

SYNTHÈSE INTÉRACTIVE DE TEXTURE
INTERACTIVE TEXTURE GENERATION.

OLEJNIK Richard

L.A. 369 UNIVERSITE DE LILLE I

Ecole Nationale Supérieure des Techniques
Industrielles et des Mines de DOUAI**RESUME**

Parmi les différents types d'informations contenus dans une image, l'information de texture qui caractérise l'état de surfaces pose encore maints problèmes. Toutes les approches visant à représenter de manière synthétique des textures, sont là pour le prouver. Néanmoins, deux approches prédominent : l'une considère que la texture résulte de la répétition d'un motif spatial (tel un mur de briques) ; l'autre suppose au contraire, qu'elle possède un aspect plus aléatoire (tel un champ de blé).

C'est à ce dernier aspect que nous nous sommes intéressés. Mais beaucoup de méthodes de ce type présentées jusqu'alors nécessitent des temps de calculs trop élevés par rapport à l'objectif que nous nous sommes fixés. Nous présentons donc une méthode interactive pour la génération de textures.

Cette méthode est basée sur un processus markovien bidimensionnel qui permet de contrôler dans un voisinage rectangulaire de dimension $u \times v$, les propriétés locales de la texture aléatoire.

Nous définissons dans un premier temps quelques caractéristiques visuelles des textures qui nous semblent primordiales. Puis après avoir décrit le processus employé, nous donnons quelques exemples de résultats.

SUMMARY

Among the characteristics of images, texture has been recognized as one of the most important and at the same time the most difficult to define. Texture synthesis methods can be classified into two different approaches according to their control of structural or statistical features. But all of these methods take too much time. So, we propose an interactive method to build texture. This method is based on a bidimensional, Markov process with full control of statistics within a given bidimensional neighbourhood. First we will define textural feature corresponding to visual perception and then we describe the process itself. We propose some examples of result.



I - INTRODUCTION

Les textures sont des propriétés inhérentes des surfaces. On peut pour s'en rendre compte prendre l'exemple des veines du marbre ou des noeuds du bois. Elles fournissent des informations importantes quant à l'arrangement structural des surfaces et aux relations avec leurs environnements. Bien qu'il nous soit facile de les reconnaître et de les décrire par des termes empiriques, il nous est extrêmement difficile d'en donner des définitions précises.

Cette difficulté est accrue par le fait que le concept de texture n'est pas indépendant de celui du ton. Bien souvent, les relations entre ces deux propriétés sont même inextricables. Celles-ci sont toujours présentes dans une surface, bien qu'une seule d'entre elles prédomine. On peut cependant dire que le ton traduit les différentes variations d'ombrage tandis que les textures concernent la distribution spatiale (statistique) des niveaux de gris.

D'un point de vue plus analytique, les textures sont l'essence des régions macroscopiques, la structure de celles-ci est due simplement à un ou plusieurs motifs répétitifs dans lesquels des éléments de base ou primitives sont placés selon certaines règles. Suivant que les primitives sont ou non facilement déterminables, nous aurons, ou une approche structurale ou une approche stochastique.

L'approche structurale suppose que l'on connaisse parfaitement les primitives et les règles de placement. Ces dernières peuvent même être stochastiques. Cette approche convient particulièrement à la synthèse de texture ayant une organisation très régulière tel un mur de briques ou certains textiles.

L'approche stochastique considère les textures de façon plus macroscopique. La notion de macrostructure est différente de celle de structure, en ce sens qu'elle désigne des motifs de grandes tailles. Ces derniers sont liés aux propriétés locales de la texture. Les statistiques de ces propriétés doivent être utilisées car on ne peut pas approximer les primitives et les règles de placement, du fait de leurs grandes variations. Cette approche favorise la synthèse de textures naturelles ayant une organisation peu apparente, tel une pelure d'orange ou un champ.

C'est à ce dernier aspect que nous nous sommes intéressés. Notre étude se base sur un processus markovien bidimensionnel qui permet de contrôler, dans un voisinage rectangulaire de dimension $u \times v$, les propriétés locales de la texture aléatoire [5], [6]. Avant de voir comment on peut utiliser ce modèle pour créer interactivement des textures, définissons d'abord les principales caractéristiques d'une texture.

II - CARACTERISATION DES TEXTURES

Etant donné le choix d'une méthode interactive, il est utile d'examiner d'abord le point de vue de la reconnaissance des formes et de la perception visuelle. De nombreuses études sur la perception des textures ont été effectuées. Julesz [4] a notamment montré que l'oeil est particulièrement sensible à la différence de statistiques du second ordre et Gagalowicz [2] a montré qu'il ne prenait pas en compte les statistiques de points éloignés ; en d'autres termes cela signifie que les propriétés locales sont fondamentales pour la vision humaine. Ce genre d'approches basées sur des caractérisations mathématiques ne fournit pourtant pas de critères simples et immédiats pour référencer ce type de texture. Il est donc nécessaire de choisir des critères plus subjectifs adaptés à la perception et à la compréhension qu'à l'homme pour les textures visuelles.

Les propriétés des textures doivent être définies sur des régions ou des parties d'une image et non sur ses points. Pour cerner ces propriétés, beaucoup d'expériences psychologiques basées sur la comparaison de régions texturées ont été menées. Elles ont dévoilé que deux régions ne sont différenciables que par la taille, le contraste, l'orientation ou la forme des éléments répétitifs. Pour traduire les propriétés des textures de manière subjective, donc compréhensible par tous, on peut retenir les critères suivants : granularité, contraste, orientation, forme, régularité et rugosité. Précisons les définitions et particularités de tous ces termes.

Granularité : la granularité est le trait le plus typique des textures. Dans un sens étroit il est même synonyme parfois de texture. De ce fait, on a beaucoup étudié cette propriété [3]. La granularité, comme le sous-entend ce nom, est basée sur le grain. Un grain est constitué par un ensemble de points (pixels) voi-



SYNTHÈSE INTÉRACTIVE DE TEXTURE
INTERACTIVE TEXTURE GENERATION.

OLEJNIK Richard

sins possédant le même niveau de gris. Un ensemble formé par des grains peut contribuer à l'obtention d'une macrostructure. Le degré de finesse de cette dernière est déterminée par la taille et par la densité des grains.

Contraste : le contraste est basé sur le nombre de niveaux gris. Une méthode simple pour changer le contraste consiste à faire varier ce nombre. Cela revient pratiquement à multiplier par une constante le niveau de gris des grains. Ce modèle change la qualité de l'image mais pas sa structure. Le bouton de contraste sur un poste de télévision constitue une bonne réalisation de ce modèle.

Orientation : cette notion concerne aussi bien les macrostructures que les microstructures que sont les grains. C'est une propriété globale pour une région donnée. Elle traduit la direction générale que prennent les motifs ou les grains d'une texture. Elle fait donc autant référence à la forme des éléments primitifs qu'aux règles de placement. Une illustration de cette propriété est par exemple donnée par la texture 1 de la figure 4.

Forme : ici encore, ce critère peut être appliqué soit aux macrostructures, soit aux grains. Dans le premier cas, on retrouve les notions de rayure, de marbrure et autres. Face à la subjectivité et aux grands nombres de formes de ce type, il est très difficile d'appréhender ce critère. La description de la forme est plus facile, par contre, lorsqu'il s'agit des grains.

Rugosité : Cette description a une signification particulière pour des textures tactiles, mais pas pour des textures visuelles. Cependant si nous observons certaines textures nous pouvons les qualifier en terme de rugueuse ou de lisse. Mais, est-ce un jugement subjectif dû aux changements de niveaux de gris, donc de la quantité d'énergie arrivant à l'oeil ? Ou est-ce simplement dû à notre imagination tactile ?

Régularité : c'est une propriété résultant de la variation des règles de placement. On peut cependant supposer que la variation des éléments réduit, spécialement dans le cas des textures naturelles, la régularité de l'ensemble.

Tamura, Mori et Yamawaki [7] ont expérimenté ces caractères sur un certain nombre de personnes

et ont montré qu'ils constituent une bonne base pour la description de texture. Dans leurs expériences, les auteurs ont notamment prouvé que la rugosité pouvait être explicitée à l'aide des autres caractères et qu'elle n'était peut être pas un caractère essentiel.

De notre côté, comme nous le verrons par la suite, nous menons actuellement des expériences pour déterminer quels sont ceux parmi ces caractères qui peuvent être manipulés par un modèle statistique markovien [5], [6].

III - TEXTURES SYNTHÉTIQUES

Une texture synthétique est fabriquée à l'aide d'une matrice de points appelée "champ de la texture". Un processus aléatoire permet d'affecter une valeur à chacun de ces points. Celle-ci peut être choisie soit parmi un ensemble de différentes couleurs, soit parmi un ensemble de plusieurs niveaux de gris. Des études ont montré qu'une texture colorée est en fait le résultat de l'adjonction d'un motif noir et blanc sur une plage colorée. Donc, seul le cas de textures synthétisées à l'aide d'un ensemble de niveaux de gris nous intéressera. Le processus stochastique évoqué précédemment peut être défini dans ces conditions, comme une fonction de l'ensemble des couples d'entiers naturels vers un ensemble de niveaux de gris L (les couples étant les coordonnées des points du champ de la texture).

$$X : \mathbb{N}^2 \rightarrow L \\ (x,y) \rightarrow l$$

Bien que l'on qualifie d'aléatoire le type de texture que nous étudions, il existe une certaine organisation entre ses points. Le problème est donc de trouver un processus qui rende compte des relations existant entre les différents niveaux de gris des points de la texture. Il s'agit autrement dit, de "contrôler ses statistiques".

La méthode 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 bidimensionnel alors que celui des chaînes de Markov est monodimensionnel, il est nécessaire d'employer la notion de chaîne markovienne de façon particulière.



SYNTHÈSE INTERACTIVE DE TEXTURE
INTERACTIVE TEXTURE GENERATION.

OLEJNIK Richard

IV - PARAMETRES DE CONTROLES
POUR LA GENERATION DE TEXTURE

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 P_i 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.

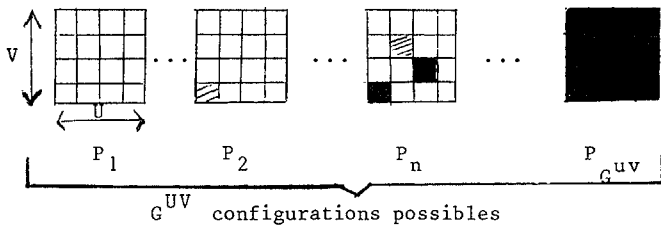


fig.1 : Eléments de la DPJ

Il faut remarquer que ce tableau de probabilités caractérise les textures. Ce sera lui qui permettra d'obtenir des macrostructures qui pourront être alors manipulées. Pour le moment, nous calculons celles-ci en différé. Cependant, les résultats de nos expérimentations nous permettent de penser qu'en stockant certaines probabilités significatives nous pourrions faire en temps réel la synthèse des macrostructures.

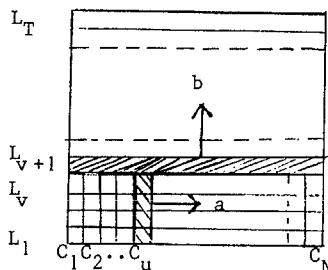


fig.2 : Principe de la méthode de synthèse

V - METHODE DE SYNTHESE

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 de ses différents placements. Pour le résoudre, nous opérons en deux étapes.

Dans un premier temps, les v premières lignes du bas de la texture sont générées. Cette opération s'effectue grâce à une première chaîne de Markov, dite "chaîne de Markov horizontale" (cas (a) de la fig.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 que représentent les états de la chaîne.

On décompose les v premières lignes en N colonnes. Chaque colonne élémentaire C_n ($n \in [1, N]$) est la réunion de deux parties : B_n est le point situé au sommet de cette colonne et A_n désigne les autres points. C_n formée par ces deux variables aléatoires est donc elle-même une variable aléatoire. Les réalisations (ou configurations) de C_n peuvent alors être codées en fonction de celles de A_n et de B_n :

$$C_n = a_n + G^{v-1} b_n \text{ avec } a_n \in [0, G^{v-1} - 1] \text{ et } b_n \in [0, G - 1]$$

D'autre part, la chaîne de Markov horizontale étant d'ordre $(u-1)$, les états de cette chaîne peuvent être représentés par les états de $(u-1)$ colonnes successives.

Dans ces conditions, les éléments de la DPJ peuvent être notés :

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

$$\forall (i_1, i_2, \dots, i_u) \in [0, G^v - 1]^u$$

De même chaque vecteur d'état qui caractérise l'état d'une colonne C_n de la chaîne horizontale a pour composantes :

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

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

SYNTHÈSE INTERACTIVE DE TEXTURE
INTERACTIVE TEXTURE GENERATION.

OLEJNIK Richard

Chacune de ces composantes donne la probabilité pour qu'une colonne C_n soit dans une configuration donnée.

Dans le cas des textures homogènes, la chaîne horizontale est définie par la donnée du vecteur d'état initial μ^1 et de la matrice de transition M. On calcule en effet un de ces vecteurs en fonction de son prédécesseur grâce à la relation :

$$\mu^n = \mu^{n-1} \times M \quad \forall n > 0$$

Ces termes peuvent être exprimés à l'aide des probabilités de la DPJ :

- Vecteur d'état initial :

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

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

- Terme général de la matrice de transition :

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

et donne la probabilité conditionnelle pour qu'un ensemble de (u-1) colonnes soit dans un état $(i'_1, i'_2, \dots, i'_{u-1})$ sachant que les (u-1) colonnes précédentes étaient dans l'état $(i_1, i_2, \dots, i_{u-1})$.

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 $G^{(u-1)v} \times G^v$ et d'élément général :

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

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

Ce terme* s'exprime aussi en fonction des probabilités de la DPJ :

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

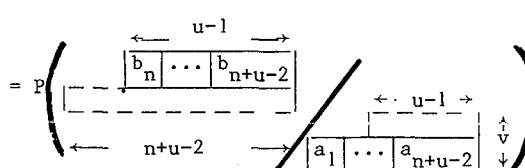
A l'aide d'une fonction aléatoire uniforme sur $[0, 1]$ et des vecteurs d'état μ^n , on détermine successivement les configurations de chaque colonne C_n .

* On prendra ce terme nul dans le cas d'un dénominateur nul.

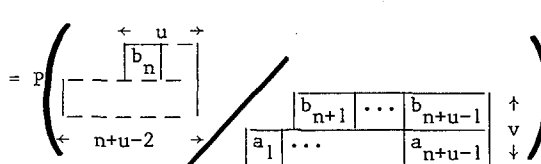
Les v premières lignes étant obtenues, il est alors possible de calculer ligne après ligne le reste de la texture. On utilise pour cela une seconde chaîne de Markov, appelée "chaîne de Markov verticale (cas (b) de la fig.2). Ce processus est considéré comme un processus d'ordre simple dont les états sont formés des configurations de (v-1) lignes successives de N points. On génère chaque ligne point par point en utilisant les propriétés de la chaîne horizontale. Cette génération se déroule en deux étapes :

- 1ère étape : pour n variant de 1 à (N-u+2) on calcule récursivement les termes suivants :

$$R_n(b_n, b_{n+1}, \dots, b_{n+u-2}) =$$

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


$$\text{et } S_n(b_n, b_{n+1}, \dots, b_{n+u-1}) =$$

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


chacun de ces termes s'exprime en fonction des probabilités de la DPJ.

- 2ème étape : elle utilise la relation :

$$P(l_{t+v-1} / l_t, l_{t+1}, \dots, l_{t+v-2}) =$$

$$= P(b_N, b_{N-1}, \dots, b_{N-u+2} / l_t, \dots, l_{t+v-2})$$

$$\times P(b_{N-u+1} / l_t \dots l_{t+v-2}, b_{N-u+2}, \dots, b_N) \times \dots$$

$$\dots \times P(b_n / l_t \dots l_{t+v-2}, b_{n+1}, \dots, b_N) \times \dots$$

$$\dots \times P(b_1 / l_t \dots l_{t+v-2}, b_2, b_3 \dots b_N)$$

Pour n décroissant de N à 1, il est possible de calculer chaque b_N de la nouvelle ligne :



SYNTHÈSE INTERACTIVE DE TEXTURE
INTERACTIVE TEXTURE GENERATION.

OLEJNIK Richard

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

- Puis chaque valeur b_n ($1 \leq n < N-u+2$) de la nouvelle ligne est générée séparément avec les G valeurs des probabilités $S_n(b_n, b_{n+1}, \dots, b_{n+u-1})$ ($b_n = 0, 1, \dots, G-1$) où les valeurs de $b_{n+1}, \dots, b_{n+u-1}$ ont déjà été déterminées.

En procédant de cette façon de ligne en ligne, on génère la texture entière.

VI - PRODUCTION DES TEXTURES - RESULTATS

Le modèle markovien utilisé permet d'obtenir des macrostructures bien supérieures à la taille de la fenêtre de génération. Ces macrostructures sont difficilement prévisibles, sinon empiriquement ou intuitivement. Un utilisateur de notre système peut, s'il le souhaite, contrôler leurs synthèses, mais pas en temps réel. Pour une utilisation interactive, nous avons créé une banque de textures précalculées. A chaque ensemble de valeurs des probabilités de la DPJ correspond une macrostructure. Cette banque évite de recalculer une texture à chaque fois que l'on désire travailler sur cette dernière. Néanmoins, l'obtention de cycle dans les valeurs de probabilités S_n et R_n (voir paragraphe V), nous amène à penser que la connaissance de ces valeurs permettra de reconstituer rapidement la texture correspondante.

De ce fait, il sera également possible de faire interactivement la composition de plusieurs textures. Actuellement, cette opération n'est faisable qu'en différé. Pour la réaliser, on associe à chaque point de la fenêtre de synthèse une valeur n'indiquant pas un niveau de gris, mais une appartenance ou non à des surfaces ombragées ou texturées. Suivant cette valeur, on affichera un pavé de points (ou un point) de l'une ou l'autre de ces surfaces.

Ayant choisi une macrostructure dans la banque ou l'ayant calculée, on peut alors la manipuler interactivement suivant des critères visuels. On peut comme le montrent les exemples de la figure 4, modifier la taille, la forme et la densité des grains. Ces paramètres permettent de changer notablement la physionomie générale de la macrostructure. Ces modifications interactives sont possibles parce que l'on ne considère pas en tant que tels les points qui

composent la fenêtre de synthèse ; mais on les considère comme étant des grains dont la forme, la taille et la densité sont paramétrables.

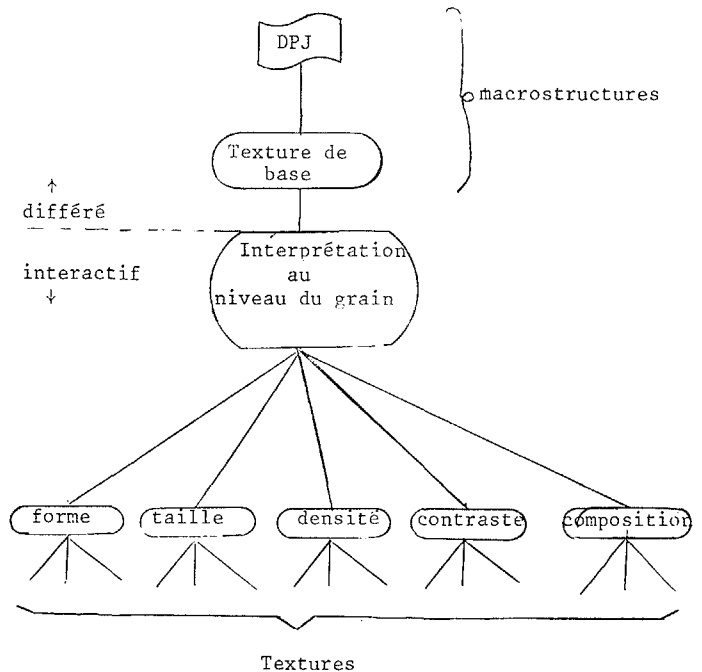


fig.3 : Schéma de production des textures

Nous donnons quelques exemples de textures synthétiques illustrant la possibilité de telles manipulations. Les calculs ont été réalisés en Fortran sur un Mini 6-92 et l'affichage sur une console Tektronix 4014. L'obtention d'une texture noir et blanc composée de 256×128 grains carrés de 8 pixels de côté prend de 5 à 10 minutes suivant sa complexité ; l'affichage prenant 70% de ce temps. Comme ce matériel est peu adapté pour générer des images point par point, nous espérons une réduction conséquente de ce temps, en transplantant le logiciel sur une machine à mémoire d'image. Nous disposons d'une machine à base de 8086 comportant une mémoire de trame $512 \times 512 \times 8$ et une table de fausses couleurs qui permettra en plus un contrôle facile des niveaux de gris ou des couleurs.

VII - CONCLUSION

La méthode de synthèse interactive que nous proposons comporte donc deux étapes. Dans un premier temps, nous générons des textures de base possédant des macrostructures qui leurs sont propres. Nous utilisons pour cela un modèle markovien bidirectionnel qui est parfaitement apte à reconstituer des macrostructures ; l'information texturale se transmettant au-delà de la fenêtre utilisée pour la synthèse. Pour le moment, les



SYNTHÈSE INTÉRACTIVE DE TEXTURE
INTERACTIVE TEXTURE GENERATION.

OLEJNIK Richard

calculs sont effectués en différé. Le temps de génération d'une texture à l'aide du modèle markovien est une fonction de la taille de la fenêtre utilisée, celle de la texture générée et de sa complexité. Il est en général de quelques minutes sur un Mini 6-92. Nous pensons néanmoins par la suite réaliser cette étape en temps réel. A l'issue de celle-ci nous obtenons donc une texture de base. Une banque permet de conserver ces macrostructures et de les retrouver rapidement lorsque l'on souhaite travailler sur l'une ou plusieurs d'entre elles. La manipulation de ces textures de base constitue pour l'instant la partie interactive de notre méthode. On peut en effet changer l'aspect intrinsèque de la texture en faisant varier la taille, la forme et la densité du grain.

Par la suite cette méthode peut être complétée en utilisant d'autres modèles de synthèse et notamment des modèles structuraux ; des pavés produit par notre méthode pouvant servir de primitives pour ces méthodes et vice versa.

Remerciements : je remercie Messieurs V. Cordonnier et M. Mériaux pour leurs judicieux conseils et les autres membres du groupe graphique pour leurs encouragements. Je remercie également Monsieur F. SCHMITT pour son aimable collaboration.

BIBLIOGRAPHIE

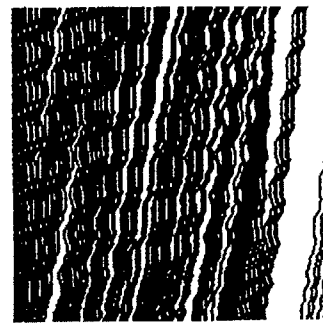
- [1] BRODATZ. Textures. New York : Dover 1966.
- [2] A. GAGALOWICZ. A new method for texture fields synthesis : some applications to the study of human vision. IEEE, vol PAMI 3, N5, 1981.
- [3] KC. HAYES, JR, AN. SHAH and A. ROSENFELD. Texture coarsness : further experiments. IEEE Trans. Syst. Man. Cyber. Vol SMC 4 Sept 74.
- [4] JULESZ. Experiments in the visual perception of texture. April 1975, p.10
- [5] J. MONNE, F. SCHMITT, D. MASSALOUX : Bidimensional texture synthesis by Markov chains. Computer Graphics and Image Processing n°17, 1981
- [6] F. SCHMITT, D. MASSALOUX : Texture synthesis using a bidimensional Markov Model. Communications for IEEE. Comp. Soc. Conf. on P.R.T.P.

Dallas, aug. 1981.

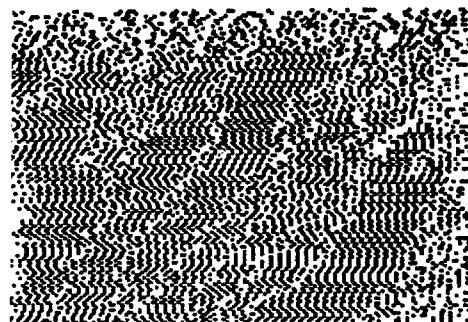
- [7] H. TAMURA, S. MORI, T. YAMAWAKI. Texture features corresponding to visual perception. IEEE Trans. on Syst. Man and Cyber. Vol SMC 8, N6, Juin 1978.

Fig. 4 - Exemples de textures.

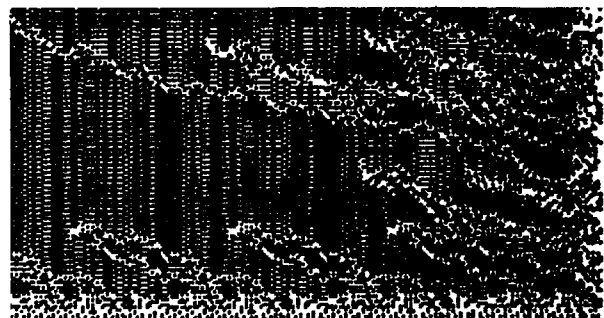
Nous présentons ci-dessous quelques exemples de textures réalisés à l'aide de notre méthode. Ces textures ont été générées en noir et blanc à l'aide d'une fenêtre 2x2.



Texture 1 - Exemple d'orientation.



Texture 2 - Réalisée avec un grain 8x8

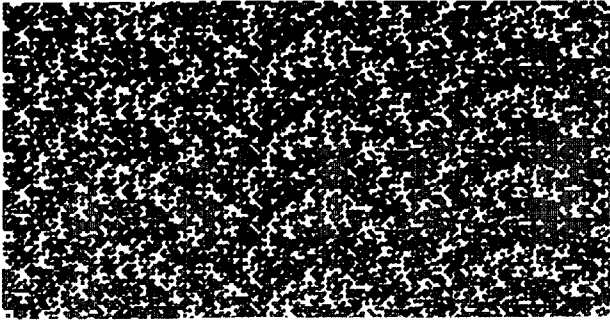


Texture 2 - Réalisée avec un grain 8x8 mais avec une densité différente.

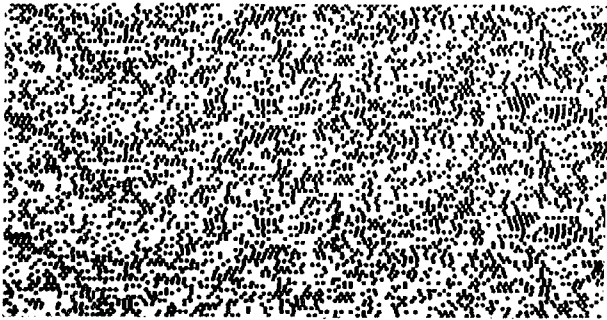


SYNTHESE INTERACTIVE DETEXTURE
INTERACTIVE TEXTURE GENERATION.

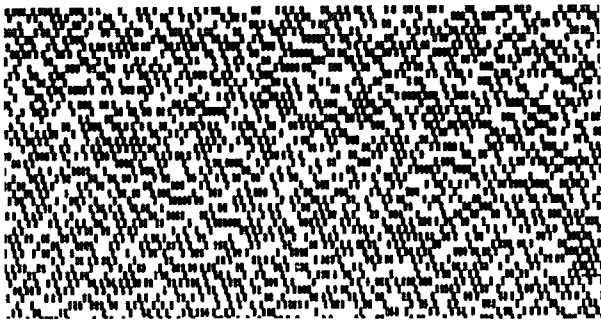
OLEJNIK Richard



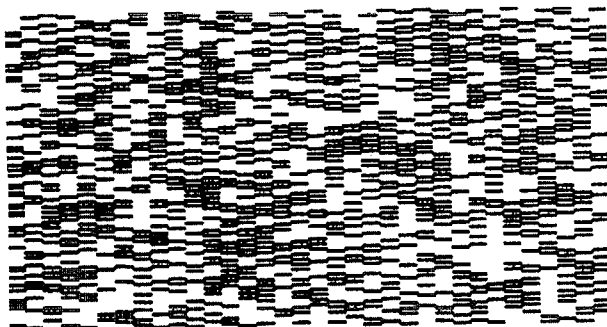
Texture 3 - Réalisée avec un grain 8x8



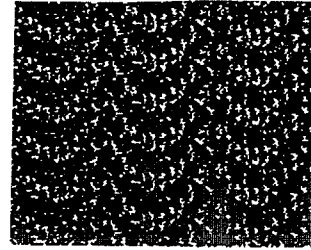
Texture 3 - Réalisée avec un grain 8x8. Densité différente.



Texture 3 - Réalisée avec un grain 8x24.



Texture 3 - Réalisée avec un grain 60x8.



Texture 3 - Réalisée avec un grain 4x4.

Fig. 5 - Exemple de différentes macrostructures.

