce point en relançant des rayons vers les sources lumineuses. Ces rayons d'ombre permettent de déterminer la contribution de chaque source lumineuse à l'éclairement du point et de détecter les ombres portées.

Lorsque la surface de l'objet est réfléchissante ou réfractante, des rayons dits secondaires sont lancés dans des directions décrites par les lois physiques correspondantes. À leur tour, ces rayons peuvent engendrer d'autres rayons secondaires ou des rayons d'ombre. L'ensemble des rayons générés pour un pixel de l'écran est alors représenté par un arbre de rayons limité à une certaine profondeur.

Pour déterminer la couleur de chaque pixel, on somme alors les intensités lumineuses contribuant à l'éclairement de cette zone de l'image. Elle dépend des propriétés de la surface en ce point, de l'éclairement direct des sources lumineuses ou indirect provenant

7.1 – Présentation générale

des objets réfléchissants. Les effets les plus souvent réalisés sont les ombres portées, les réflexions multiples et les transparences avec réfraction. Plusieurs modèles d'éclaircement sont utilisables pour effectuer cette étape de calcul. On distingue en général les modèles locaux traitant du comportement de la lumière à la surface de l'objet et les modèles globaux traitant les effets d'interréflexions entre les sources lumineuses et les différents objets.

Algorithme D'une façon schématique, l'algorithme se résume ainsi :

```
Pour chaque pixel de l'écran faire
    définir le rayon œil-pixel
    pour chaque objet de la scène faire
        tester les intersections rayon-objets
        prendre la plus proche des intersections
        lancer des rayons vers les sources lumineuses
        calculer l'éclaircement du point d'intersection
        affecter la couleur au pixel
    fin pour
fin pour
```

Cette technique paraît très simple et permet de prendre en compte de nombreux phénomènes d'optique. Elle nécessite cependant deux étapes importantes de calcul : les calculs d'intersection entre un rayon et les objets et les calculs d'intensité. Les premiers sont les plus coûteux en temps et augmentent avec la complexité de la scène. L'optimisation des procédures d'intersection est donc primordiale ; elle utilise souvent la cohérence de l'image ou la cohérence des objets. Globalement, la première revient à réduire le nombre de pixels étudiés, la deuxième cherche à minimiser le nombre d'objets à considérer.

La définition de la scène est aussi importante pour assurer un bon déroulement de l'algorithme. Contrairement à la plupart des techniques d'élimination des parties cachées, une description en faces planes n'est pas souhaitable. Il est plus efficace de décrire la scène comme un ensemble d'objets simples et d'associer un calcul d'intersection pour chaque objet élémentaire. Une des structures bien appropriée est une modélisation par *arbre de construction*.

Arbre de construction Une modélisation par arbre de construction (*CSG*) est constituée d'un ensemble de primitives, de transformations géométriques et d'opérations booléennes :

- un nœud est une opération ensembliste de type réunion, intersection ou différence,
- une feuille est un objet élémentaire comme une sphère, un cube, un cylindre, un cône, etc.

Chaque objet est constitué d'une primitive (objet unitaire) définie dans un repère local et d'une matrice linéaire 4×4 permettant la transformation des points de l'objet dans le

repère de la scène. Pour calculer l'intersection entre le rayon et un objet, le rayon est le plus souvent transformé dans le repère local de l'objet, plutôt que de transformer l'objet dans le repère de la scène. Le calcul de l'intersection avec un objet composite (défini par un arbre de construction) est réduit récursivement à celui de l'intersection avec un objet élémentaire.

D'autre part, cette modélisation permet d'associer des volumes englobants aux nœuds de l'arbre et ainsi de réduire le nombre de tests d'intersections.

7.1.2 Tracé de rayons existant

Comme nous l'avons souligné, la représentation des terrains par tracé de rayons s'effectue sur un environnement déjà existant. Nous allons donc exposer brièvement les grandes lignes et les particularités de cet environnement. Tous les détails sont consultables dans [Roe93].

Modélisation par arbre de construction L'environnement utilise un modèle de description des scènes sous forme CSG. La particularité importante du modèle est pouvoir réutiliser les objets, une fois ceux-ci définis (*nommage*). Ceci permet de simplifier l'étape de modélisation et permet la création d'une bibliothèque d'objets. L'arbre de construction se représente plutôt comme un graphe sans circuit. Les objets sont volumiques et possèdent des propriétés géométriques et des attributs volumiques ou surfaciques (couleur, densité, textures). Par ailleurs, des objets particuliers dits *neutres* peuvent être définis (objets transparents, primitives de lumière).

Séparation de la géométrie et des caractéristiques du rendu Un des principes importants est le fait de dissocier la géométrie du modèle et les informations de rendu. Ceci permet de bénéficier des avantages suivants : le processus de modélisation est simplifié puisque les deux composants sont indépendants et le même intersecteur géométrique peut être utilisé pour des calculs de rendu variés (une mise au point progressive des images est alors possible).

Utilisation d'englobants généralisés Pour réduire les temps de calcul, le module d'intersection utilise des boîtes généralisées comme englobants permettant ainsi d'évaluer la probabilité des objets à intersecer un rayon. Chaque boîte est définie comme l'intersection de trois *tranches d'espace*, chacune correspondant à la partie de l'espace comprise entre deux plans parallèles. La définition et le stockage de tels englobants est simple et la fonction de calcul d'intersection s'approche de celle utilisée pour un cube. La notion d'utilité de boîte englobante permet de réduire le nombre de tests ; elle dépend du chemin d'accès dans l'arbre et est notée pour chaque nœud.

Algorithme générique de rendu L'auteur propose une unification des méthodes de rendu dans le but de pouvoir utiliser successivement (ou en simultané) plusieurs modèles diffé-

rents. Pour effectuer ce changement de façon dynamique, un seul modèle est préférable, en définissant des fonctions génériques de rendu. Celui-ci est réalisé en utilisant les données calculées par l'intersecteur (liste d'intervalles par rayon). Il s'appuie sur la notion d'énergie comme une interprétation des caractéristiques des objets.

L'environnement ainsi développé permet de multiples extensions du fait de sa grande modularité au niveau de la géométrie et du traitement du rendu. Il est alors possible d'ajouter des procédures d'intersection pour de nouveaux objets, soit, en ce qui nous concerne, pour la représentation des terrains simulés.

7.2 Représentation des terrains

Il s'agit donc d'étudier la procédure calculant l'intersection d'un rayon avec un terrain. Dans notre cas, le terrain est représenté sous forme de grille altimétrique. Généralement, la surface du terrain à l'intérieur d'une maille de la grille peut être modélisée par deux triangles ou par une surface gauche. L'une ou l'autre de ces descriptions est désignée par le terme de *facette*. La méthode la plus simple est alors de tester le rayon avec toutes les facettes constituant le terrain. Pour une définition d'une grille en $N \times N$, l'évaluation de l'algorithme, en $O(N^2)$, se révèle très inefficace.

L'algorithme proposé par Coquillart est en $O(N)$ pour les tests d'intersection avec une facette. Il utilise la cohérence des données du terrain pour effectuer certaines optimisations. En raison de son efficacité et pour son adéquation au problème, nous avons choisi cette solution. Nous allons présenter un peu plus en détail cette méthode ; elle est entièrement expliquée dans [Coq84].

7.2.1 Intersection avec une grille altimétrique

La première optimisation utilise la régularité de la grille pour déterminer incrémentalement les mailles traversées. Si l'on considère la projection du rayon sur le plan de la grille, le rayon ne peut alors intersecter que les facettes des mailles traversées par sa projection. Il suffit donc de tester ces facettes en déterminant les mailles traversées par la projection du rayon. Ceci est effectué par une variante de l'algorithme de Bresenham. La méthode peut être étendue aux rayons secondaires.

La deuxième optimisation proposée par l'auteur suppose que le terrain modélisé ne possède pas de surplombs. Dans ce cas, les verticales dans le repère du monde restent verticales dans le repère de l'image ; autrement dit, la direction de vue est horizontale ou est oblique avec un point de vue situé à l'infini.

Soient un plan vertical V passant par le rayon primaire d'un pixel (i, j) et P le premier point d'intersection entre le rayon et le terrain, le rayon primaire pour $(i, j+1)$ a la même projection que le rayon précédent. Il appartient au plan V défini et son premier point d'intersection P' se trouve alors toujours "plus loin" que P par rapport à l'œil (P' se trouve soit sur la même facette que P , soit encore plus loin). Ce résultat permet l'optimisation suivante : pour chaque colonne de l'image, les pixels sont traités de bas en haut et les rayons primaires sont lancés à partir de la dernière facette intersectée.

Nous allons nous intéresser plus spécialement à la première optimisation car c'est ce principe que nous allons appliquer à une description hexagonale du terrain.

7.2.1.1 Grille carrée

On considère, pour un rayon, seulement les mailles de la grille contenues entre la projection du rayon sur $z = 0$ et le premier point d'intersection. La liste ordonnée des mailles est calculée par un algorithme de Bresenham modifié. Quelques points sont à prendre en compte : le rayon est défini par son origine et sa direction (on ne dispose donc pas d'un segment), tous les éléments de grille traversés doivent être considérés et les coordonnées des points d'entrée et de sortie du rayon dans la maille doivent être calculés. La figure (7.2) illustre le processus de sélection des mailles.

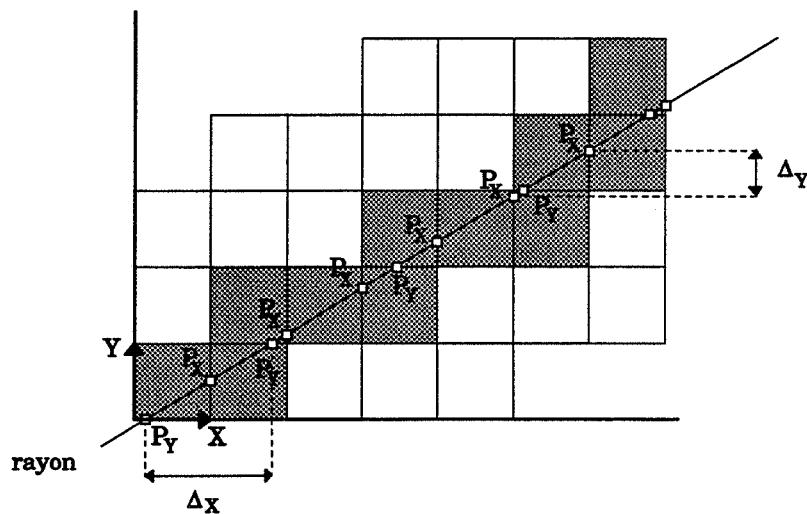


FIG. 7.2 : Détermination des mailles de la grille traversées par le rayon

En premier lieu il s'agit de déterminer l'intersection du rayon projeté avec une première maille. Si l'origine du rayon appartient à la grille, alors la première maille est celle contenant l'origine ; sinon, on calcule la première intersection du rayon avec les bords de la grille (seuls les deux bords délimitant la zone contenant l'origine sont utiles).

Puis on cherche les points d'intersection du rayon avec les côtés de la maille déterminée, soit :

- P_X le point d'intersection avec le côté parallèle à l'axe Y ,
- P_Y le point d'intersection avec le côté parallèle à l'axe X .

Ces deux points définissent les points d'entrée et de sortie du rayon dans la maille ; sur notre exemple P_Y correspond au premier point et P_X au point de sortie (ce pourrait être l'inverse).

7.2 – Représentation des terrains

Les éléments susceptibles d'être intersectés par le rayon sont déterminés incrémentalement en propageant les points P_X et P_Y le long du rayon. A chaque étape, on translate le premier des points P_X ou P_Y de la façon suivante :

- P_X se déplace du vecteur $D_X = (1, \Delta_X)$,
- P_Y se déplace du vecteur $D_Y = (\Delta_Y, 1)$,

avec :

- $\Delta_X = P$, la pente du rayon projeté (déplacement en X correspondant à un déplacement en Y),
- $\Delta_Y = \frac{1}{P}$ (déplacement en Y correspondant à un déplacement en X).

Si on part du point P_X , l'élément suivant est celui qui lui est adjacent en X , dans le cas contraire c'est la maille adjacente en Y . Ainsi, les couples successifs des points P_X et P_Y définissent l'ensemble des mailles traversées. Pour chacune d'elles, on effectue alors un test et un calcul d'intersection.

Test et calcul des intersections Le calcul devant être très souvent réalisé, le modèle de surface doit permettre des tests rapides. C'est le cas de notre application où la surface d'un élément de grille est définie par deux facettes triangulaires planes (plan contenu par trois des sommets). La simplicité de ce modèle permet une extension plus cohérente à la grille hexagonale. La figure (7.3) illustre la méthode.

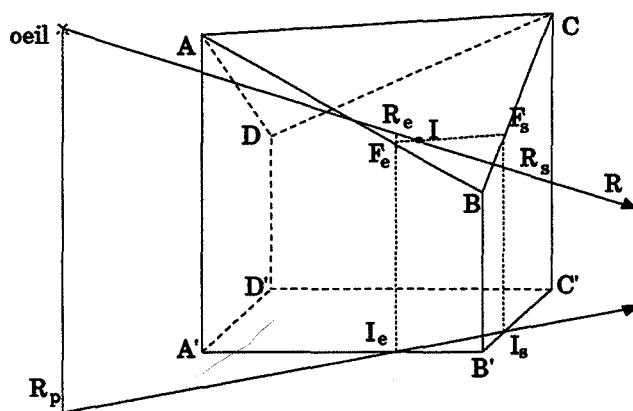


FIG. 7.3 : Intersection entre le rayon courant et une face

On note R_p la projection du rayon courant R sur le plan $z = 0$, (A, B, C, D) la surface intersectée, formée des triangles (A, B, C) et (A, C, D) et (A', B', C', D') sa projection.

```

    si  $R_p$  intersecte  $(A', B', C')$  alors
        on dispose des points  $I_e$  et  $I_s$  d'entrée et de sortie de  $R_p$ 
        on détermine les points  $R_e$  et  $R_s$  appartenant à  $R$  qui se projettent en  $I_e$  et  $I_s$ 
        et les points  $F_e$  et  $F_s$  appartenant à  $(A', B', C')$  qui se projettent en  $I_e$  et  $I_s$ 
        si  $F_e(z) < R_e(z)$  et  $F_s(z) > R_s(z)$  ou  $F_e(z) > R_e(z)$  et  $F_s(z) < R_s(z)$  alors
            le point d'intersection  $I = [R_e, R_s] \cap [F_e, F_s]$ 
        fin si
    fin si

```

Nous venons de voir comment déterminer incrémentalement les différentes mailles d'une grille carrée traversées par un rayon courant. Sur le même principe, nous proposons dans le cas d'une grille hexagonale, l'extension suivante.

7.2.1.2 Extension à la grille hexagonale

Le problème du tracé d'une ligne droite sur une grille hexagonale a déjà été étudié [Liu93] et pourrait être appliqué à notre cas pour déterminer les hexagones parcourus par le rayon. Cependant il est ensuite nécessaire d'effectuer un test d'intersection avec les six triangles constituant l'hexagone courant. Il est plus efficace de chercher à déterminer directement la suite des triangles traversés.

Pour cela, nous travaillons dans un repère particulier permettant un parcours incrémental de maille en maille (quadrilatère formé par deux triangles), illustré par la figure (7.4).

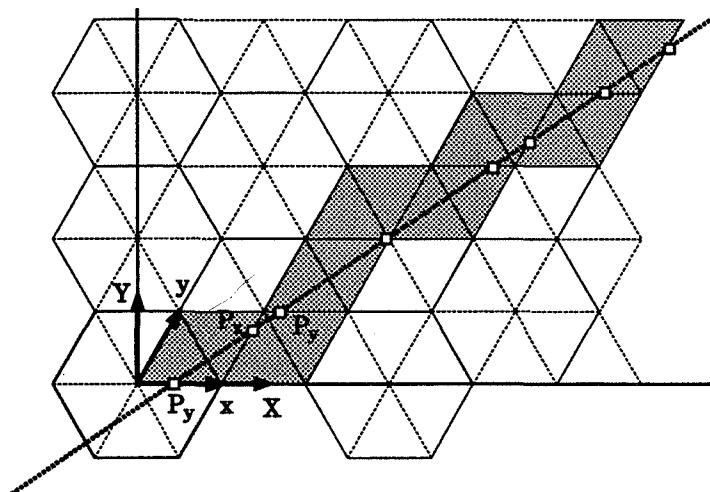


FIG. 7.4 : Détermination des mailles d'une grille hexagonale traversées par le rayon

Soient (X, Y) les coordonnées dans le repère cartésien et (x, y) celles dans le nouveau

7.3 – Conclusion

repère, les formules de changements de repère sont :

$$\begin{cases} x = X + \frac{1}{2}Y \\ y = \frac{\sqrt{3}}{2}Y \end{cases} \quad (7.1)$$

$$\begin{cases} X = x - \frac{1}{\sqrt{3}}y \\ Y = \frac{2}{\sqrt{3}}y \end{cases} \quad (7.2)$$

La première solution consiste à transformer tous les points de la grille dans ce nouveau repère, appliquer la technique de parcours incrémental en utilisant des déplacements D_x et D_y calculés dans le repère (x, y) et effectuer la transformation inverse. En fait, une solution plus rapide revient à déterminer des déplacements D_X et D_Y dans le repère habituel tels qu'ils permettent directement un parcours sur la grille hexagonale. Ils sont calculés de la façon suivante.

Soit P la pente du rayon dans (X, Y) , on calcule la pente p dans (x, y) en appliquant le système (7.1). On obtient :

$$p = \frac{P\sqrt{3}}{2+P}$$

Dans le repère oblique, les vecteurs de déplacements sont alors définis par :

$$\begin{aligned} D_x &= (1, p) \\ D_y &= \left(\frac{1}{p}, 1\right) \end{aligned}$$

Le système (7.2) permet alors de déterminer les déplacements à appliquer aux points P_X et P_Y dans le repère initial :

$$\begin{aligned} D_X &= \left(1 + \frac{p}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}p\right) \\ D_Y &= \left(\frac{1}{p} + \frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \end{aligned}$$

Pour chaque maille traversée, le test et le calcul d'intersection se fait selon le même principe que pour une maille carrée en considérant les deux triangles la constituant.

7.3 Conclusion

Nous venons de présenter les principes d'une visualisation des reliefs simulés par l'algorithme du tracé de rayons et en particulier, le calcul de l'intersection entre un rayon et une primitive de type terrain. Une fois ce calcul effectué, le rendu est réalisé par l'algorithme générique disponible. Pour l'instant, cette deuxième étape n'a pas été encore appliquée, néanmoins voici les points à prendre en compte.

Au niveau des textures, l'algorithme de rendu permet l'utilisation de textures surfaciques ou volumiques. Elles correspondent à une propriété de l'objet et ne dépendent que de la position du point de l'objet à texturer. Elles servent à créer ou à modifier les paramètres suivants : la normale à la surface de l'objet (textures surfaciques) ou la couleur de l'objet (textures surfaciques ou volumiques). Le plaquage des textures tel qu'il a été défini précédemment (6.3.4.2) est facilement réalisable puisqu'une fois les structures de textures créées, seules les positions des points où elles sont calculées sont nécessaires.

La visualisation des lignes de crête est effectuée en conservant l'information de normales différentes en certains sommets de la grille. Pour cela, le calcul des normales n'est pas réalisé au niveau du calcul d'intersection mais les normales sont directement disponibles dans la définition de la grille. En ce qui concerne le réseau hydrographique, il n'est pas actuellement intégré dans la primitive terrain aussi est-t-il traité comme un ensemble de triangles.

Par ailleurs, l'algorithme de rendu permet de fournir un certain nombre d'effets visuels. En particulier, il est possible de visualiser les ombres portées pouvant exister dans le cas de reliefs escarpés. Les effets de réflexion sont aussi envisageables sur les zones de neige en utilisant un modèle un peu plus complexe. Enfin, les effets de flou et de bleu atmosphérique et un fond de ciel sont faciles à mettre en œuvre.

Conclusion

Dans ce rapport, nous avons présenté les résultats de notre étude sur la synthèse de paysages par simulation dynamique de processus géologiques. Nous avons distingué la création des reliefs par une nouvelle modélisation qui est le cœur de l'étude et la représentation réaliste de ces reliefs par des techniques adaptées.

Nous avons d'abord expliqué les principes et les fonctionnements de ce nouveau modèle pour la génération de terrains. Il s'appuie sur une structure géologique des surfaces et sur une simulation de processus géologiques déterministes. L'originalité réside dans la modélisation géologique des terrains et dans la simulation des phénomènes naturels de l'érosion et de la sédimentation. Un terrain est modélisé sous forme de grille altimétrique (carrée ou hexagonale) associé à un sous-sol défini par un modèle géologique volumique. Les différents processus sont simulés par des équations traduisant les effets d'écoulement et de transport de matière ; ils agissent en fonction des caractéristiques géologiques de la surface et par le biais du réseau hydrographique qui est le graphe de base.

Les résultats obtenus avec cette modélisation sont encourageants car ils reflètent bien ce que l'on observe dans la nature malgré la complexité des phénomènes. Les reliefs présentent un aspect tout à fait naturel du point de vue géologique et corroborent les différentes lois du modèle. L'avantage de cette méthode est de permettre une grande diversité au niveau des reliefs possibles en variant les définitions des sous-sols. Peu d'itérations sont nécessaires pour obtenir rapidement des dénivélés conséquents et il est inutile de générer des reliefs initiaux complexes. Par ailleurs, la mise en œuvre de la simulation s'effectue d'une façon très intuitive. Un paramétrage simple des données permet de nombreuses variations. Il faut noter que l'approche très géologique de notre modélisation a demandé une étape assez longue d'études et de tests.

D'autre part, cette simulation peut être utilisée d'un point de vue strictement géologique dans le but de mieux comprendre et de vérifier l'action de certains phénomènes. Certaines conditions doivent cependant être vérifiées. La première est de préciser quelle est l'échelle de temps (nombre d'années) impliquée par les différents paramètres. Il faut pour cela comparer les résultats produits par le modèle et des résultats de terrains obtenus dans des conditions à peu près similaires. Ce point est sans aucun doute difficile à traiter. La deuxième condition est d'ajuster plus finement les lois d'érosion utilisées en comparaison avec des résultats de terrain. Enfin, il serait nécessaire de définir les paramètres de la simulation en fonction de mesures effectuées sur le terrain or une telle quantification n'est pas facile à réaliser. Comment, par exemple, évaluer de manière fiable, les quantités

d'eau ruisselée sur une pente ?

Après l'étape de modélisation, nous nous sommes intéressés à une visualisation réaliste des reliefs simulés. Les algorithmes utilisés pour la représentation des reliefs sont classiques en synthèse d'images. Ils permettent d'obtenir de bons résultats car ils sont bien adaptés à notre objectif. Certains points plus particuliers ont été considérés pour accroître le réalisme des images. Il s'agit de la génération de textures de végétation, de la visualisation du réseau hydrographique et des lignes des crêtes et de l'ajout d'effets visuels.

La visualisation du relief triangulé est effectué par l'algorithme du tampon de profondeur incluant une technique de lissage. Les lignes de crêtes présentes dans le relief sont simulées par un éclairage particulier. L'aspect de végétation est donné par un plaquage de textures planes suivant un étagement du couvert végétal de type alpin. Pour atténuer les frontières entre les différentes zones, un mélange de textures est réalisé. La création des textures est réalisée par une méthode de spot noise optimisée qui permet une génération facile et variée des textures.

La visualisation du réseau hydrographique est effectuée par création de facettes sur les lignes polygonales du relief représentant les cours d'eau. Une technique de lissage permet d'obtenir des tracés plus ou moins courbes selon l'importance de chaque affluent. Des effets visuels sont simulés comme un couvert de neige et de rochers, un ciel nuageux et un flou dans le lointain.

Enfin, nous avons exposé les principes d'une visualisation par la technique du tracé de rayons sur une réalisation existante et en particulier le calcul d'intersection d'un rayon avec le terrain. Nous avons présenté une extension à une représentation hexagonale du relief et montré que les différents effets réalistes peuvent être simulés.

Quelques applications et extensions sont envisageables. On peut citer :

- concernant la simulation, la formalisation de processus géologiques plus complexes au niveau de l'érosion fluviale ou d'un autre type d'érosion. On peut penser à l'érosion glaciaire, même si une telle simulation paraît complexe.
- l'application du processus de simulation sur des reliefs existants. Cette possibilité ne pose pas de problème dans le principe si ce n'est qu'elle requiert de disposer des caractéristiques géologiques réelles des points numérisés pour appliquer efficacement les lois de la simulation. Ceci sous entend une étude cartographique de la zone à représenter ainsi que la définition d'un modèle géologique volumique du sous-sol, ce qui, à l'heure actuelle, pose de nombreux problèmes.
- la définition d'un maillage adaptatif pouvant être utilisé dans l'étape de modélisation et de visualisation. Le maillage serait lié à la forme du relief : des mailles larges pour les zones vallonnées, plus petites pour les régions escarpées. Un tel découpage reviendrait à modifier la taille des mailles selon leur évolution. Dans ce cas, le réseau hydrographique rend directement compte des différentes aires de drainage. Cette

Conclusion

nouvelle représentation n'a pas été encore appliquée car elle demande la modification des lois de la simulation prenant en compte les différentes échelles.

Une séquence d'animation présentant l'évolution d'un relief au cours du temps a été réalisée. Le résultat obtenu est attractif et prouve l'efficacité de la simulation mise en œuvre.

Ecoulement et capacité de transport le long d'une pente A

Cet appendice explique les phénomènes d'écoulement et de transport le long d'un profil de pente. Elle correspond à la formulation employée par Kirkby pour simuler les processus d'érosion : $S = k(1 + a^2/u^2) g$.

A.1 Ecoulement le long d'une pente

L'écoulement de l'eau ruisselée d'un terrain s'effectue selon des *lignes d'écoulement*. Celles-ci correspondent aux lignes de plus grande pente (le chemin le plus court). Les lignes (ou les courbes) qui sont perpendiculaires à ces lignes d'écoulement en tout point désignent des *fronts d'écoulement*. La figure (A.1) montre trois exemples de surface soumises à l'écoulement avec des lignes d'écoulement parallèles le long d'une surface plane (a), des lignes convergentes (b) et des lignes divergentes (c).

La mesure de la quantité a dans la formulation de Kirkby peut s'évaluer de la façon suivante. Le paramètre a est défini comme une longueur de drainage équivalente par section et non comme une surface de drainage en deux dimensions. Considérons un point P à l'intérieur de la surface, compris entre deux lignes d'écoulement E et E' et un front F d'écoulement de longueur l qui leur est perpendiculaire. L'intersection de F et des lignes donnent un segment S considéré comme unitaire et centré sur P .

La mesure de a au point P est alors donnée par l'aire de la surface drainée par les lignes E et E' qui traversent le segment S . Pour le front F tout entier, cela correspond à l'aire de la surface drainée par les toutes les lignes d'écoulement traversant F . On obtient $a = \frac{A}{l}$ où A correspond à l'aire totale située en amont du front F .

On peut noter que la valeur de a varie selon les directions des lignes d'écoulement.

A – ECOULEMENT ET CAPACITÉ DE TRANSPORT LE LONG D'UNE PENTE

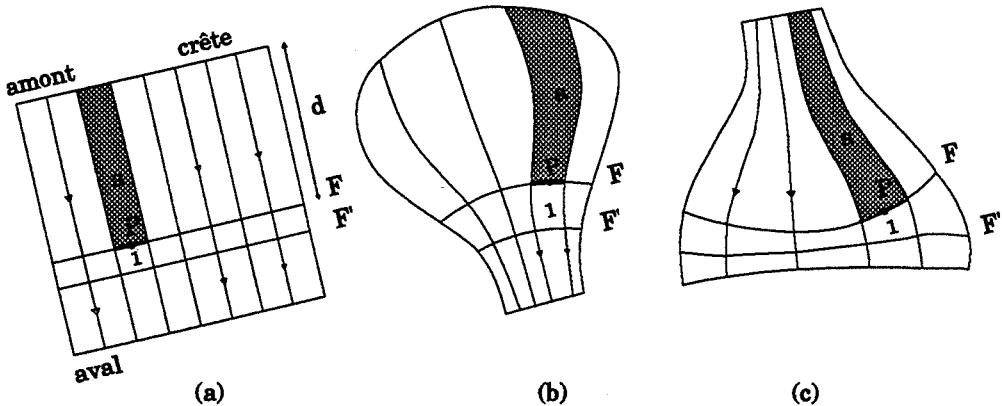


FIG. A.1 : Surfaces d'écoulement avec (a) des lignes parallèles, (b) convergentes, (c) divergentes

Dans le cas où les lignes sont parallèles, a est proportionnel à la distance l du front F à la ligne de crête. On peut alors écrire $a = k l$ où k est une constante. Si les lignes d'écoulement convergent (respectivement divergent), la valeur de a devient alors inférieure (respectivement supérieure) à $k l$.

A.2 Le transport le long d'une pente

Le modèle proposé par Kirkby prend en compte les processus de saltation, reptation et ruissellement. La quantité maximale de sédiments capable d'être transportée par chacun de ces processus correspond à leur capacité de transport. Celle-ci est proportionnelle à la pente au point considéré. Sa mesure g peut être évaluée par l'angle θ que fait la pente avec l'horizontale, soit $g = \tan \theta$.

Pour rester cohérent avec la notion de longueur de drainage équivalente, on utilise des capacités de transport équivalentes, rapportées, comme pour les longueurs de drainage, à la longueur des fronts d'écoulement intersectés. Ainsi, la mesure S de la capacité de transport équivalente d'un processus peut s'exprimer par : $\frac{S}{l}$ où S est la quantité totale de sédiments transportés par le processus le long du front F (figure A.2).

Les processus de saltation et de reptation sont des processus ponctuels; ils ne dépendent pas de l'aire de drainage et ont la même action en tout point. Aussi peut-on écrire : $S_{\text{saltation}} + S_{\text{reptation}} = k g$ avec k une constante.

Par contre, le processus de ruissellement est fonction de l'aire de drainage et ne peut donc s'exprimer par la formulation ci-dessus. La mesure de $S_{\text{ruissellement}}$ est considérée comme proportionnelle à l'énergie du flux de ruissellement. Puisque a et S sont définies comme des longueurs, on peut étudier le problème en une dimension (figure A.3). Si la pluviosité est uniforme et la perméabilité constante (quantité d'eau ruisselée proportionnelle à celle des précipitations), alors le volume d'eau de ruissellement $d eau_{\text{ruiss}}$ au point X est proportionnel à dx .

A.2 – Le transport le long d'une pente

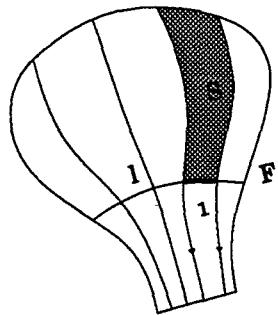


FIG. A.2 : Transport de sédiments le long d'une pente

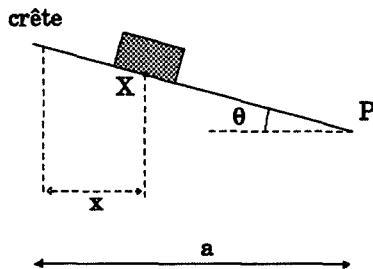


FIG. A.3 : Représentation du ruissellement en une dimension

Dans ce cas, l'énergie acquise au point P par la quantité d'eau $d eau_{ruiss}$, peut s'exprimer par $(a - x)dx \tan \theta$. Ceci correspond à la perte de l'énergie potentielle de $d eau_{ruiss}$ entre les points X et P , soit :

$$S_{ruiss}(P) \equiv \int_0^a (a - x) \tan \theta dx$$

$$S_{ruiss}(P) \equiv \frac{a^2}{u^2} \tan \theta$$

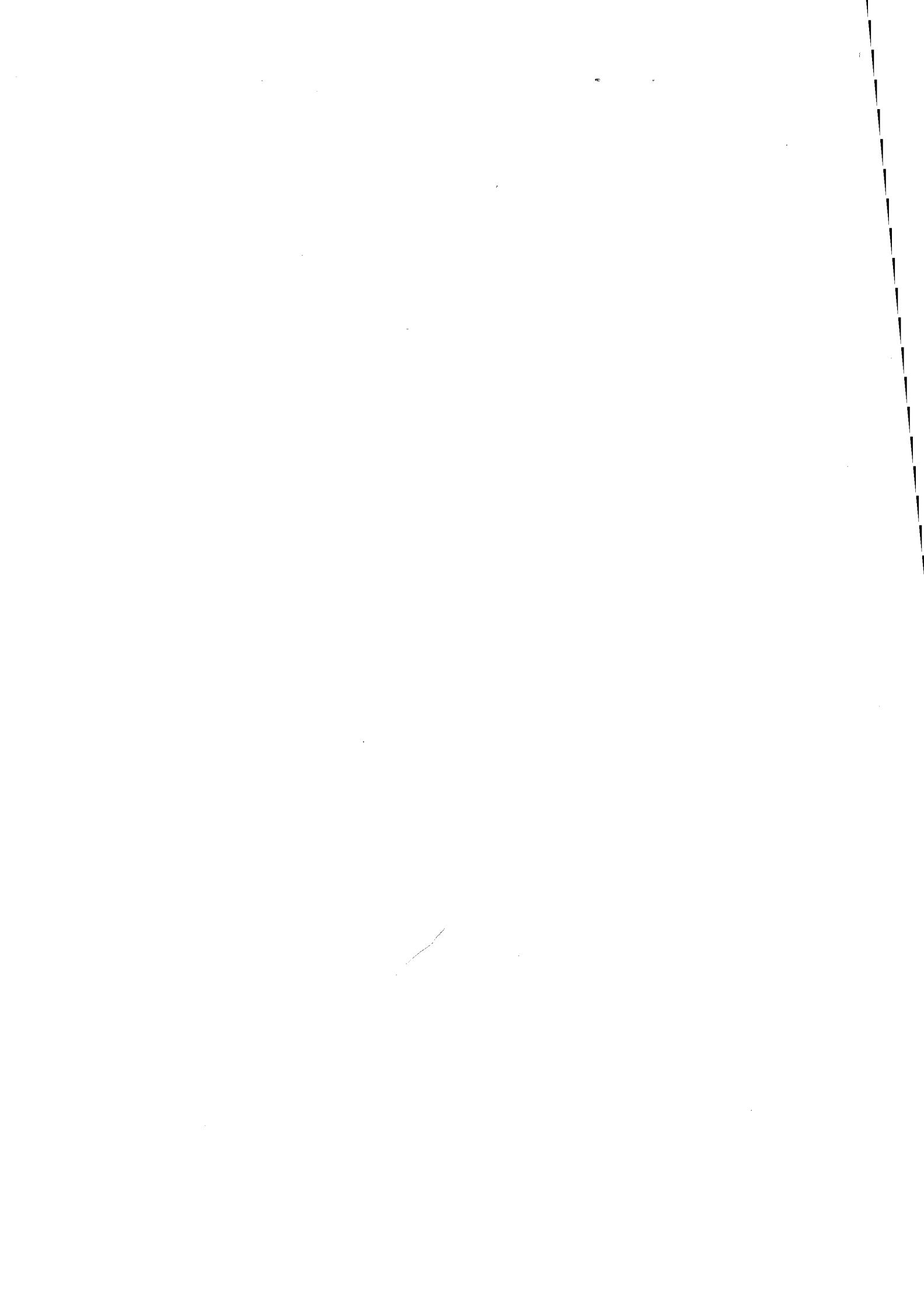
Cette expression reprend la loi en carré proposée par Kirkby. On obtient :

$$S = S_{reptation+saltation} + S_{ruiss}$$

$$S = k(1 + \frac{a^2}{u^2})g$$

avec $u^2 \equiv \frac{k}{2}$ définissant la distance critique de drainage équivalente. Il y a alors instabilité lorsque pour $a > u$, on a $\frac{\delta S}{\delta a} > \frac{S}{a}$.

Cette loi est correcte pour des simulations en régions semi-arides car la perméabilité du terrain ne dépend pas du volume des précipitations. Le rapport eau ruisselée–eau précipitée reste constant et vérifie ainsi l'hypothèse. Ce n'est pas le cas dans des régions humides où un phénomène de saturation peut avoir lieu. Au delà d'un certain seuil d'eau de pluie, les pores des roches sont complètement remplis et alors toute l'eau précipitée ruisselle.



Détermination des directions d'écoulement : proposition

B

Cet appendice traite d'une nouvelle proposition pour déterminer la direction d'écoulement de l'eau ruisselée. Elle est illustrée par l'exemple ci dessous, reproduisant le voisinage d'un point M à traiter (grille hexagonale).

B.1 Flux d'eau efficace

Considérons l'exemple suivant de la figure (B.1) où un point M et ses six voisins P_1 à P_6 sont représentés. Le point M a pour voisins plus haut que lui les points P_1 , P_3 et P_6 . Le point P_2 est aussi plus haut que M mais son voisin le plus bas n'est pas M . Les points P_4 et P_5 sont situés plus bas que M avec P_4 plus bas que P_5 .

Soient les vecteurs suivants définissant l'écoulement vers M des points situés en amont :

$$\begin{aligned}\overrightarrow{V_M^1} &= \overrightarrow{q^1} \tan \theta_1 \\ \overrightarrow{V_M^3} &= \overrightarrow{q^3} \tan \theta_3 \\ \overrightarrow{V_M^6} &= \overrightarrow{q^6} \tan \theta_6\end{aligned}$$

Ils ont pour support les segments P_1M , P_3M et P_6M . Le vecteur somme résultant $\overrightarrow{V_M}$ s'exprime alors par :

$$\overrightarrow{V_M} = \overrightarrow{V_M^1} + \overrightarrow{V_M^3} + \overrightarrow{V_M^6}$$

Cette addition vectorielle s'effectue évidemment dans l'espace 3D et non en projection.

B – DÉTERMINATION DES DIRECTIONS D’ÉCOULEMENT : PROPOSITION

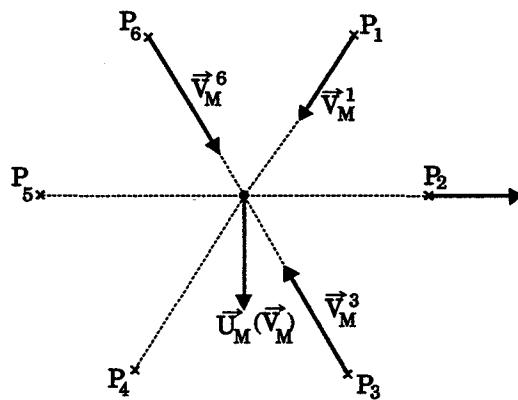


FIG. B.1 : Détermination du flux d'eau efficace

Le vecteur *flux efficace* $\overrightarrow{U_M}$ est défini alors par son module $\|\overrightarrow{U_M}\| = q_r^M$ et sa direction identique à celle de $\overrightarrow{V_M}$. La quantité d'eau ruisselante q_r^M est calculée de façon habituelle (par cumul des quantités provenant des points amont). Cette définition est ensuite utilisée pour calculer des abaissements aux points situés en aval de M .

B.2 Calcul des abaissements

Des abaissements sont calculés non seulement pour le voisin le plus bas de M (ici, P_4) mais pour *tous* les voisins plus bas que lui (donc, aussi pour P_5). Ils sont calculés par les formules :

$$\begin{aligned}\Delta Z_4 &= \alpha K_d^4 \overrightarrow{U_M} \cdot \overrightarrow{MP_4} \tan \theta_4 = \alpha K_d^4 q_r^M \tan \theta_4 \cos \varphi_4^M \\ \Delta Z_5 &= \alpha K_d^5 \overrightarrow{U_M} \cdot \overrightarrow{MP_5} \tan \theta_5 = \alpha K_d^5 q_r^M \tan \theta_5 \cos \varphi_5^M\end{aligned}$$

Les angles θ_4 et θ_5 correspondent aux angles que font les segments $[MP_4]$ et $[MP_5]$ avec le plan horizontal. Les angles φ_4 et φ_5 sont les angles (en 3D) que fait la direction de $\overrightarrow{U_M}$ avec les supports $[MP_4]$ et $[MP_5]$.

On admet donc désormais que des abaissements sont calculés pour tous les voisins de M plus bas.

B.3 Ecoulement résultant

L'écoulement de l'eau ruisselante q_r^M se fait vers le point le plus bas, P_4 ou P_5 en tenant compte des abaissements ΔZ_4 et ΔZ_5 calculés. Supposons que c'est P_4 , alors $\overrightarrow{V_M^4}$ est orienté selon la direction MP_4 et son module est : $\|\overrightarrow{V_M^4}\| = q_r^M \tan \theta_4$.

Si le vecteur $\overrightarrow{V_M}$ calculé est nul, l'écoulement se fait vers le point le plus bas des points

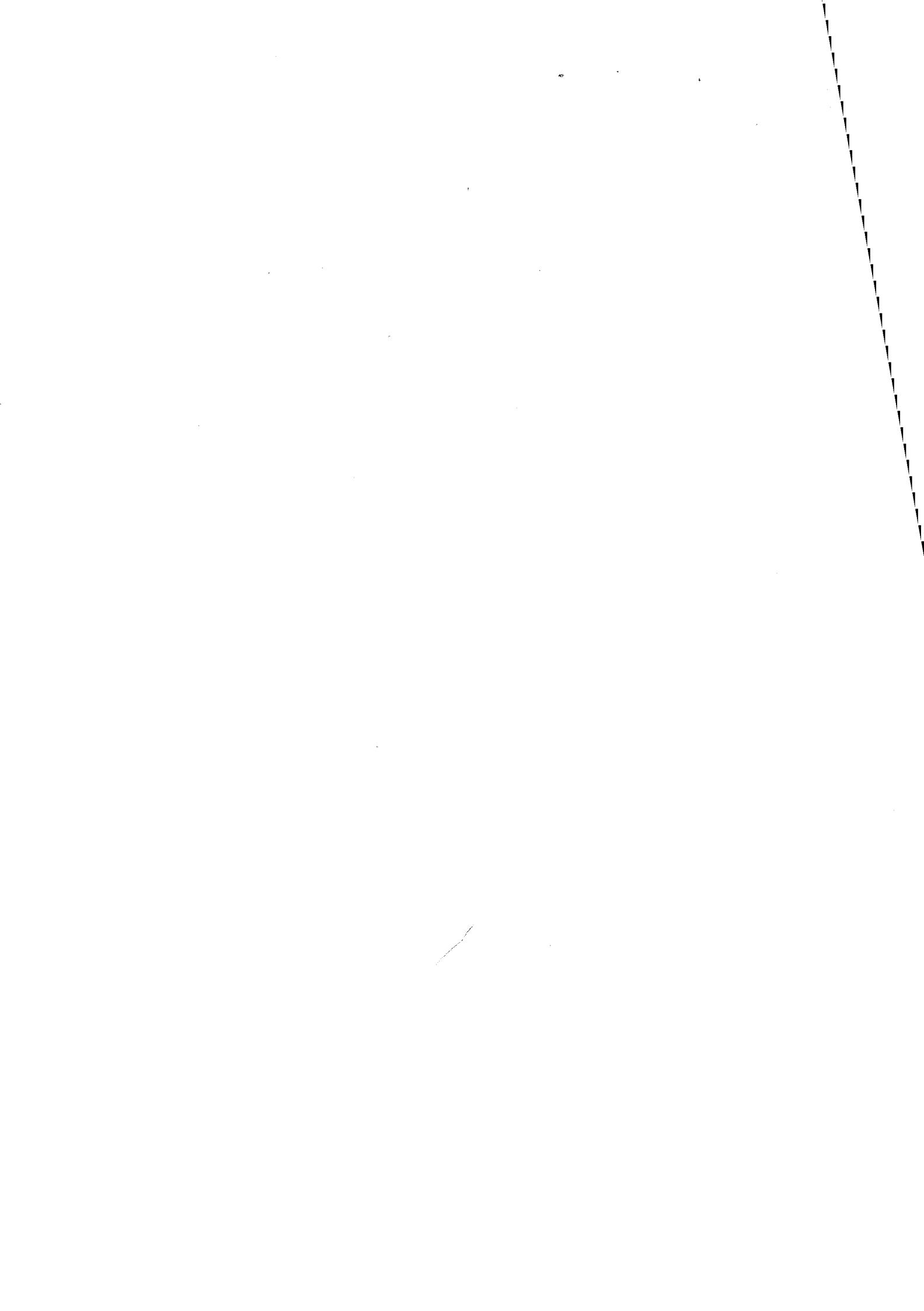
B.3 – Ecoulement résultant

P_4 ou P_5 avant tout calcul d'abaissement. L'abaissement est alors entièrement affecté à ce point.

Un abaissement ΔZ_M est bien entendu supposé calculé en cumulant les termes ΔZ provenant des points P_1 , P_3 et P_6 .

En conclusion, on peut dire que le calcul proposé diffère de celui appliqué actuellement par le calcul d'abaissements utiles pour le choix de la direction d'écoulement. On peut résumer cette méthode par les deux remarques suivantes :

- le flux efficace servant à calculer ces abaissements est une quantité vectorielle,
- la direction d'écoulement n'est choisie vers un voisin le plus bas qu'une fois ces calculs effectués.



Photographies

C

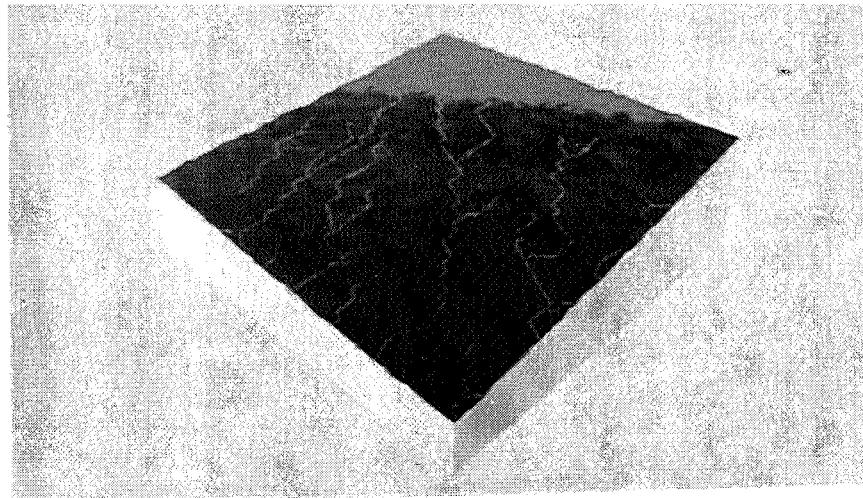


FIG. C.1 : Visualisation d'un relief et de son réseau hydrographique

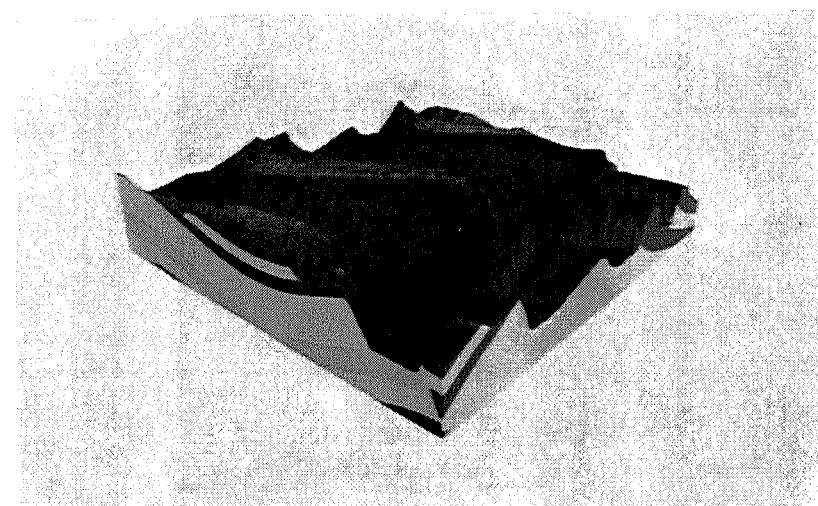


FIG. C.2 : Visualisation d'un relief et du sous-sol associé

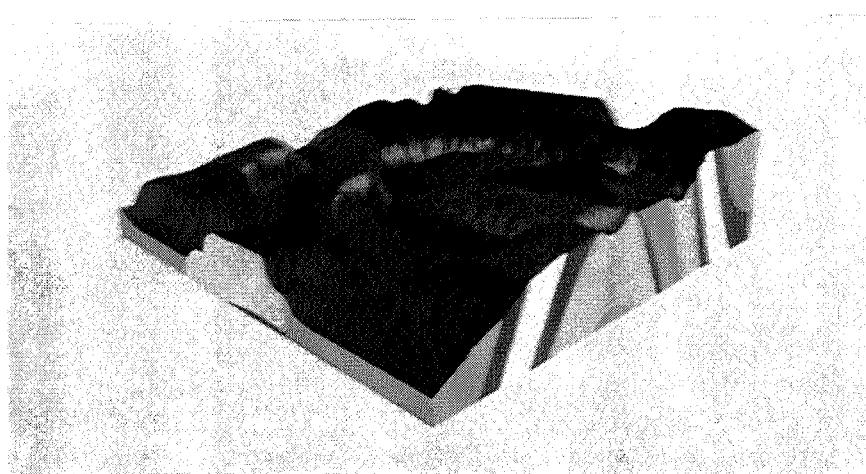


FIG. C.3 : Même visualisation sur un autre relief simulé

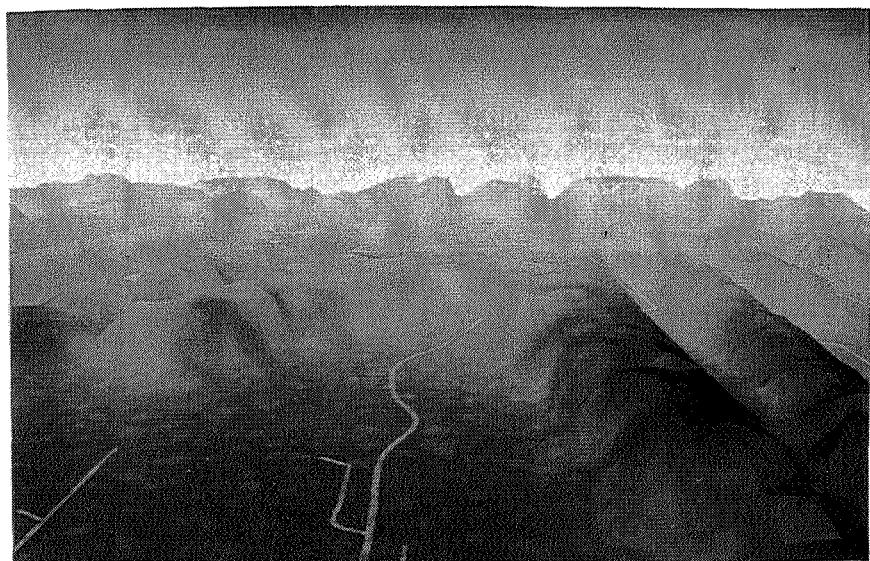


FIG. C.4 : Visualisation d'un relief et de son réseau hydrographique



FIG. C.5 : Visualisation d'un relief avec des effets visuels

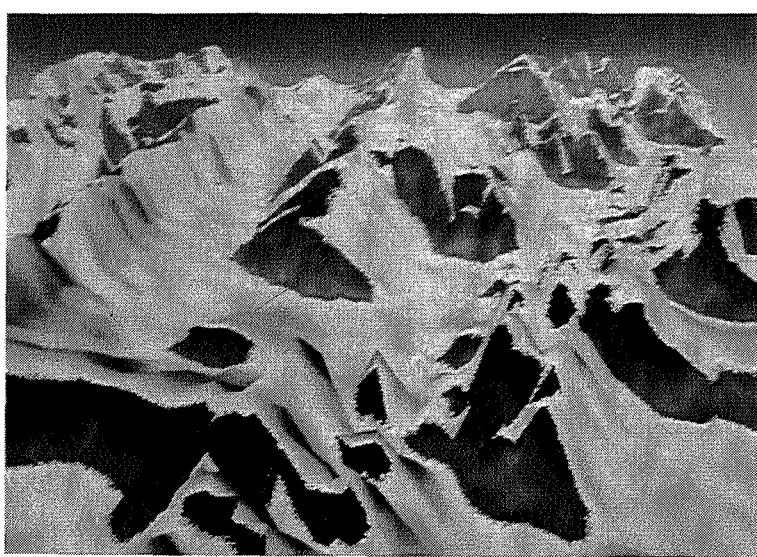
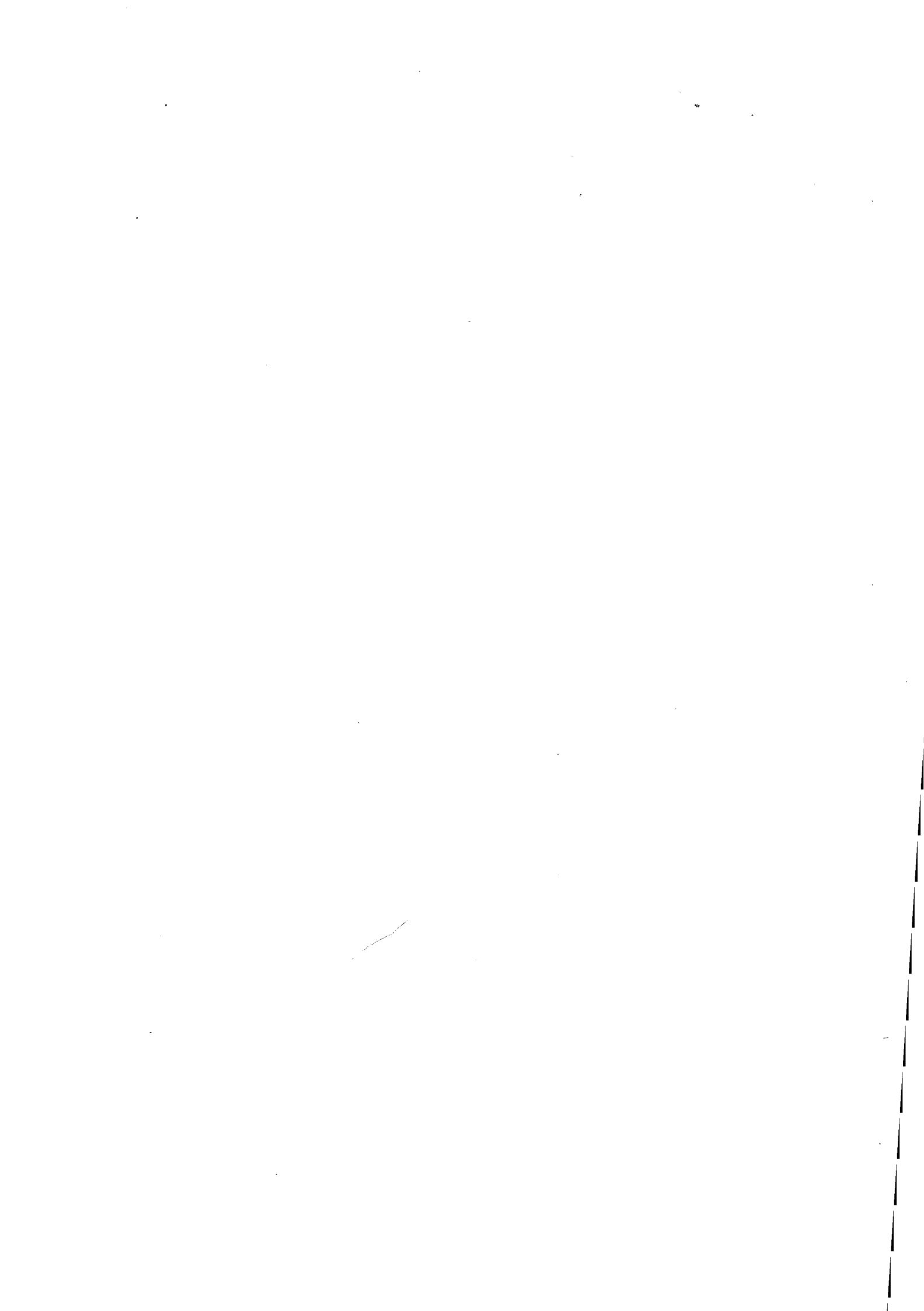


FIG. C.6 : Visualisation d'un relief avec un couvert de neige



Liste des figures

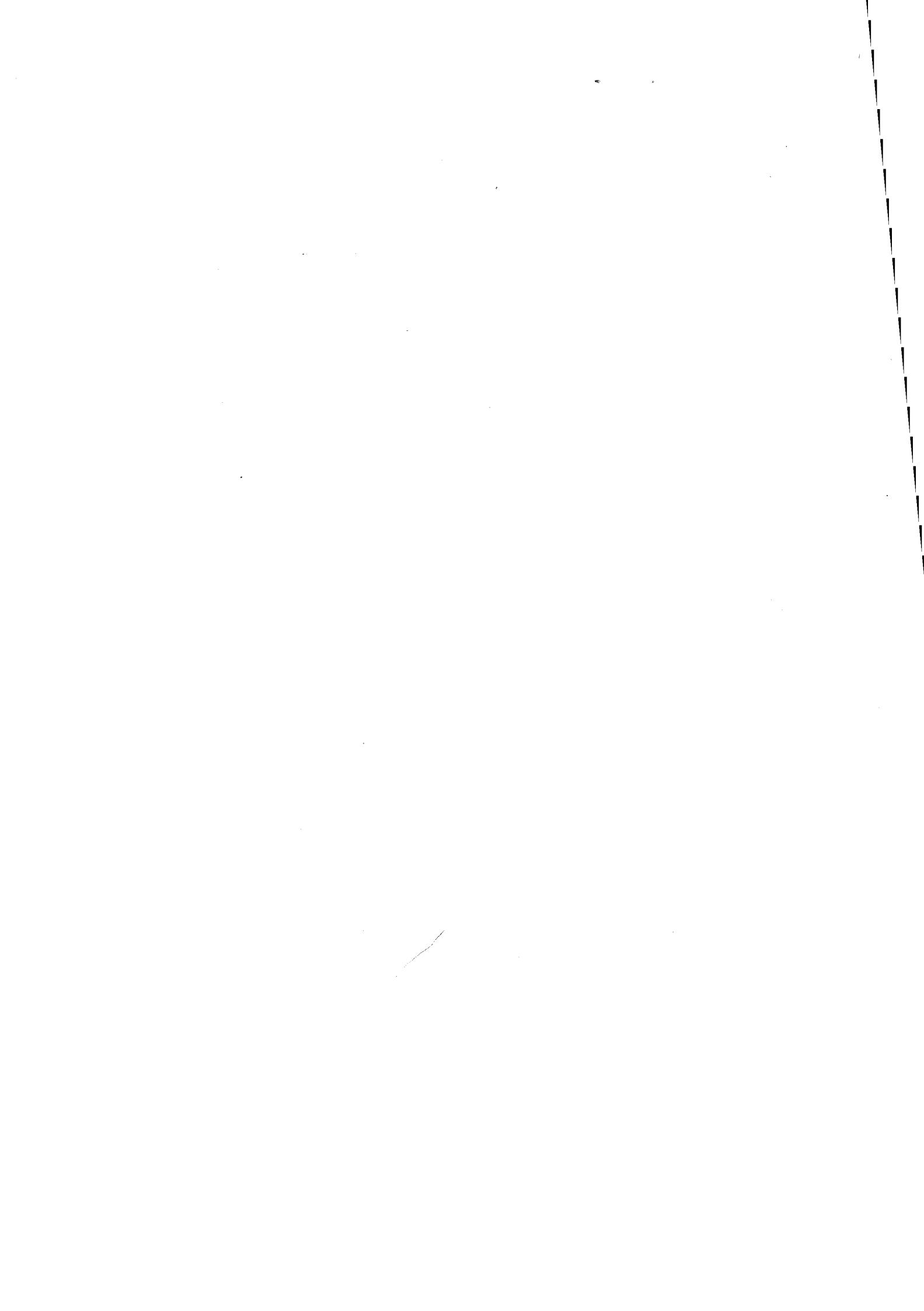
1.1	<i>Création d'un maillage radial</i>	16
1.2	(a) <i>carte de contours</i> , (b) <i>modèle irrégulier</i> , (c) <i>grille régulière</i>	17
2.1	<i>Objet fractal à une dimension : courbes de Von Koch avec $n = 4$, $r = \frac{1}{3}$</i>	23
2.2	<i>Relief obtenu par subdivision récursive</i>	24
2.3	<i>Subdivision d'un triangle en quatre sous triangles</i>	27
2.4	(a) <i>subdivision en diamant en choisissant le centre d'une face comme point de subdivision</i> , (b) <i>avec une décomposition en neuf carrés</i>	28
2.5	<i>Terrain fractal de dimension $D = 2.5$, généré par une technique de subdivision récursive</i>	28
2.6	<i>Boîte englobante d'une surface fractale</i>	30
3.1	(a) <i>bassin de drainage initial</i> , (b) <i>surface polygonale recouvrant le réseau</i> . .	37
3.2	(a) <i>arbre binaire du réseau</i> , (b) <i>carte topologique planaire quasi-triangulaire</i> , (c) <i>avec les lignes de crête et une triangulation supplémentaire</i>	38
4.1	<i>Profil de pente où le sous-sol est constitué d'une superposition de couches (Armstrong)</i>	47
4.2	<i>Calcul de l'aire de drainage</i>	50
4.3	<i>Représentation d'une grille (a) carrée et (b) hexagonale</i>	52
4.4	<i>Voisinage d'un point en maille hexagonale: (a) en réalité, (b) avec une structure de tableau</i>	54
4.5	<i>Représentation d'une surface perturbée et inclinée selon (a) une direction, (b) deux directions</i>	55
4.6	<i>Espace des déformations</i>	56
4.7	<i>Les différents types de profils</i>	58
4.8	<i>La représentation de différentes déformations : (a) avec seulement les deux phases de plis, (b) avec toutes les phases</i>	59
4.9	<i>Une même surface avec deux sous-sols différents</i>	60
4.10	<i>Numérotation d'une arborescence</i>	70

LISTE DES FIGURES

5.1	<i>Les différentes roches et leur motif associé</i>	78
5.2	<i>Relief initial : altimétrie de la surface et géologie associée</i>	79
5.3	<i>Relief obtenu (a) après 50 itérations, (b) après 100</i>	80
5.4	<i>Relief obtenu avec : (a) 50 itérations, (b) 100 itérations</i>	81
5.5	<i>Relief simulé avec : (a) 50 itérations, (b) 100 itérations</i>	81
5.6	<i>Relief simulé: (a) avec 100 itérations et un volume d'eau de 1, (b) avec 200 itérations et un volume de 0.5</i>	82
5.7	<i>Simulation effectuée avec : (a) un rapport érosion chimique de 3, (b) un rapport érosion gravitaire de 0</i>	83
5.8	<i>Simulation effectuée avec : (a) un seuil de sédimentation de 0.8, (b) un seuil de 0.6</i>	84
5.9	<i>Réseaux d'un terrain simulé avec deux géologies différentes</i>	85
5.10	<i>Réseaux d'un terrain simulé avec : (a) un volume de précipitations de 0.4, (b) et de 0.8</i>	86
5.11	<i>Représentation de cours d'eau et des lignes de crête associées</i>	86
5.12	<i>Réseaux incohérents : (a) cours d'eau de direction rectiligne, (b) cours d'eau interrompus par des cuvettes</i>	87
5.13	<i>Relief présentant un creusement des vallées</i>	89
5.14	<i>Phénomènes de propagation des cuvettes</i>	90
5.15	<i>Réseaux simulés (a) sans remplissage des cuvettes, (b) avec remplissage</i> . .	91
6.1	<i>Calcul de la couleur d'un point par lissage de Gouraud</i>	97
6.2	<i>Normales à gauche et à droite d'une ligne de crête</i>	98
6.3	<i>Triangles formés sur un lien du réseau</i>	99
6.4	<i>(a) suite des tronçons formant le réseau, (b) splines avec un nombre variable de points de contrôle</i>	100
6.5	<i>Intersection entre un triangle du réseau et un triangle du relief</i>	101
6.6	<i>Principe de notre méthode d'optimisation</i>	107
6.7	<i>Spots initiaux et textures engendrées (transition de type marche, nombre de positions = 1000)</i>	108
6.8	<i>Variation du nombre de positions aléatoires avec 500 positions et 1500 positions (transition de type marche)</i>	109
6.9	<i>Utilisation d'une fonction de transition de type marche, triangulaire et gaussienne (nombre de positions = 200)</i>	109
6.10	<i>Traitements de l'aliassage par sur-échantillonnage</i>	111
6.11	<i>Calcul de l'intensité d'un point appartenant à un triangle non homogène</i> . .	112
6.12	<i>Création des triangles constituant les coupes du terrain</i>	113
7.1	<i>Principe du tracé de rayons</i>	118

LISTE DES FIGURES

7.2	<i>Détermination des mailles de la grille traversées par le rayon</i>	122
7.3	<i>Intersection entre le rayon courant et une face</i>	123
7.4	<i>Détermination des mailles d'une grille hexagonale traversées par le rayon . .</i>	124
A.1	<i>Surfaces d'écoulement avec (a) des lignes parallèles, (b) convergentes, (c) divergentes</i>	132
A.2	<i>Transport de sédiments le long d'une pente</i>	133
A.3	<i>Représentation du ruissellement en une dimension</i>	133
B.1	<i>Détermination du flux d'eau efficace</i>	136
C.1	<i>Visualisation d'un relief et de son réseau hydrographique</i>	141
C.2	<i>Visualisation d'un relief et du sous-sol associé</i>	141
C.3	<i>Même visualisation sur un autre relief simulé</i>	141
C.4	<i>Visualisation d'un relief et de son réseau hydrographique</i>	143
C.5	<i>Visualisation d'un relief avec des effets visuels</i>	143
C.6	<i>Visualisation d'un relief avec un couvert de neige</i>	143



Bibliographie

- [Abr84] Abrahams (A.). – Channel networks: A geomorphological perspective. *Water Resour. Res.*, vol. 20, n° 2, février 1984, pp. 161–168.
- [Ahn76] Ahnert (F.). – Brief description of a comprehensive three-dimensional process response model of landform development. *Z. Geomorph. N.F/Suppl Bd. 25*, septembre 1976, pp. 29–49.
- [AJ92] Arques (D.) et Janey (N.). – Modélisation de cartes planaires pour la synthèse d’images de reliefs montagneux. *MICAD, actes de la 11ème conférence*, 1992, pp. 247–262.
- [Anj91] Anjyo (K.). – Semi-globalization of stochastic spectral synthesis. *The Visual Computer*, vol. 7, décembre 1991, pp. 1–12.
- [Arm76] Armstrong (A.). – A three-dimensional simulation of slope forms. *Z. Geomorph. N.F/Suppl Bd. 25*, septembre 1976, pp. 20–28.
- [Aub88] Aublette (P.). – Modélisation des processus d’érosion et application à la synthèse d’images. *Dossier Bibliographique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de St Etienne*, 1988.
- [BDM⁺86] Barnsley (M.F.), Devaney (R.L.), Mandelbrot (B.B.), Peitgen (H.O.), Saupe (D.) et Voss (R.F.). – *The Science of Fractal Image*. – Springer Verlag, 1986. Peitgen & Saupe Editors.
- [Bou85] Bouville (C.). – Bounding ellipsoids for ray-fractal intersection. *Computer Graphics*, vol. 19, n° 3, juillet 1985, pp. 45–52.
- [Car80] Carpenter (L.). – Rendering of fractal curves and surfaces. *ACM Computer Graphics*, vol. 14, n° 3, juin 1980, p. 109.
- [Cat74] Catmull (E.). – *A Subdivision algorithm for computer display of curved surfaces*. – Thèse de PhD, U. of Utah, 1974.
- [Cat75] Catmull (E.). – Computer display of curved surfaces. In : *Proceedings of the Conference on Computer Graphics, Pattern Recognition and data structure*, pp. 11–17.

BIBLIOGRAPHIE

- [CBG⁺83] Csuri (C.A.), Blinn (J. F.), Gomez (J.), Max (N.L.) et Reeves (W.T.). – The simulation of natural phenomena. *Computer Graphics*, vol. 17, n° 3, juillet 1983.
- [CG84] Coquillart (S.) et Gangnet (M.). – Shaded display of digital maps. *IEE Computer Graphics and Applications*, 1984, pp. 35–42.
- [CJ69] Calembert (L.) et J.Pel. – *Introduction à la géologie de l'ingénieur*. – Faculté des Sciences Appliquées de Liège, Edition Derouaux, 1969.
- [Coq84] Coquillart (S.). – *Représentation de paysages et tracé de rayons*. – Thèse de PhD, Ecole des Mines de St Etienne, décembre 1984.
- [Coq85] Coquillart (S.). – Displaying random fields. *Computer Graphics Forum*, vol. 4, 1985, pp. 11–19.
- [Cra80] Craig (R.G.). – A computer program for the simulation of landform erosion. *Computers and Geosciences*, vol. 6, 1980, pp. 111–142.
- [CRIV82] Córdova (J.), Rodríguez-Iturbe (I.) et Vaca (P.). – On the development of drainage networks. *Proceedings of the Exeter Symposium*, 1982, pp. 239–249.
- [CSS84] Chorley (R.J.), Schumm (S.A.) et Sugden (D.E.). – *Geomorphology*. – Methuen, 1984. Londres.
- [Cul78] Cullagh (M.J. Mc). – Transformation of contour string to a rectangular grid based digital elevation model. *Proc. Euro-Carto II*, 1978.
- [DSS78] Dungan (Jr. W.), Stencer (A.) et Sutty (G.). – Texture tile consideration for raster graphics. *Computer Graphics*, vol. 12, n° 3, août 1978.
- [Dun79] Dungan (Jr. W.). – A terrain and cloud computer image generation model. *Computer Graphics*, vol. 13, n° 3, août 1979, pp. 143–150.
- [FFC82] Fournier (A.), Fussell (D.) et Carpenter (L.). – Computer-rendering of stochastic models. *Commun. ACM.*, vol. 25, juin 1982, pp. 371–384.
- [FL79] Fowler (R. J.) et Little (J. J.). – Automatic extraction of irregular network digital terrain models. *Computer Graphics*, vol. 13, n° 3, août 1979, pp. 199–207.
- [Gag83] Gagalowicz (A.). – *Vers un modèle de textures*. – Thèse de PhD, U. de Paris VI, 1983.
- [Gar84] Gardner (G. Y.). – Simulation of natural scene using textured quadrics surfaces. *Computer Graphics*, vol. 18, n° 3, juillet 1984, pp. 11–20.
- [Gla89] Glassner (A.S.). – *An Introduction to Ray Tracing*. – Academic Press, 1989.

BIBLIOGRAPHIE

- [HMW76] Hobbs (B.E.), Means (N.D.) et Williams (P.F.). – *An outline of Structural Geology.* – Wiley intern ed., 1976.
- [Hor45] Horton (R.E.). – Erosion development of systems and their drainage basins, hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of Geol. Soc. America*, vol. 56, 1945, pp. 275–370.
- [Hüg80] Hügli (H.). – De la synthèse d'images appliquée aux maquettes de terrain numériques. *Rapport de recherche 28 – Institut für Geodäsie und Photogrammetrie*, novembre 1980.
- [Kaj83] Kajiya (James T.). – New techniques for ray tracing procedurally defined objects. *Computer Graphics*, vol. 17, n° 3, juillet 1983, pp. 91–102.
- [Kir86] Kirkby (M.J.). – A two-dimensional simulation model of slope and stream evolution. *Hillslope Processes*, 1986, pp. 203–222.
- [KKN⁺89] Kaneda (Kazufumi), Kato (Fujiwa), Nakamae (Eihachiro), Nishita (Tomoiki), Tanaka (Hideo) et Noguchi (Takao). – Three dimensional terrain modeling and display for environmental assessment. *Computer Graphics*, vol. 23, n° 3, juillet 1989, pp. 207–214.
- [KMN88] Kelley (A.D.), Malin (M.C.) et Nielson (G.M.). – Terrain simulation using a model of stream erosion. *Computer Graphics*, vol. 22, n° 4, août 1988, pp. 263–268.
- [Lew86] Lewis (J. P.). – Methods for stochastic spectral synthesis. In : *Proceedings of Graphics Interface '86*, éd. par Green (M.), pp. 173–179.
- [Liu93] Liu (Y-K.). – The generation of straight lines on hexagonal grids. *Computer Graphics Forum*, vol. 12, n° 1, 1993, pp. 27–31.
- [Mah72] Mahl (R.). – Visible surface algorithms for quadric patches. *IEEE Transaction Computer*, vol. C 21, 1972, pp. 1–4.
- [Mak73] Makarovic (B.). – Progressive sampling for digital terrain models. *I.T.C*, vol. 3, 1973, pp. 397–416.
- [Man75] Mandelbrot (B. B.). – Stochastic models for the earth's relief, the shape and fractal dimension of coastlines, and the number area of islands. *Proc. Nat. Acad. Sci USA*, 72, 10, octobre 1975, pp. 2825–2828.
- [Man77] Mandelbrot (B.B.). – *Fractals : Form, Chance and Dimension.* – San Francisco, Freeman & Co, 1977.
- [Man82] Mandelbrot (B. B.). – *The Fractal Geometry of Nature.* – San Francisco, W.H. Freeman and Co., 1982.

BIBLIOGRAPHIE

- [Man83] Mandelbrot (B. B.). – *The Fractal Geometry of Nature*. – New York, W.H. Freeman and Co., rev 1983.
- [Mas82] Massaloux (D.). – *Modèle stochastique de synthèse de textures*. – Thèse de PhD, Ecole Nationale Supérieure de Télécommunications, janvier 1982.
- [Mil86] Miller (G. S. P.). – The definition and rendering of terrain maps. *Computer Graphics*, vol. 20, n° 4, août 1986, pp. 39–48.
- [MKM89] Musgrave (F. Kenton), Kolb (Craig E.) et Mace (Robert S.). – The synthesis and rendering of eroded fractal terrains. *Computer Graphics*, vol. 23, n° 3, juillet 1989, pp. 41–50.
- [ML58] Miller (C.) et LaFlamme (R.A.). – The digital terrain model - theory and applications. *Photogrammetric Eng.*, vol. 24, n° 3, 1958, pp. 433–442.
- [MN68] Mandelbrot (B. B.) et Ness (J. W. Van). – Fractional brownian motion, fractional noises and applications. *SIAM Review*, vol. 10, n° 4, octobre 1968, pp. 422–437.
- [Mus88] Musgrave (F. Kenton). – Grid tracing: Fast ray tracing for height fields. *Research Report YALEU/DCS/RR-639*, juillet 1988.
- [MWC80] Marshall (R.), Wilson (R.) et Carlson (W.). – Procedure models for generating three-dimensional terrain. *Computer Graphics*, vol. 14, n° 3, 1980, pp. 154–162.
- [NW87] Nedunuri (S.) et Wiseman (N. E.). – Displaying random surfaces. *The Computer Journal*, vol. 30, n° 2, 1987, pp. 163–167.
- [PAGM88] Peroche (B.), Argence (J.), Ghazanfarpour (D.) et Michelucci (D.). – *La synthèse d'images*. – Collection Traité des Nouvelles Technologies, 1988. Editions Hermès.
- [PCBT93] Perrin (M.), Cheaito (M.), Bonigioly (D.) et Turmeaux (T.). – Vizualizing multifolded and multifaulted terrain geometry using computer graphics. à paraître dans *Journal of Japan Society of Geoinformatics*, août 1993.
- [Pea85] Peachey (D.R.). – Solid texturing of complex surfaces. *Computer Graphics*, vol. 19, n° 3, 1985, pp. 279–286.
- [Per80] Perlin (K.). – An image synthesizer. *Computer Graphics*, vol. 19, n° 3, juillet 1980, pp. 279–286.
- [PK87] Petrie (G.) et Kennie (J.J.M.). – Terrain modelling in surveying and civil engineering. *Computed-aided Design*, vol. 19, n° 4, mai 1987, pp. 171–187.
- [PORP87] Perrin (M.), Oltra (P.H.), Rommel (E.) et Peroche (B.). – Modélisation de structures géologiques par images de synthèse, exemple : déformation d'une stratification par failles et plis semblables. *Actes du Colloque FI3G*, juin 1987, pp. 330–339.

BIBLIOGRAPHIE

- [PRP93] Perrin (M.), Roudier (P.) et Peroche (B.). – Computed aided 3d erosional modelling operated on faulted and folded terrain. à paraître dans *Journal of Japan Society of Geoinformatics*, août 1993.
- [Rob87] Robertson (P. K.). – Fast perspective views of images using one-dimensional operations. *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 7, n° 2, février 1987, pp. 47–56.
- [Roe93] Roelens (M.). – *Un environnement pour le tracé de rayons utilisant une modélisation par arbre de construction*. – Thèse de PhD, Ecole des Mines de St Etienne, avril 1993.
- [Rou91] Roudier (P.). – Modélisation de terrains par simulation de processus d'érosion. *Journées Graphiques GROPLAN*, décembre 1991, pp. 123–130.
- [RPP93] Roudier (P.), Peroche (B.) et Perrin (M.). – Landscapes synthesis achieved through erosion and deposition process simulation. à paraître dans *Eurographics' 93*, septembre 1993.
- [Sch80] Schachter (B.). – Long crested wave models. *Computer Graphics and Image Processing*, vol. 12, 1980, pp. 187–201.
- [Shr66] Shreve (R.). – Statistical laws of stream numbers. *Journal of Geology*, vol. 74, 1966, pp. 17–37.
- [Smi84] Smith (A.R.). – Plants, fractals and formal languages. *Computer Graphics*, vol. 18, n° 3, juillet 1984, pp. 1–10.
- [ST89] Szeliski (Richard) et Terzopoulos (Demetri). – From splines to fractals. *Computer Graphics*, vol. 23, n° 3, juillet 1989, pp. 51–60.
- [Str52] Strahler (A.N.). – Hypsometric area-altitude analysis of erosional topology. *Bulletin of Geol. Soc. America*, vol. 63, 1952, pp. 17–42.
- [Vos85] Voss (R. F.). – *Random Fractal Forgeries*. – Berlin, R. A. Earnshaw, Springer Verlag, 1985. Fundamental Algorithms for Computer Graphics.
- [vW91] van Wijk (Jarke J.). – Spot noise, texture synthesis for data visualization. *Computers Graphics*, vol. 25, n° 4, juillet 1991, pp. 309–318.
- [Whi80] Whitted (T.). – An improved illumination model for shaded display. *Communications of the ACM*, vol. 23, n° 6, juin 1980, pp. 343–349.
- [YH78] Yokohama (R.) et Haralick (R.). – Texture sunthesis using a growth model. *Computer Graphics and Image Processing*, vol. 8, n° 3, 1978, pp. 369–380.
- [Zuc76] Zucker (S.W.). – Towards a model of texture. *Computer Graphics and Image Processing*, vol. 5, n° 2, 1976, pp. 190–202.

SYNTHESE DE PAYSAGES REALISTES PAR SIMULATION DE PROCESSUS D'EROSION

RÉSUMÉ

Cette thèse entre dans le cadre de la synthèse d'images de paysages s'appuyant sur une nouvelle modélisation des terrains par simulation dynamique de processus géomorphologiques. La restitution des phénomènes naturels agissant sur la création et l'évolution des reliefs semble un des moyens les plus sûrs pour obtenir des paysages réalistes.

Après une présentation des différentes modélisations de terrain existantes, le modèle proposé est détaillé. Il s'appuie sur la création de terrains géologiquement contrastés sur lesquels sont appliqués des processus déterministes d'érosion. Le relief est constitué d'une surface topographique à laquelle est associée la représentation volumique d'un sous-sol, qui permet de déterminer en chaque point des paramètres géologiques intervenant dans la simulation. Celle-ci suit une méthode itérative utilisant des lois simulant l'érosion gravitaire et mécanique, la dissolution chimique et la sédimentation. L'écoulement et le transport de matière entre les points s'effectuent par le biais d'un graphe de parcours qui traduit la structure du réseau hydrographique. La simulation implique l'évolution (altimétrique et géologique) du relief et la création du réseau associé.

Deux algorithmes de rendu sont ensuite proposés pour visualiser le relief modélisé. Ils incluent la représentation du réseau hydrographique et des lignes de crête. Le réalisme des images est accru par le plaquage sur le relief de textures naturelles de végétation, générées par une technique de *spot noise* et l'ajout d'effets visuels.

Mots clés : *modélisation de reliefs, simulation de processus géologiques, rendu de paysages, textures naturelles.*