

LA RESTITUTION GRAPHIQUE DES IMAGES NUMÉRIQUES

Quelques techniques pour la classe

Thierry HATT

Les techniques présentées ici ont été expérimentées en classe d'histoire-géographie au lycée Fustel de Coulanges de Strasbourg depuis cinq ans, essentiellement dans le cadre d'un travail de recherche INRP d'introduction de la télédétection satellitaire.

Ce travail avait plusieurs objectifs en relation avec l'image :

— Initiation des élèves aux méthodes graphiques et cartographiques de traitement de l'information en utilisant le support informatique disponible au lycée, outil efficace de production graphique.

— Apprentissage des règles de construction des images analogiques à partir des images numériques.

Tout graphique est une construction : à partir d'images numériques identiques il est *facile* de construire des images analogiques très différentes. Il importe de mettre en évidence les règles statistiques et graphiques de construction.

L'ordinateur permet de mettre en valeur à grande vitesse et visuellement les conséquences des choix techniques et constitue ainsi un outil privilégié d'apprentissage par l'**expérimentation**. Ce caractère expérimental est tout-à-fait nouveau dans des disciplines comme la géographie.

— Mettre les élèves en situation de **production** de documents graphiques de qualité professionnelle. La micro-informatique apporte ici à l'évidence une situation nouvelle. En effet la qualité *professionnelle* de construction d'images publiables peut être déléguée au logiciel. Certains choix initiaux restent évidemment à faire, leur importance dépend des objectifs pédagogiques et du niveau de la classe. Le logiciel de traitement graphique peut aussi servir à l'enseignant pour produire des documents de T.P., selon les règles qu'il spécifie, sans qu'il soit obligé de se plier à des règles voulues par d'autres.

— Mettre les élèves en situation de recherche scientifique avec des outils de traitement évolués sur des images de taille significative : il est facile sur les micro-ordinateurs actuels de travailler sur des images de l'ordre de 64 K octets soit $\# 256 \times 256$ pixels. L'informatique permet de placer les élèves en situation de recherche vraie : par exemple extraction d'informations d'une image satellitaire : types de culture, type d'emprise urbaine, etc. . .

— Création des outils matériels et logiciels pour cet apprentissage. Ce travail de création **pluridisciplinaire**, conduit avec des électroniciens, des physiciens, des mathématiciens, des informaticiens, a conduit à mettre au point des outils d'EAO ("*Voici Mona Lisa*" : apprentissage sur MO5 de la notion de table de transcodage), de traitement d'images satellitaires (Turbo-Télédao sur compatible PC), d'animation d'images sous Turbo-Graphix, et un ensemble de numérisation d'images sur table traçante (logiciel Turbo-Image pour compatible PC). Avec les langages compilés du type de Turbo-Pascal les temps de traitement sont négligeables (inférieurs à 2-3 minutes pour des traitements complexes du type lissage).

Nous présentons ici, en donnant priorité à l'image, la chaîne complète de traitement qui va de la numérisation de l'image à son traitement thématique en passant par les étapes de restitution graphique.

I.— LA NUMÉRISATION DE L'IMAGE

Dans le cas *normal* on se contente de traiter des images satellitaires fournies par des organismes comme de CNES (image Spot fig. 4). Il est aussi très intéressant de pouvoir traiter ses propres données, aussi avons nous développé au Centre Informatique et Enseignement une manipulation complète de numérisation qui nous permet de traiter nos propres images numériques. Ce point est très important du point de vue pédagogique : la numérisation de portraits ou de photos aériennes de lieux connus des élèves les motive énormément.

Format de l'image :

Les étapes obligées de numérisation d'une scène analogique sont toujours : le balayage de la scène par un capteur muni d'une optique, la conversion analogique numérique du signal mesuré, le transfert en mémoire informatique des valeurs numériques.

Les technologies de numérisation sont très nombreuses : microdensitomètres, analyseurs à balayage par miroir ou par faisceau de lumière, transformation de l'image optique en image électronique, réseaux de capteurs linéaires ou bi-dimensionnels type CCD, etc. . .

Nous avons choisi de transformer une table traçante en table à numériser, le porte-plume assurant le déplacement d'une photodiode munie d'une optique. Le pas de mesure est du $1/10^{\circ}$ de mm.

Une image peut être considérée comme une fonction $f(x, y)$ où (x, y) sont les

RESTITUTION GRAPHIQUE DES IMAGES NUMÉRIQUES

coordonnées et $f(x, y)$ les valeurs de luminance mesurées par le capteur.

Pour le traitement informatique les valeurs sont discrètes : fonction $f(i, j)$ où $i = 1, \dots, \text{Maxlignes}$; $j = 1, \dots, \text{Maxcolonnes}$ et $f(i, j)$ appartient à l'intervalle $[0, 255]$. Le capteur numérise l'image par un balayage ligne par ligne et la transforme en une matrice de 240 lignes, 240 colonnes maximum. Au pas de $1/10^\circ$ de mm on peut numériser un document de $2,4 \text{ cm} \times 2,4 \text{ cm}$.

La luminance d'un pixel est codée entre 0 (noir mat) et 255 (blanc brillant). Chaque pixel stocké sur un octet (byte Pascal). La matrice image représente 57600 octets sauvegardée en fichier à la fin de la saisie. Il faut à peu près 25 minutes pour numériser une telle image avec ce capteur ponctuel. Le logiciel permet ensuite de représenter à l'écran l'image dans une fenêtre de 90×120 pixels. Les fichiers images sont compatibles avec Turbo-Télédao.

II.— ANALYSE DE LA STRUCTURE DE L'IMAGE

La structure de luminance de l'image est décrite par son histogramme (fig. 1f, 2f, 3). L'histogramme est une fonction qui donne l'effectif de chaque niveau de luminance de l'image, en abscisse les luminances $[0, 255]$, en ordonnées les effectifs associés.

L'histogramme donne des informations importantes sur la distribution des luminances : image sombre ou claire, contrastée ou douce, c'est-à-dire distributions asymétriques à gauche (fig. 8b de plus multi-modale), à droite (fig. 1f), bimodale (fig. 2f et 3) ou équilibrée. On peut déterminer d'un seul coup d'œil les images bien contrastées qui peuvent être binarisées de manière efficace (lettres d'un texte, feux de forêt, eaux libres, empreintes digitales...).

Bien entendu toute l'information spatiale de l'image est perdue. La plupart des méthodes d'amélioration d'image sont fondées sur l'analyse de l'histogramme pour déterminer le nombre et l'étendue des classes de restitution graphique.

III.— LA RESTITUTION GRAPHIQUE DE L'IMAGE NUMÉRIQUE

Cette étape est évidemment indispensable, il est impossible de rien tirer de la matrice des nombres stockée en mémoire.

L'objectif est de mettre en valeur *au mieux* l'information contenue dans l'image. Chaque application a évidemment ses propres critères d'utilité : décodage de code barre, numérisation de texte, repérage d'outils sur une bande transporteuse, détermination de formules chromosomiques, renforcement de contrastes de radiographies X, segmentation d'images satellitaires, etc... les contraintes ne peuvent être les mêmes.

Aussi procède-t-on à :

A. La transformation analogique des données.

On réalise une *compression* des données : les données initiales sont étalées dans

l'intervalle théorique $[0, 255]$. On comprime l'image pour la ramener à 16 ou 8 niveaux de gris.

Pourquoi cette compression? Il y a deux raisons à cela :

— La première est une raison d'encombrement de l'image. Pour définir 64 niveaux de gris il faut une matrice de 8×8 bits par pixel. Sur une imprimante à aiguilles de 72 points au pouce on ne pourra dessiner que 8 pixels au pouce soit 129 pixels par lignes, deux pages d'imprimante pour une image 240×240 , un format d'affiche difficile à exploiter!

— La deuxième raison est liée aux capacités de l'œil humain qui possède des capacités très grandes de discrimination des couleurs mais très faibles en niveaux de gris (une douzaine sans gamme de référence). Les systèmes professionnels se contentent de 16 niveaux de gris en restitution, c'est ce que nous avons choisi.

Ce découpage en classes graphiques de l'information numérique initiale pose un certain nombre de problèmes de fond : faut-il discrétiser (dans le cas d'une variable continue) ou *surdiscrétiser* (dans le cas d'une variable initiale discrète)? Il serait techniquement possible de représenter 256 niveaux de gris, il suffirait d'une grille de 16×16 bits par pixels. Mais on ignore quels seront les regroupements faits par le lecteur de l'image qui ne peut matériellement faire la différence entre des symboles trop proches. L'erreur cartographique serait réduite mais l'erreur de lecture par généralisation augmentée. En proposant au lecteur un regroupement en classes on oriente sa lecture, ce qui procure éventuellement un gain de lisibilité mais peut aboutir à déformer l'information initiale si les limites sont *mal* choisies.

B. L'amélioration de l'image

Comme on l'a déjà vu les critères d'*amélioration* sont très variables, les techniques disponibles sont également très nombreuses. Il est très rare qu'une image occupe de manière uniforme l'intervalle théorique $[0, 255]$. La plupart des images ont des luminances concentrées dans des zones relativement étroites de l'histogramme.

Le réétalement de dynamique :

Une première technique consiste à procéder à un *réétalement de dynamique* (fig. 2) : on choisit des seuils qui permettent de réétaler les valeurs intéressantes pour le problème étudié (fig. 11). Il est possible de faire une coupure à gauche **ou** à droite de l'histogramme (on parle de seuillage), à gauche **et** à droite (on parle de fenêtrage) (fig. 11).

Les règles de réétalement peuvent être

— linéaires, règle bien adaptée à une distribution pas trop dissymétrique (fig. 1 et 2c) ou

— non linéaires selon la structure de l'histogramme :

— règle exponentielle pour un histogramme dissymétrique à droite (fig. 1c et 2d),

— logarithmique pour une distribution déséquilibrée à gauche (fig. 1d et 2b), de façon à favoriser la représentation des fortes ou des faibles luminances.

Les classes sont plus étroites là où la population des pixels est la plus importante.

Ce type de technique peut être comparé à l'utilisation en photographie de papiers durs ou doux pour atténuer ou renforcer les contrastes d'une image sur ou sous-exposée. Ces règles aboutissent en fait sur des distributions déséquilibrées au découpage en classes à pas constant d'une variable normalisée. On peut aussi obtenir des *effets* sur des distributions non dissymétriques (tous ces effets sont visualisés sur les figures 1 et 2).

La règle d'équipopulation :

Une règle très utile est la règle d'égalisation d'histogramme aussi appelée règle d'équipopulation : on considère que cette technique optimise l'information restituée par l'image analogique, la perte d'information représentée par le passage de 256 niveaux de luminance à 16 niveaux de gris est minimisée si les classes sont équiprobables.

Si l'image est de taille $N_{\text{lignes}} \times N_{\text{Colonnes}}$ et que l'on dispose d'un terminal à N_b niveaux de gris, le nombre idéal de pixels par niveau sera $M = (N_{\text{lignes}} * N_{\text{Colonnes}}) / N_b$.

On calcule sur l'histogramme les effectifs cumulés à partir du minimum jusqu'à obtenir des sommes partielles les plus proches possible de M .

Toutes les luminances décomptées sont alors attribuées à un niveau de gris unique. La méthode permet de traiter les histogrammes multi-modaux avec toutefois deux inconvénients :

- deux images égalisées ne peuvent être comparées en termes de niveaux de gris alors qu'avec d'autres transformations on peut forcer des limites telles que les niveaux de gris représentent les mêmes luminances ;
- si l'histogramme est *trop* déséquilibré, la méthode peut échouer. De toute façon, les résultats ne peuvent être qu'approchés car les luminances ne sont pas divisibles.

Binarisation d'image.

On peut enfin réaliser sur une image une *binarisation* c'est-à-dire associer un seul niveau de sortie noir ou blanc à un intervalle de luminances. C'est le type de technique utilisé pour les lecteurs de codes barres, pour l'analyse des lettres d'un texte, l'analyse d'empreintes digitales (fig. 5), l'extraction d'une zone de végétation abîmée par un feu de forêt, l'analyse des eaux libres (fig. 4), etc. . .

C'est la technique utilisée pour représenter les courbes de Julia des figures 9 et 10. On parle de *segmentation* d'image dans le cas satellitaire.

Cette technique est aussi celle qui permet les représentations les moins encombrantes (un bit allumé ou éteint par pixel de l'image). Il faut associer alors d'autres techniques pour représenter plus d'informations : c'est ce qui a été fait pour les zooms sur l'ensemble de MANDELBROT (fig. 6).

La *luminance* d'un pixel représente en fait le nombre d'itérations qui sont nécessaires pour faire diverger le point du disque unité. On a représenté les itérations

paires en noir ce qui donne cet aspect en *courbes de niveaux*. Une binarisation pure (fig. 7, 9 et 10) ne fournit qu'une petite partie de l'information : ensemble des points ayant divergé dans un intervalle de K itérations. Quant à la représentation en 16 niveaux de gris (fig. 8), on peut voir qu'elle est beaucoup plus encombrante. La forme multi-modale de l'histogramme (fig. 8b) exigeait une technique d'équipopulation.

La technique de la table de transcodage (ou table look-up) (fig. 12).

Une table de transcodage est une fonction qui transforme une luminance de l'image en un niveau de gris donné sans transformation de la structure spatiale de l'image. Cette conversion d'une luminance en niveau de gris est réalisée par une table associative : la luminance du pixel en cours de traitement pointe sur le rang de la table de transcodage où se trouve stocké le niveau analogique de sortie (fig. 12). Cette technique est ultra-rapide sur le plan informatique, elle permet de réaliser les transformations les plus complexes de l'image (logarithme ou exponentielle par exemple) en des temps linéaires (la table de transcodage est en effet calculée **avant** le traitement analogique et seul un adressage est effectué au moment de la restitution graphique analogique).

La réalisation de compositions colorées du type de celle de la couverture est une extrapolation de cette technique : on calcule pour l'image noir et blanc à représenter trois tables de transcodage complémentaires : une table pour le jaune, une pour le cyan, une pour le magenta. L'image est ensuite éditée à l'imprimante en trois passes par lignes, une passe par couleur.

Les logiciels FastCart, Turbo-Image et Voici Mona Lisa permettent l'apprentissage de ces manipulations de table de transcodage.

C. La restitution sur un terminal graphique.

Le principe est simple : on définit pour 16 niveaux de gris un pixel de 4×4 bits. Sur imprimante on noircit progressivement tous les points de la matrice de 16 aiguilles, ce qui donne 17 niveaux possibles du blanc au noir. Les points doivent être définis avec certaines précautions pour éviter les effets de lignage des pixels bord à bord.

Sur l'écran les points allumés représentent, au contraire de l'imprimante, le blanc, les points éteints le noir (ce qui explique que les recopies d'écran sur l'imprimante soient indiquées comme des négatifs) (fig. 2 et 5).

Les graphiques posent toujours des problèmes de géométrie : une matrice de 4×4 bits ne permet généralement pas d'obtenir un pixel orthonormé. Dans la boîte à outils graphique MetaWindow c'est le pixel 4×5 qui se rapproche le plus du graphique orthonormé. Dans le cas des imprimantes on rencontre des problèmes du même type, seules des imprimantes relativement coûteuses sont capables de frapper un nombre identique d'aiguilles par unité de distance en abscisse et en ordonnée. Si on ne dispose pas de ce matériel, il faut prédéfinir des pixels graphiques dont le nombre de bits en ligne et colonne soit le plus proche possible du rapport 1.

CONCLUSION

Les images numériques envahissent notre civilisation : images spatiales, biomédicales, robotiques, de synthèse...

Ce domaine de recherche en évolution rapide est d'une importance économique fondamentale. D'autre part, l'équipement actuel des établissements de second degré (compatibles PC, écrans et imprimantes graphiques) est particulièrement adapté à un coût pas trop élevé à des activités graphiques et cartographiques. Il peut être intéressant de faire profiter les élèves de cette évolution favorable.

REMERCIEMENTS

Ce travail est largement pluri-disciplinaires et a bénéficié d'aides multiples, de mathématiciens : J. DREYER, F. PLUVINAGE, d'électroniciens : J.-M. MOREL, S. WENDLING ; du soutien du Centre Informatique et Enseignement, de l'INRP, qu'ils soient ici remerciés.

LOGICIELS UTILISÉS

Boîtes à outils :

- Turbo-Graphix de Borland.
- MetaWindow de MetaGraphics Software.

Cartographie :

- FastCart : logiciel de cartographie écrit par P. PISANO, Université de Grenoble.

Imagerie satellitaire :

- Turbo-Télédao : logiciel de traitement d'images satellitaires écrit pour le contexte de la classe (T. HATT).

Numérisation et traitement d'images numérisées :

- Turbo-Image : ensemble logiciel et matériel de numérisation et de traitement d'images, mis au point par l'équipe J. CARDON, J. DREYER, T. HATT, J.-M. MOREL, S. WENDLING au Centre Informatique et Enseignement.
- Mzoom et Anim calcul et animation de zooms sur l'ensemble de MANDELBROT (T. HATT).

Enseignement assisté de la notion d'image numérique et de table de transcodage :

- Voici Mona Lisa : logiciel pour MO5 sous Nano-réseau, (T. HATT, édité par France Image Logiciel).

RÉFÉRENCES

- CAUVIN (Colette) et al.- *Discrétisation et représentation cartographique*, Reclus, 1987, 116 pages.
- Collectif.- *Principes physiques et mathématiques de la télédétection*, CNES, 1983, 833 pages.
- Collectif.- *Du satellite à la classe*, in "Rencontres Pédagogiques", n° 17, 1987, 126 pages.

T. HATT

- COSTER (Michel) et al.- *Précis d'analyse d'images*, CNRS, 1985, 521 pages.
- CUQ (François).- *Téledétection du littoral saintongeais*, Ecole Normale Supérieure de Jeunes Filles, 1983, 192 pages.
- HATT (Thierry).- *Logiciel Télédéo, télédétection assistée par ordinateur, logiciel de traitement d'image numérique*, Univ. L. Pasteur, IREM de Strasbourg, 1985, 124 pages.
- HATT (Thierry).- *Voici Mona Lisa*, logiciel édité par France Image Logiciel Thompson, 1986.
- HATT (Thierry).- *Image numérique et télédétection en géographie au lycée*, colloque CNAM "Du tableau noir à l'ordinateur graphique", mars 1986, 21 pages.
- HATT (Thierry).- *Images pédagogiques, images professionnelles, quelles images satellitaires pour la classe ?*, à paraître in "Revue Géographique de Lyon", dernier trimestre 1988, 38 pages.
- TOUMAZET (Jean-Jacques).- *Traitement de l'image sur micro-ordinateur*, Sybex, 1987, 238 pages.
- PISANO (Pierre).- *Développement de didacticiels en géographie*.- Mémoire de Maîtrise, USTM de Grenoble I, Institut de Géographie Alpine, 1986, 36 pages.
- PEITGEN (H.-O.) et al.- *The beauty of fractals*, Springer-Verlag, 1986, 199 pages.

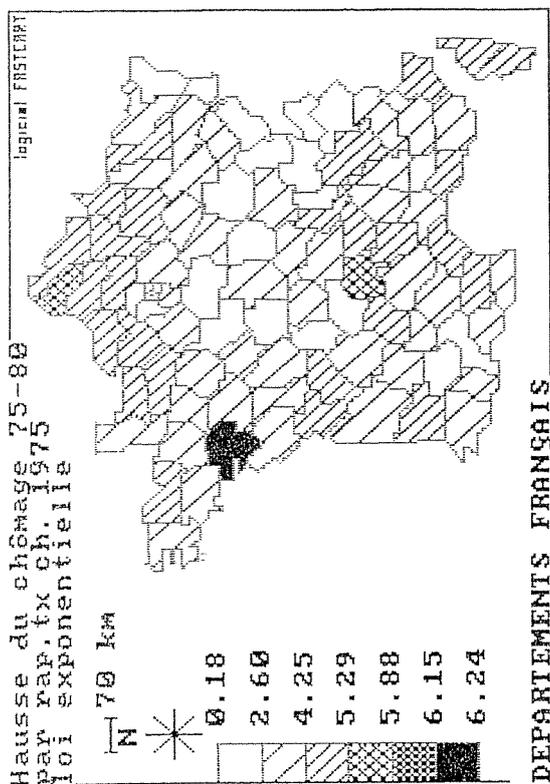


figure 1 c

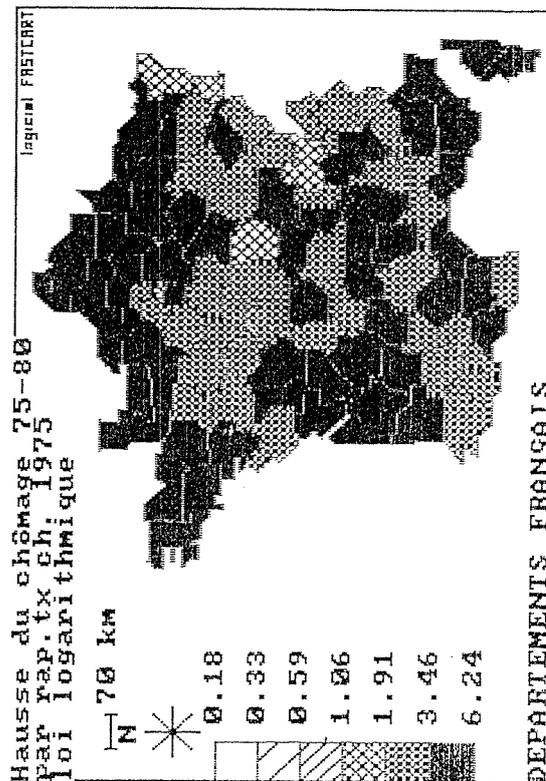


figure 1 d

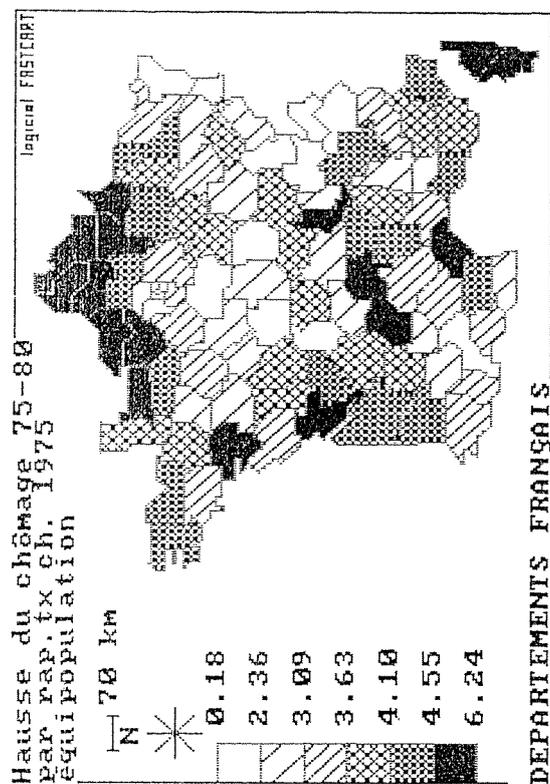


figure 1 a

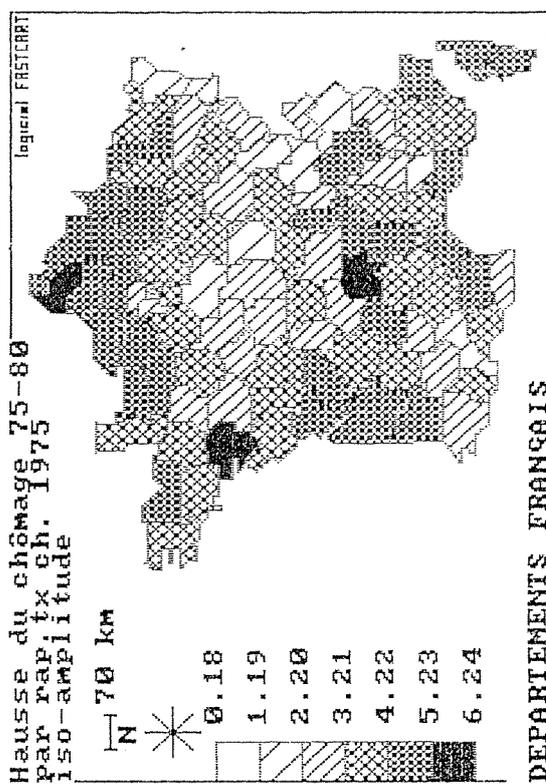
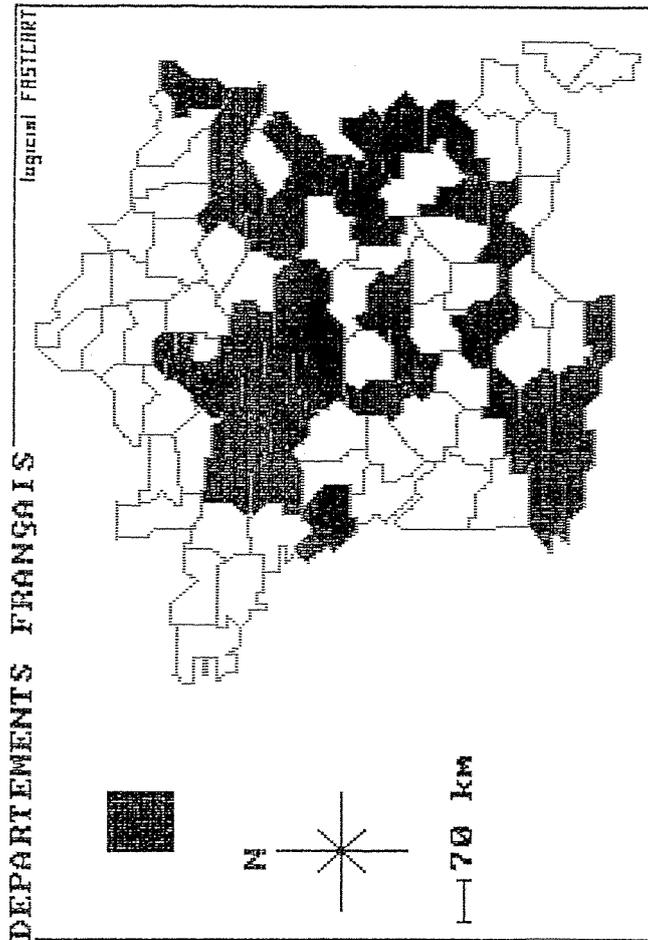


figure 1 b



DEPARTEMENTS FRANÇAIS

Un(e) Département de la couleur du carré a des valeurs comprises dans l'intervalle suivant pour: Hausse du chômage 75-80 entre 0 et 3.52 % par rapport à par rap.tx ch. 1975

figure 1 e

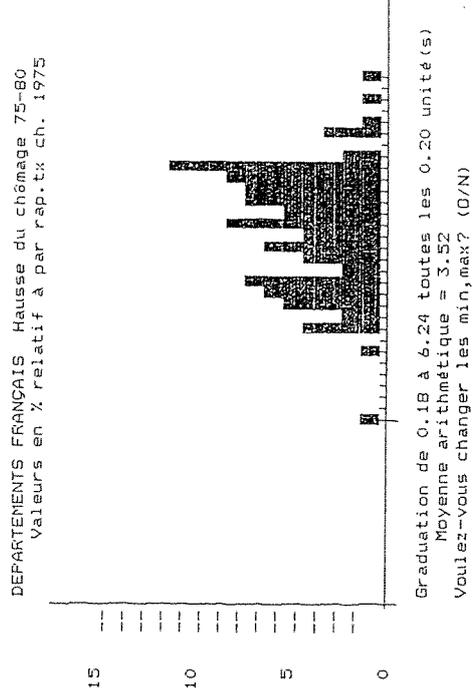


figure 1 f

RESTITUTION GRAPHIQUE DES IMAGES NUMÉRIQUES

LOI D'EQUIPOPULATION



figure 2 a

LOI LOGARITHME

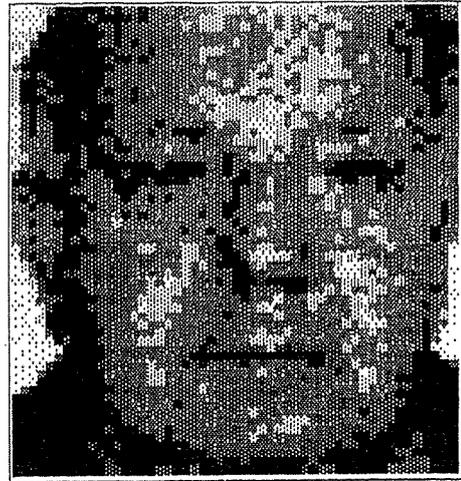


figure 2 b

LOI LINEAIRE,

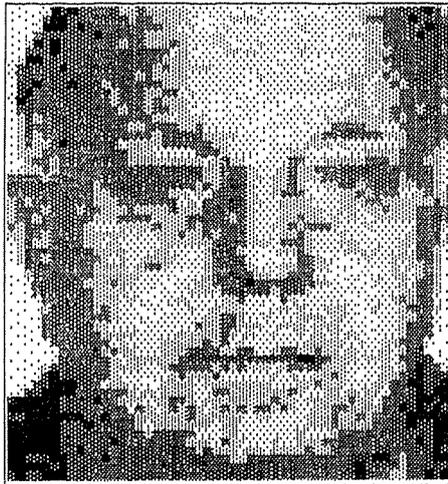


figure 2 c

LOI EXPONENTIELLE

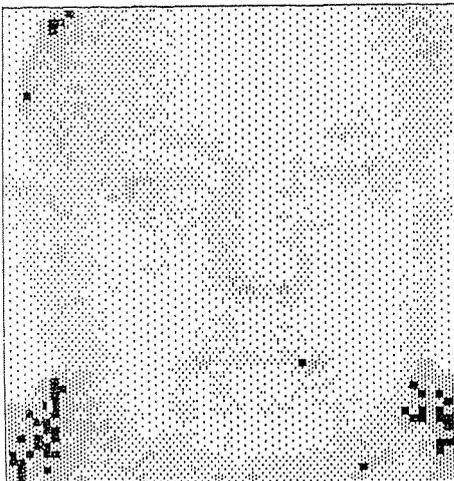


figure 2 d

LOI BINAIRE

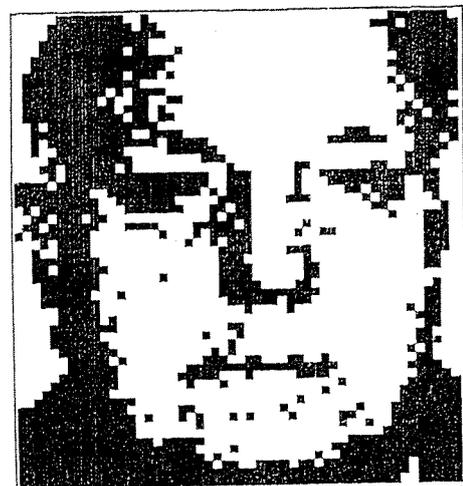
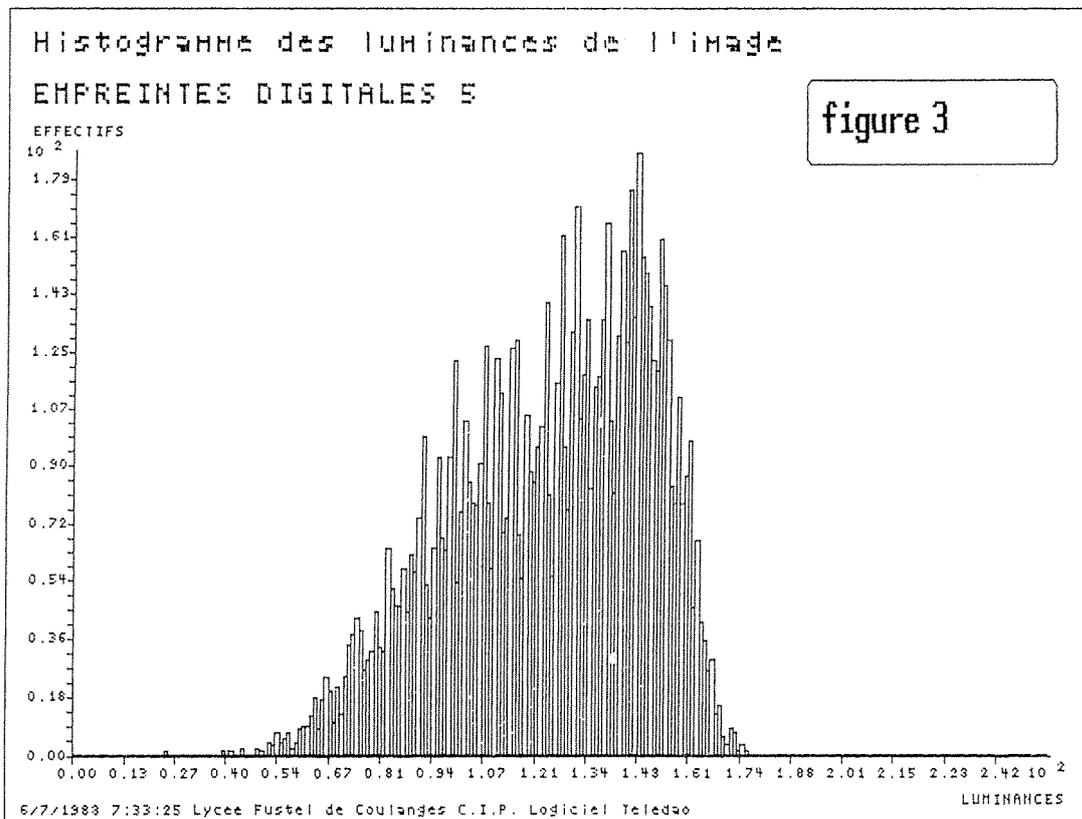
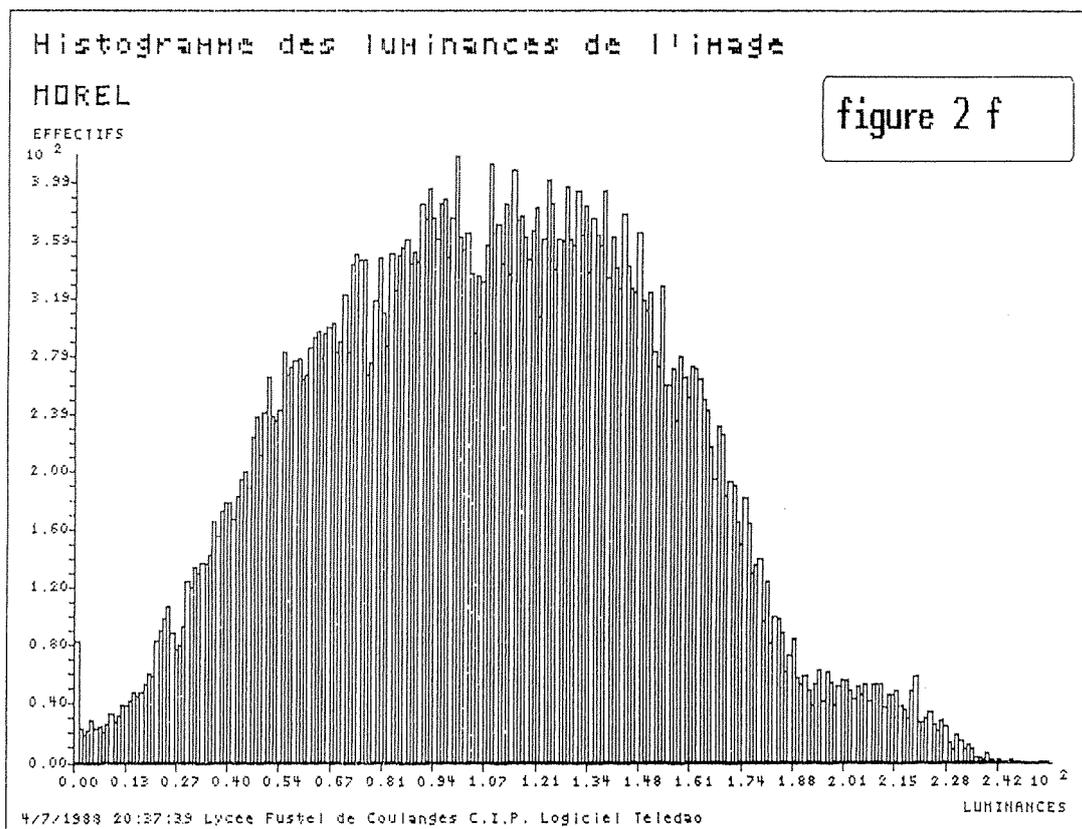
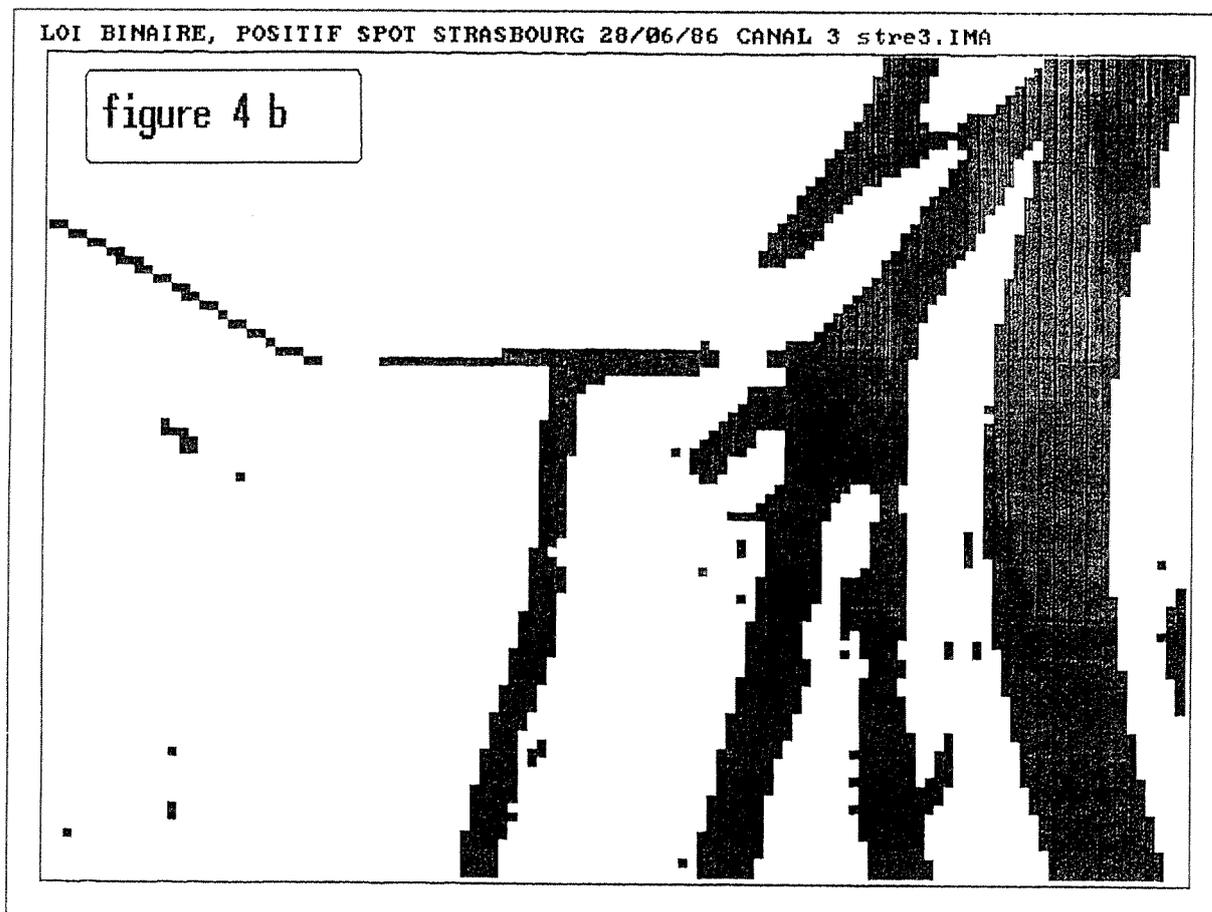
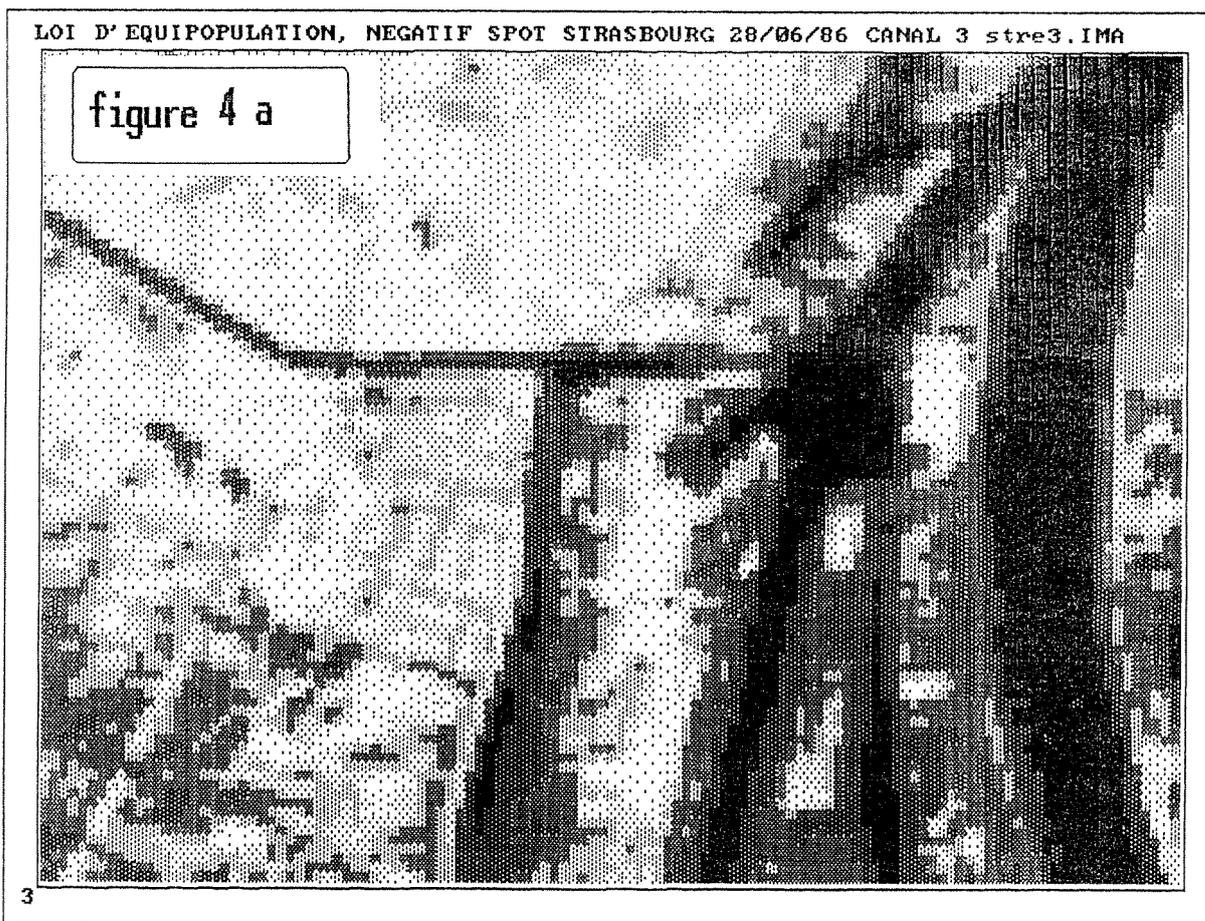


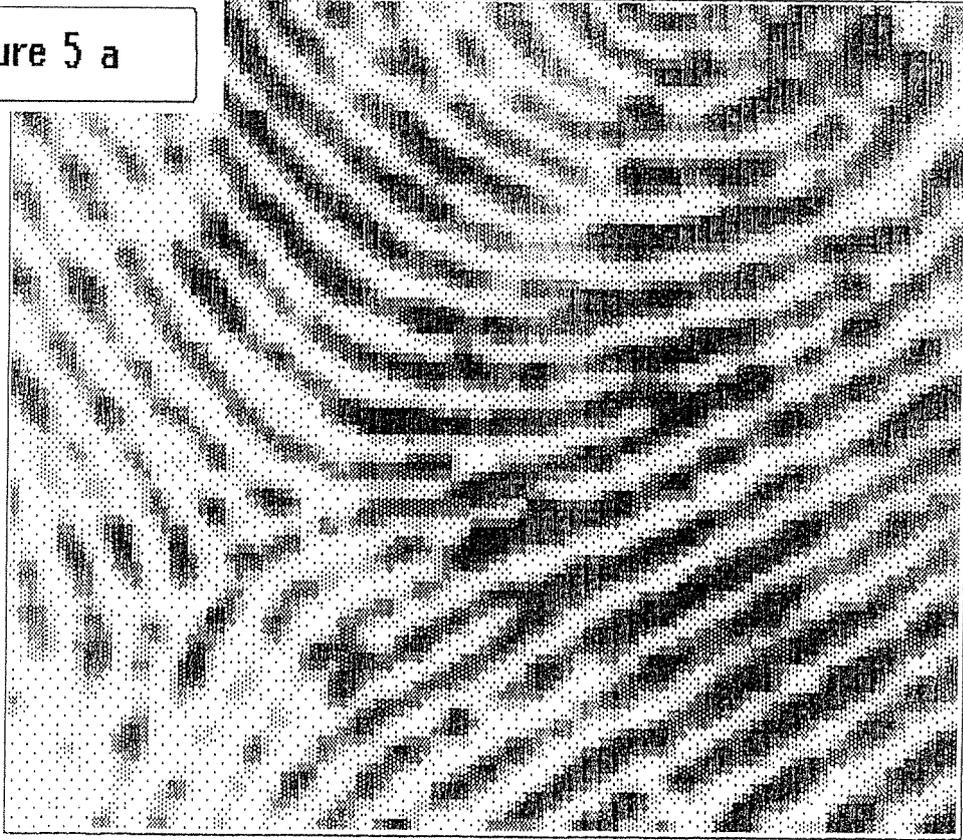
figure 2 e





LOI D'EQUIPOPULATION, NEGATIF EMPREINTES DIGITALES 5

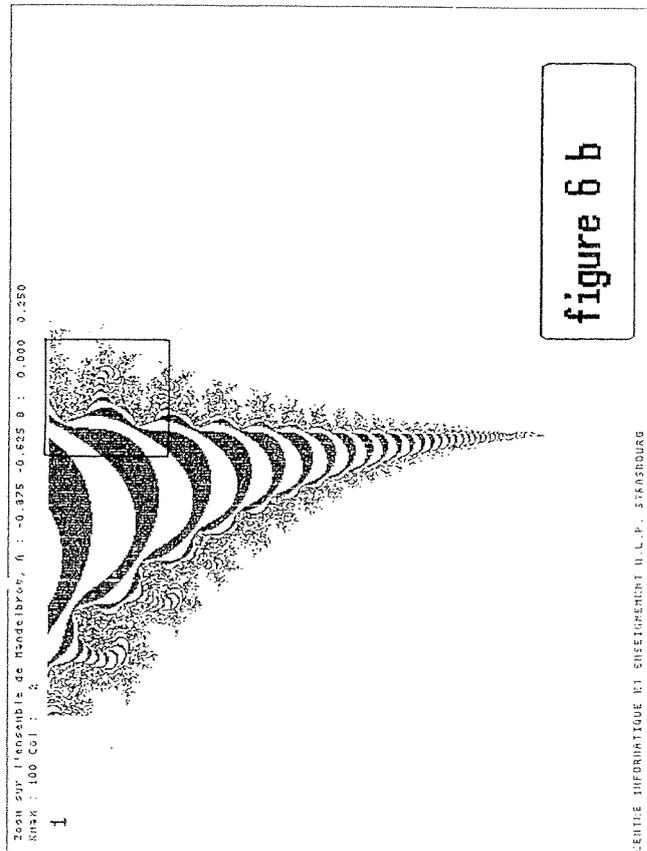
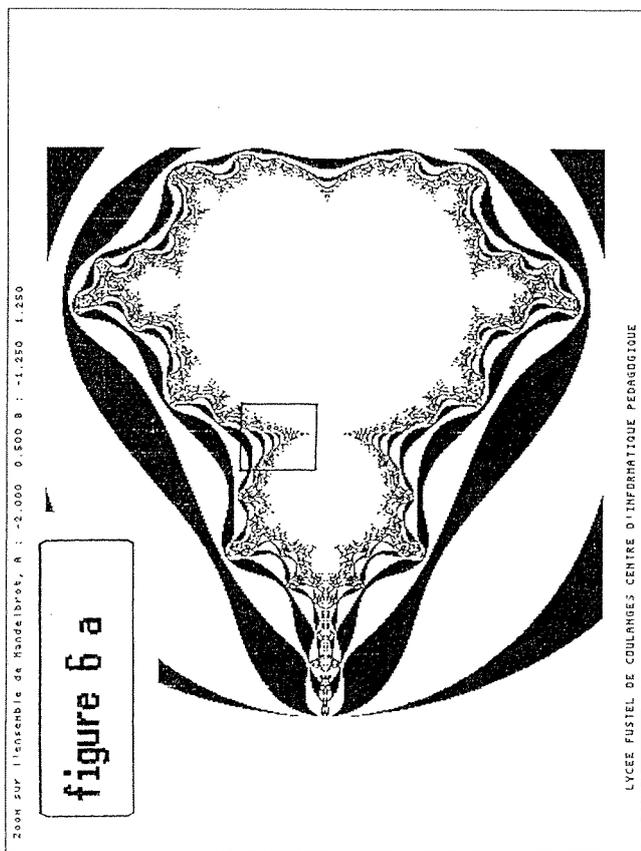
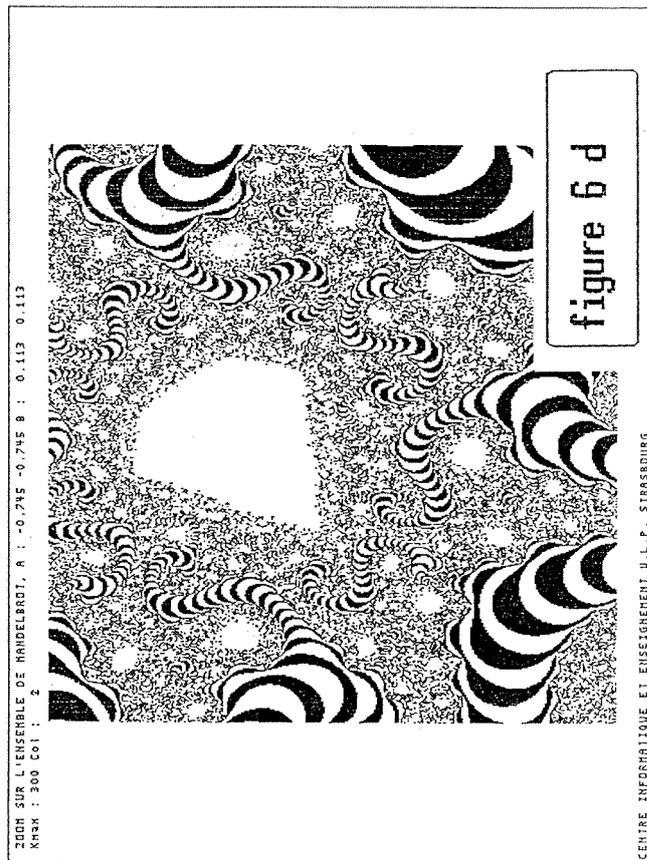
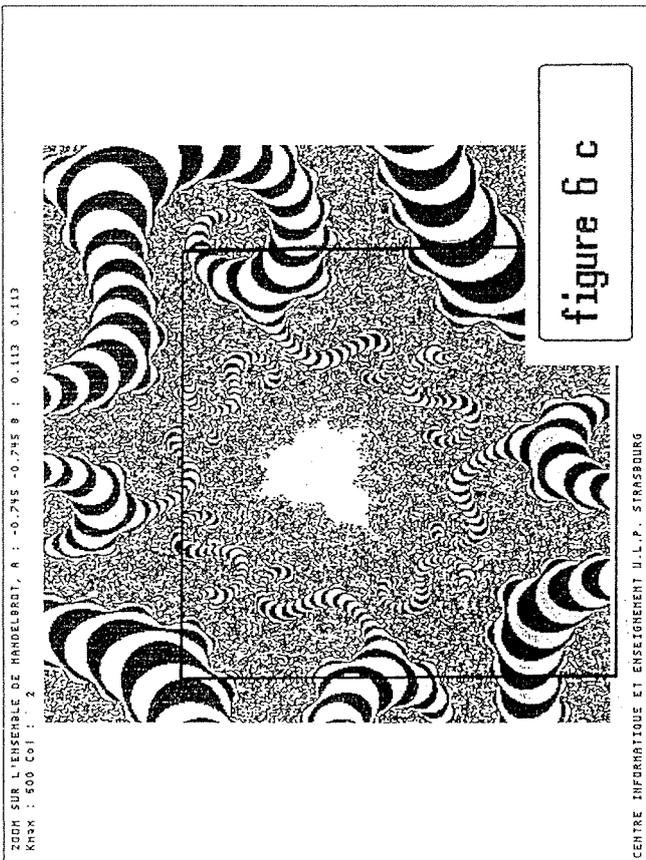
figure 5 a



LOI BINAIRE, POSITIF EMPREINTES DIGITALES 5

figure 5 b





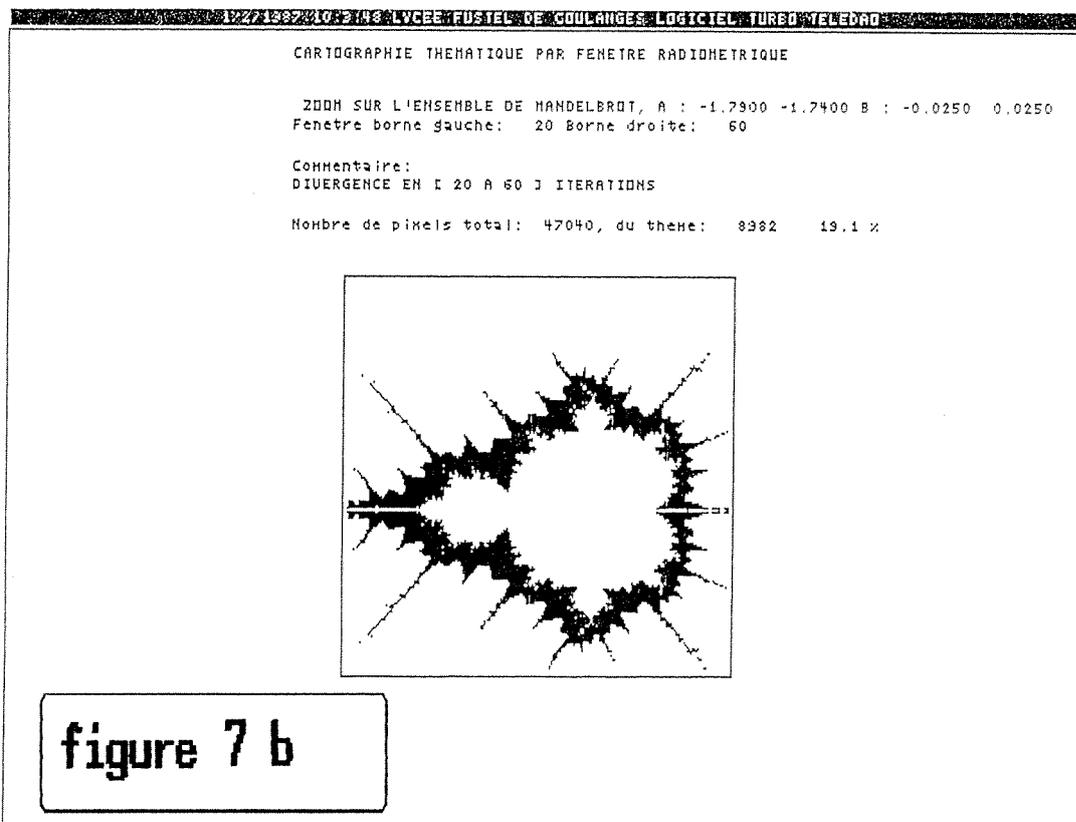
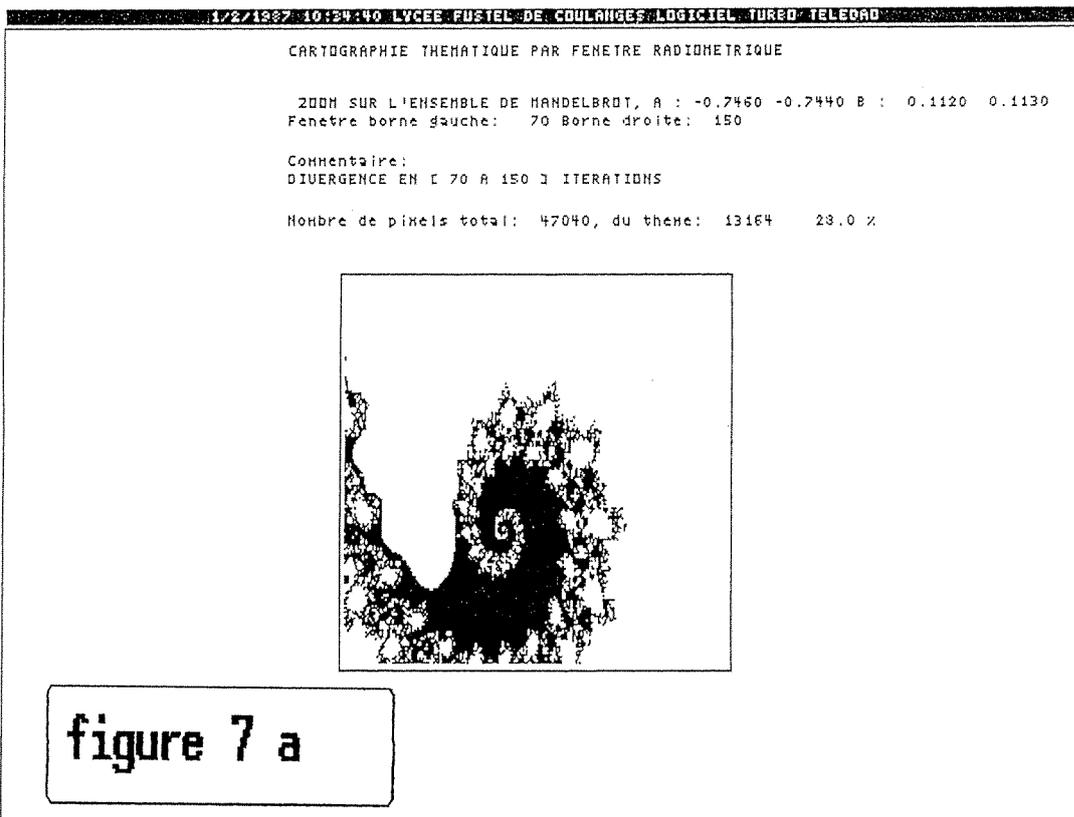
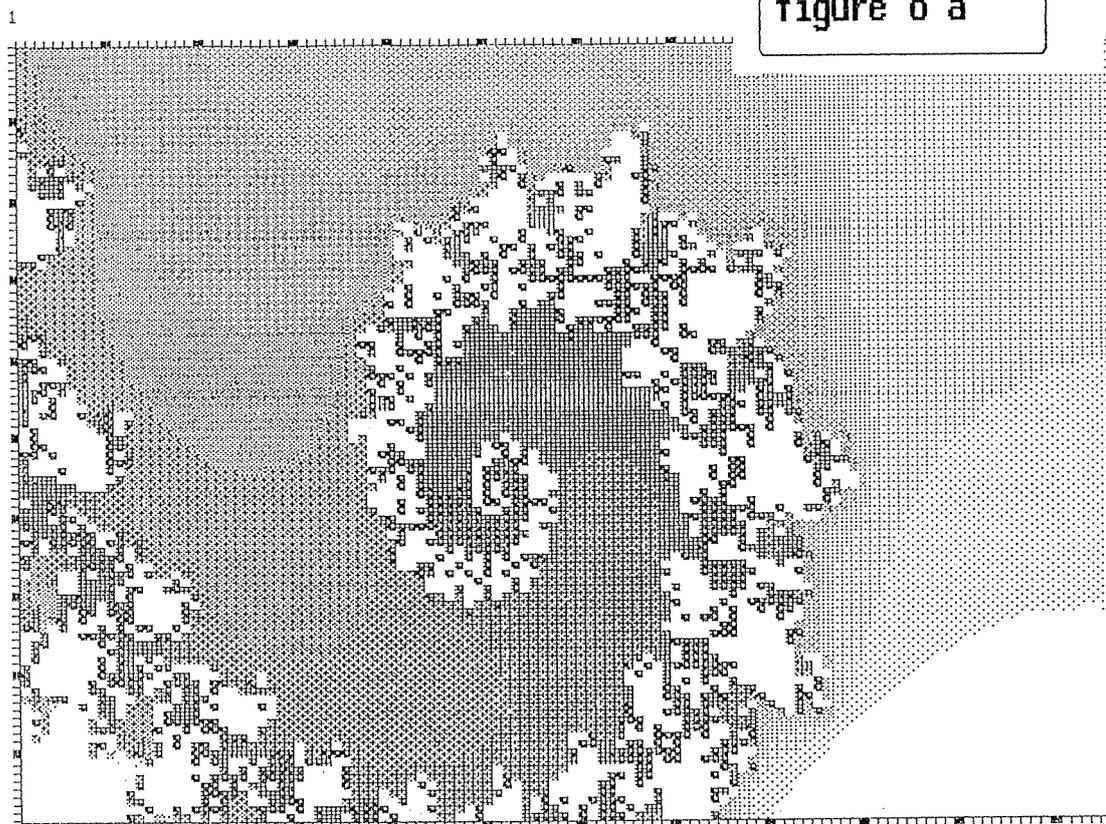


figure 8 a



Histogramme des luminances de l'image

ZOOM SUR L'ENSEMBLE DE MANDELBROT, A : -0.7460 -0.7

EFFECTIFS

10^3

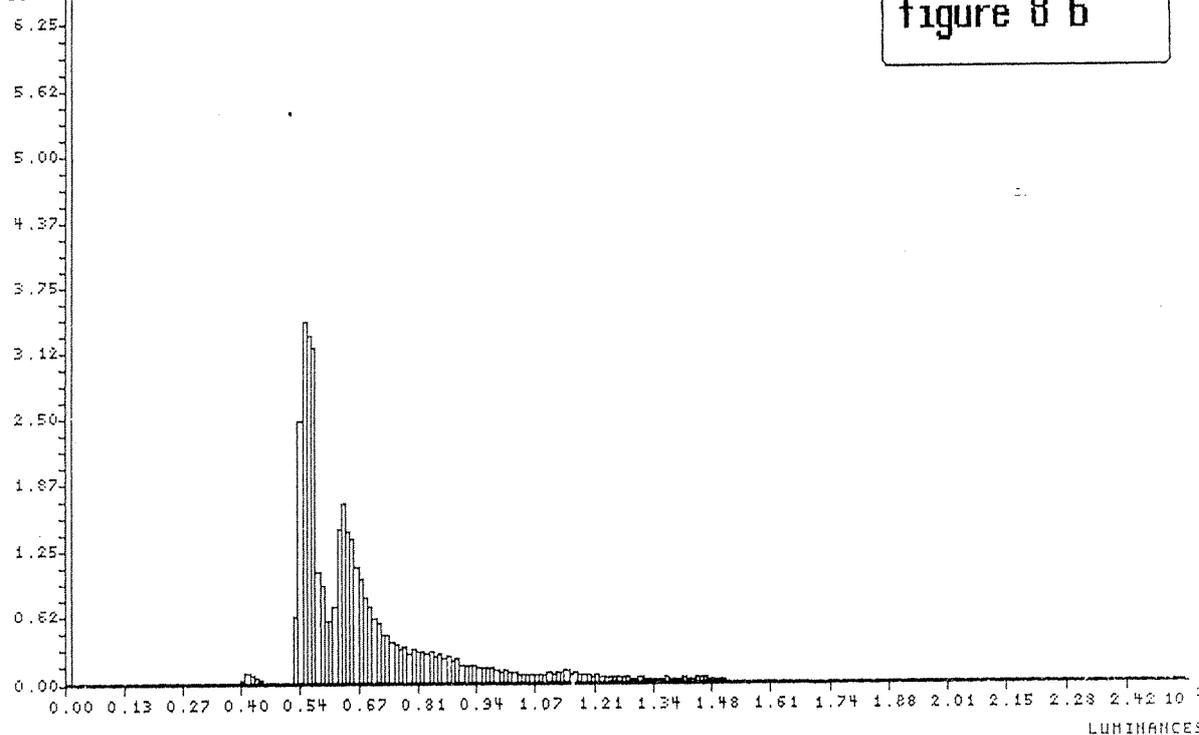
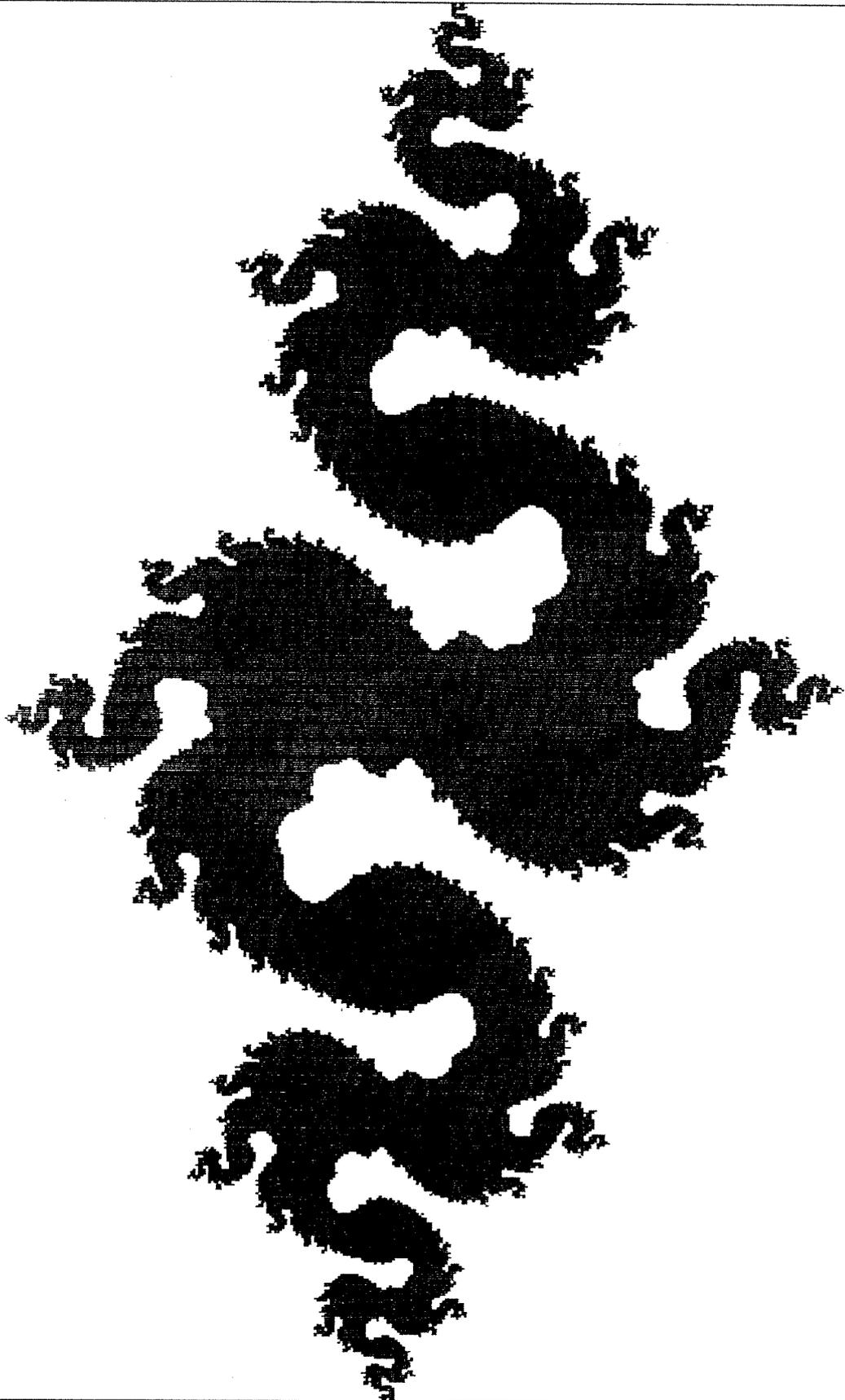


figure 8 b

YUL19:0.777000 b: 0.125000 K: 30 Bsup: 30 V13.IHR

figure 9



CARTOGRAPHIE THÉMATIQUE PAR FENÊTRE RADIMÉTRIQUE

Courbe de Julia a: -0.2905 b: -0.5868 k: 150 Bsup
 Fenêtre borne gauche: 20 Borne droite: 44

Commentaire:
 DIVERGENCE DE C 20 A 44 3 ITERATION

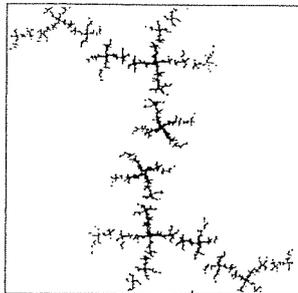


figure 10 a

CARTOGRAPHIE THÉMATIQUE PAR FENÊTRE RADIMÉTRIQUE

Courbe de Julia a: -0.2905 b: -0.5868 k: 150 Bsup
 Fenêtre borne gauche: 15 Borne droite: 56

Commentaire:
 DIVERGENCE DE C 15 A 56 3 ITERATIONS

Nombre de pixels total: 57600, du theme: 5300 10.2 %

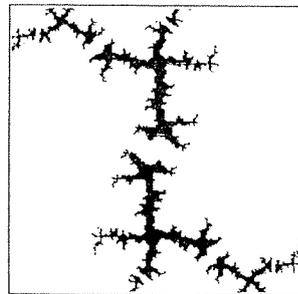


figure 10 b

CARTOGRAPHIE THÉMATIQUE PAR FENÊTRE RADIMÉTRIQUE

Courbe de Julia a: 0.7770 b: 0.1360 k: 150 Bsup
 Fenêtre borne gauche: 15 Borne droite: 40

Commentaire:
 DIVERGENCE DE C 15 A 40 3 ITERATIONS

Nombre de pixels total: 57600, du theme: 12957 22.5 %

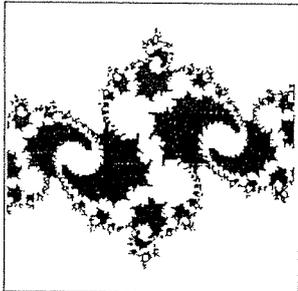


figure 10 c

CARTOGRAPHIE THÉMATIQUE PAR FENÊTRE RADIMÉTRIQUE

Courbe de Julia a: 0.7770 b: 0.1360 k: 150 Bsup
 Fenêtre borne gauche: 41 Borne droite: 60

Commentaire:
 DIVERGENCE ENTRE C 41 A 60 3 ITERATIONS

Nombre de pixels total: 57600, du theme: 5129 8.9 %

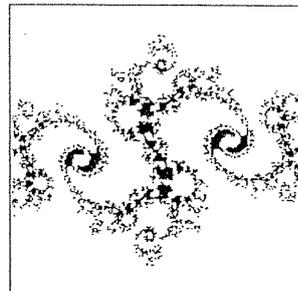


figure 10 d

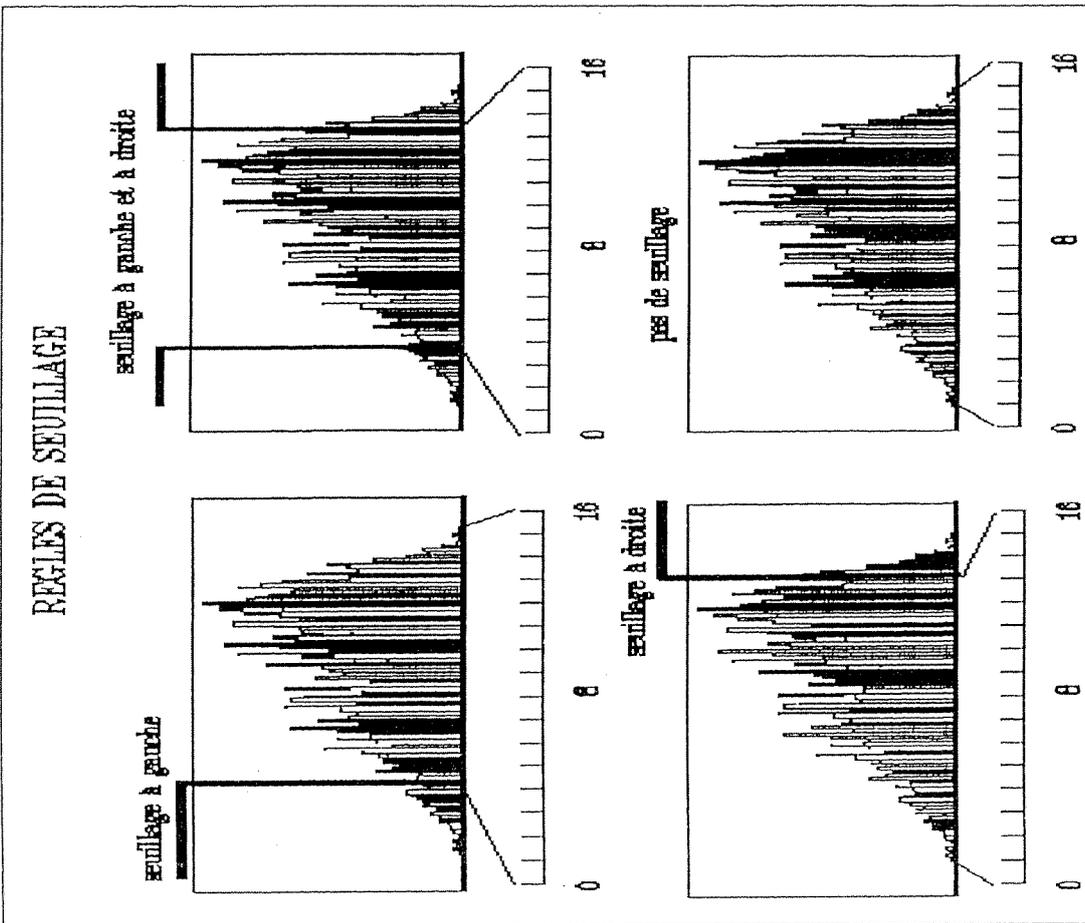


figure 11

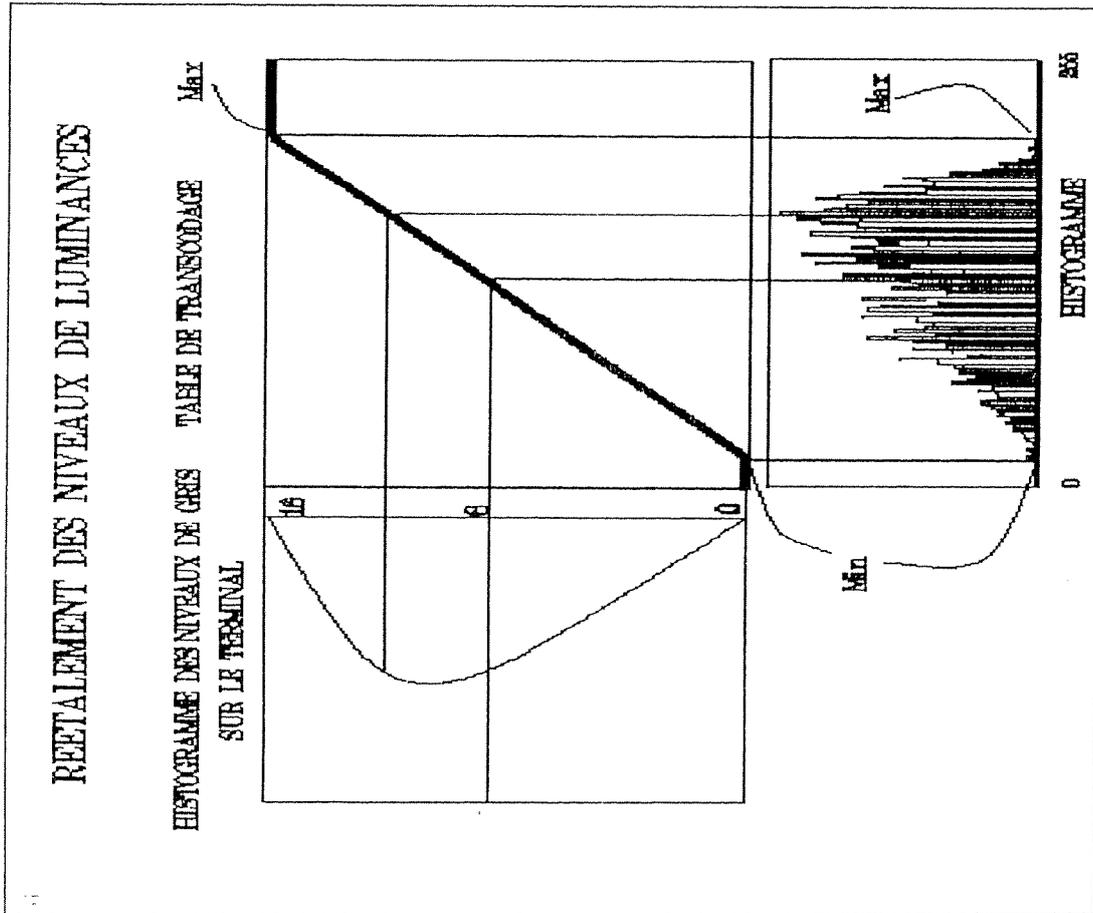


figure 12