

N° d'ordre : 1225

50376  
1984  
304

50376  
1984  
304

# THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE

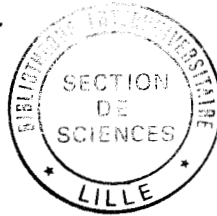
pour obtenir le titre de

**DOCTEUR DE 3ème CYCLE**

**INFORMATIQUE**

par

**Richard OLEJNIK**



**SYNTHESE INTERACTIVE DE TEXTURES**

Thèse soutenue le 23 novembre 1984 devant la Commission d'Examen

Membres du Jury :

Président  
Rapporteur  
Examineurs

M. LATTEUX  
V. CORDONNIER  
M. MERIAUX  
R. DAUL  
F. SCHMIDT



P R O F E S S E U R S   C L A S S E   E X C E P T I O N N E L L E

---

|                       |               |
|-----------------------|---------------|
| M. CONSTANT Eugène    | I.E.E.A.      |
| M. FOURET René        | Physique      |
| M. GABILLARD Robert   | I.E.E.A.      |
| M. MONTREUIL Jean     | Biologie      |
| M. PARREAU Michel     | Mathématiques |
| M. TRIDOT Gabriel     | Chimie        |
| M. VIVIER Emile       | Biologie      |
| M. WERTHEIMER Raymond | Physique      |

P R O F E S S E U R S l è r e   c l a s s e

---

|                                |                      |
|--------------------------------|----------------------|
| M. BACCHUS Pierre              | Mathématiques        |
| M. BEAUFILS Jean-Pierre (dét.) | Chimie               |
| M. BIAYS Pierre                | G.A.S.               |
| M. BILLARD Jean (dét.)         | Physique             |
| M. BOILLY Bénoni               | Biologie             |
| M. BOIS Pierre                 | Mathématiques        |
| M. BONNELLE Jean-Pierre        | Chimie               |
| M. BOUGHON Pierre              | Mathématiques        |
| M. BOURIQUET Robert            | Biologie             |
| M. BREZINSKI Claude            | I.E.E.A.             |
| M. CELET Paul                  | Sciences de la Terre |
| M. CHAMLEY Hervé               | Biologie             |
| M. COEURE Gérard               | Mathématiques        |
| M. CORDONNIER Vincent          | I.E.E.A.             |
| M. DEBOURSE Jean-Pierre        | S.E.S.               |
| M. DYMENT Arthur               | Mathématiques        |

PROFESSEURS lère classe (suite)

|                                     |                      |
|-------------------------------------|----------------------|
| M. ESCAIG Bertrand                  | Physique             |
| M. FAURE Robert                     | Mathématiques        |
| M. FOCT Jacques                     | Chimie               |
| M. GRANELLE Jean-Jacques            | S.E.S.               |
| M. GRUSON Laurent                   | Mathématiques        |
| M. GUILLAUME Jean                   | Biologie             |
| M. HECTOR Joseph                    | Mathématiques        |
| M. LABLACHE COMBIER Alain           | Chimie               |
| M. LACOSTE Louis                    | Biologie             |
| M. LAVEINE Jean Pierre              | Sciences de la Terre |
| M. LEHMANN Daniel                   | Mathématiques        |
| Mme LENOBLE Jacqueline              | Physique             |
| M. LHOMME Jean                      | Chimie               |
| M. LOMBARD Jacques                  | S.E.S.               |
| M. LOUCHEUX Claude                  | Chimie               |
| M. LUCQUIN Michel                   | Chimie               |
| M. MIGEON Michel Recteur à Grenoble | E.U.D.I.L.           |
| M. MIGNOT Fulbert (dét.)            | Mathématiques        |
| M. PAQUET Jacques                   | Sciences de la Terre |
| M. PROUVOST Jean                    | Sciences de la Terre |
| M. ROUSSEAU Jean-Paul               | Biologie             |
| M. SALMER Georges                   | I.E.E.A.             |
| M. SEGUIER Guy                      | I.E.E.A.             |
| M. SIMON Michel                     | S.E.S.               |
| M. STANKIEWICZ François             | S.E.S.               |
| M. TILLIEU Jacques                  | Physique             |
| M. VIDAL Pierre                     | I.E.E.A.             |
| M. ZEYTOUNIAN Radyadour             | Mathématiques        |

|                               |                        |
|-------------------------------|------------------------|
| M. ANTOINE Philippe           | Mathématiques (Calais) |
| M. BART André                 | Biologie               |
| Mme BATTIAU Yvonne            | Géographie             |
| M. BEGUIN Paul                | Mathématiques          |
| M. BELLET Jean                | Physique               |
| M. BERZIN Robert              | Mathématiques          |
| M. BKOUCHE Rudolphe           | Mathématiques          |
| M. BODARD Marcel              | Biologie               |
| M. BOSQ Denis                 | Mathématiques          |
| M. BRASSELET Jean-Paul        | Mathématiques          |
| M. BRUYELLE Pierre            | Géographie             |
| M. CAPURON Alfred             | Biologie               |
| M. CARREZ Christian           | I.E.E.A.               |
| M. CAYATTE Jean-Louis         | S.E.S.                 |
| M. CHAPOTON Alain             | C.U.E.E.P.             |
| M. COQUERY Jean-Marie         | Biologie               |
| Mme CORSIN Paule              | Sciences de la Terre   |
| M. CORTOIS Jean               | Physique               |
| M. COUTURIER Daniel           | Chimie                 |
| M. CROSNIER Yves              | I.E.E.A.               |
| M. CURGY Jean-Jacques         | Biologie               |
| Mle DACHARRY Monique          | Géographie             |
| M. DAUCHET Max                | I.E.E.A.               |
| M. DEBRABANT Pierre           | E.U.D.I.L.             |
| M. DEGAUQUE Pierre            | I.E.E.A.               |
| M. DELORME Pierre             | Biologie               |
| M. DELORME Robert             | S.E.S.                 |
| M. DE MASSON D'AUTUME Antoine | S.E.S.                 |
| M. DEMUNTER Paul              | C.U.E.E.P.             |

PROFESSEURS 2ème classe (Suite 1)

|                            |                        |
|----------------------------|------------------------|
| M. DENEL Jacques           | I.E.E.A.               |
| M. DE PARIS Jean-Claude    | Mathématiques (Calais) |
| Mlle DESSAUX Odile         | Chimie                 |
| M. DEVRAINNE Pierre        | Chimie                 |
| M. DHAINAUT André          | Biologie               |
| Mme DHAINAUT Nicole        | Biologie               |
| M. DORMARD Serge           | S.E.S.                 |
| M. DOUKHAN Jean-Claude     | E.U.D.I.L.             |
| M. DUBOIS Henri            | Physique               |
| M. DUBRULLE Alain          | Physique (Calais)      |
| M. DUBUS Jean-Paul         | I.E.E.A.               |
| M. FAKIR Sabah             | Mathématiques          |
| M. FONTAINE Hubert         | Physique               |
| M. FOUQUART Yves           | Physique               |
| M. FRONTIER Serge          | Biologie               |
| M. GAMBLIN André           | G.A.S.                 |
| M. GLORIEUX Pierre         | Physique               |
| M. GOBLOT Rémi             | Mathématiques          |
| M. GOSSELIN Gabriel (dét.) | S.E.S.                 |
| M. GOUDMAND Pierre         | Chimie                 |
| M. GREGORY Pierre          | I.P.A.                 |
| M. GREMY Jean-Paul         | S.E.S.                 |
| M. GREVET Patrice          | S.E.S.                 |
| M. GUILBAULT Pierre        | Biologie               |
| M. HENRY Jean-Pierre       | E.U.D.I.L.             |
| M. HERMAN Maurice          | Physique               |
| M. JACOB Gérard            | I.E.E.A.               |
| M. JACOB Pierre            | Mathématiques          |
| M. JEAN Raymond            | Biologie               |
| M. JOFFRE Patrick          | I.P.A.                 |

PROFESSEURS 2ème classe (suite 2)

|                         |                        |
|-------------------------|------------------------|
| M. JOURNAL Gérard       | E.U.D.I.L.             |
| M. KREMBEL Jean         | Biologie               |
| M. LANGRAND Claude      | Mathématiques          |
| M. LATTEUX Michel       | I.E.E.A.               |
| Mme LECLERCQ Ginette    | Chimie                 |
| M. LEFEVRE Christian    | Sciences de la Terre   |
| Mle LEGRAND Denise      | Mathématiques          |
| Mle LEGRAND Solange     | Mathématiques (Calais) |
| Mme LEHMANN Josiane     | Mathématiques          |
| M. LEMAIRE Jean         | Physique               |
| M. LHENAFF René         | Géographie             |
| M. LOCQUENEUX Robert    | Physique               |
| M. LOSFELD Joseph       | C.U.E.E.P.             |
| M. LOUAGE Francis(dét.) | E.U.D.I.L.             |
| M. MACKE Bruno          | Physique               |
| M. MAIZIERES Christian  | I.E.E.A.               |
| M. MESSELYN Jean        | Physique               |
| M. MESSERLIN Patrick    | S.E.S.                 |
| M. MONTEL Marc          | Physique               |
| Mme MOUNIER Yvonne      | Biologie               |
| M. PARSY Fernand        | Mathématiques          |
| Mle PAUPARDIN Colette   | Biologie               |
| M. PERROT Pierre        | Chimie                 |
| M. PERTUZON Emile       | Biologie               |
| M. PONSOLLE Louis       | Chimie                 |
| M. PORCHET Maurice      | Biologie               |
| M. POVY Lucien          | E.U.D.I.L.             |
| M. RACZY Ladislas       | I.E.E.A.               |
| M. RAOULT Jean François | Sciences de la Terre   |
| M. RICHARD Alain        | Biologie               |

PROFESSEURS 2ème Classe (suite 3)

|                              |                      |
|------------------------------|----------------------|
| M. RIETSCH François          | E.U.D.I.L.           |
| M. ROBINET Jean-Claude       | E.U.D.I.L.           |
| M. ROGALSKI Marc             | Mathématiques        |
| M. ROY Jean-Claude           | Biologie             |
| M. SCHAMPS Joël              | Physique             |
| Mme SCHWARZBACH Yvette       | Mathématiques        |
| M. SLIWA Henri               | Chimie               |
| M. SOMME Jean                | G.A.S.               |
| Mle SPIK Geneviève           | Biologie             |
| M. STAROSWIECKI Marcel       | E.U.D.I.L.           |
| M. STERBOUL François         | E.U.D.I.L.           |
| M. TAILLIEZ Roger            | Institut Agricole    |
| Mme TJOTTA Jacqueline (dét.) | Mathématiques        |
| M. TOULOTTE Jean-Marc        | I.E.E.A.             |
| M. TURRELL Georges           | Chimie               |
| M. VANDORPE Bernard          | E.U.D.I.L.           |
| M. VAST Pierre               | Chimie               |
| M. VERBERT André             | Biologie             |
| M. VERNET Philippe           | Biologie             |
| M. WALLART Francis           | Chimie               |
| M. WARTEL Michel             | Chimie               |
| M. WATERLOT Michel           | Sciences de la Terre |
| Mme ZINN JUSTIN Nicole       | Mathématiques        |

CHARGES DE COURS

M. ADAM Michel S.E.S.

CHARGES DE CONFERENCES

M. BAFCOP Joël I.P.A.

M. DUVEAU Jacques S.E.S.

M. HOFACK Jean I.P.A.

M. LATOUCHE Serge S.E.S.

M. MALAUSSENA DE PERNO Jean-Louis S.E.S.

M. NAVARRE Christian I.P.A.

M. OPIGEZ Philippe S.E.S.



## R E M E R C I E M E N T S

Je tiens à exprimer à Monsieur M. LATTEUX, Professeur à l'Université de LILLE I, l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider ce jury.

Monsieur V. CORDONNIER, Professeur à l'Université de LILLE I, trouvera ici l'expression de ma gratitude pour avoir dirigé cette thèse et m'avoir prodigué ses encouragements et ses critiques.

Je remercie très chaleureusement Monsieur R. DAUL, Directeur des Etudes à l'E.N.S.T.I.M.D., qui a permis la réalisation de ce travail en m'admettant au sein de son équipe et qui maintenant participe à ce jury de thèse.

Je remercie particulièrement M. M. MERIAUX, chargé de la Recherche au C.N.R.S., qui a su avec une gentillesse constante, m'apporter l'aide de sa compétence tout au long de nos nombreuses discussions qui ont accompagné l'élaboration de cette thèse.

C'est avec le plus grand respect, pour la valeur de ses travaux qui ont largement marqué cette thèse, que je tiens à remercier M. F. SCHMITT, Maître-Assistant à l'E.N.S.T., pour son aimable collaboration.

Je n'oublierai pas l'ensemble des collègues de laboratoire et notamment les membres de l'équipe graphique. Je les remercie tous de leur amitié et de leur soutien.

Madame S. HUSSEMANN a dactylographié ce document avec soin et minutie et Monsieur H. GLANC a tout aussi consciencieusement assuré son impression, je les en remercie vivement.

Je remercie également toutes les personnes que je n'aurai pas nommées ici, bien qu'elles me soient chères et qui ont contribué, de près ou de loin, à l'accomplissement de cette thèse.

A mes parents,

A ma femme et ma fille

A mes frères et sœurs, leurs époux  
et enfants,

A mes proches et amis.

## TABLE DES MATIERES

### 0. INTRODUCTION

### 1. ASPECTS VISUELS DES TEXTURES

|  |    |
|--|----|
| 1.1 - Introduction .....                       | 5  |
| 1.2 - Perception visuelle des textures .....   | 6  |
| 1.2.1 - Influence du système visuel .....      | 7  |
| 1.2.2 - Mécanisme de la perception .....       | 10 |
| 1.2.3 - Textures et signaux .....              | 12 |
| 1.2.4 - Définition visuelle des textures ..... | 14 |
| 1.3 - Textures technologiques .....            | 15 |
| 1.4 - Discrimination des textures .....        | 19 |
| 1.5 - Attributs simples de textures .....      | 22 |
| 1.5.1 - Granularité et notion de tache .....   | 23 |
| 1.5.2 - Contraste .....                        | 26 |
| 1.5.3 - Rugosité .....                         | 26 |
| 1.5.4 - Régularité .....                       | 27 |
| 1.5.5 - Directivité (isotropie) .....          | 28 |
| 1.5.6 - Forme .....                            | 28 |
| 1.6 - Conclusion .....                         | 29 |

## 2. ASPECTS ANALYTIQUES DES TEXTURES

|  |    |
|--|----|
| 2.1 - Introduction .....                           | 31 |
| 2.2 - Définition analytique d'une texture .....    | 32 |
| 2.2.1 - Primitives de texture .....                | 33 |
| 2.2.2 - Relations spatiales entre primitives ..... | 33 |
| 2.3 - Modèles de synthèse .....                    | 35 |
| 2.3.1 - Modèles basés sur le pixel .....           | 36 |
| a) Modèles monodimensionnels .....                 | 36 |
| b) Modèles de champs aléatoires .....              | 38 |
| 2.3.2 - Modèles basés sur les régions .....        | 44 |
| a) Modèles syntaxiques .....                       | 45 |
| b) Modèles de morphologie mathématique .....       | 48 |
| c) Modèles de mosaïques .....                      | 49 |
| 2.4 - Conclusion .....                             | 53 |

## 3. METHODES INTERACTIVES DE SYNTHESE DE TEXTURES

|   |    |
|---|----|
| 3.1 - Introduction .....                        | 54 |
| 3.2 - Systèmes interactifs .....                | 55 |
| 3.2.1 - Définition de l'interactivité .....     | 55 |
| 3.2.2 - Application au cas des textures .....   | 56 |
| 3.3 - Acquisition des objets de base .....      | 57 |
| 3.3.1 - Cadre de l'acquisition .....            | 57 |
| 3.3.2 - Répartition prédéfinie .....            | 59 |
| 3.3.3 - Répartition manuelle .....              | 60 |
| a) Acquisition des textures à base de grains .. | 60 |
| b) Acquisition des textures à base de taches .. | 64 |
| 3.4 - Opérations sur les objets de base .....   | 67 |
| 3.4.1 - Extraction d'une région .....           | 67 |
| 3.4.1 - Opérateurs locaux .....                 | 69 |
| 3.4.2 - Opérateurs globaux .....                | 81 |
| 3.5 - Conclusion .....                          | 83 |

## 4. UN PROCESSUS DE GENERATION AUTOMATIQUE D'UNE TEXTURE DE BASE

|  |     |
|--|-----|
| 4.1 - Introduction .....                               | 84  |
| 4.2 - Définition d'une DPJ .....                       | 85  |
| 4.3 - Présentation de la méthode de synthèse .....     | 87  |
| 4.3.1 - Notation .....                                 | 87  |
| 4.3.2 - Principe .....                                 | 87  |
| 4.4 - Méthode de génération .....                      | 88  |
| 4.4.1 - Exemple simple .....                           | 89  |
| a) Génération des lignes du bas .....                  | 89  |
| b) Définition de la chaîne horizontale de Markov ..... | 90  |
| c) Génération des autres lignes .....                  | 94  |
| 4.4.2 - Cas général .....                              | 99  |
| a) Génération des v premières lignes .....             | 99  |
| b) Génération des autres lignes .....                  | 101 |
| 4.5 - Extension de la méthode .....                    | 104 |
| 4.6 - Conclusion .....                                 | 107 |

## 5. CONSTRUCTION D'UN SYSTEME INTERACTIF DE SYNTHESE DE TEXTURES - EXPERIMENTATION

|   |     |
|---|-----|
| 5.1 - Introduction .....                          | 108 |
| 5.2 - Acquisition des éléments de la DPJ .....    | 110 |
| 5.2.1 - Acquisition automatique .....             | 110 |
| a) Choix de l'échelle de niveaux de gris .....    | 111 |
| b) Conditions de prises de vues .....             | 112 |
| 5.2.2 - Acquisition manuelle .....                | 113 |
| 5.3 - Modifications interactives .....            | 118 |
| 5.3.1 - Manipulations du grain .....              | 116 |
| 5.3.2 - Manipulation de la densité du grain ..... | 121 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.4 - Système de synthèse interactive de textures ..... | 123 |
| 5.4.1 - Schéma interactif .....                         | 123 |
| 5.4.2 - Description du système .....                    | 126 |
| 5.5 - Conclusion .....                                  | 129 |
| <br>  |     |
| CONCLUSION .....  | 130 |
| <br>  |     |
| BIBLIOGRAPHIE .....                                     | 132 |
| <br>  |     |
| ANNEXE 1 .....  | 142 |
| <br>  |     |
| ANNEXE 2 .....  | 149 |

## I N T R O D U C T I O N

L'évolution technologique de ces dernières années est fortement marquée par une formidable augmentation de la quantité d'images produites et consommées. Un contenu sémantique à la fois très riche et très souple explique cet avènement de l'image et l'intérêt sans cesse croissant qui lui est témoigné. L'homme peut saisir en un seul coup d'oeil les dispositions relatives entre les composantes d'une image et les interpréter, d'où l'adage bien connu qu'"une image vaut mille mots" (Descartes).

Emboitant le pas à la photographie et au cinéma, l'informatique graphique participe aujourd'hui à une large diffusion de l'image. Cette technique diffère pourtant des deux précédentes, en ce sens que l'utilisateur est de plus en plus étroitement associé à l'élaboration d'une image née dans son esprit. Alors qu'il y a une décennie à peine, seuls quelques scientifiques privilégiés bénéficiaient des techniques de l'infographie, les prodigieux progrès des systèmes informatiques permettent actuellement à quiconque, artiste ou pas, de créer des images par ordinateur.

Dans de nombreuses applications, les images informatiques doivent apporter le maximum de fidélité sémantique évaluée en termes de perception réaliste par l'observateur. Il est donc important que l'ensemble des caractéristiques d'une image synthétique lui donne un caractère jugé réaliste, voisin dans certains cas de celui d'une image naturelle. Les grandes étapes de progression ont successivement concerné le dessin au trait d'objets bi-dimensionnels, puis tri-dimensionnels. Les techniques d'élimination des parties cachées ont contribué à lever, dans le second cas, bien des ambiguïtés de perception en restituant

l'impression de volume. La prise en compte des phénomènes d'éclairement, d'ombres portées et d'ombrage ont ensuite donné une nouvelle dimension à ces images. Elles comportent cependant, encore des défauts d'aspects et de qualité qui les rendent assez différentes des images naturelles.

Les surfaces des objets naturels possèdent des aspects très divers qui ne sont pas forcément lisses. Nous pouvons ainsi observer des surfaces qui possèdent des motifs tantôt périodiques (textures structurées), tantôt à variations spatiales plutôt désordonnées (textures aléatoires). La complexité de ces détails rend difficile leurs incorporations dans les images synthétiques.

Il existe bien des images spectaculaires publiées dans la littérature qui incorporent des textures. Une étude approfondie révèle toutefois, qu'il s'agit dans la plupart de ces cas, d'une solution ponctuelle, adaptée au cas particulier de l'image présentée et qu'aucun concept généralisable ne s'en dégage. De cette constatation est née notre idée de fabriquer interactivement des textures. Nous avons ainsi étudié et expérimenté un certain nombre d'outils permettant de construire, étape par étape, des textures qui pourront être intégrées dans des images plus complexes.

Cet ouvrage, dans sa première partie, présente les principaux aspects visuels des textures. Il montre notamment la manière dont le système visuel humain les perçoit et les discrimine. Ce qui permet alors d'en donner une définition visuelle. Il décrit enfin, quelques unes de leurs caractéristiques sucepti-

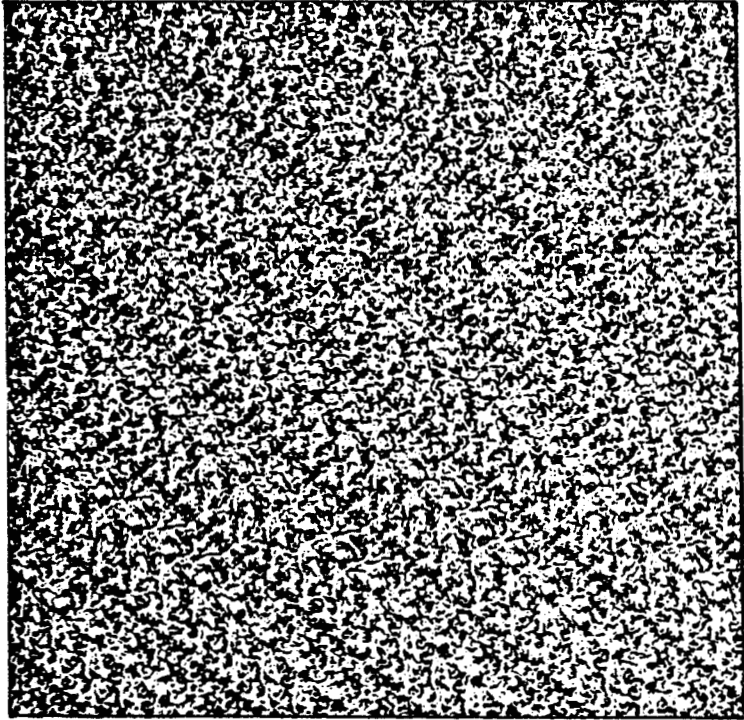


bles d'être appréhendées par un système interactif de synthèse.

Le second chapitre concerne des aspects plus analytiques. Il fournit une définition analytique des textures, puis présente différentes méthodes de synthèse et de modélisation de textures. Celles-ci sont regroupées en deux classes : structurale et stochastique. Ce chapitre fait référence à des notions que l'on pourra trouver dans beaucoup d'ouvrages traitant de statistiques et de mathématiques.

Le troisième chapitre définit différentes méthodes d'interaction permettant de synthétiser des textures. On trouvera en particulier deux manières de faire l'acquisition d'une texture (manuelle ou automatique). Dans les deux cas, les textures pourront être fabriquées à partir de grains ou de taches et constitueront les objets de base. Des opérateurs décrits ensuite, permettront de manipuler ces objets.

Le quatrième chapitre donne pour exemple une méthode d'acquisition automatique de textures. Cette méthode est basée sur un processus markovien bidimensionnel qui contrôle dans un voisinage rectangulaire de dimensions quelconques, les probabilités locales des textures aléatoires. Le dernier chapitre décrit l'intégration de celle-ci dans un système général de synthèse interactive. Il expose également les différents problèmes rencontrés ainsi que les solutions proposées pour y remédier.



## CHAPITRE 1

### ASPECTS VISUELS DES TEXTURES

#### 1.1 - INTRODUCTION

La perception des textures constitue un acte fondamental du fonctionnement visuel de l'homme. Des objets possédant des formes et des caractéristiques similaires ne peuvent quelquefois être distingués que par leurs textures. Il suffit pour s'en convaincre de considérer l'étroite association que nous établissons entre un objet et son aspect visuel. Ainsi, si nous voyons des fibres et des noeuds, nous reconnaissons du bois, de même pour des veines et du marbre. Nous pouvons de cette façon trouver bon nombre d'exemples, puisque nous sommes plongés dans un monde où les textures abondent. La texture se révèle, par conséquent, comme une propriété intrinsèque de toute surface.

Cependant, bien qu'il nous soit aisé de reconnaître des textures, et de les décrire en termes empiriques, il nous est extrêmement difficile d'en donner des définitions précises. On ne connaît, en effet, pas précisément l'information que l'oeil perçoit, quand celui-ci balaye une image. De ce fait, il existe très peu de définitions scientifiques des textures dans la littérature. L'accent est surtout mis sur l'importance des textures dans la perception visuelle.

Ainsi, Metzger [Met 66] en précurseur, soulignait en 1930, que les textures s'avéraient nécessaires pour la détection de surfaces. Gibson [Gib 66] montra

par la suite, qu'elles intervenaient dans la perception de la profondeur, de manière plus ou moins évidente. Seulement, toutes ces considérations se basent sur des études empiriques. Muerle [Mue 70] constatait cette absence de définition vraiment universelle en disant :

"Visual texture is a property of pattern scenes which has escaped precise definition so far. Part of the problem is that a very precise definition has not yet been required."

En 1979, R.M. Haralick [Har 79] adhère encore à l'idée de Muerle lorsqu'il reconnaît que, malgré son importance et son ubiquité, une approche formelle et une définition précise des textures n'existent pas.

Il est donc clair qu'il sera difficile de trouver une définition des textures qui serait à la fois simple et qui incorporerait toutes les caractéristiques importantes qui déterminent leurs aspects très variés. Pour pouvoir néanmoins donner une définition visuelle des textures, nous nous sommes intéressés en premier lieu à la manière dont l'œil percevait et discriminait des textures.

## 1.2 - PERCEPTION VISUELLE DES TEXTURES

Les textures synthétiques que l'on peut générer n'ont pas forcément d'antécédents physiques. Aussi, pour être acceptées et interprétées par le cerveau, il est impératif qu'elles respectent un certain nombre de contraintes psycho-visuelles. Il est de ce fait important de connaître la manière dont fonctionne le système visuel humain, ce qu'il peut percevoir mais aussi ce qu'il ne peut pas percevoir et enfin comment il le perçoit.

### 1.2.1 - Influence du système visuel

Le rôle du système visuel humain est de transformer l'information visuelle qu'il reçoit pour que le cerveau puisse l'interpréter. Quatre organes participent à ce traitement. Il s'agit de l'oeil, de la rétine, des corps genouillés et du cortex. Ils communiquent par l'intermédiaire du système nerveux et ont chacun une influence sur la perception.

#### a) L'oeil

-----

L'oeil est le récepteur des signaux lumineux. Il les focalise pour en former une image sur la couche photosensible : la rétine. L'image est analysée et le message est transmis au cerveau par l'intermédiaire du nerf optique et des voies intracrâniennes.

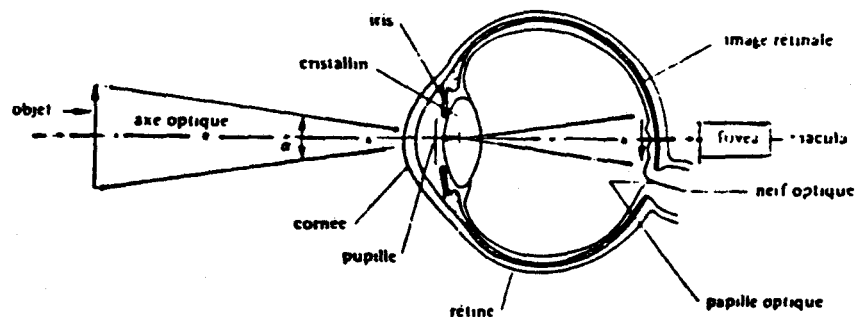


Fig. 1.1 : coupe transversale de l'oeil

La pupille peut être comparée au diaphragme d'un appareil photographique. Le cristallin est une sorte de lentille qui focalise l'image sur la rétine. N'étant pas parfait, ce dernier donne lieu à une aberration sphérique : le point focal n'est pas ponctuel. De ce fait, l'image d'un point n'est pas un point, mais un petit cercle flou.

#### b) La rétine

-----

La rétine transforme la lumière qu'elle reçoit en signaux électriques. Elle est formée de cinq types de cellules différentes, ordonnées en couches (cf. fig. 1.2). La première couche est celle des photorécepteurs : les cônes et les bâtonnets. La lumière incidente est transformée en un signal électrique, selon une loi non linéaire. Ce signal est transmis par l'intermédiaire de liaisons séries aux cellules bi-polaires, puis aux cellules ganglionnaires. En même temps, des liaisons parallèles relient les cellules horizontales avec les photorécepteurs et les cellules amacrines avec les cellules bi-polaires. Ces liaisons permettent aux cellules horizontales et amacrines d'agir sur leurs vis-à-vis. Elles sont à l'origine d'une réaction spatiale appelée inhibition latérale. Il s'agit du phénomène suivant. Si un photorécepteur est excité par de la lumière, il inhibe l'activité de ses voisins immédiats. En fait, ce phénomène se passe au niveau des cellules ganglionnaires. Ainsi, l'activité d'une cellule ne dépend pas uniquement de l'information qu'elle reçoit, mais également de celle reçue par ses voisines.

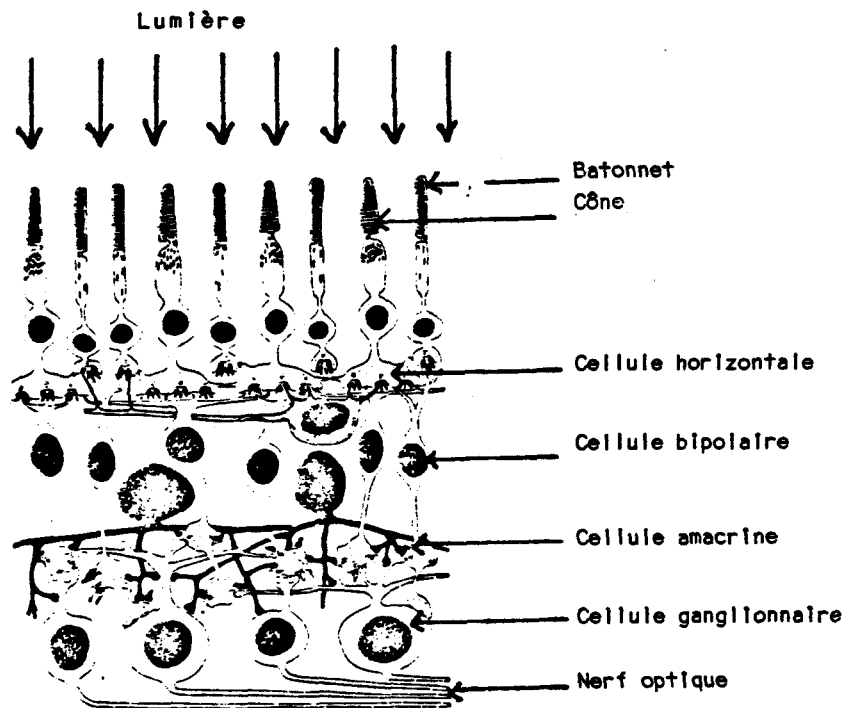


Fig. 1.2 : coupe transversale de la rétine



### c) Les corps genouillés

Les corps genouillés latéraux sont deux stations relais sur le chemin optique. Le corps genouillé gauche traite exclusivement l'information provenant du champ visuel droit. De même, le corps genouillé droit traite celle du champ gauche.

#### d) Le cortex

-----  
Placé à l'arrière du cerveau, le cortex visuel est également constitué par plusieurs couches de neurones.

Une première hiérarchie est liée à la complexité du traitement effectué par les neurones. Ceux-ci sont classés en simples, complexes, hypercomplexes et hypercomplexes d'ordre élevé. Les cellules simples sont sensibles à la position et l'orientation du stimuli. Elles détectent les lignes et les contours en un endroit donné. Les cellules complexes sont également sensibles à l'orientation. En revanche, elles ne sont pas sensibles à la position du stimuli. Elles signalent l'orientation en faisant abstraction de la position. Les cellules hypercomplexes sont sensibles non seulement à une orientation spécifique, mais en plus à une discontinuité comme la fin d'une ligne, un angle ou un coin.

La seconde hiérarchie est liée à la dominance oculaire. Elle est constituée par une alternance de colonnes ; chaque colonne contient des cellules qui traitent l'information provenant du même oeil.

La troisième hiérarchie regroupe également des colonnes de cellules mais qui, elles, sont affectées à des orientations données du stimuli.

#### 1.2.2 - Mécanisme de la perception

La constitution physique du système visuel humain que nous ve-



nons de décrire, montre qu'il n'enregistre que les informations émises par les limites. Ce fonctionnement permet notamment de minimiser les échanges entre l'oeil et le cerveau. On peut, en conséquence, voir dans toute image l'existence de deux types d'informations bien distinctes.

Il existe d'abord une information sur les contours. Les contours sont usuellement définis comme des variations brusques de niveaux de gris. Ces contours définissent des portions de surfaces. L'état de chacune d'entre elles constitue le second type d'information. L'état d'une surface peut-être soit ombragée, soit texturée.

Dans le premier cas, la surface est constituée par des motifs ou des points de coloration sensiblement voisines. De ce fait, l'oeil a énormément de mal pour distinguer ces motifs. Ils donnent alors l'illusion d'une couleur continue ou dégradée. Nous dirons alors que la surface est ombragée [01e 82].

Par contre, si les différences de ton s'accroissent ou si la taille des motifs augmente notablement, nous percevons alors ce que l'on appelle une texture.

La frontière entre ces deux phénomènes (ombrage et texture) n'est toujours pas évidente. Nous pouvons, toutefois, affirmer qu'ils sont toujours présents dans une surface et que seul l'un d'entre eux prédomine.

La différence entre les perceptions de l'ombrage et de la texture repose, comme nous l'avons déjà souligné, sur le fait que le cortex ne perçoit que les variations d'énergie lumineuse. Ces varia-

tions ne sont présentes que lorsqu'une limite est franchie. Dans le cas d'une surface ombragée, les variations extrêmement faibles ne seront pas perceptibles, alors que plus importantes dans le cas des textures, elles seront immédiatement détectées.

Dans le monde réel, il existe deux catégories essentielles de changement qui peuvent produire des gradients de stimulation sur la rétine : le changement de réflectance d'une surface (donc, en particulier du niveau de gris) et le changement d'éclairage. Chacun de ces types de changements est capable de produire à lui seul, sur la rétine un motif de stimulation complexe. D'une grande surface de papier peint, placé sous un éclairage homogène, la rétine reçoit un motif qui n'est produit que par les changements de réflectances de cette surface. Au contraire, devant les draps froissés d'un lit défait ou un paysage de neige, la rétine reçoit un motif de stimulation uniquement dû aux changements d'éclairage. Normalement, ces deux types de changements interviennent simultanément. Tout se passe comme si l'on superposait sur la rétine deux motifs séparés. Cependant, que ce soit un changement de réflectance ou d'éclairage, nous considérons que nous sommes en présence d'une texture.

### 1.2.3 - Textures et signaux

L'information visuelle provenant du monde réel ou d'une image synthétique peut-être considérée comme un signal contenant des renseignements aussi bien qualitatif que quantitatif. Sans être en contradiction avec le mode de perception visuelle, décrit précédemment, il est possible de décomposer ce signal en deux composantes additives, bien différenciées par la nature de l'information qu'elles contiennent. Ces deux composantes sont la composante dite par plateau  $I_p$  et la composante de texture  $I_T$ . On a donc la relation fondamentale :

$$I = I_p + I_T$$

Cette interprétation du signal d'image n'est pas nouvelle. Elle a déjà été mise en oeuvre dans les domaines du codage et de la restauration d'images [Bar 82], et aussi dans celui de la synthèse [Tor 83].

La nature d'un signal d'image dépend du type d'image qu'elle représente. Ainsi, dans une image monochrome, le signal est un scalaire qui peut être représenté par la luminance (intensité). Dans le cas d'une image polychrome, le signal est cette fois un vecteur que l'on peut exprimer dans un repère couleur tel celui de la Teinte, Intensité, Saturation. Dans ces conditions, on peut caractériser les deux composantes additives. La composante par plateau  $I_p$  supportera l'information d'intensité moyenne locale du signal  $I$  et de sauts de valeurs moyennes (contours) dans l'image. Cette composante fournira également des informations sur la teinte et la saturation. Elle délimite ainsi des contours tout en définissant leurs colorations.

La composante de texture  $I_T$  sera associée aux variations du signal autour de sa valeur moyenne locale. Elle supportera l'information d'intensité et d'elle dépendra la qualité des caractéristiques visuelles des surfaces.

Cette décomposition particulière du signal permet de ne considérer que le cas de synthèse de textures monochromes ; celles-ci donnant ensuite naissance à des textures colorées par superposition avec des régions de couleurs données. Il faut toutefois, nuancer cette démarche. Elle n'est normalement valable que si couleurs et éléments de la texture sont séparables et composables linéairement. Cette restriction n'est toutefois pas gênante outre mesure dans notre cas.

Il est en effet possible de considérer toute surface colorée comme une mosaïque de sous-régions qui possède une coloration uniforme sur toutes ses surfaces.

#### 1.2.4 - Définition visuelle des textures

L'ensemble des caractéristiques de répartition spatiale des luminances d'un ensemble de points qui appartiennent à une zone connexe de l'image est appelé texture. La distribution caractérise, par conséquent, la nature de la texture qu'elle représente.

Une primitive de textures (ou texel) peut alors être définie comme des motifs possédant des propriétés invariantes qui se répètent dans différentes positions, déformations et orientations à l'intérieur d'une région déterminée.

C'est ainsi que l'observation d'une texture laisse la même impression visuelle quelle que soit la partie observée. La taille minimale d'une fenêtre laissant invariantes des mesures (convenablement choisies) de texture s'appelle la résolution de la texture.

Les éléments rapportés au cours des deux derniers paragraphes nous autorisent à donner la définition suivante d'une texture colorée :

Une texture colorée résulte de la superposition d'une distribution spatiale de niveaux de gris et d'une distribution de plages colorées.

### 1.3 - TEXTURES TECHNOLOGIQUES

Deux techniques importantes permettent de fixer et de reproduire des scènes naturelles et donc par conséquent les textures qu'elles contiennent. Il s'agit de la photographie et de la télévision.

Une photographie est une représentation analogique d'une vue. L'information est enregistrée sous forme de gradations continues de gris ou de couleurs sur la surface bi-dimensionnelle d'un film. Certaines photographies comme les photographies de la Terre prises par les satellites Landsat sont enregistrées numériquement et de ce fait constituent des cas particuliers. Les amateurs et spécialistes des techniques photographiques sont très friands de textures, qui sont synonymes de prises de vue originales. Comme le montrent les illustrations de la figure 13, beaucoup de textures photographiques sont obtenues grâce à des macrophotographies ou à des vues d'ensemble (vue d'avion).

Dans le cas de la télévision, les images sont saisies puis reproduites à l'aide d'un ensemble de lignes de balayage horizontal. Les variations d'intensité lumineuse le long de chaque ligne sont émises sous la forme d'un signal électrique continu. Une image normale de télévision est donc partiellement quantifiée : l'image naturelle est transformée en information discrète selon une dimension, mais pas l'autre. Pour fabriquer une image synthétique à l'aide d'un ordinateur, il faut décomposer chacune des lignes de balayage horizontal, en un ensemble de valeurs discrètes.

De cette façon, la surface de l'image est représentée par un ensemble ordonné d'éléments-images que l'on appelle pels (pel signifie point élémentaire, en anglais : pixel).

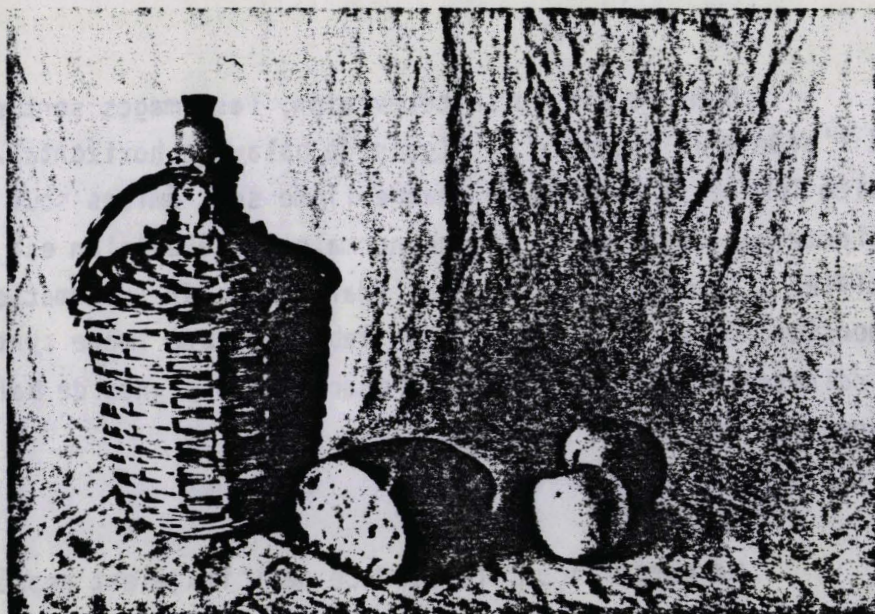
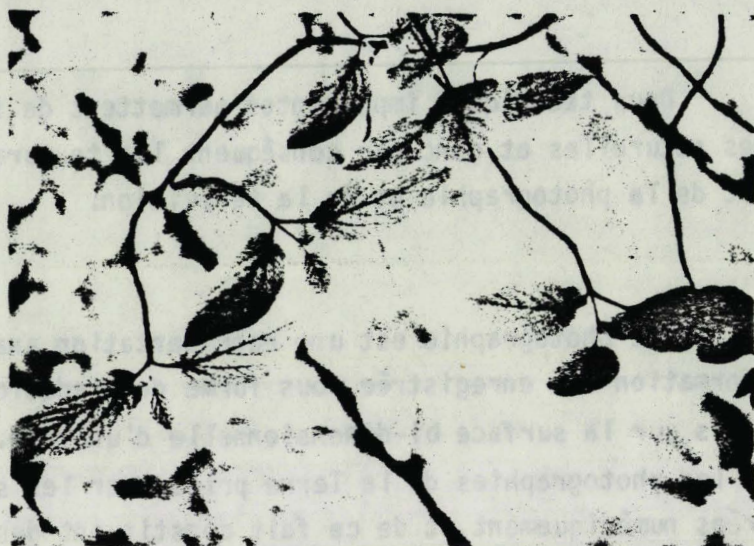
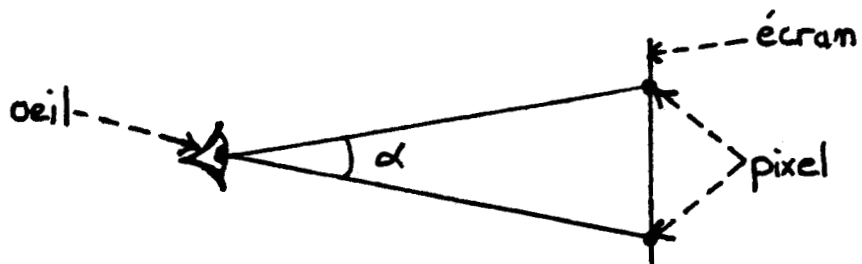
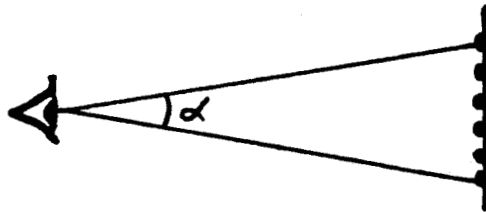


Fig. 1.3 : Textures photographiques.

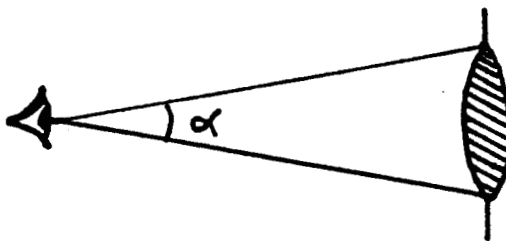
Il s'avère donc que ces deux techniques forment des images à l'aide de matrices de points. Cette discrétisation d'une image peut engendrer des problèmes de suréchantillonnage ou de sous-échantillonnage (voir fig. 1.4), dus au pouvoir séparateur de l'oeil\*.



a) pouvoir séparateur de l'oeil



b) problème de suréchantillonnage



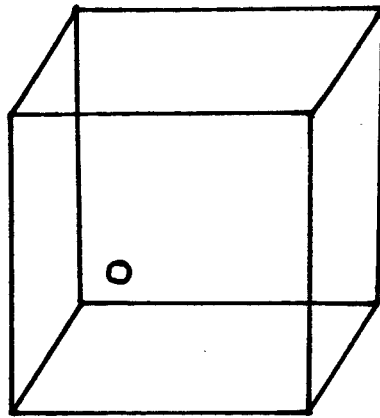
c) problème de sous-échantillonnage



Fig. 1.4 : problèmes de la discrétisation d'une vue

\* pouvoir séparateur de l'oeil : angle minimal sous lequel l'oeil peut distinguer deux points voisins.

En outre, ces techniques fournissent toutes deux des images bi-dimensionnelles de textures tri-dimensionnelles. Ce passage résulte d'opérations de projection qui ne modifient que linéairement les propriétés de la texture. Le précédent paragraphe nous a montré que le cerveau doit reconstituer un espace tri-dimensionnel en comparant les projections bi-dimensionnelles produites sur chacune des deux rétines. Dans le cas des images planes où les deux projections sont sensiblement identiques, il lui est particulièrement difficile de traiter convenablement les informations visuelles qu'il perçoit. Dans ces conditions, il utilise son expérience pour formuler à partir des informations sensorielles perçues, des hypothèses sur l'objet examiné. Ce processus qui touche surtout la vision des reliefs, apparaît dans l'examen de figures ambiguës comme le cube de Necker (voir fig. 1.5)



La face dont le centre est repéré peut-être considérée comme antérieure ou postérieure

**Fig. 1.5** cube de Necker

Etant un processus de confrontation entre informations et essais d'interprétation, la perception, et en particulier, celle des textures technologiques exige un apprentissage sans que l'on puisse faire, pour l'instant, la part entre ce qui est inné et ce qui doit être appris.



#### 1.4 - DISCRIMINATION DES TEXTURES

L'étude de la perception visuelle des textures planes par le système visuel humain est fondamentale pour déterminer les aspects réellement importants lors de la caractérisation d'une texture. Ainsi, dans le but de cerner le pouvoir de discrimination de l'oeil humain entre deux zones d'images, de nombreux tests psycho-visuels ont été expérimentés. La plupart d'entre eux se basent sur des textures de synthèse généralement issues de méthodes probabilistes. Par souci de simplification, ce genre de texture est communément appelé "texture aléatoire".

Julesz [Jul 62] est le précurseur de cette approche psychophysique de la perception des textures aléatoires. Il s'est intéressé, dans un premier temps, à la perception de la symétrie et de la périodicité dans ce type de textures. En particulier, il a montré que l'aspect aléatoire ne perturbait pas obligatoirement la perception de la périodicité. Ainsi, si la périodicité est faible nous la percevons sans grande difficulté, par contre, si celle-ci est grande nous ne la distinguons plus. D'un autre côté, il a montré également que la symétrie ne dépend pas de l'ensemble du motif, mais de la présence ou de l'absence de paires de points symétriques par rapport à l'axe. Si l'on introduit donc, aléatoirement, des points près d'un axe de symétrie, on perd l'aspect symétrique d'une figure. Inversement, si l'on place des points symétriques, on obtient un tel aspect. Ces premiers résultats sont très importants. Ils peuvent donner naissance à une méthodologie pour obtenir des grandes textures à partir de pavés de tailles diverses.

Julesz s'est, par ailleurs, posé la question de savoir s'il était possible de caractériser une texture par un ensemble de paramètres qui seraient constitués de distributions de densité de probabilités d'ordre raisonnable. Il a établi en 1962 [Jul 62] à la suite de cette interrogation une conjoncture, dite

conjoncture de Julesz, qui affirme que le système visuel humain ne peut discriminer deux textures ayant les mêmes distributions de probabilités du second ordre.

Les expériences de Julesz sur la discrimination des champs aléatoires ont été très largement citées. Elles ont servi aussi de base aux travaux de nombreux investigateurs dans les domaines de la quantification et de la synthèse des textures visuelles. Parmi ces travaux, beaucoup tentent de donner sans grand succès un contre-exemple de la conjoncture de Julesz. Ainsi, Pollack [Pol 73], puis Purks et Richards [Pur 77] ont donné des méthodes qui permettent de discriminer des textures d'ordre trois. Les distributions de probabilités d'ordre deux qu'ils utilisaient n'étaient cependant pas fixes. Ce qui de ce fait, ne constitue pas un contre-exemple de la conjoncture.

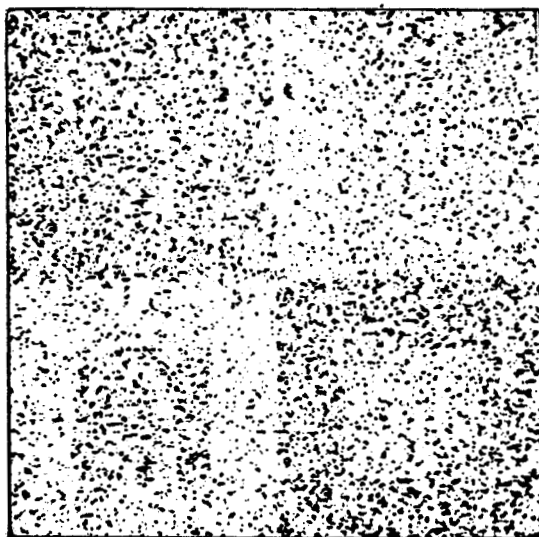
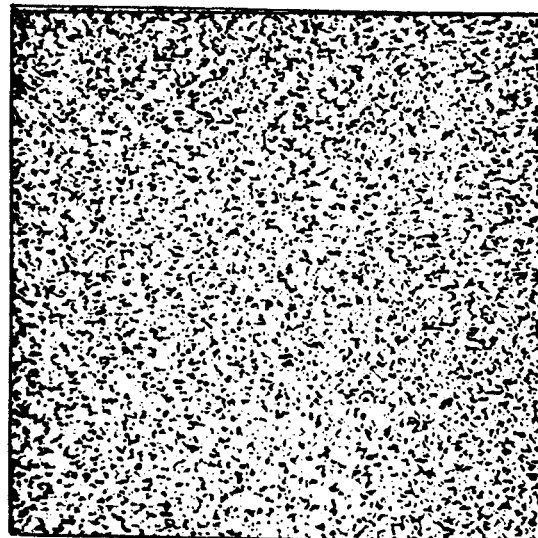
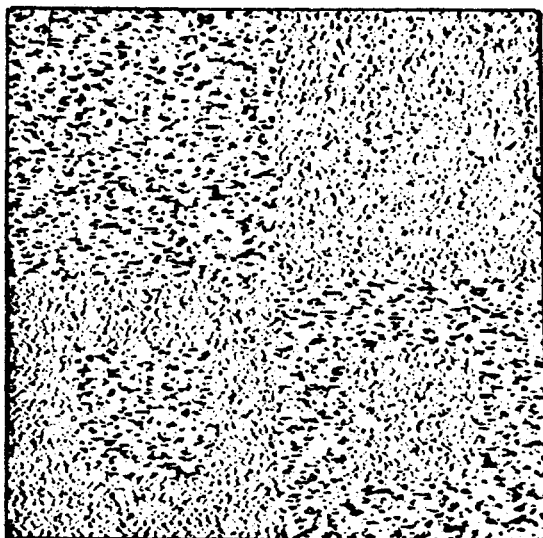


Fig. 1.6 : Comparaison de textures possédant différentes densités de probabilités du premier ordre [Gag 83]



a) Textures ayant des densités de probabilité du second ordre différentes

b) Textures ayant des densités de probabilité du troisième ordre différentes.

Fig 1.7 : Comparaison de textures. [Gag 83]

Par contre, d'autres personnes comme Gagalowicz [Gag 83] ont repris et précisé les travaux de Julesz. Celui-ci a notamment établi une nouvelle conjoncture : la discrimination visuelle des textures est locale, et localement le système visuel ne peut discriminer deux textures microscopiques qui possèdent les mêmes statistiques du second ordre. Cette nouvelle conjoncture sous-entend que le système visuel humain calcule localement des moyennes d'espace du second ordre.

Ces caractéristiques de types mathématiques qui, si elles permettent de limiter la complexité de certains algorithmes de synthèse, ne fournissent pourtant pas de critères suffisamment simples pour référencer l'aspect visuel d'une texture. Elles essaient, d'approximer la façon dont le système visuel reçoit ses informations, mais en aucun cas, elles ne font allusion à la manière dont ces informations sont sémantiquement interprétées. Pour manipuler interactivement des textures, il est indispensable de trouver des critères plus subjectifs et mieux adaptés à la compréhension de l'homme et à son expérience.

### 1.5 - ATTRIBUTS DE TEXTURES

Pour définir des attributs visuels de textures, plus subjectifs que ceux exposés auparavant, nous nous sommes intéressés à certaines expériences psycho-visuelles qui ont été menées par des chercheurs comme Tamura [Tam 78]. Ce type d'expérience est également fondé sur l'étude comparative de textures. L'objectif n'est cependant plus de discriminer des régions comme précédemment, mais il réside dans la recherche de termes qui pourraient servir lors de la description d'une texture. L'analyse des résultats fournis par ces expériences révèle que deux régions peuvent être différenciées, notamment par la taille, le contraste, l'orientation et la forme d'éléments qui se répètent plus ou moins régulièrement. Comme les expériences nous ont semblés très probantes et leurs résultats très significatifs, nous avons retenu ces termes pour qualifier des textures. Par ailleurs, nous avons complété cette liste afin d'avoir un éventail d'attributs le plus riche et le plus complet possible. La liste, finalement retenue, comporte donc les attributs suivants : la granularité, le contraste, la régularité, la rugosité, l'orientation et la forme. Précisons les définitions et particularités de tous ces termes.

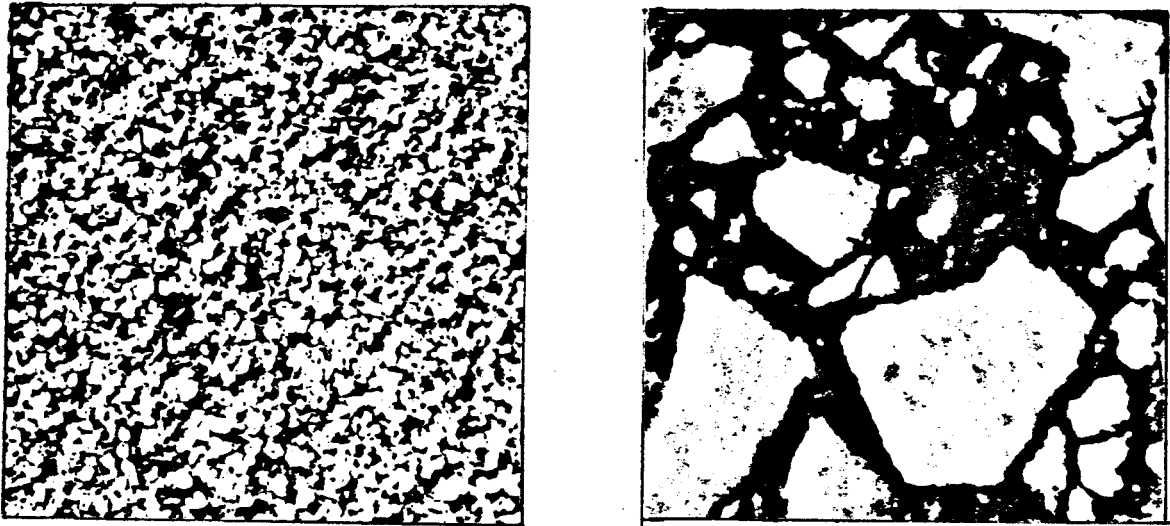
### 1.5.1 - Granularité et notion de tache

La double observation des textures naturelles et des textures technologiques, nous a permis d'en dégager deux catégories essentielles.

Certaines d'entre elles présentent la particularité d'être formées à partir d'un amoncellement d'éléments de petites tailles que l'on appelle des grains. Il s'agit d'une première classe de textures caractérisée par la propriété de granularité. Cette propriété rend compte de la façon dont les grains sont répartis dans la texture. Cette propriété est l'une des plus typiques. Aussi, certains parfois, n'hésitent pas abusivement à la confondre avec le concept même de la texture.

Dans le contexte spécifique des textures technologiques et conformément aux définitions que nous avons déjà données, un grain peut se définir comme un ensemble de points ou pixels, appartenant au sens topologique du terme à un voisinage donné et possédant, sinon un même niveau de gris, des niveaux de gris si proches qu'il en ressort une impression générale d'uniformité.

La seconde catégorie de textures se caractérise par la présence d'un autre type d'entité appelé tache. Les taches possèdent une définition analogue à celle des grains et seule la taille des voisinages permet de les différencier les uns des autres ; cette taille étant nettement supérieure dans le cas des taches.



**Fig. 1.8 : Texture granulaire et à base de taches.**



La notion de granularité fait directement référence à plusieurs caractéristiques essentielles du grain. Celles-ci sont au nombre de trois et sont la forme, la taille et la densité (voir figure 1.9).

La forme d'un grain appartenant à une texture donnée peut être absolument quelconque. Elle peut aussi bien être de nature géométrique, qu'être obtenue à partir de la composition d'objets très complexes.

Pour créer des images synthétiques, nous utilisons, le plus souvent, des écrans cathodiques. Aussi, nous pouvons exprimer la taille d'un grain avec le pixel comme unité. De même, la densité peut s'exprimer en nombre de grains par unité de surface.

Pour certains grains ayant une forme assez dissymétrique, il est également possible d'introduire un quatrième paramètre lié à leurs orientations dans le plan de la texture.

Toutes ces notions sont également applicables, comme nous le verrons plus loin aux entités que sont les taches.

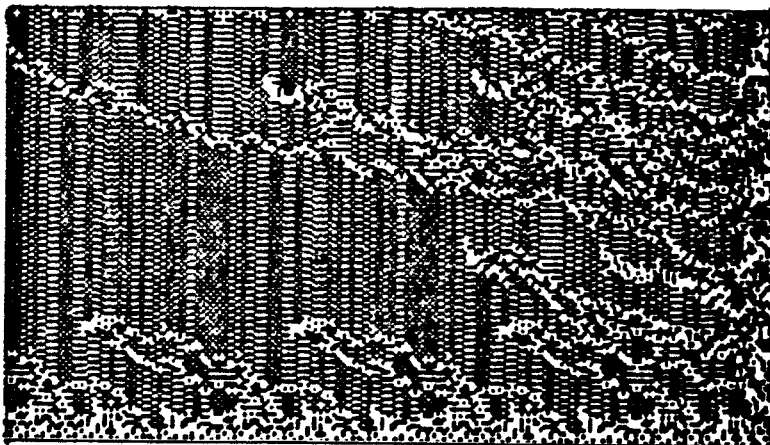
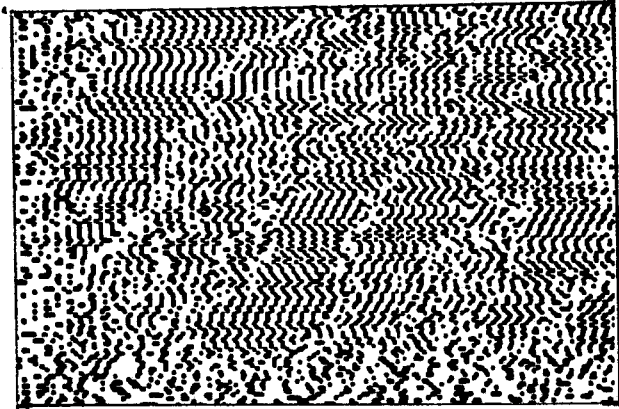


Fig. 1.9 : Manipulation des grains d'une texture.

L'ensemble des grains forme une macrostructure. Le degré de finesse de celle-ci dépend de la taille et de la densité des grains.

### 1.5.2 - Contraste

Le contraste est une propriété basée sur le nombre de niveaux de gris. Il dépend donc de l'échelle de niveaux de gris employée. Une façon simple de changer le contraste consiste à faire varier ce nombre. Ce qui revient pratiquement à multiplier le nombre représentant le niveau de gris de chaque grain par une constante. Ce modèle change la qualité de l'image, mais pas sa structure. Le bouton de contraste situé sur un poste de télévision constitue une bonne réalisation de ce modèle.

### 1.5.3 - Rugosité

Cette propriété possède une signification particulière pour certaines textures tactiles. Il est pourtant difficile d'imaginer la manière dont elle intervient dans les textures visuelles. Cependant, si nous observons certaines textures, nous pouvons les qualifier en terme de rugueuses ou de lisses. Est-ce un jugement subjectif dû aux changements de niveaux gris, donc à la variation d'énergie atteignant l'oeil ? Ou est-ce simplement dû à notre imagination tactile ? Du fait de sa trop grande subjectivité et donc de la difficulté pour la contrôler correctement, on peut penser que cette propriété particulière des textures sera difficilement exploitable dans un système de synthèse interactive des textures.



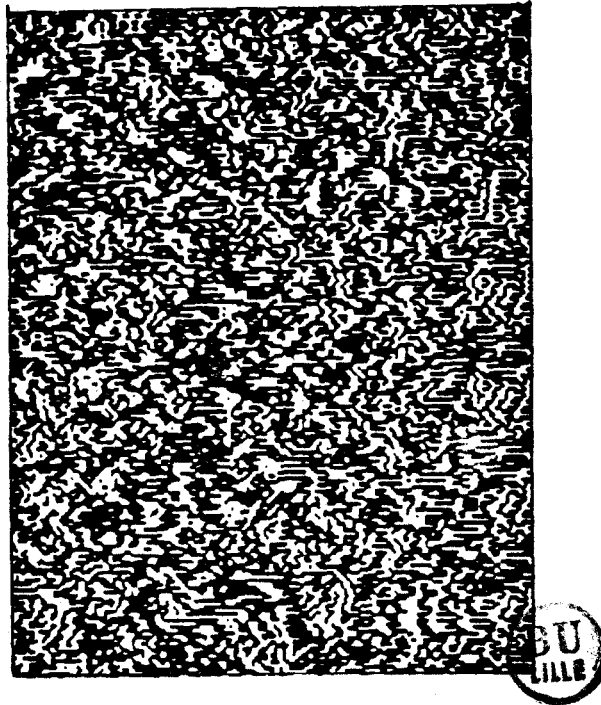


Fig. 1.10 : Rugosité dans les textures.

#### 1.5.4 - Régularité

La régularité est une propriété qui résulte de la variation des règles de placement. On peut, cependant, supposer que la variation des éléments, spécialement dans le cas des textures naturelles, réduit la régularité de l'ensemble. L'homogénéité qui apparaît dans la plupart des textures que nous présentons, est un cas particulier de la régularité.

### 1.5.5 - Directivité (isotropie)

Cette notion concerne aussi bien les taches que les grains. C'est une propriété globale d'une région donnée. Elle traduit la direction générale que peuvent prendre les grains ou les taches formant une texture. Elle fait autant référence à la forme des éléments primitifs qu'aux règles de placement. Les textures de la figure 1.11 illustrent cette propriété.

### 1.5.6 - Forme

Précédemment, nous avons vu que ce critère était utile pour la caractérisation de grains. L'étude de la forme d'une tache peut égale-

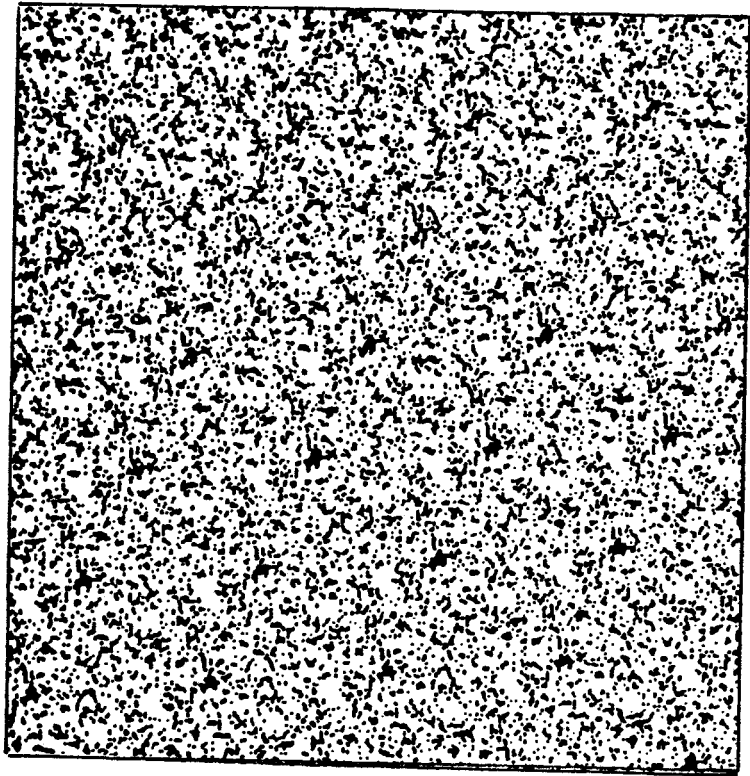


Fig. 1.11 : Exemples de textures orientées.

ment se révéler comme un facteur primordial pour la description d'une texture. Cet attribut peut être, en effet, utilisé lorsque l'on est en présence de notions très subjectives comme les rayures, les marbrures, les noeuds du bois, etc...Face au nombre important de ce type de qualificatifs, il est très difficile de les énumérer tous. L'attribut "forme" associé à celui de la "directivité" permet néanmoins d'en référencer une bonne partie. Cette association entre la directivité et la forme est illustrée par la fig. 1.8.

### 1.6 - CONCLUSION

Avec toute la prudence que requiert le transfert de conclusions des modèles psycho-physiologiques à l'informatique, nous exploiterons ces résultats afin de donner aux opérateurs de synthèse des comportements conformes à ce qu'attend l'oeil.



## CHAPITRE 2

## ASPECTS ANALYTIQUES DES TEXTURES

2.1 - INTRODUCTION

Nous avons vu avec la définition visuelle, qu'une texture résultait d'une distribution de niveaux de gris sur une surface. Une façon plus analytique de définir une texture considère la manière dont sont répartis les niveaux de gris dans le plan. Ainsi Pickett [Pic 70] définit une texture comme un ensemble constitué d'un grand nombre d'éléments visibles à différents degrés qui sont tous répartis densément et régulièrement de telle sorte que l'on obtient des motifs possédant différentes caractéristiques spatiales.

Deux approches très différentes l'une de l'autre font école pour caractériser les distributions de niveaux de gris qui forment une texture. Elles concernent toutes deux des textures technologiques (cf. § 13).

Une première approche basée sur le pixel donne une caractérisation globale de la texture. En ce sens, le descripteur de la texture est le processus de la distribution spatiale, lui-même. Cette approche porte le nom d'approche stochastique car elle suppose que tout échantillon de texture représente une réalisation d'un processus aléatoire donné.

Tout échantillon produit par un même processus illustre, par conséquent, la même texture.

L'approche stochastique est très utile dans le cas où des textures naturelles possèdent un niveau d'organisation peu apparent. Elle traduit bien leurs propriétés locales, tout en préservant les macrostructures existantes. La clé de cette approche réside, cependant, sur la seule dépendance du point, vis-à-vis de certaines propriétés, sans qu'aucune utilisation explicite d'éléments ou de sous-régions soit faite. La notion de macrostructure apparue ici représente des motifs de grandes tailles. Elle est donc différente de celle utilisée dans l'autre approche.

La seconde approche, qui est l'approche structurale, considère, en effet, une texture comme l'agencement d'un ensemble de sous-motifs spatiaux, suivant certaines règles précises. Les sous-motifs sont, en général, constitués eux-mêmes de sous-régions plus petites et positionnées suivant les mêmes règles de placement. La nature récursive de cette approche rend compte de la structure hiérarchique des scènes naturelles. Les sous-régions ou les règles de placement peuvent être choisies de manière statistique. Cette approche convient particulièrement bien pour la synthèse de textures ayant une organisation très régulière telle que l'on trouve dans un mur de briques ou dans certains textiles.

Avant de décrire les méthodes de synthèse de textures qui appartiennent à ces deux catégories, nous allons donner une définition analytique des textures.

## 2.2 - DEFINITION ANALYTIQUE d'UNE TEXTURE

Une bonne définition des textures implique de tenir compte des notions

développées par l'approche structurale et par l'approche stochastique. Pour cela, il faut voir une texture comme une structure spatiale constituée par l'organisation de primitives (ou motifs de base) qui possèdent chacune un aspect aléatoire. Une définition analytique implique des précisions sur la notion de primitives, dont nous avons déjà parlé, et sur la notion de relations spatiales entre primitives.

### 2.2.1 - Primitives de texture

Une primitive de texture ou texel est un ensemble de points qui appartiennent à une texture donnée. Cet ensemble doit être connexe et maximal, c'est-à-dire que tout point adjacent à cet ensemble, et qui ne lui appartient pas, possède une texture différente. La texture d'un point désigne, dans ce contexte, l'information spatiale relative à un voisinage de ce point, tandis que la texture d'une région désigne les caractéristiques de répartition spatiale des niveaux de gris de cette région.

La forme et la taille d'une primitive sont définies de façon géométrique, probabiliste ou autre.

### 2.2.2 - Relations spatiales entre primitives

Les relations spatiales entre les primitives d'une texture peuvent se définir de manière réursive [Cas 83]. Elles décrivent soit la répartition d'une primitive d'un type donné, soit les dispositions relatives de différentes primitives les unes par rapport aux autres.

Pour définir une texture  $T_i$  de niveau  $i$ , nous adopterons les notations suivantes :

NG : Nombre de niveaux de luminance.

$P_0(K)$  : un pixel isolé de niveau de gris K.

$P_i$  : primitive de niveau i (dont la texture est de niveau i-1).

$\mathcal{P}$  : ensemble des primitives définissant les textures de niveau i.  
(primitives dont les textures sont de niveaux i-1, i-2, ...)

$\mathcal{R}$  : Ensemble des relations spatiales définissables entre primitives.

$\mathcal{C}$  : Ensemble des contenants définissant forme et dimension des primitives.

Une texture  $T_i$  de niveau i se définit alors comme un phénomène spatial qui est indépendant de la notion de région et qui possède deux composantes :

\* la première  $\{p_i\}$  décrit l'ensemble des primitives  $p_i$  à partir desquelles cette texture est formée.

\* la seconde r décrit l'ensemble des relations spatiales donnant la répartition spatiale de ces primitives.

De façon formelle, nous pouvons donc définir une texture  $T_i$  comme un couple :



$$T_i = (\{p_i\}, r) \text{ avec } \{p_i\} \subset \mathcal{P}_i \text{ et } r \subset \mathcal{R}$$

L'ensemble des primitives  $\mathcal{P}_i$ , ainsi qu'une primitive particulière  $p_i$  peuvent également être définies plus précisément :

$$\mathcal{P}_i = \{p_i\} \cup \mathcal{P}_{i-1} \text{ avec } p_i = (c, T_{i-1}) \text{ où } c \in \mathcal{C}$$

Cette définition récurrente se termine avec la prise en compte des éléments d'un ensemble de textures de niveau 1. Ces éléments sont de la forme :

$$T_1 = (\{p_1\}, r) \text{ et } \{p_1\} \subset \mathcal{P}_1 \text{ avec}$$

$$\mathcal{P}_1 = \{p_0(k)\} \text{ où } k = 0, 1, \dots, N_G - 1$$

Les textures qui comportent le seul niveau 1 sont des textures microscopiques. Les autres sont des textures macroscopiques (de niveau  $p \geq 2$ ).

### 2.3 - MODELES DE SYNTHESE

Parce qu'une texture constitue un phénomène très complexe et très difficile à modéliser, de nombreuses méthodes de synthèse ont vu le jour. La plupart d'entre elles résultent de modèles d'analyse d'images. Pourtant, comme leurs buts étaient la modélisation de textures en vue de leurs analyses et de leurs classifications, elles sont exploitables en synthèse soit directement, soit moyennant quelques modifications.

Les différents types de modèles peuvent être classés suivant les deux approches citées auparavant : approche stochastique (modèles basés sur le pixel), approche structurale (modèles basés sur les régions).

### 2.3.1 - Modèles basés sur le pixel

On peut regrouper ces modèles entre eux, suivant le type de processus qu'ils utilisent. Une première sous-classe est constituée par des modèles où figurent des processus unidimensionnels. Les modèles autorégressifs et les modèles markoviens entrent dans cette catégorie. Une seconde sous-classe concerne des modèles basés sur des processus bi-dimensionnels.

#### a) Modèles monodimensionnels

-----

Pour étudier les textures visuelles, l'analyse par les séries temporelles a été très souvent utilisée. L'image est balayée, ligne par ligne, pour fournir une série unidimensionnelle de niveaux de gris. Cette série est considérée comme un processus stochastique qui évolue dans le temps. L'évolution future d'un processus est supposée prévisible quand on connaît une certaine partie de son passé.

Le modèle autorégressif constitue l'illustration d'un tel processus. Il utilise une image de bruit blanc en entrée et génère la texture point par point. Pour chaque point, il attribue une valeur de base de bruit blanc à laquelle il ajoute une combinaison linéaire de luminance des K points précédents qui ont déjà été générés. Le problème de l'analyse, mais aussi de la synthèse, revient à estimer les coefficients de régression, qui

sont en fait les coefficients de la combinaison linéaire. Mac Cormick et Jayaramurphy [McC 74] ont étudié ces paramètres pour générer des textures synthétiques.

Les chaînes de Markov font aussi partie de cette catégorie de modèles. Une chaîne de Markov d'ordre  $n$  (cf. Annexe 1) est un processus aléatoire discret ayant un nombre fini d'états et pour lequel l'état courant dépend statistiquement des  $n$  états précédents. Ce qui revient à dire qu'un tel processus est complètement défini par un état initial et par un ensemble de probabilités de transition entre états. En général, ces probabilités sont écrites sous forme de tableau et forment la matrice de transition du processus.

Il est clair qu'il est très facile d'engendrer une texture en faisant correspondre des niveaux de gris aux différents états d'une chaîne de Markov. Beaucoup de gens dont Torrès [Tor 83] ont mis en oeuvre de tels processus.

Il est cependant difficile d'utiliser des processus monodimensionnels comme des processus spatiaux. Le problème résulte du fait que dans un processus bi-dimensionnel, un point dépend de tous ses voisins, et non seulement de ses prédécesseurs, dans un balayage donné. Tou Chang [Tou 76], puis Gambotto [Gam 78] ont néanmoins étendu ces résultats pour obtenir un modèle autorégressif bi-dimensionnel. Le modèle markovien qui sera présenté dans le chapitre IV est un autre exemple de modèles étendus.

## b) Modèles des champs aléatoires

-----

Dans cette seconde catégorie de modèles, on assimile une texture à un champ aléatoire bi-dimensionnel. Par définition, un champ aléatoire désigne une matrice de points qui sont associés à une variable aléatoire. Différentes caractérisations mathématiques de ces champs donnent lieu à diverses méthodes.

### \* Distribution de probabilités jointes

-----

Une manière de décrire un champ aléatoire est de donner la densité de probabilités jointes des propriétés du pixel (genre niveaux de gris). Ce qui implique une estimation de la fonction de densité spatiale de probabilités des niveaux de gris, de laquelle on déduira la densité de probabilités jointes de chaque variable aléatoire du plan. Cette démarche apporte de toute évidence des surspécifications. Par voie de conséquence, on restreindra la dépendance d'un point à un petit voisinage, plutôt que de le faire dépendre de tous les autres points. Cependant, même avec cette simplification, on se heurte à des problèmes de taille et de stockage de résultats. Ainsi, si l'on utilise un voisinage  $3 \times 3$ , on doit manipuler des densités exprimées dans un espace à neuf dimensions.

Read et Jayaramamurphy [Rea 72] et Mac Cormick et Al [McC 75] utilisent les techniques de la théorie de la commutation pour identifier des textures par une description d'échantillons locaux de niveaux de gris. Le principe de la méthode est le suivant : si chaque pixel peut avoir  $N_g$  niveaux de gris, alors un voisinage donné de  $n$  pixels qui appartient à une image, peut être représenté par un point dans un espace de dimensions

$n \times Ng$ . Un grand nombre de voisinages de cette image, forment un nuage de points dans l'espace précédent. A chaque texture correspond un nuage différent de points. La théorie de recouvrement des ensembles de Michalski et Mac Cormick [McC 71] permet de décrire les ensembles de points dans chaque nuage et caractérise ainsi chaque texture.

\* Matrice de cooccurrence

-----  
 Haralick et Al [Har 73] restreignent la description locale à un voisinage  $2 \times 1$ . Ils identifient une texture par les fréquences de cooccurrence de niveaux de gris apparaissant dans ces voisinages. Ils proposent de plus, un certain nombre de paramètres qui résument les diverses propriétés des textures. Tous, dérivés des matrices de cooccurrence\*, sont fortement corrélés et, de ce fait, rarement utilisés simultanément. D'autres études ont aussi été menées sur le même thème. Ainsi Zucker [Zuc 76] cherche des relations des structures par des méthodes statistiques et sélectionne la matrice la plus représentative. Pour mesurer la taille des primitives, Weszka [Wes 76] propose une méthode basée sur l'analyse de la diagonale des matrices de cooccurrence relatives à différentes distances et directions. Connors [Con 80] a développé cette méthode pour obtenir, en plus de la taille et de l'orientation des primitives, les règles de placement. Enfin, Darling et Joseph [Dar 68] ont utilisé les matrices de cooccurrence relatives aux deux plus proches voisins pour discriminer les familles de nuages.

Toutes ces méthodes basées sur les matrices de cooccurrence fournissent de bons résultats. Cependant, leurs mises en oeuvre est très lourde.

\* Une matrice de cooccurrence (cf. annexe 2) contient les fréquences relatives des différentes probabilités de transition entre niveaux de gris.

### \* Lois statistiques

-----

De par la difficulté de décrire ou d'extraire des densités de probabilités jointes, on a utilisé des modèles paramétriques dans lesquels ces dernières sont prédéfinies. Parmi ces modèles, la loi de la normale multivariable est très souvent choisie pour sa souplesse, bien qu'elle ait néanmoins des limites d'applications. Abend et Al [Abe 65] discutent d'une procédure itérative pour obtenir une estimation de la fonction de densité de probabilités jointes, dans le cas où une loi de distribution multivariable de Bernouilli fixe les propriétés du pixel. Il affirme, par ailleurs que l'approche de la loi de la normale multivariable est très limitée et qu'elle exige dans certains cas des traitements spéciaux. Hunt [Hun 77] montre de son côté que les lois gaussiennes fournissent également des surspécifications, mais qu'en contre-partie, elles sont très malléables. Diverses autres lois ont été aussi utilisées, mais elles ne correspondent qu'à des cas particuliers. Pourtant, certaines modélisations statistiques, de phénomènes naturels et physiques, sont directement réutilisables en synthèse. Ainsi, Longuet et Higgins, des océanographes, [Lon 57] traitent les vagues des océans comme un champ aléatoire gaussien. De même, Panda [Pan 77] développa, dans le cadre de la vision infrarouge, un modèle qui établit les propriétés d'une image pour différentes distributions de niveaux de gris.

### \* Variogramme

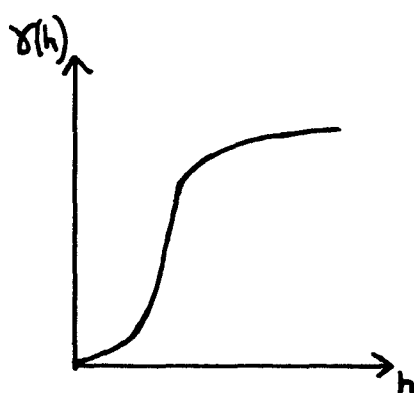
-----

Pour modéliser un champ aléatoire, Matheron [Mat 71] assimile les changements des propriétés du pixel à une fonction de la distance. Il introduit la notion de variogramme\* pour caractériser

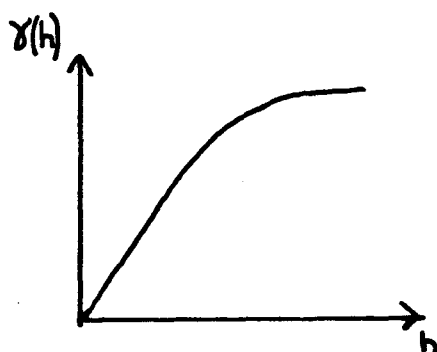
\*Variogramme : étant donné une fonction aléatoire  $F(X)$  on appelle demi-variogramme ou fonction intrinsèque de  $F(X)$  la fonction :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E [(F(X+h) - F(X))^2]$$

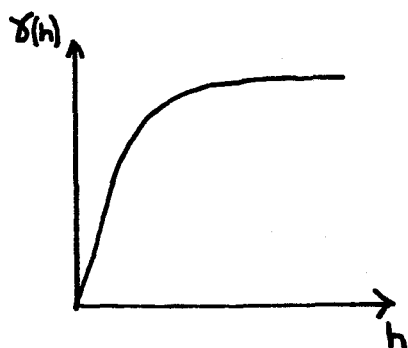
tériser la structure du champ. Ainsi que le montre la fig. 2.1, la connaissance du variogramme est très utile pour estimer un bon nombre de propriétés locales ou globales d'un champ aléatoire.



Texture régulière - aspect lissé



Variations locales assez irrégulières



Effet "pépita" - grandes irrégularités



Fig. 2.1 : Aspects de la texture en fonction du variogramme.

Huijbregts [Hui 75] a étudié quelques propriétés du variogramme. Une texture périodique se traduit par un variogramme qui possède des oscillations de même période. L'existence de paliers dans le variogramme signifie un emboîtement de plusieurs textures.

#### \* Fonction d'autocorrélation

-----

Une caractérisation similaire aux variogrammes est donnée par la fonction d'autocorrélation. Cette fonction, est un attribut donnant des renseignements sur la taille des primitives qui forment une texture. Si ces primitives sont petites (cas d'une texture fine), alors la fonction d'autocorrélation tend vers zéro rapidement en fonction de la distance ; si les primitives sont de grandes tailles (cas d'une texture grossière), celle-ci décroîtra plus lentement. Enfin, si la texture est périodique, elle le sera également. L'étalement de la fonction d'autocorrélation fournit une indication sur la grossièreté de la texture. Ces raisons ont amené Kaiser [Kai 55], et plus récemment Pratt et Al [Pra 78] à étudier le choix d'un tel attribut pour caractériser une texture. On remarque que la fonction d'autocorrélation est analogue à la transformée de Fourier du spectre de l'image et caractérise en plus la directivité.

#### \* Propriété markovienne

-----

Wong [Won 68] propose une caractérisation théorique des champs aléatoires du second ordre (qui ont des moments du premier et du second ordre finis - cf. annexe) qui peut éventuellement servir pour modéliser une texture. Après avoir étudié les propriétés des champs aléatoires bi-dimensionnels, il établit les assertions suivantes :



.(1) Il n'existe pas de champ aléatoire bi-dimensionnel gaussien qui soit à la fois homogène et markovien (d'ordre 1).

.(2) Si la fonction de covariance est invariante pour une translation comme pour une rotation, elle ne dépend alors que de la distance euclidienne. Les propriétés du second ordre de tels champs (Wong les appelle homogènes) sont caractérisables par une simple distribution spectrale unidimensionnelle.

Wong généralise la notion d'homogénéité pour qu'elle puisse aussi supporter des champs aléatoires non homogènes.

Abend et Al [Abe 65] introduisent la notion de maillage markovien pour modéliser la dépendance du pixel vis-à-vis de son voisinage immédiat.

Hassner et Sklansky ont aussi basé leurs recherches sur les champs aléatoires markoviens. Ils présentent un algorithme qui génère des textures à partir d'une configuration aléatoire initiale et d'un ensemble de paramètres indépendants, constitués par des probabilités conditionnelles.

Schmitt [Sch ] et Massaloux [Mas 82] jettent les bases d'une méthode qui repose sur un processus markovien bi-dimensionnel permettant de contrôler les probabilités locales d'une texture aléatoire. Nous développerons cette méthode dans un chapitre ultérieur.

#### \* Caractéristiques particulières

Pratt et Faugeras [PrF 78], puis Gagalowitcz [Gag 78] considèrent une texture comme la sortie d'un filtre spatial homogène excité par une source de bruit blanc, pas forcément gaussienne (cf. figure 22). L'image est ensuite caractérisée par la moyenne et l'histogramme de la source de bruit blanc et de la

fonction de transfert de filtre.

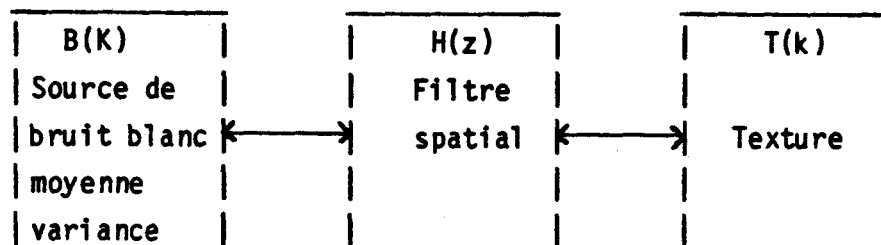


Fig. 2.2 : Modèle hybride de texture.

Si l'on inverse ce filtre, on obtient une image constituée par un bruit blanc, caractérisé par son histogramme et sa densité de probabilité. Pour un champ markovien du premier ordre, des opérateurs du genre Laplacien ou Gradient peuvent avantageusement remplacer l'opérateur de décorrélation [PrF 78]. La densité de probabilités de la source de bruit blanc et le filtre spatial ne forment cependant pas, en général, un système complet de descripteurs [Pra 78]. Mais, ce dernier suffit pour discriminer des textures visuelles.

Mandelbrot [Man 77] prend une approche similaire bien qu'il considère que les niveaux de gris des pixels définissent une surface Brownienne.

### 2.3.2 - Modèles basés sur les régions

Dans cette approche, on classe des méthodes d'analyses et (ou) de synthèse de textures, principalement fondées sur la description de primitives et sur la formalisation des relations spatiales entre ces primitives. Trois grandes familles caractérisent essentiellement celles-ci.

## a) Modèles syntaxiques

-----

Dans ce type de méthode, des règles de production appartenant à une grammaire définissent les textures. Les primitives forment les symboles terminaux de ce langage de textures. En supposant qu'une texture T est en relation bi-univoque avec la grammaire  $G_T$ , l'écriture formelle d'une telle grammaire peut se faire comme suit :

$$G_T = (V, r, p, s) \text{ sur } \langle \Sigma, r \rangle$$

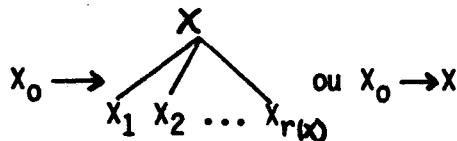
V : ensemble des symboles terminaux ou non

$\Sigma$  : ensemble de tous les symboles terminaux

r : application de  $\Sigma$  dans  $\mathbb{N}$  (ensemble des entiers naturels) qui désigne le rang associé aux symboles

s : racine de l'arbre (symbole de départ)

p : ensemble des règles de production de la forme :



avec  $X \in \Sigma$  et  $(X_0, X_1, \dots, X_{r(x)}) \in (V - \Sigma)^{r(X)}$

Lu et Fu [LuF 78] et Tsai et Fu [Tsa 78] ont utilisé cette sorte de grammaire, qui est en fait une grammaire d'arbres. Ils décrivent une texture en utilisant deux niveaux de primitives. Ils distinguent, des primitives de bas niveau définies par le

pixel. Le nombre de ces primitives et celui des niveaux de gris sont donc identiques. Des règles de composition permettent d'obtenir les primitives du niveau supérieur qui formeront la texture réelle.

La suppression de la première règle de production de la grammaire  $G_{T_2}$  donne naissance à de nombreux modèles. Ehrich et Foith [Ehr 78] ont ainsi développé un modèle simple comportant un niveau de primitives seulement. Celles-ci correspondent aux pics de luminance et à leurs voisinages (maxima locaux entourés de minima locaux). La simplicité de ce modèle ne permet pas de donner une bonne représentation des primitives pour générer des textures structurées.

Carlucci [Car 72] a pris des segments de droite et des polygones comme symboles terminaux. Il a ainsi développé un langage qui lui permet de décrire des textures.

Des zones où tous les pixels possédant un même ombrage constituent les primitives d'une grammaire construite par Vilmoretter [Vil 81]. Ce modèle est déjà plus intéressant que celui d'Ehrich et Foith pour représenter des primitives, mais les possibilités de déformations sont quasi-inexistantes.

Sur ce plan, le modèle de Zucker [Zuc 76] se révèle être particulièrement intéressant. Zucker s'appuie sur des grammaires génératives transformationnelles de Chomsky [Cho 57]. Il part de "textures idéales", qui sont construites récursivement à l'aide des primitives et qui ne sont pas observables, et leur applique diverses transformations ; ce qui donne naissance à un nouveau groupe de textures qui, elles, sont cette fois

observables. Les textures idéales (cf. fig. 2.3) sont des graphes dans lesquels chaque sommet est en relation avec ses voisins. Cette relation est la même pour tous les sommets.

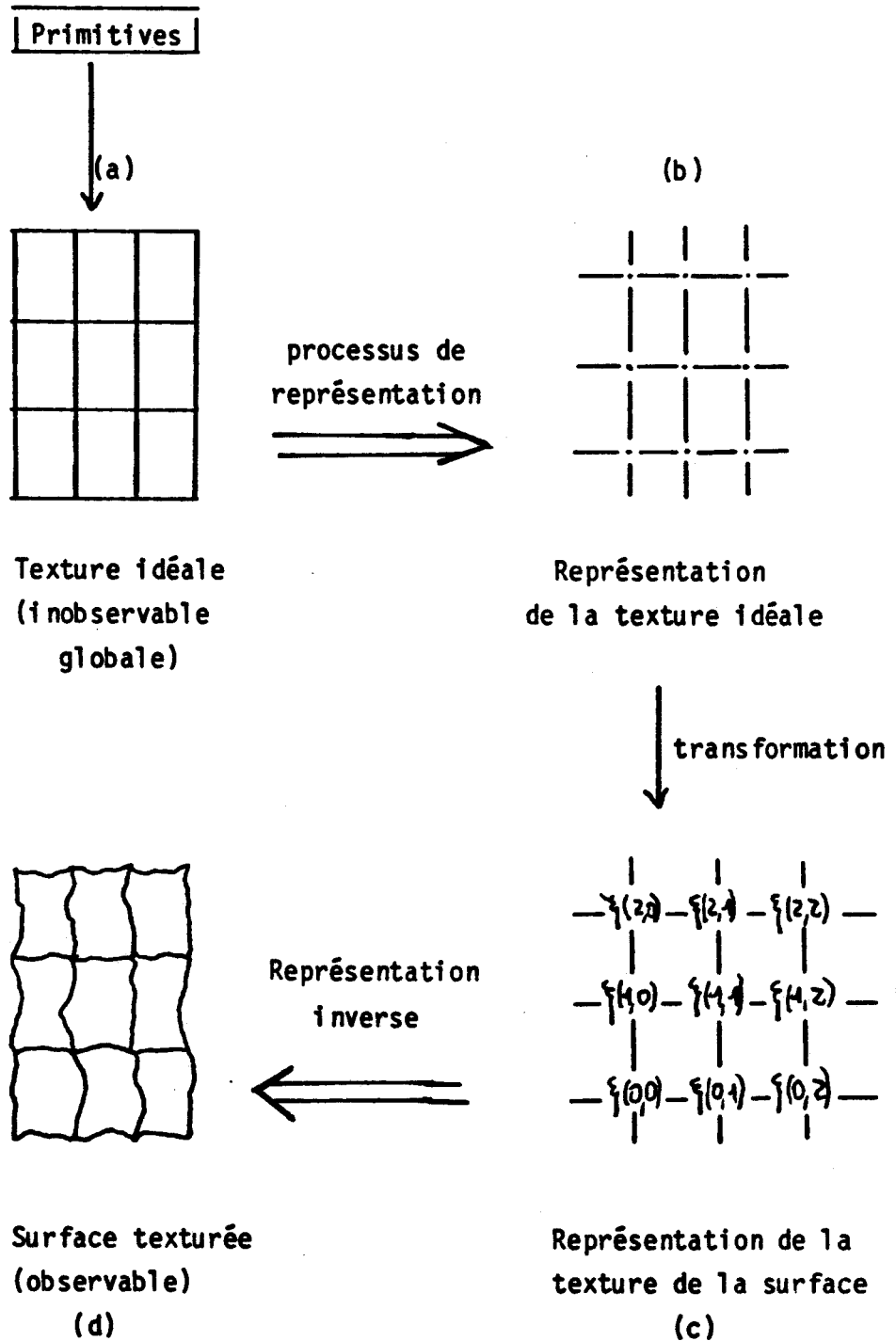


Fig. 2.3 : Illustration du modèle de Zucker

Lu et Fu ont, par ailleurs, introduit l'utilisation de grammaires stochastiques. Dans ce cas, la valeur des noeuds des arbres générés par ces grammaires sont des variables aléatoires définies par moyenne et variance. A mi-chemin entre les modèles totalement stochastiques et structuraux, ce type de modèle est très souvent appelé "structurel-stochastique". Ils sont structurels dans le sens où les primitives sont définies de manière explicite, et l'approche est stochastique dans le sens où les interactions spatiales entre primitives sont régies par des probabilités, ou vice versa. Dans le premier cas, chaque primitive est caractérisée par des attributs du genre niveau de gris, cooccurrence, mais aussi par des attributs donnant sa forme ou son homogénéité. Les relations spatiales proposées ont été l'adjacence, la proximité de deux primitives, leurs distances. Davis, Johns et Aggarwal [Dav 79] ont indiqué un moyen d'utiliser des fonctions de cooccurrence généralisées (cooccurrence de primitives) pour décrire ces relations spatiales.

Actuellement Bruno et Barba [Bru 84] travaillent sur un modèle de grammaire totalement stochastique, c'est-à-dire aléatoire aussi bien au niveau des primitives qu'au niveau de leurs interactions.

#### b) Modèles de morphologie mathématique

-----  
 Matheron [Mat 67], puis Serra [Ser 73] ont proposé un modèle qui reconstruit des textures binaires à l'aide d'un ensemble de translations d'un élément structurant. Un élément structurant désigne un ensemble de points de forme donnée tel un segment de droite, un triangle ou un cercle. Dans un but d'analyse, on recherche dans l'image tous les endroits où se retrouve cet élément. Il existe des régions étroites de l'image qui ne peuvent être recouvertes par aucun élément structurant. Toute la surface de l'image ne peut être entièrement recouverte. On ob-

tient, dans ces conditions, une version "érodée" de l'image. On peut dégager, par cette méthode, certaines propriétés des textures en paramétrant convenablement l'élément structurant. Il est intéressant de noter que pour un élément structurant composé par deux pixels distants de  $d$ , l'aire de l'image érodée est la valeur de l'autocovariance (cf. annexe) à la distance  $d$  de l'image originale. Des éléments structurants plus complexes fournissent des fonctions d'autocovariance généralisées. Matheron et Serra ont montré que ces fonctions pouvaient être utilisées pour obtenir de nombreux traits caractéristiques des textures. Ces résultats ont été étendu au cas de textures possédant un nombre de niveaux de gris quelconque.

De nombreuses applications de ce modèle ont été réalisées en Biologie et en Sciences des Matériaux. L'intérêt de cette approche repose dans le fait que les paramètres obtenus sont liés aux propriétés physiques des matériaux.

### c) Modèles de mosaïques

-----

Depuis les temps anciens, les mosaïques ont été utilisées pour peindre des scènes du monde réel. Elles offrent une approche hiérarchique pour modéliser les images. Les modèles de mosaïques actuelles décrivent les textures en spécifiant les processus géométriques qui les engendrent. Au même titre que les grammaires stochastiques, ce type de modèles utilise des règles probabilistes pour le placement des primitives. Pour construire des mosaïques, il opère en deux étapes. Il divise d'abord une région donnée en cellules. Puis, en supposant que l'on dispose de  $m$  couleurs différentes (ou niveaux de gris) et que chaque couleur possède une certaine probabilité d'être utilisée, les cellules sont coloriées en accord avec ces probabilités. Beaucoup de processus générant des mosaïques aléatoires ont été décrits. Nous allons en donner une description rapide. Les mo-

dèles que nous allons présenter, ne constituent pas tous les processus possibles de génération de mosaïques. Ils suffisent, cependant, pour illustrer les possibilités des modèles de cette classe. Ahuja [Ahu 79] en donne une description plus détaillée, et de plus, étudie leurs propriétés géométriques.

\* Modèle d'occupation ( $\overline{[Mil 79]}$ )

Un processus de Poisson de paramètre  $\lambda$  répartit des points dans le plan. La distribution, une fois terminée, chaque point "s'étend" de manière à occuper une cellule de Dirichlet ou un polygône de Voronoï (cf. fig. 2.4). Ces figures sont des polygônes qui possèdent une forme particulière et qui sont centrés sur chaque point de la distribution. Le critère d'appartenance repose sur une relation de proximité. Ce modèle convient parfaitement pour reproduire des textures naturelles telles que des vues de champs.

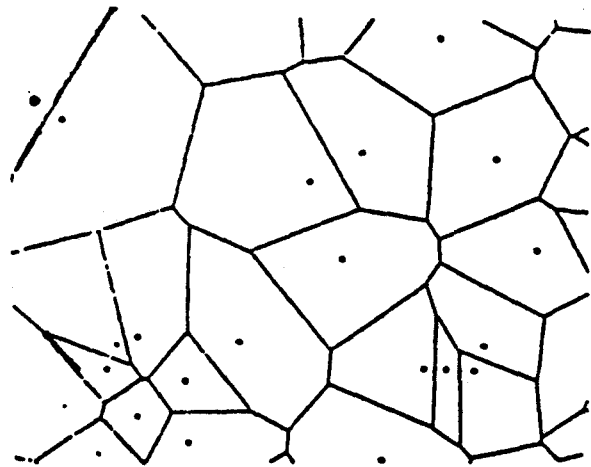


Fig. 2.4 : Cellules générées par le modèle d'occupation.



\* Modèle de Johnson Mehl (Meh 62)

-----

C'est une variante du modèle précédent. Chaque point commence à s'étendre dès que le point est généré. Les cellules formées de cette manière peuvent ne pas être convexes ou même polygonales (cf. fig. 2.5). Il constitue un modèle très réaliste pour certains types de surfaces métalliques. Malheureusement, il est très lourd à manier.

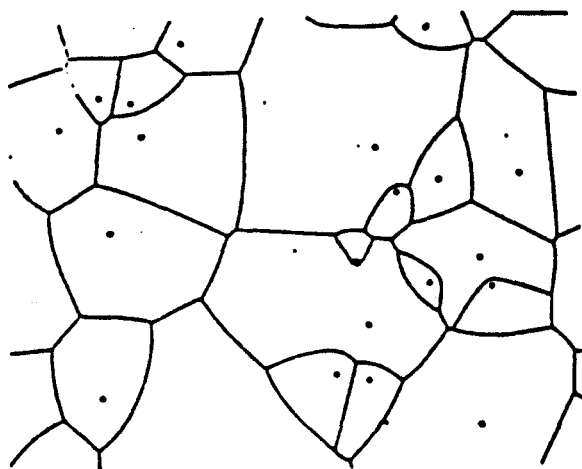


Fig. 2.5 : Cellules générées par le modèle de Johnson-Mehl.

\* Modèle des lignes de Poisson (Mil 69)

-----

Dans ce modèle le plan est divisé en cellules convexes séparées par des segments de droite ayant des positions et orientations données. De tels segments peuvent être engendrés par un processus de Poisson de paramètres  $\tau/\pi$  qui génère des points par leurs coordonnées polaires  $(\rho, \theta)$  dans une partie de l'espace défini par  $(0 \leq \theta \leq \pi$  et  $-\infty < \rho < +\infty)$ . Chacun

des points définit une droite d'équation  $x \cos \theta + Y \sin \theta = \rho$

. Beaucoup de personnes ont étudié ce modèle, parce qu'il possède un haut degré d'aléatoire. Cependant, les textures qu'il produit n'ont pas l'air très naturelles.

\* Modèle du damier transformé par rotation

-----

L'origine et l'orientation des axes d'un système de coordonnées sont choisies aléatoirement dans le plan. Suivant ce repère, le plan est morcelé en carré de côté constant. On ne peut pas s'attendre à reproduire, avec ce modèle, toutes les textures naturelles existantes, il est cependant très adéquat dans le cas des textures résultant du travail de l'homme, tel un textile. La taille constante des cellules le place à l'extrême opposé du modèle des lignes de Poisson.

\* Le modèle du "bombardier" (Swi 67)

-----

Des points sont répartis dans le plan selon un processus de Poisson de paramètre  $\lambda$ . Chaque point s'accroît dans une région de forme et de taille spécifique. On peut, par exemple, prendre un cercle de rayon donné et ayant pour centre ce point. Le processus définit dans ces conditions, un premier plan qui est formé par la réunion des cercles, et un arrière-plan qui est constitué par le reste. Bon nombre de phénomènes naturels, comme celui produit, par exemple, par des plantations d'arbres, sont reconstitués par ce modèle de façon satisfaisante.

## 2.4 - CONCLUSION

Il existe bien d'autres études relatives aux textures que celles que nous avons décrites. Elles fournissent des techniques très orientées qui traitent des principes de sélection ou de classification de caractéristiques ad hoc de textures ; mais elles n'aboutissent à aucune modélisation spécifique. Puisqu'elles ne satisfont pas à cet objectif, nous les avons, volontairement, exclues de notre présentation. Néanmoins, on pourra trouver un bon nombre d'entre elles dans Haralick [Har 79] qui en donne une description assez complète.

## CHAPITRE 3

### METHODES INTERACTIVES DE SYNTHESE

### DE TEXTURES

#### 3.1 - INTRODUCTION

Une caractéristique importante des textures naturelles résulte du fait que l'on peut les observer à différentes échelles, dans les limites permises par le pouvoir séparateur de l'oeil (cf. paragraphe 1.3).

Dans ces conditions, il n'est pas toujours très évident de savoir ce que devraient être la structure des textures technologiques correspondantes. Une bonne estimation du processus physique qui a engendré un motif donné, fournit parfois de précieuses indications sur la façon de choisir un modèle adéquat. Les processus de génération dans la nature sont de toute évidence très complexes et habituellement impossibles à simuler exactement. Il est alors utile de chercher à singulariser certains de leurs traits les plus significatifs. Si le modèle retenu incorpore de tels traits alors le motif qu'il décrit ressemblera à la texture réelle. L'étude des différents modèles de synthèse de textures faite dans le second chapitre montre néanmoins que la complexité de ces derniers dépend du degré de réalisme que l'on veut atteindre. L'utilisation de modèle de synthèse interactive peut abaisser celle-ci tout en maintenant le bon niveau de réalisme que procurent certaines méthodes sophistiquées.

## 3.2 - SYSTEMES INTERACTIFS

### 3.2.1 - Définition de l'interactivité

La génération interactive d'images synthétiques met en jeu deux interlocuteurs principaux : un programme d'application et un opérateur humain. Le programme interactif est exploité en mode dialogué à travers une communication graphique avec un ordinateur. Il se révèle, en général, le maître de ce dialogue parce qu'il limite le nombre d'actions proposées à l'opérateur. Son rôle essentiel est de synthétiser l'ensemble des informations dont il dispose, afin de fournir à l'observateur les éléments nécessaires pour que ce dernier puisse juger de l'état d'une image en fonction des paramètres qu'il a introduit, et, de choisir des actions capables de le faire évoluer. Le rôle de l'opérateur est alors d'analyser les images présentées afin d'y extraire les informations qui y sont synthétisées. A l'aide de dispositifs de communication comme le photostyle, il fournit, en retour, des données graphiques pour modifier, supprimer, ajouter ou composer des éléments dans l'image. Ce modèle d'interaction est schématisé par la figure suivante (fig. 3.1).

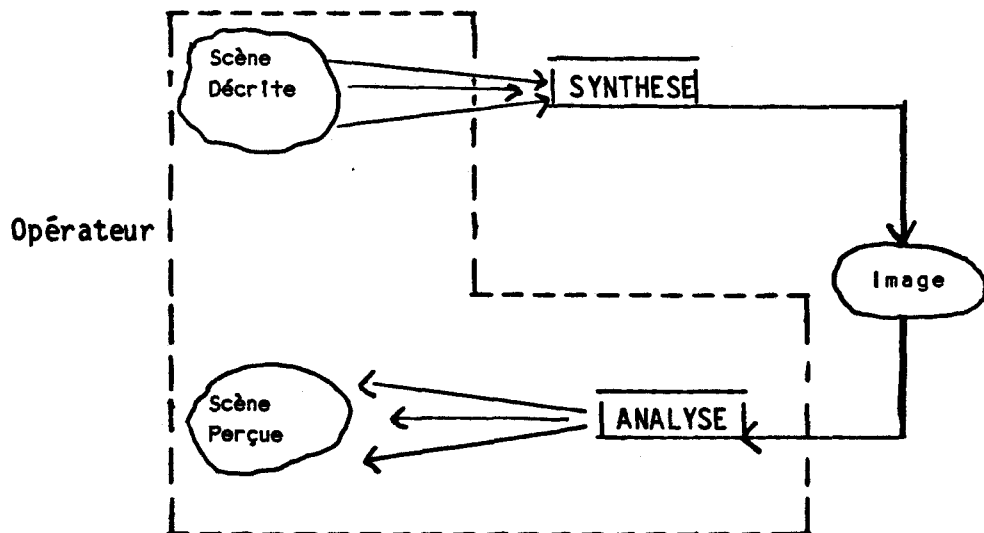


Fig. 3.1 : Boucle d'interaction.

### 3.2.2. - Application au cas des textures

Dans le cas précis où l'image comporte une texture, nous distinguerons deux formes d'interactions.

La première, qui est la plus élémentaire, est caractérisée par une interaction directe. La notion de "brosse" constitue la clé de ce modèle. Une brosse (cf. fig 3.2) représente un pavé de points dont la taille, la forme et la répartition sont définies à l'avance.

L'utilisateur dispose de plusieurs brosses regroupées dans un menu qui est affiché sur un écran cathodique. Ayant sélectionné une de ces brosses, il peut alors peindre sur l'écran à l'aide du photostyle : tout se passe de la même façon que s'il dessinait des traits d'épaisseurs variables ; ces traits étant remplacés par des nuages de points.

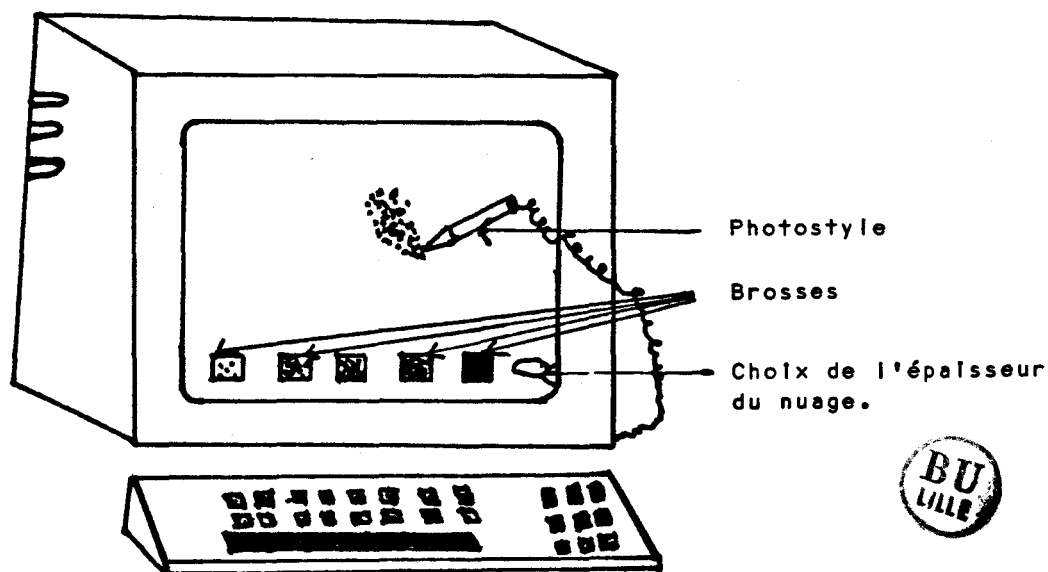


Fig. 3.2 : Dessin de textures à l'aide de brosses.

Le second modèle d'interaction (cf. fig. 3.3) est légèrement différent du précédent. Il est basé sur une banque de textures dont nous décrirons le fonctionnement ultérieurement. La difficulté de nommer précisément une texture nous pousse tout naturellement vers de tels systèmes. S'il est facile, effectivement, de désigner une couleur et d'affiner le choix ensuite pour obtenir la nuance désirée, tel n'est pas le cas pour une texture. L'existence d'imposants catalogues de tapisseries démontre parfaitement cette difficulté. Le schéma suivant montre le fonctionnement d'un système interactif de textures.

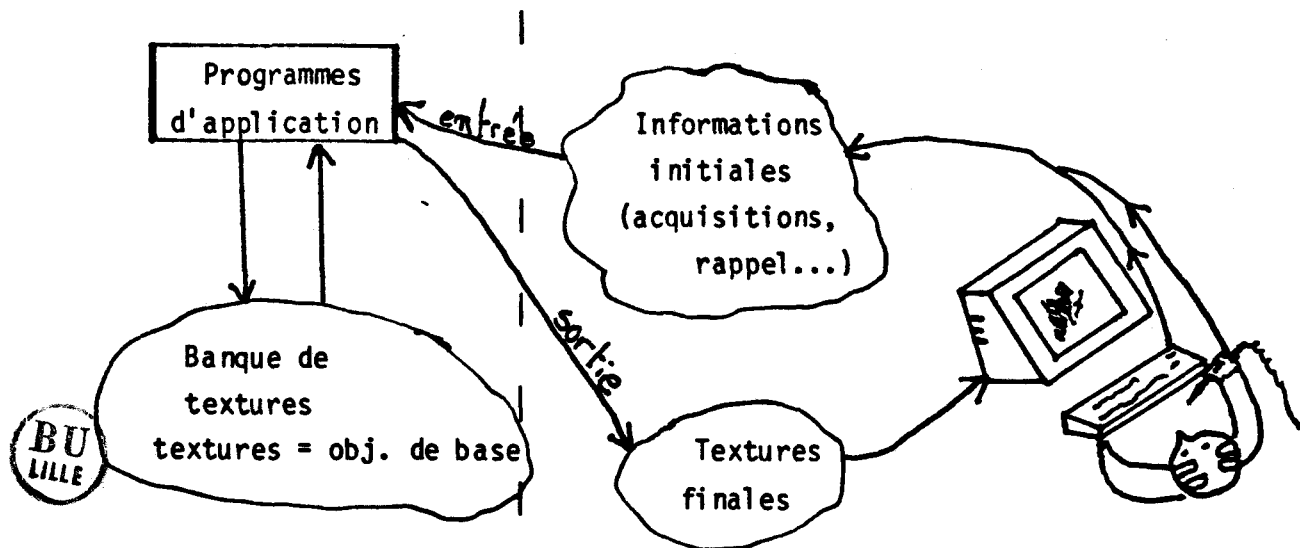


Fig. 3.3 : Système interactif de synthèse de textures.

### 3.3 - ACQUISITION DES OBJETS DE BASE

#### 3.3.1 - Cadre de l'acquisition

Les objets contenus ou destinés à être stockés dans la banque de textures sont formés soit par une collection de grains, soit par un ensemble de taches. Le choix de ces deux morphologies pour une texture,

résulte des constatations que nous avons pu faire au cours des chapitres précédents. Cependant, puisque nous nous intéressons à des algorithmes de "type pixel"\*, les textures construites à partir de l'une ou l'autre de ces entités requièrent des traitements similaires : un grain pouvant être assimilé à une tache ou vice versa. Que ce soit dans le cas de grains ou de taches, nous proposons deux manières de faire l'acquisition des objets de base. L'une utilise une fonction de répartition prédéfinie, l'autre met à la disposition d'un utilisateur des outils afin qu'il puisse introduire de façon interactive la texture.

Ces deux façons d'agir ont néanmoins un point commun : le mode de remplissage. Pour obtenir une texture, nous calculons, puis nous affichons successivement les valeurs de chaque pixel suivant le balayage télévision standard. Ce procédé génère les valeurs des points, ligne après ligne (le plus souvent de haut en bas) et de gauche à droite. En utilisant ce balayage, nous optimisons le temps d'affichage d'une image. Cela favorise, par conséquent, la réalisation de producteurs, opérateurs cablés de textures fonctionnant en temps réel au rythme du balayage de l'écran.

L'apparition d'écrans munis de mémoires de trame\*\* permet d'envisager d'autres manières d'effectuer ce remplissage. Au lieu d'opter pour un style d'axes cartésiens, il est possible de choisir un repère absolument quelconque. Dans le cas d'un système d'axes polaires, par

\*algorithme pixel : algorithme ayant pour finalité la production de valeurs destinées à chaque pixel (voir [Mer 84]).

\*\*mémoire de trame : à chaque pixel de l'écran correspond un emplacement mémoire où sera stockée sa valeur. L'ensemble de ces emplacements constituent la mémoire de trame.



exemple, le remplissage pourra se faire selon un ordre spécifique, défini à l'avance (cf. fig. 3.4). De tels systèmes peuvent servir pour synthétiser des textures qui comportent des taches particulières, tels les noeuds apparaissant dans le bois. Les méthodes que nous décrirons utilisent un mode de remplissage conventionnel. Elles peuvent être, cependant, très facilement adaptées pour fonctionner de cette manière.

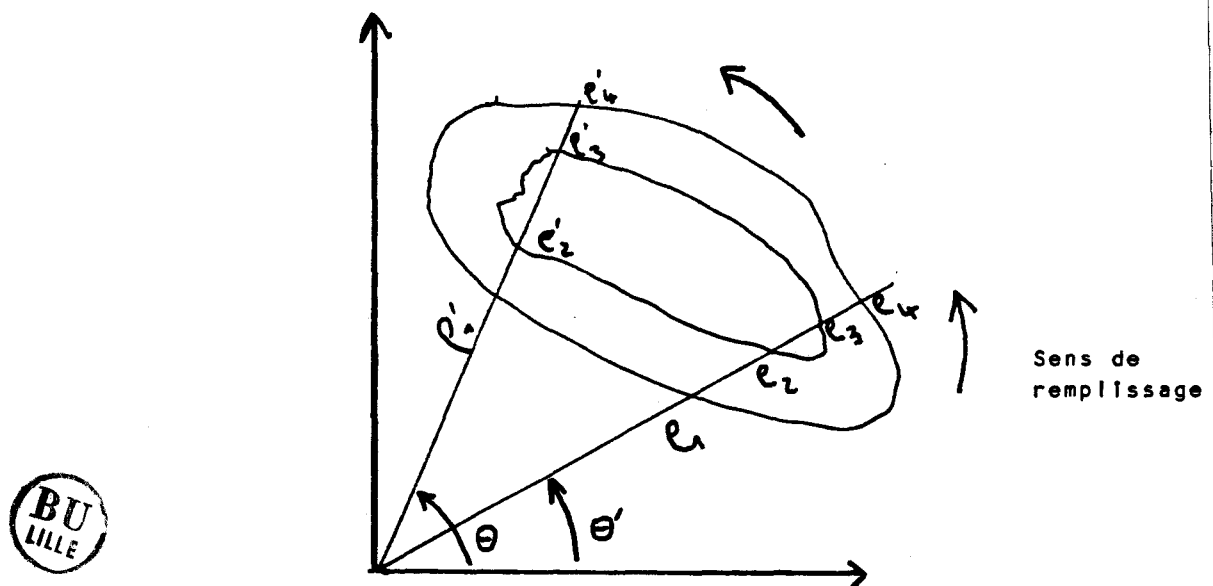


Fig. 3.4 : Autre mode de remplissage.

### 3.3.2 - Répartition prédéfinie

Une saisie directe par caméra, ou des méthodes du type de celles que nous avons décrites dans le second chapitre, donnent naissance aux textures de base. Un utilisateur pourra dans un second temps les transformer pour les rendre telles qu'il les souhaite. Les grains peuvent, par exemple, être distribués dans le plan en accord avec des règles statistiques, tandis que des taches pourront l'être avec un modèle plus structural tel celui des mosaïques. Dans le chapitre qui suit,

nous présentons, en détail, une méthode stochastique qui convient aussi bien pour les taches que pour les grains. Nous illustrons ainsi cette manière de procéder. Par rapport à une acquisition manuelle, la mise en oeuvre d'un tel modèle permet d'obtenir plus rapidement et plus facilement des textures de base. Un autre de ses avantages réside dans la faculté de fournir d'une même texture des échantillons de taille quelconque. Toutes ces raisons, nous ont amenés à préférer la mise en oeuvre d'un tel système d'acquisition automatique à celui d'une acquisition manuelle que nous décrirons néanmoins.

### 3.3.3 - Répartition manuelle

Dans cette partie nous distinguons les acquisitions des textures formées par des grains de celles composées par des taches. Si les traitements effectués sur ces deux types d'entités s'avèrent très similaires, leurs acquisitions méritent, cependant, d'être étudiées séparément. Nous supposons que les moyens déployés pour une acquisition sont identiques dans les deux cas. S'il s'agit, en l'occurrence, d'un écran muni d'un photostyle et d'une mémoire de trame, l'utilisation d'une table à digitaliser peut également être envisagée. Le choix des niveaux de gris ou des couleurs des différents éléments se fera à l'aide d'un menu. Ces éléments formeront la base qui permettra de créer des textures suivant une représentation hiérarchique, conforme à la définition analytique que nous en avons donnée.

#### a) Acquisition de textures à base de grain

---

Un premier mode de fonctionnement assez fastidieux consiste dans la désignation des emplacements occupés par les grains, à l'aide du photostyle. Ce pointage repère la position du grain par son centre de gravité, notion qu'il faudra définir pour

chaque sorte de grain. Il faut donc fournir, avant toute chose, les caractéristiques du grain, à savoir sa forme, sa taille etc... Ces opérations sont faites, pour des raisons de commodité, à une échelle supérieure à celle choisie pour constituer la texture. Un menu donne, par ailleurs, la possibilité de manipuler simultanément plusieurs types de grains. Il est aussi envisageable de bâtir une bibliothèque de grains ou d'utiliser des grains donnés en standard.

De part l'existence d'un nombre considérable de grains dans une texture, son acquisition peut se révéler pénible pour l'utilisateur. Il faut donc qu'il puisse disposer d'un certain nombre d'outils qui lui faciliteraient la tâche. L'étude du pouvoir de discrimination de l'oeil permet d'oeuvrer dans ce sens. Comme l'oeil (voir § 14) discerne bien les symétries, mais pas les répétitions, il est assez facile de construire des fonctions qui permettent de dupliquer des zones. Si les frontières, placées entre des régions fabriquées de cette manière, sont trop nettes, il devra alors disposer d'une fonction particulière, chargée de les brouiller, en y introduisant aléatoirement des grains.

Ces diverses fonctions peuvent être également utilisées dans le cas d'une répartition prédéfinie.

Une représentation particulière des textures, permet de proposer une méthode qui simplifie encore leurs acquisitions. Elle nécessite de décomposer une image en sous-régions. Une sous-région est un ensemble connexe de pixels se réduisant au minimum à un seul, et dans laquelle, il est possible de placer un ou plusieurs grains. Les sous-régions peuvent être disposées suivant une topologie de recouvrement. Elle sont toutes repérées par un seul point privilégié.

L'utilisation d'un balayage tel que celui de Péano, permet de répertorier dans un vecteur unique toutes les sous-régions en réalisant une couverture sans croisement de la surface de la texture (cf. fig. 3.5).

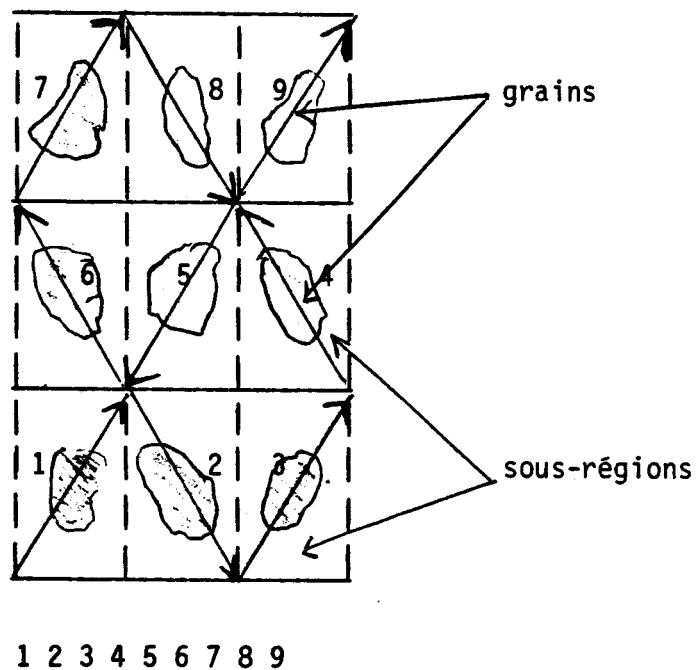


Fig. 3.5 : Balayage de Péano.

On associe à chaque sous-régions, un degré de luminosité qui peut être soit celui du grain, si elle en contient un, soit celui du fond, dans le cas contraire. Il est donc possible de classer celles-ci à l'aide d'une relation de dominance  $n$ -aire basée sur ce critère. Si chaque  $L_i$  désigne la  $i$ ème sous-région et  $L_j$ , celle possédant la plus grande valeur de luminosité, cette relation peut se noter de la façon suivante :

$$L_j (L_1, L_2, \dots, L_j, \dots, L_n)$$

Dans le cas où plusieurs sous-régions possèdent un même degré de luminance, on utilise le symbole d'équivalence ":".

Dans les textures naturelles, on retrouve des regroupements particuliers de grains possédant des valeurs de luminance données ; ces grains sont, en quelques sorte, enchevêtrés les uns dans les autres. Pour traduire ce phénomène, il faut donc, lors de la mise en oeuvre de la relation de dominance, permettre des regroupements arbitraires ou systématiques de deux et plusieurs sous-régions. Par exemple, la texture dont les degrés de luminance figurent sur la figure 3.6 (les sous-régions étant référencés par leur numéro d'ordre dans le vecteur de Péano) peut s'écrire :

$$T = 6 : 7(2(1, 2(2,3), 6 : 7(4,5,6 : 7(6,7),8)$$

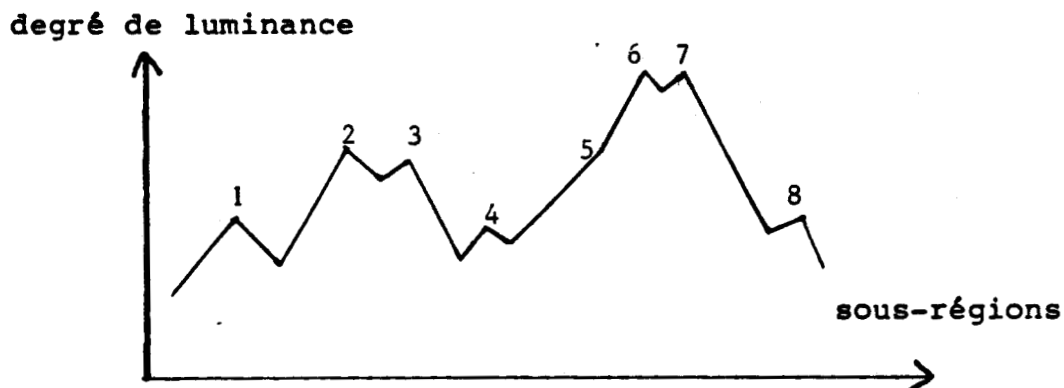
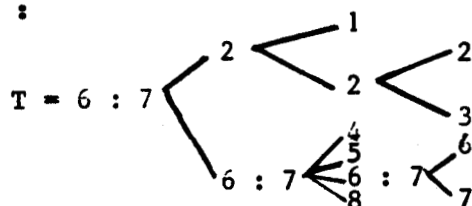


Fig. 3.6 Représentation d'une texture par ses sous-régions classées suivant le schéma de Péano

Cette relation peut aussi se représenter sous forme d'un arbre relationnel :



La mise en oeuvre de ce système implique que l'on aide l'utilisateur à remplir l'arbre de dominance. Il faut donc qu'il puisse placer les sommets dans l'espace-écran à l'aide d'un photostyle, par exemple. Chaque noeud de l'arbre relationnel devra de plus supporter d'autres informations telles la forme et la taille du grain (sommets). L'utilisateur doit, par ailleurs, pouvoir utiliser simultanément plusieurs arbres et les positionner n'importe où sur l'écran, avec possibilité de mixage.

#### b) Acquisition des textures à base de taches

-----

De même que pour les textures fabriquées à l'aide de grains, la première étape de cette acquisition doit définir les taches destinées à l'élaboration de la texture. Ces taches peuvent être standardisées, issues d'une banque ou entrées manuellement.

Une tache, qui est dans la plupart des cas un ensemble dissymétrique de points, est contenue dans une tache idéale (voir fig. 3.7). Celle-ci, constituée par une courbe parfaite, fermée, forme en quelque sorte l'enveloppe de la tache. Plusieurs paramètres définissent cette enveloppe. Nous les nommerons équateur, parallèle ou méridien par analogie avec le découpage du bloc terrestre. Le paramètre principal est la droite de plus grande longueur contenue par l'enveloppe. Nous l'appellerons équateur ou directrice de tache. Dans une figure de révolution, l'axe de symétrie constitue, par exemple, l'équateur. Parallèlement à l'équateur, des courbes définissent plus précisément la tache : il s'agit des parallèles. Ces premiers paramètres caractérisent la forme longitudinale de la tache. L'introduction d'un méridien principal et de méridiens secondaires précisent les différentes largeurs locales de celles-ci. Une perturbation du contour et de l'intérieur de l'enveloppe, donne la tache réelle. La perturbation peut être

aléatoire. Une même enveloppe peut engendrer plusieurs taches réelles.

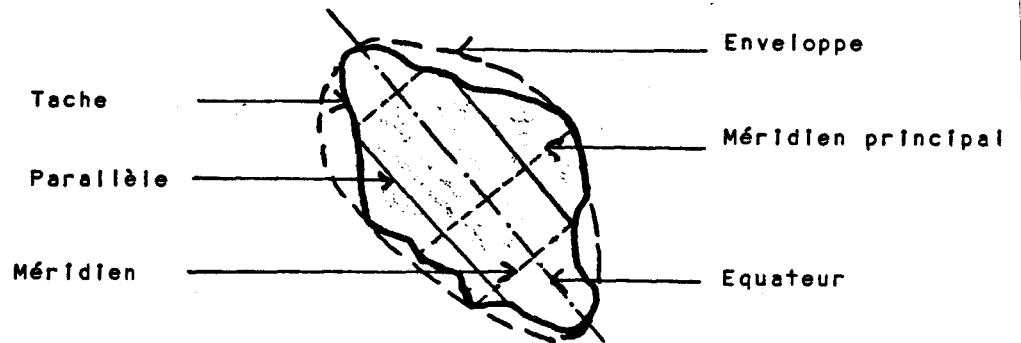


Fig. 3.7 : Schéma d'une tache.

Les axes sont déterminés interactivement en désignant à l'aide d'un photostyle leurs extrémités. L'enveloppe complète est obtenue par une simple interpolation linéaire ou par une construction de courbes du type de celle donnée par Bézier [Béz 7]. Le schéma d'interaction suivant décrit un moyen pour réaliser cette opération.

On peut aussi tracer les enveloppes à l'aide de la méthode des B-Splines [Roa 7]. Le dialogue est dans ce cas, plus riche, car il est possible d'ajouter ou d'enlever des points sur une enveloppe, sans recommencer tous les calculs qui sont toutefois plus longs que précédemment. L'élaboration d'une enveloppe se fera suivant le principe illustré par la figure 3.9.

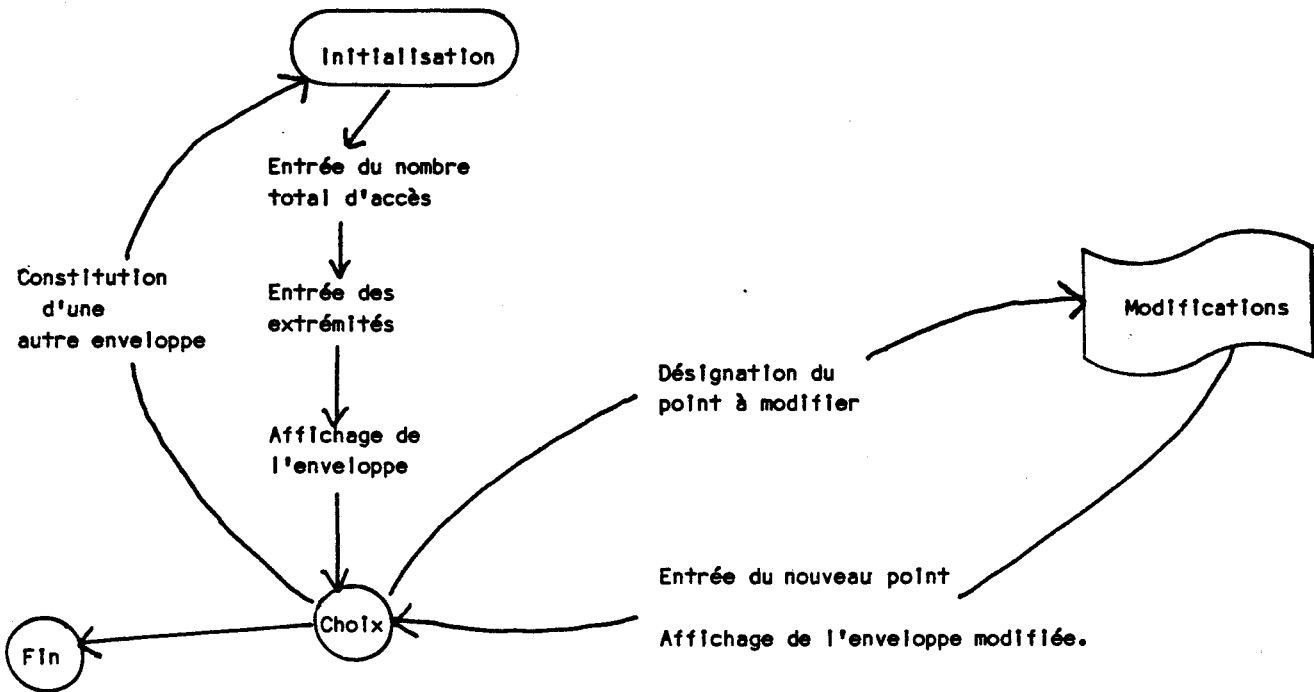


Fig. 3.8 : Fabrication d'envelopes par la méthode de Bézier.

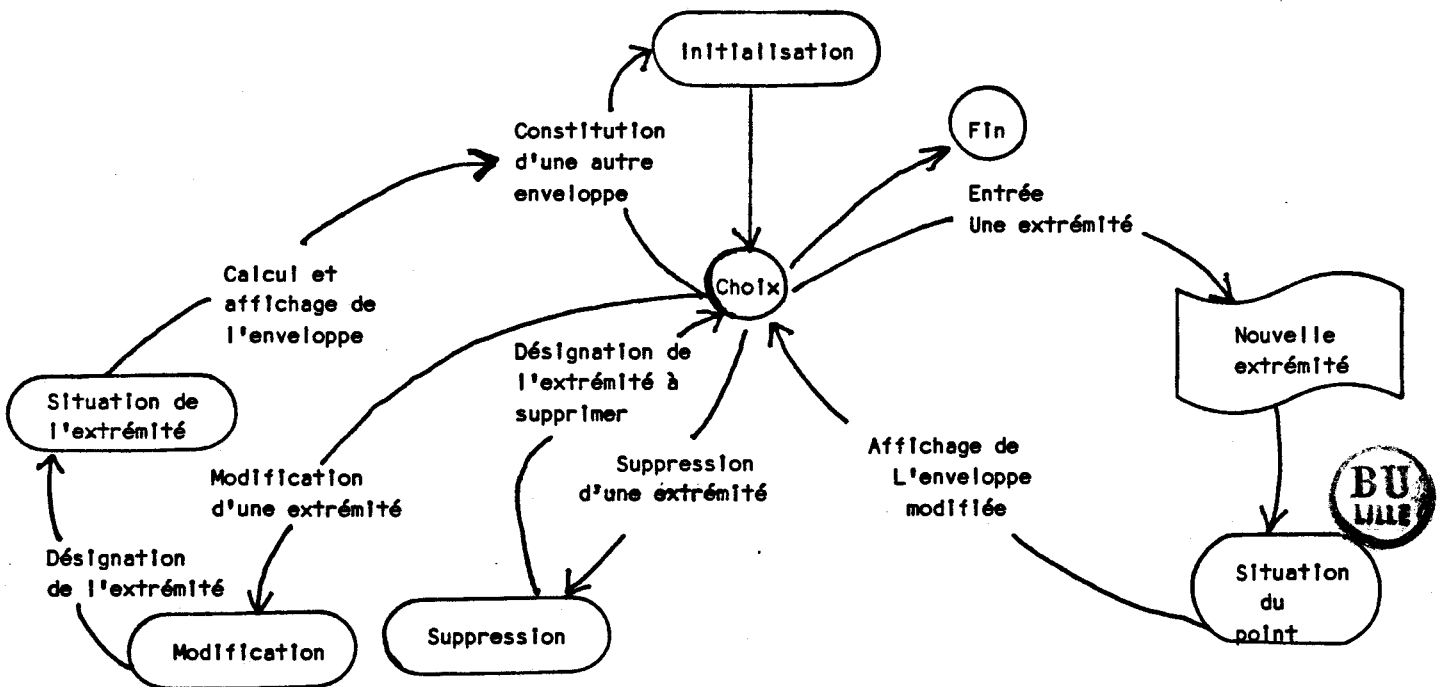


Fig 3.9 : Fabrication d'envelopes par les B-Splines.



Possédant l'enveloppe, il est alors facile de dessiner la tache correspondante. Les déformations qui lui sont appliquées, peuvent s'effectuer soit pendant, soit après son remplissage, à l'aide d'une couleur ou d'une texture de plus bas niveau. Pour certaines enveloppes, il est possible, si l'utilisateur le désire, d'entrer directement son contour avec le photostyle. Le reste des opérations demeurent inchangées.

A partir des taches qu'il a construites ou qu'il a sélectionnées dans une bibliothèque, l'utilisateur peut ensuite composer la texture qu'il souhaite. Pour cela, il dispose d'opérateurs qui offrent la possibilité de disposer sur l'écran des taches, avec possibilité de les superposer, de les mélanger ou d'en supprimer quelques unes.

### 3.4 - OPERATIONS SUR LES OBJETS DE BASE

#### 3.4.1 - Extraction d'une région

Outre les possibilités de composition d'objets de base que constituent les grains et les taches, un utilisateur doit pouvoir manipuler séparément ou globalement chacune de ces entités. Il doit pour cela, posséder des outils spécifiques pour chaque transformation. Pour réaliser ces opérations, nous utilisons un opérateur primordial, nommé **EXTRACTEXT**.

Il sert à repérer tous les endroits de la texture ou figure un niveau de gris donné (ou de couleur donnée) et possède quatre paramètres que nous avons appelés : matrice 1, matrice 2, point 1, point 2. Il suppose qu'une image est représentée par une matrice de points dont les éléments sont les valeurs du pixel (cas d'un système qui possède une mémoire de trame) : cette matrice est la matrice référencée matrice 1.

On lui associe une matrice de présence (matrice 2) qui indique, pour chaque emplacement, l'existence d'un niveau de gris particulier (celui de point 1, voir fig. 3.10). Les différentes fonctions travailleront sur cette matrice de présence et ne concerneront que les éléments auxquels sont associés un 1. Le quatrième paramètre (point 2), associé avec le paramètre point 1, marque l'endroit où seront implantés les 1 dans matrice 2 (coin bas gauche), correspondant au niveau de gris cherché. Il facilite notamment certaines translations d'objets.

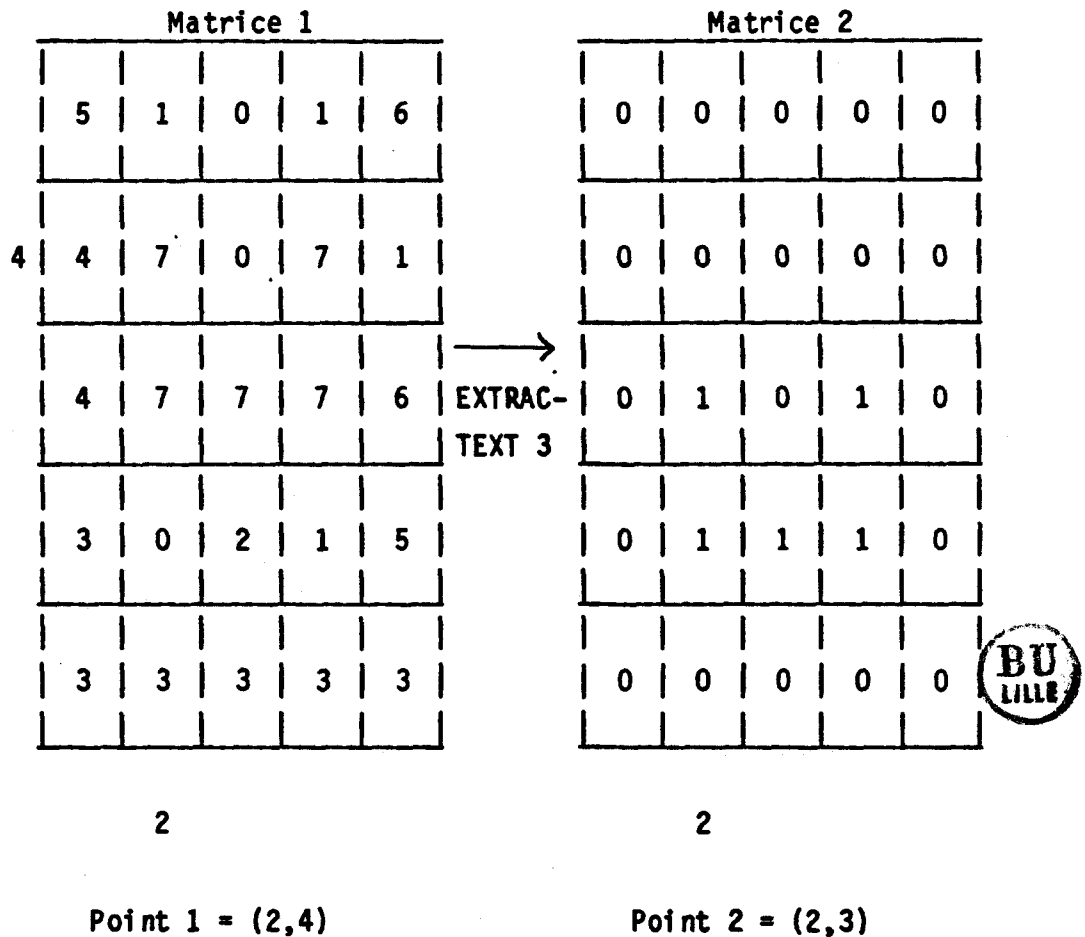


Fig. 3.10 : Opérateur EXTRACTEXT

Par la suite, nous omettrons de mettre les 0 dans les schémas qui illustrent les opérateurs, par souci de lisibilité.

### 3.4.2 - Opérateurs locaux

La fonction EXTRACTEXT (matrice 1, matrice 2, point 1, point 2) que nous venons de définir peut être utilisée par toute fonction qui considère tous les éléments d'une région donnée, quelles que soient leurs valeurs. Chaque fonction possède une ou plusieurs matrices en entrée et une matrice en sortie. Un remplissage des déplacements ou une recopie de régions ainsi que bien d'autres fonctions peuvent se réaliser à l'aide d'EXTRACTEXT. Ainsi, Schappo et Edmonds [Scp 81] ont créé un langage du type LOGO, basé sur une fonction similaire. Pour notre part, nous allons illustrer les possibilités d'utilisation de notre fonction EXTRACTEXT.

#### a) Remplissage

-----

Pour implémenter cette fonction, nous en utilisons une autre que nous appelons TRANSFERT. Elle remplace, par une valeur donnée, les éléments d'une matrice auxquels sont associées des valeurs non nulles de la matrice de présence correspondante. La fonction de remplissage peut alors être effectuée par l'algorithme suivant, si val désigne la valeur de remplissage :

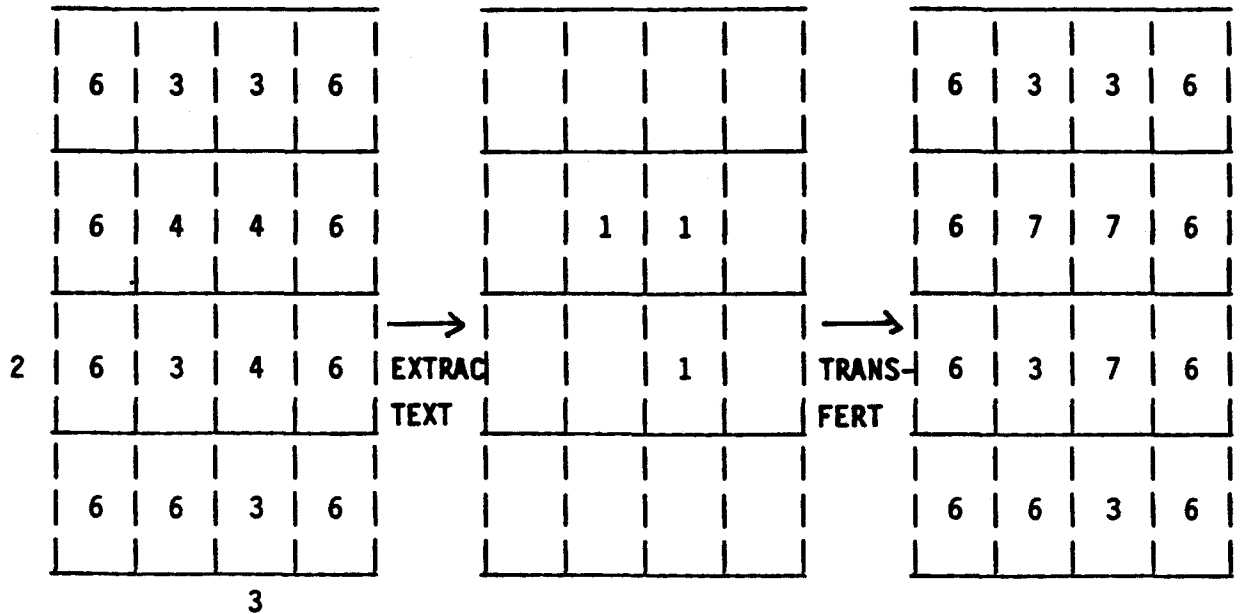
**Proc Remplir (matrice 1, point 1, val)**

**Début**

**EXTRACTEXT (matrice 1, matrice 2, point 1, point 1)**

**TRANSFERT (matrice 1, matrice 2, point 1, point 1, val)**

**fin**



matrice 1  
Point 1 = (3,2)  
val = 7

matrice 2

matrice 1

Fig. 3.11 : Opérateur REMPLIR.



b) Translation d'une région

-----  
La translation d'une région exige des traitements similaires à ceux de la fonction précédente. On utilise la fonction VALEUR (matrice 1, point 1) qui donne la valeur référencée par point 1 dans matrice 1.

**Procédure :** TRANSLATER (matrice 1, point 1, point 2, val)

**Début**

VAL1 = VALEUR (matrice 1, point 1)

REMLIR (matrice 1, point 1, VAL)

TRANSFERT (matrice 1, matrice 2, point 1, point 2, VAL)

**fin**

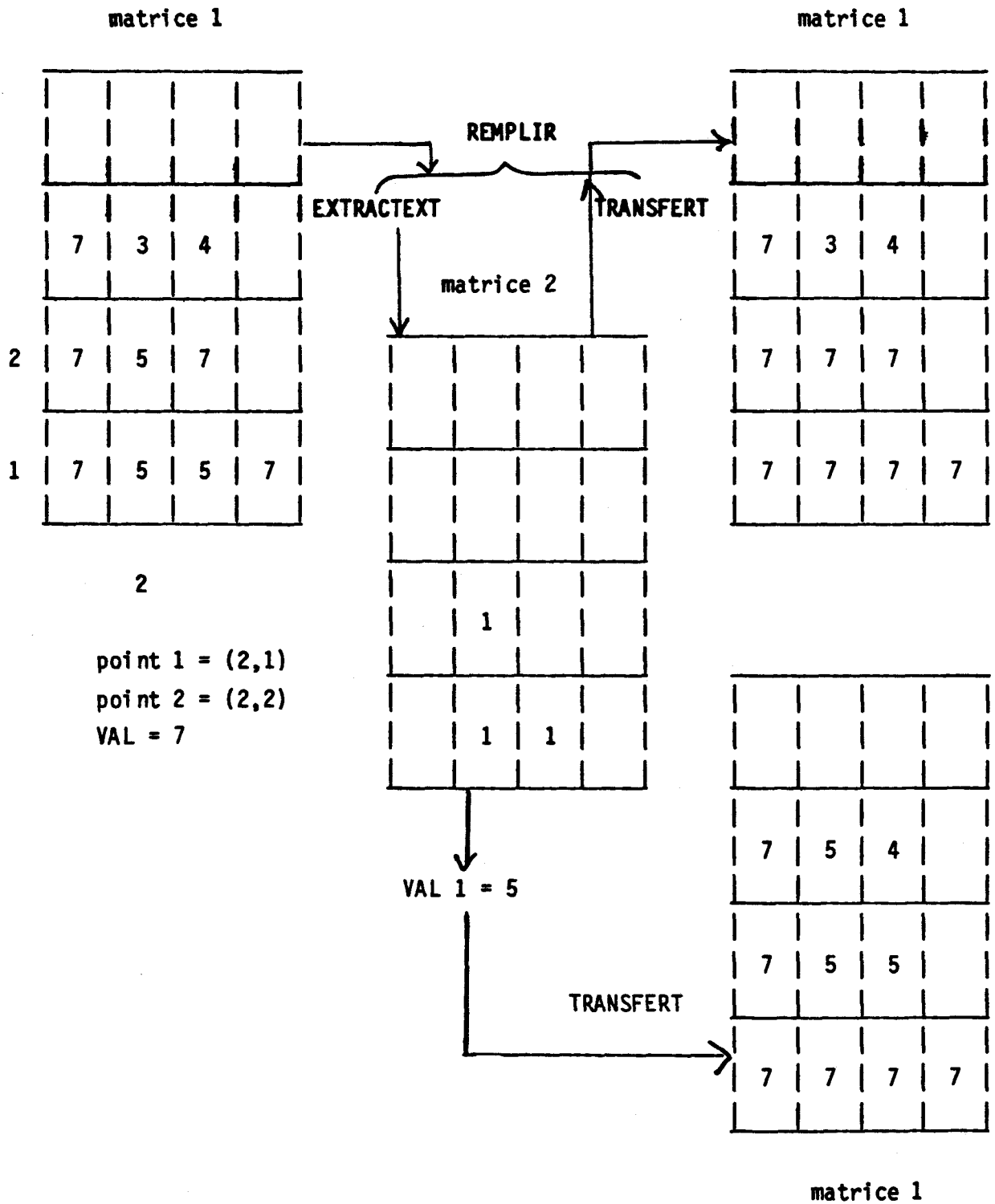


Fig. 3.12 : Opérateur tradlater.

## c) Recopie d'une région

Il est possible d'effectuer cette opération en prenant pour valeur de VAL, celle de point 1 comme paramètre de la fonction TRANSLATER. Toutefois, la définition d'un opérateur spécifique permet de la réaliser plus rapidement.

**Procédure :** COPIER (matrice 1, point 1, point 2)

**Début**

EXTRACTEXT (matrice 1, matrice 2, point 1, point 2)

VAL = VALEUR (matrice 1, point 1)

TRANSFERT (matrice 1, matrice 2, point 1, point 2, VAL)

**fin**

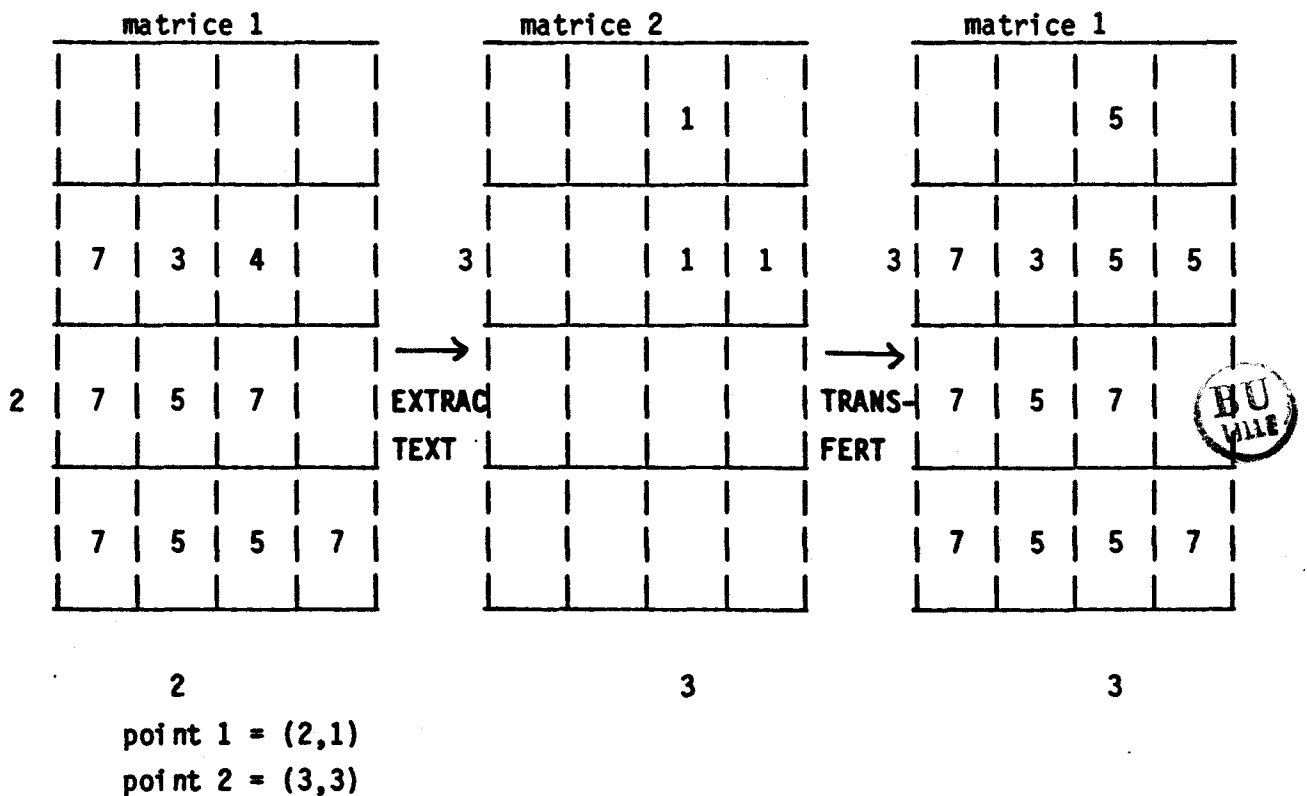


Fig. 3.13 : Opérateur COPIER.

## d) Extractions de régions particulières

-----  
 Les procédures suivantes permettent d'extraire une région contenue dans des régions données. Elles utilisent toutes, les sous-programmes suivants :

- ETENDRE : agrandit une région formée par un seul pixel.
- COMPRESSER : réduit une région à ses frontières sises sur un pixel
- TROUVER : localise le premier point par une recherche suivant les lignes de balayage
- DIFFERENCE : fait un ou exclusif entre deux matrices.

. Une première procédure permet d'extraire une région plongée dans une plus grande. Cette procédure peut sembler faire double emploi avec EXTRACTEXT. Elle est cependant très utile si l'on veut isoler des motifs de petites tailles.

PROCEDURE EXTRAIRE REGION DANS REGION (matrice 1, point 1)

## Début

EXTRACTEXT (matrice 1, matrice 2, point 1, point 1)

ETENDRE (matrice 2, matrice 3)

DIFFERENCE (matrice 4, matrice 2, matrice 3, point 1, point 1)

TROUVER (matrice 4, point 2)

REPLIR (matrice 4, point 2, 0)

TROUVER (matrice 4, point 2)

REPLIR (matrice 4, point 2, 1)

fin

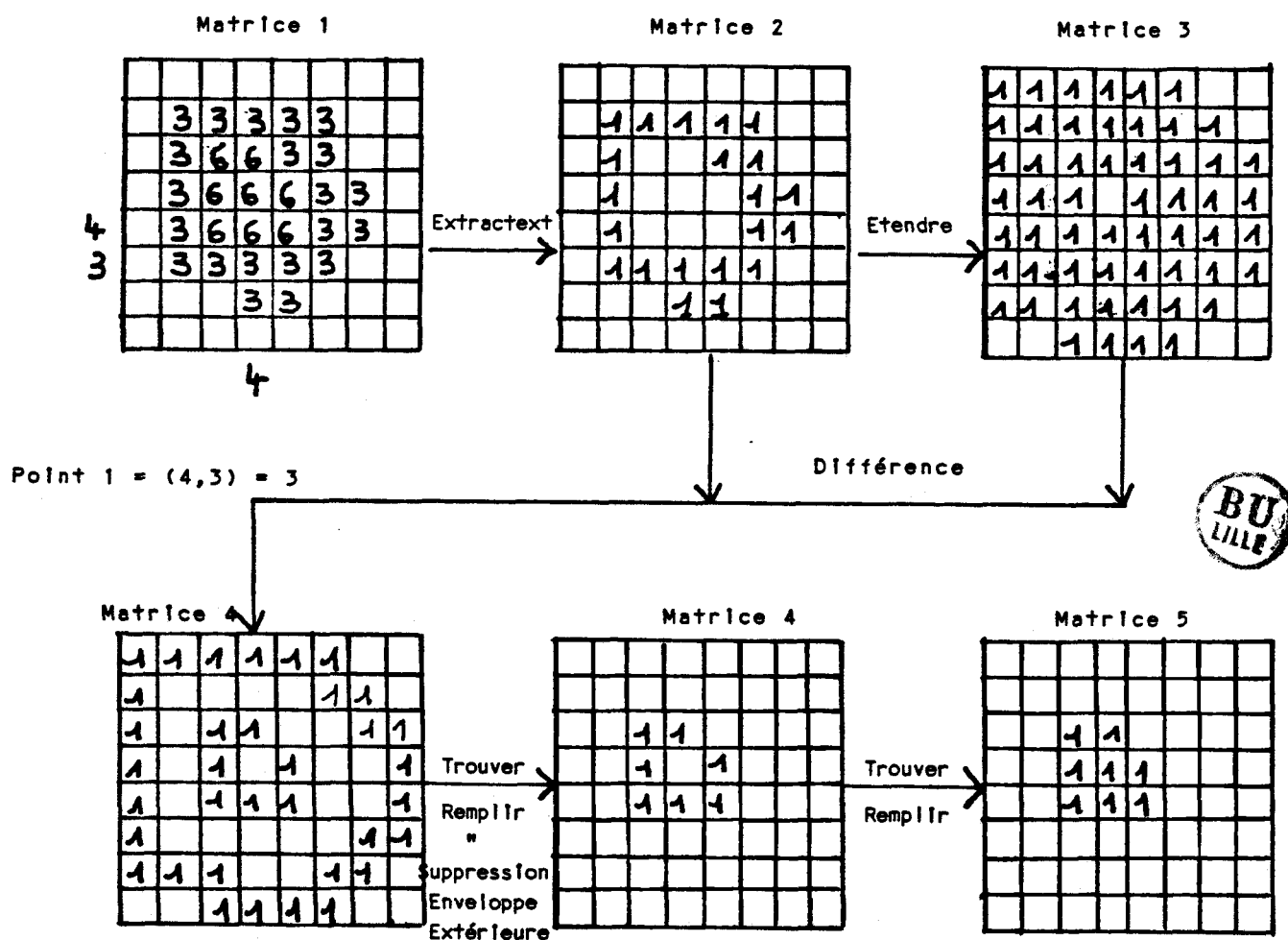


Fig. 3.14 : Opérateur EXTRAIRE REGION DANS REGION.



. L'utilisateur peut avoir besoin de manipuler des régions inclusent dans une autre. L'opérateur EXTRAIRE REGIONS DANS REGION permet alors de les extraire toutes (fig. 3.15), si l'on donne un point de la région concernée.

PROCEDURE EXTRAIRE REGIONS DANS REGION (matrice 1, point 1)

Début

EXTRACTEXT (matrice 1, matrice 2, point 1, point 1)

ETENDRE (matrice 2, matrice 3)

DIFFERENCE (matrice 4, matrice 2, matrice 3, point 1,  
point 1, point 1)

TROUVER (matrice 4, point 2)

EXTRACTEXT (matrice 4, matrice 5, point 2)

REEMPLIR (matrice 5, point 1, 1)

COMPRESSER (matrice 5, matrice 5)

DIFFERENCE (matrice 6, matrice 5, matrice 2, point 2,  
point 2, point 2)

fin

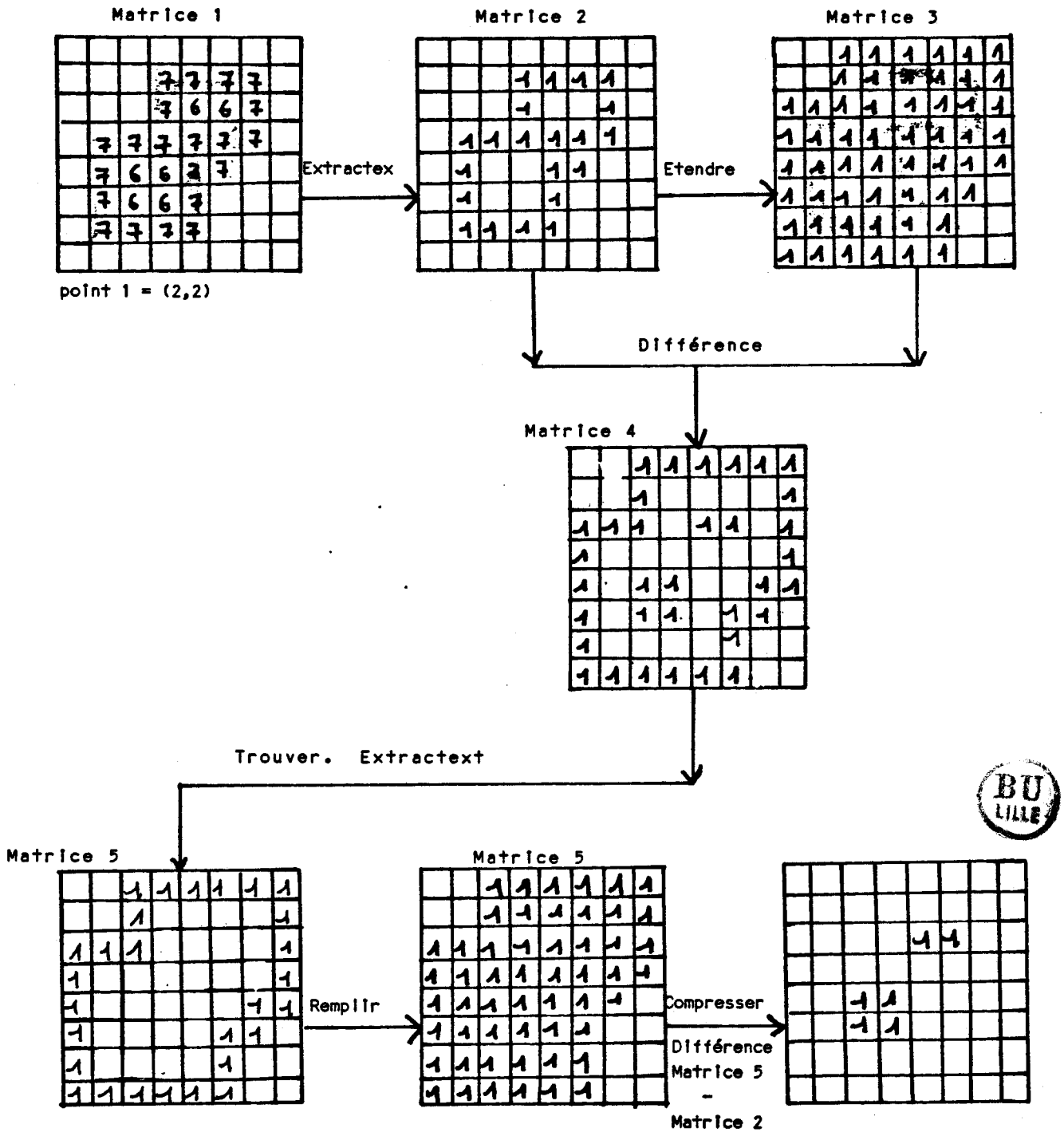


Fig. 3.15 : Opérateur EXTRAIRE REGIONS DANS REGION.

. La procédure suivante permet d'isoler chacune des régions qui ont une frontière commune avec une région donnée (fig. 3.16)

#### PROCEDURE EXTRAIRE LIMITROPHES

Début

EXTRACTEXT (matrice 1, matrice 2, point 1, point 1)

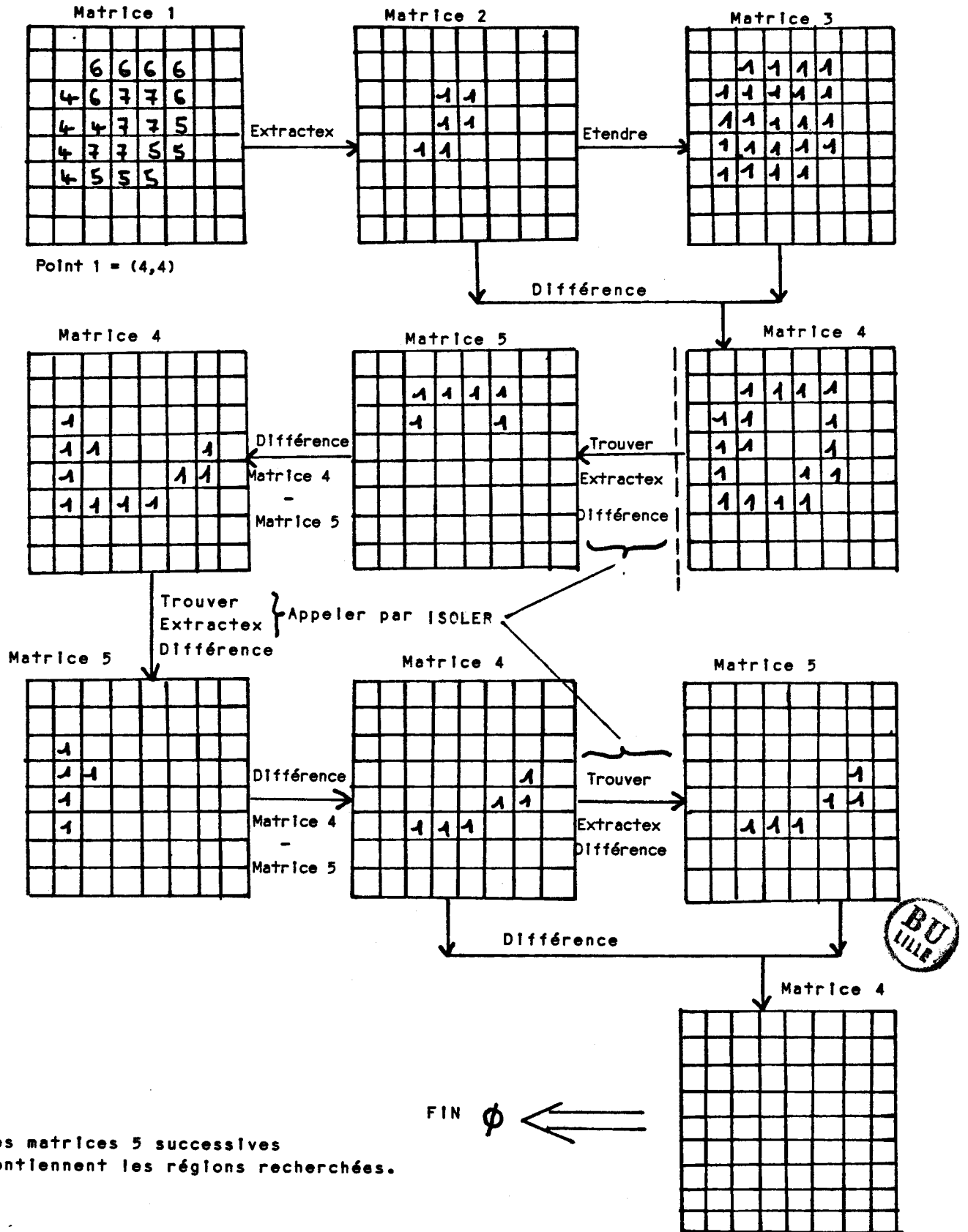
ETENDRE (matrice 2, matrice 3)

DIFFERENCE (matrice 4, matrice 2, matrice 3, point 1,  
point 1, point 1)

ISOLER (matrice 5, matrice 4, matrice 1)

fin

La procédure ISOLER peut s'écrire :



PROCEDURE ISOLER (matrice 5, matrice 4, matrice 1)

**Début**

TROUVER (matrice 4, point 1)

EXTRACTEXT (matrice 1, matrice 5, point 1, point 1)

DIFFERENCE (matrice 4, matrice 4, matrice 5, point 1,  
point 1, point 1)

Si (matrice 4 =  $\emptyset$ ) alors ISOLER (matrice 5, matrice 4,  
matrice 1)

**fin**

. On peut aussi vouloir travailler sur une région partiellement recouverte. Si l'on donne 1 point de cette région, la procédure EXTRAIRE. PARTIEL permet de l'obtenir (fig. 3.17).

PROCEDURE EXTRAIRE PARTIEL (matrice 1, point 1)

**Début**

EXTRACTEXT (matrice 1, matrice 2, point 1, point 1)

ETENDRE (matrice 2, matrice 3)

TROUVER (matrice 3, point 2)

EXTRACTEXT (matrice 1, matrice 4, point 2, point 2)

REPLIR (matrice 4, point 1, 1)

**fin**

A la fin de la procédure, la région recherchée sera repérée par la matrice 4.

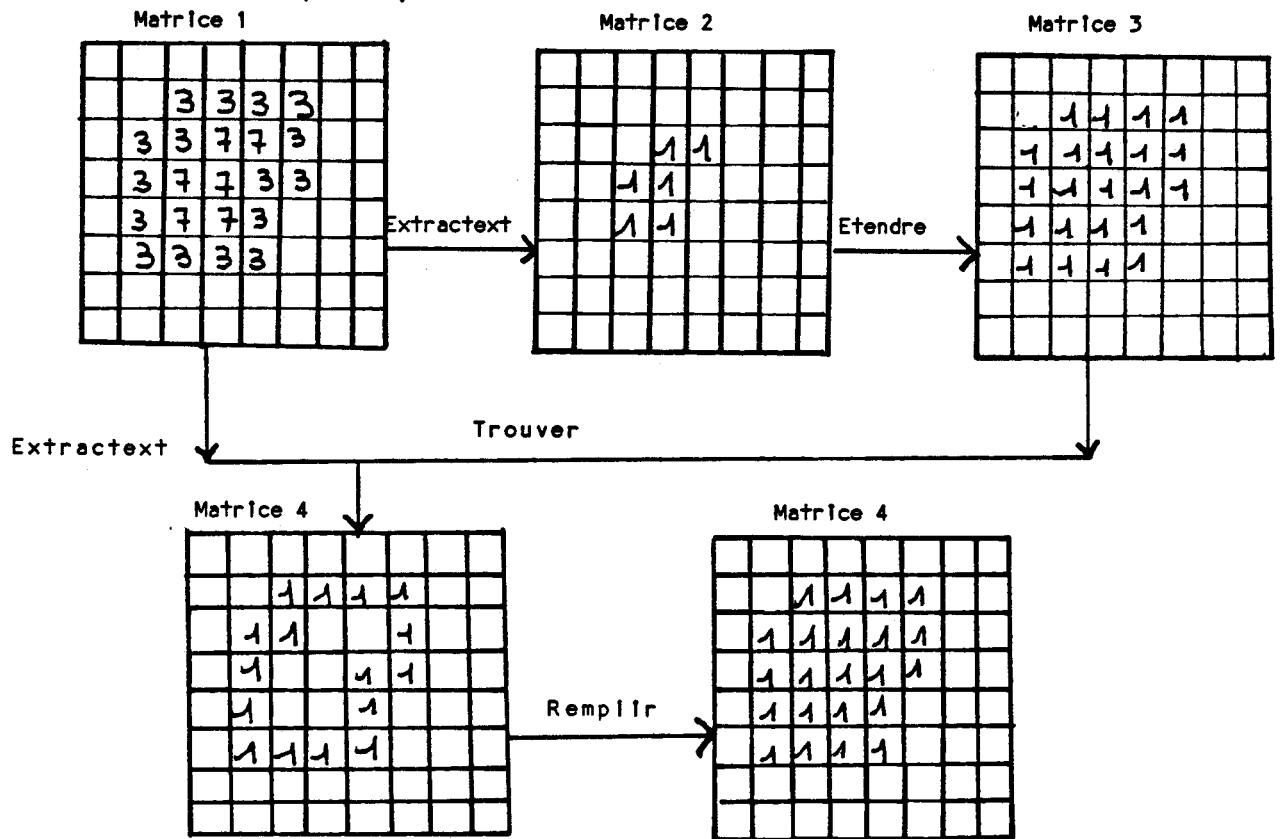


Fig. 3.17 : Opérateur EXTRAIRE.PARTIEL



#### f) Manipulations locales

-----

Les procédures que nous venons de décrire offrent la possibilité d'extraire des régions données (grains ou taches). Elles conviennent parfaitement pour un contexte interactif. Dans de nombreuses occasions le paramètre point 1 peut, par exemple, être acquis à l'aide du photostyle. Outre l'opération d'extraction, la matrice de présence permet de nombreuses transformations de la texture. Ayant ainsi isolé un ou plusieurs objets, il est alors très facile de les manipuler. On peut notamment changer leurs formes, leurs tailles, leurs orientations ou leurs aspects (couleur, niveau de gris).

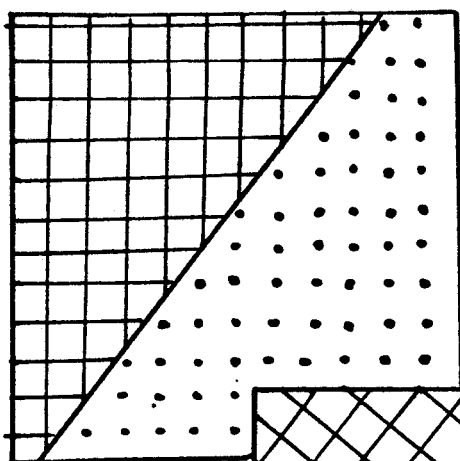
### 3.4.3 - Opérateurs globaux

Les matrices de présence, résultats d'opérations d'extraction, peuvent aussi être utilisées par des opérateurs travaillant globalement sur un ensemble de régions (grains, taches ou grains et taches). Ils ont la possibilité soit de les manipuler aléatoirement (ce qui revient à l'utilisation d'opérateurs locaux), soit de leur faire tous subir une même transformation. Parmi les opérations réalisables, on peut noter les identités, les isométries, les affinités et enfin, les similarités. Pour simplifier leur présentation, nous allons les illustrer par des motifs disposés selon des grilles (voir fig. 3.18).

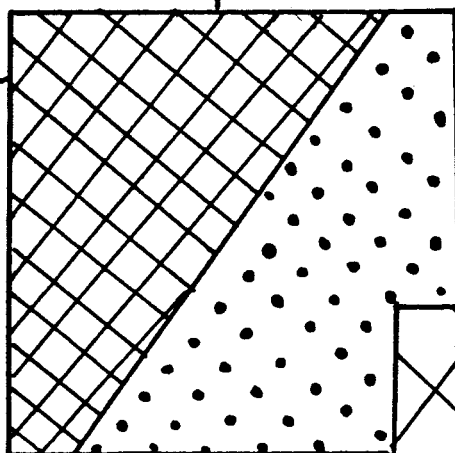
- . L'identité constitue la plus simple de ces opérations. Elle conserve les propriétés de la grille initiale et ne fait que dupliquer une partie de la texture.

- . L'isométrie imprime à l'ensemble une rotation. Elle a pour effet de changer d'orientation la texture. Le centre de la rotation est un point. Ce genre de transformation a été étudié par Castner et Robinson [Car 69] qui ont montré qu'elle donne beaucoup de propriétés visuelles différentes, à une figure.

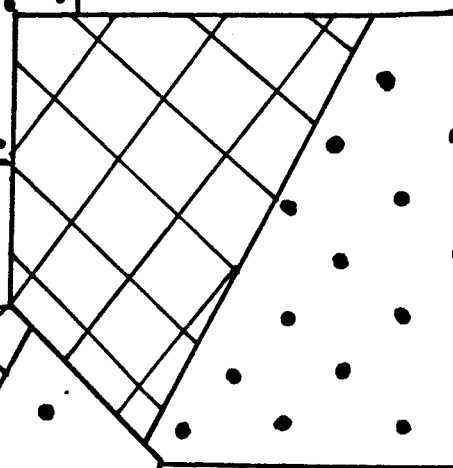
- . Dans une similitude, la taille des éléments varie. Le zoom (agrandissement d'une région donnée) est donc une similitude particulière (homothétie). Elle change le nombre de régions (grains ou taches) par unité de surface, et joue ainsi sur la densité. On peut donc dire qu'une similarité est l'un des facteurs qui contrôlent le degré de finesse d'une texture. Castner et Robinson ont fait, à ce sujet, les constatations suivantes :



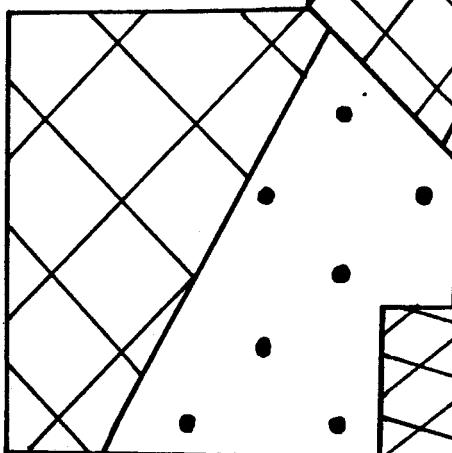
IDENTITE



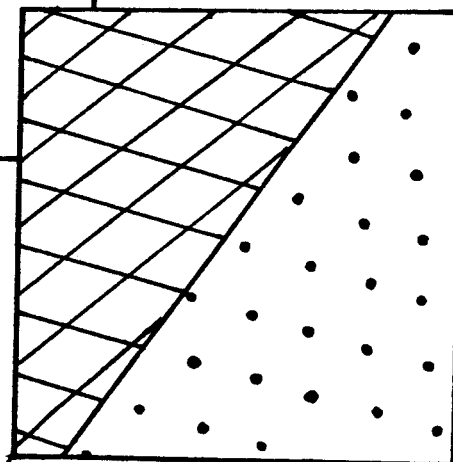
ISOMETRIE



SIMILITUDE



SIMILITUDE



AFFINITE



Fig. 3.18 : Opérateurs globaux



- des régions fabriquées à l'aide de points répartis sur plus de trente lignes par centimètre ne seront pas perçues comme des textures. Celles qui sont composées par moins de quinze lignes par centimètre représente des textures très grossières. Entre ces deux valeurs limites, on trouve tous les degrés de rugosité d'une texture.

. L'affinité a enfin la propriété de conserver les distances entre régions, tout en laissant la possibilité de les déformer. En appliquant une affinité sur une grille, on crée des figures triangulaires. Elle maintient le parallélisme entre côtés des cellules, mais la forme de celles-ci est plus un parallélogramme qu'un carré. Ainsi, des éléments placés au centre d'une cellule seront disposés suivant une répartition triangulaire. L'affinité offre donc la possibilité de travailler dans un autre repère que le repère cartésien habituel.

### 3.5 - CONCLUSION

Nous pensons qu'avec les différentes fonctions introduites tout au long de ce chapitre, un opérateur travaillant avec son intuition peut produire les textures qui lui conviennent. Toutefois, tout comme en peinture, des gouaches, une toile et un pinceau ne suffisent pas, à eux seuls, pour peindre la Joconde, notre système exige pour être utilisé un certain sens artistique et surtout un certain apprentissage. Pour faciliter la tâche de l'utilisateur, toutes ces fonctions peuvent être regroupées au sein d'un menu hiérarchique comprenant plusieurs niveaux. On devra trouver, en particulier, un menu de formes graphiques prédéfinies, un menu de textures précalculées ainsi qu'un menu comportant des fonctions du type de celles que nous avons décrites.

## CHAPITRE 4

### UN PROCESSUS DE GENERATION AUTOMATIQUE D'UNE TEXTURE DE BASE

#### 4.1 - INTRODUCTION

Une façon d'éviter le travail fastidieux que peut constituer l'acquisition d'une texture composée de grains, est de trouver un processus qui fasse automatiquement cette opération. Nous nous sommes donc penchés sur les méthodes statistiques pour tenter d'en trouver une, qui réponde à ce besoin précis. Ce type de méthode suppose qu'une texture est fabriquée à l'aide d'une matrice de points (appelée souvent champ de texture) auxquels on attribue une valeur choisie parmi un ensemble de niveaux de gris ou de couleurs. Un processus stochastique se définit dans ces conditions comme une fonction de l'ensemble des couples d'entiers naturels (coordonnées des points du champ de texture) vers un ensemble, noté  $G$ , de niveaux de gris (ou de couleurs).

processus aléatoire  $X : \mathbb{N}^2 \rightarrow G$

$(x,y) \rightarrow g$

Bien que qualifiées d'aléatoires, les textures que peuvent produire ces méthodes, doivent comporter un niveau d'organisation adéquat. Le problème est donc de trouver un processus rendant bien compte des relations qui existent entre les différents niveaux de gris des points d'une texture.

Il s'agit, autrement dit, de bien contrôler le processus statistique décrit dans ce chapitre (méthode proposée par Schmitt [Sch] et Massaloux [Mas]).

La méthode que nous avons reprise et adaptée à un contexte interactif utilise, dans cette optique la notion de mémoire qui apparaît dans les chaînes de Markov. En effet, dans une chaîne de Markov d'ordre  $n$ , un état dépend des  $n$  états qui le précèdent. Puisque le champ de la texture présente un caractère bi-dimensionnel, alors que celui des chaînes de Markov est monodimensionnel, il est nécessaire d'employer la notion de chaîne markovienne de façon particulière. Cette méthode constitue, à ce titre, un exemple pour ce genre de mécanisme qui utilise un processus Markovien comme un générateur spatial, balayant séquentiellement le plan. Il aurait été également possible d'ajouter une dimension temporelle du type "jeu de la vie" sur un tableau 2D. Dans ce cas, la génération d'un point considérée à l'instant  $t$ , dépendrait de la configuration et de ce point et de ses voisins à l'instant  $(t-1)$ . On aurait :

$$T(I,J)_{t_k} = f(\text{voisins et } T(I,J)_{t_{k-1}}).$$

#### 4.2 - DEFINITION d'UNE DPJ

Le contrôle de statistique par ce modèle se fait dans un voisinage rectangulaire de  $u \times v$  points que l'on nommera fenêtre. Si nous supposons que nous disposons de  $G$  niveaux de gris, cette fenêtre aura  $G^{uv}$  configurations possibles. A chacune de ces configurations, nous pouvons associer une probabilité qui donne la fréquence de son utilisation au cours de l'élaboration de la texture. La DPJ ou "distribution de probabilités jointes" se définit dans ces conditions, comme un tableau regroupant toutes ces valeurs. Puisqu'il s'agit de probabilité, la somme de tous les éléments du tableau vaut un.

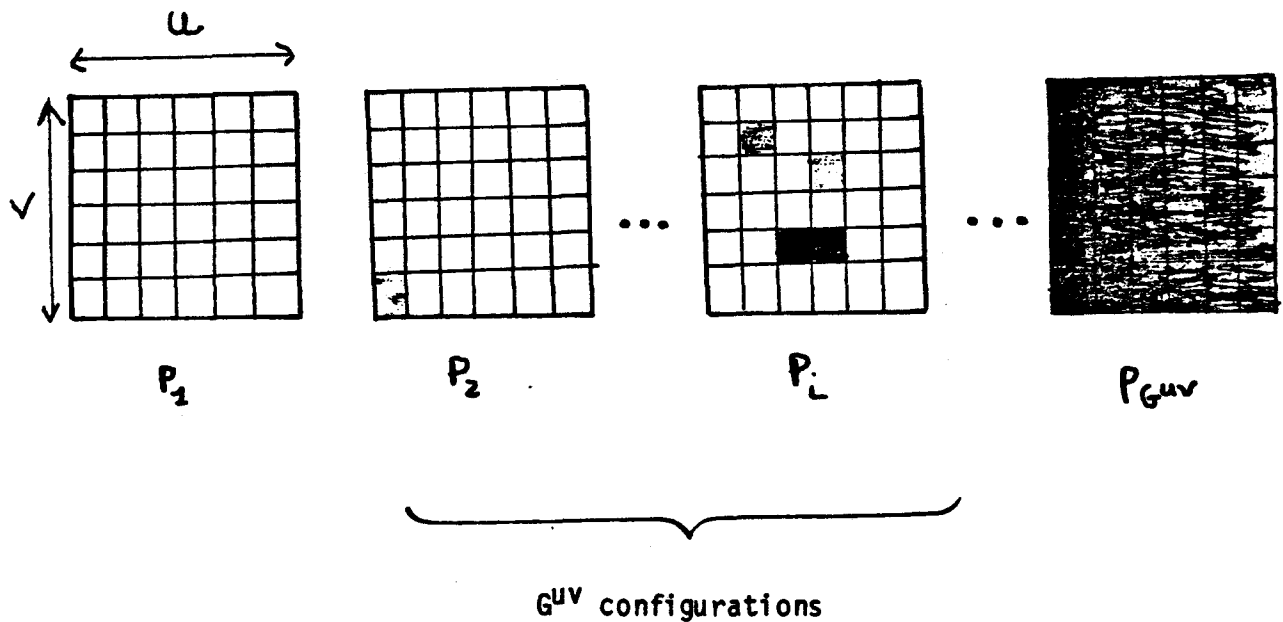


Fig. 4.1 Elements de la DPJ

Nous devons souligner que la donnée des valeurs de la DPJ caractérise une et une seule texture. Il existe, par conséquent, une bijection de l'ensemble de toutes les DPJ vers un sous ensemble des textures. On ne peut pas affirmer que l'ensemble d'arrivée de cette bijection corresponde exactement à l'ensemble des textures tout entier ; une étude théorique pourrait peut être résoudre ce problème.

Les probabilités de la DPJ constituent les paramètres du processus qui donne naissance aux textures de base. Un utilisateur peut alors les manipuler à son aise. On peut aussi penser à une interaction directe sur le modèle, à condition cependant de posséder un matériel performant. Dans ce cas, on crée directement des textures qui possèdent l'aspect souhaité. Il faut pour cela comprendre parfaitement les corrélations existantes entre les valeurs de la DPJ et l'aspect correspondant des textures. Le dernier chapitre étudiera ces possibilités.

### 4.3 - PRESENTATION DE LA METHODE DE SYNTHESE

#### 4.3.1 - Notation

Nous supposons que la texture générée comportera  $T$  lignes de  $N$  colonnes. Nous conviendrons dans toute la suite de représenter chacun des points du champ de la texture par la variable aléatoire qui lui est associée. Nous noterons cette variable par une lettre majuscule, tandis que ses réalisations figureront en lettres minuscules. D'autre part, par souci de simplification, nous confondrons les notations  $P(X_m = x_n)$  et  $P(x_m)$ .

$$P(X_n = x_n) = P(x_n)$$

Si  $X_n$  désigne la variable aléatoire et  $P(\ )$  la probabilité pour qu'elle soit dans un état  $x_n$ .

#### 4.3.2 - Principe

La donnée d'une fenêtre  $u \times v$  et des probabilités de la DPJ permet de synthétiser une texture. Le recouvrement du champ de la texture à l'aide de cette fenêtre pose un problème délicat quant au choix pour ses différents placements. Pour résoudre ce problème, nous opérons en deux étapes. Dans un premier temps, les  $v$  premières lignes du bas de la texture sont produites. Cette opération s'effectue grâce à une première chaîne de Markov, dite "chaîne de Markov horizontale" (cas (a) de la fig. 4.2). Nous la dénommons ainsi, parce que l'on calcule successivement de la gauche vers la droite, les différentes configurations des

colonnes de  $v$  points qui représentent les états de la chaîne. Les  $v$  premières lignes obtenues, il est alors possible de calculer ligne après ligne le reste du champ de la texture. On utilise pour cela une seconde "chaîne de Markov verticale" (cas (b) de la fig. 4.2).

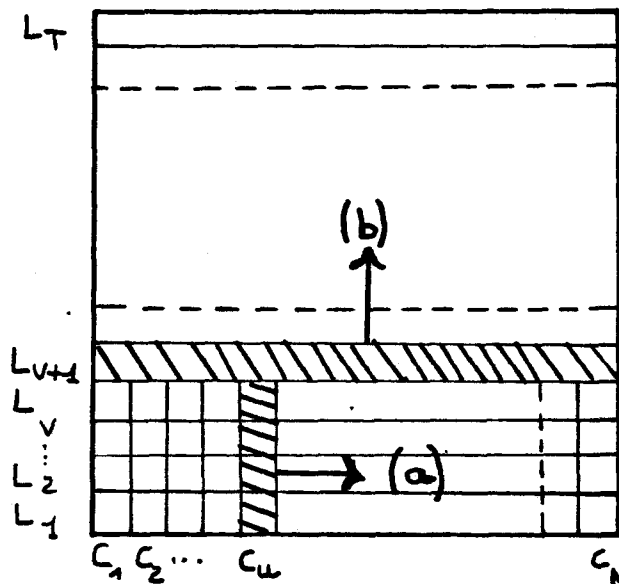


Fig. 4.2 : Principe de la méthode de synthèse.

On remarque que ce processus n'est pas isotrope. L'absence de cette propriété résulte, comme nous l'avons déjà souligné, de la difficulté de recouvrir de manière cohérente un domaine à l'aide d'une fenêtre rectangulaire. Le choix de la forme et de la taille de la fenêtre est un critère important pour l'établissement de relations avec les caractéristiques propres d'une texture.

#### 4.4 - METHODE DE GENERATION

Avant de décrire la méthode de synthèse dans le cas général, nous al-

lons d'abord le faire dans un cas particulier, pour en faciliter la compréhension. Il s'agit du cas où l'on dispose d'une fenêtre carrée de dimension  $2 \times 2$  et de deux niveaux de gris.

#### 4.4.1 - Exemple simple

Nous supposons que les deux niveaux de gris utilisés seront le noir et le blanc que nous coderons respectivement 1 et 0.

##### a) Génération des lignes du bas

-----

Nous synthétisons les deux premières lignes du bas conformément à ce qui a été dit dans le paragraphe 3.2. Ces lignes sont décomposées en  $N$  colonnes de deux points. Chacune de ces colonnes  $C_n$  sera formée par une variable aléatoire  $A_n$  associée au point appartenant à la ligne la plus basse et, par une variable aléatoire  $B_n$  associée au second point.

|       |       |       |     |       |     |       |
|-------|-------|-------|-----|-------|-----|-------|
| $L_2$ | $B_1$ | $B_2$ | ... | $B_n$ | ... | $B_N$ |
| $L_1$ | $A_1$ | $A_2$ | ... | $A_n$ | ... | $A_N$ |
|       | $C_1$ | $C_2$ |     | $C_n$ |     | $C_N$ |

Fig. 4.2 : Constitution des 2 premières lignes de la texture.

Une réalisation de  $C_n$  sera obtenue à partir des réalisations de  $A_n$  et de  $B_n$  de la façon suivante :

$$C_n = a_n + 2 b_n$$

$C_n$  pourra prendre une valeur de 0 à 3 en accord avec les différentes configurations présentées ci-dessous.



$$C_n = 0 \quad C_n = 1 \quad C_n = 2 \quad C_n = 3$$

Fig. 4.3 : Configuration d'une colonne

A l'aide des probabilités de deux colonnes distinctes, nous pouvons calculer la probabilité de la configuration que l'on obtient en plaçant les deux colonnes côte à côte. En procédant de la sorte pour toutes les combinaisons possibles de deux colonnes, nous obtenons l'ensemble des éléments de la DPJ. Ces probabilités appelées "loi du couple", serviront à exprimer les états et la matrice de transition des chaînes de Markov. Elles seront notées :

$$q^n(i,j) = p(C_{n-1} = i, C_n = j)$$

b) Définition de la chaîne de Markov horizontale

-----



\* Vecteurs d'état

-----

A chacune des colonnes définies dans le paragraphe précédent, on associe un vecteur  $\mu^n$ . Ses composantes fournissent les probabilités pour que la colonne soit dans une configuration donnée.  $\mu^n$  s'écrit donc :

$$\mu^n = (\mu^n(0), \mu^n(1), \mu^n(2), \mu^n(3)) \text{ avec } \mu^n(i) = P(C_n=i) \\ \forall i \in [0, 3]$$

Ce vecteur caractérise les états de la chaîne horizontale. En effet, nous déterminons l'état d'une colonne à l'aide de ce vecteur et d'un tirage aléatoire à quatre états. Nous utilisons dans ce but, une fonction aléatoire (ALEAT) uniformément répartie sur  $[0, 1]$ . Suivant la valeur prise par cette fonction nous aurons :

$$C_n = 0 \quad \text{si} \quad 0 \leq \text{ALEAT} \leq P(C_n=0)$$

$$C_n = 1 \quad \text{si} \quad P(C_n=0) < \text{ALEAT} \leq P(C_n=0) + P(C_n=1)$$

$$C_n = 2 \quad \text{si} \quad P(C_n=0) + P(C_n=1) < \text{ALEAT} \leq P(C_n=0) + P(C_n=1) + P(C_n=2)$$

$$C_n + 3 \quad \text{si} \quad P(C_n=0) + P(C_n=1) + P(C_n=2) < \text{ALEAT} \leq 1$$

\* Matrice de transition

-----

On passe d'un vecteur d'état de la chaîne au suivant en utilisant une matrice de transition M.

$$(1) \mu^n = \mu^{n-1} M$$

Dans le cas de chaînes de Markov d'ordre 1 (correspondant

au cas de textures homogènes) on définit simplement cette matrice par son terme général :

$$m(i,j) = P(C_n=j / C_{n-1} = i)$$

Pour définir complètement la chaîne horizontale, il apparaît alors que l'on doit expliciter le vecteur d'état initial ainsi que les termes de la matrice de transition.

\* Expressions de  $\mu^1$  et de  $m(i,j)$

-----  
Le théorème des probabilités totales permet de définir  $\mu^1$ .

$$\begin{aligned} \mu^1(i) &= P(C_1 = i) = \sum_{j=1}^3 P(C_0=j, C_1=i) \\ &= \sum_{j=1}^3 q^1(i,j) \end{aligned}$$

De même, ce théorème et la formule de Bayes permettent de donner une expression pour le terme général de la matrice de transition.

$$m(i,j) = P(C_n=j / C_{n-1}=i) = \frac{P(C_{n-1}=i, C_n=j)}{P(C_{n-1}=i)}$$

$$\text{donc } m(i,j) = \frac{q^n(i,j)}{\mu^{n-1}(i)}$$

Une hypothèse importante permet de simplifier ces résultats ; il s'agit de la stationnarité. Un processus markovien est par définition stationnaire lorsque sa loi temporelle, à priori, est invariante dans le temps (voir annexe ). Si on désigne  $(X_n)$  un tel processus, cette propriété signifie aussi que pour tout  $n$  sa loi temporelle  $P(X_p, X_{p+1}, \dots, X_{p+n-1})$  est

indépendante de  $P$ . Dans le cas qui nous intéresse, cette propriété traduit notamment le fait que les lois du couple  $q^n(i,j)$  sont indépendantes de  $n$ . On peut donc écrire :

$$\forall n_1, n_2 \in \mathbb{N} \quad q^{n_1}(i,j) = q^{n_2}(i,j) = q(i,j)$$

Donc le terme initial  $\nu^1$  et les termes  $m(i,j)$  de la matrice de transition peuvent s'écrire plus simplement.

$$\nu^1(i) = \sum_{j=1}^3 q(i,j)$$

$$\text{et} \quad m(i,j) = \frac{q(i,j)}{\nu^n(i)}$$

#### REMARQUE

Dans le cas où  $\nu^n(i)$  serait nul, le terme  $m(i,j)$  sera nul également.

L'invariance du vecteur d'état est une autre conséquence de la définition de la stationnarité. L'équation (1) implique que l'on a donc la relation :

$$\nu^1 = \nu^1 M$$

En d'autres termes cela signifie que l'on a :

$$\sum_{j=0}^3 q(i,j) = \sum_{j=0}^3 q(j,i)$$

Cette relation traduit le fait que les colonnes de droite et de gauche d'une fenêtre 2 x 2 ont les mêmes probabilités.

### c) Génération des autres lignes

-----

#### \* Procédé normal

-----

Pour décrire ce deuxième processus, nous utiliserons les mêmes notations que dans les précédents paragraphes. Les lignes du champ de la texture feront office de variables aléatoires. Les vecteurs d'états seront donc définis par les probabilités de toutes leurs configurations possibles. Comme dans la chaîne horizontale, nous nous intéresserons aux lois du couple  $P(l_t, l_{t+1})$ ,  $l_t$  et  $l_{t+1}$  désignant les états de deux lignes successives. Ces probabilités jouent le même rôle pour la chaîne verticale que celui des éléments de la DPJ pour la chaîne horizontale. Avec les mêmes conditions de stationnarité, nous pouvons écrire que la chaîne verticale est définie par :

\* son premier élément  $P(l_1) = \sum_{l_2} P(l_1, l_2)$

\* la donnée du terme général de la matrice de transition.

$$P(l_{t+1}/l_t) = \frac{P(l_t, l_{t+1})}{P(l_1)} \quad \text{si } P(l_1) \neq 0$$

$$= 0 \quad \text{sinon}$$

Nous pouvons penser agir à ce niveau exactement comme dans le paragraphe précédent en calculant l'ensemble des termes de la matrice de transition. Il est possible, en effet, d'exprimer la loi d'un couple en fonction des éléments de la DPJ.

Considérons le couple de lignes  $(\lambda_t, \lambda_{t+1})$  et notons  $A_n$  les éléments de la ligne  $\lambda_t$  et  $B_n$  ceux de  $\lambda_{t+1}$ . Grâce à la formule de Bayes et aux propriétés de la chaîne horizontale nous pouvons écrire :

$$P(\lambda_1, \lambda_2) = P \left( \begin{array}{|c|c|} \hline b_1 & b_2 \\ \hline a_1 & a_2 \\ \hline \end{array} \right)$$

$$= P \left( \begin{array}{|c|} \hline b_1 \\ \hline a_1 \\ \hline \end{array} \right) \times P \left( \begin{array}{|c|} \hline b_2 \\ \hline a_2 \\ \hline \end{array} / \begin{array}{|c|} \hline b_1 \\ \hline a_1 \\ \hline \end{array} \right) \times \dots \times P \left( \begin{array}{|c|} \hline b_n \\ \hline a_n \\ \hline \end{array} / \begin{array}{|c|} \hline b_{n-1} \\ \hline a_{n-1} \\ \hline \end{array} \right)$$

$$\text{avec } P \left( \begin{array}{|c|} \hline b_i \\ \hline a_i \\ \hline \end{array} / \begin{array}{|c|} \hline b_{i-1} \\ \hline a_{i-1} \\ \hline \end{array} \right) = \frac{q(i-1, i)}{\mu^1(i)}$$

$$\text{et } P(c_1) = \sum_{j=0}^3 q(c_1, j)$$

et de façon plus synthétique :

$$P(\lambda_1, \lambda_2) = \mu^1(c_1) \times m(c_1, c_2) \times \dots \times m(c_{n-1}, c_n) \quad (2)$$

Cette façon de procéder se révèle cependant être fastidieuse. Pour s'en rendre compte, il suffit de constater que chaque ligne a  $2^N$  configurations possibles. Par conséquent,

pour définir la matrice de transition de la chaîne verticale, il faut calculer  $2^{2N}$  termes du type (2). L'emploi d'une méthode strictement analogue à celle du paragraphe précédent n'est, de ce fait, pas envisageable.

Au cours de la génération d'une nouvelle ligne, nous ne calculerons que les termes de la matrice de transition strictement nécessaires. Leur nombre étant encore élevé (de l'ordre de  $(T-2)2^N$ ), il est encore possible de la diminuer notablement. On utilise pour cela les propriétés de la chaîne horizontale. Le processus employé génère notamment chaque nouvelle ligne, point par point, en fonction de l'état de la ligne qui la précède.

\* Génération point par point

-----

Nous appelons  $\mathcal{L}_t = (a_1, a_2, \dots, a_n)$  (avec  $2 \leq t < T$ ) la dernière ligne générée et  $\mathcal{L}_{t+1} = (b_1, b_2, \dots, b_n)$  la ligne en cours de génération. La génération de cette ligne se déroule en deux étapes.

1ère étape

Pour  $n$  variant de 1 à  $N$ , nous calculons récursivement les termes suivants :

$$R_n(b_n) = P(b_n/a_1, a_2, \dots, a_n) \quad (3)$$

$$\text{et } S_n(b_n, b_{n+1}) = P(b_n/a_1, a_2, \dots, a_{n+1}, b_{n+1}) \quad (4)$$

$$= P(b_n/\mathcal{L}_t, b_{n+1}, b_{n+2}, \dots, b_N)$$

Ce calcul se fait de la façon suivante :

. Pour  $n = 1$   $R_1(b_1) = P(b_1/a_1) = \frac{P(a_1, b_1)}{P(a_1)}$

donc  $R_1(b_1) = \frac{\sum_{j=0}^3 q(a_1 + 2b_1, j)}{\sum_{j=0}^3 \sum_{i=0}^1 q(a_1 + 2i, j)}$

. Pour  $n > 1$

Nous déduisons  $S_n$  et  $R_{n+1}$  à partir de  $R_n(b_n)$  en utilisant la probabilité conditionnelle intermédiaire  $T_n$ .

$$T_n(b_n, b_{n+1}) = P(b_n, c_{n+1}/a_1, a_2, \dots, a_n) \quad (5)$$

soit  $T_n(b_n, b_{n+1}) = P\left( \begin{array}{|c|c|} \hline b_n & b_{n+1} \\ \hline \end{array} \middle/ \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline a_1 & \dots & a_n & \end{array} \right)$

Or, si l'on utilise les propriétés de la chaîne de Markov horizontale sur les rangées  $(a_i)$  et  $(b_i)$  on a :

$$P(a_1, \dots, a_{n-1}, c_n, c_{n+1}) = P(c_{n+1}/c_n) \times P(a_1, \dots, a_{n-1}, c_n)$$

donc  $T_n(b_n, b_{n+1}) = m(c_n, c_{n+1}) \times R_n(b_n) \quad (6)$

A partir des définitions (3) et (4) de  $R_n$  et de  $S_n$ , nous pouvons alors calculer  $S_n$  et  $R_{n+1}$ .

$$S_n(b_n, b_{n+1}) = \frac{T_n(b_n, b_{n+1})}{\sum_{i=0}^1 T_n(i, b_{n+1})} \quad (7)$$

$$\text{et } R_{n+1}(b_{n+1}) = \frac{\sum_{i=0}^1 T_n(i, b_{n+1})}{\sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 T_n(i, j)} \quad (8)$$

On calcule ainsi  $2N$  probabilités  $R_n$  et  $4(N-1)$  probabilités  $S_n$ .

### 2ème étape

Ce procédé respecte la chaîne de Markov verticale, c'est-à-dire les probabilités de transition  $P(l_{t+1}/l_t)$ .

$$P(l_{t+1}/l_t) = P(b_N/l_t) \times P(b_{N-1}/l_{tb_N}) \times \dots \times P(b_1/l_{tb_2 \dots b_N})$$

Pour  $n$  décroissant de  $N$  à  $1$ , il est maintenant possible de calculer récursivement chaque  $b_n$  de la ligne  $l_{t+1}$ .

\*  $b_n$  est d'abord généré aléatoirement à l'aide des deux probabilités  $P(b_n/l_t)$ ,  $b_n$  valant  $0$  ou  $1$ . Ces dernières sont, en fait, des probabilités du type  $R_n(b_n)$  que l'on a déjà définies au cours de la première étape.

\*  $b_{n-1}$  est ensuite généré à l'aide des probabilités  $P(b_{n-1}/l_{tb_n})$  avec  $b_{n-1} = 0$  ou  $1$ . Ces probabilités sont en fait les probabilités  $S_{N-1}(b_{N-1}, b_N)$  que l'on a également déjà calculées.

On procède ainsi pour tout  $n$  supérieur ou égal à  $1$ .

La ligne  $l_{t+1}$  étant complète, on recommence ce processus pour obtenir les autres lignes. On s'arrête lorsque toute la texture est obtenue.



#### 4.4.2. - Cas général

La généralisation de la méthode se fait sans apport de problèmes théoriques supplémentaires. Seules les notations changent et les principes généraux qui figuraient dans l'exemple restent.

Pour générer la texture, nous supposons que nous disposons d'une fenêtre de dimension  $u \times v$  et de  $G$  niveaux de gris.

Les colonnes élémentaires  $C_n$  ( $n \in \overline{1, N}$ ) sont maintenant composées de  $v$  points.  $B_n$  reste le point situé au sommet de la colonne, alors que  $A_n$  désignera cette fois les  $(v-1)$  autres points. Les réalisations de  $C_n$  seront alors codées :

$$C_n = a_n + G^{v-1}b_n \quad \text{avec} \quad a_n \in \overline{0, G^{v-1} - 1}$$

$$b_n \in \overline{0, G}$$

##### a) Génération des $v$ premières lignes

-----

Cette génération se réalise à l'aide d'une chaîne de Markov d'ordre  $(u-1)$ . Un état de la chaîne est représenté par les états de  $(u-1)$  colonnes successives.

REMARQUE : Cela revient à dire que la chaîne de Markov d'ordre  $(u-1)$  est ramenée à une chaîne d'ordre simple.



Les éléments de la JPD seront donc de la forme :

$$q(i_1, i_2, \dots, i_u) = P(C_{n-u+1} = i_1, C_{n-u+2} = i_2, \dots, C_n = i_u)$$

$$\forall (i_1, i_2, \dots, i_u) \in \overline{[0, G^V - 1]}^u$$

De même, le vecteur d'état s'écrit :

$$\mu^n(i_1, i_2, \dots, i_{u-1}) = P(C_{n-u+2} = i_1, \dots, C_n = i_{u-1})$$

$$\forall (i_1, \dots, i_{u-1}) \in \overline{[0, G^V - 1]}^{u-1}$$

La chaîne horizontale (H) est définie par les données du vecteur d'état initial et de la matrice de transition.

$$\mu^1(i_1, i_2, \dots, i_{u-1}) = \sum_{i_u=0}^{G^V-1} q(i_1, i_2, \dots, i_{u-1}, i_u)$$

$$\forall (i_1, i_2, \dots, i_{u-1}) \in \overline{[0, G^V - 1]}^{u-1}$$

. Terme général de la matrice de transition.

Il s'écrit :

$$m((i_1, i_2, \dots, i_{u-1})(i'_1, i'_2, \dots, i'_{u-1}))$$

En raison du recouvrement des états, cette matrice contient un grand nombre de zéros. De ce fait, on utilisera une matrice de transition condensée de dimension  $G^{(u-1)} \times G^V$  et d'élément général :

$$m((i_1, i_2, \dots, i_{u-1}), j) = P(C_n = j / C_{n-u+1} = i_1, C_{n-u+2} = i_2, \dots, C_{n-1} = i_{u-1})$$

L'expression des éléments dans la matrice de transition figurant dans le cas simple se généralise :

$$m((i_1, i_2, \dots, i_{u-1}), j) = \frac{q(i_1, i_2, \dots, i_{u-1}, j)}{p^1(i_1, i_2, \dots, i_{u-1})}$$

De même la relation qui exprimait la stationnarité horizontale devient :

$$\sum_{j=0}^{G^{V-1}} q(i_1, \dots, i_{u-1}, j) = \sum_{j=0}^{G^{V-1}} q(j, i_1, \dots, i_{u-1})$$

$$\forall (i_1, i_2, \dots, i_{u-1}) \in \overline{[0, G^V - 1]}^{u-1}$$

Cette relation signifie que les sous-fenêtres de  $(u-1)$  colonnes élémentaires de  $v$  points à droite et à gauche d'une fenêtre  $u \times v$  ont des probabilités égales (cf. figure suivante).

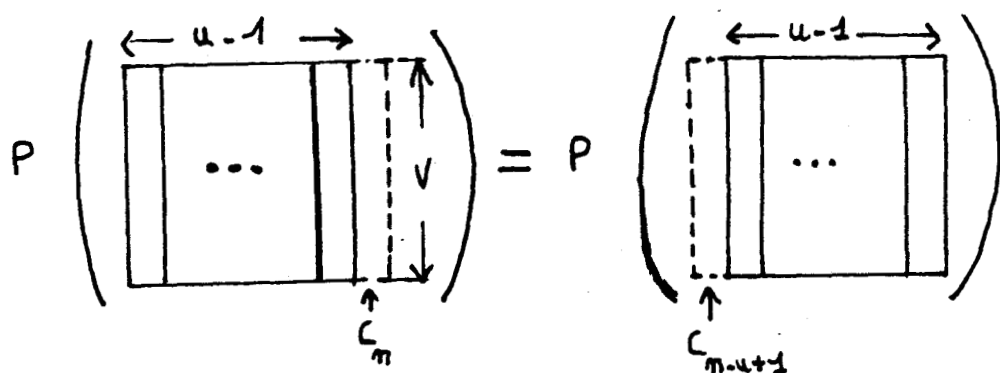


Fig. 4.4 : Stationnarité horizontale.

#### b) Génération des autres lignes

-----

Les lignes suivantes sont générées grâce à la chaîne verticale  $(V)$ . Ce processus d'ordre  $(v-1)$  se ramène à un processus d'ordre simple dont les états <sup>soit</sup> formés de  $(v-1)$  lignes successi-

ves de  $N$  points. En générant chaque lignes, point par point, et en utilisant les propriétés de la chaîne de Markov horizontale, on réduit le nombre de calculs.

La génération se déroule en deux étapes.

\* 1ère étape

Pour  $n$  variant de 1 à  $(N-u+2)$ , on calcule récursivement les termes  $R_n$  et  $S_n$  :

$$R_n(b_n, b_{n+1}, \dots, b_{n+u-2}) = P(b_n, b_{n+1}, \dots, b_{n+u-2} / a_1, a_2, \dots, a_{n+u-2})$$

$$= P \left( \begin{array}{c} \overbrace{\boxed{b_n \dots b_{n+u-2}}}^{u-1} \\ \underbrace{\hspace{10em}}_{n+u-2} \end{array} / \begin{array}{c} \overbrace{\boxed{a_1 \dots a_{n+u-2}}}^{u-1} \\ \underbrace{\hspace{10em}} \\ \uparrow \downarrow \\ V \end{array} \right)$$

$$S_n(b_n, b_{n+1}, \dots, b_{n+u-1}) = P(b_n / a_1, a_2, \dots, a_{n+u-1}, b_{n+1}, \dots, b_{n+u-1})$$

$$= P \left( \begin{array}{c} \boxed{b_n} \\ \underbrace{\hspace{10em}} \end{array} / \begin{array}{c} \boxed{a_1 \dots a_{n+u-1}} \\ \underbrace{\hspace{10em}} \end{array} \right)$$

Ces calculs se déroulent de la même manière que dans le cas simple. On calcule d'abord  $T_n$  :

$$T_n(b_n, \dots, b_{n+u-1}) = m((c_n, c_{n+1}, \dots, c_{n+u-2}), c_{n+u-1}) \times R_n(b_n, b_{n+1}, \dots, b_{n+u-2})$$

Puis on cherche  $S_n$  et  $R_n$  en fonction de  $T_n$  :

$$S_n(b_n, \dots, b_{n+u-1}) = \frac{T_n(b_n, b_{n+1}, \dots, b_{n+u-1})}{\sum_{i_1, \dots, i_u = 0}^{G-1} T_n(i_1, \dots, i_u)}$$

$$R_{n+1}(b_{n+1}, \dots, b_{n+u-1}) = \frac{\sum_{i=0}^{G-1} T_n(i, b_{n+1}, \dots, b_{n+u-1})}{\sum_{i_1, i_2, \dots, i_u = 0}^{G-1} T_n(i_1, i_2, \dots, i_u)}$$

On calcule ainsi  $G^{u-1}(N-u+2)$  probabilités  $R_n$  ET  $(N-u+1)G^u$  probabilités  $S_n$ .

$R_1$  qui amorce les calculs s'exprime en fonction des éléments de la DPJ.

$$R_1(b_1, \dots, b_{u-1}) = \frac{\sum_{c_u=0}^{G^v-1} q(c_1, \dots, c_u)}{\sum_{a_u=0}^{G^v-1} \sum_{b_0, \dots, b_u=0}^{G-1} q(c_1, \dots, c_u)}$$

\* 2ème étape

Ce procédé utilise la relation :

$$\begin{aligned}
 P(l_{t+v-1}/l_t, l_{t+1} \dots l_{t+v-2}) &= P(b_N, b_{N-1}, \dots, b_{N-u+2}/l_t, l_{t+v-2}) \\
 &\times P(b_{N-u+1}/l_t, \dots, l_{t+v-2}, b_{N-u+2}, \dots, b_N) \times \dots \\
 &\dots P(b_N/l_t, \dots, l_{t+v-2}, b_{n+1}, \dots, b_N) \times \dots \\
 &\dots \\
 &\times P(b_1/l_t, \dots, l_{t+v-2}, b_2, b_3, \dots, b_N)
 \end{aligned}$$

Pour  $n$  décroissant de  $N$  à  $1$ , il est possible de calculer chaque  $b_n$  de la nouvelle ligne.

. l'ensemble des  $(u-1)$  premières valeurs  $b_N, b_{N-1}, \dots, b_{N-u+2}$  est généré à l'aide des  $G^{u-1}$  probabilités

$$R_{N-u+2}(b_{N-u+2}, \dots, b_{N-1}, b_N)$$

. Puis on génère séparément chaque valeur  $b_n$  ( $n \in \overline{[1, N-u+2]}$ ) avec les  $G$  probabilités  $S_n(b_n, \dots, b_{n+u-1})$ .

Toutes les lignes sont ainsi générées, jusqu'à l'obtention de la texture complète.

#### 4.5 - EXTENSIONS DE LA METHODE

Pour améliorer les performances de cette méthode, deux procédés très distincts l'un de l'autre ont été développés [Mas 81].

. Le premier consiste dans le doublement des niveaux de gris d'une texture synthétique qui a préalablement été obtenue par le procédé markovien. Pour cela, la texture est reconstruite à l'aide d'une fenêtre de dimension  $3 \times 3$ , dont le point central est codé sur une base différente de celles de ses voisins. Alors que la valeur des autres points est quantifiée sur  $G$  niveaux de gris, la sienne l'est sur  $2 \times G$ .

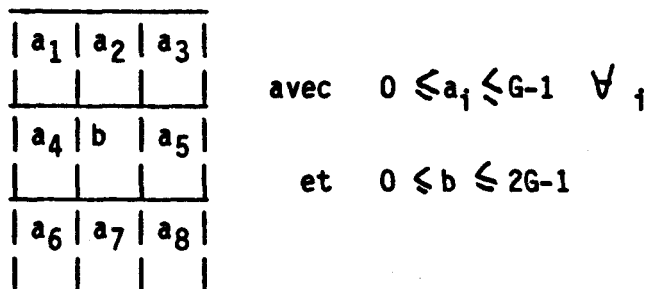


Fig. 4.5 : Codage particulier d'une fenêtre.

La mesure sur un échantillon de texture réelle de l'histogramme des configurations de fenêtres du type de la figure, fournit le tableau P, composé des probabilités conditionnelles suivantes :

$$P(B=b/A_i = a_i, i = 1..8) \quad \text{ou} \quad 0 \leq a_i \leq G-1$$

$$\text{et} \quad 0 \leq b \leq 2 \times G-1.$$

Disposant de ces valeurs, la reconstruction d'une texture synthétique fabriquée à l'aide de G niveaux de gris peut se faire point par point. La valeur  $b_0 (0 \leq b_0 \leq G-1)$  d'un point B qui est entouré par huit points  $A_k$  de valeur  $a_k (0 \leq a_k \leq G-1)$  dans cette texture, est ainsi transformée en  $2 \times b_0$  ou en  $2 \times b_0 - 1$ , suivant les valeurs prises par les probabilités de P.

La nouvelle texture garde les mêmes propriétés que la texture initiale. Cette extension constitue un moyen économique pour l'obtention de textures. Ainsi des textures synthétisées à l'aide de deux (ou quatre) niveaux pourront être étendues facilement à quatre (ou huit). Cependant les expériences qu'ont mené Schmitt et Massaloux prouvent qu'elle ne donne pas de bons résultats lorsque la texture comporte des macrostructures épaisses. Elle est très satisfaisante par contre lorsque la texture présente des détails fins comme des grains.

. La seconde extension permet de restreindre le nombre des éléments de la DPJ, utilisés dans la synthèse. Elle repose sur une classification des états de la chaîne de Markov horizontale, dont la matrice est directement liée à la DPJ.

Deux catégories d'états sont souvent associés à une chaîne de Markov [ISA 76] : les états persistants et les états transitoires. Un état est, par définition, persistant si, partant de lui, on a la certitude d'y revenir dans la suite de la génération. Dans le cas contraire, on dit qu'il est transitoire. Les états persistants s'organisent en sous-ensembles non connectés constituant des ensembles clos, irréductibles.

L'intérêt pratique de cette distinction apparaît dans le théorème qu'ont énoncé Issacson et Madseen [Isa 76] : "une chaîne de Markov est régulière si, et seulement si, l'espace d'état est réduit à un seul ensemble irréductible d'états persistants, cet ensemble étant apériodique".

Schmitt et Massaloux ont recherché, dans ce contexte, à restreindre la DPJ de telle sorte que l'espace d'état correspondant se réduise à un seul ensemble irréductible clos. Pour cela, ils éliminent tout d'abord les quelques sous-ensembles irréductibles dégénérés formés d'un petit nombre d'éléments persistants. Puis, ils suppriment les états transitoires résiduels, provenant des effets de bord gauche, apparus, lors de l'analyse qui détermine les valeurs de la DPJ. Cette méthode permet aussi la suppression des nombreux zéros apparaissant dans la DPJ. Elle facilite donc le stockage des textures et favorise l'utilisation des fenêtres de taille plus importante ainsi qu'un nombre de niveaux de gris plus important. Elle amène cependant quelques problèmes, notamment, lors de la recherche d'un élément de la DPJ, ou lorsque la texture est petite par rapport à la taille de la fenêtre.

Dans le même ordre d'idées, Schmitt a également proposé récemment le



l'extension de la méthode au cas des textures en couleur. Il utilise pour réduire le nombre d'état du processus markovien, un codage particulier, basé sur des méthodes de quantification vectorielle [Sch 83].

#### 4.6 - CONCLUSION

Cette approche qui permet d'obtenir des textures de base par l'emploi d'un processus markovien ne manque pas d'attraits. L'utilisation de cette méthode, dans un contexte interactif, permet de gommer partiellement l'un de ses principaux défauts qui réside dans son incapacité de restituer des textures hautement structurées. Dans le chapitre suivant, nous allons montrer comment mettre en oeuvre cette méthode dans un environnement interactif.

## CHAPITRE 5

### CONSTRUCTION D'UN SYSTEME INTERACTIF DE SYNTHÈSE DE TEXTURES EXPERIMENTATION

#### 5.1 - INTRODUCTION

Ce chapitre constitue la partie expérimentale de notre étude. Il décrit la mise en oeuvre des méthodes qui ont été présentées tout au long de cette thèse. En premier lieu, figureront différents problèmes relatifs à la saisie de la distribution de Probabilités Jointes (DPJ). On trouvera ensuite quelques résultats concernant la visualisation de textures, synthétisées à l'aide de la méthode markovienne que nous avons décrite dans le quatrième chapitre. Nous terminerons enfin, par la description d'un système interactif de synthèse de textures dans lequel s'intègre cette méthode.

Deux machines nous ont permis de réaliser les photographies d'un certain nombre de textures qui illustrent cet ouvrage. Il s'agit de la machine Picasso qui est décrite par la figure 5.1 et d'un Mini 6.92 (32 bits). Dans le premier cas, nous utilisons, pour l'affichage des textures, un moniteur couleur

(512 x 512 points - 16 millions de couleurs) ; dans l'autre, une console Tektronix qui comporte une extension permettant l'affichage de 4096 x 3072 points (noir et blanc).

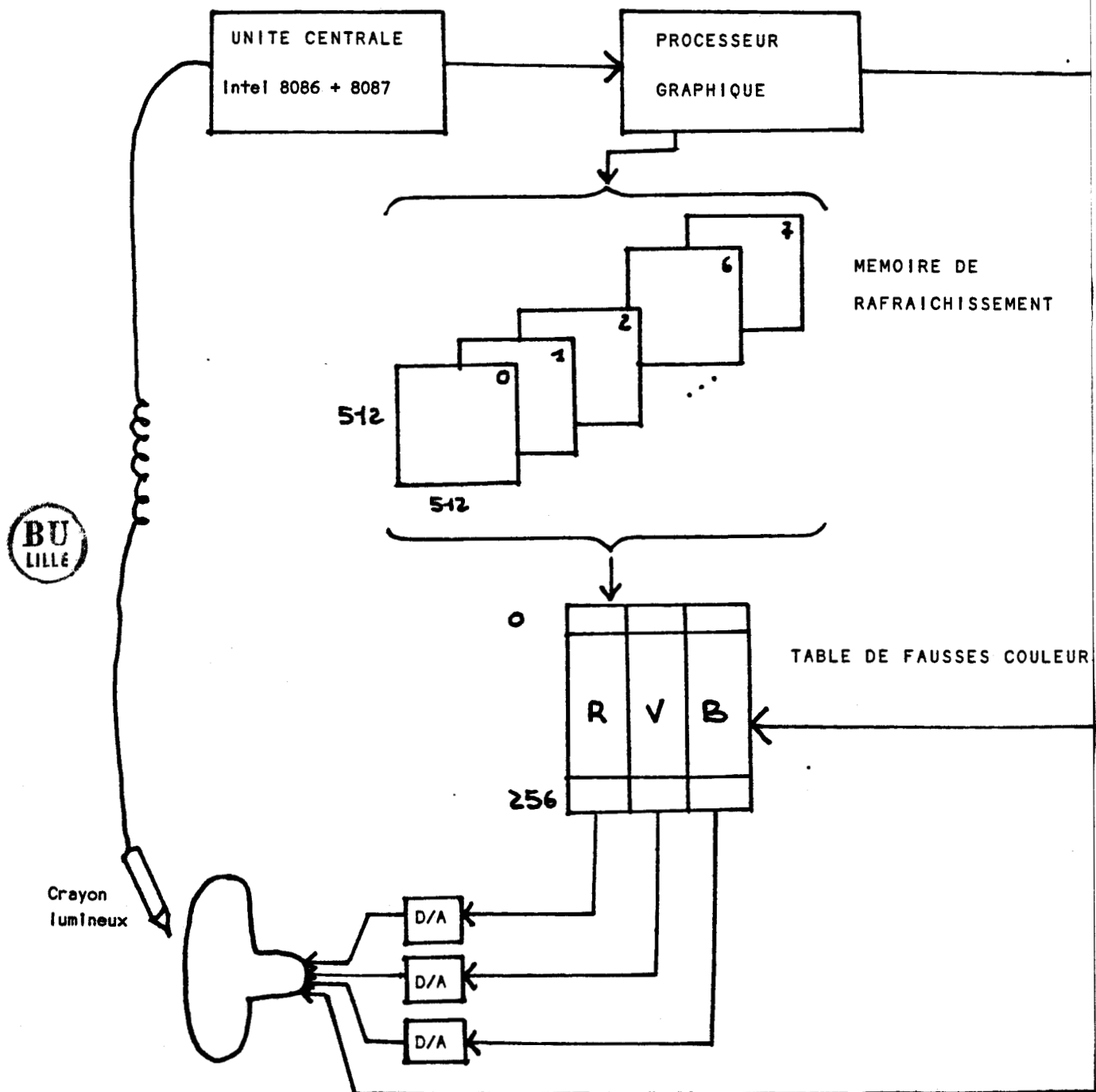


Fig. 5.1 : Architecture du système Picasso

## 5.2 - Acquisition des éléments de la DPJ

L'acquisition des objets de base (ou textures de base) constitue la première partie du système interactif de synthèse de textures proposé.

Elle se fait grâce à la notion de Distribution de Probabilités Jointes (DPJ) introduite dans le paragraphe 4.2 du quatrième chapitre. A chaque nouvelle valeur des probabilités de la DPJ correspond une nouvelle texture synthétique. La réalisation de cette opération d'acquisition peut se faire de manière automatique ou manuelle.

### 5.2.1 - Acquisition automatique

Cette première solution suppose que l'on dispose d'un échantillon réel ou d'une photographie de la texture naturelle que l'on veut reproduire. Un balayage par caméra est effectué dans une fenêtre rectangulaire de dimensions données. Il permet de comptabiliser, dans un histogramme, les différentes configurations de niveaux de gris rencontrées. La normalisation de l'histogramme qui s'obtient en divisant le nombre d'apparitions d'une fenêtre de configuration donnée par le nombre total de fenêtres recensées, fournit les probabilités de la DPJ. Il est possible d'effectuer directement une synthèse de la texture avec ces valeurs. On peut également songer à traiter ces dernières pour éliminer d'éventuelles valeurs parasites qui se seraient introduites lors de l'échantillonnage. La deuxième extension proposée par Massaloux [Mas 81] permet d'effectuer ce travail.

La Méthode d'acquisition pose certains problèmes quant au choix de l'échelle de niveaux de gris et aux conditions de prises de vue de

la texture. Nous allons donc préciser ces problèmes et voir quelles sont les solutions pour y remédier.

a) Choix de l'échelle de niveaux de gris

-----

Pour capter une image d'une scène réelle à l'aide d'une caméra, on utilise généralement 256 niveaux de gris. Des études psychovisuelles ont montré que l'on pouvait se restreindre à huit niveaux de gris sans pour autant détériorer de beaucoup la qualité visuelle d'une texture synthétique. Néanmoins, il faut que les seuils entre les niveaux de gris soient judicieusement choisis. Cette réduction dans le nombre de niveaux de gris est possible, parce que le système visuel est particulièrement sensible aux valeurs locales de moyenne et de contraste. Autrement dit, si deux images d'un même objet comportent des nombres très différents de niveaux de gris, le système visuel humain les interprêtera comme étant semblables si ces valeurs de moyenne et de contraste paraissent globalement identiques.

Une réduction brutale du nombre de niveaux de gris peut diminuer considérablement la qualité d'une image de texture. Il est, toutefois, nécessaire de préciser que les critères qui permettent de juger de la qualité d'une image sont psychovisuels, c'est-à-dire, essentiellement subjectifs. Il est donc très difficile de comparer deux images. Une telle comparaison nécessite de définir des critères de qualité visuelle par de nombreux tests. Quelques résultats peuvent cependant être déduits de multiples expériences menées çà et là. Ainsi, un grand nombre de niveaux de gris assure aux textures synthétisées de meilleurs résultats, mais un nombre de niveaux de gris compris entre trois et huit est amplement suffisant dans de nombreux cas. La synthèse binaire (à l'aide de deux niveaux de gris)

gomme parfois l'effet de relief ; cet effet qui a tant d'importance dans la perception visuelle, même s'il résulte de la confrontation des informations visuelles avec l'expérience de l'observateur (cf. chapitre 1).

La rapidité de calcul d'une texture, comme le volume d'informations à stocker influe fortement sur le choix du nombre de niveaux de gris. A une texture synthétisée, par exemple à l'aide de huit niveaux de gris et une fenêtre de dimension  $2 \times 2$ , sera associée une Distribution de Probabilités Jointes qui comporte 256 fois plus d'éléments qu'une texture binaire synthétisée à l'aide d'une fenêtre de même taille.

Dès que le nombre de niveaux de gris est choisi, il faut ensuite définir la valeur de chacun d'eux. Pour se faire, le choix de seuils équidistants entre chaque niveau de gris dans une bande centrale contenant 90 % des points, nous a semblé être une bonne solution.

#### b) Conditions de prises de vues

-----

Les conditions de prises de vue d'une texture naturelle déterminent implicitement son aspect visuel. Elles constituent une référence à prendre en compte lors de la génération de la texture synthétique correspondante. Le problème se pose en termes d'extraction des propriétés intrinsèques de la texture naturelle qui doivent être détachées des aspects circonstanciels liés aux conditions de prises de vues comme le facteur d'échelle ou les gradients de perspectives de la texture.

L'adaptation des paramètres d'application du modèle aux propriétés individuelles de chaque texture peut améliorer les performances du modèle lors de la synthèse. L'orientation de la direction d'échantillonnage doit, par exemple, être fixée par celle privilégiée, si elle existe, de la texture.

D'autres problèmes peuvent également se poser quant au choix de la taille de l'échantillon réel de la texture. Ces problèmes apparaissent pour des valeurs données du nombre de niveaux de gris et de la taille de la fenêtre utilisée. Massaloux [Mas 82] a notamment montré qu'une grande taille de l'échantillon limite le nombre des éléments non nuls de la DPJ. Ainsi, si la taille de l'échantillon utilisée pour estimer la DPJ est trop petite, cette dernière ne sera alors pas représentative du type de texture dont relève l'échantillon.

### 5.2.2 - Acquisition manuelle

Une seconde façon d'acquérir ou plus précisément de créer une texture synthétique est de donner directement des valeurs numériques à chacune des probabilités de la DPJ. Le programme mettant en oeuvre la méthode markovienne se charge alors de construire la texture correspondante.

Cette façon de procéder exige une très bonne expérience du modèle. Celle-ci peut-être acquise en analysant différents résultats obtenus par l'intermédiaire de la méthode d'acquisition automatique. Le modèle étant parfaitement stable (des études ont été faites à ce sujet), il est même possible d'effectuer des variations plus ou moins légères sur des DPJ connues pour obtenir des textures sensiblement différentes.

Il faut, toutefois, bien se rendre compte qu'il n'est pas toujours très simple de contrôler quelques milliers, voire parfois quelques milliards de paramètres, et qui plus est, des paramètres réels. Comme il est déjà très difficile de donner une définition simple de la morphologie d'une texture, sa reproduction nécessite, par conséquent, la mise en oeuvre de modèles parfois très complexes jonglant avec une multitude de paramètres. Il n'existera donc jamais de modèles simples qui soient capables de représenter toutes les textures présentes dans le monde réel.

Avec le modèle que nous employons, une synthèse réalisée à l'aide de huit niveaux de gris et une fenêtre carrée de côté quatre, exige le contrôle de plus d'un billion de paramètres ( $8^{16}$ ). L'acquisition manuelle n'est donc raisonnable que pour quelques niveaux de gris et de petites fenêtres seulement. On montre néanmoins que des images de textures produites à l'aide de trois niveaux de gris et d'une fenêtre de dimensions  $2 \times 2$  donnent de meilleurs résultats que ceux que l'on pouvait espérer. D'autant que certaines méthodes qui ont été décrites dans les chapitres précédents permettent de doubler le nombre de niveaux de gris et que l'on peut "retravailler" l'aspect d'une texture à l'aide d'opérateurs du type de ceux apparaissant dans le troisième chapitre.

Pourtant, comme il se trouvera toujours quelqu'un pour désirer utiliser un certain hasard mathématique et informatique, nous avons implémenté quelques fonctions qui permettent d'acquérir manuellement la DPJ.

La première d'entre elles offre la possibilité à l'utilisateur de définir la configuration en niveaux de gris d'une fenêtre, telle qu'il la souhaite, puis de lui donner une probabilité. Une palette de



niveaux de gris lui permet de dessiner directement sur l'écran cette configuration (cf. fig. 5.2).

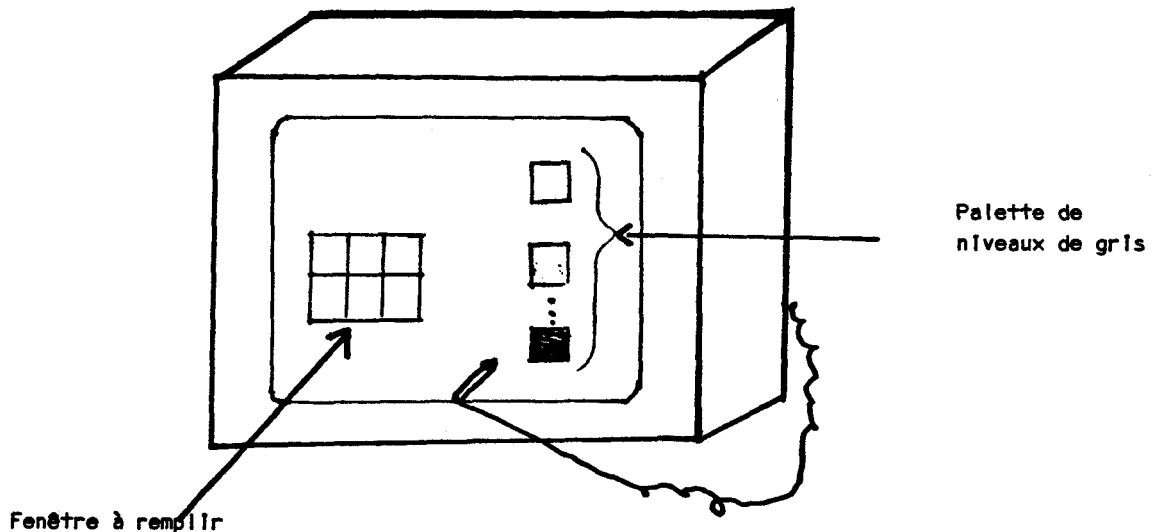


Fig. 5.2 : Acquisition d'une configuration en niveaux de gris d'une fenêtre.



Cette fonction s'accompagne d'une vérification de la validité des probabilités fournies par l'utilisateur. Elles doivent être positives et inférieures à un. Leur somme doit, de plus, être égale à cette dernière valeur. Au départ, toutes les probabilités sont mises à zéro.

Elles doivent, par ailleurs, satisfaire aussi aux règles de connectivité [Mas 82].

Le choix de la taille de la fenêtre d'échantillonnage ainsi que celui de l'échelle de niveaux de gris constitue une opération antérieure à celle de l'entrée de la DPJ.

Une seconde fonction facilite aussi l'acquisition manuelle de la DPJ. Plutôt que de donner une à une toutes les probabilités de la DPJ, elle n'exige qu'un seul paramètre : la semence. Possédant une valeur pour ce paramètre la fonction se charge de calculer les probabilités de la DPJ. Il s'agit d'une fonction pseudo-aléatoire qui fournit selon la semence utilisée, une suite de nombres aléatoires.

Le choix d'une telle fonction permet d'obtenir des textures granuleuses car elle associe à chaque probabilité de la DPJ, une valeur très petite et souvent non nulle. L'apparition de grains provient du fait que beaucoup de configurations de fenêtres sont susceptibles d'apparaître dans la texture correspondante (cf. figure 5.3). La mise à zé-

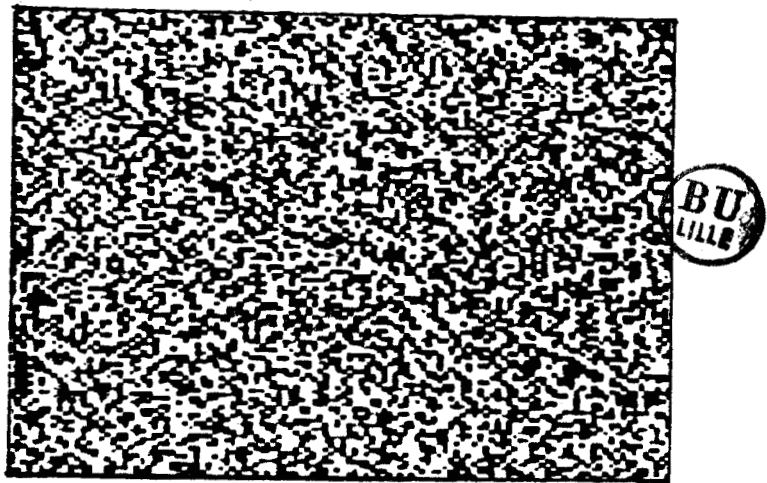


Fig. 5.3 : Texture granuleuse.

ro d'éléments de la DPJ ou des valeurs de probabilité très élevées de certains de ses éléments favorise la production de textures qui n'ont plus un aspect granuleux (voir fig. 5.4).

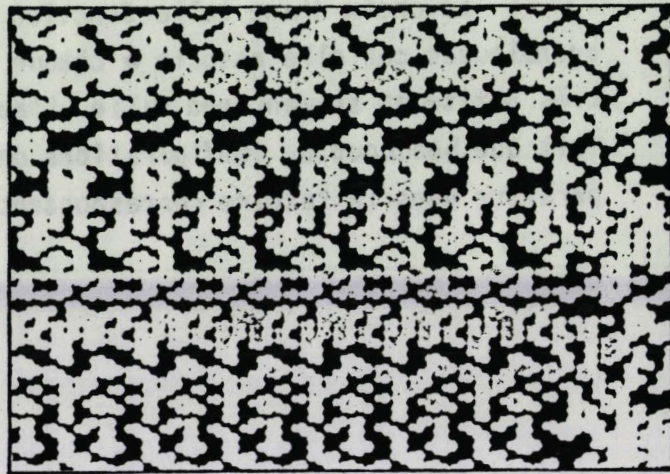


Fig. 5.4 : Texture à motif.

Nous avons d'autre part donné un rôle privilégié aux configurations de fenêtre qui ne contiennent que le seul niveau de gris minimum ou le seul niveau de gris maximum. Le niveau de gris minimum est souvent identique à la couleur du fond. Il correspond, par conséquent, à un emplacement vide. La probabilité de la configuration vide constitue un facteur très important pour la physionomie générale d'une texture. Une probabilité élevée fournira une texture "très aérée", tandis qu'une probabilité très faible ou nulle engendrera une texture dense.

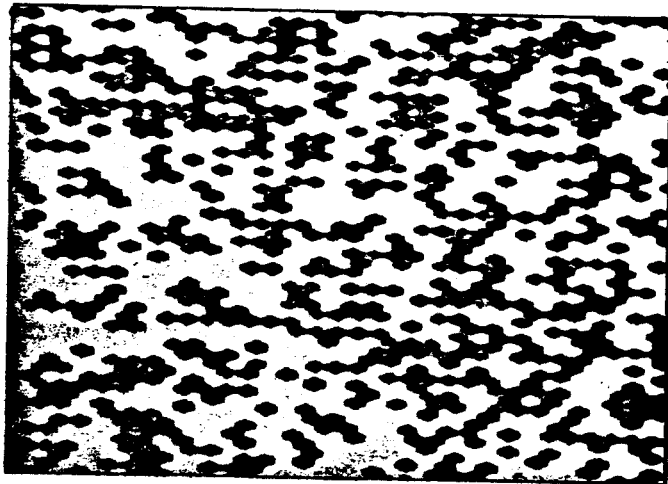
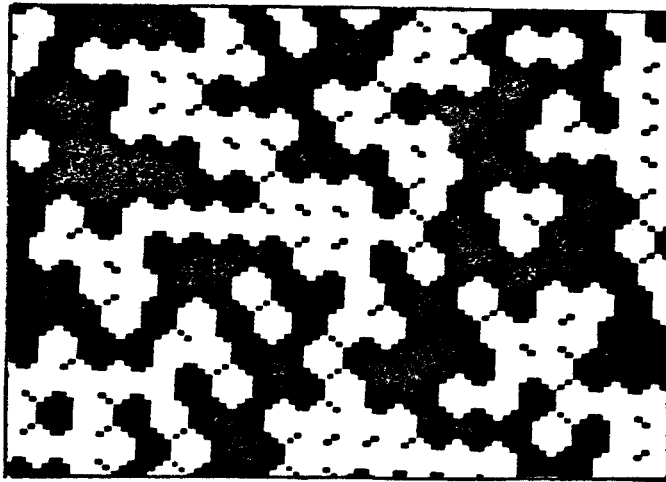
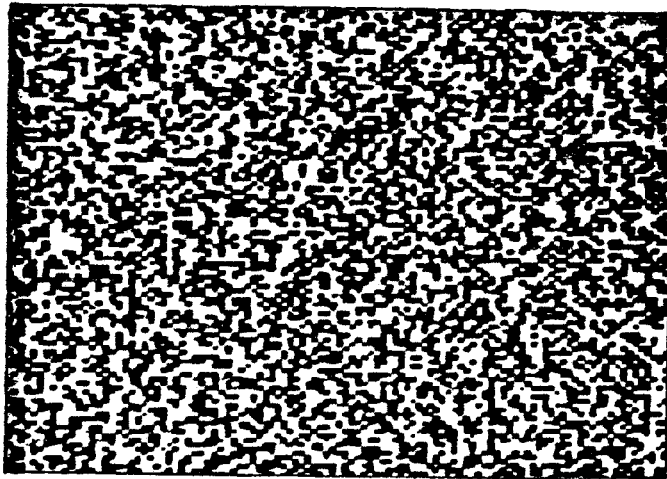
Un problème de contraste se pose avec le niveau de gris maximum. Si l'on choisit ainsi une échelle qui couvre tous les niveaux de gris, du blanc jusqu'au noir, les grains de cette dernière couleur ressortiront nettement du reste de la texture. La façon dont nous déterminons les seuils de niveaux de gris est à l'origine de ce phénomène qui peut parfois donner à la texture un aspect artificiel. La solution que l'on apporte pour y remédier, s'appuie sur un contrôle des extrêmes de l'échelle des niveaux de gris. Ce qui autorise par la même occasion, un contrôle du contraste de la texture.

### 5.3 - MODIFICATIONS INTERACTIVES

La possibilité d'acquérir des textures étant donnée, il faut maintenant fournir des primitives qui autorisent leurs modifications. Celles-ci sont possibles du fait de l'interprétation que nous donnons au point ; un point a un état qui est codé et tiré aléatoirement par le processus markovien. Un état peut désigner un niveau de gris, une couleur, une primitive plus complexe. Le point peut donc être vu comme un pixel, mais aussi comme un grain, au sens que nous avons donné dans le paragraphe 1.5, c'est-à-dire comme un ensemble connexe de pixels. De la nature de ce grain dépend beaucoup la physionomie de la texture engendrée. Ainsi, la forme et la taille de ce grain, mais aussi la densité possèdent une importance considérable dans la visualisation de la texture.

#### 5.3.1 - Manipulation du grain

Selon la forme et la taille du grain choisi la texture aura des aspects très variés. Une grande variété de formes est possible pour un grain (voir fig. 5.5). Le grain peut-être carré, rectangulaire, circulaire, polygonal etc.... Pour faire nos expériences, nous avons choisi en premier lieu des formes carrées ou rectangulaires. Elles présentaient l'avantage d'assurer un assemblage horizontal parfait entre



BU  
LILLE

Fig. 5.5 : Textures baties à partir de grains de formes diverses.

deux grains de cette forme. Ce type de représentation ne fournit cependant d'images acceptables que pour des textures formées de grains dont la taille n'est pas trop importante, ou que si l'on s'intéresse à des images composées de formes assez géométriques.

Une autre forme de grains procure des résultats intéressants. Il s'agit de formes hexagonales, telles qu'elles apparaissent dans les ruches d'abeilles (cf. fig. 5.6). Cette forme possède l'avantage d'assurer pour les grains, une continuité dans les deux sens. Des textures à base de taches (voir chapitre 1) s'accommodent bien de ce type de représentation.

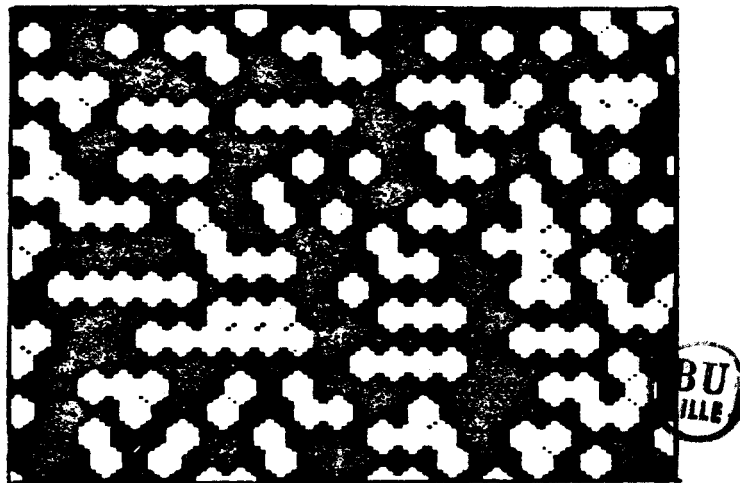


Fig. 5.6 : Texture composée de grains hexagonaux.

### 5.3.2 - Manipulation de la densité des grains

La densité constitue une autre caractéristique se prêtant bien à des modifications. Il est possible de jouer sur la densité en introduisant un facteur d'éclatement, c'est-à-dire, en insérant des espaces vierges entre les grains ou les taches de la texture. La densité des grains ou des taches selon des axes particuliers a été aussi envisagée.

Si ces opérations concernent des opérations d'extension, nous nous sommes également intéressé à celles de compression qui constituent l'opération inverse des précédentes. Elles agissent en regroupant les grains jusqu'à ce qu'ils se chevauchent. Ce type d'opérateur permet d'obtenir deux genres de textures suivant le degré de compression employé. S'il est faible, l'opérateur modifie simplement la densité. Par contre, s'il est fort, il donne naissance à des textures qui peuvent être très différentes de la texture originelle. On peut, en effet, passer de cette manière, d'une texture à base de grains à une autre basée sur des taches. Cette façon de procéder peut donner naissance à une nouvelle méthodologie pour fabriquer des textures à base de taches. Il faudrait, toutefois, posséder d'autres primitives comme celles qui supprimerait des éléments parasites dans la texture. Il serait avantageux de mettre en oeuvre dans ce contexte, des opérateurs basés sur la commande EXTRACTEXT qui est décrite dans le troisième chapitre. La figure 5.7 montre quelques possibilités du système en matières de densité.

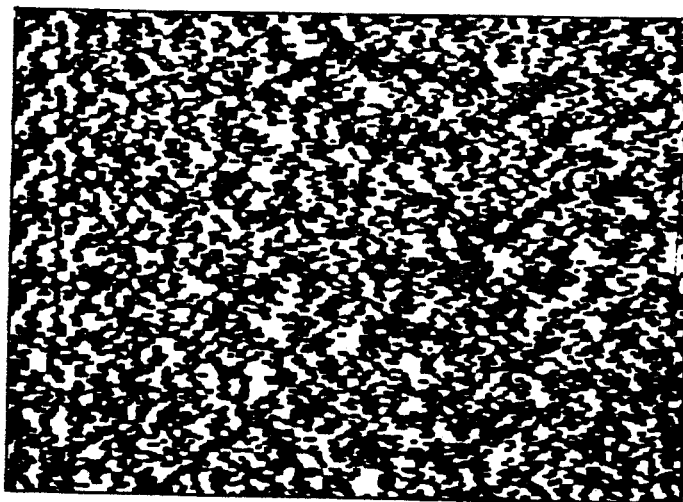
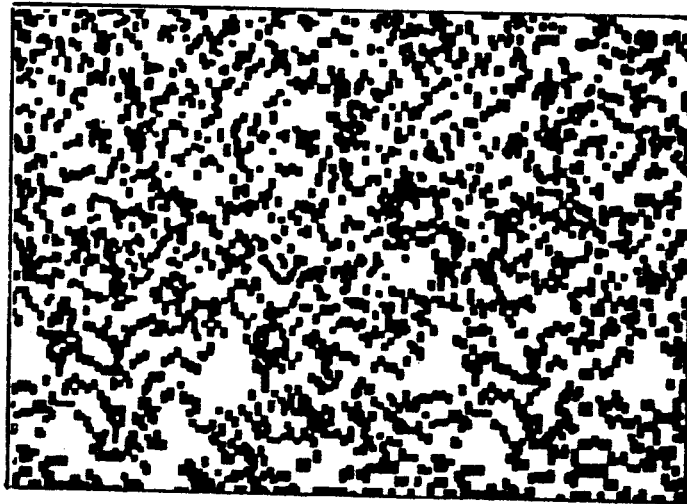
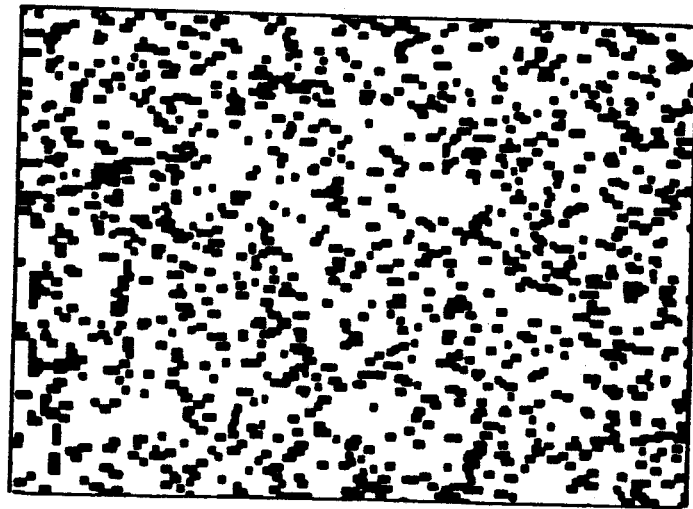


Fig. 5.7 : Opérations d'extension et de compression sur une texture.



## 5.4 - SYSTEME DE SYNTHESE INTERACTIVE DE TEXTURES

### 5.4.1 - Schéma interactif

Deux façons de réaliser des manipulations de textures du type de celles que nous venons de décrire sont envisageables. Une première solution consiste à fournir les caractéristiques du grain et de la densité, avant toute synthèse. Elle nécessite un matériel performant et très rapide puisqu'il faut tout recalculer à chaque génération de la texture. Le temps constitue, par conséquent, un sérieux handicap pour établir un contexte interactif dès lors que l'on utilise un matériel bas de gamme ou de faible puissance.

La seconde solution se base sur la génération d'une texture dite normalisée. Ce type de texture est produit à l'aide d'un grain dont la forme, la taille et la densité sont données en standard. Les manipulations relatives aux grains qu'on lui fait subir forment la seconde étape du système. La distinction entre ces deux étapes dans la réalisation d'une texture procure plusieurs avantages qui portent notamment sur la texture normalisée. Il est, en effet, possible de réaliser cette étape en différé, donc de construire une bibliothèque de textures. Cette disposition permet également de composer interactivement plusieurs textures. Pour faire cette opération, on associe à chaque point de la fenêtre de synthèse une valeur qui n'indique pas un niveau de luminance, mais une appartenance ou non à une texture. Suivant cette valeur, on affichera un pavé de pixels de l'une ou l'autre des textures. Une nouvelle fois, cette opération n'est réalisable que parce que l'on ne considère pas, en tant que tels, les points qui composent la fenêtre de synthèse.

D'autres procédés d'incrustation ou de composition de textures sont aussi envisageables. Ainsi, le mélange de deux textures  $T_1$  et  $T_2$  peut être représenté de la manière suivante :

$$T_3 = \overline{\left[ (a \text{ op}_1 T_1) \text{ op}_2 (b \text{ op}_3 T_2) \right]} \text{ op}_4 C$$

Les  $\text{op}_i$  désignent des opérateurs. Ils sont le plus souvent des opérateurs logiques, mais toute fonction ayant un sens pour la composition d'images peut également convenir.

$a$ ,  $b$ ,  $c$  fixent la proportion utilisée des deux textures  $T_1$  et  $T_2$  pour obtenir la texture résultante  $T_3$ .

L'opération d'incrustation peut, de même, être représentée par une expression analogue à la précédente.

$$T_3 = \underline{\text{Si}} \text{ bool } \underline{\text{alors}} T_1 \underline{\text{sinon}} T_2 \underline{\text{fsi.}}$$

$\text{bool}$  est un booléen. Suivant la valeur qu'il prend on affichera l'une ou l'autre des textures  $T_1$  ou  $T_2$ .

Ces opérations couvrent un grand nombre de cas. Elles peuvent être étendues de manière à ce qu'il soit possible de travailler sur plus de deux textures à la fois.

Avec tous les éléments que nous avons introduit, nous pouvons

donner la représentation d'un schéma interactif de production de textures sous la forme de la figure 5.8.

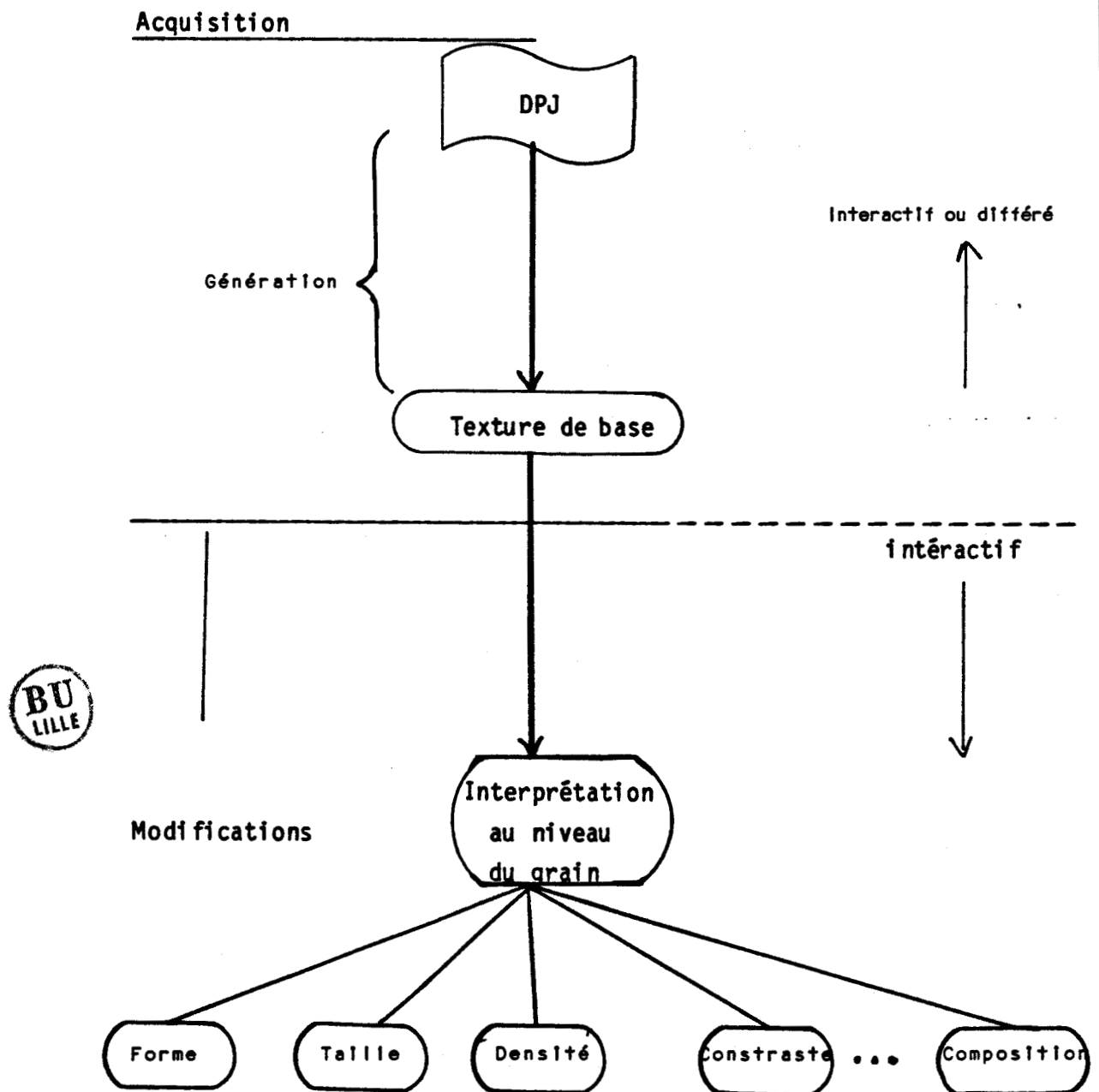


Fig. 5.8 : Schéma de production de textures.

Nous retrouvons, dans ce schéma, tous les niveaux décrits auparavant. On retrouve, notamment, le niveau d'acquisition de la texture, celui de la fabrication de la texture normalisée à partir de la DPJ et enfin celui de la transformation de cette dernière.

#### 5.4.2 - Description du système

Le schéma interactif de production de textures proposé dans le paragraphe précédent s'inscrit dans le cadre plus général d'un système interactif de synthèse de textures. Le schéma de la figure 5.9 donne une illustration de ce système qui gravite autour d'une bibliothèque de textures.

Dans ce système, les éléments de la Distribution de Probabilités Jointes (DPJ) jouent un rôle primordial, car ils permettent de reconstituer assez facilement une texture qui peut parfois posséder une taille bien supérieure à celle de l'échantillon utilisé lors de la détermination de la DPJ. Les éléments de la DPJ facilitent également la stockage d'une texture. Le système exploite cette dernière possibilité pour construire et utiliser une banque de textures.

Malheureusement, il faudra faire une distinction entre les cas de textures qui sont directement issues du modèle probabiliste markovien, avec celui des textures qu'un utilisateur a déjà modifié. Rien ne nous garantit, en effet, que la texture transformée par des manipulations soit homogène comme pouvait l'être initialement la texture de base. Même, dans un cas favorable, il serait encore nécessaire de recalculer les probabilités de la DPJ, en procédant à un rééchantillonnage de la texture. Ce dernier ne servirait à rien dans le cas contraire. Les différents modules du système proposé devront donc différencier ces deux types de textures.

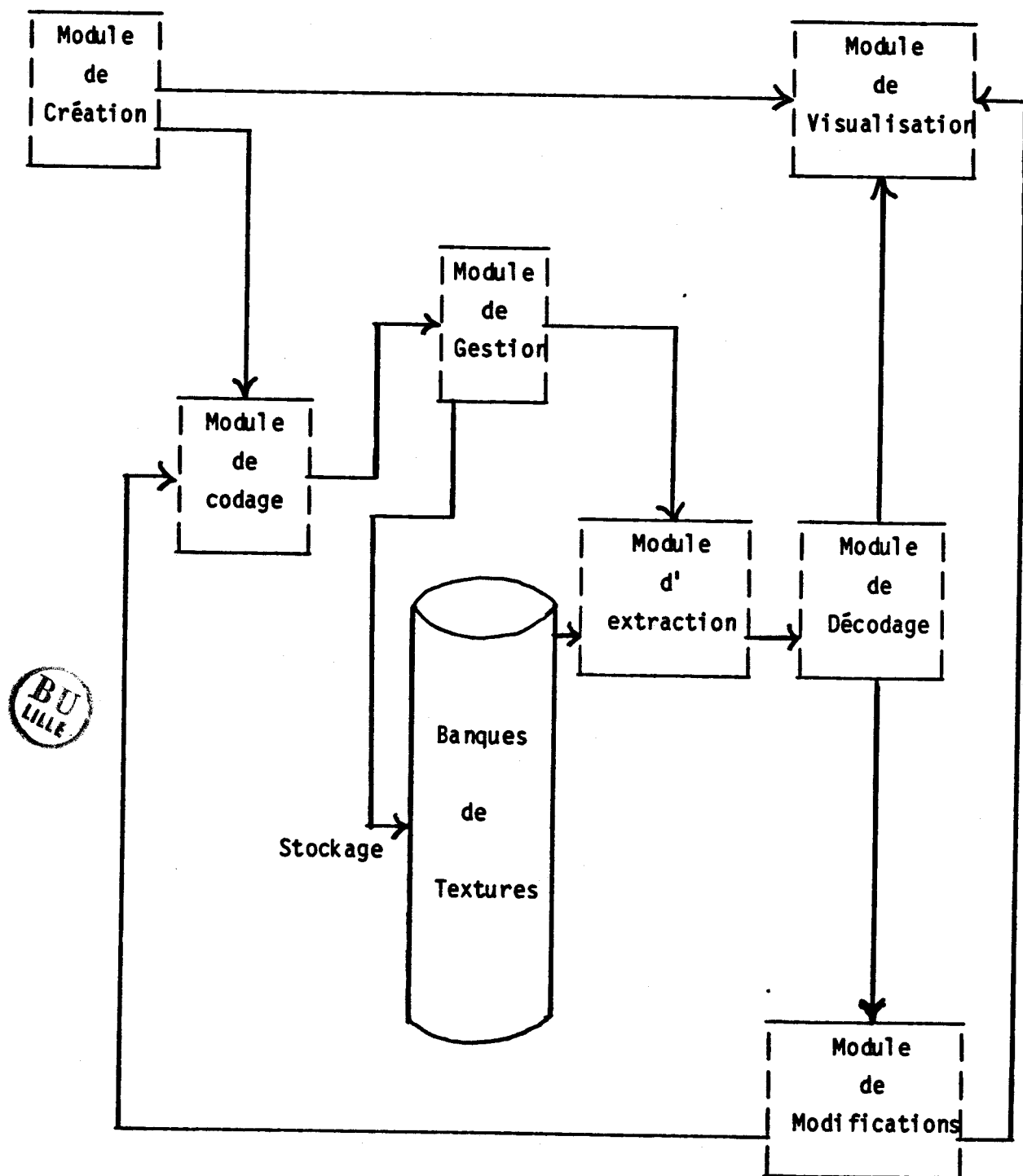


Fig. 5.9 : Schéma synoptique du système.

Dans ce contexte, le module d'acquisition comporte deux sous-ensembles : une partie qui réalise l'acquisition d'une texture par l'intermédiaire de la Distribution de Probabilités Jointes et une seconde qui effectue cette opération à l'aide des outils du genre que l'on a décrit dans le troisième chapitre.

Les modules de codage de stockage et de décodage doivent aussi traiter de façons différentes les deux cas de textures.

Il existe, néanmoins, une solution pour homogénéiser les informations manipulées par le système. Quant on modifie une texture de base qui a été produite à l'aide d'une certaine valeur de la DPJ, on effectue un nombre donné d'actions. Il suffit donc d'enregistrer ces actions pour reconstruire la texture modifiée. Après sauvegarde, une image d'une texture est, dans ces conditions, conservée sous la forme d'une suite de nombres qui représentent les probabilités de la DPJ et d'une série d'actions et de paramètres portant notamment sur le grain. Une texture produite à l'aide de la DPJ et non modifiée est représentée seulement par ceux-ci et par des paramètres concernant l'aspect des grains et de la densité, mais ne comporte aucune référence à une quelconque action.

En tenant compte de ces faits, il est alors possible de ne plus distinguer les deux cas de textures. Une suite d'actions qui référencient les modifications intervenues sur une texture, peut être optimisée, c'est-à-dire, simplifiée et réorganisée afin de réduire son encombrement et accélérer les reproductions de textures.

Le système doit permettre aussi de retrouver les informations qu'il contient, d'y accéder et de les utiliser. Pour cela, il faut d'abord effectuer des recherches très variées, et ce, dans un contexte

très interactif. Puisque les informations sont représentatives des textures, la solution la plus simple consiste à les visualiser toutes et à effectuer une sélection manuelle. Une autre solution repose sur des critères de recherche qui portent directement sur des informations relatives aux descriptions des textures. Si, de plus, on associe aux images de textures des informations précisant leur contenu, la recherche de textures est alors considérablement facilitée, puisqu'elles sont maintenant accessibles par association avec des clés.

#### 5.5 - CONCLUSION

Le système de synthèse interactive de textures proposé repose sur un schéma de production particulier et comporte deux étapes. Il génère dans un premier temps, des textures de base possédant des macrostructures qui leurs sont propres. Il utilise, pour cela, le modèle markovien bidimensionnel qui est développé dans le chapitre précédent. Ce modèle est parfaitement apte à reconstituer des macrostructures, car, l'information texturale se transmet au-delà de la fenêtre utilisée pour la synthèse. Selon le matériel dont on dispose, les calculs peuvent être faits en différé ou en temps réel, c'est-à-dire, dans un temps raisonnable pour l'utilisateur. Le temps de génération d'une texture à l'aide du modèle markovien est fonction de la taille de la fenêtre adoptée, de ses dimensions ainsi que de la complexité de la texture qui doit être produite. Il est, en général, de l'ordre de quelques minutes sur le matériel que nous utilisons.

La seconde étape du schéma de production porte sur les modifications que l'on peut accomplir sur une texture de base. Les expériences entreprises prouvent la pertinence des hypothèses que nous avons émises sur le grain. Elles ont également révélé les facultés potentielles d'un système interactif de synthèse pour reproduire simplement et efficacement des textures naturelles.

## C O N C L U S I O N

La présence de textures constitue une condition sine qua non pour le réalisme des images produites par ordinateur.

Bien que certaines images synthétiques soient très belles et qu'elles donnent l'illusion que la plupart des problèmes sont actuellement résolus, il reste encore à réaliser d'énormes progrès dans le domaine de la synthèse de texture.

L'abondance de modèles visant à reproduire des textures, prouve bien la complexité sous-jacente du phénomène. Une solution interactive reporte une partie de cette complexité, sur l'utilisateur. Le mélange d'intuition et d'expérience qu'il apporte, permet d'obtenir des images très acceptables de textures, pour un moindre coût.

A la frontière des domaines informatiques et psychovisuels, les propositions de cette étude possèdent comme finalité la construction d'un système



intéactif de synthèse de textures.

Ces textures sont conçues en deux étapes. Une texture de base est d'abord produite manuellement ou à l'aide d'un modèle markovien bidimensionnel. Des opérateurs laissent ensuite la possibilité de manipuler celle-ci pour obtenir les textures que l'on souhaite.

Les expériences que nous avons menées prouvent l'adéquation du modèle markovien utilisé dans un contexte intéactif. Elles montrent, d'autre part, le bien fondé du choix effectué sur les attributs de textures.

Plusieurs études peuvent s'inscrire dans le prolongement direct de ce travail :

. dans la nature, les textures ne sont ni totalement probabilistes, ni totalement structurelles. La démarche idéale serait donc d'associer ces deux catégories de modèles.

. la conception d'une nouvelle console graphique dans laquelle l'affichage serait basé sur la tache et non plus sur le pixel, rendrait les outils que nous proposons plus performants. Il serait également très utile que cette console puisse délivrer directement des informations concernant les textures des taches comme le font les consoles classiques pour la couleur des pixels.

## B I B L I O G R A P H I E

- [Abe 65] K. ABEND, T.J. HARLEY and L.N. KANAL  
"Classification of binary random patterns" IEEE Trans.  
Inf. Théory, IT 11, N° 4, Octobre 1965, pp 538-544.
- [Ahu 79] Ahuja NARENDA  
"Mosaic Models for image analysis and synthesis",  
PHD, University of Maryland, 1979.
- [Bar 82] D. BARBA  
"Decomposition and separated adaptative digital proces-  
sing of degraded images with a visual quality criterion",  
Proceedings ICASSP, Paris, Mai 1982, pp 1531-1536.
- [Bar 83] D. BARBA, A. BRUNO, H. TORRES  
"Génération d'images synthétiques avec textures en temps  
réel", congrès IASTED, Lille, Mars 1983.
- [Bez 77] P. BEZIER  
"Essai de définition numérique des courbes et des surfa-  
ces expérimentales, contribution à l'étude des propriétés  
des courbes et des surfaces paramétriques polynomiales à  
coefficients vectoriels", Thèse d'Etat, Paris VI, février  
1977.
- [Bor 66] P. BRODATZ  
"Texture : A Photograph album for Artists en Designers",  
Dover Publications, New-York, 1966.
- [Bru 84] A. BRUNO, D. BARBA  
"Synthèse d'images avec textures structurées et effets  
particuliers", Premier Colloque Image, CESTA, Biarritz,  
Mai 1984.
- [Car 69] H.W. CASTNER, A.H. ROBINSON  
"Dot area symbols in cartography : The influence of  
Pattern on their perception", ACSM Monograph CA. 4,  
Washington, DC, 1969.

- [Car 72] L. CARLUCCI  
 "A formal system for texture languages", Pattern Recognition, Vol. 4, janvier 1972, pp 53-72.
- [Cas 83] S. CASTAN  
 "Analyse de texture", Journées SEE, Nouvelles images électroniques de Rennes, Octobre 1983, pp 99-114.
- [Cho 57] N. CHOMSKY  
 "Syntactic Structures", Mouton, The Hague, 1957.
- [Cho 65] N. CHOMSKY  
 "Aspects of the theory of Syntax", MIT Press, Cambridge, Mass, 1965.
- [Con 80] R.W. Conners, C.A. Harlow  
 "Toward a structural textural analyser based on statistical methods", computer graphics and Image Processing, N° 12, 1980.
- [Dar 68] E.M. DARLING, R.D. JOSEPH  
 "Pattern Recognition from satellite altitudes", IEEE tr. on Systems, Man and Cybernetics, Vol SMC-4, Mars 1968, pp 38-47.
- [Dav 79] L.S. DAVIS, S.A. JOHNS and J.K. AGGARWAL  
 "Texture analysis using generalized cooccurrence matrices", IEEE tr. on Pattern analysis and Machinery Intelligence, Vol. Pami-1, 1979, pp 251-259.
- [Ehr 78] R.W. EHRICH, J.P. Foith  
 "A view of texture topology and texture description", CACM N° 8, 1978, pp 174-202.
- [Fei 80] E.A. FEIBUSH, M. LEVAY, R.L. COOK  
 "Synthetic texturing using digital filters", CACM, Vol. 14, July 1980.
- [Gag 78] A. GAGALOWICZ  
 "Analysis of texture using a stochastic model", Proc. 4th. Joint. Conf. on Pattern Recognition, Kyoto-Japon, Nov. 1978, pp 541- 544.

- [Gag 79] A. GAGALOWICZ  
"Stochastic texture fields synthesis from a priori given second order statistics", IEEE computer Society conference on Pattern Recognition and Image, Processing, Chicago, USA, 1979.
- [Ga1 80] A. GAGALOWICZ  
"Visual discrimination of stochastic color texture fields", congrès EUSIPCO-80, Lausanne, Septembre 1980
- [Ga2 80] A. GAGALOWICZ  
"Visual discrimination of stochastic texture fields based upon their second order statistics", International Conference on Pattern Recognition, Miami, Decembre 1980.
- [Ga1 81] A. GAGALOWICZ  
"Synthèse ergodique de textures homogènes", Congrès AFCET, Nancy, Septembre 1981.
- [Ga2 81] A. GAGALOWICZ  
"A new method for texture fields synthesis. Some applications to the study of human vision", IEEE trans. on Pattern Analysis and Machinery Intelligence, Vol. PAMI-3, N° 5, Septembre 1981.
- [Gag 82] A. GAGALOWICZ  
"Masking effects in the discrimination of color texture fields", IEEE computer Society conference on Pattern Recognition and Image Processing, Las Vegas, Juin 1982.
- [Gag 83] A. GAGALOWICZ  
"Vers un modèle de textures", Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, Thèse d'Etat, Mai 1983.
- [Gam 78] J.P. GAMBOTTO  
"Méthode d'estimation linéaire multi-dimensionnelle ; application à la reconnaissance et à la segmentation des textures", Thèse de Docteur-Ingénieur, ENT, Paris 1978.
- [Gar 83] D. GARBER, A. SAWCHUK  
"Texture simulation using a best-fit model", Proc IEEE 1981.

- [Gib 69] J.J. GIBSON  
 "The Senses considered as Perceptual System", Houghton Mifflin, Boston, 1966.
- [Gil 62] E. GILBERT  
 "Random subdivisions of space into crystals", Annals Math. Stat. 33, 1962, pp 958-972.
- [Gil 80] A. GILCHRIST  
 "La perception des noirs et des blancs d'une surface", La Recherche 1980.
- [Har 73] R.M. HARALICK, K. SHANMUGAM and I. DINSTEIN  
 "Textural feature for image classification", IEEE Tr. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC.3, Novembre 1973, pp 610-622.
- [Har 79] R.M. HARALICK  
 "Statistical and Structural approaches to texture", Proceedings IEEE, Vol. 67, Mai 1979, pp 786-804.
- [Hay 74] K.C. HAYES, AN. SHAH and A. ROSENFELD  
 "Texture coariness : further experiments", IEEE Trans. Syst. Man. Cyber., Vol. SMC-4, Sept 1974, pp 467-472.
- [Hui 75] C. HUIJBREGTS  
 "Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data", dans J. Davis and Mc. Cullagh, Display and Analysis of Spatial Data, Wiley, New-York, 1975, pp 38-51.
- [Hun 77] B.R. HUNT  
 "Bayesian methods in non linear digital image restoration", IEEE Trans. On Computer, C 26, Mars 1977, pp 219-229.
- [Isa 76] D. ISAACSON, R. MADSON  
 "Markov Chains : Theory and Applications", John Wiley and Sons, New-York, 1976.
- [Jul 62] B. JUKOZ  
 "Visual pattern discrimination", IRE tr. on Information Theory, Vol. It 8, Février 1962, pp 84-92.

- [Jul 73] B. JULESZ and AL.  
 "Inability of Humans to discriminate between visual textures that agree in second order statistics revised", Perception, Vol. 2, 1973, pp 391-405.
- [Jul 75] B. JULESZ  
 "Experiments in the visual perception of textures", Scientific American 232, Avril 1975, pp 34-43.
- [Kai 55] H. KAISER  
 "A quantification of textures on aerial photographs", tech. Report 121, Boston University Research Laboratory, 1955.
- [Kun 84] M. KUNT, A. IKONOMOPOULOS et M. KOCHER  
 "Compression d'images : méthodes de la deuxième génération", Premier Colloque Image-CESTA, Biarritz, Mai 1984.
- [Lip 70] B.S. LIPKIN and A. ROSENFELDS (Eds)  
 "Picture processing and psychopictorics" Academic Press, New-York 1970
- [Lon 57] M.S. LONGUET, HIGGINS.  
 "The statistical analysis of a random moving surface", Phil. Trans. Roy. Soc. London, Vol. A 249, February 1957, pp 321-387.
- [Luc ] M. LUCAS et autres  
 "La réalisation des logiciels graphiques interactifs", Eyrolles-Paris, Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France.
- [Luf 78] S.Y. LU and K.S.FU  
 "A syntatic approach to texture analysis", computer graphics an Image Processing, Vol. 7, 1978, pp 303-330.

- [Luf 79] S.Y. LU and K.S.FU  
"Stochastic tree grammar inference for texture synthesis and discrimination" computer graphics and Image Processing, n° 9, 1979.
- [Mc1 83] G.F. Mc CLEARY  
"An effective graphic Vocabulary", IEEE Computer graphic and Aided Designed, Mars-Avril 1983, pp 46-53.
- [McC 71] Mc CORMICK and R.S. MICHALSKI  
"Interval generalization of switching theory", Proc. 3rd Annual Houston Conf. on Computing System Science, Houston Texas, April 1971, pp 213-226.
- [McC 74] B.H. Mc CORMICK an S.N. JAYARAMAMURTHY  
"Time series model for texture synthesis", Int. J. Computer and Information Sciences, Vol. 3, N° 4, Décembre 1974, pp 329-343.
- [McC 75] Mc CORMICK and AL  
"A decision theory method for the analysis of texture", Int. J. Computer and Information Sciences 4, 1975, pp 1-38.
- [Man 77] MANDELBROT  
"Fractals - Form, Chance and Dimension", Freeman, San Francisco 1977.
- [Mar 82] F. MARTINEZ  
"Vers une approche systématique de la synthèse d'image. Aspect logiciel et matériel", Thèse d'état - Grenoble, Nov. 1982
- [Mas 81] D. MASSALOUX et F. SCHMITT  
"Extensions d'une méthode de synthèse de texture", 3ème Congrès AFCET-IRIA, Sept. 81, pp 700-707.
- [Mas 82] D. MASSALOUX  
"Modèle stochastique de synthèse de textures", Thèse de Docteur-Ingénieur, ENST, Janvier 1982.

- [Mat 67] G. MATHERON  
"Eléments pour une théorie des milieux poreux", Masson, Paris 1967.
- [Mat 71] G. MATHERON  
"The theory of regionalized variables and its applications", Les cahiers du Centre de Morphologie Math. de Fontainebleau 5, 1971.
- [Mer 84] M. MERIAUX  
"Contributions à l'imagerie informatique : aspects algorithmiques et architecturaux", Thèse d'Etat, Lille 1984.
- [Met 66] METZER  
Dans JJ. Gibson, "The senses considered as perceptual system", Houghton Mifflin, Boston 1966.
- [Mic 69] R.S. MICHALSKI  
"On the quasi-minimal solution of the general covering problem", Proc. 5th Int. Symp. on Information Processing, Bled, Yugoslavia, October 1969.
- [Mil 69] R. MILES  
"Random polygons determined by random lines in the plane", Proc. Nat. Acad. Sci., Vol. 52, 1969, pp 901-907.
- [Mil 70] R. MILES  
"On the homogeneous planar Poisson Point-Process", Math. Bio-sciences, Vol. 6, 1970, pp 85-127.
- [Mue 70] MUERLE  
Dans B.S. Lipkin and A. Rosenfeld (Eds), "Picture Processing and Psychopictorics", Academic Press, New-York, 1970.
- [New 79] W.M. NEWMAN, R.F. SROULL  
"Principles of interactive Computer Graphics", 2nd Edition, Mac Graw Hill, New-York, 1979.
- [Nun 83] F. NUNES FERREIRA  
"Conception et réalisation d'un système pour la synthèse d'images réalistes : Hélios", Thèse de Docteur-Ingénieur-Grenoble-Septembre 1983.



- [Ole 82] R. OLEJNIK  
 "Réalisme dans les images générées par ordinateur :  
 Ombrage, texture, transparence, ombres portées", Mémoire  
 de DEA, Lille, Septembre 1982.
- [Ole 84] R. OLEJNIK  
 "Synthèse Interactive de Texture", Premier Colloque  
 Image, Cesta, Biarritz, Mai 1984.
- [Pan 77] D.P. PANDA  
 "Statistical properties of thresholded images" University  
 of Mariland, Computer Science Technical report, TR 558,  
 July 1977.
- [Pic 70] R.M. PICKETT  
 "Visual analysis of texture in the detection and recogni-  
 tion of objects", dans B.S. LIPKIN AND A. Rosenfeld  
 (Eds), Picture Processing and Psychopictorics, Academic  
 Press, New-York, 1970, pp 289-308.
- [Pol 73] I. POLLACK  
 "Perceptual psychophysics", Vol. 13, 1973, pp 276-289.
- [Pra 78] W.K. PRATT, O.D. FAUGERAS and A. GAGALOWICZ  
 "Visual discrimination of stochastic texture fields",  
 IEEE tr. on systems Man and Cybernetics, Vol. SMC-8,  
 1978, pp 796-804.
- [Prf 78] W.K. PRATT and O.D. FAUGERAS  
 "Development and evaluation of stochastic based visual  
 textures features ", Proc. 4 th Int. Joint Conference on  
 Pattern Recognition, Nov. 1978, pp 545-548.
- [Pur 77] S.R. PURKS and W. RICHARDS  
 "Visual texture discrimination using random dot  
 patterns", Journal of optical Soc. Of America, Vol. 67,  
 1977, pp 765-771.
- [Rea 72] J.S. READ and S.N. JAYARAMAMURTHY  
 "Automatic generation of texture feature detectors", IEEE  
 Trans. on Computer, C-21, 1972, pp 803-812.

- [Roa 76] D.F. ROGERS, J.A. ADAMS  
 "Mathematical Elements for Computer Graphics", Mc Graw Hill, New-York, 1976.
- [Sch 78] B.J. SCHACHTER, A. ROSENFELD and L.S. DAVIS  
 "Random Mosaic Models for Textures", IEEE tr. on Systems, Man and Cyvernetics, SMC-8, pp 604-702, 1978.
- [Sch 80] B. SCHACHTER  
 "Generation of Random Textures", J. Inst. Maths Applics. Vol 25, N° 4, 1980, pp 343-347.
- [Scp 81] A. SCHAPPO and E.A. EDMONDS  
 "AN Interactive Raster Graphics Language", Proc. Brit. Computer, Soc-81, London 1981, pp 2-15.
- [Sch 80] F. SCHMITT, J. MONNE, D. MASSALOUX  
 "Texture Synthesis by Markov Process", Eusipco 80, Proceeding, pp 7-8, Kunt ed. Lausanne, Sept. 1980.
- [Sch 81] F.S. SCHMITT, J. MONNE and D. MASSALOUX  
 "Bidimensioneal synthesis Markov chains", Computer graphics and image processing, N° 17, 1981, pp 1-23.
- [Scm 81] F. SCHMITT, D. MASSALOUX  
 "Texture synthesis using a bidimensionnall Markov model", Communications for IEEE Comp. Soc. on PRTP-Dallas, aug 1981, pp 593-596.
- [Sch 83] F. SCHMITT  
 "Synthèse de Textures", Journées d'Etudes SEE, Nouvelles Images Electroniques, Rennes, Octobre 1983, pp 151-165.
- [Ser 73] J. SERRA and G. VERCHERY  
 "Mathematical morphology applied to fibre composite material", Film Science and Technology, Vol. 6, 1973, pp 141-158.
- [Swi 67] P. SWITZER  
 "Reconstructing pattern from sample data", Annals Math. Stat. Vol 38, 1967, pp 138-154.
- [Tam 78] H. TAMURA, S. MORI, T. YAMAWAKI  
 "Texture Features Corresponding to Visual Perception", IEEE tr. on Syst. Man and Cyber., Vol. SMC-8, n° 6, Juin 1978.

- [Tor 83] TORRES HERNANDEZ  
 "Modélisation simple de Textures Aléatoires pour la Synthèse d'Images en Temps Réel", Thèse de Docteur-Ingénieur, INSA Rennes, Nov. 1983.
- [Tou 76] J.T. TOU and Y.S. CHANG  
 "An Approach to Texture Pattern Analysis and Recognition", Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control, 1976.
- [Tsa 78] W.H. TSAI and K.S. FU  
 "Image Segmentation and Recognition by Texture Discrimination : a Synthetic Approach", 4 th Int. Joint Conference on Pattern Recognition, Kyoto-Japan, 1978.
- [Vil 81] F.M. VILMOTTER  
 "Structural Analysis of Natural Textures", PhD, University of Southern California, Septembre 1981.
- [Wes 76] J.S. WESZKA, C.R. DYER and A. ROSENFELD  
 "A Comparative Study of Texture Measures for Terrain Classification", IEEE tr. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-6, N° 4, 1976.
- [Won 68] E. WONG  
 "Two dimensionnal random fields and representations of images", SIAM J. Appl. Math 16, 1968, pp 756-770.
- [Yok 78] R. YOKOYAMA, R.M. HARALICK  
 "Texture synthesis using a growth model" Computer graphics and Image Processing, n° 8, 1978.
- [Yok 79] R. YOKOYAMA, R.M. HARALICK  
 "Texture pattern image generation by regular Markow chains", Pattern Recognition, Vol. 11, 1979.
- [Zuc 76] S.W. ZUCKER  
 "Toward a model of texture", Computer graphics and image processing, n° 5, 1976, pp. 190-202.
- [Zuc 80] S.W. ZUCKER, D. TERZOPOULS  
 "Finding Structure in Cooccurrence Matrices for Texture Analysis", Computer Graphics and Image Processing, n° 12, 1980.

## ANNEXE 1

### ELEMENTS de PROBABILITES : CHAINES de MARKOV

#### 1. NOTION DE PROCESSUS ALEATOIRE

Soit  $\Omega$ , l'ensemble de tous les états  $e_i$  que peut prendre un système ( $\Sigma$ ) aux divers instants.

On dit que l'évolution d'un système est un processus aléatoire si elle peut être décrite en termes de probabilités ; c'est-à-dire que l'on peut donner toutes les probabilités de la forme :

$$(1) \quad P(X(t_1) = e_1, \dots, X(t_n) = e_n) \quad \forall n, \forall t_i, \forall e_i \in \Omega$$

Chacun des termes  $X(t_i)$  est considéré comme une variable aléatoire.

#### 2. LOIS TEMPORELLES

L'ensemble de toutes les probabilités du type (1) reçoit le nom de loi temporelle.

De même, l'ensemble des probabilités (2) constitue la loi temporelle conditionnelle :

$$(2) \quad P(X(t) = x / X(\theta_1) = x_1, \dots, X(\theta_n) = x_n) \\ \text{avec } \theta_1 < \dots < \theta_n < t \quad (n \geq 1)$$

Les probabilités de ce type se calculent à l'aide de la formule de Bayes :

$$P(B/A) = \frac{P(A,B)}{P(A)} \quad \text{donc } p(A,B) = P(B/A) \times P(A)$$

Il existe une troisième catégorie de loi temporelle. C'est la loi temporelle à priori qui est définie comme l'ensemble des probabilités du type (3).

$$(3) \quad P(X_j = x_j)$$

### 3. CHAÎNE DE MARKOV

#### 3.1 - Processus de Markov

Un cas particulier de processus est celui où la connaissance de l'état du système aux instants consécutifs  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$  antérieurs à  $t$  apporte une certaine connaissance quant à son état en  $t$ . Si l'évolution du système se trouve résumé dans les états des  $n$  derniers instants, on dit que c'est un processus de Markov d'ordre  $n$ .

Formellement cette définition s'écrit :

$$P(X(t) = x / X(\theta_1) = x_1, \dots, X(\theta_p) = x_p) = P(X(t) = x / X(\theta_{p-n}) = x_{p-n}, \dots, X(\theta_p) = x_p)$$

$$\forall n, \forall \theta_1, \dots, \theta_p \text{ tel que } \theta_1 < \theta_2 < \dots < \theta_p < t$$

### 3.2 - Processus homogènes et discrets

On dit qu'un processus de Markov est homogène dans le temps si la loi temporelle est invariante dans le temps. Ce qui signifie que les probabilités (1) ne sont pas affectées par une translation dans le temps.

Un processus aléatoire est dit discret si les changements d'états ou transitions, sont au plus en infinité dénombrable et que l'on ne s'intéresse pas à leur abscisse exacte dans le temps, mais à leur ordre de succession.

### 3.3 - Définition

Une chaîne de Markov est un processus à la fois discret et homogène dans le temps.

### 3.4 - Matrice de transition

Nous supposerons par la suite que chaque variable aléatoire est susceptible de prendre un état parmi l'ensemble E de q états.

$$E = \{E_1, E_2, \dots, E_q\}$$

Ces états  $E_i$  peuvent se représenter également, au moyen d'entiers non négatifs (0, 1, 2, ...). On dira que  $X_n$  est dans l'état  $i$ , si  $X_n = i$ .

Le passage d'un état  $E_i$  à un autre  $E_j$ , ou transition ne dépend que de ces deux états et s'effectue selon la probabilité conditionnelle :

$$P(E_j/E_i) = P_{ij}$$

Une chaîne de Markov est donc caractérisée par une matrice stochastique, dite matrice de transition :

$$M = \overline{[P_{ij}]} \quad \text{avec} \quad \sum_{j=0}^{n-1} P_{ij} = 1$$

Un processus de Markov est complètement déterminé si on connaît la matrice  $M$  et la distribution de probabilités initiales  $P(X_0 = i) = P_i$ .

### 3.5 - Notion d'irréductibilité

On dit que l'état  $j$  est accessible à partir de l'état  $i$ , s'il

(n) (n)

existe un entier  $n \geq 0$  tel que  $p_{ij}^{(n)} > 0$  (on représente par  $p_{ij}^{(n)}$  la probabilité de transition en  $n$  étapes, c'est-à-dire, le terme général de  $p^n$ ).

On dit que l'état  $j$  est accessible à partir de l'état  $i$ , s'il

(n) (n)

existe un entier  $n \geq 0$  tel que  $p_{ij}^{(n)} > 0$  (on représente par  $p_{ij}^{(n)}$  la probabilité de transition en  $n$  étapes, c'est-à-dire, le terme général de  $M^n$ ).

On dit que deux états  $i$  et  $j$  communiquent s'ils sont accessibles, chacun l'un à l'autre, et l'on écrit  $i \leftrightarrow j$ . Ce concept de communication est une relation d'équivalence, donc on peut partager l'ensemble des états en classes d'équivalence où chaque classe est constituée par les états qui communiquent entre eux. Si cette relation d'équivalence n'entraîne qu'une seule classe d'équivalence, on dit que la chaîne de Markov est irréductible.

### 3.6 - Périodicité d'une chaîne de Markov

On définit la période de l'état  $i$ ,  $d(i)$ , comme le plus grand di-

(n)

viseur commun de tous les entiers  $n \geq 1$ , pour lesquels  $p_{ij}^{(n)} > 0$ .

Une chaîne de Markov dans laquelle tous les états ont une période égale à 1, est appelée apériodique.



### 3.7 - Notion de récurrence

(n)

Représentons par  $f_{jk}^{(n)}$  la probabilité que le système, étant dans l'état  $j$ , retourne la première fois à l'état  $k$ , après exactement  $n$  étapes.

On dit qu'un état  $i$  est récurrent si et seulement si :

$$\sum_{n=1}^{\infty} f_{ii}^{(n)} = 1$$

Un état non récurrent est appelé transitoire.

Propriété : si  $i \leftrightarrow j$  et si  $i$  est récurrent, alors  $j$  est récurrent.

Ainsi, tous les états d'une classe d'équivalence sont récurrents ou non récurrents.

Il existe donc une partition unique  $C_i$ ,  $i \in I$ , de l'ensemble des états récurrents telle que chacun des  $C_i$ ,  $i \in I$  est une des classes d'équivalence induites par la relation d'irréductibilité. Les parties  $C_i$  sont appelées classes de récurrence du processus.

Si  $i$  est un élément d'une classe récurrente apériodique,

$$\mathcal{N}_i = \sum_{n=0}^{\infty} n f_{ii}^{(n)}$$

représente l'instant moyen de récurrence. Si  $\mathcal{N}_i > 0$ , on dit que l'état est récurrent positif. Si  $\mathcal{N}_i = 0$ , on dit que l'état est récurrent nul.

Dans une classe récurrente, tous les états sont soit récurrents positifs, soit récurrents nuls. On parlera de la classe comme récurrente positive ou récurrente nulle. On utilise aussi, respectivement, les termes ergodique forte et ergodique faible.

## ANNEXE 2

### CARACTERISATION DES CHAMPS ALEATOIRES

Cette annexe contient les définitions de certains termes mathématiques nécessaires à une bonne compréhension du second chapitre de la thèse. Ces termes permettent de caractériser les champs aléatoires. Leurs définitions proviennent de [Gag 83].

A chaque point d'un champ aléatoire est associé une variable aléatoire  $X_m$ . Ces variables prennent leurs valeurs dans un ensemble de luminances.

Nous utilisons dans les définitions que nous donnons la notion d'espérance mathématique d'une variable aléatoire ( $E(X)$ ).

- $E \left[ \overline{X_m} \right]$  est la moyenne du processus  $X$  au point  $m$ .
- $K(m_1, m_2) = E \left[ (X_{m_1} - E \left[ \overline{X_{m_1}} \right]) \cdot (X_{m_2} - E \left[ \overline{X_{m_2}} \right]) \right]$  est appelée l'auto-covariance du processus  $X$  relative aux deux points  $m_1, m_2$  ( $N^*2$ ).
- $M_K(m_1, m_2, \dots, m_K) = E \left[ (X_{m_1} - E \left[ \overline{X_{m_1}} \right]) \cdot (X_{m_2} - E \left[ \overline{X_{m_2}} \right]) \dots (X_{m_K} - E \left[ \overline{X_{m_K}} \right]) \right]$  est appelé le moment d'ordre  $K$  du processus  $X$  relatif aux points  $m_1, m_2, \dots, m_K$ . (L'auto-covariance de  $X$  correspond au moment d'ordre deux).

- les distributions de probabilité du premier ordre  $\overline{p}_1[X_m = L_1]$  du processus  $X$ , sont les probabilités pour que  $X$  soit égal à  $L_1$  au point  $m$  (pour tout point  $m$  du plan et toutes les valeurs possibles de  $L_1$  ( $L_1 \in \mathcal{L}$ )).
- les distributions de probabilité du second ordre  $\overline{p}_2[(X_m = L_1), (X_n = L_2)]$  du processus  $X$  sont les probabilités que  $X$  soit égal à  $L_1$  au point  $m$ , et à  $L_2$  au point  $n$ , pour tous les couples  $m, n$  de points du plan et toutes les valeurs possible des luminances  $L_1, L_2$  ( $L_1, L_2 \in \mathcal{L}$ ).
- les probabilités de cooccurrence du second ordre  $P_{\Delta_m}(L_1, L_2)$  de  $X$  sont les probabilités d'occurrence d'un niveau de gris  $L_1$  et d'un niveau de gris  $L_2$  quand leur position relative diffère d'une translation  $\Delta_m (= (\Delta x_m, \Delta y_m))$  dans le plan du processus (pour toutes les translations possibles et pour tous les couples de luminance  $L_1, L_2$  ( $L_1, L_2 \in \mathcal{L}$ )).
- les distributions de probabilités d'ordre  $K$   $\overline{p}_K[(X_{m_1} = L_1), (X_{m_2} = L_2) \dots (X_{m_K} = L_K)]$  sont les probabilités pour que  $X$  soit égal à  $L_1$  au point  $m_1$ , à  $L_2$  au point  $m_2, \dots$  à  $L_K$  au point  $m_K$ , pour tous les  $K$ -uplets de luminance  $(L_1, L_2, \dots, L_K)$  et tous les  $K$ -uplets de points  $(m_1, m_2, \dots, m_K)$ .

Tous ces paramètres sont définis par rapport à des processus stochastiques uniquement. Pour les estimer, on a besoin d'une infinité de réalisations du processus (une infinité d'images de la même texture) dans le cas général.

Si on considère une texture comme un simple tableau bidimensionnel  $X(.,.)$  de nombres, en oubliant le modèle stochastique sous-jacent, on peut définir un autre ensemble de statistiques sur ce tableau :

.  $n$  est la moyenne (ou moment d'espace du premier ordre) d'une texture :

$$n = \frac{1}{NT} \sum_{m=1}^{NT} x_m,$$

où  $NT$  désigne le nombre de points d'une texture.

. les moments d'espace du second ordre  $\tilde{M}_2(\Delta)$  :

$$\tilde{M}_2(\Delta) = \frac{1}{I} \sum_{m=1}^I (x_m - n) \cdot (x_{m+\Delta} - n),$$

où  $I$  est le nombre de couples  $(m, m+\Delta)$  du plan de la texture, pour toutes les translations  $\Delta$  du plan.

. les moments d'espace d'ordre  $K$ ,  $\tilde{M}_K(\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_{K-1})$  :

$$\tilde{M}_K(\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_{K-1}) = \frac{1}{J} \sum_{m=1}^J (x_m - n) \dots (x_{m+\Delta_{K-1}} - n),$$

où  $J$  désigne le nombre de  $K$ -uplets  $(m, m+\Delta_1, \dots, m+\Delta_{K-1})$  existant dans le plan de la texture, et  $\Delta_1, \dots, \Delta_{K-1}$  sont des translations du plan.

- les moyennes d'espace du premier ordre (ou histogramme)  $\tilde{p}(L_1)$  :

$$\tilde{p}(L_1) = \frac{1}{NT} \sum_{m=1}^{NT} \delta(x_m - L_1), \quad L_1 = 0, \dots, L-1,$$

où  $\delta$  est l'indice de Kronecker ; on calcule la proportion de pixels ayant la luminance  $L_1$  dans la texture.

- les moyennes d'espace du second ordre  $\tilde{p}_{\Delta}(L_1, L_2)$  :

$$\tilde{p}_{\Delta}(L_1, L_2) = \frac{1}{I} \sum_{m=1}^I \delta(x_m - L_1) \cdot \delta(x_{m+\Delta} - L_2) ;$$

on calcule la proportion des cooccurrences de pixels ayant la luminance  $L_1$  et des pixels translatés du premier de  $\Delta$  ayant la luminance  $L_2$ .

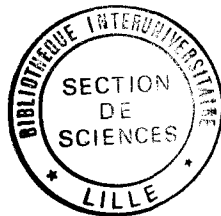
- les moyennes d'espace d'ordre  $K$   $\tilde{p}_{\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_{K-1}}(L_1, L_2, \dots, L_K)$  :

$$\tilde{p}_{\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_{K-1}}(L_1, L_2, \dots, L_K) = \frac{1}{J} \sum_{m=1}^J \delta(x_m - L_1) \cdot \delta(x_{m+\Delta_1} - L_2) \dots \delta(x_{m+\Delta_{K-1}} - L_K)$$

Dans le cas général, les statistiques spatiales de ce deuxième sous-ensemble n'ont rien en commun avec les paramètres probabilistes du premier sous-ensemble (cas d'un processus inhomogène, par exemple).

Par contre, dans le cas d'un processus homogène, les éléments du deuxième sous-ensemble deviennent les meilleurs estimateurs non biaisés des éléments du premier sous-ensemble au sens de la norme quadratique.

On dira qu'un processus homogène est ergodique si chaque élément du premier sous-ensemble est égal à l'élément correspondant du deuxième sous-ensemble, ceci correspondant au cas où les statistiques que l'on obtient sur une infinité d'images (réalisations du processus) sont égales à celles calculées sur une seule réalisation du processus (une seule image).



## RESUME

Les textures sont une caractéristique importante des surfaces et des objets du monde réel. Elles sont indispensables au réalisme des images synthétiques. Comme elles possèdent d'innombrables aspects, souvent très complexes, il n'est guère concevable de les reproduire toutes à l'aide d'un modèle classique qui est fréquemment lié à un processus particulier.

Par ce travail, nous présentons un modèle interactif de synthèse de textures qui, bâti à partir d'une étude physiologique et psychovisuelle de la perception, offre des outils suffisamment généraux pour pouvoir prétendre construire avec l'aide d'un utilisateur, une grande variété de textures. Ces outils manipulent en particulier, deux entités élémentaires (grains et taches) que nous avons spécifiées et définies, après avoir relevé leurs présences dans les textures naturelles et synthétiques.

### MOTS CLES



Texture. Synthèse d'image. Manipulation d'image. Interactivité.  
Perception visuelle.