

**LES RADARS IMAGEURS ET LA TÉLÉDETECTION AÉRIENNE OU SPATIALE  
EN ZONES TROPICALES FORESTIÈRES**

**B. VOLKOFF\*, M. GAVAUD\* et D. DUBROEUCQ\***

**RESUME**

En télédétection les micro-ondes tiennent une place spéciale car dans cette fenêtre du spectre électromagnétique les observations ne sont pas gênées par l'atmosphère ; elles peuvent être faites à travers les nuages, à travers les pluies, de jour comme de nuit. Dans la pratique on met en oeuvre des systèmes à illumination active qui émettent un signal connu et reçoivent la fraction rétrodiffusée par les objets du sol. Les paramètres liés au terrain intervenant dans la réflexion des micro-ondes sont la topographie, la rugosité du sol, la géométrie du couvert végétal, les propriétés diélectriques de l'ensemble végétation-air-sol. Sous certaines conditions (longueur d'onde, angle d'incidence, état d'humidité) une pénétration métrique est possible ; la forêt peut alors laisser deviner son support, des structures sub-superficielles du sol peuvent être révélées. Les radars en usage sont des radars imageurs à visée latérale embarqués dans des véhicules aériens (Side-looking airborne radar, abv. SLAR) ou spatiaux ; ils sont actuellement tous du type à synthèse d'ouverture (Synthetic aperture radar, abv. SAR). Ils fournissent une image ombrée pourvue d'une sorte de perspective latérale qui révèle la topographie avec une grande finesse et permet de discerner des zones de texture liées à des types de relief et de végétation différents. Il s'agit d'un outil de cartographie extrêmement précieux que de nombreux pays ont utilisé pour l'inventaire de leurs ressources naturelles. Faute d'études suffisantes on ne peut cependant pas encore identifier les objets par leurs signatures comme cela est déjà possible dans le domaine des courtes longueurs d'ondes.

\* ORSTOM, UR104, BONDY (FRANCE)

## 1. INTRODUCTION

La cartographie, l'inventaire et l'évaluation des ressources naturelles, en sols notamment, s'appuient généralement sur des vues de la surface terrestre réalisées à partir d'avions ou de satellites artificiels. Pour les obtenir on dispose aujourd'hui de procédés photographiques dont la sensibilité s'étend du spectre visible au domaine de l'infrarouge.

La mise en oeuvre de ces procédés photographiques se heurte toujours à de grandes difficultés dans les régions forestières tropicales à forte nébulosité atmosphérique. Dans ces régions les contraintes liées à une couverture nuageuse quasi permanente sont souvent si importantes qu'aucune cartographie ne peut être entreprise.

Les progrès réalisés ces dernières années dans les techniques de télédétection aérienne et spatiale ont cependant profondément modifié les données du problème. Il est devenu possible de photographier la surface terrestre à l'aide de dispositifs radar. Dans le domaine des micro-ondes, entre 1 et 30 cm de longueur d'onde, on a un double avantage : 1°) le rayonnement n'est plus affecté par les nuages et la vapeur d'eau ; 2°) les dispositifs radar émettent eux-mêmes les propres ondes électromagnétiques qui sont réfléchies par les objets au sol ; ils ne dépendent donc pas de la lumière solaire.

Ces nouvelles techniques de télédétection par radar, indépendantes de la luminosité et des conditions atmosphériques, apparaissent donc aujourd'hui comme particulièrement intéressantes pour la cartographie et l'inventaire des ressources naturelles des régions tropicales forestières. Elles sont déjà utilisées sur une grande échelle en Amérique du Sud. Le Brésil, le Venezuela, la Colombie notamment, viennent d'achever la cartographie de leurs territoires amazoniens respectifs. Quelques pays d'Afrique ont également expérimenté ces techniques ou envisagent de le faire prochainement.

## 2 - LES SYSTEMES IMAGEURS RADAR

### 2.1. Principes généraux

Il existe deux grands types de radars imageurs : les radars à antenne rotative et les radars à antenne immobile.

Dans les radars à antenne rotative l'antenne effectue une rotation de  $360^\circ$  (ou moins de  $360^\circ$ ). Les signaux sont visualisés sur un écran à cathode circulaire. Le balayage du tube est synchronisé avec la rotation de l'antenne, l'image de chaque balayage restant sur le tube cathodique entre 2 tours, la visualisation est permanente. Ce type de radar est surtout utilisé par l'armée.

Pour les applications civiles et la cartographie, les radars les plus intéressants sont les radars à antenne immobile qui photographient le terrain par balayage latéral. L'antenne est montée sur le côté d'un avion ou d'un satellite artificiel. Le dispositif comporte un émetteur de forte puissance qui envoie de courtes impulsions d'énergie à une fréquence donnée. Le faisceau micro-onde est oblique; l'angle d'incidence varie de  $20^\circ$  à  $80^\circ$ . L'énergie rétrodiffusée est convertie en une tache de lumière sur un écran cathodique puis enregistrée sur un film sensible noir et blanc. La luminosité d'un point donné dépend de l'intensité de l'énergie micro-onde rétrodiffusée vers le récepteur radar par le point correspondant de la surface terrestre. L'intensité rétrodiffusée dépend des propriétés physiques et électriques de la surface.

Le déplacement du vecteur permet d'obtenir un balayage et une visualisation des échos reçus sur une très grande surface.

Les dispositifs à visée latérale embarqués dans des véhicules aériens sont connus sous le nom de "Side-looking Airborne radar", SLAR en abrégé.

### 2.2. Formation de l'image

Sur l'axe perpendiculaire au déplacement du vecteur on mesure le temps mis par l'impulsion radar pour atteindre l'obstacle, être réfléchi et revenir sur l'antenne. Le dispositif radar range donc les points observés suivant la variation de leur distance au capteur.

La position des points sur l'autre axe est déterminée par le déplacement de l'avion parallèlement à la route suivie.

L'intensité du signal retour commande l'intensité d'un spot lumineux sur l'écran d'un oscilloscope, l'intensité de chaque point dépend de la nature et de la position des éléments du relief du sol. Le spot se déplace sur une ligne de l'écran à une vitesse proportionnelle au balayage du faisceau micro-onde dans la direction perpendiculaire à la route de l'avion. L'écran de l'oscilloscope est balayé par des lignes successives qui s'inscrivent sur un film se déplaçant perpendiculairement aux lignes à une vitesse proportionnelle à celle de l'avion. Ainsi se crée une image continue du terrain.

### 2.3. Résolution de l'image.

Dans la direction perpendiculaire à la ligne de vol, la finesse de l'image dépend de la durée de l'impulsion micro-onde. On ne peut, en effet, séparer des échos renvoyés par 2 obstacles distincts que si la différence de leur éloignement est égale à la  $1/2$  longueur d'impulsion micro-onde. Plus la durée de pulsation est courte meilleure est la résolution. Comme l'énergie transmise est proportionnelle à la durée de la pulsation, on ne peut, pour des raisons de détection, utiliser des pulsations trop brèves. Dans la pratique les impulsions ont de 0,055 à 0,1 micro-secondes.

La résolution de l'image dans la direction de la ligne de vol est proportionnelle à la largeur du faisceau micro-onde émis par l'antenne. On peut séparer 2 objets situés à la même distance de l'avion si leur éloignement dans la direction longitudinale est supérieur à la largeur du faisceau à cette distance. Comme le faisceau devient plus large avec la distance la résolution diminue avec l'éloignement.

L'ouverture angulaire du faisceau radar étant inversement proportionnelle à la longueur de l'antenne, il faut, pour améliorer la résolution longitudinale utiliser une antenne aussi longue que possible. La résolution géométrique d'un radar comportant une antenne de 5m et fonctionnant sur 3cm de longueur d'onde est de 30m à 5km, 60m à 10km. Avec une telle antenne de 5m la résolution n'est donc satisfaisante que si le radar est utilisé à faible altitude.

Pour des satellites qui gravitent autour de la terre à plusieurs centaines de km d'altitude on remplace l'antenne réelle par une antenne dite synthétique qui est une antenne virtuelle engendrée par l'avancement propre à l'avion ou au satellite. On prend en compte l'amplitude des échos reçus en fonction du temps et leur décalage en fréquence par rapport à une onde de référence. Le système (SAR, synthetic aperture radar) se comporte comme si l'antenne avait plusieurs dizaines de mètres de longueur.

Le traitement des échos reçus nécessite un très grand nombre de calculs d'ordinateur. On utilise en fait des méthodes de traitement optique. Les radiations radar étant cohérentes les signaux retour

réfléchis par le sol peuvent interférer avec une onde de référence. Les franges d'interférences sont enregistrées sur un film. L'image obtenue éclairée par un faisceau laser produit une image normale.

#### 2.4. Les caractéristiques des images.

Le radar latéral peut couvrir des bandes de terrain avec des angles d'incidence compris entre  $5^\circ$  et  $75^\circ$ . Avec les systèmes opérationnels classiques on couvre une bande d'environ 20km de large à partir d'une distance d'environ 1km de la ligne de vol à basse altitude (1500m) et une bande de 40km de large à une distance comprise entre 20 et 80km de la ligne de vol à haute altitude (1500m). Les bandes sont assemblées en mosaïques présentées généralement à l'échelle 1/250 000. Des agrandissements au 1/100 000 sont aussi utilisables.

Si deux lignes de vol se chevauchent une vision stéréoscopique des images radar est possible. Celle-ci est très précieuse pour la photo-interprétation.

La résolution spatiale est différente dans le sens de la trace et le sens perpendiculaire à la trace. Avec une antenne synthétique l'échelle est constante dans le sens de la trace mais elle varie de façon continue dans le sens perpendiculaire du fait de la visée latérale. Des rectifications géométriques sont donc nécessaires avant toute exploitation.

La résolution moyenne des radars en usage est de 10-15m.

### 3 - PARAMETRES INFLUENCANT L'INTENSITE DES ECHOS RADAR.

L'énergie rétrodiffusée mesurée dépend de caractéristiques qui sont liées à la géométrie de l'ensemble radar-objet et à d'autres caractéristiques qui sont propres à l'objet lui-même.

#### 3.1. Paramètres liés à la géométrie radar-objet.

Les ondes radar se propagent en ligne droite : les régions cachées par le relief ne reçoivent pas d'impulsions micro-ondes et ne sont pas vues. Elles apparaissent noires sur les images.

Sur l'image radar le détail des réflexions dépend d'une part de la longueur d'onde et de la polarisation du rayon incident, d'autre part des caractéristiques géométriques et réfléchissantes de chaque surface du terrain.

- La fréquence et la polarisation : la bande Ka (0,8 à 1,2cm de longueur d'onde) correspond à la plus haute fréquence possible sans avoir à subir les effets de l'atmosphère. Avec les bandes Ka, les bandes X (2,4 à 3,8cm de longueur d'onde) sont les plus utilisées. Les radars météorologiques, basés au sol, fonctionnent avec des longueurs d'ondes plus courtes, celles qui provoquent le maximum d'absorption par les nuages et la pluie. Avec les bandes correspondant à des longueurs d'ondes plus longues, la résolution diminue mais la pénétration augmente, ce qui, dans certains cas est intéressant (exemple des radars de SEASAT et SIR-A qui ont fonctionné à 23,5cm de longueur d'onde). La polarisation normalement utilisée est HH (horizontale émise et reçue).

- Angle d'incidence du faisceau : pour les radars à ouverture réelle on évite les incidences trop rasantes, l'angle varie de 70° à 20°. Pour le SAR où la distance importe peu l'angle d'incidence varie de 60° à 85°. Dans certains cas on recherche des visions presque verticales (pour SEASAT, par exemple, l'angle était de 23°, +/-3°).

- Orientation du terrain par rapport au faisceau. La réflexion dépend de l'orientation du terrain face au faisceau radar et de son incidence. Les variations de réflexion sont toujours beaucoup plus marquées pour les angles d'incidence faibles.

### 3.2. Paramètres propres à l'objet

- Rugosité de la surface. Elle est contrôlée par le micro-relief ou la géométrie du couvert végétal. On distingue les surfaces lisses qui ont une réflexion spéculaire : les images apparaissent noires et les surfaces rugueuses qui diffusent l'énergie dans toutes les directions ; une partie seulement de cette énergie est reçue par l'antenne ; ces surfaces apparaissent avec des tonalités plus claires. La limite entre les surfaces spéculaires et les surfaces rugueuses dépend de la longueur d'onde et de la hauteur de l'irrégularité ; elle est déterminée par la loi de Raleigh :  $h = \text{longueur d'onde} / 8 \cdot \cos I$  (h étant la hauteur de l'irrégularité et I l'angle d'incidence). Pour 45° une surface est théoriquement lisse dans la bande X (longueur d'onde de 3cm) si  $h < 0.53\text{cm}$ . On considère souvent un état de rugosité intermédiaire entre l'état lisse et l'état très rugueux ; il correspond, pour la bande X et une incidence de 45°, aux irrégularités comprises entre 0.17 et 0.69cm de hauteur.

- Propriétés diélectriques. Les propriétés électriques, principalement la conductivité, sont liées à la porosité et surtout à l'humidité. Elles influencent fortement l'intensité du signal micro-onde mesuré. Pour une même longueur d'onde l'intensité est d'autant plus forte que la teneur en eau est élevée mais la pénétration devient alors faible. La pénétration est maximum pour les sols secs.

#### 4 - APPLICATIONS

La méthodologie pour interpréter les images radar est très proche de celle qui est utilisée pour la photo-interprétation. Mais il faut toujours avoir présent à l'esprit que les images radar et les photographies aériennes sont deux systèmes totalement différents en ce qui concerne la formation et la géométrie de l'image et que l'intensité de réflexion micro-onde des objets dépend de paramètres différents de ceux qui interviennent pour le visible et l'infrarouge proche utilisés pour les photo-aériennes.

##### 4.1. Vision du modelé.

Le modelé est très aisément perçu du fait de l'existence, sur l'image, de zones d'ombre totale sur les faces orientées sous le rayonnement et de zones d'éclaircissement blanches sur les faces orientées directement au rayonnement. La grandeur de la projection des ombres des reliefs permet une estimation relative des dénivelées de ces reliefs. L'illumination oblique donne des images ombrées homogènes pourvues d'une sorte de perspective latérale très expressive pour les reliefs moyens.

Mais il y a de fortes distorsions topographiques. Il y a exacerbation du relief réel avec un déport du sommet des reliefs saillants vers la zone d'émission du rayonnement. Les déformations et les longueurs d'ombre varient avec l'éloignement. Dans les régions montagneuses la proportion de surface couverte par les ombres portées peut être importante et gêner l'interprétation, les ombres radar correspondant à une absence totale d'information sur le secteur considéré.

##### 4.2. Exploitation topographique et géomorphologique.

Des changements de pente de quelques degrés peuvent doubler ou tripler la retrodiffusion radar. Les images radar sont donc particulièrement bien adaptées pour détecter des particularités topographiques qui sont révélées avec une grande finesse. L'organisation du réseau de drainage est aussi facilement reconnue grâce au renforcement des ombres.

Les caractéristiques du modelé et le détail du relief conduisent donc à une vision très concrète de la topographie, de la géomorphologie et des structures géologiques au sens large.

### 4.3. Etats de surface et végétation.

On s'appuie sur la tonalité et la texture de l'image. La tonalité est surtout contrôlée par l'orientation des versants par rapport au faisceau radar mais elle est aussi influencée par des paramètres dépendants du sol, de la végétation, de l'humidité qui sont tous interdépendants. Les différences de végétation et de petites variations de relief sont en général facilement reconnues par l'analyse combinée de la tonalité et la texture de l'image.

Pour les angles d'incidence proches de la verticale il est possible de détecter des différences dans l'humidité du sol et distinguer différents types de sols sur la base de leur rugosité.

## 5 - RESULTATS ET PERSPECTIVES

La vision synoptique offerte par les images radar permet une interprétation visuelle et stéréoscopique de grands ensembles géographiques.

L'analyse des caractéristiques du drainage et du relief fournit les bases de l'interprétation pour la cartographie géologique. De telles cartographies ont été entreprises avec de bons résultats dans de nombreux pays tropicaux forestiers (exemple la cartographie géologique du Gabon).

Des ensembles pédo-paysagiques sont généralement associés à des secteurs d'images homogènes caractérisés par un maillage régulier, expression de la répétitivité spatiale de mêmes formes de relief. La signature radar des mailles élémentaires est elle-même en très bonne corrélation avec un contenu morpho-pédologique défini. Pour ces raisons les images radars apportent une aide très précieuse à la prospection pédologique en zones tropicales forestières (exemple du levé morpho-pédologique de l'Amazonie vénézuélienne).

On cherche aujourd'hui à améliorer l'interprétation des images en utilisant un code de couleur pour représenter toutes les gammes d'énergie des échos (gamme qui dépasse les possibilités des films noir et blanc), en mettant au point des techniques stéréoscopiques qui font apparaître les altitudes des divers points de l'image, en combinant les images Landsat et radar, en utilisant des images faites avec des polarisations différentes et différentes longueurs d'ondes.

L'étude des propriétés réfléchissantes des matériaux en fonction de la longueur d'onde et de la polarisation devrait également conduire à l'identification des surfaces réfléchissantes (sols, types de végétations, types de cultures).

Etant donné les relations étroites entre réflexion et humidité du sol, il est déjà possible d'accéder à une connaissance de l'humidité des sols au niveau d'une région et de suivre son évolution dans le temps.

La télédétection radar apporte donc une information synoptique indépendante des conditions atmosphériques (applications géologiques et topographiques). Elle donne les moyens de passer aisément des études ponctuelles réalisées sur le terrain à des surfaces (applications pédologiques). Dans l'avenir elle devrait permettre de passer des éléments paysagiques aujourd'hui seuls perçus à une connaissance directe de la nature des objets (inventaires botaniques). Cette technique doit permettre aussi d'accéder à des informations volumiques et de prendre en compte des évolutions temporelles (applications agronomiques et écologiques).

#### BIBLIOGRAPHIE CONSULTÉE

- COUZY A. 1982 - La télédétection. Que sais-je ? P.U.C., Paris, 127p.
- BRASIL. 1980 - Projeto RADAMBRASIL. Folha SC. 21 Jurueña. Levantamento de recursos naturais. Vol. 20. Ministerio das Minas e Energia. Departamento nacional da produção mineral. Rio de Janeiro, 456p.
- DONZELI P.L., VALERIO M., NOGUEIRA F.P., PEREZ A. et KOFFLER N.F. 1983 - Imagens orbitais e de radar na definição de padrões fisiográficos aplicados a solos. Rev. brasileira de ciencia do solo, 7 : 89-94.
- ELACHI C. 1980 - Spaceborne Imaging Radar : geologic and oceanographic applications. Science 209 (4461) : 1073 - 1082.
- ELACHI C. 1983 - Les images radar de la Terre prises de l'espace. Pour la Science, n° 64 : 22-32.
- ELACHI et FONTANEL A. 1981 - L'observation de la terre par radar. La recherche 12 (128) / 1366-1375.
- FARR T.G. 1984 - Recent advances in geologic mapping by radar. In Télédétection appliquée à la cartographie géologique. Ed. P. Teleki et C. Weber. Document BRGM n° 82, pp. 199-215.
- FOIN F. 1981 - Textures et signatures spectrales. Deux aspects complémentaires indissociables pour l'interprétation des images de satellite. In. Signatures spectrales d'objets en télédétection. Colloque inter. Avignon (France), 8-11 sept. 1981. Ed. G. Guyot et M. Verbrugghe. Les colloques de l'INRA n° 5, pp. 303-313.
- HAMMOND A.L. 1977 - Remote sensing II : Brazil explores its Amazon wilderness. Science, 196 (4289) : 513-515.

- JENSEN H., GRAHAM L.C., PORCELLO L.J. et LEITH E.N. 1977 - Cartographie par radar. Pour la science, 2 : 80-92.
- KING C. 1979 - Contribution à l'utilisation des micro-ondes dans l'étude des sols. Thèse INA-GRIGNON, multigr. 122 p.
- KING C. 1981 - Analyse du signal retrodiffusé des parcelles cultivées en Beauce. Mesures effectuées par le radar à visée latérale VIGIE. In. Signatures spectrales d'objets en télédétection. Colloque inter. Avignon (France), 8-11 sept. 1981. Ed. G. Guyot et M. Verbrughe. Les colloques de l'INRA n° 5, pp. 133-145.
- KOOPMANS B.N. 1983 - Side-looking radar, a tool for geological surveys. Remote sensing reviews, vol. 1 : 19-69.
- KOOPMANS B.N. 1983 - Spaceborne imaging radars, present and future. ITC journal, 3 : 223-231.
- LE TOAN T. et PAUSADER M. 1981 - Active microwave signatures of soil and vegetation-covered surfaces. Results of measurement programmes. In. Signatures spectrales d'objets en télédétection. Colloque inter. Avignon (France), 8-11 sept. 1981. Ed. G. Guyot et M. Verbrughe. Les colloques de l'INRA, n° 5, pp. 303-313.
- LORTIC M.C. - Système Radar. Aspects Techniques. Document du E.H.E.S.S. (sans date), 30 p. Ronéo.
- MONGET J.M., DIOULY OSSO, BASSOT J.P., HERNER R.R. et PATOUREAUX Y. 1984 - Geological cartography of Gabon using side-looking radar imagery : an exemple of an intergrated mapping project. In. Télédétection appliquée à la cartographie géologique. Ed. P. Teleki et C. Weber. Document BRGM n° 82, pp. 107-128.
- PEDREIRA A.J. 1983 - Spaceborne SAR imagery interpretation, Bahia area, Brazil. ITC Journal 1983-3 : 241-245.
- POUYLLAU M. et BLANCANEAUX Ph. 1984 - Applications thématiques d'imageries radar (SLAR-Goodyear et SIR-A) et satellite (Landsat) dans un inventaire géomorpho-pédologique en Amazonie vénézuélienne : évaluation, combinatoire et critique. In. Ann. 18e Sym. Inter. sur l'Observation de la terre, Paris, 1-5 oct. 1984.
- ULABY F.T. 1984 - Microwave properties of vegetation canopies : an overview. In. II Coll. inter. Signatures spectrales d'objets en télédétection. Bordeaux, 12-16 sept. 1983. Ed. INRA. Les Colloques de l'INRA n° 23. pp. 567-576.
- VERGER F. 1982 - L'observation de la terre par les satellites. Que sais-je ? P.U.F., Paris, 127 p.