

**Institut für Geodäsie und
Photogrammetrie**
an der Eidgenössischen
Technischen Hochschule
Zürich

Mitteilungen Nr.



De la synthèse
d'images appliquée
aux maquettes de terrain
numériques

Heinz Hügli

November 1980

De la synthèse
d'images appliquée
aux maquettes de terrain
numériques

Heinz Hügli

Copyright by
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
an der Eidg. Technischen Hochschule Zürich

Alle Rechte vorbehalten

Auflage 800 Exemplare

Vorwort

Das 1934 gegründete Institut für Technische Physik an der ETH (ITP) hatte schon sehr früh Forschungsarbeiten, die heute den Bildwissenschaften zugeordnet werden, aufgenommen. Die Elektronik, die sich damals ausschliesslich auf die Verwendung von Elektronenröhren beschränken musste, weil es nichts anderes gab, wurde kaum ausserhalb der Nachrichtentechnik angewendet. Die Mittel für die Behandlung der eingangs erwähnten Aufgaben waren demnach sehr beschränkt. Die ersten Arbeiten, die Untersuchung von Methoden für die retouschenlose Herstellung von Autotypie-Druckplatten mit Hilfe von elektronischen Steuerungsmitteln blieben notgedrungen theoretische Arbeiten (Dissertation W. Lindecker, 1939 und R. Bonzanigo, 1939). Mit der weltweiten Entwicklung der Fernsehtechnik kurz vor dem zweiten Weltkrieg eröffneten sich neuartige Tätigkeitsfelder, die vom Institut für Technische Physik zielstrebig aufgenommen wurden. Im Zuge der Entwicklung der als Eidophorverfahren bezeichneten Methode für die Erzeugung von projizierten Fernsehbildern hoher Lichtstärke (Prof. F. Fischer) konnten alle einschlägigen Probleme dieses technisch hoch interessanten Gebietes am ITP gepflegt werden. Neben physikalischen und optischen Problemen mussten auch zahlreiche grundlegende elektronische Aufgaben gelöst werden. Neben der "klassischen" Uebertragungstechnik kam zum ersten Mal die Inpulstechnik zur Anwendung (Erzeugung von Rastern für Fernsehbilder). Es ging dabei oft um sehr schnelle Vorgänge die an der Grenze der technischen Realisierbarkeit lagen.

Mit der Einführung der Halbleitertechnologie in den fünfziger Jahren öffnete sich wiederum eine neue technische Welt, die bald auch Teile der elektronischen Bildverarbeitung eroberte. Diese Entwicklung ging parallel mit einer kaum fassbaren Entfaltung der Digital- und Computertechnik. Der elektronischen Bildverarbeitung boten sich jetzt ganz neue Werkzeuge an. Es wurde nun möglich, Bilder oder wenigstens Teile davon, punktweise, d.h. in Bildelemente aufgelöst, zu speichern, zu verarbeiten und neu zusammzusetzen. Da das ITP die Digitaltechnik, dank der Tradition in der alten Fernsehtechnik, schon immer gepflegt hatte und nun besonders intensiv weiter-

pflegte, wurden auch bald einschlägige Arbeiten aus dem Bereich der digitalen, elektronischen Bildverarbeitung aufgenommen. Es bestand ja jetzt die Möglichkeit der mathematisch exakten Bearbeitung des Inhaltes von ganzen Bildern oder Teilen davon. In den letzten Jahren entstanden denn auch eine Reihe von diesbezüglichen Arbeiten, zu denen auch die Dissertation von Herrn Heinz H ü g l i, die hier vorliegt, gehört. Es wird darin die reizvolle Aufgabe untersucht, wie aus einer Landkarte, die als kotierte Normalprojektion des Geländes aufgefasst werden kann, rein mathematisch neue Bilder abgeleitet werden können, die z.B. die Ansicht dieses Geländes von einem beliebig wählbaren Standpunkt darstellen können. Wenn auch die "synthetisch" erzeugten Bilder noch recht unvollkommen erscheinen, ist doch erkennbar, dass diese neuartige Technik nach weiterer Vervollkommung auch in die Praxis Eingang finden dürfte.

Die am ITP durchgeführten Arbeiten waren immer darauf ausgerichtet, den jungen Mitarbeitern eine möglichst vielseitige Ausbildung zu vermitteln. Ein Teil der für die Ausführung der Arbeit nötigen elektronischen Geräte (Hardware) wurde deshalb, einer alten Tradition folgend, von Herrn Hügli selbst gebaut.

Ich bin Herrn Prof. Dr. H. Matthias zu besonderem Dank verpflichtet, dass er die Initiative ergriffen hat, diese Arbeit in die schöne Reihe "Mitteilungen des Institutes für Geodäsie und Photogrammetrie" aufzunehmen, um die Resultate einem breiteren Kreis von Interessenten bekannt zu machen. Ich möchte hoffen, dass dadurch eine weitere Verfolgung der begonnenen Studien angeregt wird.

30.10.1980

Prof. Dr. E. Baumann
Vorsteher ITP von 1948 - 1979

Ce travail a été fait à l'Institut de Physique technique à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich.

Je tiens à exprimer ma plus vive gratitude à Monsieur le Professeur Dr. E. Baumann pour le soutien accordé à ce travail en tant que directeur de l'Institut et rapporteur.

Je tiens également à remercier très chaleureusement le corapporteur, Monsieur PD. Dr. T. Celio, pour les précieuses suggestions et pour l'enthousiasme exprimés au cours de l'élaboration de ce travail.

Des discussions et suggestions fructueuses ont largement contribué à ce travail pour lesquelles je remercie mes amis et collègues Dr. F. Bonzanigo, Dr. J.-P. Graf et B. Schneuwly.

SOMMAIRE

Résumé

Zusammenfassung

Abstract

1. Introduction

1.1 But

1.2 Délimitations

1.3 Maquettes de terrain numériques

1.4 Moyens de synthèse et de visualisation
d'images

2. Synthèse d'images orthographiques

2.1 Carte d'ombre

2.2 Ombrage

2.2.1 Ombre propre

2.2.2 Ombre portée

2.2.3 Carte d'ombre

2.3 Interpolation

2.3.1 Méthode d'interpolation

2.3.2 Interpolation par B-spline

2.3.3 Interpolation dans l'objet et
interpolation dans l'image

2.3.4 Appréciation des résultats
d'interpolation

2.3.5 Interpolation mesurée à l'écart
moyen

3. Synthèse d'images perspectives

3.1 Principes de synthèse perspective

3.1.1 Transformations géométriques

3.1.2 Transformation de facettes

3.1.3 Maquette hiérarchique

3.2 Implémentation

4. Visualisation optimale de terrains

4.1 Comparaison des techniques de
visualisation des facettes

4.2 Visualisation d'information liée au
terrain

4.3 Effets de quantification de la mémoire Z_p

4.4 Effets de profondeur

4.5 Transition entre maquettes par fusion

5. Conclusion

A. Annexe

Bibliographie

RESUME

La synthèse d'images par ordinateur est appliquée aux maquettes de terrain numériques dans le but de les visualiser, avec un accent particulier sur le rendu tridimensionnel et le réalisme de la représentation. La technique de visualisation télévision est choisie. Les maquettes de terrain sont des objets de synthèse ambivalents, dont la simplicité vient de la structure et la complexité du grand nombre de données la constituant. Des méthodes de synthèse adaptées à ces conditions et reposant sur l'illumination artificielle du terrain, sur l'ombre propre et l'ombre portée sont présentées.

Une première partie est consacrée aux images orthographiques du relief, où les conditions optimales de représentation et d'interpolation sont analysées en particulier. Un algorithme de synthèse de carte d'ombre propre et portée est présenté, qui est caractérisé par un traitement séquentiel des données et s'applique ainsi à des maquettes indéfiniment grandes.

Une deuxième partie traite la synthèse de vues perspectives. Après une analyse détaillée des différentes étapes de la synthèse d'une part, et l'étude d'une structure de maquette adaptée d'autre part, un algorithme de synthèse perspective particulièrement adapté aux terrains est proposé puis implémenté.

La synthèse perspective débouche finalement, dans une troisième partie, sur une analyse de techniques connues et de deux techniques nouvelles pour améliorer le rendu et le réalisme de la représentation.

Tous les points traités sont appuyés par un grand nombre d'exemples pratiques d'images synthétisées à partir de deux maquettes de terrains existants, présentant une quantité d'information de 1,2 Mbit et 23 Mbit respectivement.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Arbeit behandelt die Möglichkeit, mit dem Computer von einem numerisch beschriebenen Objekt Bilder zu generieren, welche für die Raster-scan Technik geeignet sind. Als Objekte für die Synthese werden digitale Geländemodelle verwendet, welche sich einerseits durch die Einfachheit ihrer Struktur und andererseits durch eine, durch die grosse Datenmenge bedingte Komplexität kennzeichnen. Beleuchtung und Schattierung werden derart eingesetzt, dass möglichst plastisch wirkende und realistische Darstellungen entstehen.

Im ersten Teil wird die Synthese von orthographischen Geländebildern im Hinblick auf eine optimale Darstellung des Reliefs analysiert. Insbesondere wird die Interpolation von so erzeugten Schattenkarten behandelt. Diese Analyse führt zu einem Algorithmus für die Synthese von Schattenkarten mit Eigen- und Schlagschatten, welcher auf einer sequentiellen Behandlung der Geländedaten beruht und somit die Berechnung eines beliebig grossen Geländemodells ermöglicht.

Im zweiten Teil werden die perspektivischen Ansichten behandelt. Nach einer genauen Analyse der verschiedenen Syntheseschritte wird auch hier ein Algorithmus vorgeschlagen, der die Geländedaten sequentiell bearbeitet. Eine hierarchische Datenstruktur wird vorgeschlagen, welche die Synthese wesentlich beschleunigt.

Im dritten Teil werden die verschiedenen Darstellungsmöglichkeiten perspektivischer Geländebilder verglichen und optimiert. Zwei neue Methoden werden vorgestellt, welche eine spezielle Texturmodulation verwenden, um den Realismus der Darstellung zu verbessern.

Die Realisierung der vorgeschlagenen Algorithmen wird jeweils besprochen und praktische Beispiele von Bildern gezeigt. Als Datenquelle dienen zwei verschiedene Modelle von wirklichen Geländen, welche eine Informationsmenge von 1,2 Mbit bzw. 23 Mbit aufweisen.

ABSTRACT

Shaded pictures of digital reliefs are synthesized by computer. They show sufficient realism and three-dimensional rendering to simulate reality. The raster-scan technique is used here. As an environment for the synthesis, a digital relief has two main characteristics: a simplicity of structure and a complexity that results from the large amount of data. Picture generation methods based on terrain illumination and shading including cast shadows are presented that fit best for the aim presented.

A first part deals with the orthographic view of the relief. The synthesis is analysed for best rendering. Particular attention is given to the interpolation of shaded relief pictures. Finally a shading algorithm is presented which also considers cast shadows. Using it, relief data are handled sequentially so that a relief of indefinite size can be processed.

In a second part, the synthesis of perspective views is analysed step by step leading to a method that also processes the relief data sequentially. A hierarchical data structure is then proposed which improves the computing efficiency of the synthesis.

In a third part, the different methods for generating a perspective view are compared with respect to the quality of rendering. Two new techniques are shown which use a special texture modulation in order to improve the realism of the picture.

The realisation of the different algorithms is also discussed and many pictures are shown. They are synthesized from two models of existing terrains having a quantity of information of 1,2 Mbit and 23 Mbit respectively.

1. INTRODUCTION

Ce chapitre traite de la définition du problème posé et cerne les limites du domaine considéré dans ce travail.

1.1 But

C'est la synthèse d'images simulant la vue d'un terrain. C'est la connaissance des méthodes et des possibilités théoriques et pratiques de la synthèse d'images appliquée aux surfaces courbes en général et aux terrains en particulier. Les images simulant un terrain, qu'il soit réel ou entièrement synthétique, doivent le représenter avec un maximum de réalisme. Le rendu plastique du corps tridimensionnel représenté est spécialement recherché.

Le but est aussi de fournir un bon nombre d'exemples pratiques d'images simulant un terrain réel. A cet effet on fera usage de maquettes numériques décrivant des terrains existants.

Le but de ce travail est motivé par la curiosité de voir les techniques de traitement de l'image confrontées avec l'avènement de grandes bases de données. Pour décrire cette confrontation il faut considérer deux choses. D'une part, que l'image est un moyen inégalé pour transmettre une grande quantité d'information à l'homme. D'autre part, que les méthodes de traitement de l'image sont à l'âge adulte et que le matériel correspondant se développe rapidement. Dans ce contexte, l'image sera utilisée de plus en plus à la périphérie des bases de données pour en visualiser l'un ou l'autre aspect.

Plus modestement, le but énoncé est motivé par le problème commun à beaucoup de disciplines, où la base des données contient ou consiste en une maquette de terrain qu'il faut visualiser.

1.2 Délimitations

La synthèse d'images par ordinateur est née il y a une dizaine d'années et a considérablement évolué jusqu'à aujourd'hui. On connaît des applications dans des domaines aussi variés que l'animation, l'architecture, les arts, la représentation de données, le dessin assisté, la cartographie et le génie médical [18][38][39].

La synthèse d'images par ordinateur est étroitement liée à la technologie des moyens de visualisation d'images. La représentation d'objets en fil de fer est liée au display à balayage x-y et n'est pas considérée ici. Seul le deuxième type de représentation, caractérisé par un display à balayage télévision et une image aux teintes demi-ton, est traitée ici [34].

L'originalité du travail présent réside dans l'application de la synthèse à des terrains ou autres surfaces semblables. Peu de travail de recherche a été effectué jusqu'à présent dans cette application particulière. Cependant dès 1965 Yoeli [52] en a entrevu la possibilité. Des essais pratiques sont effectués en 1973 par Brassel [12] et une carte d'ombre synthétique de Montrose [6] est publiée en 1975. Les moyens modernes de calcul et de production d'images offrent maintenant de nouvelles possibilités qui sont examinées dans ce travail.

L'application à un terrain présente deux caractéristiques majeures. La première fait que les objets appartiennent à l'ensemble des surfaces définies par une relation univoque $f(x,y)$. Cette définition inclut deux conceptions de l'objet: l'objet constitué par une surface et l'objet délimité par une surface. Elle inclut en outre les objets constitués de surfaces multiples pour autant qu'elles soient chacune univoques. Cette première caractéristique restreint donc les objets à considérer et simplifie ainsi le problème de synthèse.

La deuxième caractéristique en est une contrainte. Elle est

liée à la complexité généralement très grande des maquettes de terrain, où la complexité résulte du grand nombre de facettes constituant un objet. On considère comme étant de niveau de complexité très élevé, un objet dont le nombre total de facettes est de l'ordre de 120'000 [47].

Il faut considérer aussi les limitations de temps de calcul et de capacité de mémoire lors d'une réalisation pratique. Aussi ce travail est-il orienté vers le choix de méthodes simples et faciles à réaliser. Cependant, entre des applications de synthèse en temps réel et des applications basées sur la qualité uniquement, il y a tout un spectre de possibilités présentant des contraintes différentes et qu'il convient d'analyser.

1.3 Maquettes de terrain numériques

Une maquette de terrain numérique est l'ensemble des données modelant la forme géométrique d'un terrain. Elle existe généralement sous la forme explicite des altitudes a_k du terrain discrétisé aux noeuds k d'une grille plane qu'il a pour base. La lecture, visuelle ou par scanner, de la carte et l'interprétation, par autographe ou corrélateur interposé, de couples de photos stéréoscopiques sont les possibilités pratiques pour discrétiser et digitaliser un terrain. Les premières maquettes proviennent de la lecture visuelle de la carte [6][37][54]. Le développement constant et l'usage croissant des autres méthodes laisse prévoir une disponibilité croissante de maquettes détaillées et de bonne qualité.

Le choix de la grille de discrétisation est important pour la synthèse d'images. Deux conceptions s'opposent. La grille irrégulière d'une part, qui s'adapte aux besoins locaux du terrain et suit ainsi les crêtes, les talweg, etc. Cette caractéristique lui confère l'avantage de présenter une densité d'information adaptative. La grille régulière d'autre part, qui n'a pas cet avantage-là, mais deux autres avantages qui la rendent supérieure dans la plupart des applica-

tions: 1) la réduction du volume des données mémorisées due à la forme implicite de la grille et 2) la simplicité et rapidité d'accès aux données d'un noeud quelconque de la grille.

Toutes les maquettes considérées seront donc à grille régulière et, pour plus de simplicité, à maille carrée. Une maquette de terrain numérique est ainsi définie par les altitudes a_{ij} aux noeuds (i,j) , par le nombre de noeuds de la grille $i_{\max} \cdot j_{\max}$ et par la dimension $\Delta l \cdot \Delta l$ d'une maille de la grille (fig.1.1).

Voici les maquettes utilisées dans ce travail.

Maquette géométrique

Cette maquette consiste en une surface définie analytiquement et représente des formes géométriques simples (fig.1.2).

Maquette Rimini

Cette maquette à la maille de 250m couvre toute la Suisse (fig.1.3). Il s'agit en fait de la réorganisation en un tableau unique des données de la maquette Rimini originale [37] organisée par blocs correspondant aux cartes nationales 1:25'000.

La correspondance entre la grille (i,j) et les coordonnées des cartes nationales (X_{cn}, Y_{cn}) est donnée par:

$$\begin{aligned} X_{cn} &= 62 + 0,25 \cdot (j - 1) && \text{[km]} \\ Y_{cn} &= 480 + 0,25 \cdot (i - 1) && \text{[km]} \end{aligned} \tag{1.1}$$

Voici quelques caractéristiques importantes:

- les données proviennent de la lecture visuelle des cartes nationales 1:25'000 ou 1:50'000;
- la région des Alpes ainsi que les régions frontières proviennent des cartes 1:50'000 et ont été relevées selon une grille aux mailles de 500m puis interpolées linéairement à 250m;

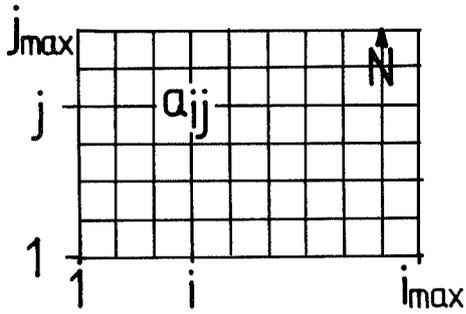


Fig.1.1 Maquette à grille rectangulaire et à maille carrée

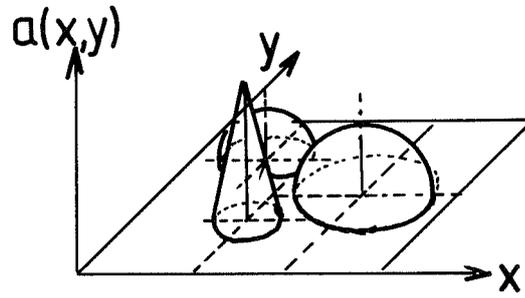


Fig.1.2 Maquette géométrique. La surface est définie analytiquement.

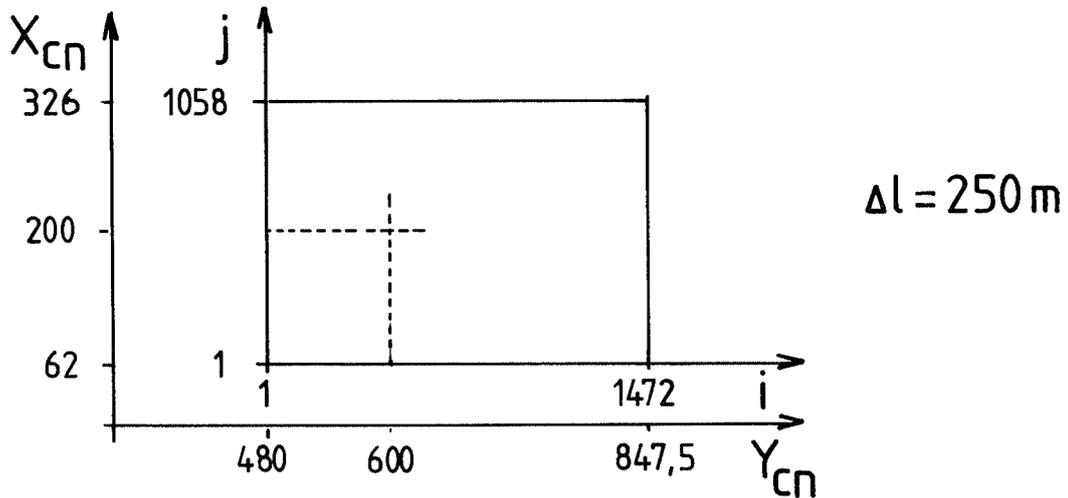


Fig.1.3 Maquette Rimini: maquette aux mailles de 250 m couvrant toute la Suisse. (X_{cn}, Y_{cn}) sont les coordonnées de la carte nationale.

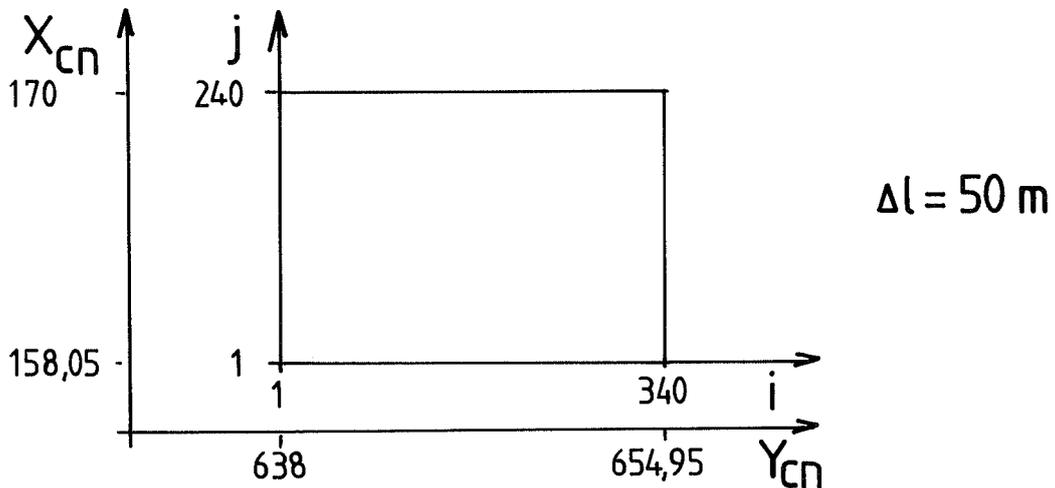


Fig.1.4 Maquette Grindelwald: maquette aux mailles de 50 m couvrant la région de Grindelwald. (X_{cn}, Y_{cn}) sont les coordonnées de la carte nationale

- l'altitude est quantifiée à 1 m et l'erreur moyenne est évaluée à 8 m en plaine et à 25 m en montagne;
- la quantité d'information de la maquette est 23 Mbit.

Maquette Grindelwald

Cette maquette à la maille de 50 m couvre en gros la carte 1:25'000 de Grindelwald (carte nationale no. 1229) (fig.1.4). Il s'agit en fait de la réorganisation en un tableau unique des données de la maquette Grindelwald originale [54] organisée en blocs de 1 km².

La correspondance entre la grille (i,j) et les coordonnées des cartes nationales (X_{cn}, Y_{cn}) est donnée par:

$$\begin{aligned} X_{cn} &= 158,05 + 0,05 \cdot (j - 1) && [\text{km}] \\ Y_{cn} &= 638 + 0,05 \cdot (i - 1) && [\text{km}] \end{aligned} \quad (1.2)$$

Voici quelques caractéristiques importantes:

- les données altimétriques proviennent de la lecture visuelle de la carte 1:25'000 de Grindelwald. Ont été relevés d'abord les points selon une grille aux mailles de 100 m puis, environ 1000 points spéciaux (points cotés, de triangulation, points sur les arêtes);
- la base de données de 50 m est obtenue par un procédé d'interpolation complète consistant en une interpolation quadratique des données à 100 m combinée à une interpolation tenant compte des points spéciaux);
- l'altitude est quantifiée à 1 m et l'erreur évaluée est inférieure à 3 m dans 85% des cas;
- la quantité d'information de la maquette est 1,2 Mbit.

1.4 Moyens de synthèse et de visualisation d'images

Le calculateur utilisé est un miniordinateur HP-21MX avec 32k mots (16 bit) de mémoire, sous le contrôle du système opérationnel RTE-2. Les appareils périphériques spécialement utilisés pour la synthèse d'images sont un scanner photographique à haute résolution (9 lignes/mm), un plotter électro-

statique et surtout une mémoire d'image comme moyen d'entrée et de sortie vidéo.

A l'exception de la figure 2.14 qui provient du scanner, toutes les images de ce travail sont des photographies d'images visualisées sur écran de télévision. Une telle image présente au maximum $256 \cdot 256$ pel à 256 niveaux. Elle est rafraîchie par la mémoire d'image d'une capacité de 64k octets à travers 4 tabelles de transfert programmables, soit une par canal couleur et une pour un canal noir/blanc. Chaque tabelle effectue une transformation, programmable à souhait, entre les 256 niveaux du code en mémoire et les 256 niveaux du signal vidéo [31].

La luminance émise par le phosphore de l'écran peut s'exprimer par différentes grandeurs qu'il convient de définir. Plutôt que l'intensité lumineuse qui est le flux lumineux par unité d'angle solide émis dans une direction donnée, j'utilise la luminance L_v qui est l'intensité lumineuse rapportée à l'unité de surface émettrice. J'utiliserai le mot luminance aussi pour les images photographiques, sans préciser qu'il s'agit dans ce cas de luminance de réflexion. L'image physique est ainsi une fonction de luminance bidimensionnelle $L_v(x,y)$.

Les non-linéarités du système de reproduction vidéo et photographique sont compensées par une fonction de transfert adéquate dans chaque tabelle de transfert. Le code de l'image en mémoire est ainsi proportionnel à la luminance de l'image visualisée. J'utiliserai donc dorénavant la seule luminance L , normée à 1, pour désigner ces deux grandeurs.

La luminosité ℓ_v est la grandeur qui mesure l'intensité de la lumière perçue par le système visuel. Elle est, selon la loi de Weber-Fechner [22], proportionnelle au logarithme de la luminance. Pour les grandeurs ℓ et L de la luminosité respectivement de la luminance, chacune normées à 1, cette

loi s'écrit:

$$l = \frac{\log(\beta \cdot L)}{\log \beta} \quad (1.3)$$

où $\beta = L_{\max}/L_{\min}$ est le contraste maximum de l'image. Il vaut environ 50 pour l'image de télévision.

2. SYNTHÈSE D'IMAGES ORTHOGRAPHIQUES

Ce chapitre étudie les méthodes pour visualiser une maquette de terrain sous la forme d'une carte orthographique (désormais: carte). Leur implémentation a lieu avec des maquettes dérivées des maquettes Rimini(R) et Grindelwald(G) et définies dans l'annexe A.1.

2.1 Carte d'altitude

Soit une méthode de visualisation directe définie par une luminance fonction de l'altitude $L(a)$. Cette méthode est illustrée par la figure 2.1 qui reproduit les altitudes sur l'échelle, psychophysiologiquement homogène, de la luminosité ℓ . Considérant la loi de Weber-Flechner (1.3) et la proportionalité souhaitée entre ℓ et a , la fonction $L(a)$ s'écrit:

$$L(\alpha) = 10^{(\alpha-1) \cdot \log \beta} \cdot \frac{1}{\beta} \quad (2.1)$$

avec: $\alpha = a/a_{\max}$

On constate que cette représentation manque de tout rendu tridimensionnel et qu'elle est en outre incapable de reproduire le domaine des altitudes avec la pleine résolution.

Quelles sont les améliorations possibles avec les techniques de manipulation de gamma et de fausses couleurs [1]? La manipulation de gamma consiste à choisir une courbe $L(a)$ appropriée. Sa possibilité réside dans l'amélioration de la représentation d'un domaine d'altitude bien particulier et est illustrée par la figure 2.2, où l'image reproduit le domaine d'altitude compris entre 400 m et 1000 m.

La technique des fausses couleurs consiste à utiliser tout l'espace des couleurs pour représenter une information. Un point de l'espace des couleurs pouvant être défini par la luminance L et les deux coordonnées de chrominance x_c et y_c



Fig.2.1 Carte d'altitude du Lac des Quatre Cantons (R).
Grille de 250 m. La luminosité est proportionnelle
à l'altitude entre 300 et 3000 m.



Fig.2.2 Carte d'altitude du Lac des Quatre Cantons (R).
Grille de 250 m. La luminosité est proportionnelle
à l'altitude entre 400 et 1000 m.

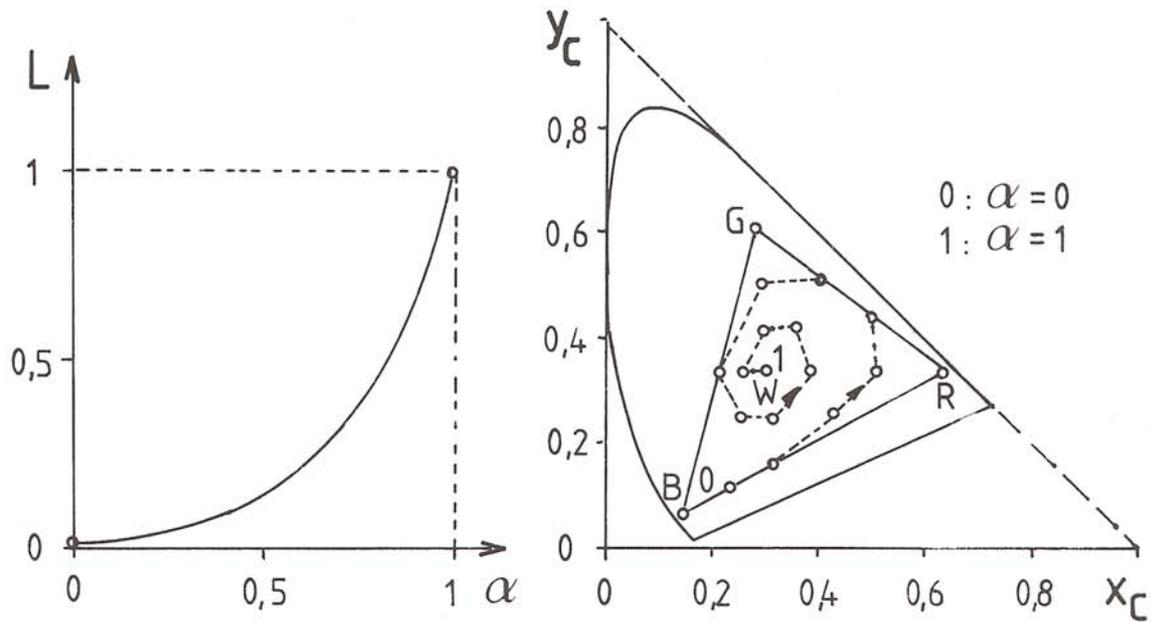


Fig.2.3 Courbes de luminance et de chrominance pour la représentation en fausses couleurs de l'image ci-dessous. α est l'altitude normée à 1.

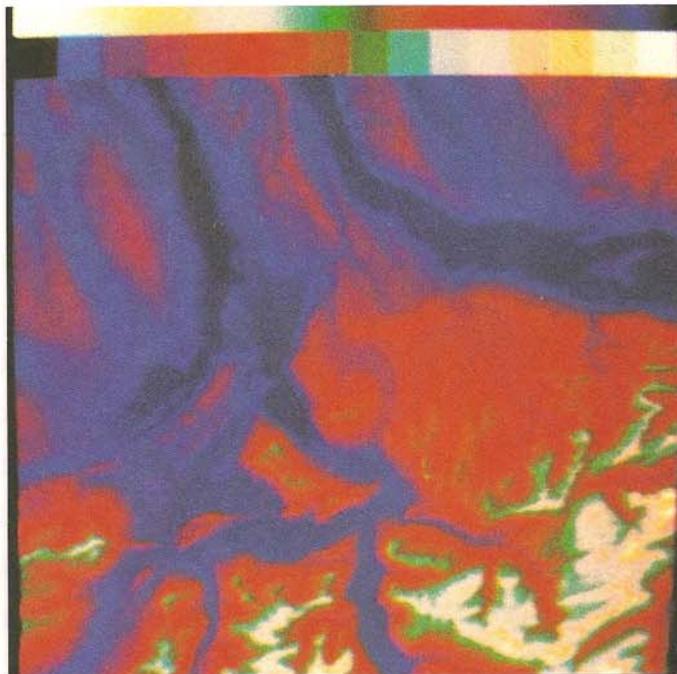


Fig.2.4 Carte d'altitude du Lac des Quatre Cantons (R) en fausses couleurs. Grille de 250 m.

[44], la représentation directe aura la forme:

$$L = L(a) \quad x_c = x_c(a) \quad y_c = y_c(a) \quad (2.2)$$

Soient les courbes de la figure 2.3, choisies selon une stratégie qui utilise la luminance pour maintenir la continuité dans la vision globale de l'image et la chrominance pour augmenter la résolution de l'échelle de luminance. Le résultat de l'application de ces fonctions à une maquette de terrain est illustrée par la figure 2.4 qui confirme, par comparaison avec la figure 2.2, la possibilité des fausses couleurs de reproduire un domaine d'amplitude avec une résolution accrue.

Ces exemples illustrent donc le champ d'action de la manipulation de gamma et de la technique des fausses couleurs ainsi que l'effet de leur application à la représentation de l'altitude. On voit que ces techniques agissent essentiellement au niveau de la représentation d'une tranche d'altitude avec plus ou moins de résolution et qu'elles le font avec succès. Elles sont par contre incapables d'améliorer le rendu tridimensionnel de la représentation qui doit donc être recherché par d'autres moyens.

2.2 Ombre

On appelle ombre la transformation qui imite les conditions naturelles d'une surface illuminée par une source de lumière. Soit donc la situation d'une surface illuminée et observée à la verticale, dont on désire connaître l'image (fig.2.5). La luminance de la surface observée est déterminée essentiellement par les deux phénomènes que sont la réflexion et l'ombre. Pour séparer les problèmes, je vais inclure ces deux phénomènes dans les deux notions d'ombre propre et d'ombre portée selon la nature locale ou globale des phénomènes.

2.2.1 Ombre propre

C'est l'obscurité provoquée par la réflexion variable de la

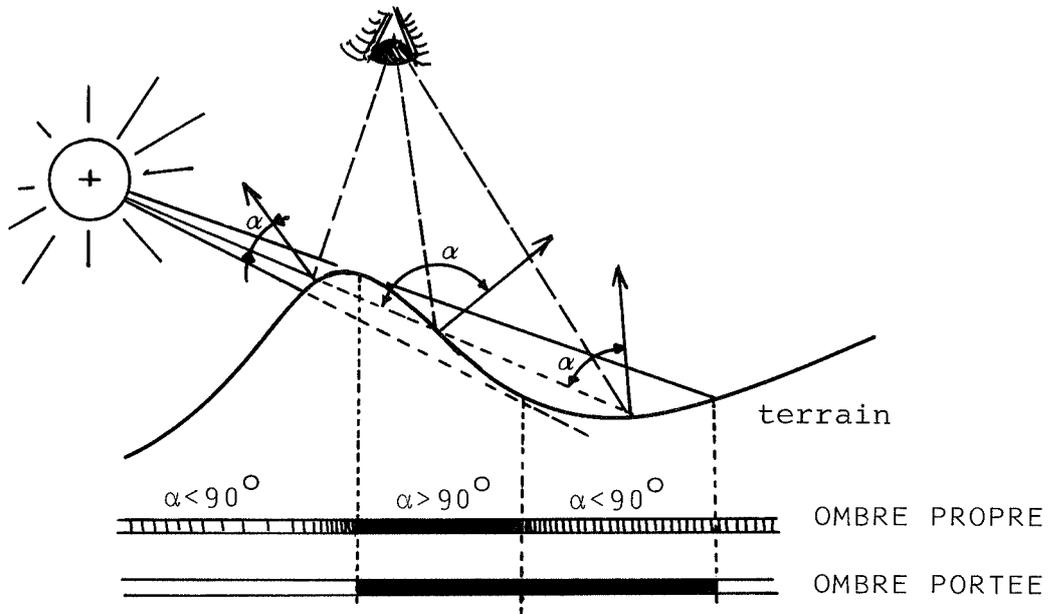


Fig.2.5 Définition de l'ombre propre et de l'ombre portée d'un terrain éclairé

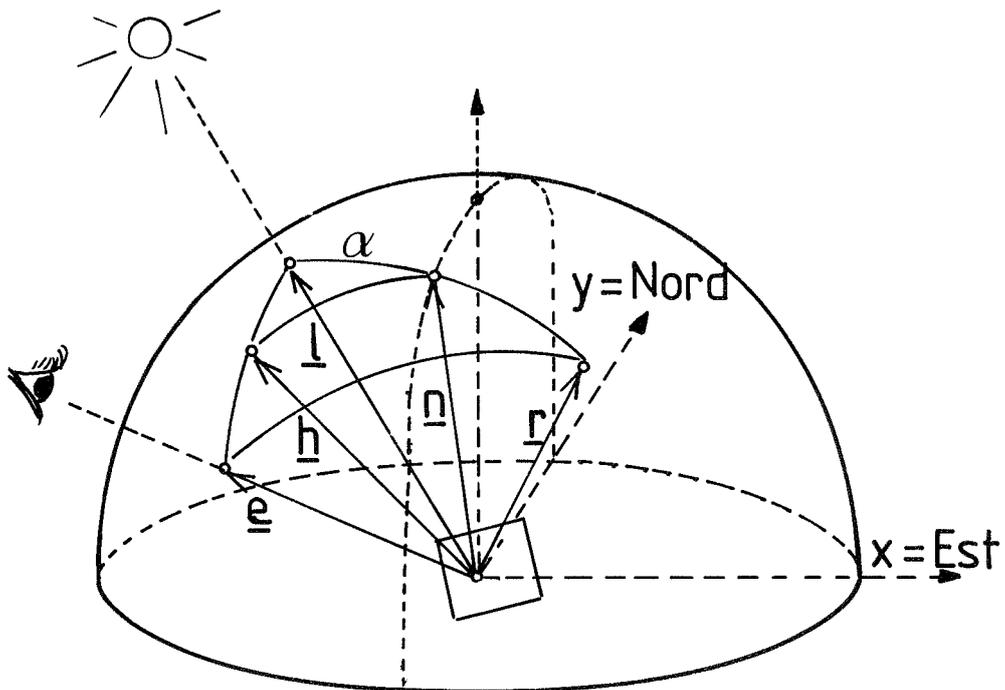


Fig.2.6 Modélé de la réflexion de la lumière en un point de la surface.

lumière sur une surface. Je vais maintenant modéliser la réflexion de la lumière en un point de cette surface et en analyser l'aptitude à transformer un terrain en un relief plastique.

Modèle de réflexion

Des nombreuses études sur la réflexion de la lumière [6][35][36] je retiens les modèles de Phong [43] et de Blinn [8] sans considérer les subtilités du modèle de Torrance et Sparrow [49]. Ces deux modèles considèrent la lumière réfléchie comme la somme d'une composante ambiante, d'une composante diffuse et d'une composante spéculaire.

Soit la figure 2.6 représentant un élément de surface unitaire éclairé par une source lumineuse dans la direction \underline{l} et vu par un observateur situé dans la direction \underline{e} . Tous les vecteurs $\underline{l}, \underline{e}, \underline{n}, \underline{h}$ et \underline{r} sont unitaires. La luminance L perçue vaut:

$$L = p_a + p_d \cdot d + p_s \cdot s \quad (2.3)$$

où: p_a = proportion de réflexion ambiante
 p_d = proportion de réflexion diffuse
 p_s = proportion de réflexion spéculaire
 d = quantité de réflexion diffuse
 s = quantité de réflexion spéculaire

La réflexion diffuse est définie par la loi de Lambert qui admet une réflexion de la lumière incidente égale dans toutes les directions. La lumière incidente d'un élément de surface varie cependant directement avec sa section efficace par rapport à la direction d'illumination \underline{l} . La section efficace d'une surface unitaire avec une normale \underline{n} par rapport à \underline{l} est égale au produit scalaire $\underline{n} \cdot \underline{l}$ des vecteurs unitaires. La quantité de réflexion diffuse vaut donc:

$$d = \max(\underline{n} \cdot \underline{l}, 0) \quad (2.4)$$

formule qui tient compte du fait que la réflexion est nulle

quand le produit scalaire est négatif, soit quand la surface est illuminée par l'arrière.

La réflexion spéculaire se caractérise par un surplus de lumière dans la direction de réflexion \underline{r} symétrique à la direction d'incidence par rapport à la normale \underline{n} . Déduite d'un modèle où la surface réfléchissante est constituée de nombreux petits miroirs, elle vaut:

$$s = (\cos\sigma)^c \quad (2.5)$$

Elle est maximale pour la direction \underline{r} et décroît lorsque la direction d'observation \underline{e} s'éloigne de \underline{r} . Le facteur c , généralement compris entre 2 et 80, contrôle cette décroissance.

On trouve deux définitions différentes pour σ . Pour Phong, c'est l'angle entre \underline{e} et \underline{r} . Dans ce cas la réflexion spéculaire se calcule comme suit:

$$s = (\underline{e} \cdot \underline{r})^c \quad (\text{Phong}) \quad (2.6)$$

avec: $\underline{r} = 2 \cdot (\underline{n} \cdot \underline{l}) \cdot \underline{n} - \underline{l}$

Pour Blinn, l'angle σ est l'angle entre \underline{n} et un nouveau vecteur \underline{h} , à mi-chemin de \underline{l} et de \underline{e} :

$$s = (\underline{n} \cdot \underline{h})^c \quad (\text{Blinn}) \quad (2.7)$$

avec: $\underline{h} = \frac{\underline{l} + \underline{e}}{|\underline{l} + \underline{e}|}$

Pour un effet qualitativement semblable, ces deux définitions ne soutiennent pas moins une conception différente. La définition de Phong voit un \underline{r} fixe et une diminution de la réflexion spéculaire au fur et à mesure que \underline{e} s'éloigne de \underline{r} . La définition de Blinn par contre voit un vecteur \underline{h} fixe et une réflexion spéculaire diminuant lorsque \underline{n} s'éloigne de \underline{h} .

Cette différence de conception est doublée d'une différence pratique lors de la synthèse d'une image. Les vecteurs \underline{l} et

\underline{e} sont constants et seule varie la normale \underline{n} d'un point à l'autre de la surface. Dans ces conditions la formule de Blinn a un vecteur \underline{h} constant et est donc bien plus économique à calculer.

Quatre méthodes pour calculer la normale

Le vecteur unitaire \underline{n} normal à la surface continue $a(x,y)$ vaut:

$$\underline{n}^* (x,y) = \left(- \frac{\delta a(x,y)}{\delta x} \quad - \frac{\delta a(x,y)}{\delta y} \quad 1 \right)$$

$$\underline{n} = \frac{\underline{n}^*}{|\underline{n}^*|} \tag{2.8}$$

Le vecteur unitaire \underline{n} normal au terrain discret a_{ij} avec une maille $\Delta\ell$ vaut:

$$\underline{n}_{ij}^* = \left(- \Delta a_{xij} \quad - \Delta a_{yij} \quad \Delta\ell \right)$$

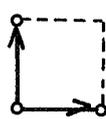
$$\underline{n} = \frac{\underline{n}^*}{|\underline{n}^*|} \tag{2.9}$$

où Δa est la différence d'altitude d'une maille à l'autre en direction x ou y . Sa valeur diffère suivant l'hypothèse choisie. Considérant l'équivalence de notation:

$$\begin{bmatrix} a_{i-1,j+1} & a_{i,j+1} & a_{i+1,j+1} \\ a_{i-1,j} & a_{i,j} & a_{i+1,j} \\ a_{i-1,j-1} & a_{i,j-1} & a_{i+1,j-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_4 & a_3 & a_2 \\ a_5 & a_0 & a_1 \\ a_6 & a_7 & a_8 \end{bmatrix}$$

voici ces hypothèses:

a) cas le plus simple: normale au plan défini par 3 points:



$$\Delta a_x = a_1 - a_0$$

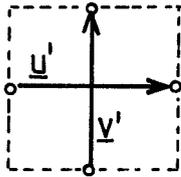
$$\Delta a_y = a_3 - a_0 \tag{2.10}$$

b) normale au plan défini par les vecteurs moyens \underline{u}' et \underline{v}' ; normale aux vecteurs diagonaux non coplanaires \underline{u}'' et \underline{v}'' :



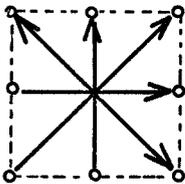
$$\begin{aligned} \Delta a_x &= \frac{1}{2}(a_1 - a_0 + a_2 - a_3) \\ \Delta a_y &= \frac{1}{2}(a_3 - a_0 + a_2 - a_1) \end{aligned} \quad (2.11)$$

c) normale aux vecteurs non coplanaires \underline{u}' et \underline{v}' traversant deux mailles; normale à la surface d'interpolation spline de degré 2 au moins:



$$\begin{aligned} \Delta a_x &= \frac{1}{2}(a_1 - a_5) \\ \Delta a_y &= \frac{1}{2}(a_3 - a_7) \end{aligned} \quad (2.12)$$

d) normale aux vecteurs moyens traversant deux mailles:



$$\begin{aligned} \Delta a_x &= \frac{1}{8}(a_2 - a_6) + \frac{1}{4}(a_1 - a_5) + \frac{1}{8}(a_8 - a_4) \\ \Delta a_y &= \frac{1}{8}(a_4 - a_8) + \frac{1}{4}(a_3 - a_7) + \frac{1}{8}(a_2 - a_6) \end{aligned} \quad (2.13)$$

La normale ainsi déterminée vaut pour la facette $\overline{0123}$ dans les cas a) et b) et pour le noeud 0 dans les cas c) et d). Il est important de pouvoir faire cette différence, car certaines techniques d'ombrage utilisent l'ombre définie au noeud alors que d'autres techniques utilisent une ombre définie pour toute la surface (§4.1).

Cartes d'ombre propre

La synthèse de la carte d'ombre propre d'un terrain est liée au choix d'un certain nombre de paramètres qui sont: les conditions d'illumination, les caractéristiques réfléchissantes de la surface, les hypothèses sur la surface en un point du terrain qui dictent la méthode à choisir pour calculer la normale. Voici une analyse de ces paramètres dans le but d'une synthèse produisant un effet plastique optimal.

Les conditions d'illumination sont déterminées par la direction de la source lumineuse \underline{l} et par la proportion de lumière ambiante p_a . Les figures 2.7.a,b et c montrent cette influence que je résume ainsi: une illumination latérale pas trop rasante contribue positivement et la lumière

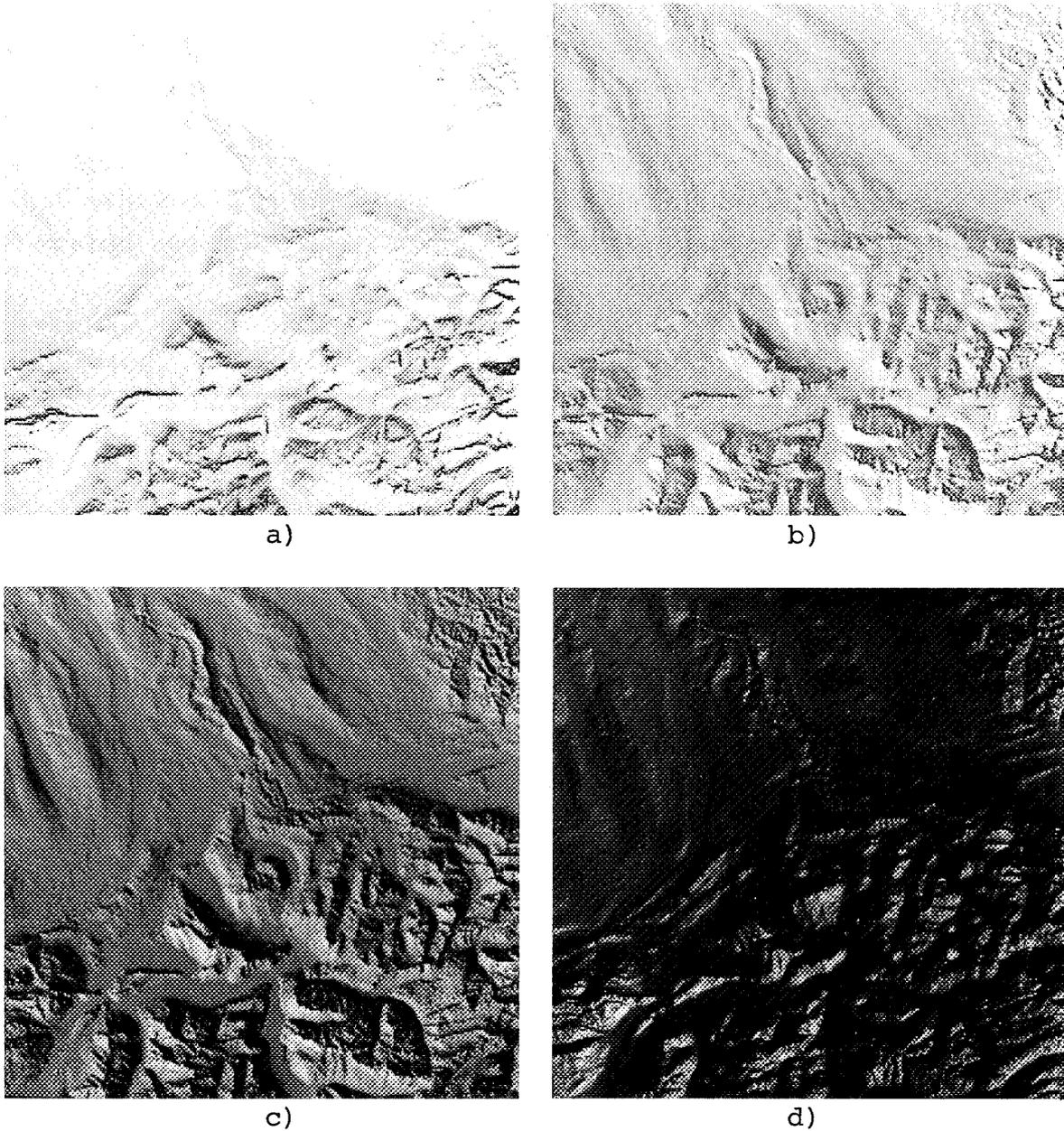
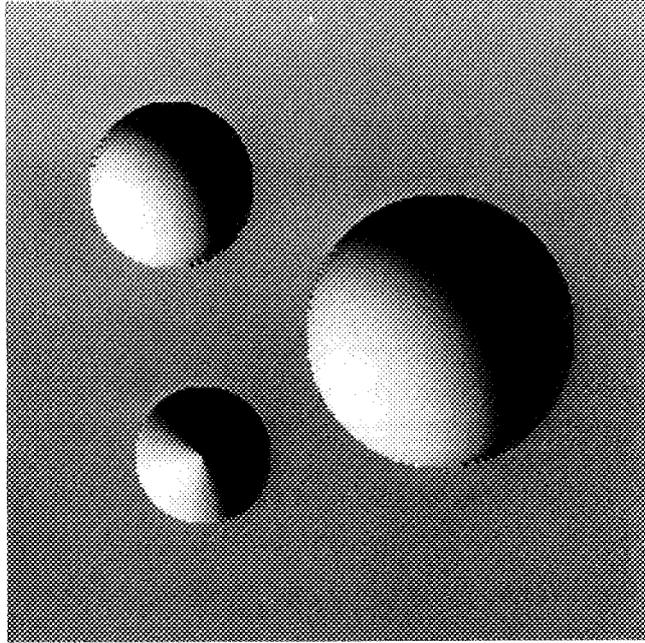
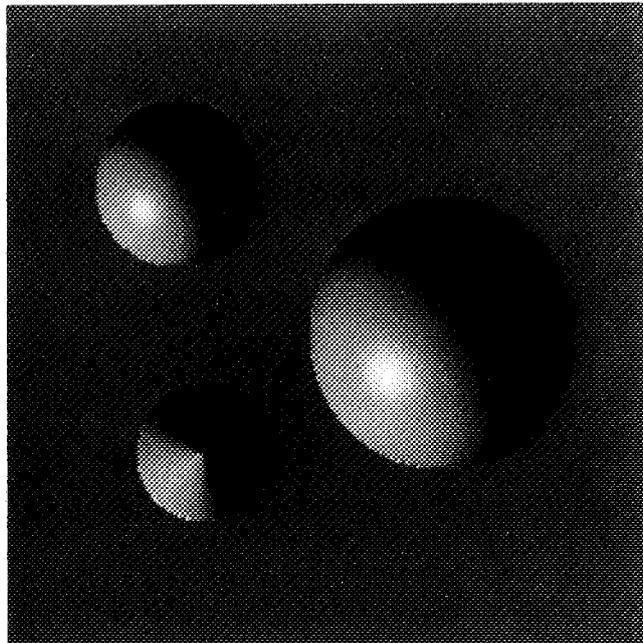


Fig.2.7 Carte d'ombre propre du Lac des Quatre Cantons(R). Grille de 250 m. Influence du rendu tridimensionnel des conditions d'illumination et du type de réflexion:

- a) juin 12 h; réflexion diffuse 100%
- b) mars 15 h; réflexion ambiante 40% et diffuse 60%
- c) mars 15 h; réflexion diffuse 100%
- d) mars 9 h; réflexion diffuse 60% et spéculaire 40% (c=20)



a) mars 15 h; réflexion diffuse 100%



b) mars 15 h; réflexion diffuse 60% et spéculaire
40% (c=20)

Fig.2.8 Carte d'ombre propre de la maquette géométrique
avec et sans réflexion spéculaire

ambiante négativement au rendu tridimensionnel.

Concernant la direction d'illumination, il faut relever que celle-ci peut être choisie de manière tout-à-fait libre. Cependant, puisqu'il s'agit de simuler des terrains existants, je choisirai souvent des conditions d'illumination naturelles dans les exemples. Les directions de \underline{l} correspondantes sont reportées en annexe (A.2).

Les qualités réfléchissantes de la surface sont matérialisées par les proportions diffuse p_d et spéculaire p_s ainsi que par l'exposant spéculaire c . Les figures 2.7.c et d, 2.8.a et b, permettent de comparer l'aspect de surfaces diffuses et métallisées (réflexion diffuse et spéculaire combinées). On constate d'abord que l'effet tridimensionnel est parfaitement rendu avec la réflexion diffuse seule. On constate ensuite les effets suivants: la réflexion spéculaire accroît le réalisme de la représentation; elle est cependant liée à deux inconvénients qui sont, d'une part et de manière générale, la réduction du domaine de luminance attribué normalement à la réflexion diffuse seule et, d'autre part et spécialement pour les surfaces présentant peu de continuité, l'apparition de discontinuités dans les reflets. Ces exemples démontrent finalement que l'usage de la réflexion spéculaire est réservé aux surfaces présentant une grande continuité comme la maquette géométrique (fig.2.8) ou le terrain largement interpolé (fig.2.19.b). Dans le cas général d'une maquette de terrain, où elle a plutôt tendance à diminuer le rendu de l'ombrage diffus, la réflexion spéculaire est à éviter.

La manière de calculer la normale à la surface du terrain a une influence non négligeable sur l'aspect de l'image finale. Le choix de la méthode appropriée dépend dans une large mesure de la qualité de la maquette utilisée et du but poursuivi. La figure 2.9 illustre ceci par une comparaison des quatre méthodes précitées appliquées à la maquette Mittelleggi(G). La méthode a) accentue toute une série

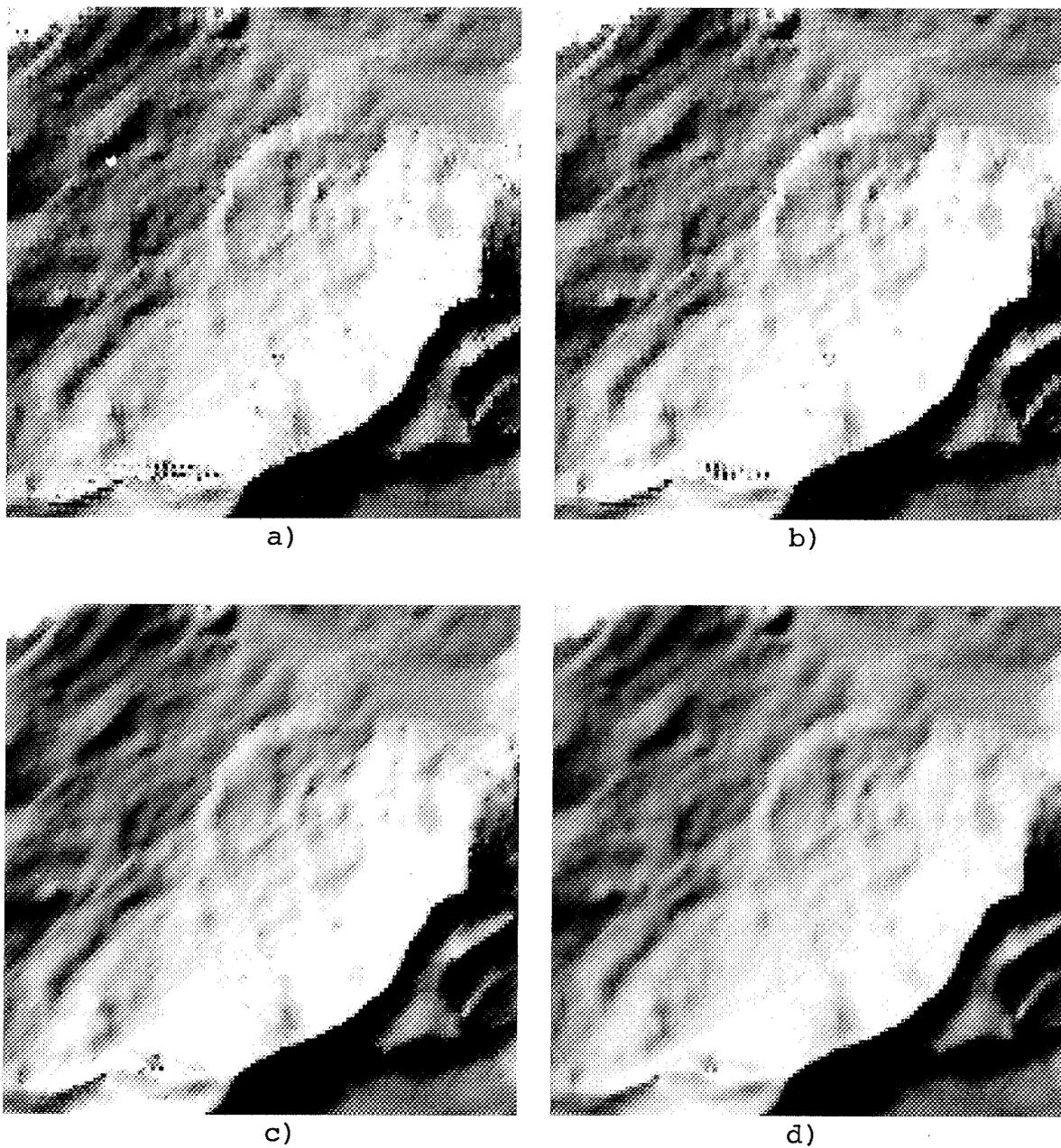


Fig.2.9 Carte d'ombre propre de Mittelleggi(G). Grille de 50 m. Agrandissement de 2 par répétition. L'illumination est du NW, $\underline{l} = (-1, 1, 1)$. Influence du calcul de la normale qui se base, dans chaque cas sur:

- a) 3 points sur une maille
- b) 4 points sur une maille
- c) 4 points sur 4 mailles
- d) 8 points sur 4 mailles

de points qui se révèlent être les points spéciaux de la maquette, ajoutés lors de la phase d'interpolation; la méthode d) les supprime et b) et c) sont des compromis entre-deux. On choisira donc une méthode ou l'autre selon que le but est de visualiser ces détails, pour les localiser ou les modifier par exemple, ou que le but est de visualiser le relief avec un effet plastique optimal.

Cet exemple débouche aussi sur une question: ces points sont-ils des artefacts ou le terrain est-il vraiment ainsi? Avant de répondre, il faut considérer deux faits. D'une part, la méthode d'interpolation utilisée pour générer la maquette a comme critère de minimaliser l'écart entre la maquette et le terrain, ce qui est conforme au but recherché [54]. D'autre part, la représentation de cette maquette fait apparaître des effets que l'oeil interprète avec peine. Il faut donc répondre affirmativement aux deux parties de la question et considérer que la synthèse d'images a des critères d'interpolation spécifiques. Ce sujet est traité au paragraphe 2.3.

Les exemples présentés ci-dessus démontrent finalement que l'ombre propre, basée sur la seule réflexion diffuse, est parfaitement en mesure de rendre l'effet tridimensionnel du relief.

2.2.2 Ombre portée

C'est l'obscurité portée par un objet interceptant la lumière. Il s'agit, dans ce paragraphe, d'établir une méthode de calcul de l'ombre portée spécialement adaptée au cas du terrain, de manière à compléter la carte d'ombre propre.

Choix et principe de calcul

Les algorithmes d'ombre portée connus considèrent des objets quelconques, mais ne s'appliquent pratiquement qu'à des maquettes simples de 100 à 400 facettes environ [4][19][51]. Pour traiter une maquette complexe, il faut donc simplifier le problème en le restreignant. Je développe maintenant une

méthode spécialisée pour le cas de la carte orthographique d'un terrain illuminé par des rayons parallèles.

Le principe de cette méthode consiste à déplacer un plan à travers le terrain de sorte qu'il s'éloigne toujours de la source de lumière (fig.2.10). A un moment donné, ce plan, appelé plan d'ombre, contient l'ombre portée de tout le terrain déjà balayé sous la forme d'un profil d'ombre $o(t)$. L'intersection du plan avec le terrain définit un second profil, appelé profil d'altitude $a(t)$, qu'il faut comparer et combiner avec le profil d'ombre. Le terrain est à l'ombre si:

$$o(t) > a(t) \quad (2.14)$$

Le nouveau profil d'ombre $o^*(t)$ vaut:

$$o^*(t) = \max(o(t), a(t)) \quad (2.15)$$

Quelle que soit la direction d'illumination, il est toujours possible de choisir un plan d'ombre vertical qui est aussi parallèle à la grille. Cette possibilité confère à cette méthode tout son avantage, qui est de traiter les données séquentiellement avec, comme conséquence pratique, la faculté de traiter des maquettes presque illimitées.

A maquette égale, la qualité de cette méthode est en relation directe avec la résolution de discrétisation de l'ombre. Cette résolution est bidimensionnelle: discrétisation de l'ombre en profils d'une part, discrétisation des profils en échantillons d'ombre d'autre part. La qualité de l'ombre calculée est donc d'autant meilleure que cette résolution est élevée. Un second point qui influence la qualité est la méthode utilisée pour interpoler et le profil d'ombre, et le profil d'altitude. Je retiens, en conclusion, que la qualité est donc directement liée à l'effort de calcul et qu'elle présente l'avantage d'être modulable à souhait.

Il faut signaler un autre point important concernant la qualité et la discrétisation. A chaque fois qu'un profil est

discrétisé, une erreur est commise. Or, au moment de comparer le profil d'altitude avec celui d'ombre, les deux bases ne coïncident généralement pas et il faut donc transposer un profil dans la base de l'autre. Les deux possibilités ne sont pas identiques. Pour parer à une discrétisation récursive et par contre susceptible de dégénérescence du profil d'ombre, il faut que celui-ci soit toujours exprimé dans la même base et que chaque profil d'altitude lui soit adapté pour la comparaison. En d'autres termes, il est préférable de maintenir le plan d'ombre fixe et d'y projeter un à un les profils d'altitude plutôt que de projeter successivement le profil d'ombre.

Algorithme

Le calcul de l'ombre portée comprend deux phases qui sont à répéter pour chaque profil du terrain. La première phase (fig.2.11) consiste à projeter le profil j parallèlement au vecteur de l'illumination $\underline{l}=(l_x l_y l_z)$ sur le plan d'ombre et est décrite par la transformation suivante:

$$(x' \quad z') = (x \quad y \quad z \quad 1) \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -l_x/l_y & -l_z/l_y \\ 0 & 1 \\ t_x & 0 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

La seconde phase (fig.2.12) consiste à comparer, dans le plan d'ombre, le profil d'altitude ainsi projeté $a'(x')$ avec le profil d'ombre $o'(x')$ calculé lors de la passe précédente. Chaque profil ayant sa base de discrétisation propre, il faut interpoler les profils pour les comparer. J'utilise ici les formules de l'interpolation linéaire. Soient les bases de l'altitude et de l'ombre indexées respectivement par i et k . L'index i marque la place originelle d'un point dans la maquette et permet d'y retourner l'ombre propre. L'index k marque l'abscisse de l'échantillon d'ombre immédiatement inférieur à x'_i . Cela étant, la condition d'ombre

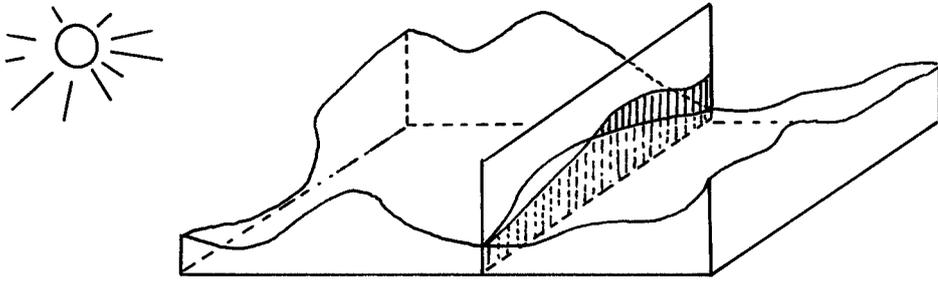


Fig.2.10 Principe du calcul de l'ombre portée: la surface est balayée par un plan d'ombre.

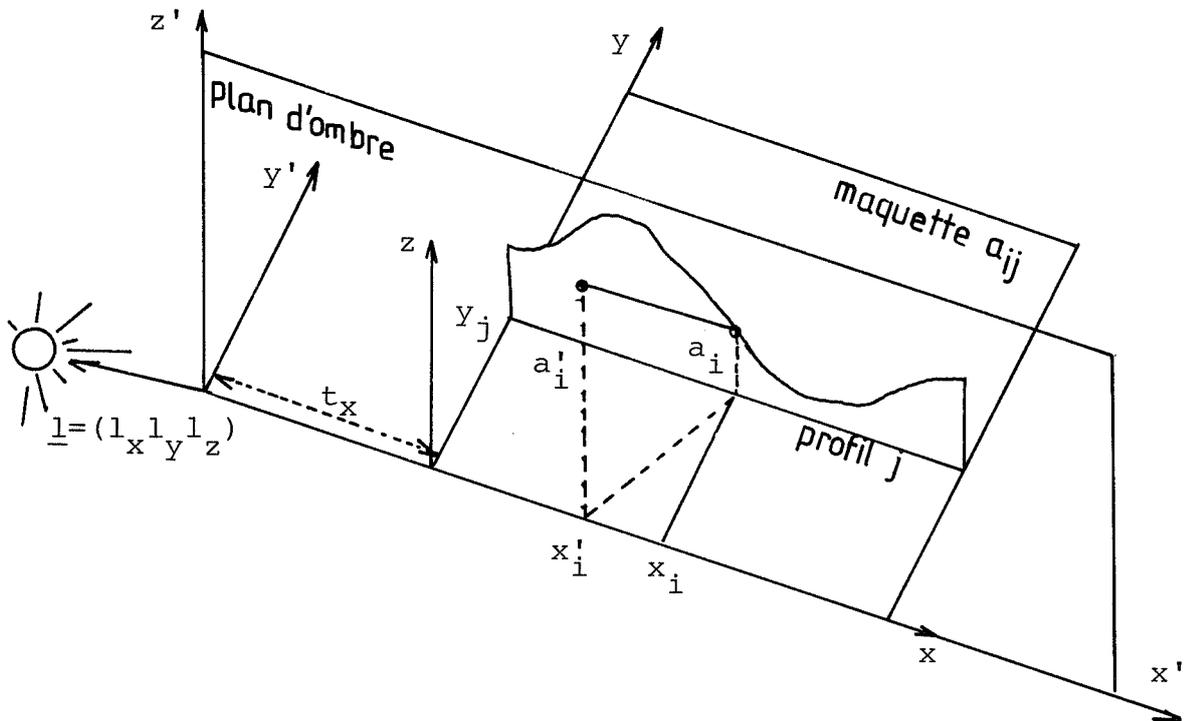


Fig.2.11 Projection d'un profil d'altitude a_i du système (x, y, z) dans le plan d'ombre du système (x', y', z')

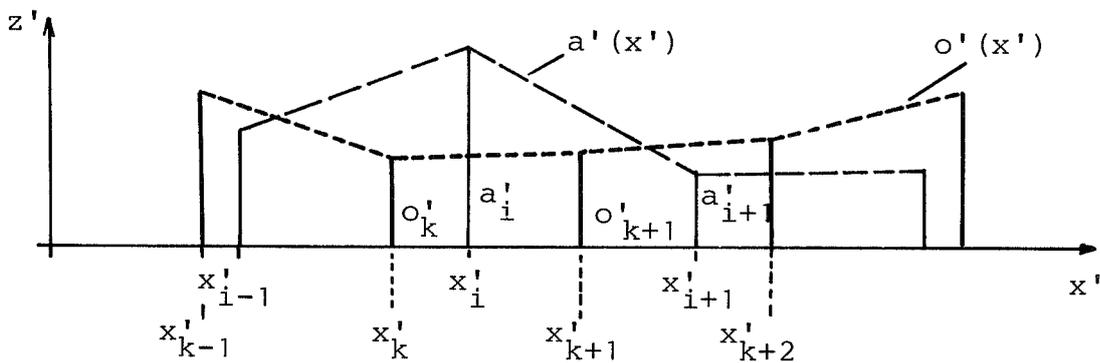


Fig.2.12 Plan (x', z') . Comparaison des altitudes a'_i dans la base i avec les ombres o'_k dans la base k

propre, établie en x'_i , s'écrit:

$$\begin{aligned} &\text{il y a une ombre propre en } i \text{ si: } a'_i < o'_i \\ &\text{avec: } o'_i = o'_k \cdot \frac{x'_{k+1} - x'_i}{x'_{k+1} - x'_k} + o'_{k+1} \cdot \frac{x'_i - x'_k}{x'_{k+1} - x'_k} \end{aligned} \quad (2.17)$$

Finalement, le profil d'ombre actualisé, établi en x'_k , a la forme:

$$\begin{aligned} &o'_k = \max(o'_k, a'_k) \\ &\text{avec: } a'_k = a'_{i-1} \cdot \frac{x'_i - x'_k}{x'_i - x'_{i-1}} + a'_i \cdot \frac{x'_k - x'_{i-1}}{x'_i - x'_{i-1}} \end{aligned} \quad (2.18)$$

et doit être mémorisé pour être utilisé par la passe suivante.

Le résultat final est une image binaire représentant la carte de l'ombre propre. Cette carte a ses applications propres [15]. Pour la représentation du relief cependant, elle n'a de sens que combinée à la carte d'ombre propre.

2.2.3 Carte d'ombre

La carte d'ombre a la luminance de l'ombre propre L atténuée par l'ombre portée:

$$L' = \begin{cases} \varepsilon \cdot L & : \text{avec ombre portée } (0 \leq \varepsilon < 1) \\ L & : \text{sans ombre portée} \end{cases} \quad (2.19)$$

Les cartes d'ombre des figures 2.13 et 2.14 illustrent la technique de l'ombre propre et de l'ombre portée combinées. C'est l'ombre propre qui est surtout responsable de l'effet plastique de l'image. L'ombre portée contribue cependant sensiblement à en améliorer la qualité, notamment en trois points: 1) elle crée une relation géométrique entre objets qui permet de les situer mieux dans l'espace: relation entre cône et demi-sphère dans la figure 2.13, relation entre maquette et niveau de la mer dans la figure 2.14; 2) elle satisfait le besoin de réalisme de l'oeil qui, à priori, en attend la présence dans une scène éclairée;

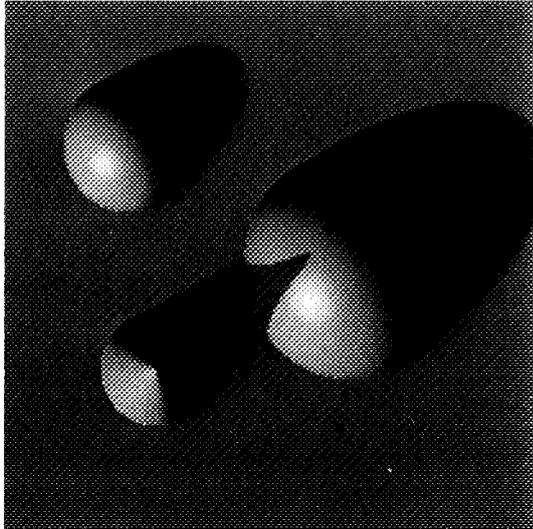


Fig.2.13 Carte d'ombre (propre et portée) de la maquette géométrique. Illumination de mars, 15h, réflexion diffuse 60% et spéculaire 40% ($c=50$); coefficient d'ombre portée $\varepsilon = 0,5$

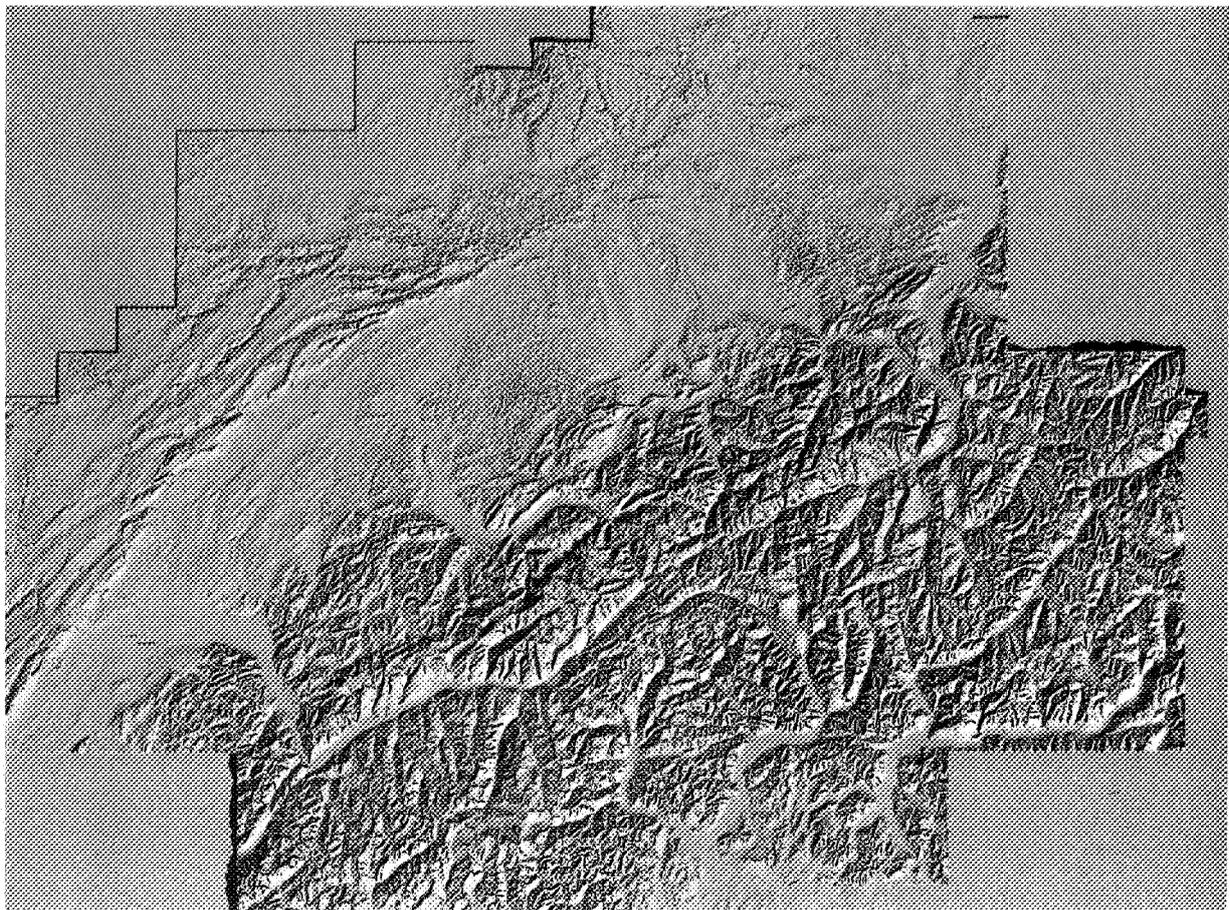


Fig.2.14 Carte d'ombre (propre et portée) de la maquette Rimini dans son ensemble. Illumination du SE, $\underline{l} = (1,-1,1)$; réflexion diffuse 100%; coefficient d'ombre portée $\varepsilon = 0$

3) elle supprime finalement l'ambiguïté intrinsèque de la carte d'ombre seule qui, selon le sens de l'éclairage admis par l'observateur, représente soit le relief positif, soit le relief négatif.

2.3 Interpolation

Pourquoi interpoler? Dès que les points de l'image dépassent en nombre les noeuds de la maquette, il faut gagner les nouveaux points par interpolation.

Où interpoler? L'ombrage transformant l'objet en image, on a le choix d'effectuer l'interpolation avant ou après la transformation, soit dans l'espace de l'objet ou dans celui de l'image. Suivant qu'on l'effectue ici ou là, l'interpolation aura un effet différent sur la qualité de l'image, car l'ombrage est une transformation non-linéaire. Cet aspect est traité au paragraphe 2.3.3.

Comment interpoler? Du point de vue de la théorie de l'information, la maquette ne peut reproduire le terrain original que si le critère de Nyquist a été respecté lors de l'échantillonnage. Cela n'est généralement pas le cas et est loin de l'être pour les maquettes Rimini et Grindelwald. A défaut de règle générale, il faut alors émettre une hypothèse d'interpolation et la vérifier dans des cas pratiques. Je distingue deux manières différentes de procéder. On peut comparer la maquette interpolée avec le terrain réel et ainsi trouver une méthode d'interpolation adéquate. C'est en général l'approche lors du relevé d'une maquette. L'autre manière, qui est celle traitée ici, est orientée vers la visualisation. Elle consiste à faire passer, par les échantillons de la maquette, une surface d'aspect plastique qui les lie au mieux.

2.3.1 Méthode d'interpolation

L'interpolation linéaire des profils ou bilinéaire des faces

est la manière la plus directe et la plus simple de procéder selon le but énoncé. Elle n'est cependant guère satisfaisante comme le montre l'exemple de la figure 2.17.b. L'image donne l'impression d'une surface hérissée de petites déformations pointues et ne donne aucune vision de la forme d'ensemble. Les discontinuités de la luminance de l'image ne sont pas conformes à la réalité où, pour une surface courbe, le passage de l'ombre à la lumière se fait de manière continue.

Cette figure est aussi l'occasion d'illustrer la nature différentielle de l'ombrage se manifestant par ces discontinuités. En effet la luminance, selon sa définition, varie essentiellement avec la normale à la surface et par conséquent avec ses dérivées spatiales qui, pour l'interpolation linéaire, sont discontinues aux noeuds.

La suppression de ces discontinuités passe par une méthode d'interpolation d'ordre supérieur. La fonction d'interpolation spline est choisie parce qu'elle est, parmi toutes les fonctions d'interpolation passant par les valeurs, la plus fondue [23][29]. Elle a donc les meilleures chances de remplir les conditions de continuité nécessaires.

2.3.2 Interpolation par B-spline

Les fonctions B-spline [3][5][26] présentent surtout les avantages suivants: 1) des fonctions passant par les valeurs données, elles présentent le tracé le plus fondu car la norme des $m-1$ dérivées d'un spline de degré m entre les noeuds est minimale; 2) elles ne couvrent qu'un nombre limité de noeuds, c'est-à-dire leur support est local; 3) on peut choisir le degré m d'un spline dont toutes les dérivées de degré $m-1, \dots, 1$ sont alors partout continues.

L'interpolation à deux dimensions du tableau de dimension $N \cdot N$ des valeurs g_{ij} avec une fonction spline séparable s'écrit:

$$\hat{g}(x,y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_{ij} \cdot S_i(x) \cdot S_j(y) \quad (2.20)$$

Au tableau \underline{G} des valeurs g_{ij} correspond donc un tableau \underline{C} de mêmes dimensions, comprenant les coefficients multiplicateurs de la fonction spline séparable $S_i(x) \cdot S_j(y)$.

Aux noeuds, la fonction d'interpolation passe par les échantillons g_{ij} :

$$\hat{g}(x_i, y_j) = g_{ij} \quad (2.21)$$

d'où découle la relation entre les valeurs \underline{G} et les coefficients \underline{C} . L'équation 2.20 réécrite sous forme matricielle:

$$\underline{G} = \underline{E} \cdot \underline{C} \cdot \underline{E} \quad (2.22)$$

où \underline{E} est la matrice d'interpolation faite des amplitudes des fonctions splines aux noeuds.

Le calcul de nouvelles valeurs interpolées se fera donc en deux pas. Il faut premièrement calculer les coefficients \underline{C} à partir du tableau des valeurs \underline{G} , en le multipliant à gauche et à droite par la matrice d'interpolation inversée \underline{E}^{-1} :

$$\underline{C} = \underline{E}^{-1} \cdot \underline{G} \cdot \underline{E}^{-1} \quad (2.23)$$

Le deuxième pas consiste à calculer les valeurs interpolées selon la formule 2.20 en partant des coefficients \underline{C} . Pratiquement, l'interpolation se calcule maille par maille et a la forme suivante. Soit la maille (k, l) de dimension $\Delta l \cdot \Delta l$. Les coordonnées d'un point de la maille sont:

$$\begin{aligned} x &= x_k + \xi \cdot \Delta l & (0 \leq \xi < 1) \\ y &= y_l + \eta \cdot \Delta l & (0 \leq \eta < 1) \end{aligned} \quad (2.24)$$

et la surface d'interpolation s'écrit:

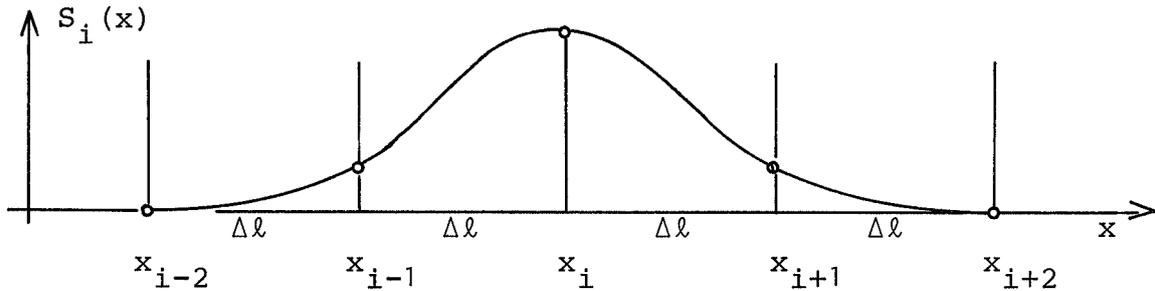
$$\hat{g}_{kl}(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_{ij} \cdot S_i(x_k + \xi \cdot \Delta l) \cdot S_j(y_l + \eta \cdot \Delta l) \quad (2.25)$$

Je vais maintenant traiter ces deux pas plus en détail, mais dans le cas du spline cubique ($m=3$) uniquement, les cas de degré différent étant semblables. C'est l'occasion

d'évaluer les coûts de l'interpolation et de suggérer un moyen de simplification.

La fonction B-spline cubique

Elle résulte de la triple convolution de la fonction rectangulaire par elle-même et a la forme suivante [29]:



$$S_i(x) = \frac{1}{6 \cdot \Delta l^4} \cdot \left[(x-x_{i-2})^3 \cdot u(x-x_{i-2}) - 4 \cdot (x-x_{i-1})^3 \cdot u(x-x_{i-1}) + 6 \cdot (x-x_i)^3 \cdot u(x-x_i) - 4 \cdot (x-x_{i+1})^3 \cdot u(x-x_{i+1}) + (x-x_{i+2})^3 \cdot u(x-x_{i+2}) \right] \quad (2.26)$$

avec: $u(x-x_m) = \begin{cases} 1 & \text{pour } x > x_m \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

La valeur de la fonction spline cubique aux noeuds est respectivement $1/6$, $4/6$, $1/6$. Ces valeurs forment la matrice d'interpolation qui vaut alors:

$$\underline{E} = \frac{1}{6} \cdot \begin{bmatrix} 4 & 1 & & 0 \\ 1 & 4 & 1 & \\ & 1 & 4 & 1 \\ 0 & & \cdot & \cdot \\ & & & 1 & 4 \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

La fonction spline exprimée par maille (2.24) a donc la forme:

$$S_i(x) = S(x_k + \xi \cdot \Delta l) = \begin{cases} s_1(\xi) & \text{pour } k=i+1 \\ s_2(\xi) & \text{pour } k=i \\ s_3(\xi) & \text{pour } k=i-1 \\ s_4(\xi) & \text{pour } k=i-2 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} \text{avec: } s_1(\xi) &= \frac{1}{6} \cdot (-\xi^3 + 3 \cdot \xi^2 - 3 \cdot \xi + 1) \\ s_2(\xi) &= \frac{1}{6} \cdot (3 \cdot \xi^3 - 6 \cdot \xi^2 + 4) \\ s_3(\xi) &= \frac{1}{6} \cdot (-3 \cdot \xi^3 + 3 \cdot \xi^2 + 3 \cdot \xi + 1) \\ s_4(\xi) &= \frac{1}{6} \cdot \xi^3 \end{aligned}$$

qui permet d'écrire la surface d'interpolation pour une maille:

$$\hat{g}_{kl}(\xi, \eta) = \underline{s}(\xi) \cdot \underline{C}_{kl} \cdot \underline{s}^T(\eta) \quad (2.30)$$

$$\text{avec: } \underline{C}_{kl} = \begin{bmatrix} c_{k-1, l-1} & c_{k-1, l} & c_{k-1, l+1} & c_{k-1, l+2} \\ c_{k, l-1} & c_{k, l} & c_{k, l+1} & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ c_{k+2, l-1} & \cdot & \cdot & c_{k+2, l+2} \end{bmatrix}$$

$$\text{et: } \underline{s}(\xi) = (s_1(\xi) \quad s_2(\xi) \quad s_3(\xi) \quad s_4(\xi))$$

Cette relation définit la surface d'interpolation de la maille (k,l) en fonction des 16 coefficients des noeuds les plus voisins.

Discrétiser la fonction d'interpolation revient à dresser le tableau des valeurs \hat{g} pour des valeurs de ξ et η discrètes. Soit une discrétisation uniforme en K pas. K est appelé le facteur linéaire d'interpolation et doit être entier. Alors le tableau $\hat{\underline{G}}_{kl}$ de ces valeurs, de dimension $K \cdot K$, s'écrit:

$$\hat{\underline{G}}_{kl} = \underline{s}^T \cdot \underline{C}_{kl} \cdot \underline{s} \quad (2.31)$$

$$\text{avec: } \underline{s} = \left(\underline{s}^T(0) \quad \underline{s}^T\left(\frac{1}{K}\right) \quad \dots \quad \underline{s}^T\left(\frac{1-K}{K}\right) \right)$$

Inversion de la matrice d'interpolation \underline{E}

Il existe une forme analytique pour inverser la matrice d'interpolation cubique \underline{E} de dimension $N \cdot N$, à condition de modifier légèrement \underline{E} . Soit donc une approximation de \underline{E} définie

par la matrice circulante \underline{E}_C :

$$\underline{E}_C = \frac{1}{6} \cdot \begin{bmatrix} 4 & 1 & 0 & 0 & \cdot & 0 & 1 \\ 1 & 4 & 1 & 0 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 4 & 1 & \cdot & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 4 & \cdot & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdot & 4 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & 1 & 4 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

dont l'inverse vaut [25]:

$$\underline{E}_C^{-1} = \frac{6}{v} \begin{bmatrix} \mu_{ij} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

pour N pair: $\mu_{ij} = (-1)^{i+j} \cdot r_\ell$; $v = 4 \cdot r_{\frac{N}{2}}^{-2} \cdot r_{\frac{N}{2}-1}$

$$\ell = |\text{mod}_N(i-j) - \frac{N}{2}| \quad (2.34)$$

$$r_0=1 \quad r_1=2 \quad \dots \quad r_k=4 \cdot r_{k-1}^{-r_{k-2}} \quad (k=2, \dots, \frac{N}{2})$$

pour N impair: $\mu_{ij} = (-1)^m \cdot r$; $v = 4 \cdot r_{\frac{N-1}{2}}^{-2} \cdot r_{\frac{N-3}{2}}$

$$\ell = \text{entier} |\text{mod}_N(i-j) - \frac{N}{2}| \quad (2.35)$$

$$m = \text{entier} | |i-j| - \frac{N}{2} |$$

$$r_0=1 \quad r_1=5 \quad \dots \quad r_k=4 \cdot r_{k-1}^{-r_{k-2}} \quad (k=2, \dots, \frac{N}{2})$$

Un exemple pour N=8:

$$\underline{E}_C^{-1} = \frac{6}{46} \cdot \begin{bmatrix} 97 & -26 & 7 & -2 & 1 & -2 & 7 & -26 \\ -26 & 97 & -26 & 7 & -2 & 1 & -2 & 7 \\ 7 & -26 & 97 & -26 & 7 & -2 & 1 & -2 \\ -2 & 7 & -26 & 97 & -26 & 7 & -2 & 1 \\ 1 & -2 & 7 & -26 & 97 & -26 & 7 & -2 \\ -2 & 1 & -2 & 7 & -26 & 97 & -26 & 7 \\ 7 & -2 & 1 & -2 & 7 & -26 & 97 & -26 \\ -26 & 7 & -2 & 1 & -2 & 7 & -26 & 97 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

montre que cette matrice est aussi circulante, symétrique et à dominance diagonale.

Cette manière de faire présente deux inconvénients. Le fait

de rendre la matrice \underline{E} circulante revient à considérer le tableau des valeurs \underline{G} comme un tableau périodique, ce qu'il n'est pas. Une discontinuité est ainsi interpolée qui se manifeste pratiquement par des artefacts aux bords de l'image. Une manière de remédier à ces effets consiste à choisir une matrice \underline{G} plus grande et à inclure ainsi au calcul des valeurs périphériques du tableau à interpoler.

Le deuxième inconvénient apparaît pour des matrices \underline{G} très grandes, typiquement $N > 50$. Le calcul des coefficients \underline{C} selon 2.23, nécessitant $2N^3$ multiplications, c'est-à-dire $2N$ multiplications par coefficient, devient alors trop long. Une diminution des coûts de calcul est possible en tolérant une certaine erreur sur les coefficients. En annulant les éléments de \underline{E}_C^{-1} de valeur inférieure à une valeur arbitrairement petite δ , j'obtiens une matrice avec une bande diagonale d'éléments non-nuls de largeur L . L'erreur sur les coefficients est inférieure à 0,1% pour $L \geq 15$.

Voici un exemple pour illustrer l'effet combiné de ces deux mesures ($N=3$, $L=5$): (2.37)

$$\begin{bmatrix} c_{11} & \dots & c_{13} \\ \cdot & & \cdot \\ c_{31} & \dots & c_{33} \end{bmatrix} = \frac{1}{16} \cdot \begin{bmatrix} 1-2 & 7-2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1-2 & 7-2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1-2 & 7-2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} g_{11} & \dots & g_{17} \\ \cdot & & \cdot \\ g_{71} & \dots & g_{77} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -2 & 1 & 0 \\ 7-2 & 1 & \cdot \\ -2 & 7-2 & \cdot \\ 1-2 & 7 & \cdot \\ 0 & 1-2 & \cdot \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Autrement dit, \underline{C} est obtenu par une convolution bidimensionnelle et séparable de \underline{G} . Les coûts de calcul sont de $L \cdot (2 + (L-1)/N)$ multiplications par coefficient, c'est-à-dire $\approx 2L$ quand $N \geq L$.

2.3.3 Interpolation dans d'objet et interpolation dans l'image

L'interpolation dans l'objet est la méthode naturelle dans le sens que c'est celle qui serait utilisée dans le cas d'une grille de maquette plus fine. On en attend un bon résultat

visuel. L'interpolation dans l'image, quant à elle, parce qu'elle a lieu après l'ombrage, a l'avantage de réduire les coûts de calcul d'ombre, car il s'applique, dans ce cas, à un nombre restreint de points. J'examine maintenant ce compromis coûts/qualité.

Coûts de calcul

Soit, comme unité de coûts de calcul, l'opération principale (OP) que je définis comme les coûts pour effectuer une multiplication ou une division. Les coûts de calcul de l'ombrage dépendent dans une grande mesure de la loi d'ombrage utilisée. Pour le cas le plus simple de la réflexion diffuse seule, ces coûts peuvent être réduits à 10 OP par point transformé [30]. Les coûts de l'ombrage rapportés à un point de l'image finale sont donc:

$$\phi_o = \begin{cases} 10 & : \text{pour l'interpolation dans l'objet} \\ \frac{10}{K^2} & : \text{pour l'interpolation dans l'image} \end{cases} \quad (2.38)$$

où K est le facteur linéaire d'interpolation.

Les coûts de calcul de l'interpolation spline de degré m sont ceux du calcul de coefficients (2.37) qui sont 2L par coefficient, ajoutés aux coûts de calcul de l'interpolation proprement dite (2.31) qui sont $4+4^2/K$ pour un spline de degré 3 et $m+1+(m+1)^2/K$ par point interpolé pour un spline de degré m. Le cas spécial de l'interpolation linéaire (m=1) ne nécessitant pas le calcul des coefficients, les coûts totaux d'interpolation rapportés à un point de l'image finale valent:

$$\phi_i = \begin{cases} 2 + \frac{4}{K} & \text{pour } m=1 \\ \frac{2L}{K^2} + 1+m + \frac{(1+m)^2}{K} & \text{pour } m>1 \end{cases} \quad (2.39)$$

Une comparaison des coûts pour interpoler et ombrer une image est donnée dans la figure 2.15 qui représente ces coûts en fonction du facteur linéaire d'agrandissement K. Notons que pour $K \geq 4$ les coûts d'ombrage dominant nettement

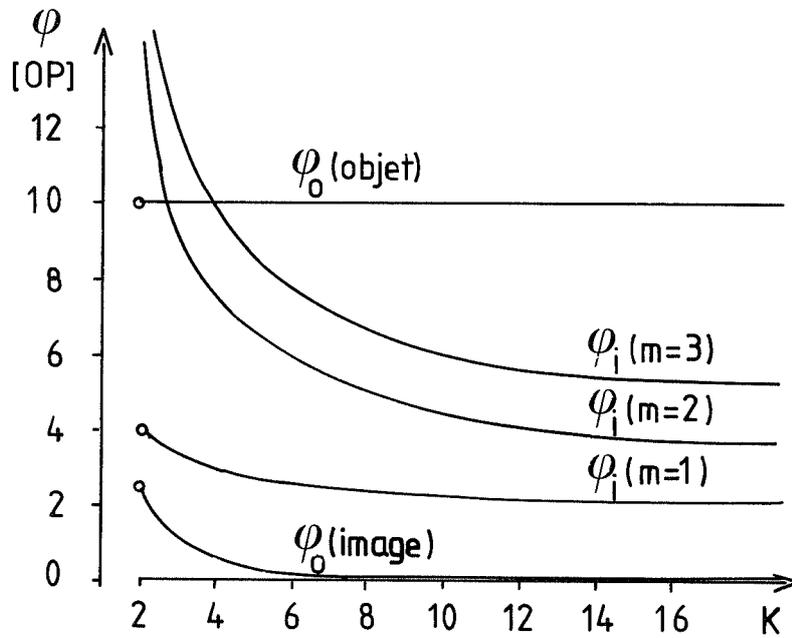


Fig.2.15 Coûts de calcul pour interpoler ϕ_i et pour ombrer ϕ_0 une maquette de terrain

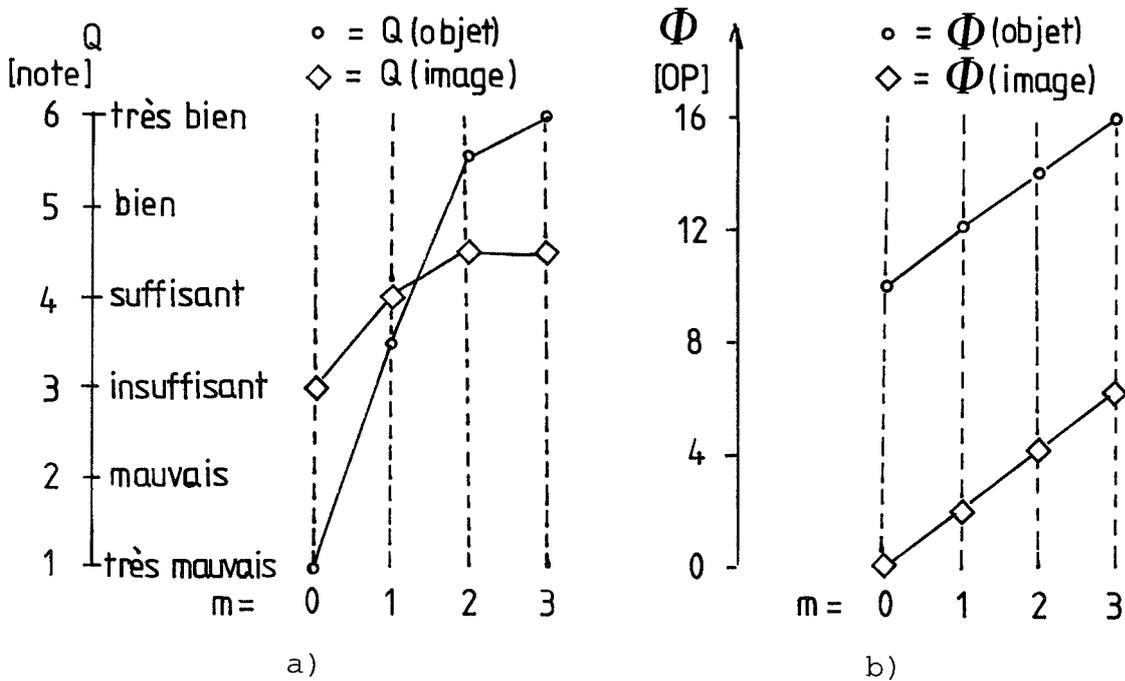


Fig.2.16 Qualité Q et coûts de calcul Φ totaux pour interpoler et ombrer une carte d'ombre:

- a) Qualité subjective basée sur le rendu des figures 2.17 et 2.18
- b) Coûts totaux par point de l'image finale ($K=10$)

les coûts d'interpolation, quand l'interpolation a lieu dans l'objet, alors que ce rapport est inversé, quand l'interpolation est dans l'image.

Il s'agit finalement de considérer les coûts totaux:

$$\Phi = \phi_i + \phi_o \quad (2.40)$$

désignés par Φ_{objet} et Φ_{image} suivant l'espace dans lequel l'interpolation a lieu. Ils sont représentés pour $K=10$ par la figure 2.16.b qui va servir de référence pour une comparaison avec la qualité.

Qualité des images

Il s'agit de comparer la qualité des images d'ombre obtenues par interpolation. L'interpolation est dans l'objet ou dans l'image, sa fonction est de degré variable.

La discussion de cette qualité est dominée par les caractéristiques de la perception visuelle d'une part et par la nature de la transformation que représente l'ombrage d'autre part. J'ai déjà dit que le réalisme exigeait une fonction-image continue (§2.3.1). L'effet des bandes de Mach [17] exige cependant que souvent, cette continuité soit étendue aussi aux dérivées de cette fonction. On s'attend donc à une amélioration de la qualité quand le degré de la fonction d'interpolation augmente. Quant à la nature différentielle de l'ombrage, elle diminue, lors de la transformation, le degré de continuité de la fonction-objet. On peut ainsi s'attendre, au niveau de l'image, à trouver les mêmes niveaux de continuité avec une fonction-objet de degré m et une fonction-image de degré $m-1$.

Les tests d'interpolation se font sur la maquette Mettenberg(R) dérivée de la maquette Rimini. Sa maille est de 500 m et correspond à la maille d'origine de Rimini dans cette région alpine. Une interpolation avec le facteur d'interpolation $K=10$ est appliquée à un tableau de $32 \cdot 32$ valeurs (15,5·15,5 km) pour obtenir un nouveau tableau de

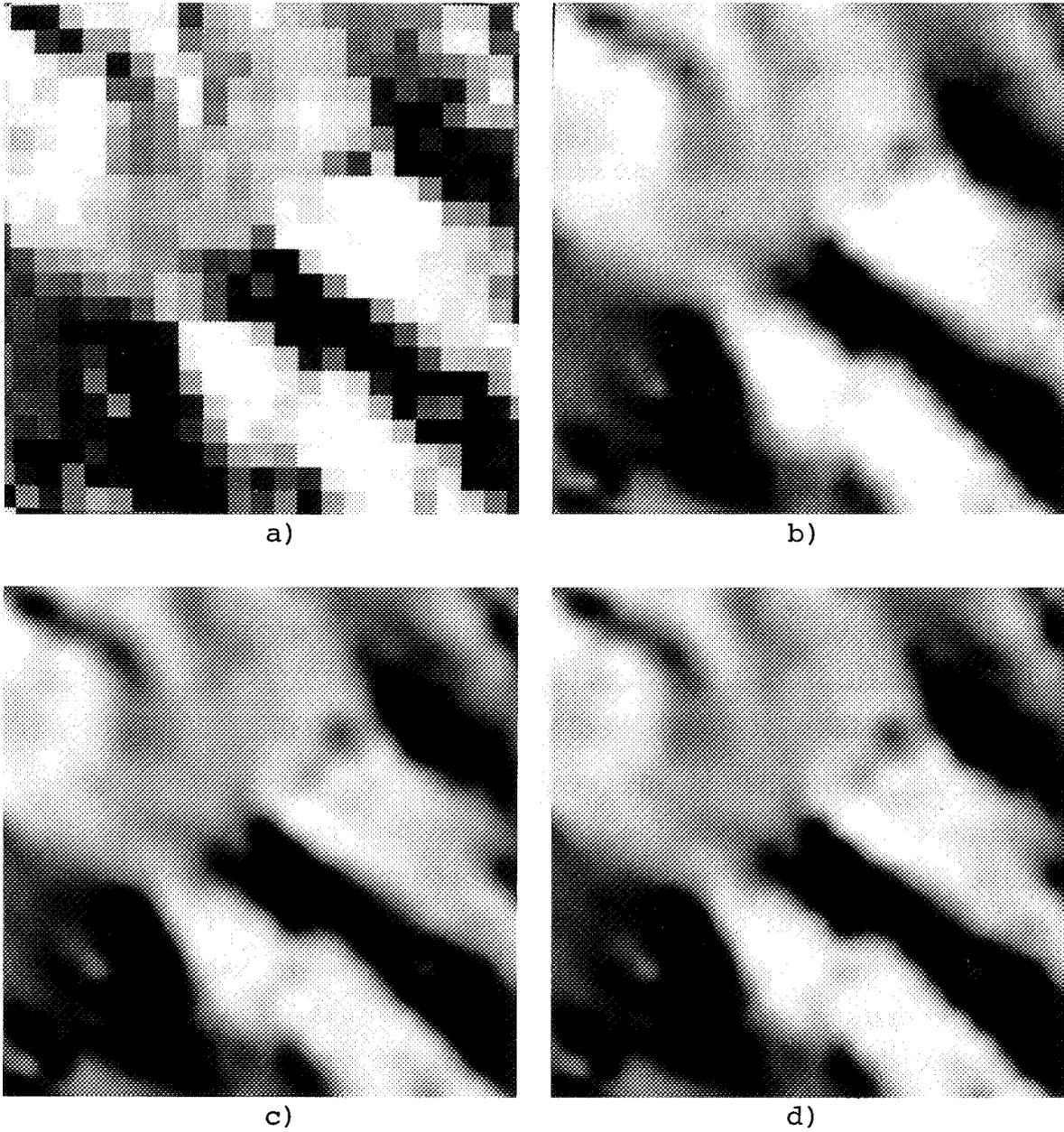


Fig.2.17 Cartes d'ombre propre de Mettenberg(R). Grille de 500 m interpolée à 50 m ($K=10$). Interpolation dans l'image avec des fonctions de degré 0 à 3. Illumination de mars, 15 h; réflexion diffuse 100%.

- a) interpolation par répétition ($m=0$)
- b) interpolation bilinéaire ($m=1$)
- c) interpolation spline quadratique ($m=2$)
- d) interpolation spline cubique ($m=3$)

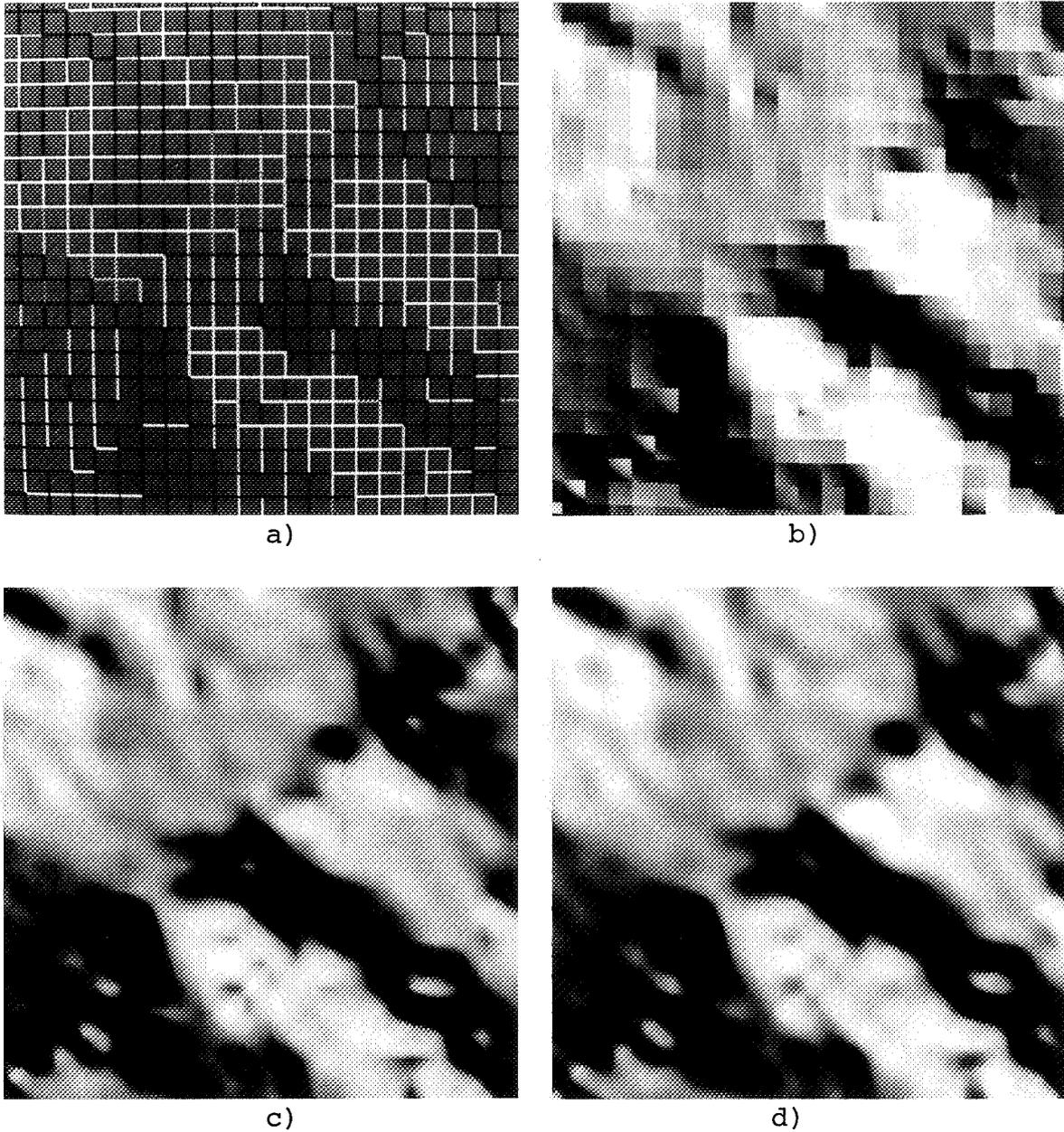


Fig.2.18 Cartes d'ombre propre de Mettenberg(R). Grille de 500 m interpolée à 50 m ($K=10$). Interpolation dans l'objet avec des fonctions de degré 0 à 3. Illumination de mars, 15h; réflexion diffuse 100%.

- a) interpolation par répétition ($m=0$)
- b) interpolation bilinéaire ($m=1$)
- c) interpolation spline quadratique ($m=2$)
- d) interpolation spline cubique ($m=3$)

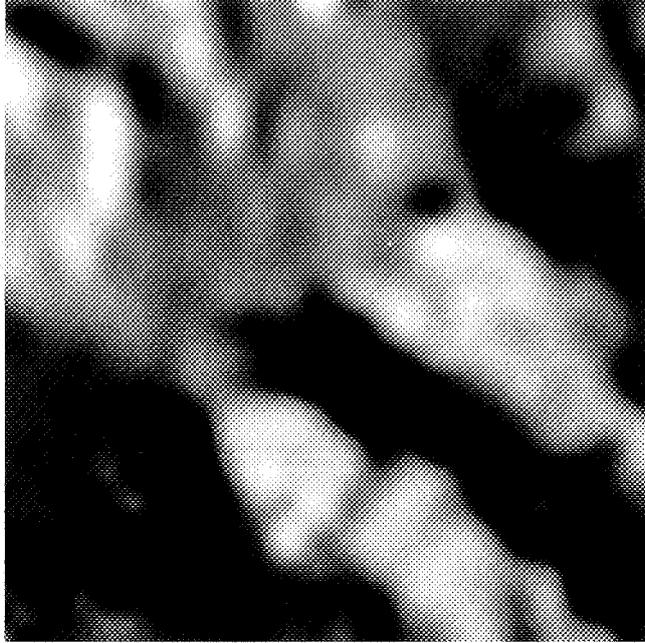
226•226 valeurs (11,25•11,25 km). Cette manière de faire permet de calculer la matrice des coefficients spline en tenant compte des valeurs aux limites ($N \approx 22$, $L \approx 5$). Les résultats sont illustrés par la figure 2.17 pour l'interpolation dans l'image et par la figure 2.18 pour l'interpolation dans l'objet. Pour chacune des deux séries, la qualité du rendu de l'image a été reportée sur une échelle subjective de 6 notes (fig.2.16.a). Elle va croissant avec le degré de l'interpolation. Le pas décisif vers la continuité de l'image a lieu quand on passe à $m=1$ pour l'interpolation dans l'image respectivement à $m=2$ pour l'interpolation dans l'objet, ce qui confirme la théorie précitée. En dessous de cette limite, la qualité est insuffisante, et en-dessus, la qualité est presque égale, si ce n'est une légère amélioration due à la suppression des bandes de Mach quand on passe au degré supérieur.

Une autre comparaison de ces deux méthodes d'interpolation montre que seule l'interpolation dans l'objet permet une éventuelle représentation avec un ombrage spéculaire (fig. 2.19).

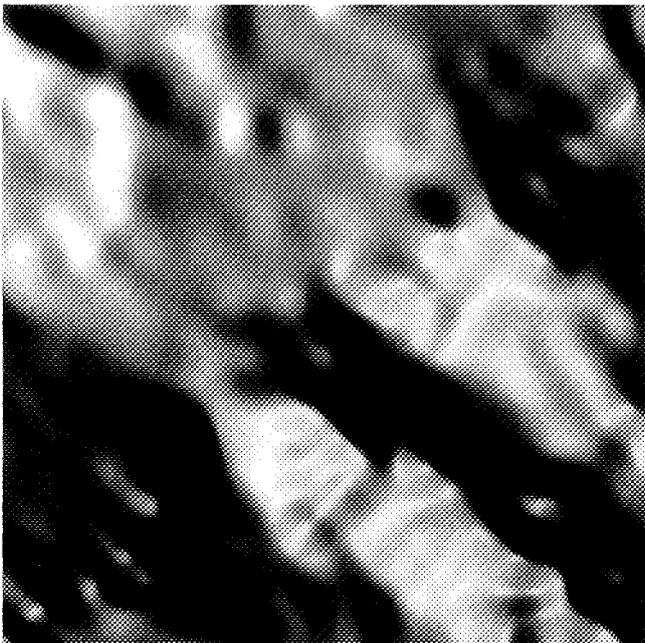
Compromis coûts/qualité

A comparer les 8 possibilités de la figure 2.16, j'élimine les images de qualité insuffisante (I0,00,01). Il reste deux cas de très bonne qualité (O2,03) et trois cas de qualité suffisante (I1,I2,I3) qu'il faut porter en relation avec les coûts. Plutôt qu'une seule solution optimale, il ressort deux cas favorables de cette confrontation: I1 bat I2 et I3 par des coûts nettement réduits sans perdre beaucoup de qualité; O2 et O3 sont plus proches, mais, parce que c'est la solution de qualité, O3 l'emporte.

Il existe, en conclusion, deux moyens favorables (I1 et O3) pour gagner une carte d'ombre par interpolation. La première méthode est économique, donne une image de qualité suffisante et consiste à interpoler dans l'espace de l'image par inter-



a) ombrage spéculaire puis interpolation cubique dans l'image (m=3)



b) interpolation cubique dans l'objet (m=3) puis ombrage spéculaire

Fig.2.19 Cartes d'ombre propre de Mettenberg(R). Grille de 500 m interpolées à 50 m ($K=10$). Rendu de la réflexion spéculaire d'une surface interpolée. Illumination de mars, 15h; réflexion diffuse 50% et spéculaire 50% ($c=30$)

polation bilinéaire. La deuxième méthode donne des images de très bonne qualité mais est chargée de coûts plus importants: elle consiste à interpoler l'objet avec une fonction spline de degré 2 au moins et de degré 3 de préférence.

Le rapport des coûts des deux différentes méthodes est:

$$R_{\Phi} = \frac{\Phi_{\text{objet}}^{(m=3)}}{\Phi_{\text{image}}^{(m=1)}} = \frac{7K^2 + 8K + L}{K^2 + 2K + 5} \quad (2.41)$$

et se situe entre 5 et 7 pour des cas pratiques.

2.3.4 Appréciation des résultats d'interpolation

Le rendu plastique de la surface couvrant le terrain a été le fil conducteur dans l'analyse et le choix de la méthode d'interpolation. Cette dernière étant trouvée, il faut encore s'assurer que le relief perçu corresponde bien aux données de la maquette et non à des artefacts embellisseurs de synthèse. Je compare à cet effet les images obtenues par interpolation avec une nouvelle carte d'ombre (fig.2.20) obtenue à partir de la maquette Grindelwald discrétisée elle, à haute résolution. L'image interpolée de meilleure qualité (fig.2.18.d) ne contient pas un seul élément qui ne soit aussi visible dans la carte d'ombre à haute résolution. Cette constatation prouve que l'interpolation spline est adéquate. Elle en confirme aussi la performance.

2.3.5 Interpolation mesurée à l'écart moyen

L'interpolation optimale selon le critère visuel vient d'être trouvée. Il me semble intéressant de comparer ces résultats avec l'interpolation de l'objet mesurée à l'écart moyen. J'utilise à cet effet la même maquette Mettenberg ($\Delta\lambda=100$ m) qui est d'abord décimée ($\Delta\lambda=500$ m) puis interpolée ($\Delta\lambda=100$ m). Les altitudes interpolées sont alors comparées aux altitudes originales et l'écart moyen σ est



Fig.2.20 Carte d'ombre propre de Mettenberg(G). Grille de 50 m. Illumination de mars, 15h; réflexion diffuse 100%

calculé. Il est $\sigma = 102$ m, 55 m, 50 m et 50 m pour les interpolations spline de degré $m = 0, 1, 2$ et 3 respectivement. Le pas décisif de l'amélioration est donc entre $m=0$ et $m=1$ avec le jugement à l'écart moyen alors qu'il est entre $m=1$ et $m=2$ avec le jugement visuel. Ceci montre encore une fois la nature différente de ces deux critères.

3. SYNTHÈSE D'IMAGES PERSPECTIVES

Alors que le chapitre précédent traitait des images orthographiques, ce chapitre s'occupe du cas plus général des images perspectives d'un terrain, appréciées pour leurs deux qualités essentielles: 1) elles peuvent représenter une vue dans une direction quelconque et à partir d'un point quelconque; 2) elles présentent un bon rendu de la profondeur, suggérée par un point de fuite. Les questions traitées sont celles pour lesquelles l'application à une maquette de terrain conduit à une situation particulière.

3.1 Principes de synthèse perspective

La synthèse d'images perspectives comprend trois volets. Le premier volet englobe les transformations géométriques qui font passer les points de la maquette dans l'image. Le deuxième volet représente le centre de gravité de la synthèse et consiste en une série d'opérations sur la surface du terrain, notamment la formation des facettes, leur transformation dans l'espace perspectif, l'élimination des surfaces cachées et le remplissage des facettes finalement portées sur l'image. Le troisième volet considère la question d'une structure de données adaptée particulièrement à l'opération de synthèse.

3.1.1 Transformations géométriques

Elles mènent de l'espace de l'objet à celui de l'image en passant par l'espace de l'oeil et l'espace perspectif [23] [41]. Elles sont présentées ici sous une forme modifiée introduisant des paramètres de transformations adaptés à un terrain. En effet, la position de l'oeil est définie dans l'espace de l'objet et les angles de vision sont choisis comme les angles de vol d'un avion.

Transformation objet-oeil

Soit une maquette orientée ($x_g = \text{Est}$, $y_g = \text{Nord}$) dans l'espace de l'objet (fig.3.1). La transformation de l'espace de l'objet p_g vers l'espace de l'oeil p_e comporte une translation et une rotation et s'écrit, en utilisant les coordonnées homogènes:

$$(x_e \ y_e \ z_e \ 1) = (x_g \ y_g \ z_g \ 1) \cdot T_{ge} \quad (3.1)$$

La matrice de transformation $4 \cdot 4$ T_{ge} est déterminée par les paramètres suivants:

- E_x, E_y, E_z : échelle de chaque axe de l'objet
- T_x, T_y, T_z : position de l'oeil dans l'objet
- α : cap
- β : angle de montée
- γ : angle de gauchissement

et s'écrit:

$$T_{ge} = T_T \cdot T_\alpha \cdot T_\beta \cdot T_\gamma \quad (3.2)$$

avec:

$$T_T = \begin{bmatrix} E_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_z & 0 \\ T_x & T_y & T_z & 1 \end{bmatrix} \quad T_\alpha = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & 0 & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_\beta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & \sin\beta & 0 \\ 0 & -\sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_\gamma = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 0 & 0 \\ -\sin\gamma & \cos\gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Transformation perspective

Elle mène de l'espace de l'oeil \underline{p}_e à l'espace perspectif \underline{p}_p et est linéaire sous sa forme homogène:

$$(x_p \ y_p \ z_p \ w_p) = (x_e \ y_e \ z_e \ 1) \cdot \underline{T}_{ep} \quad (3.3)$$

Elle est définie et normée par les paramètres suivants (fig.3.2 et 3.3):

- ϕ : angle d'ouverture
- S : grandeur de la demi-fenêtre dans \underline{p}_e
- F : profondeur de champ dans \underline{p}_e

Dans ces conditions la matrice de transformation \underline{T}_{ep} s'écrit:

$$\underline{T}_{ep} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{S}{F} + \operatorname{tg} \frac{\phi}{2} & \operatorname{tg} \frac{\phi}{2} \\ 0 & 0 & 0 & S \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Le passage aux coordonnées conventionnelles de l'espace perspectif $(X_p \ Y_p \ Z_p)$ constitue la partie non-linéaire de la transformation. Il se fait en divisant chaque composante par w_p ($w_p \neq 0$):

$$X_p = \frac{x_p}{w_p} \quad Y_p = \frac{y_p}{w_p} \quad Z_p = \frac{z_p}{w_p} \quad (3.5)$$

La transformation perspective est identique à la transformation photographique [53]. Une de ses qualités essentielles réside dans le fait qu'elle transforme des droites dans des droites. Ceci est extrêmement avantageux pour l'algorithme des surfaces cachées qui utilise la profondeur perspective Z_p pour décider de la visibilité d'un point, car la profondeur perspective Z_p d'une droite se calcule ainsi avec une équation linéaire.

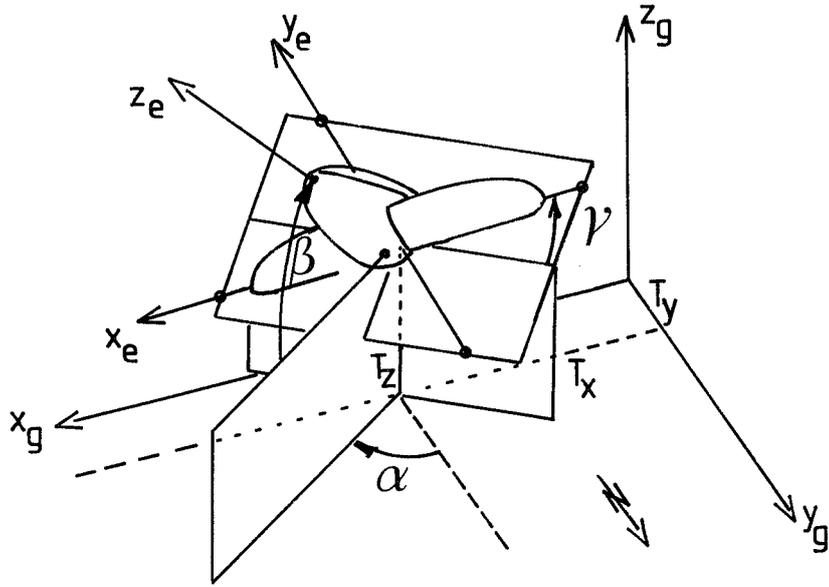


Fig.3.1 Conditions de vue fixant l'espace de l'oeil \underline{p}_e dans l'espace de l'objet \underline{p}_g

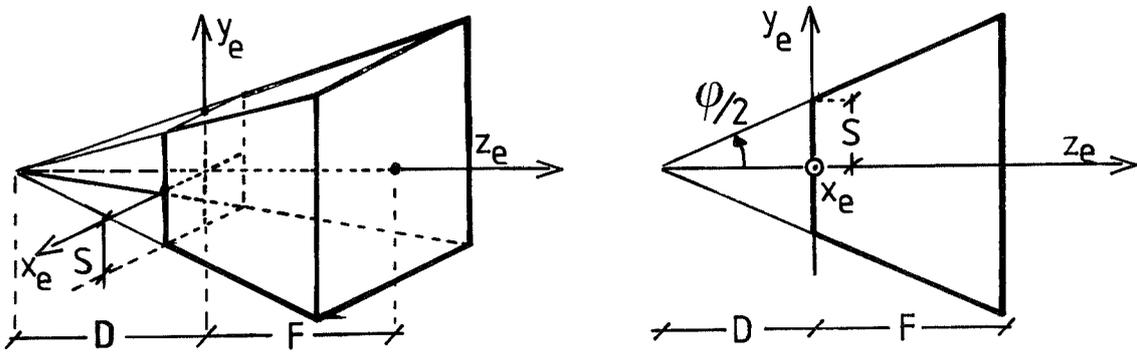


Fig.3.2 Pyramide de visibilité dans l'espace de l'oeil \underline{p}_e

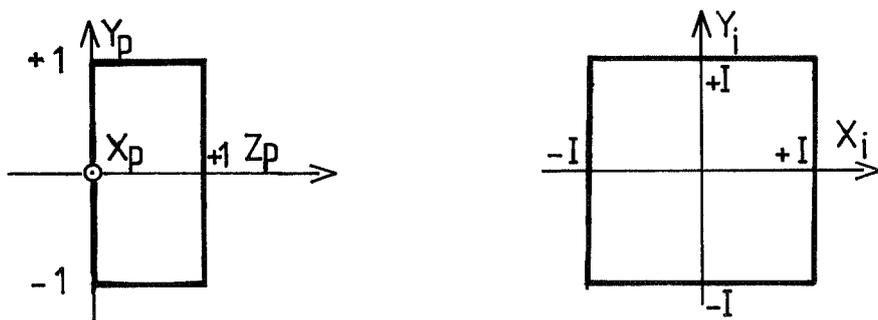


Fig.3.3 Pyramide de visibilité dans l'espace perspectif \underline{p}_p et celui de l'image \underline{p}_i

Pyramide de visibilité

Il s'agit de limiter la visibilité à un volume de l'objet appelé la pyramide de visibilité, qui est la portion de la pyramide de vision partant de l'oeil située entre la face avant ($z_e=0$) et la face arrière ($z_e=F$) (fig.3.2 et 3.3). Les conditions de visibilité d'un point, exprimées en coordonnées homogènes, s'écrivent alors:

$$\begin{aligned} -w_p &\leq x_p \leq w_p \\ -w_p &\leq y_p \leq w_p \\ 0 &\leq z_p \leq w_p \end{aligned} \quad (3.6)$$

Quantification de la profondeur perspective Z_p

Soit un codage linéaire de Z_p avec un code de n bit. Ce code définit dans l'espace de l'oeil, un pas de quantification Δz_e variable:

$$\Delta z_e = \frac{1}{2^n} \cdot \frac{dz_e}{dz_p} \quad (3.7)$$

En utilisant la transformation 3.3 et $D=S/\operatorname{tg}\frac{\phi}{2}$ pour la distance entre l'oeil et la face avant de la pyramide de visibilité, ce pas s'écrit:

$$\Delta z_e \cong \frac{1}{2^n} \cdot \frac{(D+z_e)^2}{D} \quad \text{quand } F \gg D \quad (3.8)$$

Pour un objet dont la profondeur z_e varie entre 0 et F , la quantification passe donc de $D/2^n$ pour la partie rapprochée, ce qui est une quantification fine, à $F^2/(2^n \cdot D)$ pour la partie éloignée, ce qui peut être une quantification très grossière. Il faut veiller, par un choix judicieux des plans de découpage avant et arrière, à limiter ce pas de quantification.

Ainsi pour une quantification de Z_p avec $n=16$ bit, je peux représenter un terrain depuis une distance de $D=20$ m et sur

une profondeur de $F=10'000$ m avec un pas de quantification de $\Delta z_e(F)=76$ m pour les points les plus éloignés.

Projection dans l'image

L'image est obtenue par la projection de l'espace perspectif sur le plan $Z_p=0$. Les coordonnées de l'image sont (fig.3.3):

$$X_i = I \cdot X_p \quad Y_i = I \cdot Y_p \quad (3.9)$$

3.1.2 Transformation des facettes

La surface du terrain est ombrée et divisée en facettes polygonales, pas nécessairement planes, auxquelles sont rattachées une ou plusieurs valeurs d'ombre. Les sommets de chaque polygone sont transformés dans l'espace perspectif et comparés à la pyramide de visibilité. Les polygones extérieurs sont éliminés, les polygones à cheval sur la pyramide sont tronqués de leur partie extérieure dans l'opération de découpage. Les polygones restants subissent alors le test des facettes arrières qui élimine les facettes présentant leur face cachée. Il subsiste finalement, dans l'espace perspectif, les facettes potentiellement visibles mais qui peuvent encore se cacher l'une l'autre. Ce problème est résolu au moyen de la profondeur perspective Z_p , alors que les coordonnées X_i et Y_i permettent de remplir la facette dans l'image avec les valeurs d'ombre qui lui sont attachées. Voici ces opérations plus en détail.

Découpage de polygones

Le découpage proprement dit est précédé d'un tri rapide s'appliquant d'abord aux polygones puis, le cas échéant, aux arêtes des polygones [10][46]. Le tri rapide partage ces éléments (polygones ou arêtes), selon la position relative de leurs sommets par rapport aux 6 plans de la pyramide de visibilité, en trois classes: 1) les éléments intérieurs

qui sont retenus; 2) les éléments extérieurs qui sont rejetés; 3) les éléments mixtes qu'il faut alors découper.

Le découpage consiste alors à trouver l'intersection d'un élément mixte avec un des plans de la pyramide de visibilité et à le découper ainsi en deux nouveaux éléments qu'il faut retrier. L'opération se termine quand tous les éléments sont classés intérieurs ou extérieurs.

Elimination des facettes arrières

Selon qu'une surface est la délimitation d'un objet ou un objet en soit, elle possède un, respectivement deux côtés visibles. La surface d'un terrain n'en a qu'un. Il est donc possible d'éliminer les facettes présentant leur face arrière à l'observateur. Il faut alors comparer la direction de la normale à la facette avec la direction vers l'observateur. Le plus simple est d'effectuer le calcul dans l'espace perspectif où les rayons vers l'observateur sont parallèles et où il suffit donc de tester le sens de la composante Z_p de la normale. Soient \underline{u}_p et \underline{v}_p deux vecteurs de la facette en coordonnées perspectives tels que le vecteur normal $\underline{n}_p = \underline{u}_p \times \underline{v}_p$ soit dirigé vers l'extérieur de l'objet (le système perspectif est gauche!) la facette est invisible si:

$$U_x \cdot V_y - U_y \cdot V_x > 0 \quad (3.10)$$

Ce test est valable pour une facette plane. Une facette polygonale non plane n'est invisible que si le test est satisfaisant pour tous ses sommets.

Problème des surfaces cachées

Maintes solutions ont été proposées, principalement entre 1963 et 1974 [23]. L'étude comparative de Sutherland [47] portant sur l'efficacité des différents algorithmes conduit aux constatations qui suivent.

La solution du problème peut avoir lieu soit dans l'espace

de l'objet, soit dans l'espace perspectif. La solution dans l'espace de l'objet est typique des premiers algorithmes proposés et n'est en général plus utilisée aujourd'hui. En effet, la solution dans l'espace perspectif offre comme avantages décisifs: 1) une précision de calcul fixée par la résolution de l'image; 2) une comparaison des objets facilitée, puisqu'elle se fait par simple projection parallèle et non centrale comme dans le cas précédent.

La deuxième constatation concerne la stratégie utilisée pour comparer les facettes. Il y a, d'une part, la méthode de la force brute qui consiste à traiter les facettes systématiquement l'une après l'autre et à détecter les surfaces cachées point par point, au moment de remplir l'image. Les profondeurs perspectives Z_p du nouveau et de l'ancien point sont comparées; le nouveau point remplace l'ancien si la nouvelle valeur de Z_p est inférieure à l'ancienne. Pour implémenter cette méthode, il faut disposer d'une grande mémoire consistant en une mémoire d'image doublée d'une mémoire de la profondeur Z_p .

Il y a d'autre part, toute une série d'algorithmes basés sur le tri des facettes suivant leur position sur les axes de l'espace perspectif. La méthode la plus répandue est le tri suivant Y_p suivi de tris dans le plan $X_p Z_p$, qui a l'avantage de fournir une solution complète pour chaque ligne de télévision.

L'étude comparative de Sutherland montre finalement la supériorité des méthodes de tri sur la méthode de la force brute pour des maquettes de complexité petite et moyenne. Pour des maquettes de grande complexité, les rangs s'inversent cependant et la méthode de la force brute offre une efficacité supérieure. Ce bon rendement est évidemment lié à la disponibilité de la mémoire requise. Dans ce cas, la méthode de la force brute est aussi appelée méthode de la mémoire Z_p .

L'utilisation de cette méthode est donc justifiée puisqu'elle est la plus efficace pour traiter une maquette de terrain de

grande complexité. Elle a de plus l'avantage d'être très simple. En effet, les facettes sont envoyées séquentiellement dans une cascade de transformations aboutissant dans les mémoires Z_p et de l'image. Toutes les interactions entre les facettes se font à travers ces mémoires. Ceci confère à la méthode de la mémoire Z_p la faculté de traiter des maquettes indéfiniment grandes. Un dernier avantage réside dans le fait que cette méthode fournit gratuitement, en plus de l'image proprement dite, un tableau complet de la profondeur de la scène. Cette information supplémentaire peut être utilisée pour un traitement ultérieur de l'image (§4.4 et 4.5)

Le problème de la disponibilité de ces mémoires n'est certes pas à négliger. Peu d'ordinateurs disposent actuellement d'un accès rapide et aléatoire à un minimum de 13k mots supplémentaires ($256 \cdot 256 \cdot 2$). Leur évolution va cependant dans ce sens. La mémoire d'image, d'une profondeur de 8 bit ou plus, peut être celle servant au rafraîchissement t.v. Il faut tripler cette mémoire pour implémenter aussi la mémoire Z_p , d'une profondeur de 16 bit au moins (§4.3). Des mémoires de cette capacité et ainsi organisées existent [2]. Des pas sont actuellement entrepris pour accéder rapidement à une telle mémoire d'image par l'intermédiaire d'un calculateur spécialisé recevant des ordres à caractère graphique [33]. L'algorithme des surfaces cachées de la mémoire Z_p pourrait être implémenté avantageusement dans une telle structure.

Le remplissage des facettes

Soit une facette polygonale définie par la liste ordonnée de ses sommets en coordonnées de l'image (X_i, Y_i) . Il faut remplir cette facette avec une luminance donnée. L'algorithme de remplissage de Watkins [41, p.537] s'applique à des polygones plans. Voici une modification de cet algorithme pour traiter des facettes non planes comme on les trouve dans les maquettes de terrain (fig.3.4).

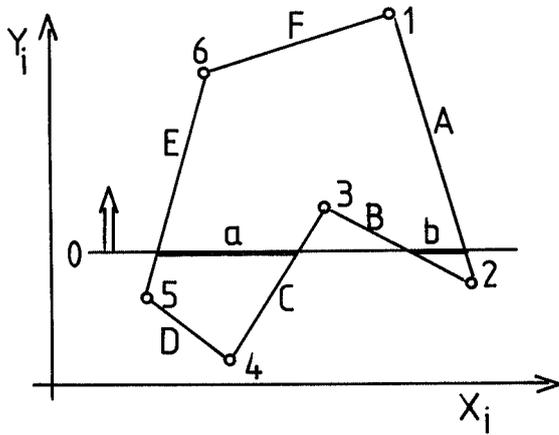


Fig.3.4 Remplissage d'un polygone dans l'image:

0 : ligne de remplissage A...F : arêtes
 1...6 : sommets a,b : segments

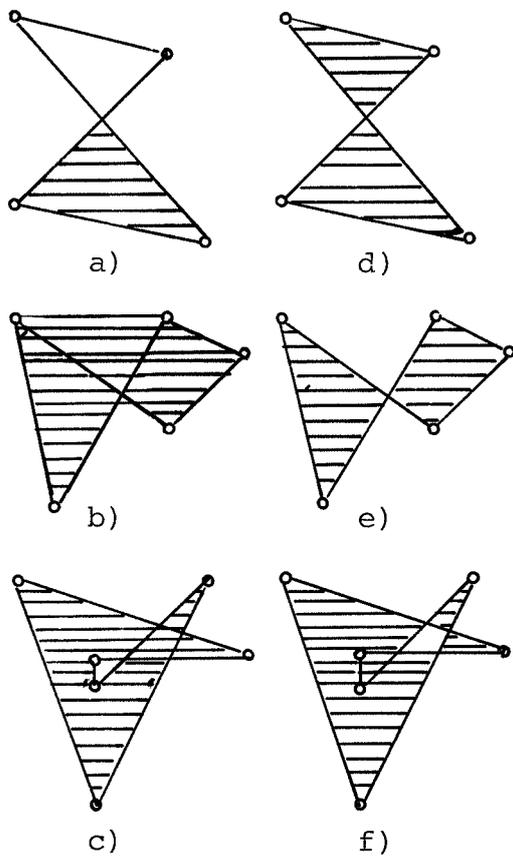


Fig.3.5 Remplissage de polygones non plans: cas pathologiques

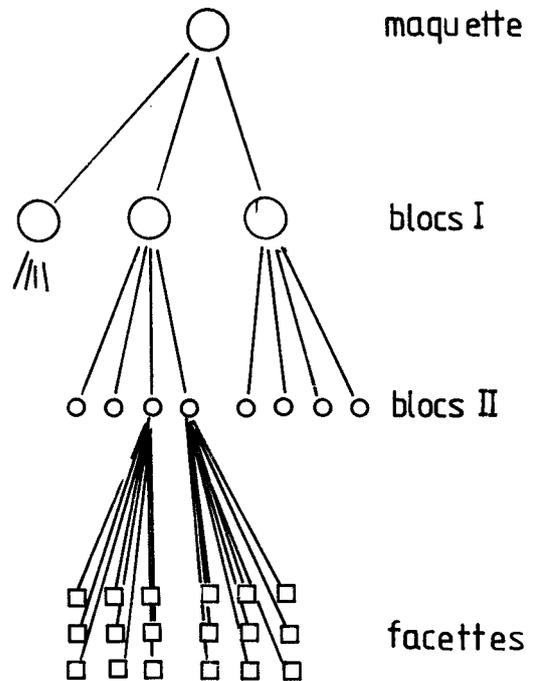


Fig.3.6 Maquette hiérarchique

Le remplissage se fait ligne par ligne, dans le sens de Y_i croissant. Au début toutes les arêtes sont en liste d'attente. Une arête devient active quand son sommet inférieur est dépassé par la ligne de remplissage; elle sort de la liste quand son sommet supérieur est dépassé. Le remplissage se termine quand la liste est vide.

Horizontalement, le remplissage a lieu sur les segments limités chacun par une arête gauche et une droite. D'une ligne à l'autre, les calculs sont très rapides car les limites gauches et droites des segments s'obtiennent de manière incrémentale. A chaque changement dans la liste d'attente, il faut, de plus, redéfinir la liste des segments par un tri des arêtes.

Sous cette forme l'algorithme provoque des trous quand les arêtes des facettes non planes se coupent (fig.3.5.a et b). Ceci suggère la modification à apporter. Il faut renouveler la liste des segments dans deux cas supplémentaires:

1) quand un segment inverse ses extrémités gauche et droite (cas de la figure 3.5.a) et 2) quand deux segments se chevauchent (cas de la figure.3.5.b). Ainsi modifié, cet algorithme convient parfaitement aux facettes non planes d'une maquette de terrain (fig.3.5.d et e).

En complément, la figure 3.5.c et f illustre un cas où l'algorithme normal donne une solution juste et l'algorithme modifié produit une erreur. Ce cas ne se présente pas dans les maquettes de terrain.

3.1.3 Maquette hiérarchique

Grâce à la structure régulière de sa grille, la maquette de terrain peut être réorganisée systématiquement en une nouvelle structure hiérarchique basée sur sa géométrie [16]. La maquette est d'abord divisée en blocs selon une grille à grosses mailles. Puis chaque bloc est divisé à nouveau selon une maille plus fine et ainsi de suite jusqu'à la maille la

plus fine de la maquette (fig.3.6). Une telle organisation permet de profiter de la cohérence de la maquette. Elle a les avantages suivants: 1) accélération de la synthèse par l'introduction d'un test d'invisibilité au niveau des blocs; 2) suppression de détails inutiles; 3) possibilité de moduler le niveau de détail d'une scène; 4) possibilité d'adapter la qualité de l'image à des coûts de calcul fixes. Voici les deux premiers points plus en détail.

Test d'invisibilité d'un bloc

Ce test d'invisibilité s'applique aux blocs en descendant progressivement dans la pyramide hiérarchique. Quand un bloc est reconnu invisible, toute la branche qui lui fait suite est ainsi invisible et ne doit donc plus être considérée. On définit à cet effet, pour chaque bloc, un volume simple qui englobe la portion de terrain qui lui correspond. J'utilise le cas simple et avantageux du parallélépipède rectangle construit sur la base du bloc et défini par les 6 coordonnées $x_{g1}, x_{g2}, y_{g1}, y_{g2}, z_{g1}, z_{g2}$. Ces valeurs sont calculées à l'avance et font partie de la description du bloc.

Le test d'invisibilité d'un bloc a lieu au moment de la synthèse et est très rapide. Il consiste à transformer les 8 sommets du parallélépipède dans l'espace perspectif où ils sont comparés avec les plans de la pyramide de visibilité. Un bloc est invisible si tous ses sommets sont écartés par au moins un des plans.

Le test d'invisibilité combiné avec une maquette hiérarchique permet ainsi d'éliminer très rapidement les parties non significatives de la maquette ; ainsi pour une vue plongeante sur le terrain où les blocs non significatifs tout autour de la pyramide de vision sont éliminés.

Le cas de la vue horizontale dans un terrain est plus critique. Il faut considérer que le nombre de facettes potentiellement visibles croît très rapidement quand on augmente la profondeur F de la pyramide de visibilité. Voici une solution à ce problème.

Suppression de détails

L'idée consiste à remplacer toutes les facettes d'un bloc par une facette généralisée, quand celles-ci deviennent trop petites dans l'image. Soit une facette de dimension typique $\Delta l \cdot \Delta l$. Sa dimension dans l'image est définie par la transformation perspective 3.3 et 3.9. Elle est inférieure à $\varepsilon \cdot I \cdot \varepsilon \cdot I$ quand sa profondeur dans l'espace de l'oeil est plus grande que la valeur critique:

$$z_e(\varepsilon) = \frac{\Delta l}{\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \frac{\phi}{2}} - D \quad (3.11)$$

Cette valeur peut donc être utilisée comme limite pour passer à la facette généralisée de l'échelon hiérarchique supérieur.

La facette généralisée peut être le polygone reliant les 4 altitudes aux angles du bloc. Cette méthode convient parfaitement pour assembler des facettes généralisées entre elles, mais produit des discontinuités à la liaison d'une facette généralisée et des facettes plus petites. Cet effet ne peut être évité que si la facette généralisée tient compte de son voisinage et adopte, le cas échéant, une ligne polygonale qui suit la ligne d'interface des facettes voisines plus petites.

Cette mesure nécessitant des liaisons entre les blocs et les facettes géométriquement voisins, son implémentation passe par une modification de la structure des données de la maquette. La structure hiérarchique pure doit être abandonnée pour une structure au graphe plus complexe.

Désirant me concentrer sur une structure simple, je n'ai pas envisagé cette possibilité plus à fond. Je propose deux autres possibilités. La première est plutôt un substitut et consiste à faire usage de la perspective aérienne pour supprimer les détails au loin (§4.4). La deuxième possibilité est une vraie alternative et consiste à faire

fusionner les facettes provenant de grilles différentes, non pas dans l'objet comme c'est le cas ci-dessus, mais dans l'image (§4.5)

3.2 Implémentation

Les principes de synthèse énoncés ont été implémentés sur le miniordinateur précité (§1.4). Ce système a une capacité de mémoire relativement restreinte, forçant ainsi une réalisation faite de compromis qui diminuent l'efficacité potentielle de l'algorithme. Il a par contre un accès direct à une mémoire d'image visualisée sur écran de t.v. et offre donc à l'utilisateur les avantages du travail interactif.

Les grandes mémoires à accès aléatoires sont réalisées comme suit. La mémoire d'image logique d'une part, est confondue avec la mémoire d'image physique externe au calculateur et servant au rafraîchissement t.v. Celle-ci offre l'accès aléatoire désiré à chaque point de l'image.

La mémoire de profondeur Z_p d'autre part, ne peut être que simulée. Elle est située physiquement sur le disque et son accès est lent et lié à un transfert par séries de données. Un accès aléatoire logique est réalisé par l'intermédiaire d'une mémoire tampon intermédiaire contenant une fraction de la scène des profondeurs. L'accès à la mémoire Z_p est un accès de lecture et d'écriture de sorte qu'un transfert physique aller-retour entre le disque et la mémoire tampon doit avoir lieu dès qu'une nouvelle fraction de la scène veut être accédée. Les fractions sont choisies carrées, de manière à exploiter la cohérence bidimensionnelle des facettes d'une scène pour réduire le nombre de transferts. La mémoire Z_p est ainsi divisée en 7·7 fractions à 36·36 points chacune. La synthèse se fait en deux phases principales qui sont aussi implémentées par deux programmes distincts (fig.3.7). La première phase est une phase de préparation et de construction d'une maquette ombrée et hiérarchique. D'abord vient l'ombrage (a) qui complète la maquette en attribuant une

luminance soit à chaque facette, soit à chacun de leurs sommets. Puis vient la structuration (b), implémentée pour permettre la construction d'une maquette à deux niveaux hiérarchiques avec un maximum de 400 blocs à 19·19 facettes, soit un total de 144'400 facettes. Le choix de mettre l'ombrage en tête se justifie par la plupart des applications où les conditions d'illumination ne varient que lentement, n'imposant ainsi pas de contraintes quant à l'efficacité de cette première phase.

La deuxième phase est à répéter, en principe, pour tout changement des conditions de vue et doit être rapide. D'abord vient le test d'invisibilité des blocs (c). Puis vient une étape de tri (d) qui classe les blocs restants suivant leur profondeur croissante. Cette mesure a pour effet de favoriser les blocs du premier plan qui sont alors représentés les premiers dans l'image. Elle accélère la partie initiale de la synthèse de l'image, ce qui se révèle avantageux pour le travail interactif et pour la synthèse à temps de calcul limité. Lors de la synthèse de séquences d'images animées, où les conditions de vue ne changent que très peu d'une image à l'autre, les étapes de test et de tri de blocs (c et d) peuvent alors être répétées à une cadence plus lente.

Puis vient la synthèse de l'image proprement dite. Cette partie est implémentée pour traiter à la fois un bloc de 20·20 points au maximum. Tous ces points sont transformés (e et f) dans l'espace perspectif en coordonnées homogènes, où ils sont comparés à la pyramide de visibilité. Les polygones sont alors formés et traités séquentiellement. Il y a pour chaque polygone, l'étape de tri rapide et de découpage (g) suivi de la transformation en coordonnées perspectives à 3 dimensions permettant l'élimination des facettes arrières (h). Il y a évidemment interruption de calcul et passage au polygone suivant dès que l'invisibilité d'une facette est reconnue. Vient finalement l'étape (i) du remplissage du

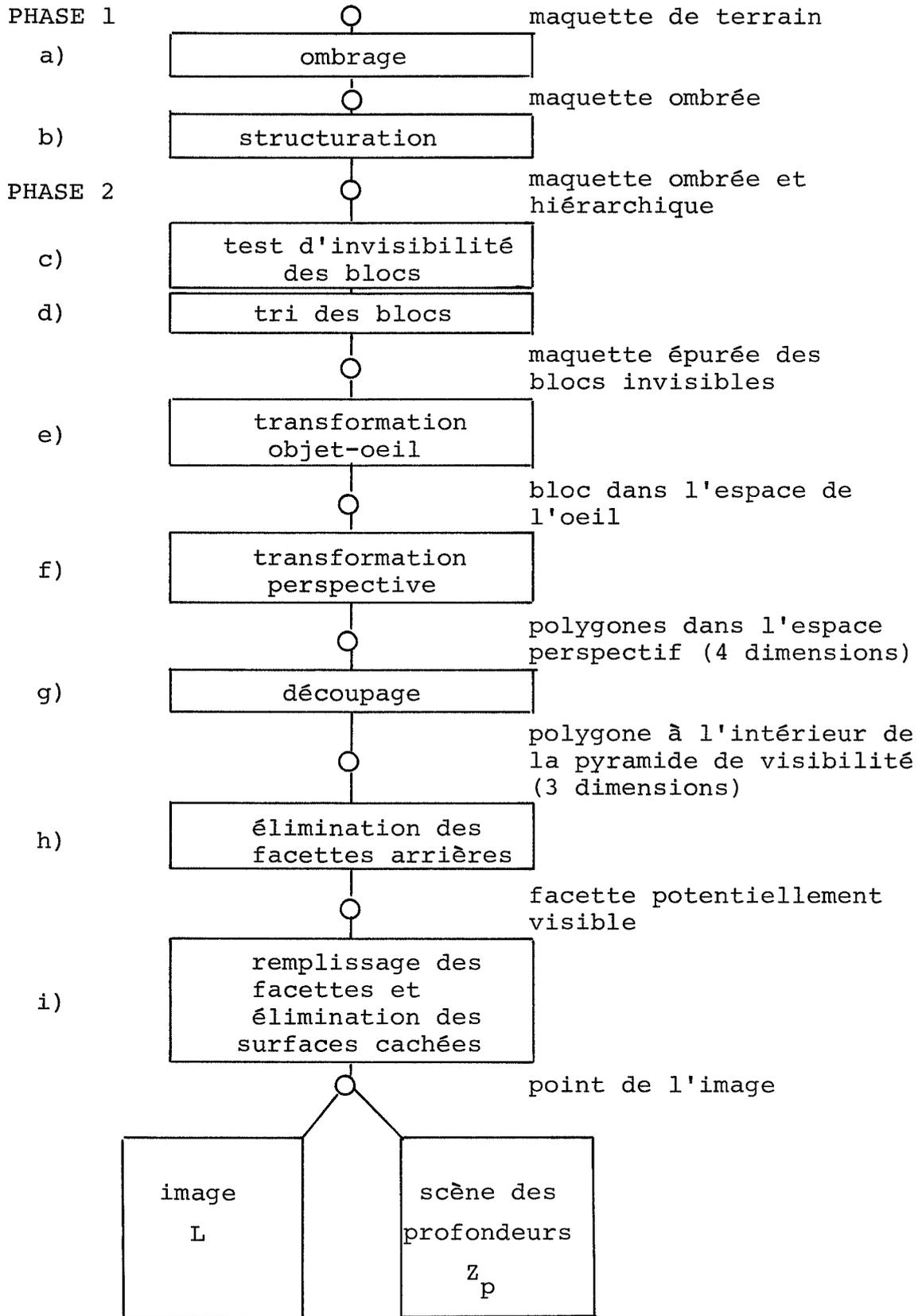


Fig.3.7 Organigramme de la synthèse perspective

polygone et de l'élimination des surfaces cachées, implémenté suivant le principe énoncé, avec une mémoire d'image externe et une mémoire Z_p simulée. Cette étape comprend en outre une mesure supplémentaire pour diminuer les transferts liés à l'usage de la mémoire Z_p . Ainsi s'ajoute un découpage des polygones suivant les fractions définies pour la mémoire Z_p , ce qui empêche un accès multiple à la même fraction pendant le remplissage d'une seule facette.

Performances

Les performances varient énormément avec tous les paramètres de synthèse. Voici cependant une comparaison de quatre cas types. Ont été synthétisées les images perspectives des figures 3.8, 3.9, 3.10.a et b appelées respectivement Alpes bernoises (AB), Rigi (RI), Wetterhorn 50 m (W50) et Wetterhorn 250 m (W250). Tous les paramètres de synthèse sont portés dans l'annexe A.3 et la statistique des facettes est reportée dans la figure 3.11. Ces cas se différencient grandement par la durée de synthèse et par la complexité, mesurée au nombre de facettes, des maquettes et des scènes. Ainsi la complexité de la maquette de AB est grande (288k)

	fig.	nombre total de facettes ($\cdot 10^3$)				temps de calcul [mn]
		maquette:		scène:		
		a)	b)	c)		
AB	3.8	288,8	49,0	39,4	26,3	40
RI	3.9	50,6	32,1	27,5	21,7	30
W50	3.10.a	50,6	10,5	8,02	4,65	11
W250	3.10.b	2,02	0,81	0,321	0,186	3,5

Fig.3.11 Comparaison de la complexité de la maquette, de la complexité de la scène et de l'effort de calcul. La complexité de la scène est mesurée à 3 niveaux de calcul, soit après l'élimination a) des blocs invisibles, b) des facettes invisibles et c) des facettes arrières.

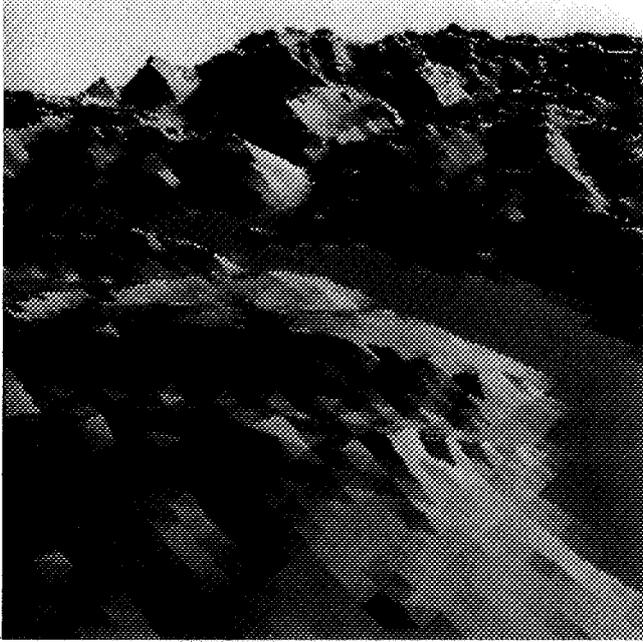


Fig.3.8 Vue perspective sur les Alpes Bernoises synthétisée à partir de la maquette Thun(R). Illumination de janvier, 14h. L'observateur est au-dessus de Thun, à 6000 m d'altitude et regarde au SE ($\phi=60^{\circ}$). Scène de grande complexité

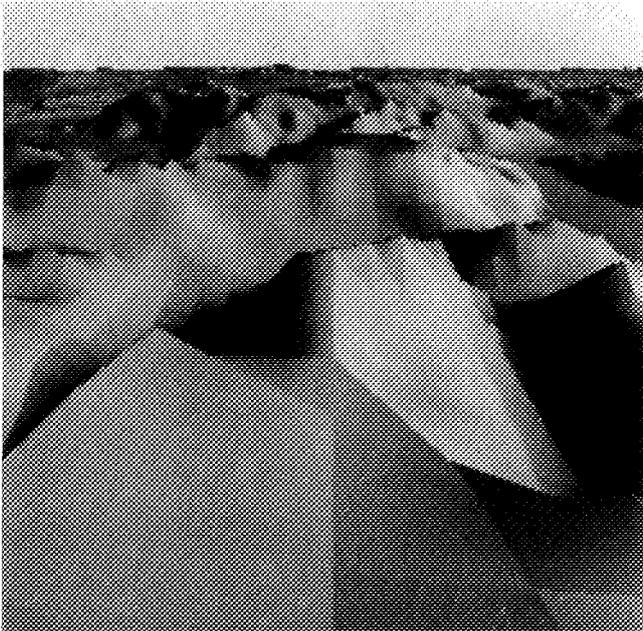
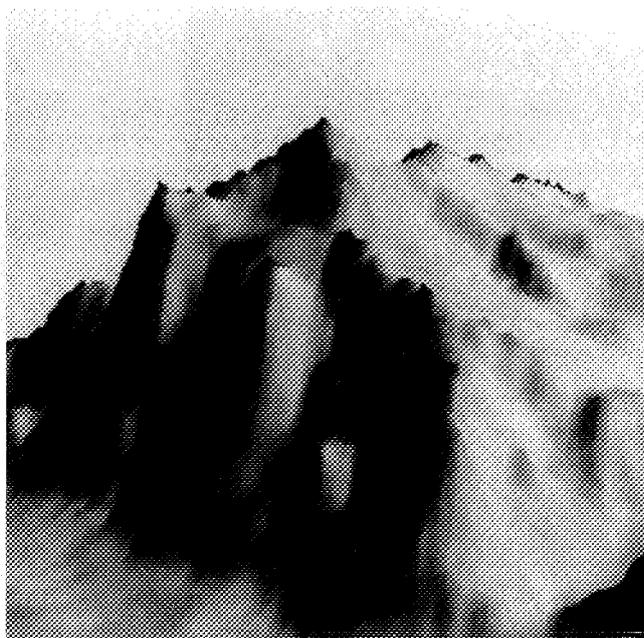


Fig.3.9 Vue perspective sur le Rigi synthétisée à partir de la maquette Lac des Quatre Cantons(R). Illumination d'avril, 8h. L'observateur est sur le Rotstock d'Uri à 3200 m d'altitude et regarde au N ($\phi=60^{\circ}$). Scène de grande complexité



a) maquette à la maille de 50 m;
scène de complexité moyenne



b) maquette à la maille de 250 m;
scène de petite complexité

Fig.3.10 Vue perspective sur le Wetterhorn synthétisée à partir de la maquette Mettenberg. Illumination de mars, 13h. L'observateur est au-dessus de Grindelwald, à 1900 m d'altitude et regarde à l'E ($\phi=20^{\circ}$)

celle de RI et W50 moyenne (50k) et celle de W250 petite (2k). Le nombre de facettes se réduit alors quand on passe au niveau de la scène et il est évident que cette réduction est dominée par le choix des conditions de vue. Au niveau de la scène, la complexité est répartie autrement. Ainsi AB et RI sont de grande complexité (39 et 27k), W50 de complexité moyenne (8k) et W250 de petite complexité (0,3k). La comparaison de ces valeurs avec les temps de calcul illustre le fait que c'est la complexité de la scène et non celle de la maquette qui est déterminante pour la durée de synthèse. Elle confirme aussi l'efficacité de la structure de données hiérarchique qui permet une élimination rapide des facettes non significatives.

Ces résultats montrent finalement la capacité de cet algorithme de synthèse de traiter des scènes et des maquettes de grande complexité sur un système de calcul relativement modeste. De plus, les temps de calcul peuvent encore être sensiblement diminués si la mémoire Z_p est implémentée avec une mémoire à accès rapide, de sorte que sur cette base, un système simple peut être conçu, qui permette la synthèse interactive - avec un temps de réponse de quelques secondes - pour des maquettes grossières. Une synthèse en temps réel ne peut être réalisée aujourd'hui que grâce à des systèmes extrêmement sophistiqués [48].

4. VISUALISATION OPTIMALE DE TERRAINS

Ce chapitre traite quelques aspects choisis de la synthèse perspective appliquée aux maquettes de terrain. Les aspects analysés débouchent sur une visualisation de terrains optimisée par une technique d'ombrage adaptée, la suppression d'erreurs de quantification et l'utilisation à posteriori de l'information de profondeur de la scène pour augmenter le rendu et le réalisme de la représentation.

4.1 Comparaison des techniques de visualisation des facettes

Il y a plusieurs manières de former les facettes à partir des mailles de la grille. Je peux traiter des facettes planes en divisant la maille en deux ou plusieurs facettes triangulaires. Je peux aussi traiter la maille directement comme une facette non plane. La facette plane a l'avantage de rester plane dans l'espace perspectif ce qui permet, lors du remplissage de la facette, de déterminer la profondeur perspective Z_p d'un point d'un segment par l'interpolation linéaire des Z_p de ses extrémités. Pour une surface non plane, cette interpolation doit être non-linéaire et il vaut mieux l'éviter parce que trop longue à calculer.

Que se passe-t-il si j'utilise malgré tout une interpolation linéaire pour les facettes non planes? La forme de la facette est définie au moment du remplissage et sera donc différente pour des projections différentes. Des discontinuités peuvent aussi se présenter pour les cas de la figure 3.5. Ces effets n'ont heureusement pas de conséquence désavantageuse pour des maquettes de terrain en général (fig.4.1.d). Ils pourraient se manifester tout au plus dans le cas où l'intersection du terrain avec un autre objet devrait être calculée.

Trois méthodes d'ombrer les facettes sont considérées:

1) ombrage uniforme des facettes; 2) ombrage selon Gouraud [24] et 3) ombrage selon Phong [43].

La méthode d'ombrage uniforme est la plus simple. L'ombrage est inclu dans la maquette sous forme d'une valeur de luminance par facette qui est utilisée telle quelle pour remplir la facette.

La méthode de Gouraud réalise une continuité de luminance d'une facette à l'autre par l'interpolation des luminances dans l'image. L'ombrage est inclu dans la maquette sous forme d'une valeur de luminance L par noeud de la grille. Leur interpolation a lieu lors du remplissage en doublant l'interpolateur Z_p d'un interpolateur L .

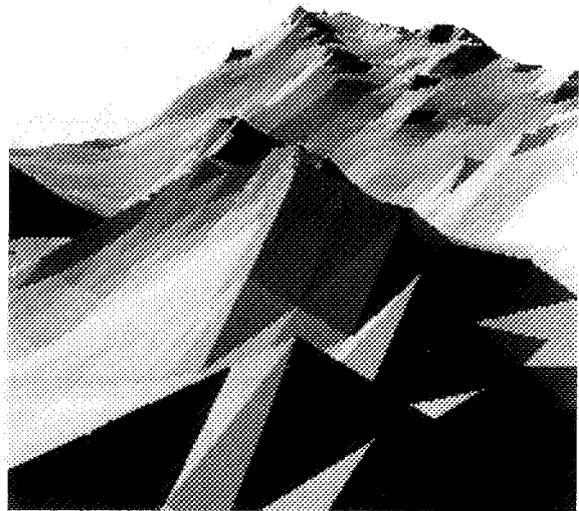
La méthode de Phong est la plus complexe mais aussi, en principe, la meilleure puisqu'elle est basée sur la continuité du vecteur normal à la surface \underline{n} . Cette continuité est en général suffisante pour permettre une réflexion spéculaire. Sa réalisation nécessite de compléter la maquette des deux composantes variables Δa_x et Δa_y de la normale en chaque noeud (§2.9). Le remplissage a lieu cette fois-ci en ajoutant à l'interpolateur Z_p un interpolateur Δa_x et un interpolateur Δa_y . L'ombre doit finalement être calculée en chaque point de l'image.

La figure 4.1 offre une comparaison visuelle d'une même vue perspective synthétisée selon les techniques suivantes:

- a) Division d'une maille en deux facettes planes selon une diagonale NW-SE; luminance uniforme.
- b) Division d'une maille en deux facettes planes selon une diagonale NE-SW; luminance uniforme.
- c) Division d'une maille en 4 facettes planes réunies au centre interpolé de la maille; luminance uniforme.
- d) Facette non-plane; luminance uniforme.



a) 2 facettes, $\eta=0$



b) 2 facettes, $\eta=0$

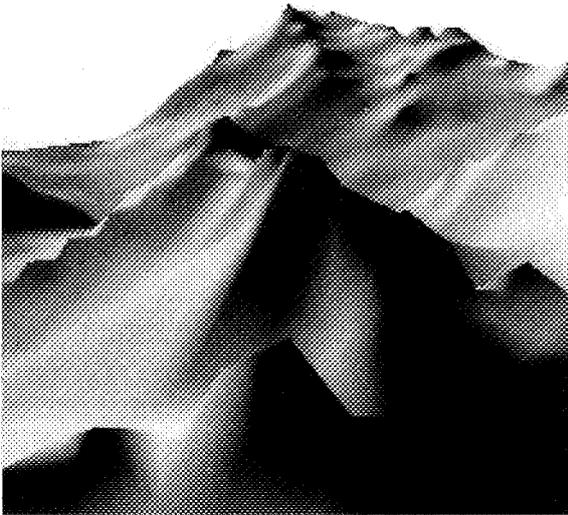


c) 4 facettes, $\eta=0$

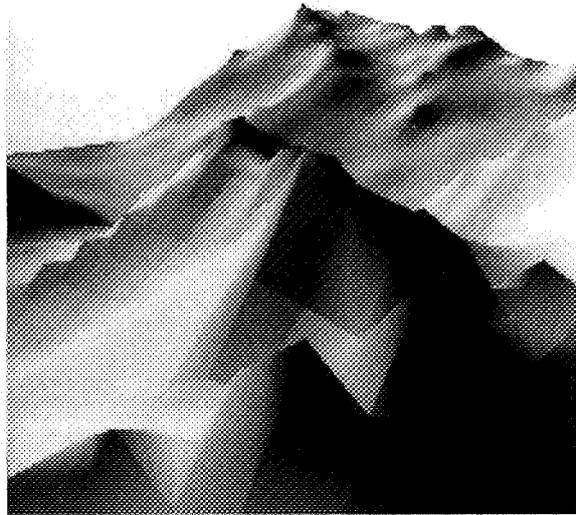


d) 1 facette, $\eta=0$

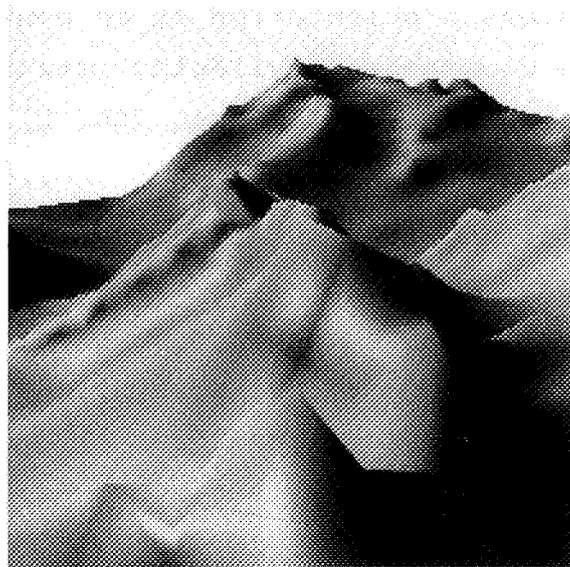
Fig.4.1 Vue perspective sur le Schreckhorn synthétisée à partir de la maquette Mettenberg(R) à la maille de 250 m. Illumination de juin, 16h. L'observateur est au-dessus du Lauteraarhorn à 4500 m d'altitude et regarde au NW ($\phi=45^\circ$). Voir le texte pour les différentes techniques de visualisation utilisées



e) 1 facette, $\eta=1$



f) 1 facette, $\eta=0,6$



g) 1 facette, $\eta=1$, réfl.spéculaire

Fig.4.1 suite

- e) Facette non-plane; luminance interpolée selon Gouraud.
- f) Facette non-plane; luminance combinée d'une part L_i interpolée selon Gouraud et d'une part uniforme L_u :

$$L = \eta \cdot L_i + (1-\eta) \cdot L_u \quad (4.1)$$

où η est le coefficient de fondu.

- g) Facette non-plane; luminance calculée selon la méthode de Phong et en tenant compte d'une réflexion diffuse et spéculaire ($p_d=0,6$ $p_s=0,4$ $c=20$).

Des méthodes à facettes planes a) b) et c), cette dernière est sans doute la meilleure, les deux autres méthodes provoquant des distorsions d'orientation et de contraste liées à la présence d'une diagonale privilégiée (structures plutôt verticales dans a) et plutôt obliques dans b); contraste moindre dans a) que dans b)).

A comparer c) et d) je relève d'abord que la méthode des facettes non-planes ne présente, comme prévu, pas d'artefacts. Je relève ensuite un avantage de qualité pour c) respectivement de temps de calcul pour d) dû à un nombre de facettes quatre fois plus grand dans c) que dans d). Aussi ces deux méthodes sont-elles jugées équivalentes.

La méthode e) présente par rapport aux méthodes précédentes l'avantage, déterminant pour la synthèse de terrain, de différencier fortement les transitions entre facettes voisines des transitions entre facettes se recouvrant. Cette propriété confère à l'image un rendu de très bonne qualité. La méthode f) offre la possibilité d'un compromis, contrôlé par η , entre ce rendu et la visibilité de la grille. Une certaine visibilité de la structure de la grille peut en effet être souhaitée, car elle contribue à accentuer la vision perspective d'une part et d'autre part, elle sert à donner une échelle à la représentation du terrain.

La méthode g) est la seule qui pratiquement permette le calcul de la réflexion spéculaire. Celle-ci présente cependant peu ou pas d'avantage. Aux objections formulées

à l'encontre de son emploi pour les cartes d'ombre (§2.2.1) s'ajoute le fait que les vues perspectives de terrain ne présentent que rarement les conditions pour la présence de réflexions spéculaires. En effet, pour des conditions de vue caractérisées par un angle de montée β petit et un terrain limité en pente, celles-ci n'apparaissent pratiquement que pour de la lumière à contre-jour. Ceci est par ailleurs une vue plutôt désavantageuse pour le rendu de l'ensemble du terrain. Sinon pour des applications particulières où une réflexion spéculaire est jugée indispensable, cette méthode n'est donc pas recommandable.

En conclusion, la méthode f) est considérée comme particulièrement adaptée à la synthèse perspective de terrains.

4.2 Visualisation d'information liée au terrain

Il existe chez les utilisateurs de bases de données qui sont liées à un terrain, un grand besoin de représenter des informations avec le terrain comme support. La synthèse d'images offre une nouvelle possibilité pour visualiser simultanément le terrain a_{ij} et une information supplémentaire désignée par la grandeur b_{ij} et située géométriquement en a_{ij} . La méthode consiste à utiliser de manière indépendante la luminance et la chrominance pour représenter le terrain respectivement b_{ij} . L'information b_{ij} module ainsi la chrominance des facettes qui, comme la luminance, peut être soit uniforme soit interpolée. Pour une grandeur logique, la présence ou non d'une forêt par exemple, le remplissage doit être uniforme, alors qu'il peut être uniforme ou interpolé quand l'information est le prix du terrain, pour citer un autre exemple.

L'information b_{ij} est quelconque. Elle définit par exemple la couverture du sol, la qualité du sous-sol, la densité d'habitants, la facilité d'accès, etc.

La figure 4.2 est un exemple spécial où l'information représentée est l'altitude elle-même ($b_{ij}=a_{ij}$). L'image est codée avec 5 bit pour la luminance et 3 bit pour la chrominance,

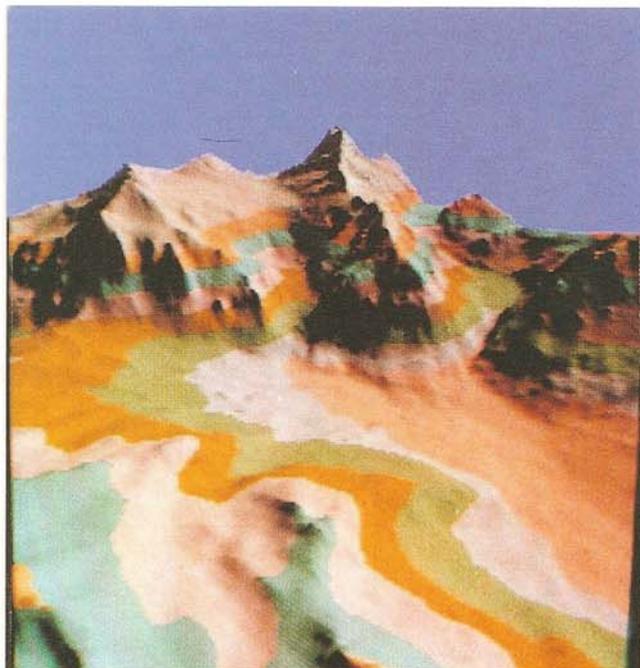


Fig.4.2 Vue perspective sur le Wetterhorn synthétisée à partir de la maquette Mettenberg(G) à la maille de 50 m. Illumination de mars 13h. L'observateur est au-dessus du Faulhorn à 3000 m d'altitude et regarde au SE ($\phi=45^{\circ}$).

On voit au premier plan, le Faulhorn, et à l'arrière plan, de gauche à droite, la Grande Scheidegg, le Wetterhorn, le Schreckhorn et le Lauteraarhorn, puis l'arête de Mittelleggi.

Visualisation de l'altitude par la couleur. L'équidistance des courbes de niveau est de 250 m.

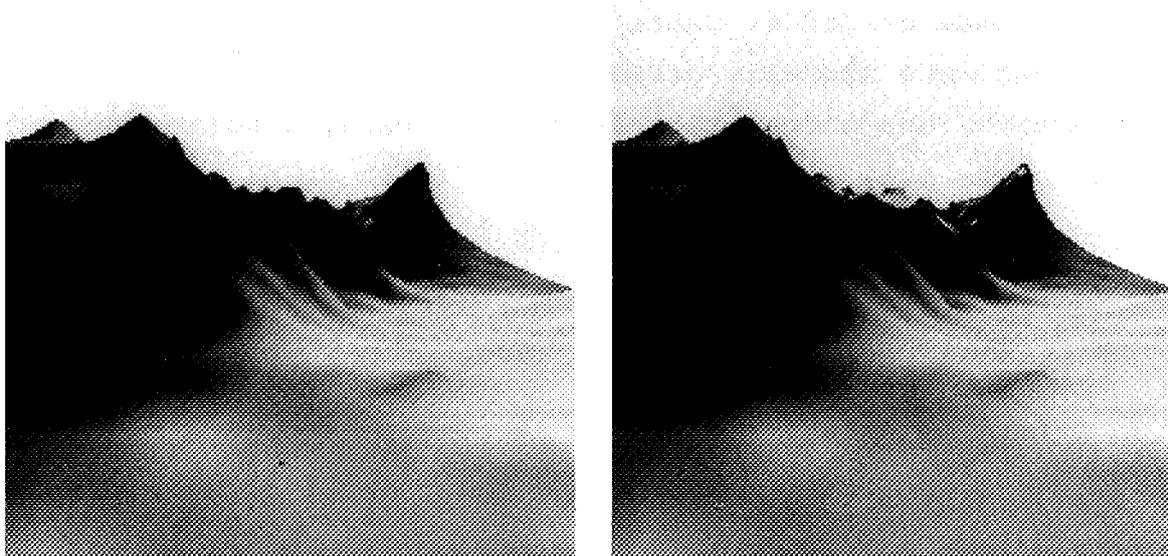
l'échelle des chrominances définissant des courbes de niveau équidistantes de 250 m. Cette image illustre deux choses: d'une part, une nouvelle possibilité de visualiser, en vue perspective, une information liée au terrain; d'autre part, quand, comme ici, l'information est l'altitude elle-même, une amélioration possible de la représentation du terrain, grâce à la référence à l'altitude introduite par cette méthode.

4.3 Effets de quantification de la mémoire Z_p

Soient deux facettes se recouvrant en un point de l'image et soient Z_{p1} et Z_{p2} leur profondeur perspective en ce point. La détermination de la surface visible devient impossible quand Z_{p1} et Z_{p2} tombent dans le même pas de quantification (§3.1.1), ce qui conduit à des erreurs dans l'image. Pour des images de terrains, la profondeur critique z_{ec} à partir de laquelle des erreurs de superposition peuvent apparaître systématiquement dans l'image peut être définie comme celle dont le pas de quantification Δz_e est égal à la maille Δl . De (3.8) je tire:

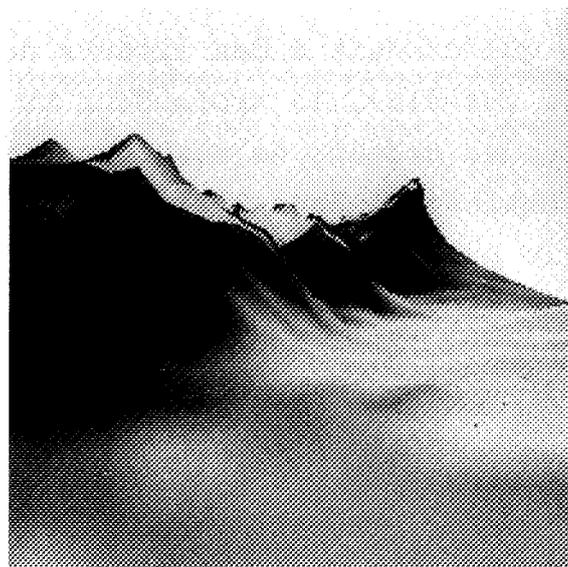
$$z_{ec} = \sqrt{\Delta l \cdot D \cdot 2^n} - D \quad (4.2)$$

Les effets visuels provoqués par une quantification insuffisante de la profondeur perspective sont illustrés par la figure 4.3 représentant une scène de la maquette Mettenberg ($\Delta l = 250$ m), vue depuis une distance de $D = 20$ m et sur une profondeur de $F = 14$ km. Les images a) b) et c) sont obtenues avec une mémoire Z_p limitée respectivement à $n = 16, 12$ et 8 bit, ce qui définit une profondeur critique respectivement de $z_{ec} = 18'080, 4'500$ et $1'110$ m. L'image a) sans erreur confirme la faisabilité de la synthèse de terrain avec une mémoire Z_p de 16 bit. Les images b) et c) illustrent l'effet visuel des erreurs de quantification. La présence prévue d'un front d'erreurs qui se déplace de l'arrière vers l'avant au fur et à mesure de la réduction de résolution justifie



a) $n=16$ bit, $z_{ec}=18,0$ km

b) $n=12$ bit, $z_{ec}=4,5$ km



c) $n=8$ bit, $z_{ec}=1,1$ km

Fig.4.3 Vue perspective sur la Grande Scheidegg synthétisée à partir de la maquette Mettenberg(R) à la maille de 250 m. L'observateur est à 3000 m d'altitude et regarde au SW en direction de l'Eiger. Effets de quantification de la mémoire Z_p

par ailleurs l'utilité de la profondeur critique z_{ec} pour situer le domaine des erreurs.

4.4 Effets de profondeur

Il y a d'abord les effets de profondeur physiologiques [42]. L'accommodation, la convergence et la disparité binoculaire sont les effets qui nécessitent la représentation stéréoscopique. La parallaxe de mouvement est monoculaire et nécessite la production de séquences d'images animées. Les paires stéréoscopiques et les séquences d'images s'obtiennent par répétition de la synthèse pour des conditions de vue changeantes. Leur implémentation est brièvement décrite.

Il y a ensuite les effets de profondeur psychologiques [7]. La grandeur rétinienne d'objets familiers, la perspective linéaire, la superposition et l'ombre sont les effets déjà réalisés avec l'algorithme de synthèse. La perspective aérienne et le gradient de texture sont deux effets qu'il convient encore d'analyser.

Paires d'images stéréoscopiques

Deux images sont à synthétiser pour une même scène. Les deux points de vue sont aux extrémités d'un segment de base, de longueur P_1 , perpendiculaire à la direction d'observation. Les deux directions d'observation effectives convergent sous un angle θ . Trois conditions dictent le choix des paramètres P_1 et θ : 1) les conditions de présentation de l'image (grandeur de l'écran, distance d'observation, distance entre les yeux); 2) le désir d'une relation linéaire entre l'effet de profondeur et la distance [42,p.76-77]; 3) la convergence des yeux lors de la visualisation, qui doit varier dans un domaine limité pour rester confortable.

Des paires stéréoscopiques de vues de terrain implémentées suivant ces règles ont un bon effet tridimensionnel qui est particulièrement marqué avec les techniques de visualisation des facettes préservant la visibilité de la grille. Ces vues

gardent cependant un aspect artificiel, vu que l'effet stéréo est marqué pour un terrain miniature, mais disparaît complètement pour un terrain grandeur réelle.

Séquences d'images

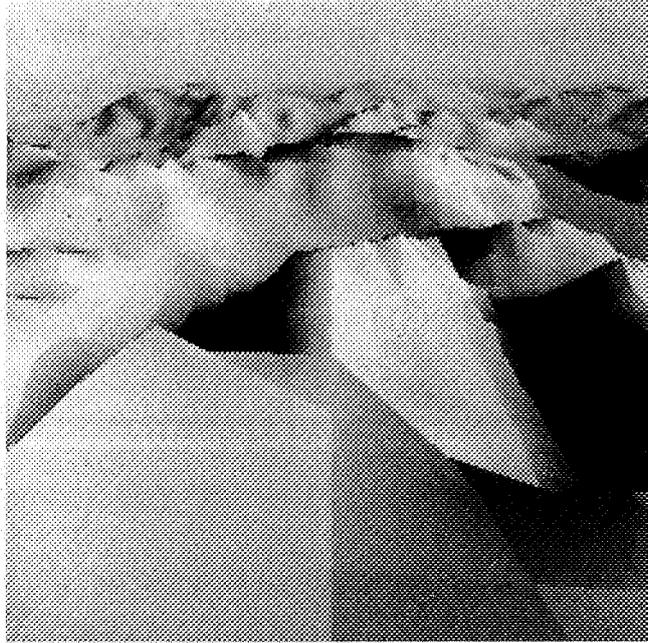
Un système de prise de vues automatique a été implémenté et plusieurs séquences filmées ont été réalisées image par image. Ainsi une séquence de vol simulé dans un terrain est obtenu par le déplacement successif du point de vue dans la direction d'observation. La double exposition d'une même image ne porte en général pas préjudice à la qualité du mouvement, de sorte qu'il faut synthétiser 12 images/s quand la cadence est de 24 images/s. Avec la synthèse implémentée et pour une scène simple, il faut donc compter avec 12.3 mn de synthèse par seconde de projection.

Les séquences synthétisées confirment, ici aussi, un effet tridimensionnel très prononcé et favorisé par la visibilité de la grille. Est aussi testée, à cette occasion, la technique de remplissage des facettes non-planes, qui ne montre définitivement pas d'artefact d'origine dynamique.

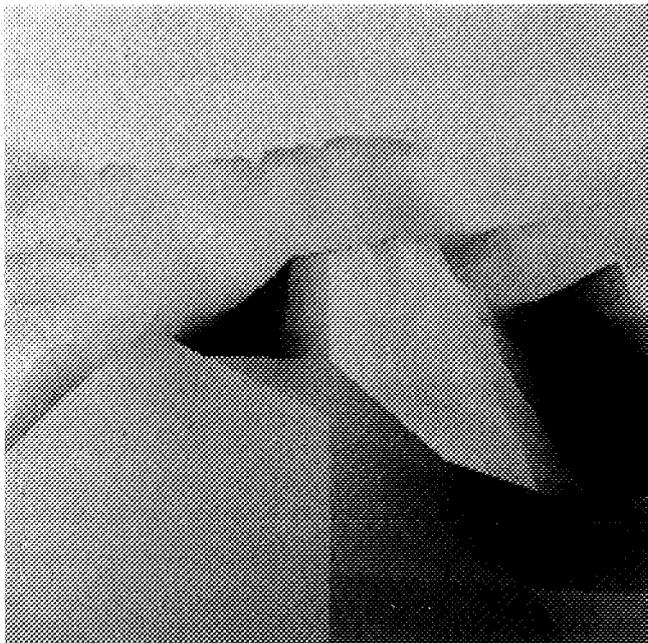
Perspective aérienne

La dispersion de la lumière par les particules de l'air entraîne une diminution de contraste des objets éloignés. Au cours de la synthèse, l'éloignement est déterminé par la profondeur linéaire z_e et par la profondeur perspective Z_p qui, des deux, est la seule connue pour chaque point de l'image. La perspective aérienne transforme donc la luminance L d'un point de l'image en une nouvelle luminance aérienne L_a selon une transformation à définir $L_a(L, Z_p)$.

Il convient de relever que les grandeurs L et Z_p pour chaque point de l'image sont disponibles à la fin de la synthèse dans les mémoires Z_p et de l'image. La perspective aérienne peut donc être implémentée très facilement. Cette transfor-



a) $L_\infty = 0,7$ $z_{e\infty} = 40 \text{ km}$ $z_e^* = 20 \text{ km}$



b) $L_\infty = 0,9$ $z_{e\infty} = 15 \text{ km}$ $z_e^* = 5 \text{ km}$

Fig.4.4 Vue sur le Rigi de la figure 3.9 modifiée par la perspective aérienne. L_∞ = luminance à l'infini, $z_{e\infty}$ = profondeur limite, $z_e^*(\lambda^*=0,5)$ = profondeur typique.

mation peut, de plus, être répétée pour des fonctions $L_a(L, Z_p)$ variables, ce qui offre la possibilité de visualiser très rapidement la même vue avec des fonctions différentes. Des variations dynamiques en temps réel peuvent être implémentées, s'il est fait usage de la technique des tabelles de transfert variables [45].

Soit, sans justification physique, la perspective aérienne définie par:

$$L_a = (1-\lambda) \cdot L + \lambda \cdot L_\infty \quad (4.3)$$

avec:

$$\lambda = \{ \min(1, Z_p / Z_{p^\infty}) \}^\kappa \quad (4.4)$$

Avec Z_p croissant, la luminance L_a passe de L à la luminance à l'infini L_∞ . L'exposant κ permet de moduler la transition et Z_{p^∞} marque la limite de visibilité en profondeur.

L'exposant κ n'étant guère tangible, il se calcule de préférence à partir d'un point typique de la fonction $\lambda(Z_p^*) = \lambda^*$.

Ainsi:

$$\kappa = \frac{\log \lambda^*}{\log Z_p^* - \log Z_{p^\infty}} \quad (4.5)$$

Considérant de plus la liaison avec la profondeur linéaire:

$$Z_p \cong \frac{z_e}{z_e + D} \quad (F \gg D) \quad (4.6)$$

je peux définir la perspective aérienne par les deux grandeurs caractéristiques que sont la profondeur typique z_e^* et la profondeur limite z_{e^∞} .

La figure 4.4 démontre l'effet visuel de la perspective aérienne appliquée à la vue sur le Rigi, illustrée dans sa forme originale par la figure 3.9. On y trouve les trois caractéristiques de la perspective aérienne: 1) l'effet de profondeur, 2) un réalisme accentué et 3) la possibilité de couper un terrain sans transition abrupte.

Gradient de texture

Le gradient de texture provient du changement apparent de la structure de surface d'un objet. Cette structure est en général tridimensionnelle et difficile à modeler. Une approche bidimensionnelle considère l'objet recouvert d'une tapisserie peinte [11][21]. Une autre approche produit une texture pseudo-tridimensionnelle en utilisant la tapisserie pour perturber le vecteur normal à la surface \underline{n} et moduler ainsi l'ombre [9]. Ces deux techniques sont cependant complexes car elles nécessitent la retransformation de tous les points de l'image dans l'objet pour y lire la tapisserie.

J'expose ici une technique très simple qui génère la texture non pas dans l'objet comme les méthodes précitées, mais dans l'image, et qui fait usage exclusivement de l'image et de la scène des profondeurs Z_p disponibles à la fin de la synthèse.

A ce niveau de calcul, la provenance des facettes est inconnue. Seuls L et Z_p sont connus pour chaque point de l'image. De plus, considérant la scène des profondeurs comme une nouvelle maquette, l'orientation de la surface de ce nouveau relief $Z_p(X_p, Y_p)$ peut être obtenue en calculant le vecteur normal \underline{n}_p à cette surface. Une texture dans l'image peut ainsi être générée à partir de L, Z_p et \underline{n}_p .

Soit t la fonction de texture, limitée au domaine $[-1, 1]$ et qui module la luminance L de l'image. La luminance L_t de l'image avec texture vaut:

$$L_t = \Delta L + (1 - 2 \cdot \Delta L) \cdot L + \Delta L \cdot t \quad (4.7)$$

ΔL étant l'amplitude de crête de la texture.

Le choix de la texture t est dicté par le désir d'accentuer l'effet de profondeur et le réalisme de l'image. Soit une première texture t_1 provenant d'un générateur aléatoire binaire:

$$r_1 = \begin{cases} 1 & \text{probabilité} = 0,5 \\ -1 & \text{probabilité} = 0,5 \end{cases} \quad (4.8)$$

et présentant un effet de contraste diminuant avec Z_p . Avec la fonction (4.4), la texture t_1 s'écrit:

$$t_1 = r_1 \cdot (1 - \lambda(Z_p)) \quad (4.9)$$

La figure 4.5 illustre l'effet visuel de cette texture de contraste appliquée à la vue sur le Schreckhorn (fig.4.1).

Une deuxième texture t_2 doit montrer l'effet de profondeur produit par un effet de taille de la texture. Il faut donc disposer d'un générateur aléatoire paramétrique dont un des paramètres module la taille de la texture. Un tel générateur a été trouvé sous la forme d'un processus markovien bidimensionnel et binaire générant r_2 au point (m,n) selon ses voisins précédents r_1' au point $(m-1,n)$ et r_1'' au point $(m,n-1)$, compte tenu des probabilités conditionnelles:

$$p(r_2 | r_1', r_1'') : \begin{cases} p(1 | 1, 1) = p(-1 | -1, -1) = p_\gamma \\ p(1 | 1, -1) = p(-1 | -1, 1) = p_\psi \end{cases} \quad (4.10)$$

La texture ainsi produite a l'avantage d'être symétrique ($p(1)=p(-1)$) et d'être modulable point par point. Les probabilités p_γ et p_ψ modulent indépendamment la taille respectivement l'orientation de la texture (fig.4.6).

La texture avec effet de taille t_2 peut donc être réalisée avec le générateur r_2 en variant la probabilité p_γ avec Z_p ; par exemple, en utilisant à nouveau la fonction $\lambda(Z_p)$ de la formule 4.4:

$$t_2 = r_2 \quad \text{avec:} \begin{cases} p_\gamma = 1 - \lambda(Z_p) \\ p_\psi = 0,5 \end{cases} \quad (4.11)$$

La figure 4.7 illustre l'effet visuel de cette texture de taille.

Ces deux résultats démontrent finalement que des améliorations sensibles de l'effet de profondeur, mais aussi du réalisme, sont possibles avec cette technique très simple

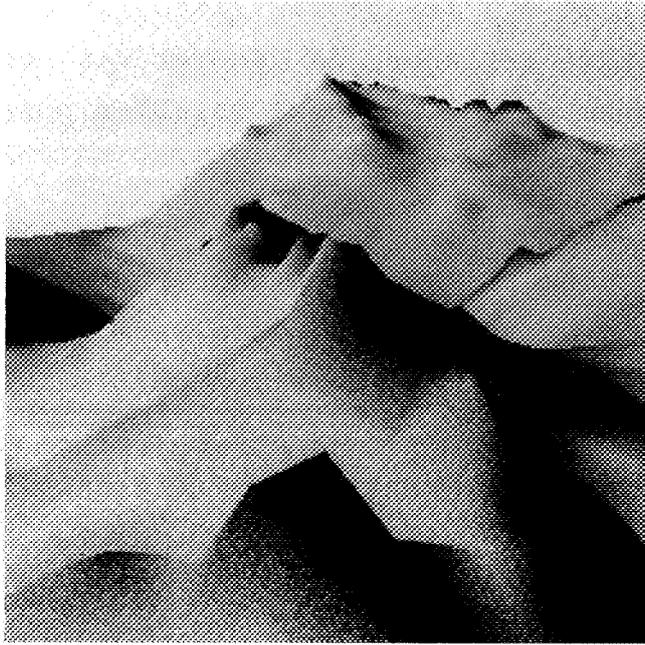


Fig.4.5 Vue sur le Schreckhorn de la figure 4.1 avec une texture à effet de contraste.

$$\Delta L = 0,1 \quad z_e^*(\lambda^* = 0,5) = 1,5 \text{ km} \quad z_{e\infty} = 15 \text{ km}$$

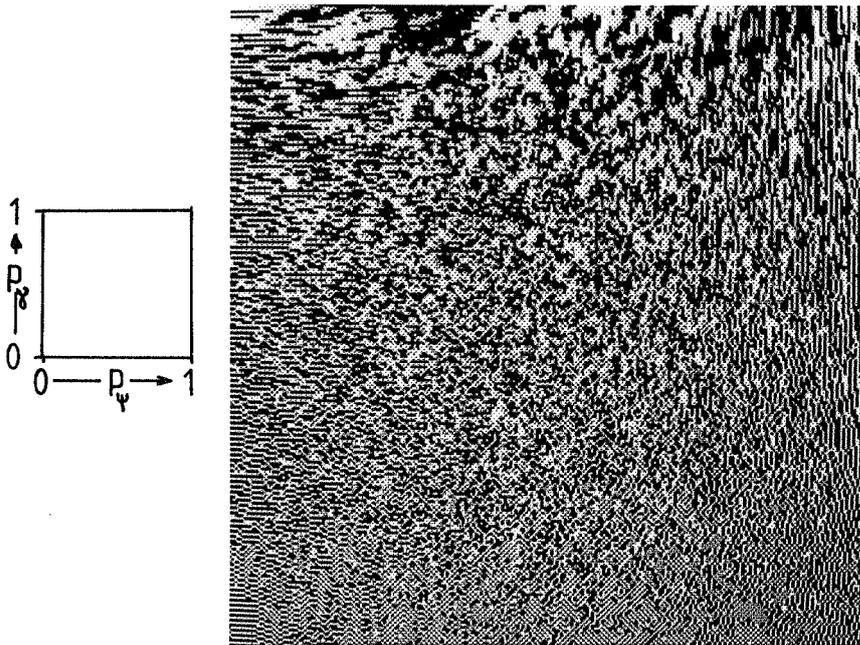


Fig.4.6 Caractéristique du générateur de texture aléatoire paramétrique $r_2\{p_\gamma, p_\psi\}$. La taille et l'orientation de la texture sont modulées indépendamment par p_γ et p_ψ .

des textures dans l'image. Ces textures découlant aussi des seules informations L et Z_p , les possibilités, déjà mentionnées pour la perspective aérienne, de générer des textures variables ou même dynamiques sont aussi valables pour cette technique.

Les principes énoncés laissent par ailleurs prévoir d'autres améliorations sur le même principe, notamment en créant:

1) une texture avec un effet d'orientation basé sur la variation de la probabilité p_ψ en fonction de l'orientation de la surface des profondeurs définie par \underline{n}_p , ou 2) une texture qui combine judicieusement ces différents effets.

4.5 Transition entre maquettes par fusion

L'utilisation de la structure hiérarchique pour généraliser des facettes apparemment trop petites se heurte aux problèmes de continuité entre des facettes différemment grandes (§3.1.3). L'idée présentée ici consiste à effectuer cette transition dans l'espace de l'image et à utiliser la profondeur perspective Z_p pour en assurer la continuité. Soit une scène dont on synthétise d'abord le premier plan à partir d'une maquette à maille fine, puis, dans une deuxième image, le second plan à partir d'une maquette à maille grossière. Les domaines en profondeur, soit $[0, Z_{p1}]$ pour le premier plan et $[Z_{p2}, 1]$ pour le second plan, doivent se recouvrir suffisamment pour que la superposition des deux images se fasse sans trou. Une nouvelle image est obtenue par la fusion point par point des luminances L_1 respectivement L_2 des deux images:

$$L = \begin{cases} L_1 & \text{pour } Z_p < Z_{p2} \\ (1-\tau) \cdot L_1 + \tau \cdot L_2 & \text{pour } Z_{p2} < Z_p < Z_{p1} \\ L_2 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.12)$$

$$\text{avec: } \tau = \frac{Z_p - Z_{p2}}{Z_{p1} - Z_{p2}}$$

Cette technique de fusion est testée en utilisant les deux

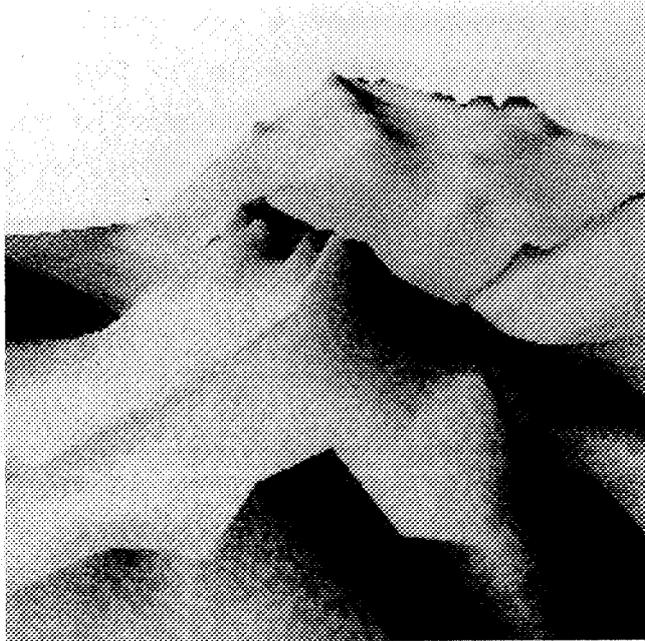


Fig.4.7 Vue sur le Schreckhorn de la figure 4.1 avec une texture à effet de taille:

$$\Delta L = 0,05 \quad z_e^*(\lambda^* = 0,5) = 4 \text{ km} \quad z_{e\infty} = \infty$$



Fig.4.8 Vue sur le Schreckhorn de la fig.4.1. Illumination de mars 13h. Fusion dans l'image des maquettes aux mailles de 50 respectivement 250 m entre $z_{e2} = 2000$ m et $z_{e1} = 3000$ m de profondeur.

maquettes Mettenberg. Le premier plan a une profondeur de $z_e = [0,3000\text{m}]$, commence à une distance de $D= 500$ m de l'observateur et vient de la maquette à la maille de 50 m. Le deuxième plan a une profondeur de $z_e = [2000\text{m},\infty]$ et vient de la maquette à la maille de 250 m. La fusion est faite suivant les valeurs Z_{p1} et Z_{p2} correspondantes. La figure 4.8 illustre le résultat qu'il faut comparer avec la figure 4.1. Le premier plan est maintenant de bonne résolution et la transition vers la maquette à basse résolution est fondue. Cette technique de fusion se révèle ainsi parfaitement adaptée à assurer la transition entre des maquettes aux mailles inégales et permet ainsi l'usage d'une maquette hiérarchique simple tout en profitant de la possibilité de supprimer les détails inutiles de l'image.

5. CONCLUSION

Les images présentées montrent l'aptitude de la synthèse par ordinateur, à visualiser des objets. Le rendu de la représentation est infiniment meilleur que la visualisation directe des données.

Le rendu et le réalisme des images synthétiques de maquettes de terrain s'est révélé être variable. Le rendu tridimensionnel provient surtout de la réflexion diffuse, l'ombre portée ajoutant une part de réalisme souvent utile. La réflexion spéculaire ajoute un brin de réalisme mais souvent au détriment du rendu. Le rendu de terrains est particulièrement bien marqué par les vues perspectives et est encore sensiblement accru par l'animation, mais cette fois-ci à des coûts élevés. La stéréoscopie a peu de signification pour des maquettes de terrain. Quant à la perspective aérienne et à la texture, elles agissent surtout au niveau du réalisme. La nouvelle méthode de génération de texture tire avantage de la disponibilité de la scène des profondeurs à la fin de la synthèse. Elle est simple et révèle une bonne aptitude à améliorer le réalisme des images de terrain.

La visualisation impose des conditions spécifiques à l'interpolation d'un terrain. Elle nécessite une continuité de la surface suffisante. Il y a deux méthodes favorables pour interpoler l'image d'un objet. La solution économique consiste à interpoler l'image linéairement. La solution de qualité consiste à interpoler l'objet avec une fonction d'interpolation d'ordre supérieur, par exemple la fonction spline cubique. Ces résultats se révèlent être la conséquence directe de la nature différentielle de l'ombrage.

Le traitement de grandes maquettes à rendu nécessaire le développement de méthodes de calcul adéquates. Ainsi le calcul de cartes d'ombre a pu être effectué séquentiellement, grâce

à l'algorithme de l'ombre portée développé sur le principe de la propagation d'un plan d'ombre.

La synthèse perspective de grandes maquettes est facilitée par deux mesures. Ainsi le choix de la méthode de la mémoire Z_p permet-il aussi un traitement séquentiel de la maquette entière. L'accroissement exagéré des coûts de calcul liés à cette méthode, et qui explosent littéralement pour des vues à direction horizontale, est limité par la deuxième mesure. Celle-ci propose l'usage d'une maquette hiérarchique pour éliminer, à un niveau supérieur, des régions entières, non-significatives pour la scène.

L'utilisation d'une maquette hiérarchique pour supprimer les détails superflus de la représentation se heurte à des problèmes de continuité dans les transitions entre facettes. La solution, nouvellement envisagée, d'effectuer cette continuité par la fusion dans l'image se révèle tout-à-fait faisable avec des maquettes de terrain.

L'implémentation de l'algorithme de la mémoire Z_p peut être réalisé de manière efficace avec les mémoires aujourd'hui disponibles. Une quantification de Z_p avec 16 bit est suffisante pour des maquettes de terrain. Dans ces conditions, la synthèse peut être interactive déjà sur un système de calcul modeste.

L'utilisation supplémentaire de la chrominance dans les vues perspectives est une méthode originale pour visualiser des informations liées à un terrain.

A.1 ANNEXE 1 : Définition des maquettes dérivées:

Nom:	Maquette d'origine:	Maille: Δx [m]	[noeuds]	Grandeur: [km·km]	Origine: X_{cn}/Y_{cn} [km·km]
1 Lac des Quatre Cantons (R)	Rimini	250	256·256	63,75·63,75	190,000/655,000
2 Mittelleggi (G)	G'wald	50	128·128	6,3 · 6,3	158,100/640,500
3 Mettenberg (R)	Rimini	250	23,5·23,5	11,25·11,25	158,250/643,250
4 Mettenberg (G)	G'wald	50	226·226	11,25·11,25	158,250/643,250
5 Thun (R)	Rimini	250	381·381	95,0 · 95,0	137,000/555,000

A.2 ANNEXE 2 : Référence des directions d'illumination

illumination naturelle: (latitude 46,60°)	heure	vecteur illumination (fig.2.6):			azimuth:	angle de hauteur:
		l_x	l_y	l_z	α_1 [°]	β_1 [°]
janvier	14 h	-0,468	-0,828	0,306	209,5	17,8
mars	13 h	-0,258	-0,701	0,663	200,2	41,5
mars	15 h	-0,707	-0,513	0,485	234,0	29,0
mars	16 h	-0,866	-0,363	0,343	247,2	20,0
avril	8 h	0,847	-0,216	0,483	104,3	28,9
juin	12 h	0,0	-0,393	0,919	180,0	66,8
juin	16 h	-0,794	-0,006	0,604	265,6	37,1

A.3 ANNEXE 3 : Paramètres de synthèse pour les figures du chapitre 3

Sujet	Alpes (AB)	Rigi (RI)	Wetterh. (W50)	Wetterh. (W250)
Figure	3.8	3.9	3.10.a	3.10.b
Maquette	Thun (R)	Lac 4 Cant (R)	Mettenberg (G)	Mettenberg (R)
- maille $\Delta\lambda$	[m] 250	250	50	250
- type	diffus	diffus	diffus	diffus
- illumination	janvier 14h	avril 8h	mars 13h	mars 13h
- nombre de blocs	20*20	15*15	15*15	5*5
hiérarchique	- nbre. noeuds/bloc	20*20	16*16	10*10
Vue	- lieu: X_{cn}/Y_{cn} [km*km]	179,25/609,75	190,25/683,75	163,65/643,00
	- altitude [m]	6000	3200	1900
	- $\alpha/\beta/\gamma/\phi$ [°]	135/-30/0/60	0/-25/0/60	78/5/0/20
	- D/F [m]	1000/∞	100/40'000	100/11'500
Blocs invi-	- nbre. blocs total	400	225	225
sibles	- nbre. blocs restant	68	143	47
Facettes	- nbre. facettes/maille	2	1	1
	- interpolation: $\eta =$	0	0,4	0,6
Facettes	- nbre. facettes total	49,0 k	32,1 k	10,5 k
invisibles	- nbre. facettes restant	39,4 k	27,5 k	8,0 k
et arrières	- nbre. facettes restant	26,3 k	21,7 k	4,6 k
Temps de calcul	[mn] 40	30	11	3,5

A.4 ANNEXE 4 : Paramètres de synthèse pour les figures du chapitre 4

Sujet	Schreckhorn I	Wetterhorn	Gde.Scheidegg	Rigi	Schreckhorn II
Figure	4.1, 4.5, 4.7	4.2	4.3	4.4	4.8
Maquette					
- nom	Mettenberg (R)	Mettenberg (G)	Mettenberg (R)	Lac 4 Cant.(R)	Mettenberg
- maille $\Delta\lambda$	[m] 250	50	250	250	50 et 250
Ombrage					
- type	diff/spéc.	diffus	diffus	diffus	diffus
- illumination	juin 16h	mars 13h	mars 13h	avril 8h	mars 13h
- interpol.: $\eta =$	variable	1	1	0,4	1
Vue					
- lieu: $X_{cn} Y_{cn}$ [km·km]	158,25/653,75	169,50/643,25	169,50/651,75	190,25/683,75	158,25/653,75
- altitude	[m] 5000	5000	3000	3200	5000
- $\alpha/\beta/\gamma/\phi$	[°] -45/-25/0/45	135/-25/0/62	-160/-10/0/75	0/-25/0/60	-45/-25/0/45
- D/F	[m] 500/ ∞	100/ ∞	20/14'000	100/40'000	500/ ∞

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Andrew H., "Computer Techniques in Image Processing", Academic Press, 1970
- [2] Andrew H.C., "Semiconductor Advances Boost Digital Image Processing System Performance", Computer Design, Sept. 1979, p.93-101
- [3] Andrew H.C. & Patterson C.L., "Digital Interpolation of Discrete Images", IEEE Trans. Computer, Vol. C-25, No. 2, Feb. 1976
- [4] Atherton P., Weiler K. & Greenberg D., "Polygon Shadow Generation", Computer Graphics, Vol. 12, Summer 1978, p.275-281
- [5] Barnhill R.E. & Riesenfeld R.F., "Computer Aided Geometric Design", Academic Press, N.Y., 1974
- [6] Batson R.M., Edwards K. & Eliason E.M., "Computer Generated Shaded-Relief Images", Jour. Research U.S. Geol. Survey, Vol. 3, No. 4, July-Aug. 1975, p.401-408
- [7] Blakemore C., "The Baffled Brain", in: Illusion in Nature and Art, Gerald Duckworth Ltd., London, 1973
- [8] Blinn J.F., "Models of Light Reflexion for Computer Synthesized Pictures", Computer Graphics, Vol. 11, Summer 1977, p.192-198
- [9] Blinn J.F., "Simulation of Wrinkled Surfaces", Computer Graphics, Vol. 12, Summer 1978, p.286-292
- [10] Blinn J.F. & Newell M.E., "Clipping Using Homogeneous Coordinates", Computer Graphics, Vol. 12, Summer 1978, p.245-251
- [11] Blinn J.F. & M.E., "Texture and Reflexion in Computer Generated Images", Comm. ACM, Vol. 19, No. 10, Oct. 1976 p.542-547
- [12] Brassel K., "Modelle und Versuche zur automatischen Schräglichtschattierung", Diss. Uni. Zürich, 1973
- [13] Brun F., Denegre J. & Pasquier B., "Recherches en cartographie et photointerprétation", dans: Le traitement automatisé de l'image", F. Lévy, Interphotothèque N° spécial 33-34, déc. 1977
- [14] Catmull E., "A Hidden-Surface Algorithm with Anti-Aliasing", Computer Graphics, Vol. 12, Summer 1978, p. 6-11
- [15] Celio T. & Graf J.-P., "Schattenkarten von Fernsatsatelliten", Mitteilungen GFF, Nr. 1/2, Juni 1978, S.42

- [16] Clark J.H., "Hierarchical Geometric Models for Visible Surface Algorithms", Comm. ACM, Vol. 19, No. 10, Oct. 1976, p.547-554
- [17] Cornsweet T.N., "Visual Perception", Academic Press, New York, 1970
- [18] Crow F.C., "Shaded Computer Graphics in the Entertainment Industry", Computer, March 1978, p.11-12
- [19] Crow F.C., "Shadow Algorithms for Computer Graphics", Computer Graphics, Vol. 11, Summer 1977, p.242-248
- [20] Crow F.C., "The Aliasing Problem in Computer Generated Shaded Images", Comm. ACM, Vol. 20, No. 11, Nov. 1977
- [21] Dungan W., Stenger A. & Suttly G., "Texture Tile Consideration for Raster Graphics", Computer Graphics, Vol. 12, Summer 1978, p.130-134
- [22] Evans R.M., "The Perception of Color", John Wiley & Sons, N.Y., 1974, p.35
- [23] Giloi W.K., "Interactive Computer Graphics", Prentice-Hall Inc., N.J., 1978
- [24] Gouraud H., "Continuous Shading of Curved Surfaces", IEEE Trans. Computers, Vol. C-20, No. 6, June 1971, p.623-629
- [25] Gregory R.T. & Karney D.L., "A Collection of Matrices for Testing Computational Algorithms", Wiley, N.Y., 1969, p.48
- [26] Greville T.N., "Theory and Application of Spline Functions", Academic Press, N.Y., 1969
- [27] Harvey J.F., "Current Trends And Issues in Visual Simulation", Proc. SPIE, Vol. 162, Visual Simulation & Image Realism, 1978, p.1-5
- [28] Horn B.K. & Bachmann B.L., "Using Synthetic Images to Register Real Images with Surface Models", Comm. ACM, Vol. 21, No. 11, Nov. 1978, p.914-924
- [29] Hou H.S. & Andrew H.C., "Cubic Splines for Image Interpolation and Digital Filtering", IEEE Trans. Ac. Sp. Sig. Proc., Vol. ASSP-26, No. 6, Dec. 1978, p.508-517
- [30] Hügli H., "The Shading of True Relief Data", Proc. Int. Conf. on Digital Signal Processing, Florence (Italy), 1978, p.197-203
- [31] Hügli H., "Picture Display System", Aktenvermerk, Inst. Techn. Physik, ETH-Zürich, 1979
- [32] Hügli H., "Vom Geländemodell zum Geländebild: Die Synthese von Schattenbildern", Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, Jg. 77, Oktober 1979, S.245-249

- [33] Little W.D. & Heuft R., "An Area Shading Graphics Display System", IEEE Trans. Computer, Vol. C-28, No. 7, July 1979, p.528-531
- [34] Machover C., "Graphics Displays", IEEE Spectrum, August and October 1977, p.24-32 and 22-27
- [35] Middleton W.E.K. & Mungall A.G., "The Luminous Directional Reflectance of Snow", JOSA, Vol. 42, No. 8, 1952
- [36] Minnaert M., "Photometry of the Moon", in: The Solar System III: Planets and Satellites, Kniper G.P. & Middlehurt B.M., Chicago 1961
- [37] MOR, "Rimini", Studiengruppe für Operations Research, Zürich
- [38] Myers M., "Interactive Computer Graphics: Poised for Takeoff?", Computer, January 1978, p.60-74
- [39] Myers M., "Interactive Computer Graphics: Flying High", Computer, July and August 1979, p.8-17 and 52-66
- [40] Neighbors M.A. & Stuart C.E., "Raster Scan Computer Graphics", Digital Design, February 1978, p.40-50
- [41] Newman W.M & Sproull R.F., "Principles of Interactive Computer Graphics", Mc. Graw-Hill, First edition: 1973, Second edition: 1979
- [42] Okoshi T., "Three-Dimensional Imaging Techniques", Academic Press N.Y., 1976
- [43] Phong B.T., "Illumination for Computer Generated Pictures", Comm. ACM, Vol. 18, No. 6, June 1975, p.311-317
- [44] Schultze W., "Farbenlehre und Farbenmessung", Springer-Verlag, 1975, S.21
- [45] Sloan K.R. & Brown C.M., "Color Map Techniques", Computer Graphics and Image Processing, Vol. 10, 1979, p.297-317
- [46] Sutherland I.E. & Hodgman G.W., "Reentrant Polygon Clipping", Comm. ACM, Vol. 17, No. 1, Jan. 1974, p.32-42
- [47] Sutherland I.E., Sproull R.F. & Schumacker R.A., "A Characterization of Ten Hidden-Surface Algorithms", ACM Computing Survey, Vol. 6, No. 1, March 1974
- [48] Swallow R., "Computrol: A New Approach to Computer Generated Imagery", Proc. SPIE, Vol. 162, Visual Simulation & Image Realism, 1978
- [49] Torrance K.E. & Sparrow E.M., "Theory for Off-Specular Reflexion From Roughened Surfaces", JOSA, Vol. 57, No. 9, September 1967, p.1105-1114

- [50] Weiler K. & Atherton P., "Hidden Surface Removal Using Polygon Area Sorting", Computer Graphics, Vol. 11, Summer 1977, p.214-222
- [51] Williams L., "Casting Curved Shadows on Curved Surfaces", Computer Graphics, Vol. 12, Summer 1978, p.270-274
- [52] Yoeli P., "Analytische Schattierung", Kart. Nachrichten, Jg. 14, Nr. 4, 1965/b, S.142-148
- [53] "The Relation Between Perspective and Photographic Transform", Computer Graphics, Vol. 12, No. 4, Dec. 1978
- [54] "Digitalisation altimétrique du relief: Etude test de Grindelwald", rapport, Inst. de géophysique, Univ. de Lausanne