

Nice 7 au 12 mai 1973

## TRAITEMENT HYBRIDE DE PHOTOGRAPHIES AERIENNES

C. BLANCHET, A. FONTANEL, G. GRAU, CH. HEMON, G. LEGENDRE

(Institut Français du Pétrole)

**RESUME**

Une photographie aérienne classique contient une information représentée par plusieurs millions de bits, ce qui n'est pas sans poser des problèmes pour le traitement numérique. Aussi est-il intéressant d'associer aux filtrages numériques des procédures analogiques, soit pour les essais et les déterminations des réglages optimaux, soit pour le traitement lui-même.

On montrera plusieurs exemples d'applications, et en particulier des recherches d'alignements permettant de faire ressortir des accidents géologiques. Ces travaux ont été menés par utilisation conjointe de méthodes optiques et de méthodes numériques. Le choix entre ce qui doit être fait optiquement et ce qu'il est raisonnable de faire numériquement est chaque fois l'objet d'un compromis entre commodité et prix du traitement, qualité du résultat, but recherché ....

**SUMMARY**

A conventional aerial photograph has an information content that can be represented by several million bits. This imposes severe restrictions on the digital processing of such large amounts of bits. It is interesting to use analog and digital processing together, either for tests and for the determination of optimal values of various parameters, or for the processing itself.

Several examples of application are shown, particularly a study of rectilinear events on photographs for the purpose of emphasizing geological faulting. This work was done with a joint use of optical and digital processing methods. The balance between optical and digital processing must be the result of a compromise between simplicity and price of the processing, quality of the result, purpose of the filtering, etc.

## I - INTRODUCTION

Avant d'aborder les problèmes de traitement proprement dit, il convient de montrer d'abord la nécessité de ce traitement, ses modalités et d'indiquer ensuite la nature de l'information à traiter.

### Nécessité du traitement des images

Le traitement des images obtenues par les différents procédés de télédétection est rendu nécessaire pour plusieurs raisons :

1°) une première raison est que les images doivent souvent subir des transformations d'échelle de façon à devenir comparables à d'autres images du même endroit obtenues soit à des instants différents dans les mêmes bandes de longueur d'onde, soit au même instant dans différentes bandes.

2°) une deuxième provient de la nécessité dans laquelle on se trouve souvent de compenser des réponses d'appareillage de façon à faire ressortir certains traits des images, par exemple les contours.

3°) une troisième raison est que l'on désire souvent faire effectivement les comparaisons d'images que l'on a préparées en 1 et 2, par exemple pour étudier les caractéristiques spectrales des diverses régions survolées.

4°) enfin le traitement est rendu nécessaire dès que l'on a plusieurs images du même endroit, car l'interprétation à vue devient alors extrêmement longue et contraignante. Que l'on imagine en effet la tâche d'un interpréteur qui dispose de sept images d'une région, obtenues chacune dans une bande de longueur d'onde et au même endroit ! Pour peu qu'il veuille utiliser des images qui se recouvrent, il sera rapidement submergé par la masse de documents à examiner.

### Modalités du traitement

Ce traitement peut s'effectuer par voie optique ou par voie numérique. Suivant les cas, il faudra se livrer à des transcriptions diverses variant selon la nature du traitement et le type d'enregistrement des images de départ.

Le traitement des images qui se présentent sous la forme d'une photographie peut se faire par voie optique si on les transforme en un microfilm de dimensions appropriées ou par voie numérique après qu'on les ait numérisées. Le traitement des images qui sont enregistrées analogiquement sur bande magnétique peut être exécuté de deux façons différentes :

- par voie optique si l'on procède à la conversion en une photographie sur support transparent,
- par calcul numérique si l'on fait passer les enregistrements analogiques sous la forme numérique avec ou sans enre-



gistrement magnétique intermédiaire. Si enfin les images originales sont enregistrées sous forme numérique sur une bande magnétique, il peut sembler évident que le traitement numérique s'impose. En fait on verra dans ce qui suit que cela n'est pas certain et que l'on peut avoir besoin de traiter optiquement des images même si, au départ, elles ne sont enregistrées que sur bande magnétique numérique.

Tous les cas de conversion semblent donc devoir se présenter sauf toutefois celui des photographies en données enregistrées analogiquement sur bande. Le traitement dans des machines analogiques autres qu'optiques ne semble en effet pas assez intéressant pour que l'on convertisse des photos en bandes non numériques.

Les traitements optiques et numériques présentent chacun des avantages et des inconvénients qui les rendent complémentaires les uns des autres. Les traitements optiques sont en nombre assez limité, mais leur mise en oeuvre est très simple dès l'instant qu'on dispose d'un cliché transparent de taille appropriée. Leur prix est par conséquent très faible. Les traitements numériques, en revanche, sont d'une souplesse infinie. Ils sont d'autre part d'une efficacité plus constante du fait que leur application ne dépend pas de procédés photographiques, toujours générateurs d'aléas. Leur grand inconvénient réside dans leur prix. Il est probable cependant que ce facteur ne constituera pas une gêne très importante dans l'avenir, car il aura tendance à continuer à baisser au fur et à mesure que les calculateurs continueront à faire des progrès.

Dans l'état actuel des choses, on peut avoir intérêt à faire certaines parties du traitement par voie optique, d'autres par voie numérique, donc à se livrer à ce que l'on peut appeler un traitement hybride. Nous en montrerons un exemple plus loin. La réalisation de tels traitements peut ne pas paraître très efficace par la nécessité qu'ils imposent de passer d'un support à l'autre, de la photographie à la bande magnétique et d'un domaine à l'autre, de l'analogique au numérique et vice versa. Il est certain que la technologie est ici en retard sur la théorie. Les calculateurs hybrides, même sous la forme simple que leur donnaient Weaver et ses collaborateurs (1970), ne sont pas répandus et peut-être faudra-t-il attendre quelque temps avant que les constructeurs de calculateurs adjoignent à leurs machines des périphériques à traitement optique. Il sera sans doute intéressant à cet égard que l'on puisse disposer de moyens de présentation optique d'images qui court-circuitent la photographie avec tous ses inconvénients. Encore faudra-t-il ne pas perdre la qualité par laquelle la photographie est si précieuse, c'est-à-dire sa résolution.

---

Le but de cette note est d'examiner les différentes modalités d'enregistrement et de traitement des images. Nous indiquerons dans quel cas tel ou tel traitement paraît actuellement le plus approprié et selon quelles modalités.

### L'information à traiter

Les images à manipuler peuvent représenter des choses très différentes. Elles pourront être des photographies du sol ou de la surface de la mer prises avec des émulsions et des filtres ad hoc. Ces images seront alors représentatives de la lumière visible et du proche infra-rouge.

Il se pourra d'autre part que les images soient obtenues à l'aide d'appareils à balayage, comme ceux qui servent pour les images dans l'infra-rouge ou comme les tubes de télévision. On rattachera à ces matériels ceux qui donnent les images de radar latéral et de sonar latéral car le résultat est le même : l'image du sol ou de la mer est échantillonnée par lignes juxtaposées.

Dans les deux cas, la quantité d'information à traiter est grande.

Prenons le cas des photographies classiques. Ces photos, souvent prises à une échelle voisine de  $1/35\ 000$ , ont une résolution au sol qui est de l'ordre de 4 mètres, c'est-à-dire environ 0,11 millimètre. Comme ces photographies ont un format de 23 sur 23 centimètres, on voit qu'une fois échantillonnées elles doivent être représentées par  $4 \cdot 10^6$  échantillons indépendants au moins. De façon à quantifier correctement les différentes densités de l'image photographique il faudra représenter autant de niveaux que l'oeil peut distinguer de gradations de gris. Il suffit en général de 32 niveaux, ce qui s'exprime numériquement par 5 bits. En fait, on admet généralement qu'il en faut davantage pour être sûr de couvrir correctement la dynamique totale de l'image et pour représenter les plages grises. On prend généralement 8 bits par échantillon. L'image est donc représentée numériquement par  $32 \cdot 10^6$  bits au moins.

Dans le cas des images obtenues à partir des satellites ERTS 1, la zone couverte au sol est un carré de 185 kilomètres de côté et la résolution est de l'ordre de 70 mètres. Il faut donc un minimum de  $7 \cdot 10^6$  échantillons, donc de  $56 \cdot 10^6$  bits par image. Or chaque région carrée de 185 km de côté est couverte sept fois par des prises de vues dans sept bandes différentes de longueur d'onde. Il faut donc multiplier le dernier nombre obtenu par 7, d'où finalement nécessité de manipuler presque  $4 \cdot 10^8$  bits à la fois, si toutefois on veut traiter les  $185 \times 185 = 34\ 225 \text{ km}^2$  d'un seul coup.



---

On peut comparer la quantité d'information que l'on obtient ainsi avec celle qui est fournie dans le cas des sonars (Cholet et collab., 1968).

Les images du fond de la mer que l'on obtient avec des sonars latéraux sont plus favorables ne serait-ce que du fait de la lenteur de leur production. Le bateau qui remorque le sonar n'avance pas à une grande vitesse, ce qui fait que le débit d'information n'est pas énorme. Rappelons cependant les données du problème. Un sonar opérant sur le plateau continental couvre deux bandes larges, d'environ 700 mètres chacune, simultanément de part et d'autre du poisson qui le porte. La résolution maximale est généralement de l'ordre de 1,5 mètre. Aussi voit-on que sur une longueur d'1,5 kilomètre, parcourue en 8 minutes environ, il faut un minimum d'échantillons de l'ordre de  $10^6$ .

Les nombres d'échantillons estimés ci-dessus dans les divers cas montrent que des problèmes de temps de calcul et de capacité se poseront souvent lors du traitement des images avec les calculateurs numériques dont on peut disposer actuellement. Aussi, en attendant des calculateurs plus puissants ou moins chers, devra-t-on s'efforcer d'une part de procéder à une compression d'information chaque fois que possible, et d'autre part de faire le plus possible de traitements par voie non numérique. Le traitement analogique électrique n'est guère pratique que pour la régularisation des densités de l'image selon le principe des tireuses électroniques. Encore cette régularisation n'a-t-elle pas toute la souplesse de celle que l'on peut réaliser par calcul numérique. Reste le traitement optique qui est intéressant pour obtenir l'allure du module d'une transformée de Fourier ou pour faire des filtrages simples en fréquence spatiale ou en direction.

## II - ANALYSE DES DIFFERENTS TYPES DE TRAITEMENT

Dans ce chapitre on examinera sommairement les différents traitements d'images en les classant d'après le mode opératoire.

### II.1. - Traitement optique en lumière non cohérente

Le traitement le plus spectaculaire est incontestablement celui qui permet d'isoler dans une photographie les plages dont la densité est comprise entre telle et telle valeur. Cette opération se fait à l'aide de procédés photographiques spéciaux comme l'Agfa contour (Ranz et Schneider, 1971). Si l'on colore le film après coup, on peut obtenir des effets très spectaculaires et une très grande facilité de lecture. On en trouvera un exemple dans l'article cité ci-dessus.

Le découpage en plages de densité est intéressant pour les études de végétation et de sédimentation. Il est également utile pour la recherche des hétérogénéités à la surface des plans d'eau. La figure 1 montre l'emploi du procédé pour la détection d'une nappe d'eau anormale dans le Golfe de Gênes.

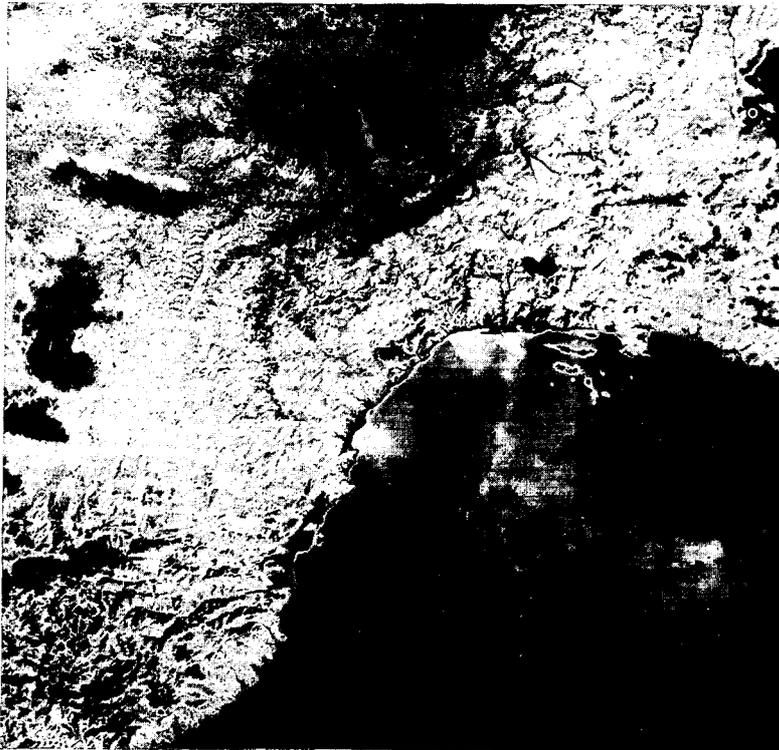


Fig. 1 - Extraction d'une plage de densité sur une photographie d'E.R.T.S. 1, altitude de prise de vue 900 km, bande 0,6 à 0,7  $\mu$  (cliché N.A.S.A.) Nord vers le haut de la figure.



La photographie a été prise de 0,6 à 0,7  $\mu$  par le satellite ERTS 1. On a isolé la tranche de densité allant de 1,50 à 1,75 sur le négatif fourni par la N.A.S.A., ce qui permet de faire ressortir la nappe issue des ports de Gênes et de Savone et d'observer son étendue. On ne peut pas présenter dans ce texte l'image colorée qui en a été tirée. En couleurs, la mer non perturbée apparaît dans le traitement que nous en avons fait en bleu pâle et la nappe issue des ports en rouge sang de boeuf. Sur le cliché original, il est assez difficile de distinguer la nappe sauf près des ports. En tirage positif, la mer y apparaît presque uniformément noire. On trouvera un exemple d'application géologique de l'étude des densités dans l'article de Boissard (1971).

On verra dans la section II.4, fig. 10, un exemple d'utilisation du traitement numérique pour l'étude des densités. De telles opérations ne sont pas très difficiles à faire mais comme il y a beaucoup de manipulations photographiques, elles sont relativement coûteuses. ↑  
optiquement,

Une autre opération qui peut se faire en lumière non cohérente consiste à "dérivée" l'image de façon à faire apparaître les contours qui séparent les plages où la densité est relativement constante. Un tel procédé, qui fait intervenir le cliché et un contre-type (Zeitouni, 1971), permet de faire apparaître des particularités difficilement visibles sur l'original. C'est ainsi que sur la figure 2 b, que nous devons à l'amabilité de P. Boissard, on peut distinguer dans les régions non cultivées actuellement des traits caractéristiques que l'on voit mal sur la figure 2 a (cette photographie a été prise par l'I.G.N. pour le C.N.E.S.). Les plages où la densité varie lentement ont tendance à blanchir, les régions où elle varie brutalement comme les bords de chemin, les lignes de ceps, les murettes, sont conservées.

Enfin nous mentionnerons comme traitement d'image qui peut se faire en lumière non cohérente, l'anamorphose destinée à compenser les distorsions que l'on observe sur les images produites par les appareils à balayage. Le procédé a été utilisé par Cholet et collab. (1968) sur des images de sonar latéral et par Boissard (1971) sur des thermographies.

## II.2. - Traitement optique en lumière cohérente

On sait que lorsque l'on illumine un cliché transparent à l'aide d'un pinceau de lumière cohérente et parallèle, on peut faire apparaître sa transformée de Fourier en plaçant derrière le cliché une lentille convergente. Ce spectre peut être photographié dans le plan focal de la lentille (Fontanel et collab., 1966).

Nous en montrons des exemples à la figure 3. Sur la figure 3 a, on voit la région étudiée représentée ici à l'échelle approximative 1/30 000. Le coin en haut à gauche, de teinte



Fig. 2 a  
Photographie  
de vignobles  
(panchro, cliché  
I.G.N.)

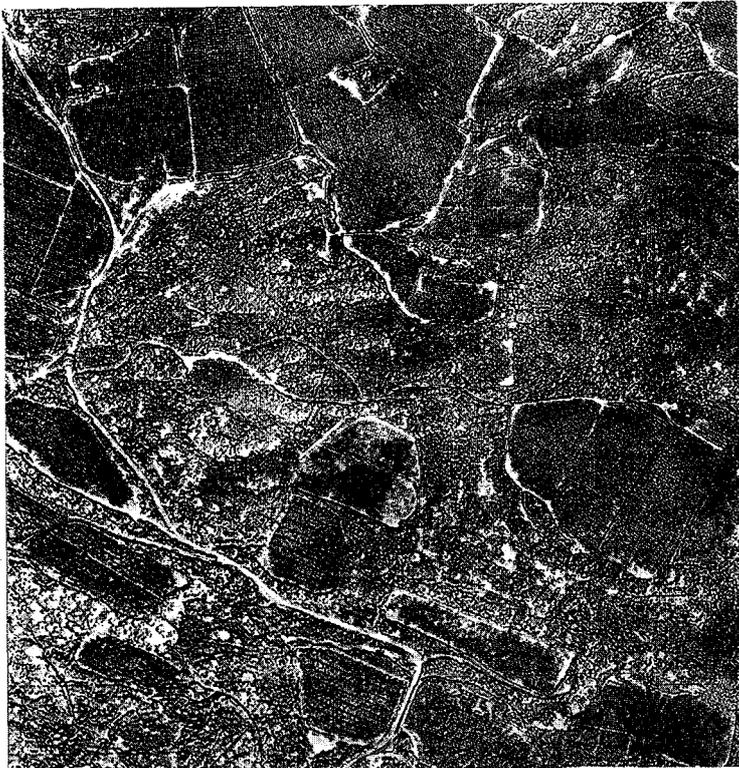


Fig. 2 b  
La même après  
dérivation



Fig. 3 a - Vue prise dans la région des Vans (Ardèche)  
(cliché I.G.N., tirage panchro à partir d'un film  
en couleurs, altitude de vol 6000 m).

claire, à la végétation rare, consiste en un affleurement de Séquanien. La bande sombre qui prend la photo en écharpe de gauche à droite et de bas en haut est constituée de Kimmeridgien recouvert par endroit d'une végétation assez sombre. Dans le bas à droite, on a affaire à l'étage berriasien que l'on voit affecté de nombreuses fractures.

Les spectres sont gradués en longueur d'onde spatiale à partir de la tache centrale. On observe que le spectre du Séquanien (fig. 3 b) est très différent de celui du Kimmeridgien (fig. 3 c). Dans le Séquanien, il y a beaucoup de failles fort rapprochées et pratiquement dans toutes les directions. Dans le Kimmeridgien, au contraire, on voit deux directions principales presque à angle droit. Le spectre du Berriasien sera présenté plus loin (figure 11) en comparaison avec le spectre de la même région calculé numériquement. On y voit une direction dominante de fracturation, celle qu'on distingue d'ailleurs aisément sur la figure 3 a.

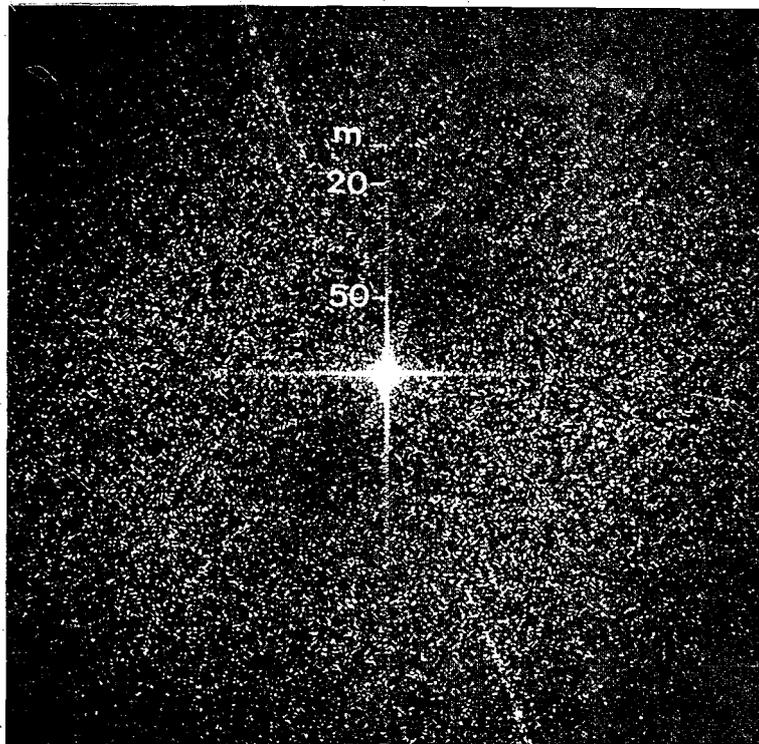


Fig. 3 b - Spectre du Séquanien

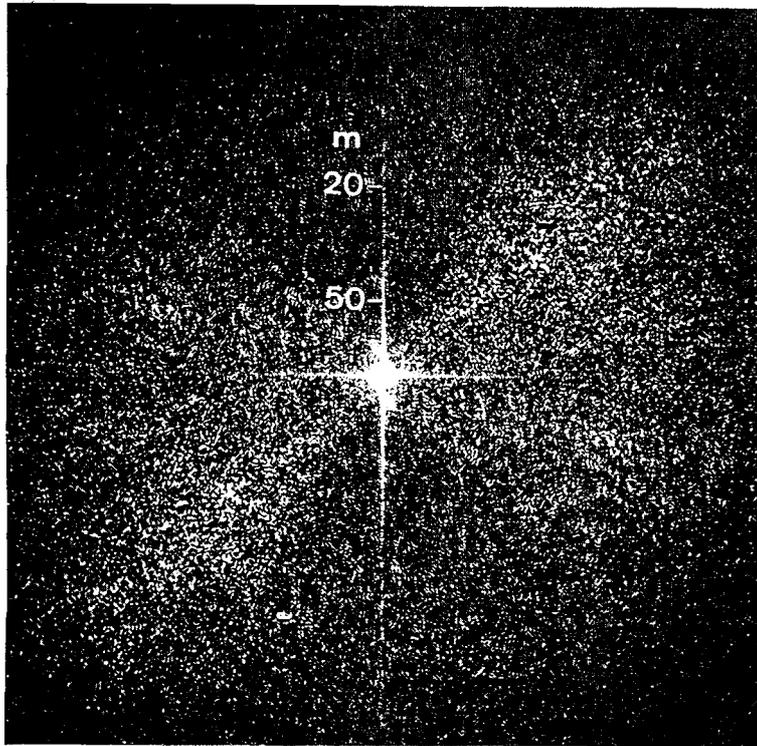


Fig. 3 c - Spectre du Kimmeridgien



---

De tels spectres sont utilisés pour produire des statistiques de fracturation selon les azimuts (Fontanel et collab., 1966 ; Fontanel et Grau, 1968 ; Bouché et Poulet, 1971).

Au lieu de cette analyse spectrale, ou bien au vu de cette analyse, on peut pousser plus loin et procéder à un traitement de façon à rendre plus visibles certaines familles de fractures au détriment des autres (Fontanel et collab., 1966 ; Pincus et Dobrin, 1966 ; Chevallier et collab., 1970). Le principe de ce traitement est décrit sous le nom de filtrage en éventail dans la section II.4. Nous en montrerons un exemple (figure 4) que nous avons emprunté à Fontanel et ses collaborateurs (1973). Sur la droite de la photographie 4 a, on voit le Mont Ventoux à mi-hauteur et la partie occidentale du Lubéron en bas. Un filtrage en éventail avec réjection d'un angle de  $20^\circ$  dans le spectre permet de faire apparaître sur la fig. 4 b des directions de fracture N  $50^\circ$  E à N  $60^\circ$  E qui contrastent avec la direction générale E-W des plis. Un autre exemple, qui traite l'image déjà analysée sur les figures 3 b et 3 c, montre un type de manipulation un peu plus évolué. Sur la fig. 5 a, on peut voir un filtrage en éventail réalisé sur la photographie de la figure 3 a. La région du spectre qui était rejetée était comprise dans un angle de  $20^\circ$  dont la direction moyenne était sensiblement orientée selon la diagonale qui va du coin en haut à gauche au coin en bas à droite. L'opération complémentaire consistant à ne préserver dans le spectre que ce qui est compris dans un angle étroit donne des résultats intéressants pour l'étude détaillée (Bouché et Poulet, 1971 ; Bourrouilh et Bourrouilh, 1972), mais ne fournit pas d'image d'ensemble agréable à regarder. Sur la figure 5 b, on a superposé avec des temps de pose convenables la vue de la figure 3 a et la même filtrée par une fente de  $10^\circ$  d'ouverture seulement. Tout se passe comme si, à un fond normal, on avait superposé le dessin fait à la main des failles et des fractures.

Un cas particulier du filtrage en éventail consiste à supprimer les lignes dues au balayage (voir par exemple Boissard, 1971).

Ce type de traitement optique est très pratique lorsqu'on désire l'utiliser isolément. Si on veut l'employer à l'intérieur d'une longue chaîne de traitements d'une autre nature, numérique par exemple, il peut se révéler beaucoup moins utilisable. Il ne serait en particulier pas raisonnable de convertir une image, que l'on aurait sur bande numérique, en photographie pour le simple plaisir de la filtrer optiquement. Cependant le traitement optique est très intéressant pour faire des essais, dont on peut ensuite utiliser les résultats pour faire un traitement numérique bien ajusté.

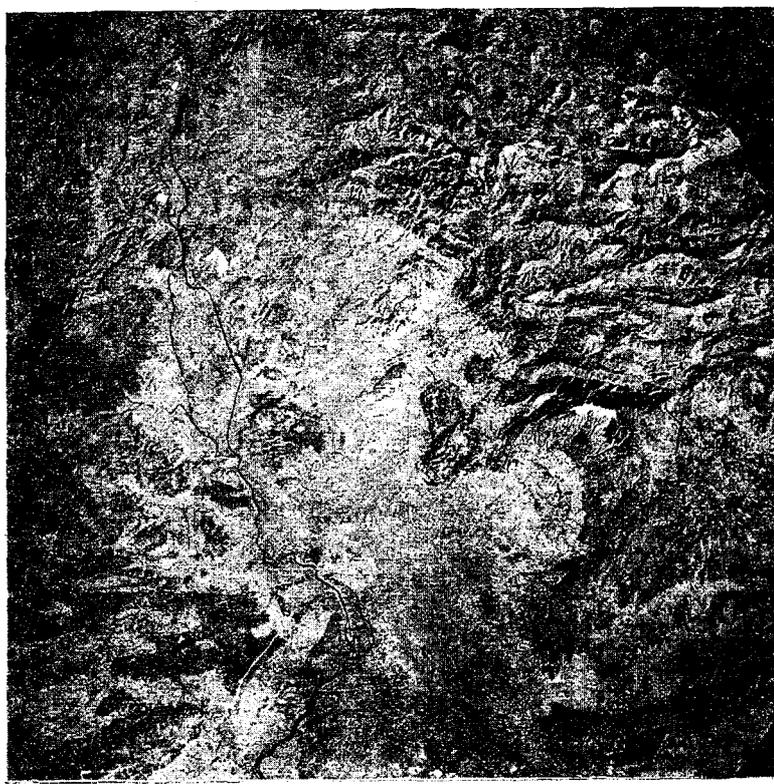


Fig. 4 a  
La vallée du Rhône de Montélimar à Avignon (cliché N.A.S.A, ERTS 1, bande 0,6 à 0,7 $\mu$ , altitude de prise de vue 900 km). Le Nord est vers le haut.

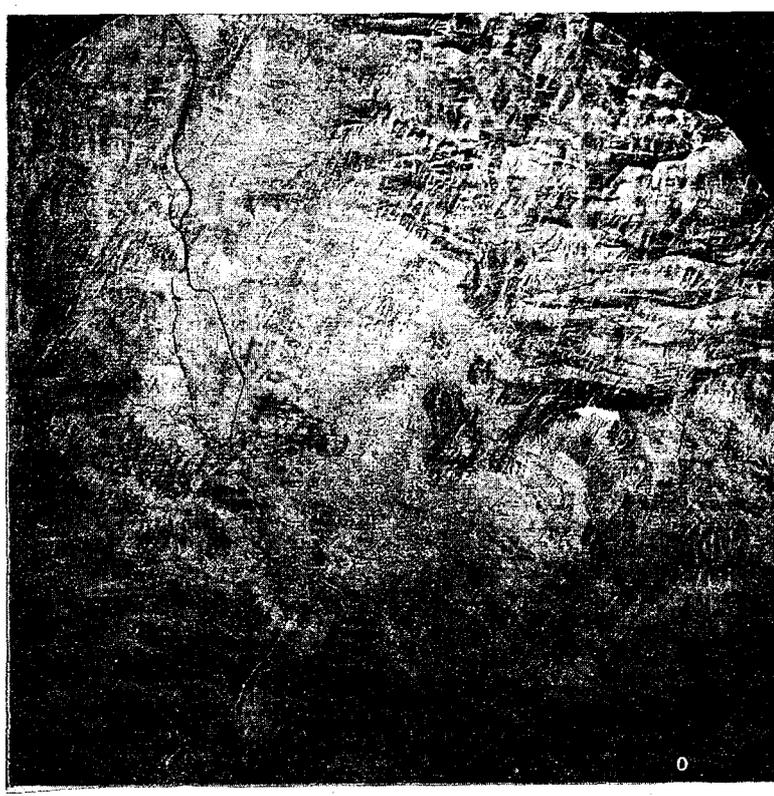


Fig. 4 b  
La même vue ayant subi un filtrage en éventail optique.

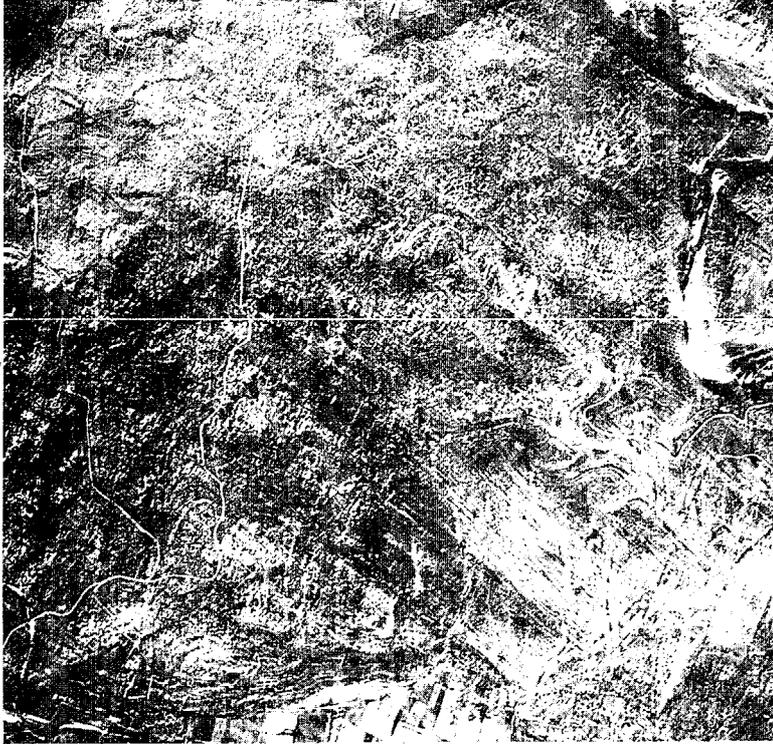


Fig. 5 a  
Filtrage en  
éventail optique  
exercé sur la vue  
de la figure 3 a.



Fig. 5 b  
Superposition de  
3 a et du résult-  
tat de filtrage  
de l'image 3 a  
à travers une  
fente de  $10^\circ$   
d'ouverture.



La lumière cohérente peut encore être utilisée pour faire des autocorrélations et des intercorrélations (Fontanel, 1971 ; Fontanel et Grau, 1971), mais les autocorrélations semblent assez peu intéressantes pour le traitement des images du sol. Quant aux intercorrélations qui pourraient servir en reconnaissance des formes, on peut penser qu'à part des cas vraiment particuliers, il vaut mieux opérer par calcul numérique. Pour une telle application, il faut en effet une souplesse que le traitement optique n'a pas.

Nous mentionnerons enfin l'obtention de différences d'images pour laquelle Debrus et ses collaborateurs (1971) offrent une solution élégante qui a été utilisée par Françon (1973). Ce procédé pourrait fournir une méthode intéressante pour les études multispectrales pour lesquelles les images à comparer sont par construction de la même taille et à la même échelle.

### II.3. - Traitement analogique électrique

On entend par là des traitements dans lesquels la photographie originale est analysée à l'aide d'un spot mobile. Un photomultiplicateur fournit un courant qui dépend de la densité photographique du cliché à l'endroit où se trouve le spot. Par passage dans des circuits appropriés on peut aisément faire subir au signal électrique de lecture une série de traitements, dits traitements analogiques. Il est non moins aisé d'effectuer les mêmes opérations sur les signaux produits par la lecture et la démodulation des images enregistrées analogiquement ou numériquement sur bande magnétique.

On pourra par exemple régulariser les amplitudes d'une image d'un bord à l'autre pour rétablir une densité moyenne constante sur de larges plages. C'est le principe des "tireuses électroniques".

On pourra aussi rendre les contours plus visibles en dérivant systématiquement les signaux électriques de lecture. Les plages où la densité est constante donnent un signal nul. Au contraire, les lignes de séparation de ces plages, ou contours, se manifestent par de brèves impulsions. Si l'on utilise le signal dérivé pour reconstituer une image, on obtient une image dite réduite aux contours où seules les lignes de séparation apparaissent. L'inconvénient d'un tel procédé est que l'on n'opère la dérivation que dans une seule direction. Aussi observe-t-on généralement que les contours perpendiculaires au balayage sont très bien marqués et que ceux qui lui sont parallèles sont pratiquement absents.

C'est ce que l'on pourra remarquer sur la figure 6 qui représente, en haut, une image obtenue avec l'appareil multispectral "Daedalus" et, en bas, le résultat d'une réduction aux contours. Les contours parallèles à la longueur de la vue sont

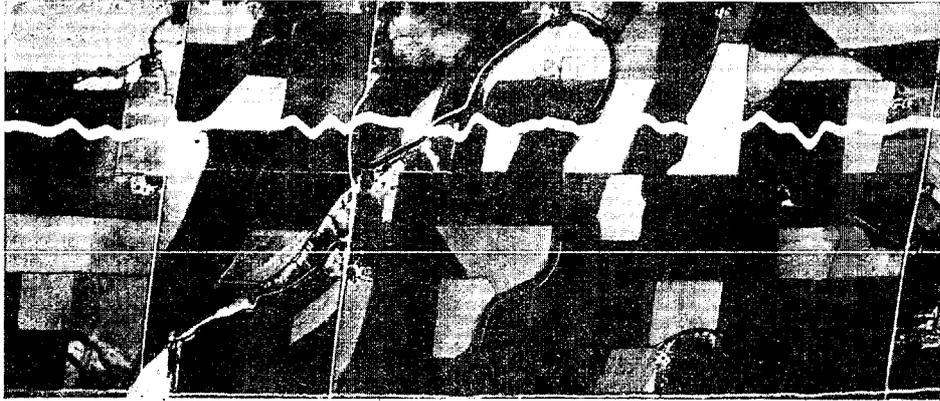


Fig. 6 a - Image obtenue à l'aide d'un appareil  
à balayage "Daedalus" (bande 0,60 à 0,65 $\mu$ )



Fig. 6 b - La même image réduite aux contours.

---

très visibles, les autres nettement moins. De plus, on distingue de nombreux détails dans la plupart des champs, qui n'apparaissent pas comme des plages homogènes sur l'original, et dans les ravinements du centre et de la gauche de l'image.

Une application montrant bien l'intérêt de la dérivation est donnée dans le projet de machine à faire des orthophotoplans de G. d'Autume (1968). Cette machine fait d'ailleurs intervenir plusieurs lecteurs de photographies utilisés simultanément.

Une philosophie semblable peut être utilisée pour les traitements dits multispectraux. Il s'agit alors de faire des comparaisons d'images obtenues toutes au même instant, donc au même endroit, mais dans des bandes de longueur d'onde différentes. L'idée est de caractériser chaque affleurement rocheux par une somme, ou une différence ou un rapport, en un mot par une combinaison adéquate des densités des différentes images. Une étude sur la discrimination entre diverses roches silicatées a été publiée par Vincent et Thomson (1971). Il semble que de telles opérations seront plus facilement réalisées par voie numérique car il sera plus facile d'ajuster les paramètres de reconnaissance des spectres par la programmation des calculs numériques que par la construction de machines électriques spéciales.

Le traitement par calculateur analogique électrique se prête encore très bien à la sélection des densités sur les images. Il suffit de faire passer la tension produite par le système de lecture de l'image dans des circuits comparateurs qui ne laissent subsister que des niveaux compris dans un certain intervalle, qui les quantifient, etc... Des machines existent qui font ces opérations de façon fort efficace et en tout cas à meilleur marché que par voie optique.

On voit par les quelques exemples cités ici que les traitements analogiques par voie électrique ne sont pas sans intérêt. Il faut toutefois remarquer que les montages électroniques destinés au traitement analogique n'ont pas une souplesse infinie. On peut penser que les traitements les plus aisés à mettre en œuvre sont précisément ceux qui ont déjà été réalisés et que les méthodes électriques ont donc en grande partie donné l'essentiel de ce qu'elles peuvent donner.

Un inconvénient supplémentaire du traitement analogique est qu'il faut pratiquement construire une machine spéciale pour chaque traitement. Cependant le prix des manipulations dans ces machines est en général très faible et lutte encore avantageusement avec celui du calcul numérique.

On verra cependant qu'il en est du traitement des images comme de beaucoup d'autres techniques utilisant le calcul: les machines numériques offrent tellement plus de souplesse qu'il ne fait pas de doute qu'elles seront de plus en plus



utilisées au détriment des machines analogiques. L'argument de prix qui joue encore actuellement en faveur de la technique analogique tombera vraisemblablement au fur et à mesure que les calculateurs verront leur rapport prix de l'heure/rapidité de calcul décroître.

#### II.4. - Traitement numérique

Le traitement numérique des photographies aériennes se justifie d'abord par la nécessité de la recherche d'un automatisme poussé, étant donné la quantité considérable d'information à traiter, et ensuite par la complexité de certaines opérations qu'il est difficile d'envisager autrement que sur calculateurs. Parmi ces opérations, on peut citer les corrections géométriques, l'amélioration des contrastes, le filtrage en éventail, l'analyse des textures.

En fait, le traitement numérique des photographies aériennes en est à ses débuts. Devant la très grande quantité d'information que l'on est amené à traiter, deux procédures sont souvent utilisées actuellement. Certaines équipes, soucieuses d'obtenir des résultats immédiats cherchent surtout à appliquer des techniques de traitement qui ont fait leurs preuves dans d'autres disciplines, en espérant que ces techniques, même si elles ne sont pas parfaitement adaptées au cas des photographies aériennes, donneront malgré tout des résultats positifs non négligeables. D'autres équipes préfèrent temporiser en matière de traitement et recherchent plutôt des techniques nouvelles spécialement adaptées au cas des photographies. Il semble qu'il faille mener les deux procédures de front : d'abord voir quelles possibilités sont offertes par des traitements confirmés en d'autres domaines et étudier ceux qui conviendraient uniquement aux photographies aériennes. Par ailleurs, l'importance future évidente de tels traitements conduit à envisager dès à présent leur rentabilité. Etant donné les prix généralement élevés des calculs numériques et l'économie très appréciable apportée par des traitements optiques, on sera sans doute amené à envisager des techniques hybrides optiques-numériques dont le hardware reste encore à concevoir et à fabriquer.

##### 1. Les corrections géométriques

Les techniques mêmes de prise de vues aériennes, par avion notamment, exigent un certain nombre de corrections : recalage du zéro à chaque rotation du miroir, correction de dérive, compensation du roulis... Certains appareillages permettent d'effectuer ces opérations électroniquement (Bendix), d'autres non (Daedalus). On enregistre alors le cap, le roulis et les données du calculateur Doppler dont les quatre faisceaux fournissent les variations longitudinales et latérales de l'avion. L'utilisation de ces données multiplexées permet d'effectuer numériquement les corrections. De toute façon, il est nécessaire de compenser le fait que, par suite de la rotation du miroir et du champ total de prise de vue qui

est de l'ordre de 80°, l'angle d'incidence des rayons est très variable. C'est un phénomène bien connu en sismique réflexion et les techniques numériques employées dans cette discipline pour corriger cet effet dit "d'obliquité" peut facilement être étendu au cas des photographies aériennes.

Dans les cas où l'avion ou le satellite repasse sur une même zone, il est impossible que les conditions de prise de vues soient rigoureusement identiques. Par ailleurs, dans le cas de prises de vues jointives pour couvrir une région, il y a superposition partielle des photographies. Il faut donc effectuer des recalages des différentes vues. On retrouve alors les problèmes des transformations géométriques : translation, rotation, homothétie, anamorphose. Ce n'est qu'après ces opérations qu'on peut envisager la superposition des images. Les techniques actuellement employées nécessitent un calage préalable de deux points sur chacune des vues : ce calage ne peut se faire automatiquement. A partir de là, l'une des vues est transformée géométriquement par ordinateur de façon que pour tout point de la deuxième vue les coordonnées par rapport à un système d'axe quelconque soient les mêmes que celle du point homologue de la première vue par rapport au même système d'axes (Bakis et autres, 1972).

Un problème très analogue consiste à projeter la photographie dans un système de coordonnées géographiques. Le passage d'un système à un autre se fait automatiquement par programmes numériques. Il en est de même pour les changements d'échelle.

## 2. L'amélioration des contrastes

L'interprétation écologique ou géologique d'une photographie peut être facilitée par l'amélioration des contrastes. Des calculs de dérivées permettent d'abord de dégager les contours des différentes formes apparaissant sur l'image et la somme de la vue originale et de la carte des contours donne un résultat où les contrastes sont très accentués. Une pondération convenable doit être affectée à chacun des termes de la somme. Les figures suivantes donnent des exemples, d'un tel traitement.

La figure 7a représente une photographie par avion à 5800 m de champs cultivés ; on constate que les séparations ne sont nettes que dans le cas de teintes bien différenciées, ailleurs les limites sont parfois très floues donnant presque l'impression d'une photographie prise avec un appareil qui aurait bougé.

La figure 7b représente la même région : les limites entre les champs sont extrêmement nettes, le flou a disparu et même entre des teintes très voisines apparaît une différenciation bien marquée. L'amélioration d'ensemble est remarquable. Les structures apparaissent mieux.



Fig. 7 a

Vue de la région  
des Vans (Ardèche), région  
légèrement au  
sud de 3 a, mêmes  
conditions de  
prise de vue.  
Nord vers le haut.  
En haut à droite,  
le village de  
Berrias.



Fig. 7 b

La même après  
amélioration des  
contrastes.

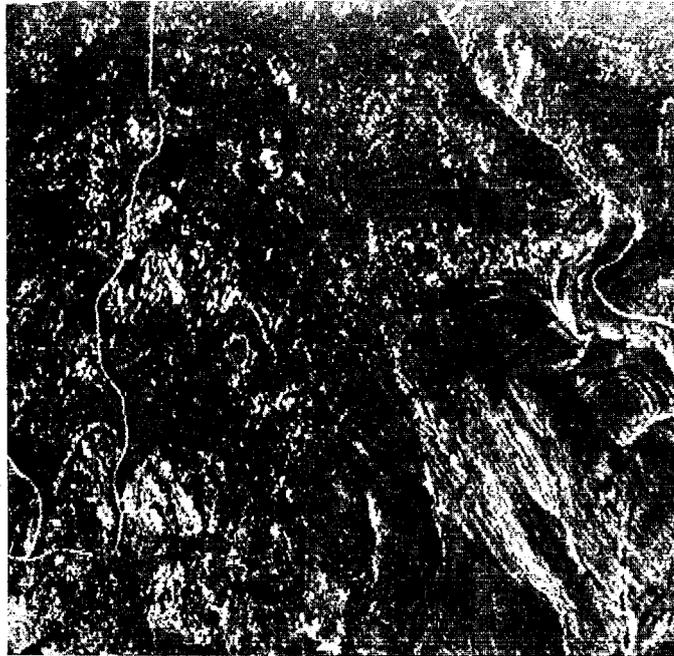


Fig. 8 a - Une partie de la vue 3 a.

Les échelles N-S et E-W de cette figure et des autres vues traitées numériquement ci-dessous ne sont pas homogènes par suite de contraintes imposées par le matériel de représentation.

Si, d'un panorama de champs quadrillés, on passe aux vues prises lors du survol d'une forêt, on remarque des différences d'un autre ordre. La figure 8a est la vue originale d'une région boisée et la figure 8b représente le résultat de la technique d'amélioration des contrastes appliquée à cette vue. On voit se dessiner des îlots élémentaires qui peuvent correspondre à des essences différentes ou à des variations à l'intérieur d'une même espèce (maladie, vieillissement....).

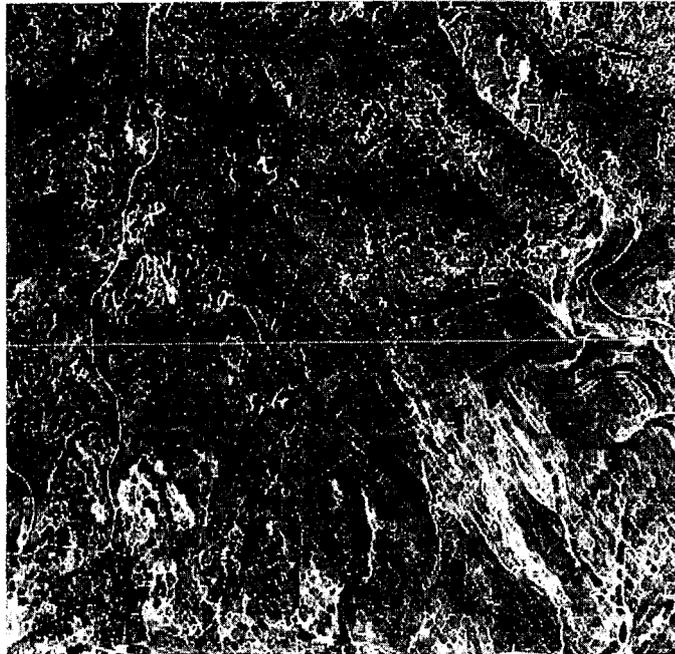


Fig. 8 b - La même après amélioration des contrastes

### 3. Le filtrage en éventail

Si, dans le plan de la photographie aérienne, on considère tous les éléments qui sont parallèles à une direction donnée, on sait que leur spectre se réduit à une seule droite perpendiculaire à cette direction et passant par le centre du spectre. Il est donc possible de réaliser des filtrages en direction en supprimant dans le spectre toute l'information se trouvant sur la droite passant par le centre et perpendiculaire à cette direction. En fait, il n'est pas commode de se limiter à une droite, c'est pourquoi on supprime l'information qui se trouve dans un éventail. Cette technique a été utilisée en optique depuis plusieurs années. Cette technique a été utilisée



en optique depuis plusieurs années. On peut aussi l'appliquer numériquement (Fail et Grau, 1966 ; Embree et collab., 1966). Du fait de la contrainte de l'échantillonnage, les bords de l'éventail ne sont plus des droites, mais des escaliers dont la grandeur des marches dépend du pas d'échantillonnage. L'utilisation numérique est donc moins souple que le procédé optique, mais, en général, la qualité des résultats est meilleure. D'autre part, l'enchaînement des traitements numériques permet d'associer plusieurs opérations et de les effectuer successivement sans qu'il faille réaliser des représentations visuelles à chaque opération.

Le filtrage en éventail doit être utilisé avec beaucoup de précaution. D'une façon générale, en effet, on s'expose par ce procédé à introduire des transitoires très forts qui risquent de masquer l'information que l'on voulait mettre en évidence. Pour éviter cet inconvénient, il vaut mieux tenter de supprimer une information gênante en appliquant un éventail étroit que de vouloir garder la seule information contenue dans un éventail resserré.

On voit qu'un tel procédé de filtrage est bien adapté à certains problèmes particuliers. Si, par exemple, sur une photographie aérienne, on veut mettre en évidence des directions privilégiées (failles, diaclases), on le fera facilement par cette technique. Cependant, la précision nécessaire à l'application de filtres de faible ouverture exige souvent un tâtonnement qui risque d'être coûteux en calcul numérique. Il convient donc de faire des essais d'ouverture de filtres par les procédés optiques et de n'aborder le traitement numérique qu'une fois que l'on a déterminé la direction et l'ouverture optimales du filtre (Fontanel et Grau, Onde Electrique, 1968).

Les procédés optiques ont déjà été souvent utilisés, on pourra trouver des exemples dans Bouché et Poulet, (1971).

Les planches suivantes montrent des exemples d'application numérique du filtrage en éventail. La figure 9a est la photographie originale. On constate, surtout du côté droit en bas de l'image, une certaine directivité principale en oblique vers le côté gauche en haut, elle est sensiblement parallèle à la diagonale (gauche-haut, droit-bas) de l'image. Il est, par contre, extrêmement difficile de distinguer les détails dont l'ensemble donne cette impression de directivité.

Le résultat du filtrage en éventail effectué numériquement est représenté sur la figure 9b. On voit se concrétiser nettement des alignements élémentaires dans la direction indiquée plus haut. L'apparence de cordons que prennent ces alignements est due à leur renforcement par une technique de contour. On remarquera particulièrement les deux lignes continues et parallèles, distantes d'environ 7 mm, sur le côté gauche en haut de la photographie. Ces lignes peuvent très bien repré-



Fig. 9 a - Une partie de la vue 3 a

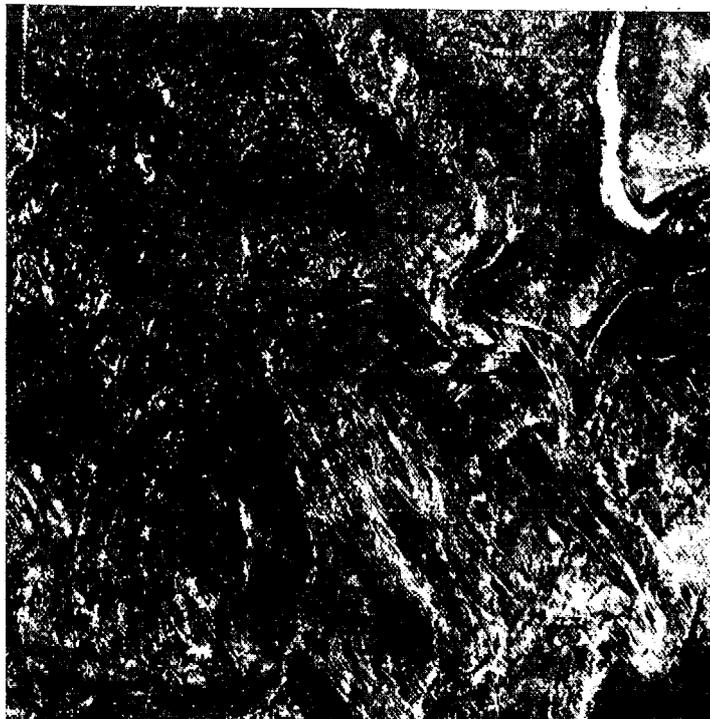


Fig. 9 b - La même après renforcement des directions NW-SE.



senter des fractures. Il pourrait être question de failles, mais dans le cas particulier représenté ici, la vue ne permet pas de dire s'il y a déplacement ou rejet. On voit également sur cet exemple que la technique doit encore être améliorée, car elle donne pratiquement la même importance aux différents alignements. Il faudrait notamment tenir compte de la continuité de la ligne comme facteur d'amplitude.

#### 4. Analyse de textures

Le but souvent recherché dans le traitement des photographies aériennes est l'analyse des textures. Il s'agit de caractériser et de classer les différents éléments de l'image. On voit immédiatement l'intérêt de la statistique, de l'analyse spectrale, de la reconnaissance des formes. Des essais ont déjà été effectués par voie numérique (Guy, 1971) : reconnaître dans un ensemble de tracés d'anciens chemins s'il s'agit de voies romaines ou de voies plus récentes, détecter dans un ensemble boisé les arbres malades ou morts. Le problème revient en fait à déterminer des topologies et à les distinguer. Le développement des techniques en est encore à ses débuts (A.J. Richardson, 1971 ; Triendl, 1972).

La statistique peut être employée avec succès. La simple répartition des populations suivant la valeur de leur moyenne et de leur variance permet déjà une classification assez intéressante comme le montre la figure 10. L'original est représenté sur la figure 7a. C'est une image d'un ensemble de champs qui se distinguent par leur contour et par l'intensité diverse de la lumière qu'ils réfléchissent. Leur classification suivant la valeur de cette intensité a été réalisée sur la figure 10. Les contours sont conservés.

D'autres procédés peuvent être utilisés, comme l'étude des spectres à deux dimensions. On peut les obtenir d'une façon peu onéreuse par voie optique, mais si l'on veut effectuer des répartitions, des filtrages variés sur les résultats de ces spectres, il est préférable d'opérer numériquement. Les propriétés spectrales permettent une autre classification que celle de l'image elle-même (voir figures 11 a et 11 b).

L'ensemble des répartitions obtenues par ces différentes méthodes devrait par exemple permettre de réaliser d'une manière presque automatique une classification des terrains, ce qui constituerait une aide particulièrement appréciable pour le géologue. Ces classifications pourraient être basées sur les différentes inerties thermiques, les constantes diélectriques, les diverses réflectances aux différentes longueurs d'onde et les radiances. On pourra trouver une application intéressante des études de densité par voie numérique dans l'article de Bodechtel et Kritikos (1971). Ces auteurs ont considérablement augmenté le contraste de photographies de régions désertiques.



Fig. 10 - Résultat d'un traitement statistique réalisé sur la figure 7 a. Les intensités ont été classées en huit populations suivant la valeur des variances, de façon à obtenir une équirépartition du nombre d'individus figurant dans chaque population. Dans chaque groupe ainsi constitué toutes les intensités ont été égalées à la valeur moyenne des intensités du groupe.

---

On voit ainsi les difficultés du problème et le chemin qui reste à faire. La quantité d'information à traiter est considérable et rechercher dans les différents enregistrements concernant une même région les caractéristiques qui se recourent est une oeuvre de longue haleine.

### III - CONCEPTION EVENTUELLE D'UN TRAITEMENT HYBRIDE

Dans les sections précédentes, on a pu voir décrites selon les modalités pratiques les différentes opérations que, dans l'état actuel de la technique, on peut faire subir aux images.

On va maintenant reprendre cette liste de traitements en les classant non plus d'après la façon de les mettre en oeuvre, mais selon leur nature et leur action; on examinera alors quelle est la manière qui semble actuellement la plus pratique, ou la moins chère, de les mettre en oeuvre. Dans l'hypothèse où une partie du traitement devrait être faite par une voie, une autre par une autre, on sera amené à recommander un traitement hybride. Il est bien certain que les conclusions que l'on tirera à cet égard de l'étude des différentes méthodes sont essentiellement transitoires et relatives. Elles dépendent en effet de l'état d'avancement des constructions de machine, tant analogiques que numériques.

De plus, il n'existe pas à notre connaissance de machine hybride permettant de faire simultanément ou presque des opérations ressortissant à deux ou trois des catégories que l'on a énumérées dans la partie II : optique, analogique électrique, numérique. Un projet, cependant, a été publié par Weaver et ses collaborateurs (1970). Il concerne une machine dans laquelle une partie optique produit le spectre de Fourier d'une image que l'on introduit sous forme d'un film transparent. Une convolution ou un filtrage peut alors être effectué instantanément et le résultat est repris par un système d'analyse à balayage, numérisé et envoyé dans un ordinateur numérique pour le reste du traitement.

En l'absence d'une telle machine, force est de choisir selon la nature du traitement quelle est la voie qui paraît souhaitable.

Considérons les points de départ et d'arrivée. Au départ, comme on l'a vu, on peut avoir à sa disposition ou une image sur film, ou une bande analogique ou une bande numérique. A l'arrivée, dans la plupart des cas, c'est une image que l'on désire. Il faut donc, si on n'y est pas resté, revenir au mode optique. Mais on peut aussi chercher à sortir du ordinateur une carte ou une statistique voire des courbes ou des graphiques quelconques. Dans ce cas, une imprimante classique de centre de calcul peut suffire. Peut-être aura-t-on également besoin d'une table traçante ou d'une caméra, électrostatique



ou autre. Souvent on voudra à la fois une ou plusieurs images et des éléments pouvant être imprimés.

Entre le début et la fin de la chaîne de traitement, on aura à faire une ou plusieurs des opérations suivantes : corrections géométriques, régularisation des amplitudes moyennes, suppression des lignes et des bruits systématiques, augmentation des contrastes et réduction aux contours, découpage selon les densités, étude de spectres spatiaux, filtrage en direction, comparaison d'images, analyse de texture, etc...

En ce qui concerne les corrections, seule l'anamorphose réalisant l'opération d'affinité peut se faire de façon simple par voie optique. C'est ce qui a été fait par Cholet et collaborateurs (1968) pour ramener des vues du fond de la mer obtenues par sonar latéral à la même échelle et pour en composer des mosaïques. Le basculement des photographies peut se faire aussi par voie optique, mais paraît difficile à automatiser. Le passage à une projection orthogonale peut se faire à l'aide d'une machine électrique à calcul analogique (d'Autume, 1968). La correction des défauts d'appareillage ne peut guère se faire que par voie numérique. C'est ainsi que l'ont réalisée les auteurs qui ont traité les images envoyées de Mars par les Mariners (Rindfleisch et autres, 1971 ; Nathan, 1966). Aussi, dans l'ensemble, peut-on conclure que les corrections d'image doivent être faites numériquement. Cela impose donc une numérisation dès le début du traitement, si toutefois les images n'arrivent pas au centre de traitement déjà sous forme numérique.

La régularisation des densités moyennes, si tant est qu'on ait besoin de la faire, est aussi facile par voie analogique électrique que par voie numérique.

La suppression des lignes causées par un balayage et des bruits systématiques, périodiques ou non, peut se faire par voie optique ou numérique. On pourrait à la rigueur réserver la suppression des lignes à l'optique car c'est le type même d'opération très simple à réaliser optiquement, mais qui est relativement coûteuse à faire numériquement. Cependant c'est par calcul numérique que l'on a la souplesse et la finesse la plus grande pour l'analyse du type de bruit auquel on a affaire. Un système de calculateur avec représentation du résultat de traitement sur un écran de tube cathodique est avantageux à utiliser, car il permet le contrôle de l'élimination du bruit. Encore faut-il que le centre de calcul soit organisé en conséquence.

On aboutit à une conclusion voisine à propos de l'augmentation des contrastes, de la réduction aux contours et du découpage par tranches de densité. Voilà trois types de traitement que l'on sait certes faire optiquement, mais qui sont moins chers lorsqu'ils sont effectués dans une machine électrique analogique, et qui sont beaucoup plus souples, donc plus

efficaces, si on les réalise avec un calculateur numérique. Par voie numérique, en effet, on peut tenir compte d'un plus grand nombre de paramètres et l'on peut agir sur le traitement à l'aide de terminaux appropriés.

L'étude spectrale des images, au moins si on se limite à des recherches qualitatives, est particulièrement bien réalisée par voie optique. Si on désire calculer numériquement des spectres, on risque de se trouver en face de problèmes de capacité de mémoires et de temps de calcul, alors que la transformée de Fourier est réalisée très simplement si on tire parti des propriétés de la lumière cohérente.

Les figures 11a & 11b permettent de faire une comparaison entre des spectres obtenus par voie optique et par voie numérique. La figure 3a montre l'image originale. On y distingue une directivité principale suivant la lèrediagonale (haut-gauche vers bas-droit). Cette direction se retrouve très bien sur les deux spectres et l'on met également en évidence une direction secondaire pratiquement perpendiculaire à la précédente. Le spectre optique (fig.11a) est qualitatif, le spectre numérique (fig.11b) est quantitatif et permet, par exemple, le tracé de courbes de niveau.

Si l'on cherche à calculer d'autres transformées, par exemple celles de Walsh ou d'Hadarnard, des filtrages (Gubbins et coll., 1971), alors il est bien certain que le calcul numérique est très pratique et qu'il s'impose.

En ce qui concerne les filtrages en direction, on peut dire qu'ils sont également aisés dans les domaines optique et numérique. Leur faible prix de revient par voie optique incite à les introduire dans un ensemble d'opérations réalisées par voie numérique. La figure 12a représente une image résultant d'un traitement numérique ayant pour effet d'améliorer les contrastes. Sur la figure 12b, on voit le résultat du filtrage en éventail réalisé par procédé optique sur l'image de la figure précédente.

Pour la comparaison d'images et l'analyse des textures, il semble hors de doute que le traitement numérique l'emporte de loin grâce à la possibilité qu'il donne au programmeur de modifier à l'infini ses algorithmes de reconnaissance. Encore faut-il, là encore, qu'un terminal du calculateur permette de voir rapidement les résultats sur un écran et d'agir sur le traitement en cours. Il est toutefois une application particulière où des traitements peuvent se faire d'une façon tout à fait élémentaire : c'est l'addition d'images du même endroit pour produire une image composite incorporant les informations reçues en provenance de différentes bandes de longueur d'onde. Il existe sur le marché des projecteurs perfectionnés permettant de superposer plusieurs images à travers des filtres colorés de façon à faire la synthèse d'une image en fausses couleurs. L'oeil et le cerveau voient alors plus facilement les

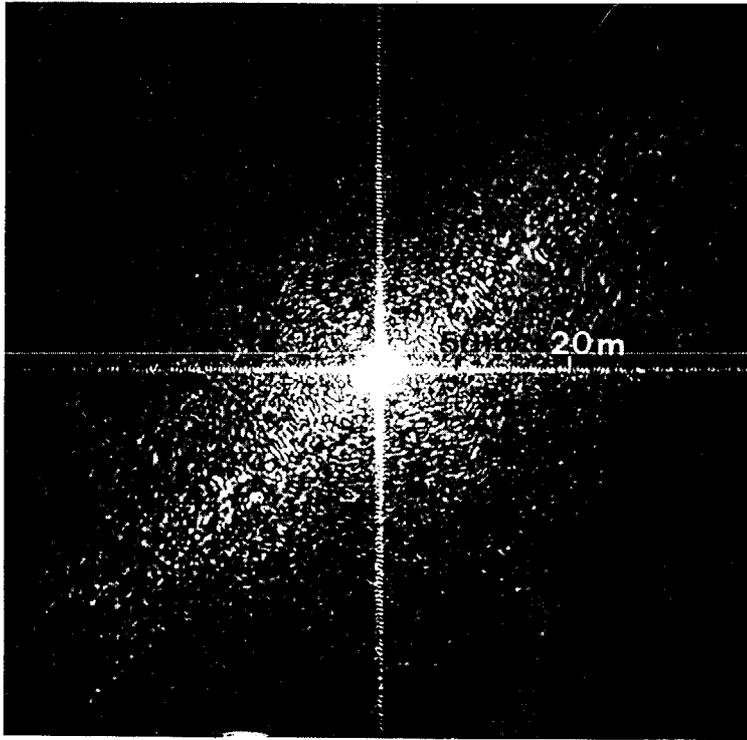


Fig. 11 a

Spectre optique  
du Berriasien de  
la vue 3 a à  
comparer aux  
spectres 3 b et  
3 c.

395 263 309 282 345 76 94 150 43 94 184 222 142 380 252  
 264 258 258 439 235 241 333 400 128 375 157 682 256 319 576  
 153 125 395 337 15 173 316 223 538 374 248 50 311 415 809  
 301 756 639 196 104 152 234 415 262 204 353 600 289 571 168  
 151 150 248 393 368 96 580 780 335 279 539 1175 144 97 210  
 130 294 392 480 967 1135 257 1013 153 584 799 780 1115 941 165  
 386 226 319 247 385 632 852 528 890 512 1505 1984 215 221 370  
 102 202 104 219 758 1297 231 480 1732 2528 1889 1580 281 896 190  
 65 236 935 1015 588 143 176 126 244 581 341 387 662 848 601 210  
 468 320 415 98 494 1485 480 480 1485 494 98 415 320 468  
 210 601 848 662 387 34 1458 1282 1761 143 588 1015 935 236 65  
 190 896 281 1580 1889 2528 1732 480 231 1297 758 219 104 202 102  
 370 221 215 1984 1505 512 890 528 852 632 385 247 319 226 386  
 165 941 1115 780 799 584 153 1013 257 1115 967 480 392 294 130  
 210 97 144 1175 539 279 335 780 580 96 368 393 248 150 151  
 168 571 289 600 353 204 262 415 234 152 104 196 639 756 301  
 809 415 311 50 248 374 538 223 316 173 15 337 395 125 153  
 576 319 256 682 157 375 128 400 333 241 235 439 258 258 264  
 252 380 142 222 184 94 43 150 94 76 345 282 309 263 395

Fig. 11 b

Spectre de la  
même région  
calculé numéri-  
quement. On  
retrouve les  
mêmes directions  
principales.



Fig. 12 a  
Vue d'une région  
voisine de 9 a  
après améliora-  
tion numérique  
des contrastes.



Fig. 12 b  
La même après  
filtrage optique.



---

similitudes et les différences entre les plages de l'image et l'identification de certains types de sols, de roches, de végétation, etc... est rendue plus facile. Il ne semble pas qu'il existe de telles machines couplées avec des calculateurs.

On voit par cette rapide énumération que, si le traitement numérique a l'immense avantage de la souplesse, il n'est pas sans présenter le défaut d'être encore assez onéreux. Et le traitement optique peut encore revendiquer quelques applications particulières comme lui revenant de droit. Le traitement électronique n'est pas non plus sans mérite. Aussi devra-t-on dans la mesure du possible réserver à chaque méthode la voie qui lui convient le mieux.

#### IV - CONCLUSION

La conclusion que l'on peut tirer de ces considérations est que tout est affaire d'espèce. En l'absence de calculateurs permettant le calcul hybride, même si un traitement individuel est avantageusement réalisé avec un appareil optique, rien ne prouve qu'il soit économique de le faire effectivement de cette manière. Il faut étudier soigneusement l'économie de l'ensemble des traitements, rechercher quelles sont les voies les plus efficaces et se décider en fonction du problème particulier. Aussi peut-on dire qu'il n'y a pas de solution générale.

Dans ce vaste domaine enfin, où l'automatisme ne peut encore être envisagé, il est nécessaire de disposer de matériel conversationnel qui permettrait de modifier facilement et sans perte de temps les paramètres de traitement, de contrôler leur efficacité. Il y a aussi actuellement un évident manque de souplesse au niveau des périphériques d'entrée et surtout de sortie, ceux-ci devraient permettre une représentation rapide et éventuellement colorée des résultats.

#### REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la société Daedalus qui leur a fourni l'exemple reproduit à la figure 6. Ils sont redevables à J.C. Rivereau, ingénieur au Bureau d'Etudes Industrielles et de Coopération de l'Institut Français du Pétrole, de nombreux conseils et renseignements.

Ils remercient le Centre National d'Etudes Spatiales pour le prêt du cliché de la figure 2 a et P. Boissard, de l'Ecole Nationale Supérieure du Pétrole, pour le prêt des clichés de la figure 2 b avant sa publication dans la revue Photo-Interprétation. La photographie de la figure 3 a appartient au Club de Télédétection formé par le B.R.G.M., la C.F.P., l'I.F.P., la Société ELF et la S.N.P.A. Les photographies 1 et 4 a proviennent de la N.A.S.A.



## BIBLIOGRAPHIE

- G. d'Autume, 1968, Une conception nouvelle de l'orthophoto-plan, Int. Symp. on Photo Maps and Orthophoto Maps. The Canadian Surveyor, vol. XXII, I, p. 101-105.
- R. Bakis, M.A. Wesley et P.M. Will, 1972, Digital Corrections of Geometric and Radiometric Errors in ERTS Data, Proc. of the 7th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, 17-21 mai 1972, vol. II, p. 1427-1437.
- J. Bodechtel et G. Kritikos, 1971, Quantitative image enhancement of photographic and non-photographic data for earth resources, Proc. 7th Internat. Sympos. on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, 17-21 mai 1971, vol. I, p. 469-486.
- P. Bois, 1973, Compression d'images obtenue en utilisant les transformations orthogonales, Communication au 4e colloque sur le Traitement du Signal et ses Applications (GRETSI), Nice, 7-21 mai 1973.
- P. Boissard, 1971, Traitement optique des thermographies, La télédétection des ressources naturelles, C.N.E.S., Paris, 6-27 oct. 1971, p. 276-306.
- P. Bouché et M. Poulet, 1971, Méthode et exemple d'étude sur photographies aériennes de la fracturation naturelle des carbonates. Revue de l'Institut Français du Pétrole, janvier 1971, p. 3-21.
- R. Bourrouilh et B. Bourrouilh, 1972, Analyse spectrale et filtrage en éventail des cartes structurales de l'île de Minorque et de l'Est de Majorque (Baléares). Conséquences tectoniques, C.R. Ac. Sc. Paris, t. 275, n° 13, série D, n. 1335-1338.
- R. Chevallier, A. Fontanel, G. Grau et M. Guy, 1970, Application of optical filtering to the study of aerial photographs, Photogrammetria, 26, p. 17-35.
- J. Cholet, A. Fontanel et G. Grau, 1968, Etude du fond de la mer à l'aide d'un sonar latéral, Bull. Soc. Fse de Photogrammétrie, 32.
- S. Debrus, M. Françon et C.P. Grover, 1971, Detection of differences between two images, Optics Communications, vol. 4, 2, p. 172-174.



- M. B. Dobrin, A.L. Ingalls et J.A. Long, 1965, Velocity and frequency filtering of seismic data using laser light. *Geophysics*, vol. 30, p. 1144-1178.
- P. Embree, J.P. Burg et M. M. Backus, 1963, Wide-Band velocity filtering, The Pie-Slice Process. *Geophysics*, vol. 38, p. 948-974.
- J.P. Fail et G. Grau, 1963, Les filtres en éventail. *Geophysical Prospecting*, vol. XI, p. 131-163.
- A. Fontanel, 1971, Corrélation optique et holographie acoustique, application à la géophysique, Thèse, Fac. Sc. de Paris (Paris VI), 113 p.
- A. Fontanel et G. Grau, 1968, Traitement optique de l'information géophysique et dans le domaine de la photographie aérienne, mars 1968, *L'Onde Electrique*, vol. 48, n° 492, p. 235-244.
- A. Fontanel et G. Grau, 1971, Corrélation optique en lumière cohérente, *Geophysical Prospecting*, vol. XIX, I, p. 98-117.
- A. Fontanel, G. Grau et Ch. Hémon, 1971, Filtrage et contraction des hyperboles de diffraction, 3e Colloque du GRETSI, Tome I, p. 377-390.
- A. Fontanel, G. Grau, J. Laurent et L. Montadert, 1966, Méthode d'étude et dépouillement des photographies aériennes par diffraction de la lumière cohérente issue d'un laser, IIe Symp. Internat. de Photo-Interprétation, Paris, Sept. 1966, *Archives Internat. de Photogrammétrie*, vol. XVI, p. III-13 - III-22.
- A. Fontanel, J. Guillemot et M. Guy, 1973, First ERTS 1 results in Southeastern France : geology, sedimentology, pollution at sea, Communication au Symposium on significant results obtained from ERTS 1, NASA Goddard Space Flight Center, 5-9 mars 1973.
- A. Fontanel et Ch. Hémon, 1971, Quelques possibilités de traitement numérique des images et de représentation de surfaces, La Télédétection des ressources naturelles. CNES. Paris 26-27 octobre 1971, p. 246-275.
- M. Françon, 1973, New method of optical processing using a random diffuser, *Optica Acta*, vol. 20, 1, p. 1-17.
- D. Gubbins, I. Scollar et P. Wisskirchen, 1971, Two-dimensional digital filtering with Haar and Walsh transforms, *Ann. de Géophysique*, t. 27, 2, p. 85-104.



---

M. Guy, 1971, Divers exemples de cartographie sur le Minervois. La Télédétection des ressources naturelles, CNES, Paris 26-27 octobre 1971, p. 342-356.

R. Nathan, 1966, Digital video-data handling, Jet Propuls. Lab. TR. 32-877.

M.J. Pincus et M.B. Dobrin, 1966, Geological application of optical data processing, J. of Geophysical Research, 71, 20, p. 4861-4869.

E. Ranz et S. Schneider, 1971, Progress in the application of Agfacontour equidensity film for geo-scientific photo interpretation, Proc. 7th Internat. Sympos. on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, 17-21 mai 1971, vol. I, p. 779-790.

T.C. Rindfleisch, J.A. Dunne, H.J. Frieden, W.D. Stromberg et R.M. Ruiz, 1971, Digital Processing of the Mariner 6 and 7 Pictures. J. of Geophysical Research, vol. 76, n° 2, p. 394-417.

A. Rosenfeld, 1969, Picture Processing by Computer, Academic Press, New York, Londres.

E.E. Triendl, 1972, Automatic Terrain Mapping by Texture Recognition, Communication 8th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, 2-6 octobre 1972.

R.K. Vincent et F.J. Thomsen, Discrimination of basic silicate rocks by recognition maps processed from aerial infrared data, Proc. 7th Internat. Sympos. on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, 17-21 mai 1971, vol. I, p. 247-252.

C.S. Weaver, S.D. Ramsey, J.W. Goodman et A.M. Rosie, 1970, The optical convolution of time functions, Applied Optics, Juillet 1970, p. 1672-1682.

M.K. Zeitouni, 1971, Réduction aux lignes de contour d'un cliché aérien en demi-teintes par voie photographique et par filtre optique des fréquences spatiales en lumière cohérente, Thèse Ing.-Doct., Paris, Arch. Centre de documentation C.N.R.S. n° 6210, 92 p.