

## TEST D'ANALYSE GEOLOGIQUE DE RADARGRAPHIES AEROSPATIALES (Adrar des Iforas, Rép. du Mali)

par H. LADMIRANT (\*) et A. WALEFFE (\*\*)

RESUME. - L'étude de deux images radar prises en 1981 par la navette spatiale Columbia sur l'Adrar des Iforas (République du Mali), dans le cadre de l'expérience SIR - A, a mis en évidence un certain nombre de traits particuliers de la géologie de cette région, qu'il a été intéressant de confronter à la carte géologique existante, en vue d'évaluer l'apport éventuel des radargraphies aérospatiales à la cartographie géologique d'une région aride. L'utilisation de cette nouvelle technique constitue un complément utile aux méthodes classiques de cartographie géologique par les informations nouvelles, principalement d'ordre structural, qu'elle apporte.

ABSTRACT. - The study of two scenes of the "Adrar des Iforas" (Republic of Mali) from the radar imagery taken in 1981 by the Space Shuttle Columbia within the SIR - A experiment has pointed out some peculiar features of the geology of that area; those features have been compared with the existing geological map in view of assessing the possible contribution of space radar imagery to the geological mapping of an arid region. The use of that technique will usefully complete the classical methods of geological mapping by adding new data mainly in connection with structural problems.

### 1. INTRODUCTION.

Lors de son deuxième vol expérimental du 12 au 14 novembre 1981, la navette spatiale américaine Columbia a emporté à son bord une série d'instruments destinés à étudier des phénomènes météorologiques et à analyser chimiquement des composants de l'atmosphère, des océans et des terres. Ce groupe d'expériences, appelé OSTA-I (\*) comportait notamment un système de radar imageur à ouverture synthétique particulièrement performant et dont le but consistait à prendre des images de différentes régions du globe en vue d'y tester les possibilités d'études géologiques *lato sensu*. Cette dernière expérience, appelée SIR-A (\*\*\*) a fourni des images de haute qualité.

L'objectif de cette note est précisément d'évaluer les possibilités que peuvent offrir des images radar à petite échelle pour les reconnaissances et la cartographie géologiques.

Nous avons sélectionné une zone située dans le Nord-Est du Mali (Adrar des Iforas) car elle a l'avantage de réunir deux éléments favorables d'importance. D'une part cette zone, située en région aride (pluviosité < 100 mm) permet une bonne exposition de roches variées dénudées et, d'autre part, elle est bien connue par une récente (1981) carte géologique détaillée, au 1/500.000 (FABRE, 1982).

(\*) Section de Cartographie et de Photo-interprétation.  
(\*\*) Section de Géologie Générale.

Musée royal de l'Afrique centrale, Tervuren, Belgique.

(\*) Office of Science and Technology Applications.  
(\*\*) Shuttle Imaging Radar.

La méthode consiste à repérer et à délimiter sur images des plages d'aspect homogène pouvant être identifiées à des formations géologiques connues, et à rechercher des indications de structures (failles, cassures, stratifications, foliations). Les données radar sont continuellement confrontées aux informations de la carte géologique.

## 2. CARACTERISTIQUES DU RADAR ET DE SES IMAGES.

### 2. 1. LA NAVETTE SPATIALE.

L'orbite de la navette est presque circulaire (altitude variant de 255 à 266 km) et son inclinaison par rapport à l'équateur est de  $38^\circ$  (fig. 1).

L'antenne est disposée de façon à ce que la direction de visée latérale du radar soit perpendiculaire à la ligne de vol et orientée vers le Nord. Compte-tenu de ces paramètres et de la rotation de la Terre, la zone maximale pouvant être imagée est comprise entre les parallèles  $40,83^\circ$  Nord et  $35,59^\circ$  Sud. La fig. 2 montre sur un planisphère les portions de trajectoires pendant lesquelles ont été réalisées des images.

Les images analysées dans cette note appartiennent à la bande 28 (Data Take 29-30) et sont situées dans la partie Nord-Est du Mali (fig. 3).

### 2. 2. LE RADAR.

Le radar émet à partir d'une antenne longue de 10 m, travaille en bande L (longueur d'onde de 23 cm) et en polarisation horizontale tant à l'émission qu'à la réception (mode HH). L'angle de pointage est de 47 degrés et la bande imagée a une largeur au sol de 50 km (fig. 1).

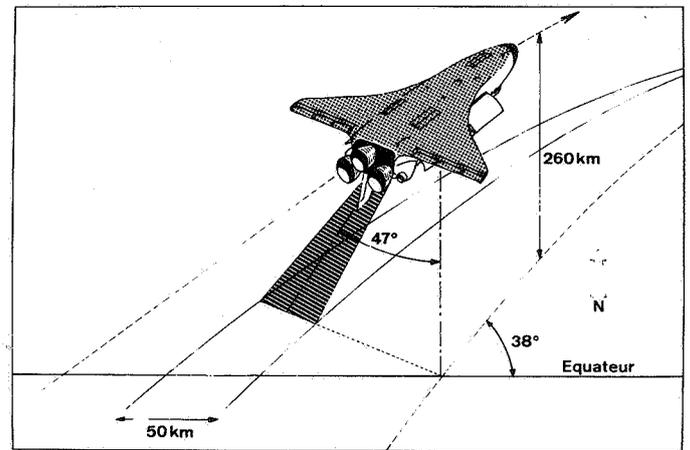


Fig. 1 - Schéma montrant les paramètres géométriques de la navette spatiale Columbia pour l'expérience OSTA-1.

Le système de prise d'images est basé sur un balayage de la surface du sol constitué par un étalement du signal de retour dans le temps. L'enregistrement de l'ampleur du signal (écho de rétrodiffusion) a été effectué sur film à bord. Après le retour au sol, ces données ont été traitées au Jet Propulsion Laboratory (U. S. A.). Les images sont fournies sous la forme d'un film d'une largeur de 12,5 cm sur une longueur pouvant atteindre 10 m pour certaines bandes.

L'échelle de ce document de base est le 1/500.000. La résolution moyenne serait un peu meilleure que 40 m et les films supportent aisément un agrandissement au 1/200.000.

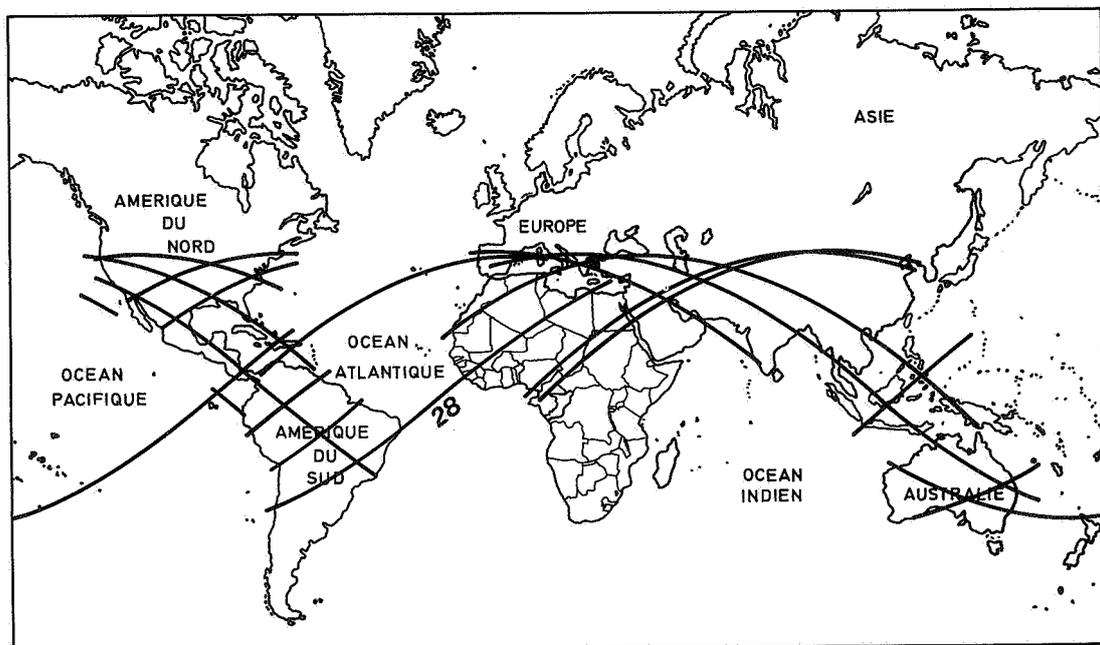


Fig.2 - Trajectoires le long desquelles ont été réalisées des radargraphies. La navette a volé d'Ouest en Est et les images étudiées appartiennent à la bande 28.

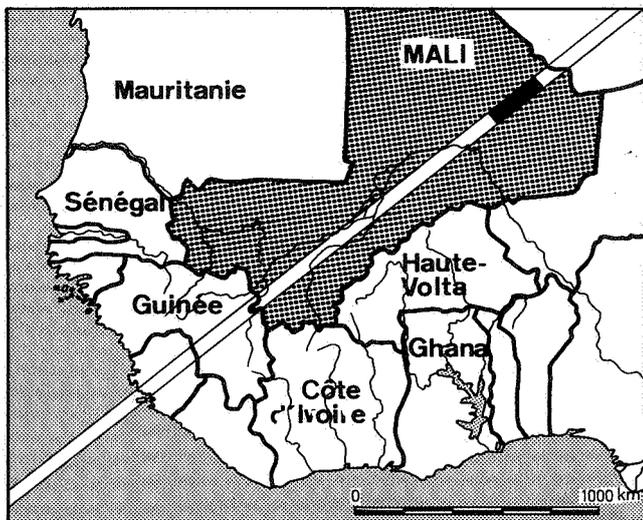


Fig. 3 - Schéma montrant la situation géographique des images étudiées dans le Nord-Est du Mali (en noir).

### 2. 3. FORMATION DES IMAGES.

L'image radar est constituée par des retours d'énergie provenant de la diffusion par le sol d'ondes électromagnétiques à hyperfréquence envoyées sous un angle d'incidence relativement faible. Il s'ensuit que l'image, c'est-à-dire les taches sombres et brillantes qui la composent, dépendent de paramètres différents de ceux que l'on a l'habitude de considérer dans le cas des longueurs d'onde plus courtes, celles du domaine visible notamment.

L'intensité de l'énergie rétrodiffusée, peu liée à la composition minéralogique du sol, est principalement fonction de :

- La pente de la surface du sol. Plus le plan se rapproche d'une position perpendiculaire à la direction de visée, plus le signal est important.
- L'état de surface. Pour une longueur d'onde donnée, on définit l'état d'une surface rugueuse ou lisse. Dans le cas présent d'une longueur d'onde de 23 cm, la séparation entre ces états (critère de Rayleigh) correspond à des dénivellations de l'ordre de 4 cm. Une plage de sable sera donc lisse et renverra l'onde électromagnétique comme un miroir (mode spéculaire) tandis qu'un gravier grossier donnera lieu à une importante diffusion se rapprochant ainsi d'une surface dite lambertienne qui, idéalement, diffuse de façon isotrope.
- La constante diélectrique est un paramètre lié à la composition chimique, à la porosité et à d'autres facteurs encore mal étudiés. Les matériaux métalliques (pont métallique, bateau) à haute constante diélectrique donnent un retour d'énergie "éblouissant".
- L'eau présente une absorption assez marquée.

Ces quelques indications montrent qu'une image radar doit être interprétée selon des critères qui sont encore neufs et mal assurés.

### 3. ANALYSE DES IMAGES.

#### 3. 1. FORMATIONS SUPERFICIELLES.

Le réseau hydrographique qui se reconnaît à sa disposition ramifiée, est constitué de vallées présentant des brillances variables mais contrastant généralement avec l'environnement.

De grandes vallées, larges de 500 à 1000 m et parfois plus, apparaissent en bandes très foncées (A) (\*) qui pourraient traduire une absorption due à une humidité plus importante, ou correspondre éventuellement à un rejet spéculaire sur un mince recouvrement de sable fin homogène. Par endroits, les vallées prennent une teinte gris moyen à clair (B), indépendante de la direction d'illumination, qui traduit vraisemblablement un fond composé partiellement de cailloutis dont les dimensions atteindraient quelques cm.

Localement les plages alluvionnaires s'étendent latéralement selon de petites zones très sombres rapportables à des terrasses (C, carte I).

Les photos montrent deux grandes plages très sombres (D, carte II) et (E, carte I) correspondant à des zones d'ensablement. La plage E, allongée E - O, est une dépression d'après la Carte Internationale du Monde (vallée fossile ?) tandis que la plage D, bordée au Sud par une frange claire (F) d'où part un chevelu de ravines (G) se réunissant et dirigées vers l'extérieur semble être une surface de plateau. La bande la plus claire (F) correspondrait à une zone de pente du sol faisant face à la direction de visée de l'émetteur radar et provoquant un retour d'énergie important.

Ces deux grandes plages sombres renferment des petites taches très claires (H) témoins de l'existence d'affleurements rocheux isolés repérables par une forte brillance due à l'"effet de trièdre" bien connu dans le renvoi des hyperfréquences.

Notons encore, dans l'angle ouest de la photo II, de minces lignes claires traduisant un réseau de filons parallèles N-S (I) (dolérites).

#### 3. 2. ROCHES INTRUSIVES ET METASEDIMENTAIRES.

Quatre principaux massifs attirent l'attention par une forme subcirculaire et parfois remarquablement circulaire, une brillance généralement très forte, un aspect grossièrement granuleux et des contours assez bien contrastés (J, carte I). Ils correspondent à des massifs granitiques à rattacher au "Magmatisme Anorogénique" et comprenant différents types de granites,

(\*) Les lettres de renvoi sans autre spécification se rapportent à la fois aux cartes I et II.

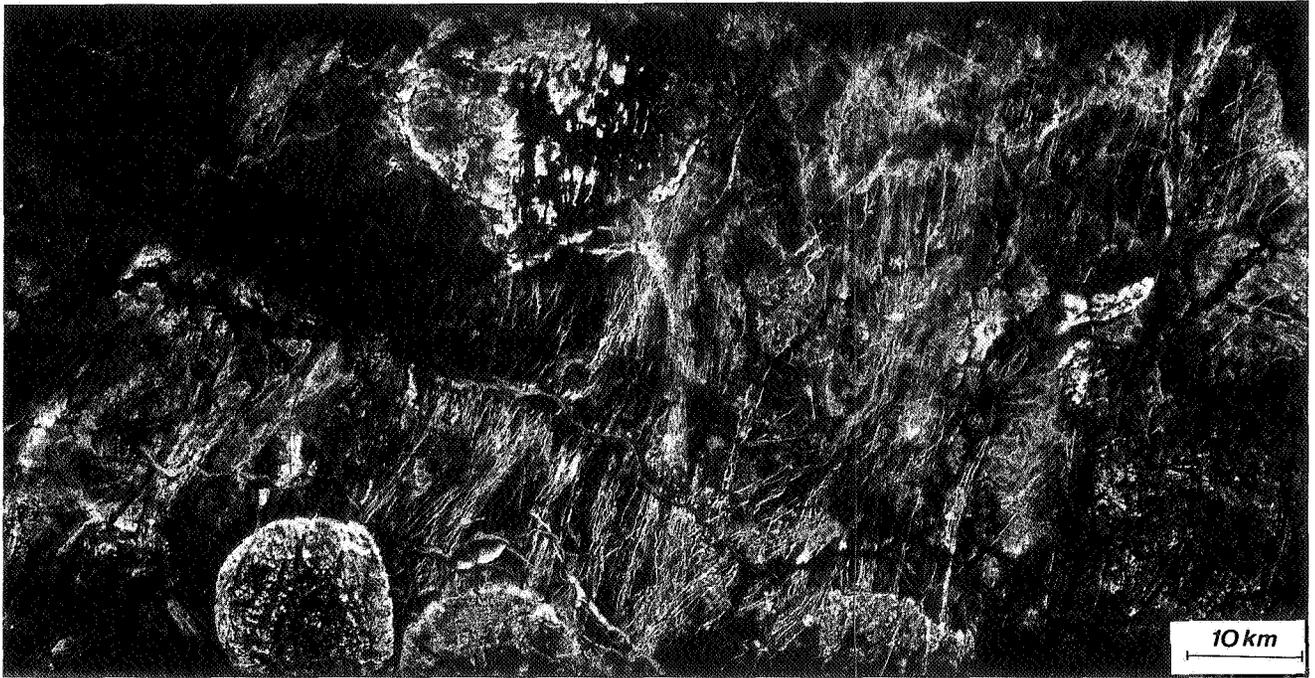
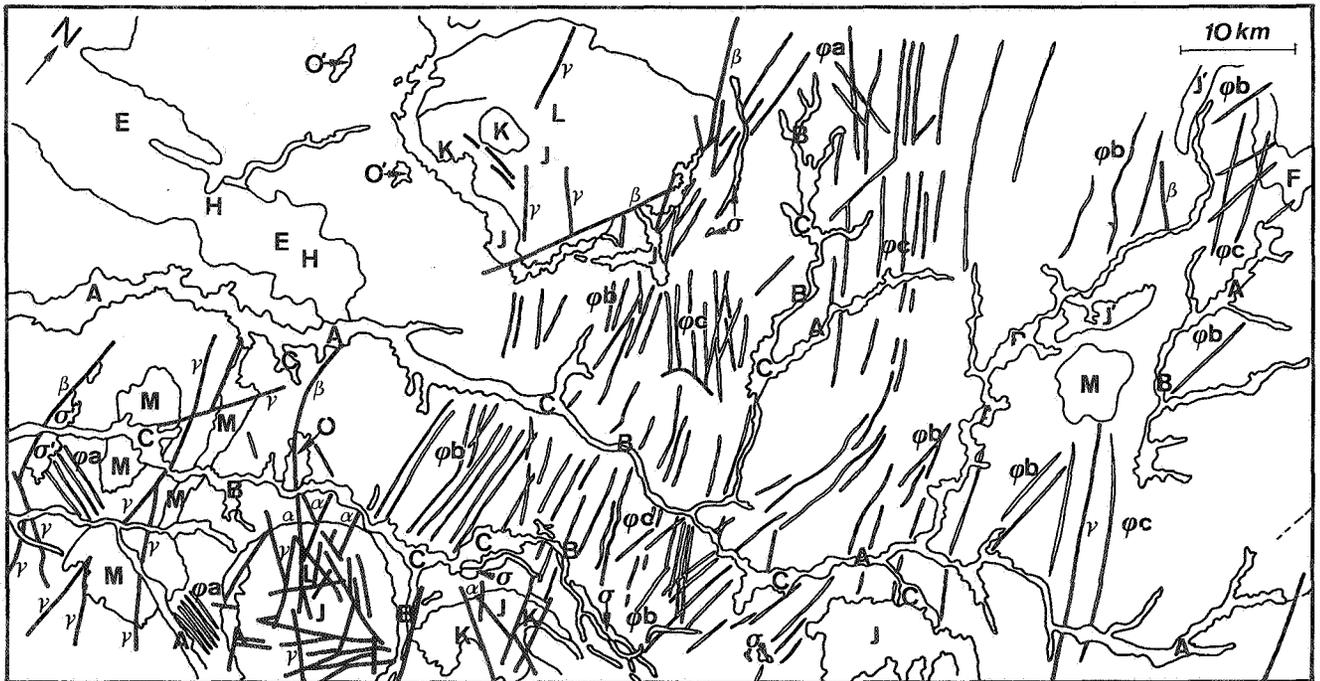


Photo I - Radargraphie de la bande 28 du SIR-A. Partie sud-ouest de la zone étudiée (Adrar des Iforas, Rép. du Mali).



Carte I - Interprétation de la photo I. / limite lithologique; // faille; // filon.

tels que granite à deux feldspaths, granite à perthite, ...

La distinction entre ces différents types de granites à l'intérieur d'un même massif est difficile à faire et leurs limites sont souvent estompées (voir photo I, k).

Des plages irrégulières gris foncé à noir à l'intérieur de ces massifs (L, carte I) pourraient correspondre à l'ensablement de zones de fracturation suivant l'orientation de certaines failles et cassures.

Quelques massifs de ce type de granite apparaissent parfois en plages allongées, de forte brillance, aux contours nets (J', carte I).

Certains autres massifs apparaissent dans différents tons de gris clair à blanc mais avec des contours généralement moins nets que les massifs précédents (M); ils sont constitués de granitoïdes comprenant notamment des adamellites et des tonalites; d'autres massifs de composition lithologique analogue mais d'extension très réduite présentent une forte brillance que l'on serait plutôt tenté de rapporter à une très forte "rugosité" de surface plutôt qu'à une constante diélectrique particulière liée à la composition lithologique (O). Sur la photo I de petites plages (O') de moins forte brillance sont à rattacher à cette catégorie.

Des plages non uniformes de teinte gris moyen (P, carte II) à contours souvent nets, présentent des orientations et sont rapportés aux massifs granitoïdes syn- à tardi-tectoniques.

La photo II met en évidence d'autres plages aux contours plus compliqués. La zone Q, en gris foncé homogène, dessine un couloir (en pointillé lâche sur la carte) correspondant à un ensemble archéen (gneiss, granulites). On y distingue par endroits de fins alignements assez réguliers, plus ou moins parallèles à l'allongement de la zone.

Il est étonnant que la grande zone claire R (en pointillé serré sur la carte II) corresponde également à ces mêmes formations archéennes. Cette grande différence de brillance pourrait s'expliquer soit par un fort découpage (failles majeures bien visibles), soit par une disposition assez contournée de la foliation, ce qui est confirmé par la carte géologique et par l'examen de l'image à la loupe. La limite orientale en est mal définie.

La zone S (carte II) située à l'ouest de la précédente et en contact net avec elle, apparaît selon un couloir assez foncé dont la partie septentrionale est lardée de minces filons blancs très serrés. Il s'agit de gneiss suivis vers l'ouest par une bande de métadiorites (S') d'aspect peu caractéristique.

Cet ensemble S est lui-même suivi vers l'ouest par une plage (C) dont l'aspect hétérogène et la forte brillance pourraient être attribués à un ravinement très développé (pointillé régulier sur la carte II).

La plage plus sombre (T) qui occupe l'angle septentrional de la photo II comprend des gneiss éburnéens avec intercalations de granitoïdes orientés et de leptynites, ensemble dont on ne peut guère séparer les constituants.

Remarquons la petite plage en forme de L (en noir sur la carte II) bien identifiable sur la photo et correspondant à des quartzites.

Une bande de gabbro, syn- à tardi-tectonique (en petits triangles sur la carte II) située dans la zone sombre des leptynites ne peut être distinguée.

La plage U (carte II) très foncée, constituée de quartzites et de marbres se prolonge vers l'est où l'on peut observer des alternances de fines bandes claires et sombres, incurvées, qui représentent la stratification.

La plage V (angle oriental, carte II), de teinte gris moyen, montrant une fracturation en grand, correspond à un ensemble de granitoïdes orientés et de gneiss.

La plage plus claire (X) est en majeure partie constituée de métadiorites. On y distingue de fines lignes probablement liées à la foliation.

### 3. 3. DYKES ET FILONS.

Des dykes de contour net et de teinte très claire apparaissent en deux endroits de la photo I ( $\sigma$ ) avec des directions générales E-O et N-S; ils sont constitués de microsyénite quartzique. Outre ces dykes on distingue un petit massif allongé de direction N-S, de teinte également très claire et constitué de granite alcalin ou hyperalcalin ( $\sigma'$ ) (carte I).

Un trait remarquable, plus particulièrement sur la photo I, réside dans un intense chevelu de filons qui peuvent être groupés en plusieurs ensembles suivant leur direction dominante :

- a) filons E-O ( $\varphi_a$ ) de la photo I;
- b) un ensemble important de filons N-S qui couvrent une bonne moitié de la photo ( $\varphi_b$ );
- c) un autre ensemble de direction N-NO à N-O ( $\varphi_c$ ).

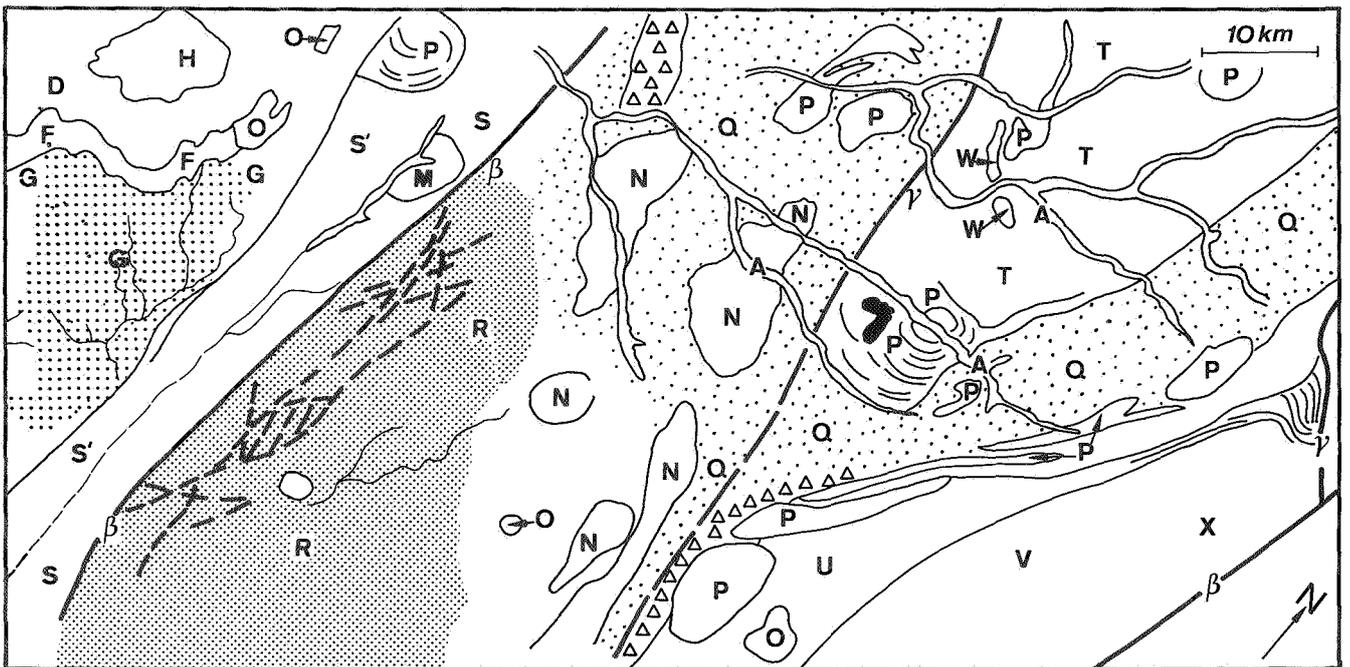
Ces filons sont constitués de microdiorite, microsyénite, microgranite, rhyolite.

Il apparaît clairement, notamment dans l'angle méridional de la photo I, que les filons E-O ( $\varphi_a$ ) sont antérieurs à la fois au granitoïde post-tectonique (M), ainsi qu'aux massifs granitiques anorogéniques (J).

Dans la région où les filons ( $\varphi_b$ ) croisent les filons ( $\varphi_c$ ), (voir bord inférieur de la photo I) on peut constater la postériorité des filons ( $\varphi_c$ ).



Photo II - Radargraphie de la bande 28 du SIR-A. Partie nord-est de la zone étudiée (Adrar des Iforas, Rép. du Mali).



Carte II - Interprétation de la photo II. Voir explications dans le texte.

### 3. 4. FAILLES.

Des failles sont aisément reconnaissables soit par des décalages de limites ( $\alpha$ ) (carte I), soit par un contact rectiligne entre plages de faciès photographiques différents ( $\beta$ ) ou soit encore sous forme d'un trait continu de teinte gris moyen à foncé ( $\gamma$ ).

De nombreuses failles de faible rejet apparaissent dans les massifs granitiques anorogéniques de la photo I.

Les failles longitudinales n'ont pu être identifiées dans la partie orientale de la photo II.

### 4. CONCLUSIONS.

L'analyse succincte des deux photos I et II met en évidence l'abondance, la précision et la qualité relative des informations géologiques qui peuvent être contenues dans une radargraphie de région aride, même lorsqu'elle est prise à partir d'un vecteur aérospatial.

On retiendra entre autres la remarquable mise en évidence des filons et des dykes et, dans une moindre mesure, des cassures et des failles. A ce propos, il est intéressant de noter que, contrairement aux résultats généralement constatés dans les radargraphies aériennes, on n'a pas observé de différence entre les cassures et les failles d'orientations différentes.

Il est possible, dans de nombreux cas, de délimiter des plages homogènes et de les distinguer entre elles sur la base du faciès "photographique" constitué notamment par la brillance, l'aspect lisse, ligné, grumeleux, etc., éléments essentiellement liés à la morphologie de surface (rugosité).

Une caractéristique intéressante des hyperfréquences est leur pouvoir de pénétrer au travers d'une mince couche de sable sec, et de donner ainsi une image de la surface de la roche sous-jacente. Cet avantage permet une meilleure interprétation de la structure grâce à une observation plus continue des éléments géologiques.

Par ses apports originaux, l'interprétation des radargraphies montre sa complémentarité aux autres techniques de télédétection.

### 5. PERSPECTIVE D'AVENIR.

La réussite de l'expérience SIR-A, aussi bien par divers aspects technologiques que par l'excellente qualité des images, a conduit les responsables de la NASA à poursuivre ce type d'expérience et à préparer une nouvelle mission, SIR-B, programmée pour août 1984.

Le radar émettra dans le même bande L, toujours en polarisation HH, mais avec une orientation de l'antenne selon des angles de visée de 15 à 60°, ce qui autorisera la réalisation de stéréogrammes à partir d'orbites voisines. On attend également, des différentes

directions d'illumination, la production de différents albédos pour un même objet, ce qui n'est pas sans rappeler, *mutatis mutandis*, les différences de brillance obtenues dans la multispectralité des images Landsat.

La résolution moyenne serait de l'ordre de 25 m et la numérisation des informations permettra des traitements d'images qualitatifs et quantitatifs.

La navette volera à une altitude d'environ 227 km et la trace au sol de sa trajectoire fera avec l'équateur un angle de 57°, autorisant ainsi le survol de l'Europe notamment.

Le radar fonctionnera pendant environ 25 heures, ce qui représentera l'acquisition d'images couvrant une surface de la Terre d'environ 40 millions de km<sup>2</sup> !

Les prochaines mises sur orbite du satellite français SPOT en 1985 et du satellite européen ERS-1 en 1988-1989 dont les images vont s'ajouter à celles déjà abondantes des Landsat, Meteosat et couvertures aérographiques classiques, vont poser un sérieux problème d'analyse et de stockage de données, celles-ci devenant pléthoriques, voire redondantes.

### 6. REMERCIEMENTS.

Nous adressons nos vifs remerciements au NSSDC (National Space Science Data Center, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland 20771, U. S. A.) pour les documents et les importantes informations qui nous ont permis d'élaborer cette note.

### 7. BIBLIOGRAPHIE.

- CIMINO, J. B. and ELACHI, C. (1982) - Shuttle Imaging Radar-A (SIR-A) Experiment; *Jet Propulsion Laboratory publication* 82-77, California Institute of Technology.
- ELACHI, C., BROWN, W. E., CIMINO, J. B., TIXON, T., EVANS, D. L., FORD, J. P. and al. (1982) - Shuttle Imaging Radar Experiment; *Science*, vol. 218, 3, pp. 996-1003.
- FABRE, J. (1982) - Carte géologique de l'Adrar des Iforas, échelle 1/500.000; Républ. du Mali, Direction nationale de la Géologie et des Mines.
- KOOPMANS, B. N. (1983) - Spaceborne imaging radars, present and future. *ITC Journal*, 3, 223-231.
- MACDONALD, Harold, C. (1969) - Geologic evaluation of radar imagery from Darien Province, Panama; *Modern Geology*, vol. 1, n. 1, pp. 1-95.
- NASA - National Aeronautics and Space Administration - STS 2-OSTA. 1 - SIR-A Information packet (81-111A-01A); Goddard Space Flight Center, U.S.A.

SABINS FLOYD, F. Jr. (1978) - Remote Sensing, Principles and Interpretation; *Freeman and Company, San Francisco*, 1-414.

SETTLE, M. and TARANIK, J. V. (1982) - Use of the Space Shuttle for Remote Sensing Research : Recent Results and Future Prospects; *Science*, vol. 218, 3. pp. 993-995.

WEECKSTEEN, G. (1983) - Evaluation de l'apport des radargraphies SIR-A en géologie : comparaison avec les images Landsat et les photographies aériennes. *Bull. Soc. française de Photogram. et de Télédétection*, n° 92, fasc. 4, pp. 43-62.