



IMAGES DE SYNTHÈSE DANS LES SIMULATEURS D'ENTRAÎNEMENT -
COMPUTER GENERATED IMAGES IN TRAINING SIMULATORS

Gérard ALLAIN

THOMSON-CSF DIVISION SIMULATEURS 26 Chaussée Jules César 95523 OSNY

RESUME

L'utilisation courante des images de synthèse, dans les simulateurs de vol, pour la reproduction de l'environnement extérieur à la cabine, date d'une dizaine d'années.

La contrainte essentielle réside, ici dans le caractère interactif des simulateurs d'entraînement, qui impose une génération d'images en temps réel.

Cet article présente certains aspects particuliers de la synthèse d'image dans le domaine de la simulation et décrit les principales approches envisagées actuellement sur le plan des procédés de modélisation, des algorithmes de visualisation et de l'architecture des générateurs d'image.

SUMMARY

The use of computer generated imagery, in flight simulators to provide external visual cues became wide spread about ten years ago.

The main problem lies in the interactive nature of training devices which requires a real time image generation.

This paper presents some specific aspects of image synthesis in the simulation field and describes the main approaches being considered now regarding to modeling techniques, display methods and image generators architecture.



INTRODUCTION

Issue des besoins de l'aéronautique, l'industrie des simulateurs concerne aujourd'hui de nombreux domaines où la formation de personnel sur les équipements réels, présente des difficultés importantes, à cause des problèmes de sécurité, du fait de la complexité croissante des systèmes ou de leur coût d'exploitation.

Les développements les plus importants en ce qui concerne l'amélioration du réalisme des simulateurs, portent aujourd'hui sur le dispositif de reconstitution de l'environnement visuel de l'opérateur.

Ce domaine est largement dominé par les procédés de synthèse d'images par ordinateur, appelés ici C.G.I. ("Computer generated imagery"). La simulation s'est en effet intéressée très tôt à ces techniques et a largement contribué à leur développement. Le premier dispositif de ce type, destiné à équiper un simulateur de vol, a été conçu en 1962 par les laboratoires de General Electric pour la Nasa.

Les générateurs d'image réellement perfectionnés et capables en particulier de reproduire des scènes tridimensionnelles, datent cependant du début des années 70. Ces premiers systèmes C.G.I. ne disposaient que d'une capacité limitée de l'ordre de quelques centaines de facettes et faisaient appel à une électronique entièrement câblée et relativement importante.

Par la suite, de nombreuses améliorations ont pu être apportées grâce à l'évolution constante de la technologie microélectronique. Les systèmes actuels sont capables de reproduire des scènes complexes et variées, constituées de plusieurs milliers de faces, sous différents éclairages, et avec une gamme d'effets visuels de plus en plus étendue (lissage, transparences, textures, etc...).

Le succès des systèmes C.G.I., ainsi que la sophistication et la complexité croissante des tâches des pilotes, ont cependant créé de nouvelles demandes.

Aujourd'hui, les besoins d'entraînement sur simulateurs exigent couramment la reproduction de terrains de très grandes dimensions, avec un niveau de détail de plus en plus élevé, compatible avec la simulation de vols en basse ou très basse altitude, ou encore d'opérations au sol.

CONCEPTS "GRAPHIQUES" DE BASE

La constitution d'un modèle numérique, capable de restituer la complexité et la variété des formes et des textures rencontrées dans la nature, et apte en outre à la génération d'images en temps réel est bien sur un problème extraordinairement difficile.

Les efforts accomplis jusqu'ici ont davantage porté sur la capacité de traitement de systèmes basés sur une représentation élémentaire de formes (polyèdres) plutôt que sur la qualité de modélisation.

Aujourd'hui de nouvelles voies, basées sur la recherche de modèles réellement adaptés aux différents types d'éléments du paysage, et sur l'extension de la notion de texture, commencent à être sérieusement envisagées.

Représentation des formes 3D

Le procédé le plus simple consiste à représenter les objets 3D par une surface polyédrique, c'est-à-dire par une collection de surfaces planes, délimitées par un contour polygonal, en général convexe (facettes).

Ce type de surface présente l'avantage de donner lieu à des calculs linéaires et de permettre l'utilisation d'algorithmes d'élimination des parties cachées performants.

La plupart des superstructures (bâtiments, ouvrages d'art, etc...) peuvent être facilement et naturellement modélisées de cette manière. Les éléments de forme courbe ne peuvent être, cependant représentés que par une approximation plus ou moins fidèle de leur surface.

Les quadriques constituent la forme la plus élémentaire des surfaces courbes. Elles sont bien adaptées à la représentation de formes simples et régulières correspondant aux objets de construction humaine (châteaux d'eau, silos, etc...).

De nature illimitée (ellipsoïde excepté), elles sont en général bornées par des plans. Les volumes élémentaires ainsi créés (cylindres, cônes, etc...) peuvent être assemblés pour former des objets complexes.

La représentation de textures de type aléatoire, donnant l'illusion d'une certaine irrégularité, est envisagée par certains constructeurs (GARD 82) pour étendre le champ d'application de ces surfaces aux éléments naturels (collines, bosquets, arbres...).

Les modèles vraiment adaptés à la représentation de formes quelconques font appel à des approximations par "carreaux" (patches) à l'aide de surfaces paramétriques d'ordre 3 (bicubiques). Ces surfaces ne sont réellement envisagées en simulation que pour la représentation du terrain.

Les surfaces les plus commodes à utiliser dans ce cas, sont les B-spline. Les algorithmes de visualisation publiés dans la littérature procèdent :

- soit par subdivision récursive de la surface (CATM 74, CLAR 79, LANE 80),
- soit par détermination explicite de la silhouette dans le plan de l'écran (BLIN 78, WHIT 78).

Tous présentent de grandes difficultés du point de vue de la génération d'images en temps réel. Les procédés de subdivision récursive font cependant l'objet d'un intérêt particulier car ils permettent de représenter également des "textures fractales".

Les concepts de modélisation stochastique, et de représentation fractale introduits par Mandelbrot (MAND 77) et développés par Fournier, Fussel, et Carpenter (FOUR 80), répondent en effet très bien aux besoins de la simulation.



Les méthodes proposées par ces auteurs consistent à modéliser les éléments naturels du paysage comme le résultat d'un processus stochastique.

Une surface "stochastique" peut être définie par une fonction paramétrique déterministe tenant compte de l'allure générale de la surface (B-spline par exemple) et une fonction aléatoire tenant compte des propriétés statistiques de la surface. Cette dernière composante est facilement déterminée, au cours du processus de subdivision à partir de tables de nombres aléatoires.

Ce type de modélisation permet de représenter la surface du terrain par exemple, avec un niveau de définition quelconque sans augmenter la taille de la base de données. En dynamique le niveau de détail de chaque parcelle de terrain évolue de manière automatique et continue, en fonction des déplacements de l'observateur. La méthode proposée par Fournier garantit, en outre, que la nature macroscopique de la texture reste inchangée lorsque des détails supplémentaires sont introduits, grâce à un choix approprié de "graines" pour les générateurs de nombres aléatoires.

Représentation des textures

La représentation des textures revêt une grande importance en simulation, car ce sont les détails des objets, dont la densité apparente évolue à la fois dans le temps et dans l'espace, qui véhiculent l'essentiel des informations de distance et d'orientation (KOEN 76).

Le concept de texture est généralement compris comme un attribut de la forme, exprimant certaines propriétés statistiques de la surface par une modulation directe de la couleur ou une perturbation de la normale à la surface (textures lumineuses).

La méthode vraiment générale consiste à effectuer un "pavage" de la surface à partir de motifs bidimensionnels codés point par point. Les transformations à effectuer sont en général complexes. Plusieurs méthodes, destinées à faciliter les calculs, sont proposées dans la littérature (CATM 80, GANG 80, FEIB 80, SKOL 82).

Ces procédés de pavage sont généralement limités en pratique à des motifs périodiques. L'utilisation de "textures vidéo", ouvre des horizons tout à fait nouveaux et très prometteurs dans le domaine de la synthèse de paysages.

Des images 2D de qualité photographique peuvent être ainsi "spatialisées" et appliquées sur des surfaces nues, de manière à représenter avec un excellent réalisme et tous les détails nécessaires, des objets divers tels que les bâtiments, tours, ouvrages, etc...

Modèles d'éclairage et de visibilité

Les modèles d'éclairage utilisés en simulation ne prennent en compte, en général, que les phénomènes de réflexion diffuse. L'ombrage des surfaces fait appel à une approximation simple de la loi de Lambert.

Les phénomènes de réflexion spéculaire ne présentent que peu d'intérêt sur le plan de qualité des aides visuelles fournies au pilote. Des effets de transparences sont par contre parfois simulés pour représenter :

- les brumes, fumées, etc...
- les ombres portées,
- ainsi que certains objets particuliers tels que les rotors d'hélicoptère, les treillis métalliques, etc...

Les ombres portées constituent une aide visuelle importante ; compte-tenu des difficultés de calcul, elles sont généralement prédéterminées au niveau de la constitution en temps différé de la base de données.

Les phénomènes de visibilité atmosphérique, liés aux brumes, brouillards ou nuages, sont simulés par une réduction du contraste en fonction de la distance.

Les dispositifs de visualisation pour simulateurs prennent en compte, en général, une modélisation des sources lumineuses, ainsi que toute une panoplie d'effets spéciaux (pluie, éclairs, neige, etc...).

La modélisation est parfois étendue, par ailleurs, aux caractéristiques d'autres capteurs que l'oeil humain, tels que les dispositifs à images infra-rouge, etc...

Élimination des parties cachées

L'élimination des parties cachées présente de grandes difficultés, particulièrement dans le cas de la génération d'images en temps réel.

La méthode la plus utilisée, en pratique, est celle proposée par Schumaker (SCHU 69), car une grande partie de la tâche de détermination des parties visibles est reportée au niveau de la constitution en temps différé de la base de données.

Le principe consiste à décomposer chaque élément de la scène en volumes élémentaires, en général convexes, séparés deux à deux par des plans "fictifs". L'ensemble de ces plans détermine une partition de l'espace en zones, auxquelles il est possible d'affecter une liste de priorités d'affichage fixe.

En pratique le nombre de plans nécessaires est assez réduit car un même plan peut séparer plusieurs couples d'objets.

Les listes de priorité sont déterminées hors temps réel et stockées au niveau de la base de données. Les traitements effectués en temps réel, consistent à déterminer la position de l'observateur par rapport à chacun des plans ; les listes de priorité sont généralement obtenues par le parcours d'un arbre binaire.

Ces techniques, connues sous le nom de "priorités dynamiques", présentent cependant des contraintes importantes au niveau de la création de la base de données. Certains auteurs proposent aujourd'hui d'autres méthodes de classement préalable des informations, plus générales ou se prêtant davantage à un traitement automatique sur ordinateur.



Devant ces contraintes, certains (rares) constructeurs ont opté pour des algorithmes à balayage ligne du type Watkins. L'algorithme Z-buffer serait par ailleurs très séduisant, car extrêmement simple à mettre en oeuvre en pratique, s'il ne posait pas de sérieux problèmes du point de vue du filtrage de l'image.

"ANTIALIASING"

Les images produites par les premiers systèmes C.G.I. étaient entachés de défauts d'autant plus gênants qu'ils étaient inhabituels et inconnus dans les procédés de télévision conventionnels.

Ces anomalies, telles que les effets de crénelage, de clignotement, de scintillement, etc... sont dues au principe même de la synthèse d'images par ordinateur qui procède par un double échantillonnage, spatial et temporel.

Les études publiées récemment sur ce sujet (FIEB 80, GARD 80, SCHU 80, CROW 81) traitent principalement des techniques de filtrage spatial. Rares sont les auteurs (BUNK 82) qui abordent les problèmes liés à l'échantillonnage temporel.

Filtrage spatial

L'image informatique est souvent reconnaissable par des imperfections (crénelage) sur les contours particulièrement évidents dans le cas d'arêtes proches de l'horizontale ou de la verticale.

Ces défauts apparaissant sur des images fixes, sont cependant assez bien tolérés par l'oeil qui a tendance à les ignorer. Sur des images animées, au contraire, ces mêmes défauts créent des effets secondaires, qui attirent irrésistiblement l'oeil.

La solution correcte à ces problèmes, du point de vue de la théorie du signal, consiste à filtrer l'image avant échantillonnage, ce qui revient à effectuer une convolution avec la fonction $\sin x/x$. Les méthodes utilisées en pratique, sont des approximations plus ou moins fidèles de ce principe.

Le procédé le plus courant consiste à calculer pour chaque pixel, une intensité moyenne égale à la somme des contributions de chaque surface élémentaire. Cette technique, connue sous le nom d'"area-averaging" est a priori équivalente à un filtrage par une fonction de pondération uniforme (fenêtre de Fourier). L'évaluation correcte de ces contributions, se heurte cependant en pratique, à de nombreuses difficultés et n'est généralement possible que dans des cas simples.

Les dispositifs d'"antialiasing" réalisés sur ce principe font appel à différentes "cuisines", propres à chaque constructeur, et généralement tenues secrètes. Les résultats sont le plus souvent globalement satisfaisants pour des images de complexité moyenne.

Les méthodes de filtrage par "sur-échantillonnage" ("over-sampling filtering") sont a priori plus coûteuses à mettre en oeuvre, mais donnent de meilleurs résultats. Elles consistent à effectuer la convolution sous forme discrète, ce qui impose de calculer préalablement l'image avec une résolution supérieure à la résolution d'affichage.

Le coût d'un procédé de filtrage spatial doit être apprécié globalement, sur le plan de la qualité générale de l'image. Il ne fait pas de doute, en effet, qu'un système de résolution donnée comportant un très bon procédé de filtrage, puisse être équivalent à un système de plus haute résolution, mais sans procédé d'antialiasing perfectionné.

Effets temporels

Les effets de l'échantillonnage temporel sont généralement moins connus et moins bien compris. Les anomalies les plus néfastes sont dues au mode de balayage entrelacé de l'écran.

Lorsqu'un objet se déplace verticalement dans l'image, il semble parfois se présenter sous une forme dégradée comme si une des deux trames était perdue. Ce défaut est particulièrement apparent pour des vitesses de déplacement correspondant à une ligne par image.

Ce phénomène, connu sous le nom de "field tracking" se produit également, mais dans une moindre mesure avec les procédés de télévision conventionnels. Il apparaît principalement sur les éléments à haut contraste, tels que les marques d'un court de tennis ou d'un terrain de football lors des retransmissions sportives.

Un moyen de correction radical consiste à utiliser une mode de balayage non entrelacé. Cette solution n'est cependant guère envisageable, en pratique car elle conduit à doubler la capacité de calcul.

L'exemple des procédés de télévision conventionnels, où ces défauts sont sensiblement atténués, fournit l'idée d'un compromis peut-être acceptable, consistant à travailler à la fréquence trame et à "payer" le prix d'un filtre spatial non uniforme en vertical, voire même sensiblement accentué dans ce sens (BUNK 82), quitte à perdre légèrement en résolution.

STRUCTURE ET TECHNOLOGIE DES GENERATEURS D'IMAGES EN TEMPS REEL.

Un dispositif de génération d'images pour simulateur est un système de représentation graphique fonctionnant en temps réel à partir d'une base de données tridimensionnelle constituée au préalable.

La fenêtre d'observation * est liée au véhicule simulé dont les paramètres (position, vitesse, etc...) sont fournies à chaque instant par le simulateur.

La génération d'un image complète est traditionnellement effectuée sur trois étages de calcul fonctionnant en parallèle à la cadence de 30 images par seconde. Le temps de réponse de l'ordre de 100ms est généralement compensé par des calculs d'anticipation.

* Dans la plupart des cas, la restitution du champ visuel du pilote, nécessite le traitement simultané de plusieurs fenêtres d'observation.



Le premier étage ou extracteur, regroupe les fonctions de gestion et de contrôle dynamique de la base de données.

Ces opérations ont pour but, en particulier de sélectionner à chaque cycle, les informations nécessaires au calcul de l'image en fonction de la position et de la direction de visée de l'observateur :

- . extraction de la zone survolée à partir de la base de données de terrain généralement stockée sur disque,
- . sélection des éléments potentiellement visibles à l'intérieur du champ de vision simulé,
- . gestion de niveaux de détail,
- . etc...

Les tâches correspondantes sont en général compatibles avec la capacité de traitement d'un mini-ordinateur conventionnel, car les modifications entre deux points de vue successifs sont faibles compte-tenu des vitesses d'évolution usuelles.

Pour cette même raison, le calcul des priorités d'affichage entre les différents objets de la scène est souvent réalisé à ce niveau.

Le deuxième niveau du système ou, processeur géométrique effectue différentes transformations (translation, rotation, "clippings", projection, etc...) permettant d'obtenir une représentation plane de chaque modèle dans un système de coordonnées lié à l'écran.

Le volume des calculs à réaliser (de 100 000 à 1 000 000 de transformations 3D par seconde) nécessite l'emploi de processeurs spécifiques.

Les solutions techniques utilisées en pratique correspondent à deux approches différentes.

La méthode la plus utilisée jusqu'à présent consiste à réaliser un processeur spécialisé à structure "pipeline" c'est-à-dire composé d'opérateurs câblés (ou éventuellement microprogrammés) connectés en cascade. Elle permet d'atteindre des cadences de calcul très élevées mais présente l'inconvénient d'une relative complexité de conception et d'une assez grande rigidité de l'ensemble rendant les extensions difficiles.

La deuxième approche est basée sur une répartition de la charge de travail entre plusieurs processeurs universels fonctionnant en parallèle.

Sur le plan économique, la perte d'efficacité par rapport à une machine spécialisée est aujourd'hui largement compensée par une grande souplesse d'emploi et une excellente modularité.

Ce type de solution bénéficie par ailleurs d'une évolution technologique nettement favorable (développement de circuits de calcul universels de plus en plus performants).

Le processeur vidéo constitue le dernier étage du générateur d'images. Il comprend tous les traitements nécessaires au calcul d'une représentation échantillonnée de l'image sous forme de pixels.

La bande passante requise de l'ordre de 25 millions de pixels par seconde impose une réalisation sous forme câblée à l'aide de circuits rapides.

Les différentes approches envisageables se rattachent à un petit nombre de schémas de base :

Structures à Balayage ligne

L'organisation la plus courante mais aussi la plus naturelle consiste à effectuer les traitements ligne par ligne au fur et à mesure du balayage de l'écran.

Elle permet d'exploiter au maximum la "cohérence" de l'image et de simplifier les traitements d'occlusion et d'"Antialiasing". Ceci compense largement de coût d'un classement préalable des informations (facettes par exemple) en fonction de la coordonnée verticale de l'écran.

Différents algorithmes d'élimination des parties cachées sont utilisés en pratique. Le filtrage de l'image fait en général appel à une technique d'"area-averaging".

Le principal inconvénient de cette architecture est que les traitements doivent être obligatoirement synchrones du balayage Télévision ce qui impose de dimensionner le système en fonction de la ligne de balayage la plus complexe.

L'introduction d'une mémoire tampon n'est généralement pas envisagée dans le cadre de cette structure.

Structures à mémoire d'image

Les machines organisées autour d'une mémoire d'image semblent a priori beaucoup plus simples à mettre en oeuvre, le tracé de l'image étant complètement indépendant du balayage de l'écran.

La solution la plus évidente consiste à tracer successivement chaque primitive (facettes par exemple) dans l'ordre inverse des priorités (déterminées par exemple par la méthode de Schumaker) assurant ainsi un recouvrement correct des parties cachées de la scène.

Le filtrage de l'image introduit cependant une complication importante. Le calcul de l'intensité moyenne d'un pixel ne peut être en effet correctement effectué qu'une fois déterminées les contributions de chaque surface. Une solution consiste à mémoriser ces contributions au cours du tracé (en se limitant par exemple aux surfaces les plus prioritaires). Les techniques de filtrage par suréchantillonnage sont a priori plus coûteuses.

La méthode précédente impose de tracer complètement chaque surface y compris les parties qui seront en définitive cachées.

Cet inconvénient peut être levé au prix d'un accroissement de la complexité du système.

La méthode consiste à tracer les objets en sens inverse (du plus prioritaire vers le moins prioritaire). Le tracé de chaque primitive n'est réalisé effectivement qu'après un test de visibilité effectué par rapport à un masque défini pixel par pixel et mis à jour au fur et à mesure des traitements.



Le filtrage peut être réalisé en un cours de tracé, par une méthode de suréchantillonnage. L'avantage de cette structure est qu'il n'est pas nécessaire de mémoriser l'image complète à haute résolution. (Seul le masque doit être mémorisé avec une résolution supérieure à la résolution d'affichage)

Enfin une troisième approche connue sous le nom de Z-Buffer permet de s'affranchir de tout classement préalable des éléments à visualiser. Elle fait appel à une mémoire d'image étendue, capable de stocker pour chaque pixel une information de distance ou de profondeur par rapport à l'écran.

Le tracé de l'image peut être ainsi effectué dans un ordre quelconque, l'écriture en mémoire étant subordonnée à un test de visibilité fonction de la profondeur du point considéré. Cette solution à première vue très avantageuse, soulève cependant de sérieuses difficultés du point de vue du filtrage de l'image, qui impose pratiquement de procéder par suréchantillonnage. La taille mémoire nécessaire reste aujourd'hui encore prohibitive sur le plan économique.

REFERENCES

- BUNK 82 W.M.Bunker,
Filtering Simulated Visual Scenes - Spatial
and Temporal Effects,
Proc 4th IITEC Nov 82.
- CATM 74 E.Catmull,
A Subdivision Algorithm for Computer Display
or Curved Surfaces,
Univ. Utah Computer Science Dept, UTEC
74133 Dec 74.
- CATM 80 E.Catmull and A.R.Smith,
3D Transformations of Images in Scanline
Order Computer Graphics 14 (3) July 80.
- CROW 81 F.C.Crow,
A Comparison of Antialiasing Techniques
IEEE Computer Graphics and Applications,
January 81.
- FEIB 80 E.A.Feibush, and R.L.Cook,
Synthetic Texturing using Digital Filters,
Computer Graphics 14 (3) July 80.
- FOUR 80 A.Fournier, D.Fussel, and L.Carpenter,
Computer Rendering of Stochastic Models,
Comm of ACM June 82.
- GANG 82 M.Gangnet, D.Perny and P.Couégnoux
Perspective Mapping of Planar Textures
Proc.Eurographics 82.
- GARD 80 G.Y.Gardner, and E.P.Berlin,
Effective Antialiasing of Computer Generated
Images
Proc. 2nd IITEC Nov 80.
- GARD 82 G.Y.Gardner, and B.Gelman,
Simplified Scene Modeling using Curved
Surfaces and Texturing
Proc.4th IITEC Nov 82.

CONCLUSION

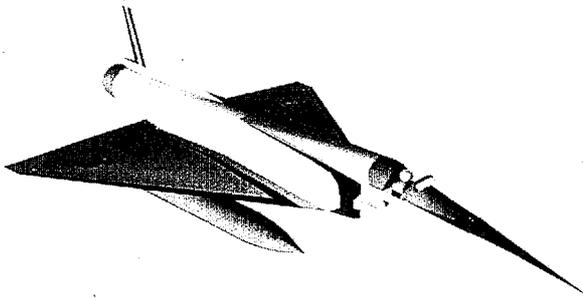
L'évolution des générateurs d'images en temps réel est aujourd'hui directement liée aux progrès technologiques dans le domaine de l'électronique et de l'informatique.

Sur le plan algorithmique, les méthodes permettant de produire des images réalistes d'excellente qualité sont en effet connues.

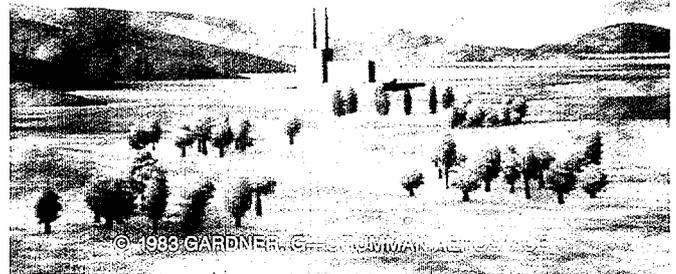
La principale amélioration envisagée actuellement est la reproduction de textures réalistes pour la représentation des éléments naturels du paysage (végétation, nuages, fumées, etc...).

En ce qui concerne l'architecture des générateurs d'image, la tendance qui se dessine aujourd'hui correspond à des structures de machines moins spécialisées, basées sur l'utilisation plus large de processeurs universels et organisées probablement autour d'une mémoire d'image.

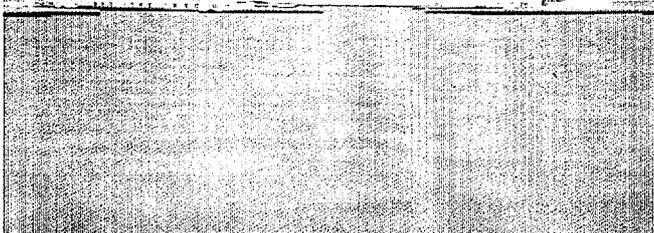
- KOEN 76 J.J.Koenderink, and A.J.Van Doorn,
Local Structure of Movement parallax of the
Plane
Journal of the Optical Society of America
vol 66 n°7 July 76.
- LANE 80 J.M.Lane, L.C.Carpenter, T.Whitted and
J.F.Blinn
Scan Line Methods for Displaying
Parametrically Defined Surfaces
Comm of the ACM Jan 80.
- MAND 77 B.B.Mandelbrot,
Fractal : Form, Chance and Dimension
San Francisco W.H.Freeman Co, 1977
- SCHA 83 B.J.Schacter,
Computer Image Generation
John Wiley & Sons, 1983.
- SCHU 69 R.A.Schumacker, B.Brand, M.Gilliland and
N.Sharp,
Study for Applying Computer Generated
Images to Simulation
AFHRL-TR 69 14 Sept 1969.
- SCHU 80 R.A.Schumacker,
A New Visual System Architecture
Proc 2th IITEC Nov 80.
- SKOL 82 P.T.Skolmoski and M.Fortin,
Texture in Low Cost Visual System
Proc.4th IITEC Nov 82.
- WHIT 80 T.Whitted,
An improved illumination Model for Shaded
Display
Comm of the ACM 23 (6) June 80.
- YAN 79 J.R.Yan,
Real Time Generation and Smooth Shading of
Quadric Surfaces
Proc 1st IITEC Nov 79.



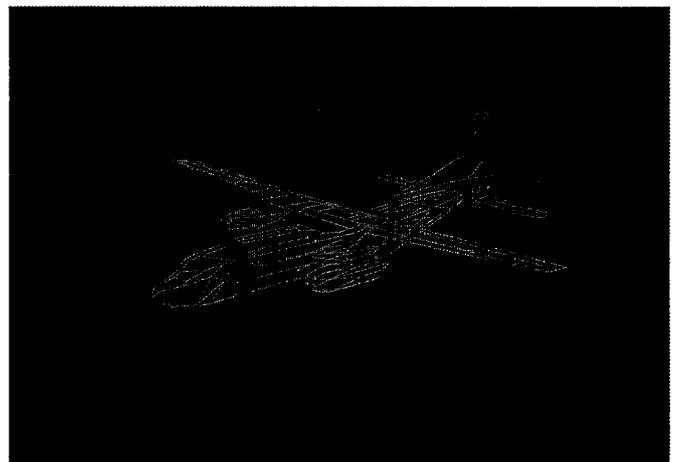
Représentation d'objet par facettes lissées :
 méthode de Gouraud (THOMSON)



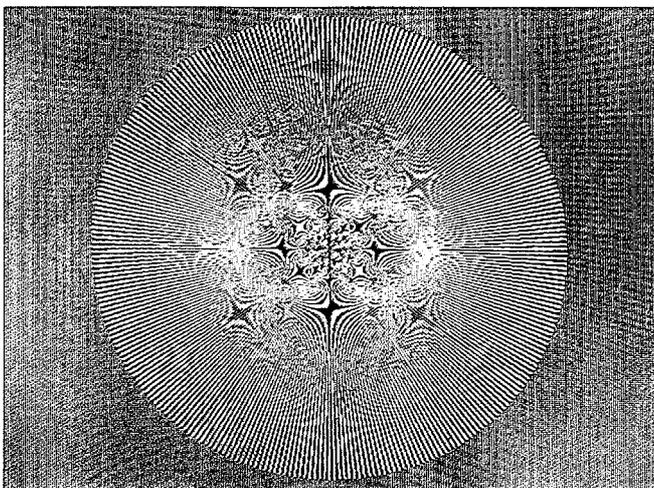
Représentation d'un terrain à l'aide de quadrilles
 et de textures aléatoires (GRUMANN)



Représentation de textures planes par pavage de
 motifs périodiques de 32 x 32 (THOMSON)

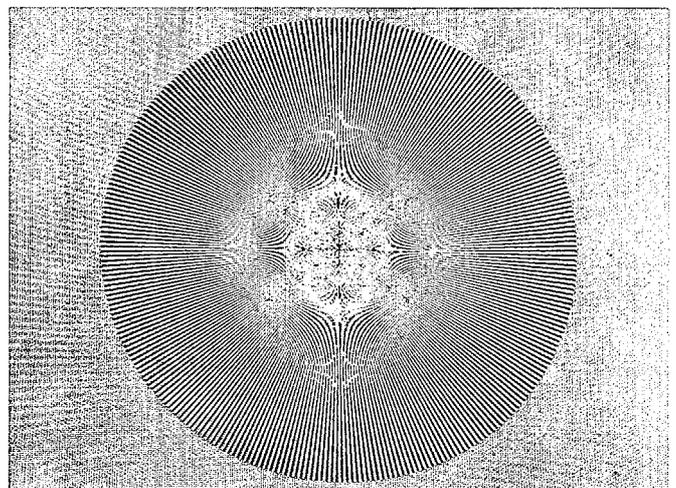


Décomposition des objets en volumes élémentaires
 (Élimination des parties cachées)



Mire de test des algorithmes de

a) image initiale non filtrée



filtrage spatial

b) image filtrée par pondération non uniforme
 triangulaire avec suréchantillonnage 4 x 4