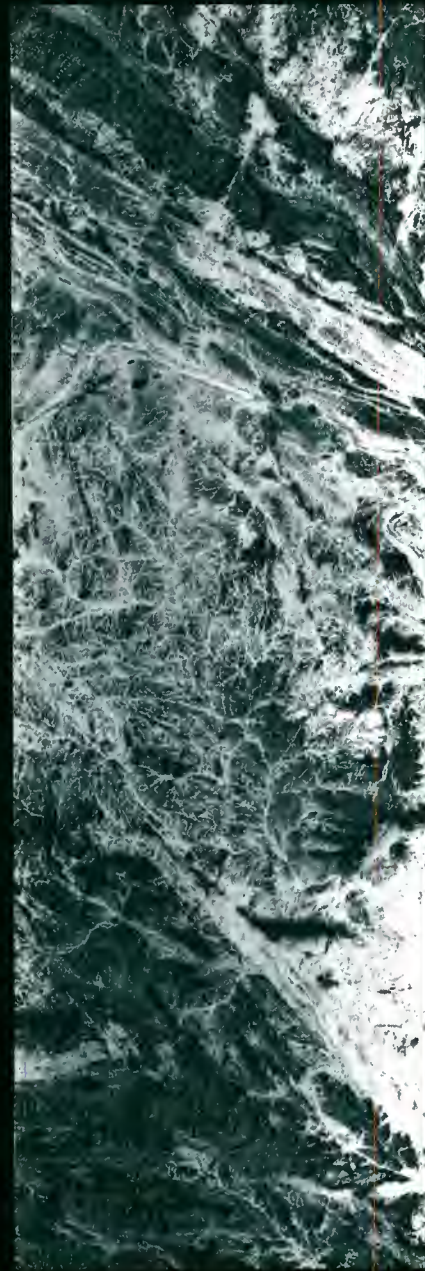
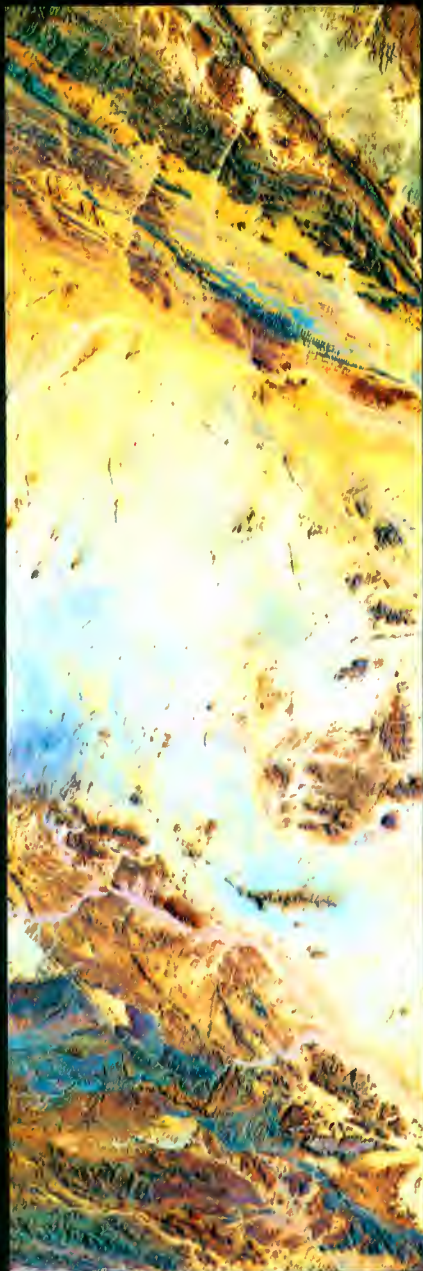


CENTRE DE TÉLÉDÉTECTION FAO

PRINCIPES D'IMAGERIE RADAR



Organisation des Nations Unies
Pour l'Alimentation et l'Agriculture



esa

European Space Agency
agence spatiale européenne

La page de couverture présente deux images satellitaires de la même zone désertique du Hoggar, dans le Sud algérien (échelle 1:750 000):

- à gauche, composition colorée Landsat Thematic Mapper dans le visible et l'infra-rouge (Image 191/44 du 19 Janvier 1985 acquise par ESA/Earthnet, distribution Eurimage)
- à droite, image radar du SIR-A (DT 29-30 du 14 Novembre 1981, source Elachi, JPL, NSSDC et World Data Center A for Rockets and Satellites; traitement GAF).

La combinaison de données Landsat avec des données radar se révèle très utile pour la cartographie des formations géologiques et des écoulements. En pénétrant le sable sec, les hyperfréquences font apparaître la morphologie au dessous de la surface.

Ces Notes de Cours ont été préparées par:

J.F. Dallemand, (Consultant ESA)
J. Lichtenegger (ESA-Earthnet, Frascati)
H. Laur (ESA-ESRIN, Frascati)
Ph. Rebillard (MS2i, Paris).

Ce document est basé en partie sur la Publication FAO/ESA "Principles of radar imagery" (Série du Centre de Télédétection FAO, No. 46, Rome, 1989) ainsi que sur d'autres publications, citées en bibliographie, traitant de théorie ou applications de radars imageurs.

Dans certains cas, les termes techniques français sont suivis de la dénomination anglaise plus communément utilisée.

Série RSC 62

CENTRE DE TELEDETECTION

DIVISION DU DEVELOPPEMENT DE LA RECHERCHE
ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE L'AGRICULTURE

PRINCIPES D'IMAGERIE RADAR

ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE
Rome, 1991

RESUME

Ces Notes de Cours présentent les principes de base des radars imageurs. Une description du domaine microonde du spectre électromagnétique et des facteurs influençant la rétrodiffusion d'une cible terrestre est fournie. La différence entre radars imageurs à ouverture réelle SLAR ("Side Looking Airborne Radar") et radars imageurs à ouverture synthétique SAR ("Synthetic Aperture Radar") est abordée. La géométrie des images radar est ensuite décrite. Des éléments d'interprétation d'images sont présentés pour des thématiciens spécialisés en études de ressources renouvelables, notamment en études forestières et cartographie de l'utilisation du sol.

REMERCIEMENTS

Les auteurs de ce document tiennent à remercier:

Mme K. Barbance du Département des Relations Internationales
de l'Agence Spatiale Européenne (ESA)

M L. Marelli, Manager du Programme Earthnet à l'ESRIN-ESA,
Frascati, et

M Z.D. Kalensky, Chef du Centre de Télédétection FAO

pour le soutien et les encouragements reçus.

TABLE DES MATIERES

	<u>Page</u>
I. INTRODUCTION	1
II. L'ONDE RADAR ET LE COEFFICIENT DE RETRODIFFUSION RADAR	2
1. Le rayonnement électromagnétique utilisé par les radars imageurs: les microondes	2
2. Capacité tout-temps des radars imageurs	2
3. Les quantités mesurées par les radars imageurs	4
4. Facteurs influençant la rétrodiffusion radar	4
4.1 Influence de la fréquence	5
4.2 Influence de la polarisation	6
4.3 Influence de l'angle d'incidence	8
4.4 Influence des propriétés géométriques	8
4.5 Influence de l'humidité	9
III. FONCTIONNEMENT DES SYSTEMES RADARS IMAGEURS	11
1. Le radar imageur à ouverture réelle RAR ("Real Aperture Radar")	14
1.1 Résolution spatiale radiale ("across-track or range resolution") et durée de l'impulsion radar	14
1.2 Résolution spatiale azimutale ("along-track resolution") et ouverture du faisceau radar	17
2. Le radar imageur à ouverture synthétique SAR ("Synthetic Aperture Radar")	19
2.1 Principe du SAR	19
2.2 Traitement de données SAR	21
IV. ELEMENTS D'INTERPRETATION DES IMAGES RADAR	23
1. La radiométrie	23
1.1 Le speckle	23
1.2 Analyse d'image et texture	25
2. La géométrie de l'image	31
2.1 Les particularités de la géométrie de l'image	31
2.2 Rétrodiffusion et angle d'incidence local	36
2.3 Ombre portée ("Shadowing"), Déversement radar ("Layover") et Raccourcissement des distances ("Foreshortening")	37
2.4 Géocodage d'images radar	40

V.	APPLICATIONS	44
	1. Etudes Forestières	44
	2. Cartographie de l'utilisation du sol	47
	3. Géologie et géomorphologie	49
	4. Hydrologie	49
	5. Océanographie et études de zones côtières	50
	6. Surveillance de l'environnement	50
VI.	CONCLUSIONS	51
VII.	GLOSSAIRE	59
VIII.	BIBLIOGRAPHIE	72
ANNEXES		
	1. Caractéristiques des radars embarqués sur la navette spatiale	76
	2. Caractéristiques des missions radar de longue durée	77
	3. Présentation ERS-1 et ERS-2	78

LISTE DES FIGURES

	<u>Page</u>	
Fig.1	Le spectre électromagnétique	3
Fig.2	Effet des nuages sur les transmissions radio	5
Fig.3	Effet de la pluie sur les transmissions radio	5
Fig.4	Rétrodiffusion de cibles naturelles en bande L, C et X	7
Fig.5	Représentation des polarisations incidentes horizontale et verticale	8
Fig.6	Réflexion et rétrodiffusion de surfaces différentes	10
Fig.7	Eléments d'un système radar	11
Fig.8	Ambiguïtés de distance avec l'observation verticale	13
Fig.9	Principe du radar imageur à ouverture réelle	14
Fig.10	Détermination des distances par impulsions radar	15
Fig.11	Effet de la durée de l'impulsion sur la résolution radiale ("range resolution")	16
Fig.12	Localisation azimutale ("along-track")	18
Fig.13	Configuration d'une ouverture synthétique SAR	19
Fig.14	Fréquence Doppler	20
Fig.15	Correspondance entre une cellule de résolution (k,l) et le pixel associé (i,j) de l'image traitée	22
Fig.16	Relation sur image radar entre tonalité et rétrodiffusion	26
Fig.17	Combinaison des 3 composantes de la texture générale avec l'information tonale de l'image radar	30
Fig.18	Géométrie d'acquisition de données radar SLAR	31
Fig.19	Géométrie d'image radar et de photographie aérienne oblique	32
Fig.20	Deux modes de présentation des données radar	33

Fig.21	Paramètres influençant l'acquisition données aéroportées	35
Fig.22	Image radar sur grille carrée sans correction des variations d'attitude de l'avion	36
Fig.23	Relation sur image radar entre tonalité et angle d'incidence	37
Fig.24	Relation sur image radar entre ombre et distance oblique	37
Fig.25	Effet des variations locales de la topographie sur une image radar SAR	39
Fig.26	Principe de géocodage d'une image SAR	41
Fig.27	Système de correction topographique et de géocodage de données SAR (d'après Sowter et al., 1988)	42
Fig.28	Influence de la longueur d'onde utilisée: Images SAR 580, Freiburg, Allemagne (Référence Sieber et Noack, 1986)	52
Fig.29	Exemple de speckle: Zone agricole de Flevopolder (Pays-Bas)	53
Fig.30	Exemple de géocodage d'image SAR Seasat Image de Genève, Suisse	54
Fig.31	Région de Pointe Noire, Congo: Exemple d'image de radar SAR aéroporté (Crédit INTERA)	55
Fig.32	Utilisation d'analyse de texture en classification forestière, (Site d'Orléans, France) (Référence Laur et al. 1987)	56
Fig.33	Composition colorée optique-microonde, Zone de Grombalia, Tunisie	57
Fig.34	Comparaison entre image Caméra Métrique et image radar SAR (SIR-A, 1982) des pentes du Sud du Hoggar, Algérie.	58
Fig.35	Géométrie d'acquisition de données ERS-1 SAR en Mode Image	80

LISTE DES TABLEAUX

Tab.1	Les 3 composantes de la texture d'une image radar (Laur, 1988)	29
Tab.2	Utilisation de données SAR en forêts tropicales, résultats résumés (d'après Raney, Dams, Werle, 1990)	45/46
Tab.3	ERS-1: Spécifications techniques du SAR Mode Image	78

I. INTRODUCTION

Depuis 1972, date de lancement du premier ERTS ("Earth Resources Technology Satellite"), la télédétection spatiale a évolué vers des applications de plus en plus opérationnelles, même à des échelles semi-détaillées. Toutefois, en agriculture et pour des études de ressources renouvelables, un des facteurs limitant l'utilisation opérationnelle d'images orbitales a été la disponibilité insuffisante de données; ce point est particulièrement important en agriculture quand plusieurs images sont nécessaires pour permettre une séparation optimale de diverses classes d'utilisation du sol. Du fait des conditions atmosphériques et du couvert nuageux, une cartographie multitemporelle de l'utilisation du sol est donc souvent difficile. Ce problème a été partiellement résolu par la possibilité de visée latérale de SPOT qui augmente la probabilité d'obtention d'image pour une zone donnée, ainsi que par l'analyse conjointe de données SPOT et Landsat. Toutefois, notamment dans les zones tropicales et équatoriales, le manque d'information disponible est très net; l'imagerie radar, indépendante de la lumière solaire et des conditions atmosphériques, peut donc être particulièrement importante pour les pays en voie de développement où la cartographie thématique est souvent insuffisante.

L'imagerie radar aéroportée a déjà démontré son utilité en zone tropicale dans les années 1970, notamment dans le cas d'importants projets tels le projet NIRAD (Nigeria), Radam (Brésil) ou Proradam (Colombie). Des images radar orbitales ont commencé à être interprétées à la suite des missions expérimentales Seasat (1978), SIR-A (1981), SIR-B (1984) et ALMAZ (1987). Aujourd'hui, un nouveau cadre se dessine avec le lancement prévu en 1991 par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) du satellite ERS-1, première mission de longue durée équipée d'un radar imageur, ainsi qu'avec la préparation des missions microondes JERS-1 (Japon) et Radarsat (Canada). Grâce à la poursuite des missions d'observation de la terre déjà en cours (Landsat, SPOT, NOAA), nous avons donc de nouvelles perspectives d'analyse combinée de données optiques et microondes.

Avantages des techniques microondes

Par rapport aux capteurs optiques, l'intérêt de l'emploi de radars imageurs est lié à:

- la faible sensibilité aux conditions atmosphériques; indépendance de la radiation solaire permettant l'obtention d'images de jour, de nuit et/ou à travers 100% de couvert nuageux;
- la possibilité de contrôle de la radiation électromagnétique émise: puissance, fréquence, polarisation; possibilité de choix d'un angle de dépression et d'un angle azimutal adapté aux objectifs de l'étude;
- l'accès à des paramètres physiques différents de ceux détectés dans le visible et l'infrarouge et possibilité limitée d'obtention d'une information relative à la subsurface.

II. L'ONDE RADAR ET LE COEFFICIENT DE RETRODIFFUSION RADAR

1. Le rayonnement électromagnétique utilisé par les radars imageurs: les microondes

Les systèmes radars imageurs ont pour principe de base d'envoyer vers la surface terrestre un rayonnement électromagnétique, puis de mesurer la quantité de rayonnement électromagnétique renvoyée par la surface terrestre. Le rayonnement électromagnétique est donc le véhicule de l'information. L'onde électromagnétique est caractérisée par:

- la direction de propagation
- l'amplitude
- la longueur d'onde
- la polarisation
- la phase.

La fréquence f de l'onde électromagnétique est liée à la longueur d'onde par la relation suivante:

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad f = \text{fréquence en Hertz (1 GHz} = 10^9 \text{ Hz)} \left[\frac{1}{\text{sec.}} \right]$$

$$c = 3 \times 10^8 \left[\frac{\text{m}}{\text{sec.}} \right]$$

$$\lambda = \text{longueur d'onde en [m]}$$

Les systèmes radar imageurs furent mis au point dans les années 1950, surtout par les forces armées. Pour l'observation de la terre, les longueurs d'ondes utilisées sont comprises entre 1 centimètre et 1 mètre.

La Figure 1 présente le spectre électromagnétique et les lettres désignant les portions du spectre microonde communément utilisées. Notons que les microondes sont parfois appelées hyperfréquences.

2. Capacité tout-temps des radars imageurs

Un radar imageur est un système actif: il fournit sa propre source d'illumination (le rayonnement microonde qu'il envoie). Il ne nécessite donc pas de source d'illumination extérieure (le rayonnement solaire par exemple) comme dans le cas des satellites optiques (SPOT, Landsat) ou des photographies aériennes. Le radar permet donc d'obtenir des images aussi bien le jour que la nuit. D'autre part les microondes pénètrent aisément les nuages. En effet, l'atténuation atmosphérique est nulle ou relativement faible pour les microondes (si $\lambda > 3\text{cm}$).

Les Figures 2 et 3 présentent les effets respectifs des nuages et de la pluie sur la transmission des microondes entre l'espace et la terre.

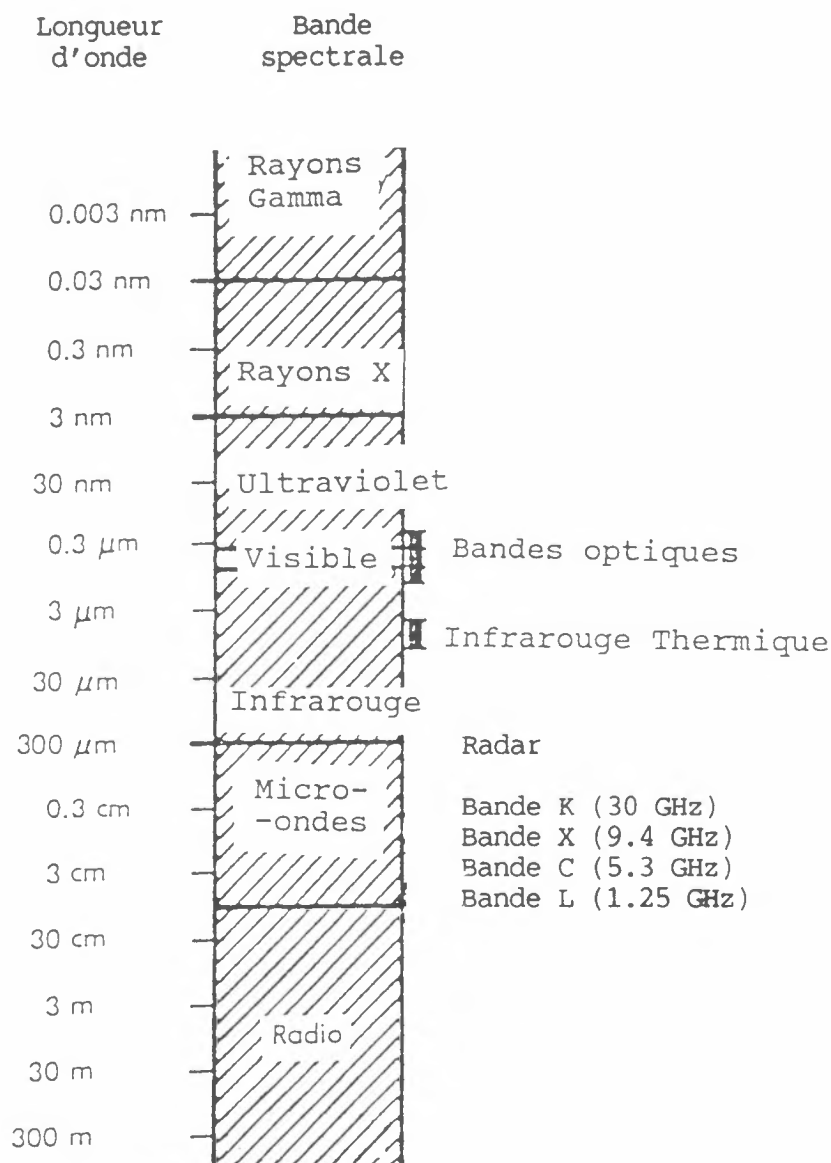


Fig.1: Spectre électromagnétique et désignation des bandes radar

Les radars imageurs, contrairement aux capteurs habituels de télédétection, ont donc une capacité tout-temps et il s'agit là d'un des avantages essentiels de la télédétection par radars imageurs.

3. Les quantités mesurées par les radars imageurs

Un radar imageur produit une image dans laquelle chaque pixel donne une valeur proportionnelle à la puissance du rayonnement électromagnétique rétrodiffusé (renvoyé) par la surface terrestre illuminée par le radar. L'équation radar donne la puissance moyenne rétrodiffusée en tout point de l'image:

$$\langle P_R \rangle = P_T \frac{G \cdot \lambda^2 \cdot q}{(4 \pi R)^3} \sigma_0$$

- $\langle P_R \rangle$ = Puissance moyenne reçue (rétrodiffusée)
- P_T = Puissance transmise
- G = Gain d'antenne
- λ = Longueur d'onde émise
- q = Constante tenant compte des gains et pertes divers
- R = Distance oblique entre l'antenne et la surface imagée.

σ_0 est la section efficace de diffusion radar par unité de surface de la cible (cible = surface imagée). σ_0 est plus couramment appelé le coefficient de rétrodiffusion radar. Il est sans unité. Cependant, comme il a une forte dynamique (de l'ordre de 10^9), il est généralement exprimé en décibels:

$$\sigma_0 \text{ dB} = 10 \log \sigma_0$$

4. Facteurs influençant la rétrodiffusion radar

Le coefficient de rétrodiffusion radar σ_0 donne des informations sur la surface observée. Il est fonction de la fréquence f , de la polarisation p et de l'angle d'incidence de l'onde émise d'une part (paramètres d'observation du radar), des propriétés géométriques et diélectriques de la cible d'autre part (paramètres de la surface étudiée).

4.1 Influence de la fréquence

La fréquence de l'onde incidente joue un rôle majeur dans l'interaction des microondes avec la surface étudiée. Elle entre en compte dans:

- la profondeur de pénétration de l'onde dans le milieu observé
- le concept de rugosité de la surface observée (voir II.4.4).

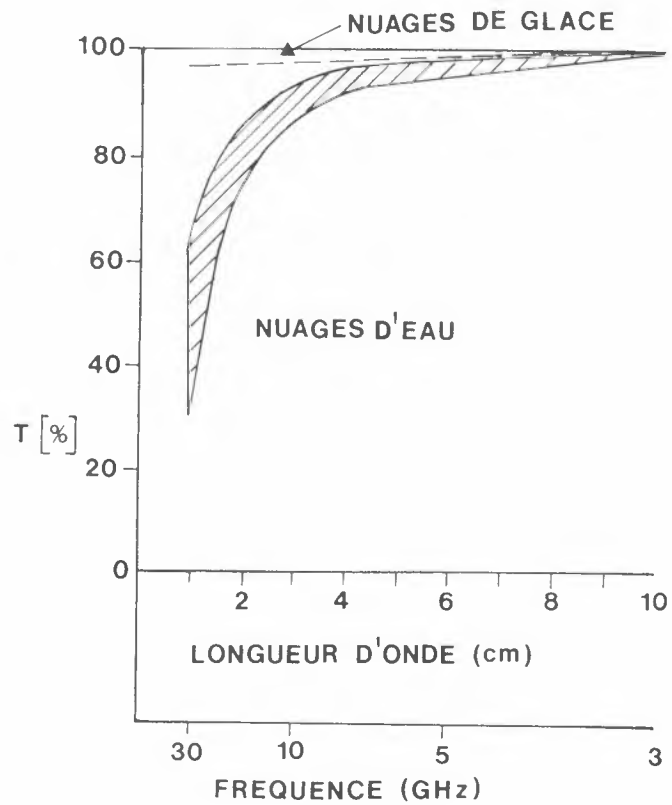


Fig.2: Effet des nuages sur les transmissions radio espace/terre (d'après Ulaby, Moore, Fung, 1982)
 T Transmission en %

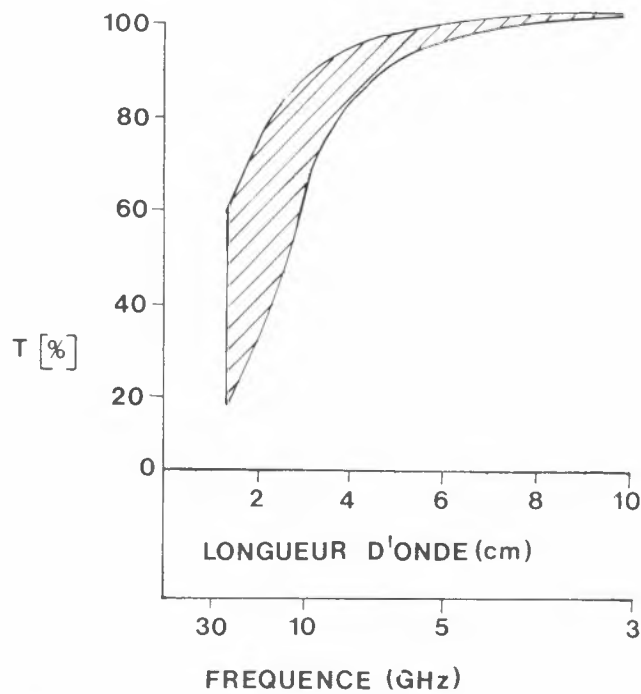


Fig.3: Effet de la pluie sur les transmissions radio espace/terre (d'après Ulaby, Moore, Fung, 1982)
 T Transmission en %

Plus la fréquence diminue (= plus la longueur d'onde augmente) et plus la profondeur de pénétration est importante. Prenons l'exemple de la forêt: avec une longueur d'onde $\lambda = 3\text{cm}$ (Bande X), l'onde s'arrête au niveau des premières feuilles des arbres. L'information contenue dans l'image est donc liée à la couronne des arbres. Par contre, avec une longueur d'onde $\lambda = 23\text{cm}$ (Bande L), l'onde pénètre le feuillage et les petites branches; l'information est alors liée essentiellement aux troncs des arbres ou au sol sous-jacent (Fig.29).

Des phénomènes semblables se produisent pour différents types de surfaces ou milieux observés (Fig.4). Notons toutefois que la profondeur de pénétration est aussi liée à l'humidité du milieu étudié (voir II.4.5).

Enfin, il faut noter que les microondes ne pénètrent pas dans l'eau.

4.2 Influence de la polarisation

La polarisation de l'onde électromagnétique est la direction du vecteur champ électrique \vec{E} ; cette direction est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde. Le plan d'incidence est défini comme le plan perpendiculaire à la surface observée. Lorsque la direction de \vec{E} est perpendiculaire au plan d'incidence, on parle de polarisation horizontale. Lorsque la direction de \vec{E} est parallèle au plan d'incidence, on parle de polarisation verticale (Fig.5).

Les systèmes imageurs présentent différentes configurations de polarisation. Toutefois, les configurations les plus utilisées sont les configurations de polarisation linéaire: **HH**, **VV**, **HV** ou **VH**, le premier terme correspondant à la polarisation à l'émission de l'onde, le deuxième terme à la réception de l'onde.

Comme la fréquence, la polarisation peut apporter pour certains cas particuliers (végétation inondée par exemple) des informations sur les différentes couches du milieu observé, l'onde radar pénétrant plus ou moins suivant la polarisation choisie. En outre, la polarisation peut renseigner sur la forme et l'orientation des petits éléments diffuseurs composant la surface ou le milieu observés.

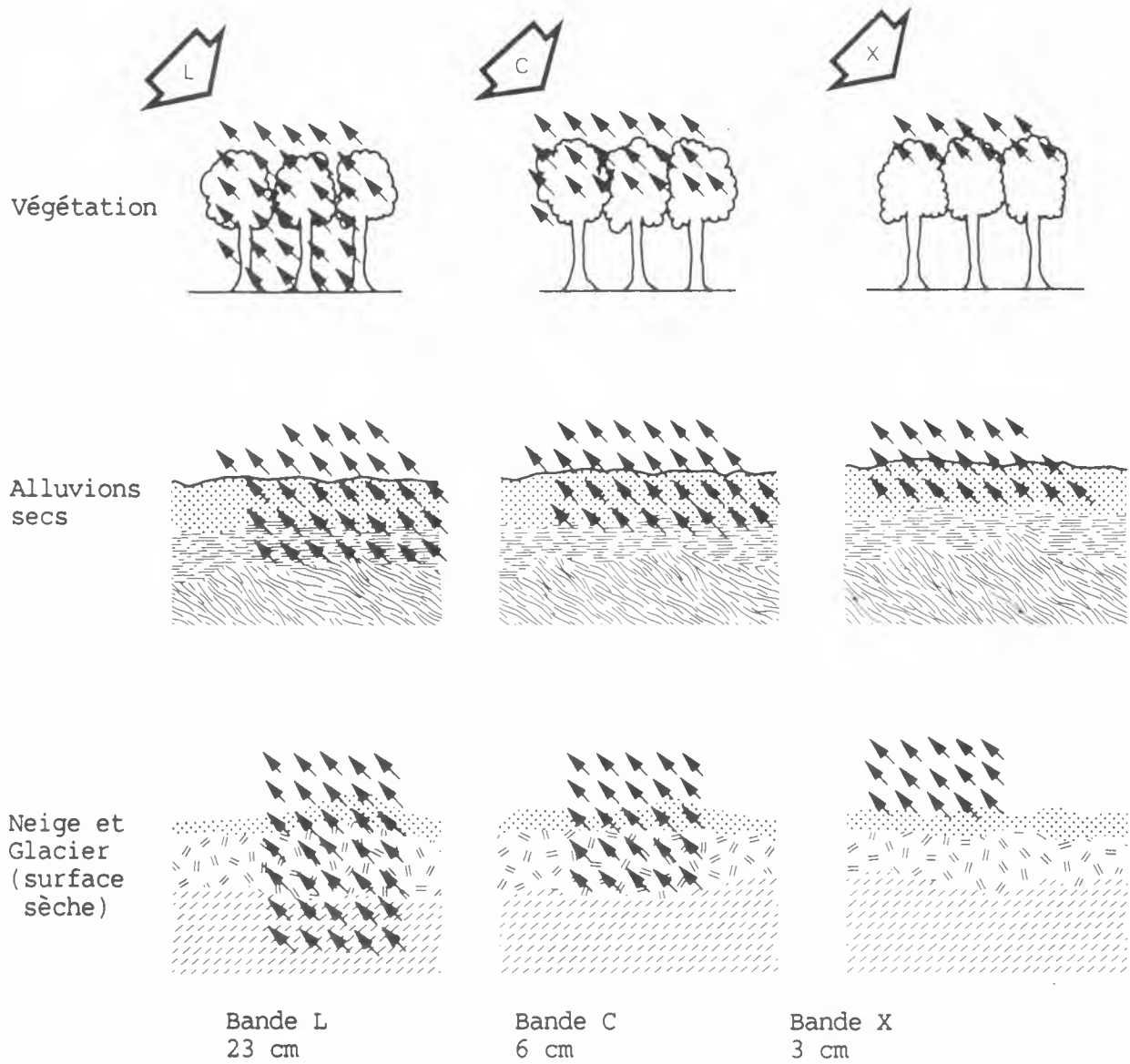


Fig.4: Rétrodiffusion de cibles naturelles en bandes L, C et X
(Source: NASA, 1988)

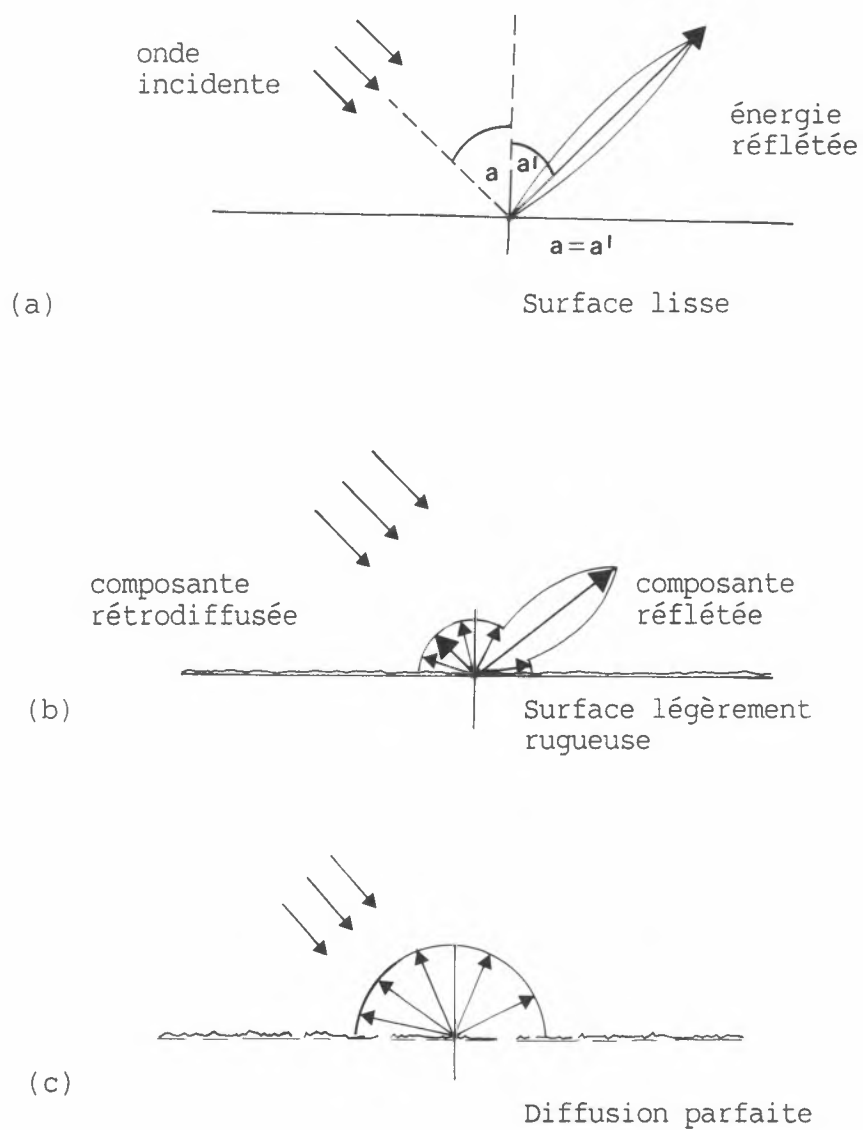


Fig.6: Réflexion et rétrodiffusion de surfaces différentes

III. FONCTIONNEMENT DES SYSTEMES RADARS IMAGEURS

Avant de décrire les principes des radars imageurs, il est important de distinguer, parmi les systèmes microondes utilisés:

- radar ("Radio Detection and Ranging") (système actif)
 - . systèmes de surveillance des avions et des bateaux,
 - . systèmes imageurs (radars à ouverture réelle ou à ouverture synthétique)
 - . diffusionomètres, altimètres
- radiomètre microonde (système passif)
 - . linéaire
 - . imageur

Un diffusionomètre ("scatterometer") est un capteur qui mesure les propriétés de rétrodiffusion d'un objet. Tout radar mesurant précisément la force d'un écho de retour est donc un diffusionomètre.

Le principe de base du radar est la transmission et la réception d'impulsions dans un faisceau étroit des bandes centimétriques du spectre électromagnétique. Les signaux de retour sont enregistrés:

- force relative
- temps mis par l'impulsion pour atteindre l'objet et en revenir
- phase.

La même antenne est souvent utilisée pour la transmission et la réception.

La figure 7 présente les éléments d'un système radar.

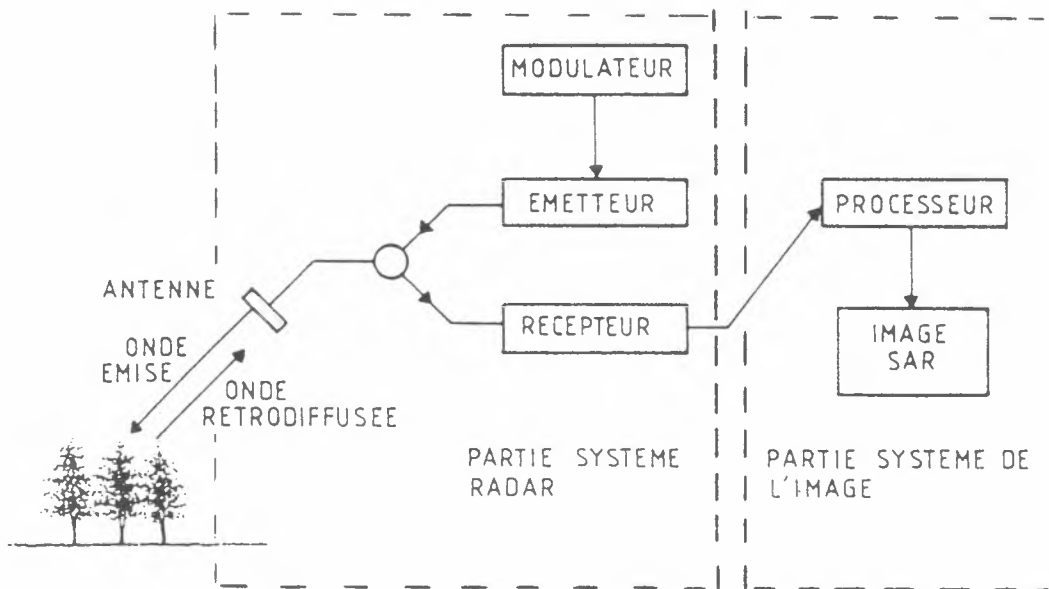


Fig.7: Eléments d'un système radar

Les systèmes radars imageurs peuvent être de deux types:

- radars à antenne réelle RAR ("Real Aperture Radar")
- radars à antenne synthétique SAR ("Synthetic Aperture Radar").

Il est à noter que la communauté d'utilisateurs désigne souvent les radars à antenne réelle par le terme SLAR ("Side Looking Airborne Radar"). Les systèmes à ouverture réelle et synthétique sont tous les deux à visée latérale perpendiculaire à l'axe de vol du porteur, mais se différencient dans l'obtention de la résolution spatiale azimutale, c'est à dire la résolution le long de l'axe de vol.

Les systèmes radar à ouverture réelle utilisent une énergie non cohérente. Ce sont les systèmes les plus simples et leur résolution spatiale azimutale, suivant la ligne de vol ("along track"), est fonction de la distance oblique ("slant range") entre le radar et la cible.

Les radars à ouverture synthétique SAR ("Synthetic Aperture Radar") utilisent une énergie cohérente; par le biais de l'enregistrement et du traitement des signaux rétrodiffusés le long de la ligne de vol, on simule une antenne plusieurs centaines de fois plus grande que l'antenne existant réellement. Ces systèmes ont une bonne résolution azimutale ("along track resolution") indépendante de la distance oblique entre le radar et l'objet. En général, et selon le traitement, les résolutions obtenues sont de l'ordre de 1-2 mètres pour les radars aéroportés et 5-50 mètres pour les radars orbitaux.

Il est à noter que le traitement radar est basé sur le temps de parcours des impulsions. Il y aurait donc des ambiguïtés en temps, et par conséquent en distance, dans le cas d'une visée verticale comme pour les capteurs visible ou infrarouge. (Fig.8)

Pour les deux types de systèmes radar, la résolution radiale, suivant la direction de visée du radar ("across track resolution" ou "range resolution") est déterminée par la durée de l'impulsion émise et est constante.

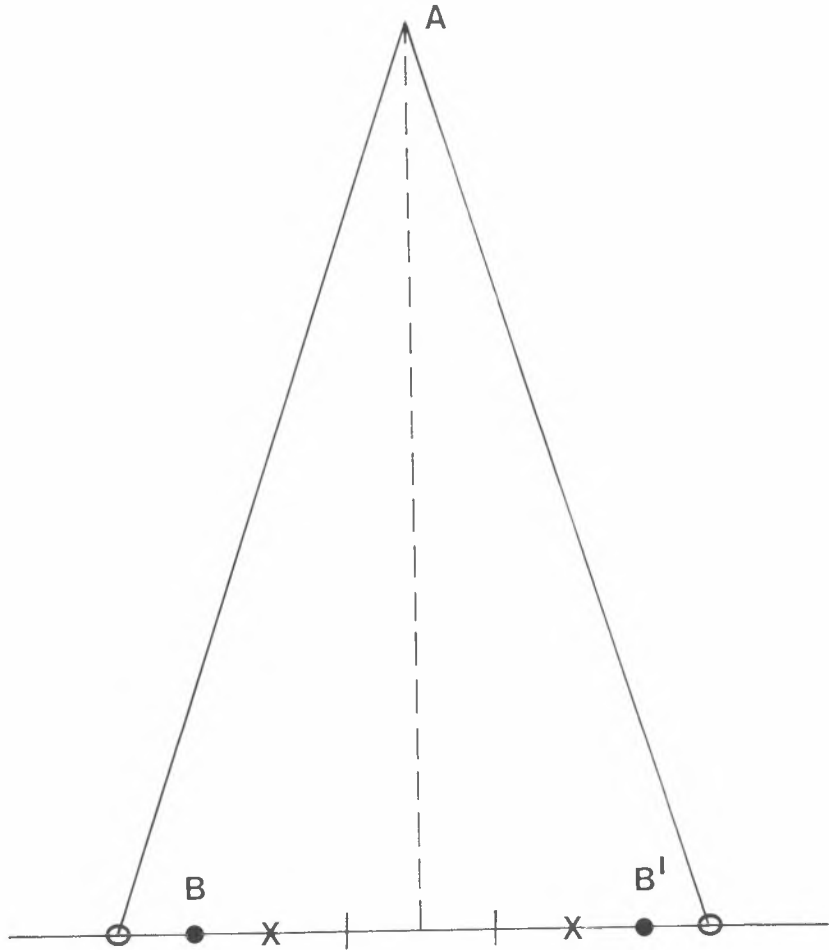


Fig.8: Ambiguïtés de distance provoquées par l'observation verticale

$$AB = AB'$$

L'onde rétrodiffusée par B arrive à l'antenne A en même temps que l'onde rétrodiffusée par B'.

1. Le radar imageur à ouverture réelle RAR
 ("Real aperture radar")

1.1 Résolution spatiale radiale ("across track or range resolution") et durée de l'impulsion radar

La figure 9 illustre l'acquisition de données par un radar à ouverture réelle.

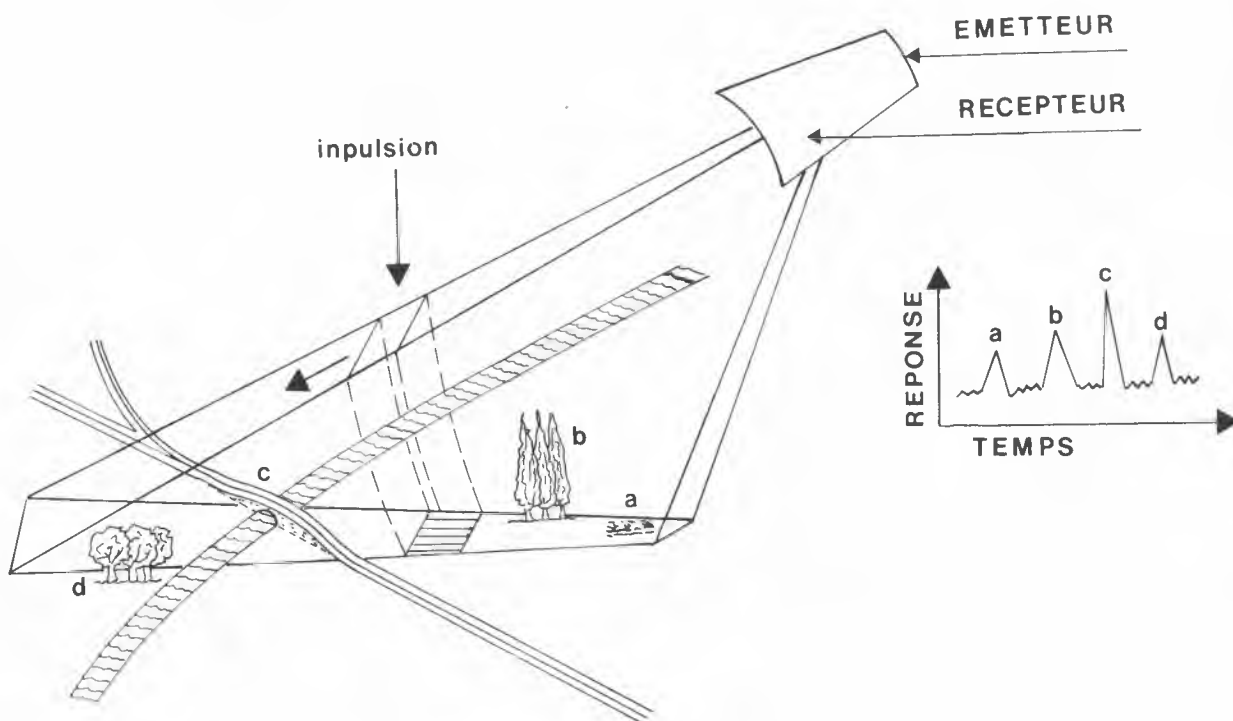


Fig.9: Principe du radar imageur à ouverture réelle

La Publication Goodyear GIB-9/67 décrit les mécanismes d'élaboration d'une image radar.

La durée de l'impulsion radar détermine la résolution radiale, i.e. dans la direction de propagation de l'énergie. Les radars fonctionnent avec une visée latérale: ils envoient un étroit faisceau d'énergie perpendiculairement à la ligne de vol de l'avion. Une impulsion d'énergie est émise par l'antenne radar; l'intensité relative des échos de retour sert à produire l'image d'une bande de terrain. Lors de la transmission de l'impulsion suivante, l'avion a légèrement avancé, permettant ainsi d'imager une bande de terrain différente. Ces bandes de terrain séquentielles sont ensuite enregistrées côte à côte afin de construire une image complète du terrain (Fig.10).

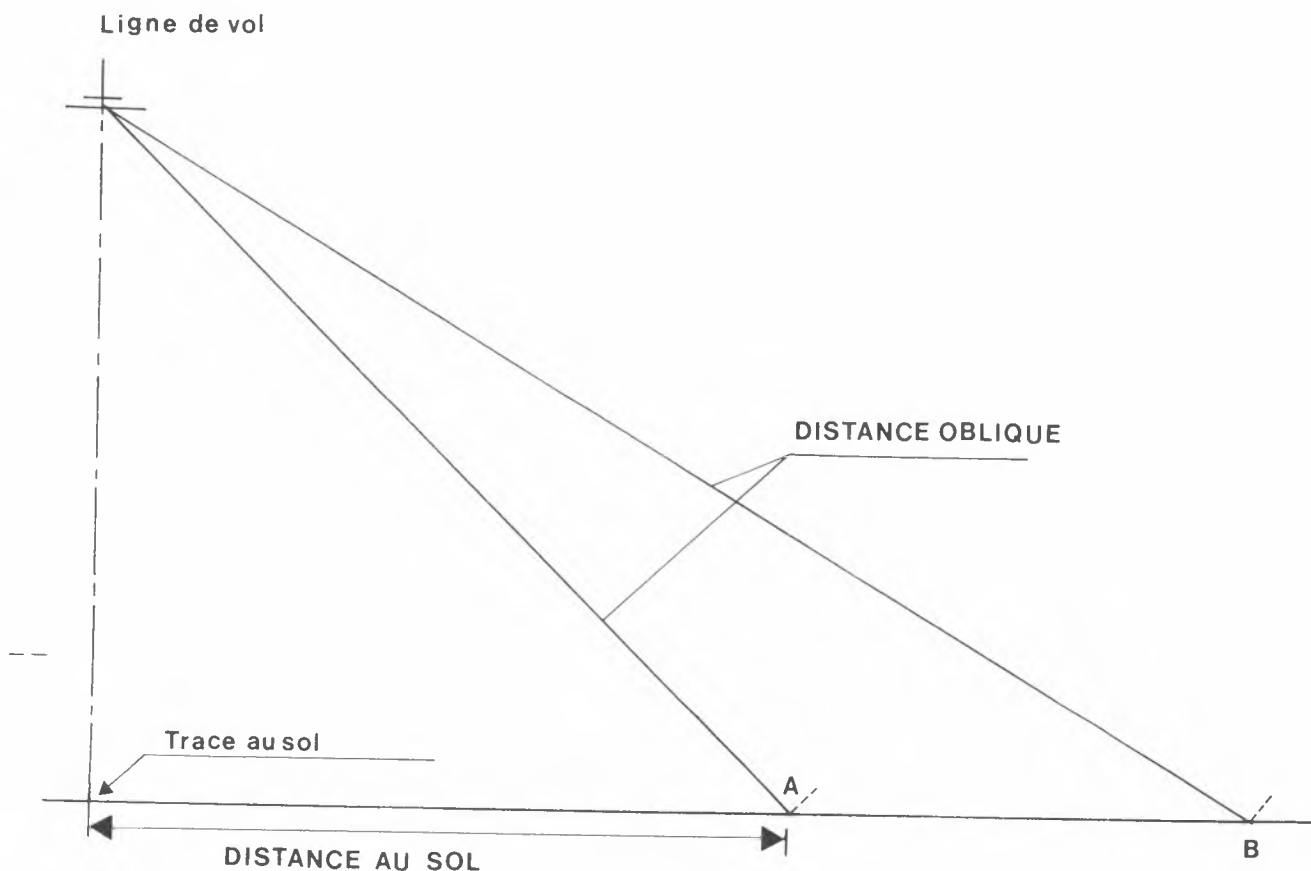


Fig.10: Détermination des distances obliques
par impulsions radar
 Point A: "Near range"
 Point B: "Far range"

Sur la Figure 10, la frange de terrain devant être imagée s'étend du point A au point B, ce qui correspond au temps de réception des impulsions. La distance entre l'antenne et le point A, le plus rapproché, correspond à la distance oblique "near range" de l'image radar; le point B, le plus éloigné, correspond à la distance oblique "far range".

Pour que le radar puisse séparer deux éléments très rapprochés, les échos de retour doivent nécessairement être reçus à des instants différents. Sur la Figure 11, l'impulsion L s'approche des bâtiments A et B. La distance oblique ("slant range") entre les bâtiments est $L/2$.

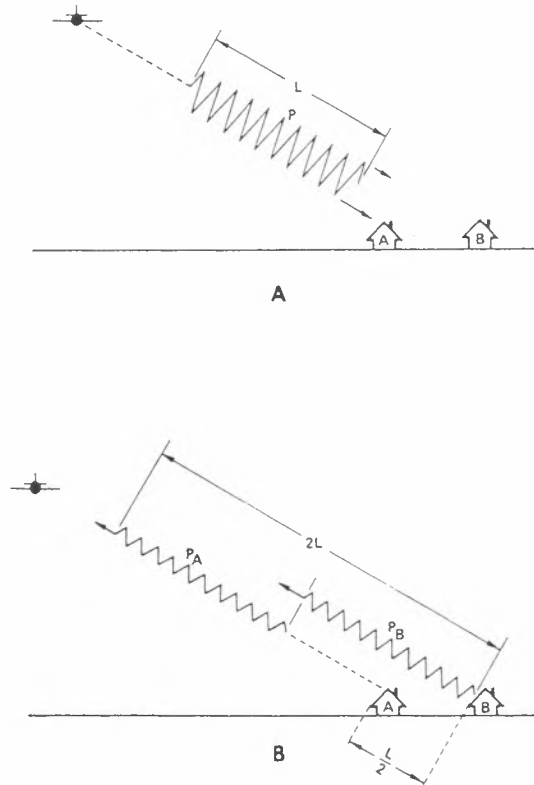


Fig.11: Effet de la durée de l'impulsion émise sur la résolution radiale (d'après GIB, 1971)

La partie de l'impulsion rétrodiffusée par le bâtiment A est P_a , celle rétrodiffusée par le bâtiment B est P_b . Il apparaît sur la figure 11 que P_b a couvert, en allant vers la cible et en en revenant, une distance supplémentaire $L/2$, se trouvant à la distance L derrière P_a . Donc la fin du signal P_a et le début du signal P_b se superposent quand ils atteignent l'antenne. En conséquence, ils sont imagés comme une seule cible s'étendant du bâtiment A au bâtiment B. Si la distance oblique entre les bâtiments A et B était légèrement supérieure à $L/2$, les deux impulsions ne se superposeraient pas et les deux signaux seraient enregistrés comme des images séparées.

Il apparaît donc que la résolution radiale oblique ("range resolution"), dans le plan perpendiculaire à la ligne de vol, est approximativement égale à $L/2$, soit la moitié de la longueur de l'impulsion émise.

La résolution radiale sur le terrain ("ground range resolution") est:

$$R_r = \frac{c t}{2 \cos \alpha}$$

avec c = vitesse de la lumière
 t = durée de l'impulsion
 α = angle de dépression

L'angle de dépression est l'angle situé entre le plan horizontal et la ligne reliant l'antenne à la cible.

Il est important de remarquer que la résolution radiale est indépendante de la distance entre l'avion et la cible, pour un angle de dépression donné; mais la résolution radiale change à travers la fauchée en fonction de l'angle de dépression.

Pour améliorer la résolution radiale, les impulsions radar devraient être aussi courtes que possible; cependant, il est également nécessaire qu'elles transmettent suffisamment d'énergie pour que les signaux rétrodiffusés puissent être détectés. Si l'impulsion est raccourcie, son amplitude doit donc être augmentée afin de conserver à l'impulsion la même énergie. Le problème est la difficulté de mise au point d'un équipement pouvant émettre une impulsion à la fois de courte durée et de forte énergie. De ce fait, pour la plupart des systèmes radars à longue portée, a été adoptée une méthode alternative de compression d'impulsion par modulation de fréquence ("chirp"). La technique du "chirp" utilise, à la place d'une impulsion courte de fréquence constante, une impulsion plus longue, d'amplitude inférieure et de fréquence variable, adaptée à une image de haute résolution. En principe, cela permet de séparer des échos à l'intérieur d'une impulsion car ils ont des fréquences différentes.

1.2 Résolution spatiale azimutale et ouverture du faisceau radar (Ouverture réelle)

Nous avons vu précédemment (III.1.1) comment le radar localise les cibles dans le plan radial ("across track"). Nous abordons maintenant la localisation des cibles dans le plan azimutal ("along track"), c'est à dire parallèlement à la ligne de vol.

La Figure 12 montre que les objets 1 et 2 se trouvent dans le faisceau radar d'ouverture au même instant et que les échos rétrodiffusés seront reçus simultanément. Il n'est donc pas possible de les distinguer et ils apparaîtront sur l'image comme un seul écho fort. Cependant, l'écho retourné par l'objet 3 n'est pas reçu tant que 3 n'a pas été atteint par le faisceau grâce au déplacement de l'avion. Lors du retour de 3, les échos des objets 1 et 2 ne sont plus reçus: l'écho de 3 est donc reçu et enregistré séparément. Donc, pour séparer deux cibles dans le plan azimutal ("along track"), il est nécessaire que la distance entre les cibles soit égale ou légèrement supérieure à la largeur du faisceau radar.

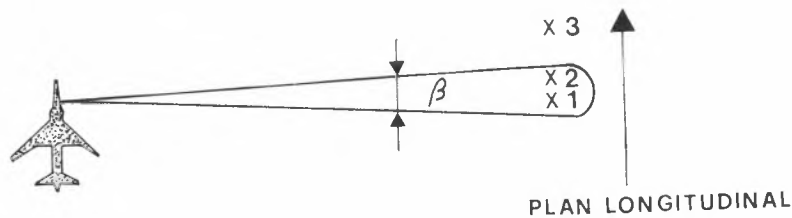


Fig.12: Localisation azimutale β = ouverture du faisceau radar (d'après GIB, 1971)

Pour les radars conventionnels à ouverture réelle le faisceau forme un angle constant. La résolution azimutale est dépendante de la distance radar/surface; elle est meilleure pour les points les plus rapprochés ("near range"), avec un faisceau plus étroit.

Dans le cas d'un système radar à ouverture réelle, pour une longueur d'onde donnée (λ), l'angle d'ouverture du faisceau (β) dépend de la dimension effective (D) de l'antenne:

$$\beta = \frac{\lambda}{D}$$

Ainsi, pour obtenir une ouverture de faisceau de 10 milliradians avec une longueur d'onde de 50 millimètres, il sera nécessaire d'utiliser une antenne de 5 mètres. La largeur du faisceau est un paramètre important car en dépend la résolution azimutale r_{az} , i.e. le pouvoir de séparation spatiale suivant l'axe de vol.

$$r_{az} = R \beta \quad \begin{array}{l} r_{az} \text{ résolution azimutale} \\ R^{az} \text{ distance oblique antenne-cible} \end{array}$$

Pour une distance oblique R de deux kilomètres et une ouverture de faisceau de 10 milliradians, la résolution azimutale r_{az} sera de: $2000 \cdot 0.01 = 20$ mètres. Il apparaît donc que les radars à ouverture réelle ne conviennent pas aux plateformes orbitales.

Une antenne plus longue permet d'obtenir un angle plus étroit et d'améliorer la résolution azimutale. Une autre façon d'améliorer la résolution azimutale consiste à utiliser une radiation électromagnétique de longueur d'onde plus courte. Néanmoins, il existe des limitations pratiques, par exemple en ce qui concerne la longueur d'une antenne pouvant être transportée, de manière stable, par un avion. De plus, l'utilisation de longueurs d'ondes plus courtes est associée à une plus forte atténuation par les nuages et l'atmosphère, réduisant ainsi la capacité du radar d'acquérir des images par tout temps. Du fait de ces limitations, les radars à ouverture synthétique SAR ont été mis au point: ils permettent en effet d'obtenir, sans longue antenne ou courte longueur d'onde une résolution azimutale ("along track") satisfaisante indépendante de la distance radar/surface.

2. Le radar imageur a ouverture synthétique SAR ("Synthetic Aperture Radar")

2.1 Principe SAR

Une ouverture synthétique s'obtient, à bord d'un avion ou d'un satellite, en utilisant une antenne relativement courte qui émet et reçoit des impulsions à intervalles de temps réguliers le long de la ligne de vol. Quand ces signaux individuels sont enregistrés, puis combinés, une antenne de longueur effective beaucoup plus grande que l'antenne existant physiquement a été créée artificiellement. Cette ouverture synthétique permet d'améliorer la résolution azimutale. (Fig.13)

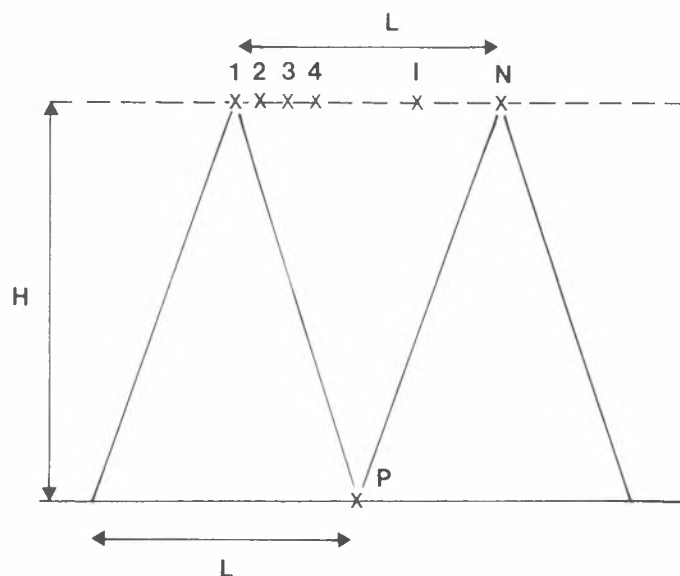


Fig.13: Configuration d'une ouverture synthétique SAR
Le point P est illuminé à partir de 1,2
jusqu'à N (d'après Elachi, 1988)

Il existe une différence importante entre antenne réelle et antenne synthétique. Dans le cas de l'antenne réelle, à un instant donné, une seule impulsion est émise, reçue et visualisée comme une ligne sur l'image. Par contre, dans le cas d'une antenne synthétique, chaque cible sera illuminée par beaucoup d'impulsions et produira un grand nombre d'échos. Ce jeu d'échos provenant de chaque cible doit être enregistré, puis corrélé de façon à simuler l'antenne synthétique.

Il est important de noter que la caractéristique de l'écho reçu en provenance d'une cible change pendant la durée de visibilité par l'antenne. Ce changement concerne surtout la fréquence à cause de l'effet Doppler. Nous illustrerons ce point avec une analogie.

Considérons, comme dans le cas de la Figure 14, une bouée qui plonge dans l'eau et en ressort de façon à produire des vagues ayant une fréquence de 10 cycles par minute. Un bateau se déplace le long d'une ligne V. A la position B, un passager compterait 10 vagues par minute. Cependant, à la position A le bateau se déplace vers les vagues et l'observateur compterait un nombre plus élevé, peut être 12 par minute. A la position C, le bateau s'éloigne de la bouée et la fréquence apparente est seulement de 8 cycles par minute. La fréquence Doppler est la différence entre les fréquences émises et reçues.

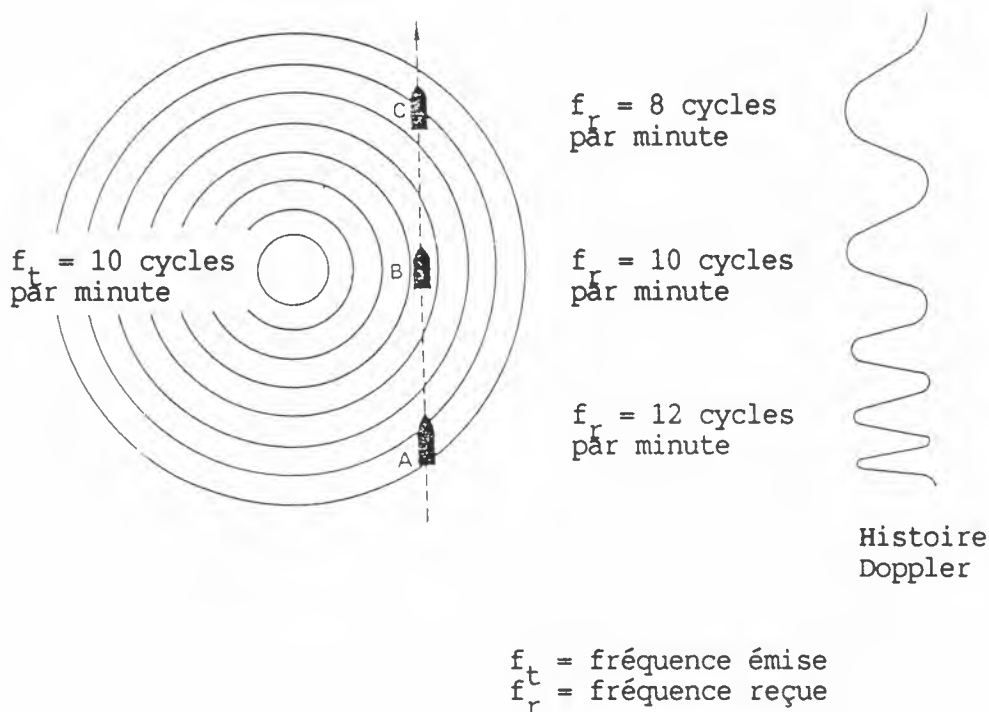


Fig.14: Fréquence Doppler (d'après GIB, 1971)

Lors du déplacement du bateau de la position **A** à la position **C**, l'enregistrement par l'observateur des variations du niveau de l'eau ressemblerait à la courbe de droite de la figure 14.

Considérons maintenant un avion émettant un signal radar et non plus une bouée. Le bateau correspondrait à un réflecteur ou cible se déplaçant relativement dans le faisceau illuminé par l'antenne lors du déplacement de l'avion. L'enregistrement des signaux rétrodiffusés par la cible et reçus serait analogue à celui obtenu par l'observateur dans le bateau. Un tel enregistrement s'appelle l'histoire Doppler des signaux de retour.

Lorsque le faisceau radar éclaire pour la première fois une cible ponctuelle, le signal rétrodiffusé présente un décalage Doppler négatif.

Lorsque le faisceau d'illumination est à l'aplomb de la cible, la fréquence Doppler est nulle. Enfin, lorsque le faisceau éclaire pour la dernière fois la cible, le signal rétrodiffusé a un décalage Doppler positif.

Par des moyens optiques et électroniques, l'histoire Doppler est habituellement emmagasinée pour être plus tard utilisée lors du traitement.

2.2 Traitement de données SAR

Le but du traitement SAR est de reconstruire la scène imagée à partir des nombreuses impulsions rétrodiffusées par chaque cible, reçues par l'antenne et enregistrées sur film ou numériquement.

Il existe deux façons de produire une image finale: soit directement sur film (traitement SAR optique), soit numériquement comme une séquence de pixels sur bande CCT ("Computer compatible tape"). L'image numérique finale peut alors faire l'objet d'un traitement postérieur, être rehaussée, classifiée, visualisée sur écran ou enregistrée sur film par un scanner électro-optique.

Lors du traitement numérique, il est possible d'obtenir des produits intermédiaires comme par exemple les données complexes qui conservent la phase. Ceci est utile pour la caractérisation de navires. Par contre, dans l'image SAR finale, l'information relative à la phase est perdue. Il est important de noter (Fig.15) que le pixel de l'image SAR finale n'a pas les mêmes dimensions que la cellule de résolution lors de l'acquisition des données puisque la résolution radiale sur le terrain varie avec l'angle d'incidence.

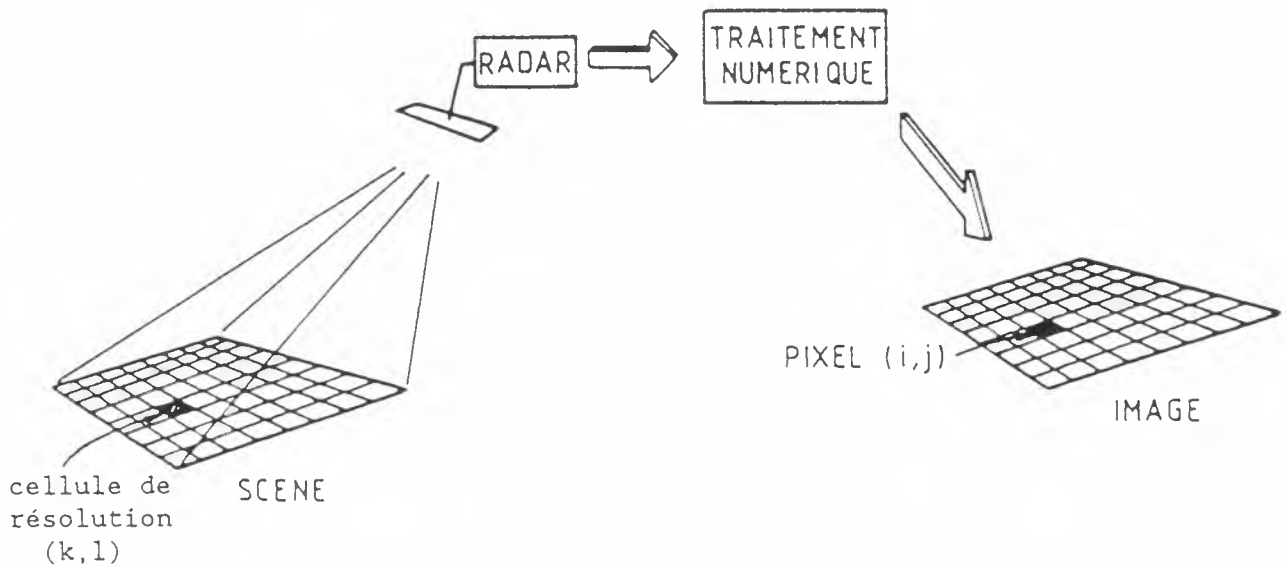


Fig.15: Correspondance entre une cellule de résolution (k,l) et le pixel associé (i,j) de l'image traitée

Le traitement SAR ("SAR processing") est une opération complexe. Au début des opérations de traitement, les échos rétrodiffusés sont emmagasinés par catégories d'intervalles de distance ("range gate"); au sein de chaque catégorie de distance, les signaux sont classés selon la fréquence Doppler. Des corrections sont ensuite appliquées à ce jeu de données en considérant entre autres la vitesse relative de la cible due, dans le cas d'un satellite, à la rotation de la terre et du capteur.

L'échantillonnage final consiste à corrélérer et focaliser les échos provenant de la même cible. Cette opération peut exiger un traitement informatique particulièrement long et complexe. Le résultat de la corrélation est une image numérique qui peut devenir un produit photographique après balayage par un système de restitution (scanner opto-électronique).

IV. ELEMENTS D'INTERPRETATION DES IMAGES RADAR

Les images des systèmes radar ont des caractéristiques bien différentes de celles des images de systèmes optiques (Landsat, SPOT ou photographies aériennes). En fait, ces caractéristiques découlent directement de la technique du radar imageur.

Ce chapitre se propose de décrire les notions essentielles sur les particularités des images radar. Ces caractéristiques peuvent être d'ordre radiométrique (le speckle, la texture) ou d'ordre géométrique (images en distance oblique, déformations). Durant l'analyse d'une image radar, il faut garder à l'esprit que, bien que l'image analysée se présente souvent sous la forme d'un produit photographique, en aucun cas il ne s'agit d'une image telle qu'aurait pu la voir un oeil humain. L'image radar traduit en niveaux de gris la capacité de la scène étudiée à renvoyer vers le radar imageur une partie des microondes qu'il a émises. Le résultat est souvent bien différent de ce qu'aurait pu voir notre oeil s'il avait été à la place du radar.

1. La radiométrie

Il est important de noter que:

- la dynamique de l'image peut parfois être réduite du fait d'un mauvais réglage du gain d'antenne pendant l'acquisition du signal (saturation ou excès de bruit);
- une focalisation satisfaisante de cibles ponctuelles dépend du contrôle de l'attitude de la plateforme et du traitement ultérieur des données.
- le traitement photographique influe également sur la qualité du produit final dans le cas d'un tirage-papier.

1.1 Le speckle (ou chatoiement)

Le coefficient de rétrodiffusion radar σ_0 diffère suivant les types de surface, ce qui se traduit^o par des tons de gris moyens différents d'un type de surface à un autre.

L'aspect clair et sombre des champs est un lissage effectué par notre oeil; un examen plus détaillé de l'image radar montre en effet qu'à l'intérieur d'un même type de surface, les tons de gris entre pixels voisins peuvent présenter d'importantes variations. Ces variations à l'échelle de la cellule de résolution créent une texture granulaire caractéristique des images radar. Il s'agit de l'effet de speckle, dû à la cohérence de l'onde radar: les cellules de résolution, qui correspondent à une cible étendue, contiennent chacune plusieurs éléments diffuseurs dont les réponses élémentaires, par interférences constructives ou destructives, donnent des tons de gris clairs ou sombres dans l'image radar.

Un exemple de présence de speckle est fourni par l'image radar de la Figure 29 correspondant à la zone agricole de Flevopolder (Pays-Bas).

Le speckle n'est donc pas le résultat d'une variabilité spatiale dans les propriétés physiques ou électromagnétiques de la surface illuminée par le radar. Par contre, si la résolution est suffisamment bonne, certaines parcelles peuvent présenter une texture autre que celle du speckle. C'est le cas par exemple de parcelles de forêt où l'effet de l'illumination radar des arbres juxtaposée à l'ombre radar de ces mêmes arbres crée une texture granulaire plus grossière que celle du speckle. Dans ce cas, il existe bien une variabilité spatiale dans les propriétés physiques ou électromagnétiques de la parcelle illuminée. Dans toute image radar, on peut donc rencontrer des parcelles où la seule texture présente est celle du speckle: on les appellera des parcelles "sans texture" (cible étendue homogène) par opposition aux parcelles "avec texture" qui présentent des variations spatiales autres que le speckle. L'étude des distributions statistiques du signal radar rétrodiffusé en fonction des caractéristiques du radar est donc possible pour les parcelles "sans texture" puisque cela revient à étudier les statistiques associées au speckle. Or ces statistiques sont parfaitement connues.

Le speckle peut être réduit par deux méthodes. La première méthode est la technique de la "multivue" ("multilook") pendant le traitement de l'image SAR, c'est à dire pendant l'élaboration de l'image. Cette technique consiste à prendre plusieurs vues ("looks") de la même surface en partageant le faisceau d'antenne en plusieurs secteurs; ces vues sont ensuite "moyennées" de façon à réduire les variations aléatoires des valeurs des pixels dues au speckle. On peut donc avoir des images 8 "looks" par exemple; plus le nombre de "looks" est important, plus le speckle disparaît. Toutefois, cette technique a l'inconvénient de dégrader la résolution spatiale de l'image; il faut donc faire un compromis entre la résolution spatiale que l'on souhaite obtenir et la quantité de speckle que l'on veut éliminer.

La deuxième méthode de réduction du speckle regroupe les techniques de filtrage du speckle: ce sont des techniques de post-traitement d'image, c'est à dire des techniques appliquées après que l'image ait été formée, contrairement à la méthode précédente. La technique la plus connue de filtrage du speckle est celle du filtre moyenne, mais elle produit une image "floue". C'est pourquoi ont été développés de nombreux filtres du speckle dont on peut trouver les principes dans la littérature scientifique (Référence Touzi, 1988).

1.2 Analyse d'image et texture

Des éléments d'interprétation d'images radar pour des études de ressources renouvelables ont été présentés par exemple dans "Applications of aerial photographs and other remote sensing imagery in forestry" (Stellingwerf et al, 1983) ainsi que dans "The use of Side-Looking Airborne Radar imagery for the production of a land use and vegetation study of Nigeria" (Allen, 1979).

Le radar permet d'obtenir une image de type photographique. Toutefois, il est important de toujours garder à l'esprit que l'imagerie radar traduit en niveaux de gris la capacité de la superficie à réfléchir des microondes. L'intensité du signal rétrodiffusé varie donc en fonction de la rugosité, des propriétés diélectriques des matériaux (roche, sol, végétation...) et de la pente du terrain. Il ne s'agit donc pas de réflexion de la radiation solaire visible ou proche infra-rouge comme dans le cas des photographies aériennes et de certaines bandes spectrales des satellites d'observation de la terre tels Landsat et SPOT.

Les paramètres suivants sont utilisés lors de l'interprétation d'imagerie radar:

- Tonalité
- Texture
- Forme
- Structure
- Taille.

Certains principes de photointerprétation peuvent être utilisés pour l'interprétation d'images radar et nous pouvons distinguer trois étapes principales:

- Lecture
Ceci correspond à la reconnaissance des limites en considérant les paramètres précédemment cités.
- Analyse
Il s'agit de la reconnaissance des éléments à l'intérieur des limites établies.
- Interprétation par déduction
Lors de cette phase, l'interprète utilise sa connaissance thématique et son expérience.

Allen (1979) a proposé les définitions suivantes:

Tonalité

La tonalité d'une image radar peut être définie comme l'intensité du signal rétrodiffusé. Les échos de forte intensité apparaissent en tonalités claires sur l'image, ceux de faible intensité en tonalités foncées. La Figure 16 illustre la relation entre rétrodiffusion vers l'antenne et tonalité sur l'image radar.

Forme

Il s'agit de la délimitation spatiale de l'objet. Certains éléments à forme caractéristique (routes, ponts, aéroports...) peuvent être identifiés par leur forme.

Structure

La structure est l'arrangement spatial des éléments texturaux.

Taille

Les dimensions d'un objet peuvent permettre une identification sur image radar. La taille sur l'image d'éléments connus permet une évaluation relative de l'échelle ou de la taille d'autres éléments.

Texture

La texture peut être définie comme l'aspect superficiel de la plus petite zone pouvant être individualisée sur une image, sans qu'un changement de caractère ne soit identifiable.

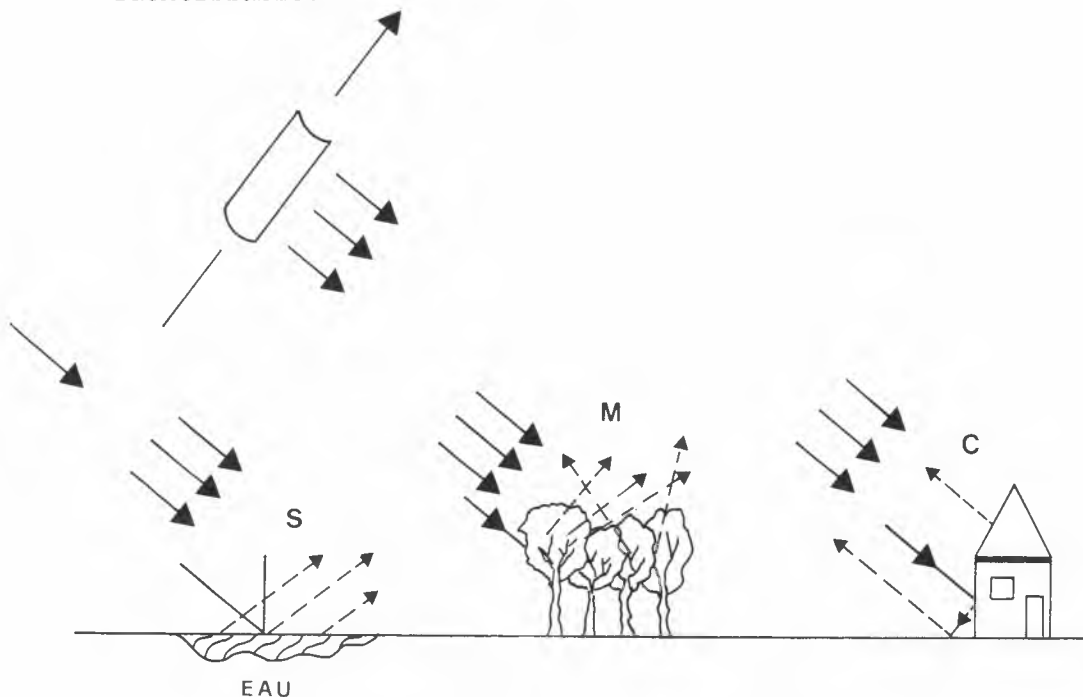


Fig.16: Relation entre tonalité sur image radar et rétrodiffusion de diverses cibles
(M = Moyenne, C = Claire, S = Sombre)

Le concept de texture de l'image radar a été décrit par Laur (1989). Avant d'aborder la spécificité de la texture dans l'image radar, il est nécessaire de définir le concept de cellule texturale: il s'agit de l'unité élémentaire de la texture, c'est à dire le plus petit élément homogène de même radiométrie constituant la texture. La texture correspond donc à la taille et à l'organisation des cellules texturales. Le nom de cellule texturale a été

choisi par analogie avec la cellule de résolution qui correspond à la dimension de la cellule discernable par le SAR (elle est fonction de la résolution transversale et azimutale du système).

Suivant la dimension de la cellule texturale par rapport à la cellule de résolution, la texture d'une image radar peut être scindée en trois composantes:

- la micro-texture, en fait le speckle, qui se présente sous la forme de grains dont la taille est celle de la cellule de résolution et dont la valeur est aléatoire. Ainsi que nous l'avons vu précédemment (Section IV.1.1), il s'agit d'une texture inhérente au système radar; elle ne correspond donc pas à une variation réelle d'une cellule de résolution à une autre. Le speckle dégrade la lisibilité de l'image radar. Toutefois, malgré cet inconvénient majeur, le speckle, lorsqu'il est totalement développé, a l'avantage important, de par sa nature même, d'être parfaitement caractérisable par diverses statistiques. Cet avantage peut être utilisé par les différentes méthodes de filtrage du speckle. Notons enin que la technique de la multivue ("Multilook") permet d'atténuer le rôle de cette micro-texture dans l'analyse de l'image radar.
- la meso-texture qui est dûe à la variation naturelle de la rétrodiffusion radar sur plusieurs cellules de résolution. Un exemple est celui de la forêt: la forte rétrodiffusion produite par la partie de l'arbre face au radar se juxtapose à l'ombre de la face opposée pour produire une texture granulaire dont le grain élémentaire s'étend sur plusieurs cellules de résolution (suivant la résolution spatiale du système). C'est cette composante de la texture générale qui permet réellement l'interprétation texturale de l'image radar; pour cette raison, cette composante est souvent appelée tout simplement texture. Il s'agit en fait d'un abus de langage car le terme texture intrinsèque aurait été mieux indiqué.

Cette convention de langage a notamment pour conséquence de nous amener à parler de "parcelle sans texture" lorsque la seule texture présente dans la parcelle est celle du speckle (totalement développé). Une telle zone sera dite homogène; c'est en particulier le cas des champs car aucune inhomogénéité spatiale n'y est habituellement présente, aux résolutions habituelles des SAR. Par contre, une "parcelle avec texture" contiendra des disparités de rétrodiffusion à laquelle viendra se superposer le speckle. Il peut alors s'agir de speckle totalement développé ou de speckle partiellement développé. Une telle zone sera généralement qualifiée d'inhomogène ou d'hétérogène. Il semble donc que lorsque l'on parle de texture dans l'image radar, ce soit en fait à une qualité essentielle de la texture que l'on se réfère, à savoir l'homogénéité.

- la macro-texture, qui correspond en fait aux différentes structures s'étendant sur de nombreuses cellules de résolution. Il peut s'agir par exemple des frontières de champs, des ombres de forêts, des routes ou des linéaments géologiques. La structure a donc une importance considérable de l'image radar, comme dans toute image de télédétection. C'est particulièrement le cas en géologie ou en océanographie. Les techniques habituellement utilisées pour la mettre en évidence relèvent plutôt de la détection de contours (Touzi, 1988).

Après la description des 3 composantes (speckle, texture et structure), quatre remarques importantes doivent être faites:

- le speckle, présent dans toute l'image, se superpose à la texture ou à la structure, d'où les difficultés rencontrées dans l'analyse texturale ou la détection de contours.
- la texture étant liée à la distribution spatiale des cellules de résolution, elle est indépendante de la qualité radiométrique de l'image radar. Il faut toutefois que la qualité radiométrique soit relativement constante dans les échantillons où sont faits les mesures texturales.
- les notions de texture et de structure sont très dépendantes de la résolution spatiale.
- le speckle peut totalement disparaître (au sens physique) si la résolution spatiale est suffisamment fine pour résoudre chacun des éléments diffuseurs de la scène.

Le Tableau 1 et la Figure 17 résument et illustrent les trois composantes de la texture de l'image radar.

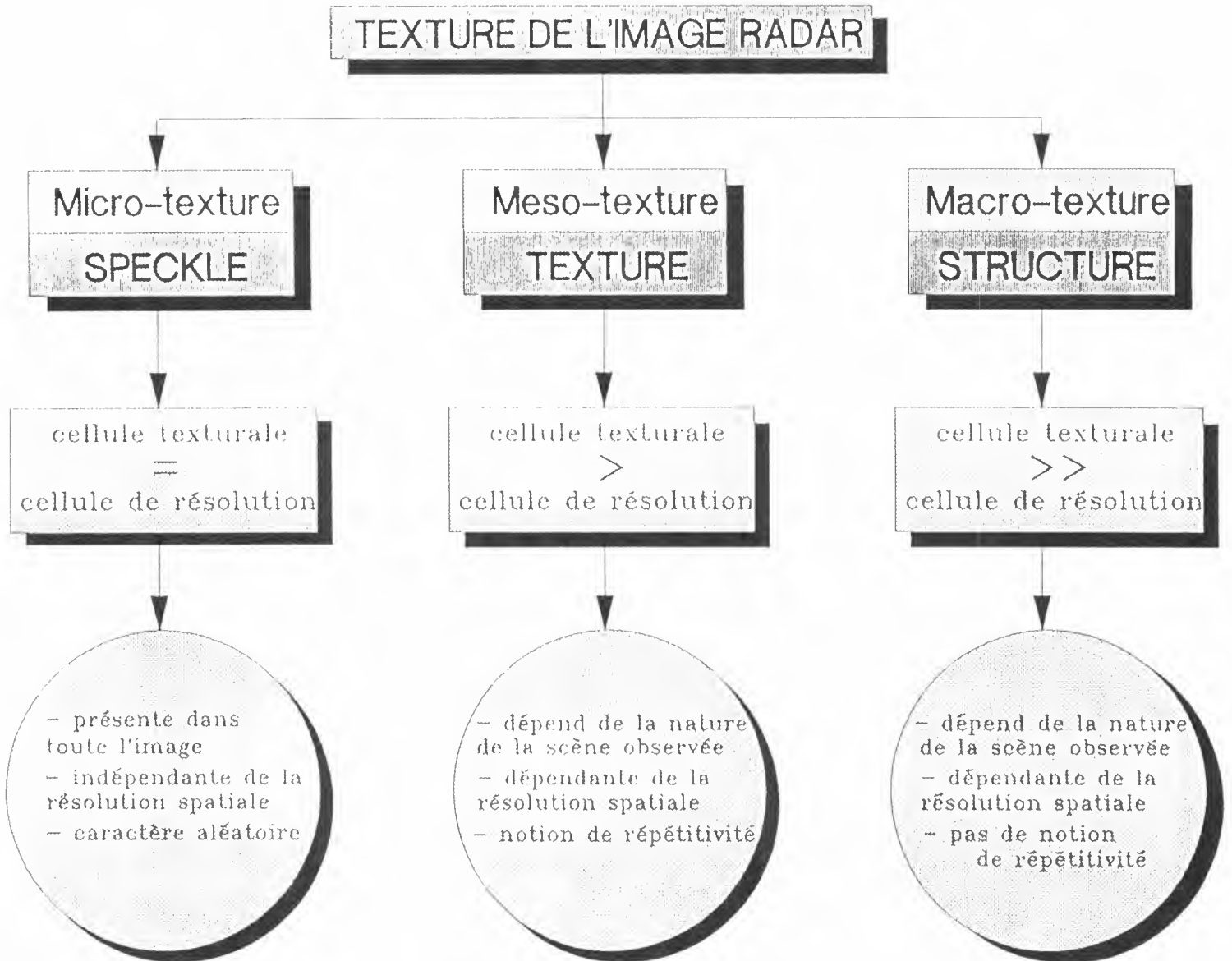


Tableau 1: Les 3 composantes de la texture d'une image radar
(Laur, 1989)

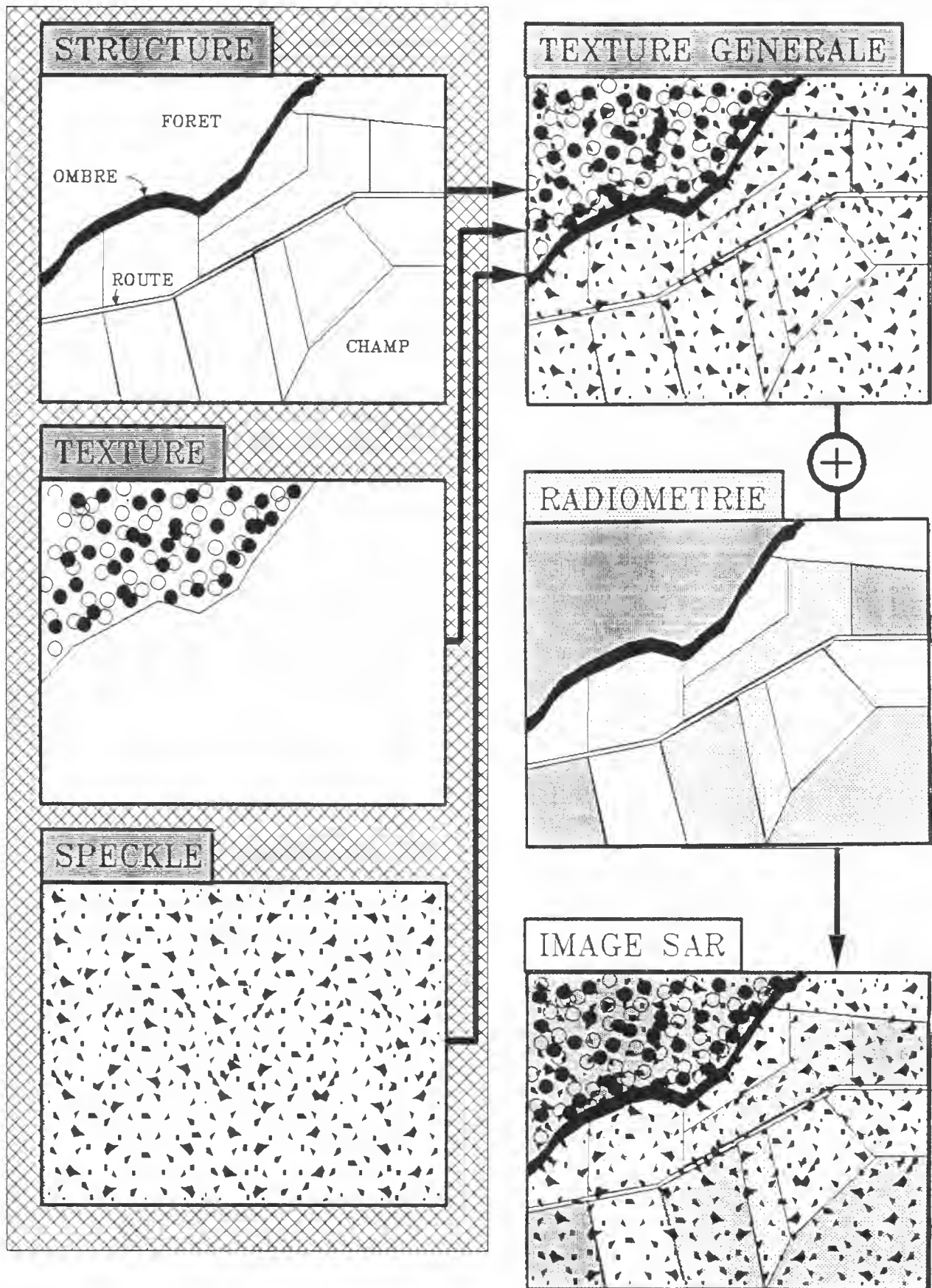


Fig.17: La combinaison des 3 composantes de la texture générale (structure, texture et speckle) avec l'information tonale forme l'image radar (Laur, 1989)

2. Géométrie de l'image

2.1 Les particularités de la géométrie de l'image

L'image radar a une géométrie qui découle du mode d'acquisition des données (Fig.18); le radar "voit" le terrain selon une ligne de perspective qui correspond à la ligne oblique reliant l'antenne à la cible. Les échos des impulsions émises sont enregistrés dans une séquence temporelle et fournissent la composante transversale de l'image ("across track"). La dimension longitudinale ("along track") résulte du déplacement de l'avion le long de la ligne de vol.

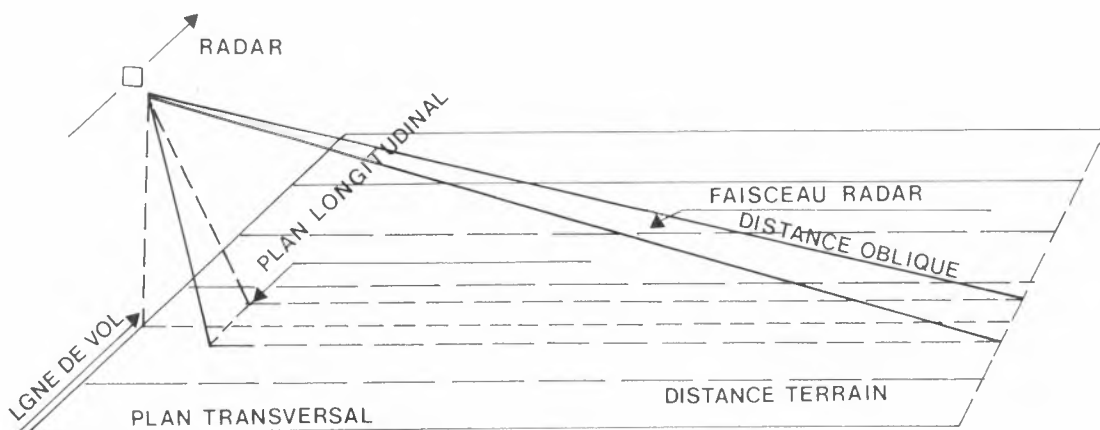


Fig.18: Configuration d'acquisition de données radar SLAR

La Figure 19 présente une comparaison géométrique entre les acquisitions de données radar SLAR et de photographies aériennes obliques.

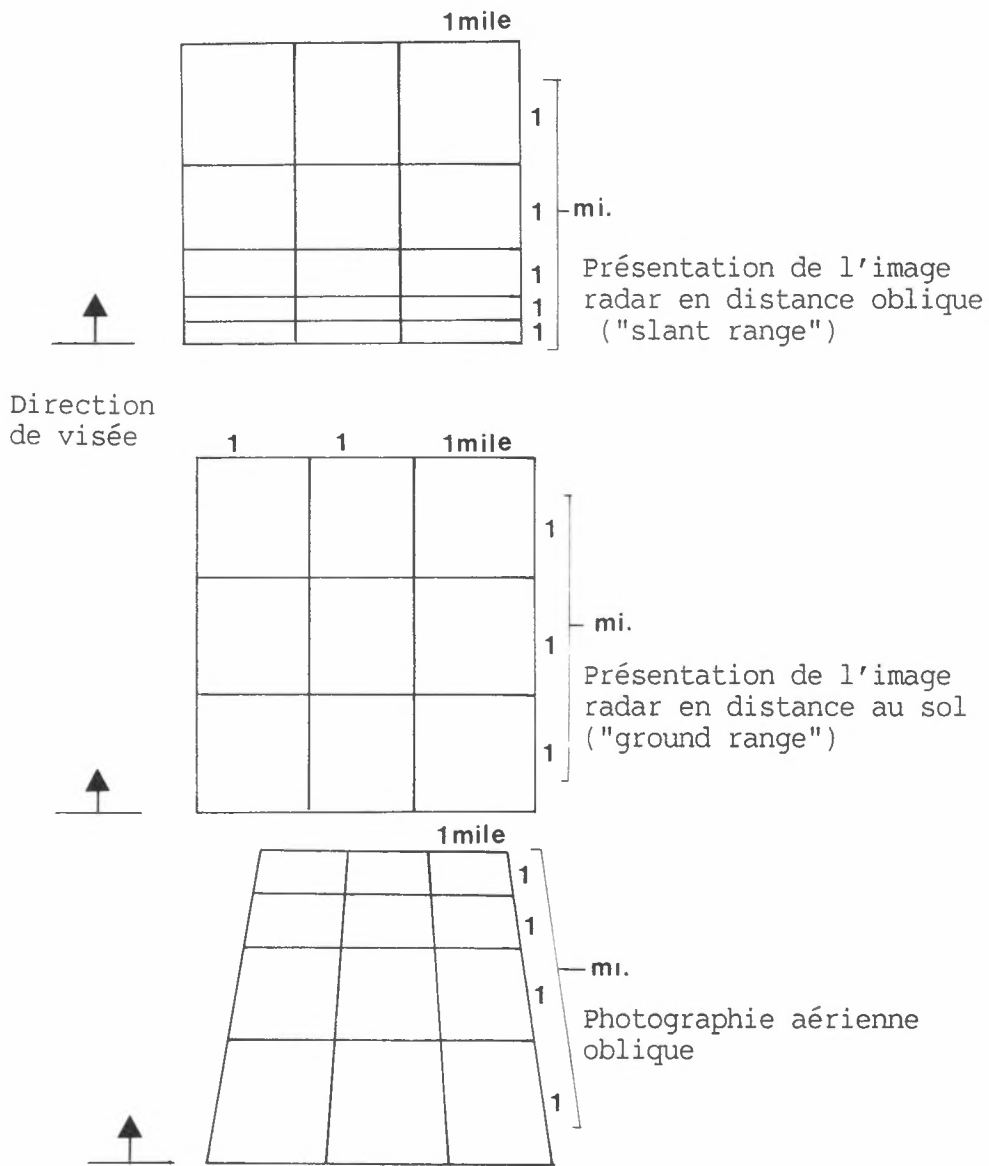


Fig.19: Géométrie d'image radar et de photographie aérienne oblique (d'après MacCoy, 1967)

Sur la Figure 20 sont représentés deux types de présentation des données radar :

- image en distance oblique ("slant range image"). Il s'agit de la distance entre le capteur et la cible étudiée.
- image en distance au sol ("ground range image"). Il s'agit cette fois-ci de la distance entre la trace au sol du capteur et la cible étudiée. Ce type d'image est aussi appelé image rapportée au terrain ("ground range image").

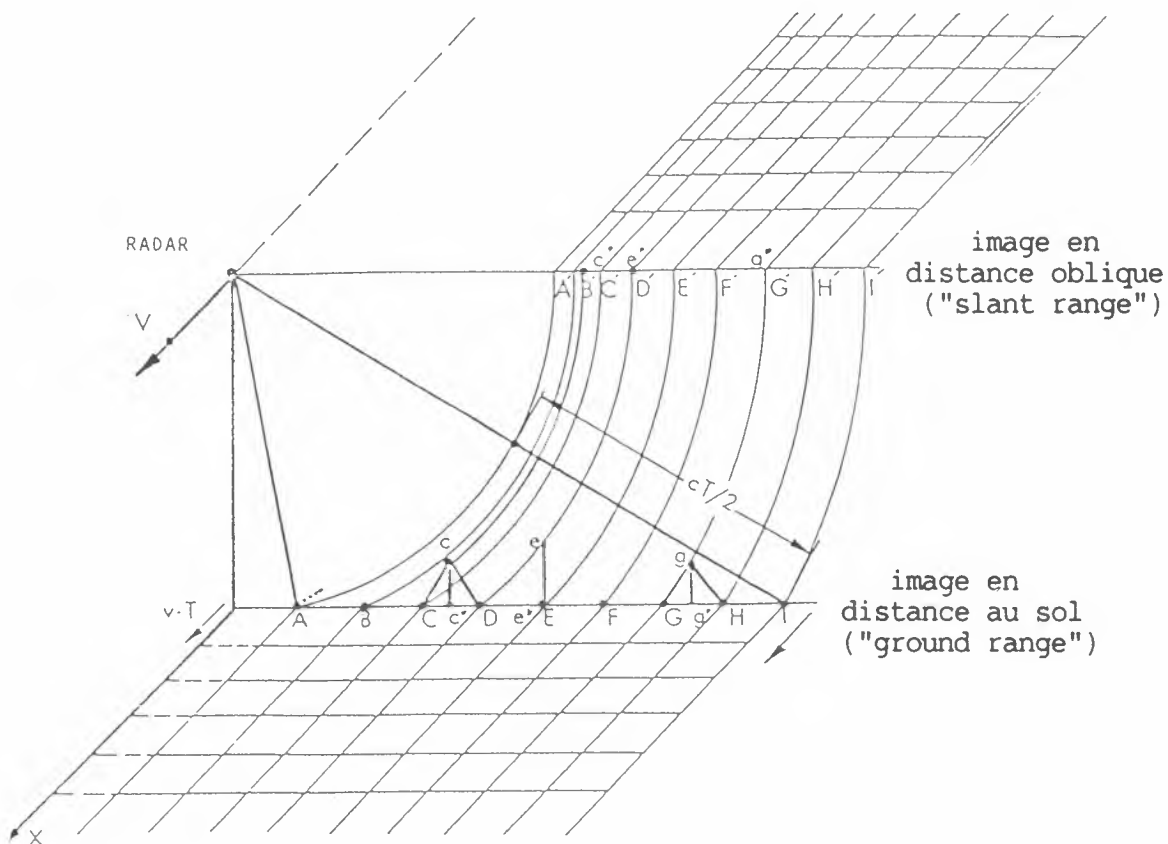


Fig.20: Deux modes de présentation des données radar

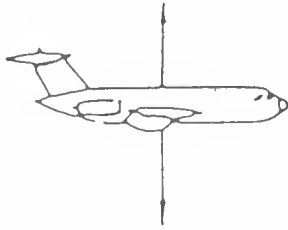
Parmi les distorsions géométriques présentes sur image radar SLAR, nous pouvons distinguer entre:

- **Distorsions dues à l'élévation du terrain** ("Elevation distortion").
Ce type de distorsion apparaît dans le cas des points situés à une élévation différente de l'élévation moyenne du terrain. (Voir les points c, e, g sur la Figure 20).
- **Distorsions dues à la distance** ("Range distortion")
Le radar mesure des distances obliques mais une image représentant correctement la superficie doit être rapportée au terrain ("ground range corrected").

En plus de ces distorsions inhérentes aux images radar, nous pouvons rencontrer cinq types de distorsion géométriques liées à la stabilité de l'avion (Ulaby, Moore, Fung, 1982):

1. Changement de vitesse
La vitesse de déroulement du film d'enregistrement n'est pas parfaitement synchronisée avec la vitesse de déplacement de l'avion. Ceci provoque un étirement non linéaire ("stretching") ou une compression dans le plan longitudinal.
2. Dérive dans le plan horizontal
Le balayage oblique qui s'en suit provoque une transformation des angles.
3. Lacet ("Yaw")
Ce phénomène de rotation dans le plan horizontal provoque localement des étirements ou compressions.
4. Tangage ("Pitch")
Le tangage, relèvement et/ou abaissement du nez de l'avion, crée un effet de défocalisation particulièrement visible dans le cas des cibles ponctuelles.
5. Roulis ("Roll")
Le roulis autour de l'axe longitudinal du fuselage provoque une modification du gain d'antenne pour différents points de l'image. De ce fait, les signaux rétrodiffusés par des surfaces réfléchissantes égales ne sont plus constants sur l'image; l'échelle des niveaux de gris peut en être modifiée.

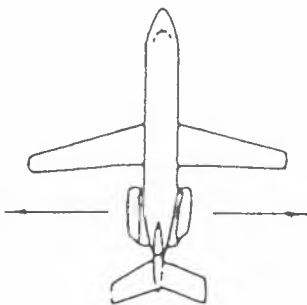
La Figure 21 présente les paramètres influençant l'acquisition de données aéroportées.



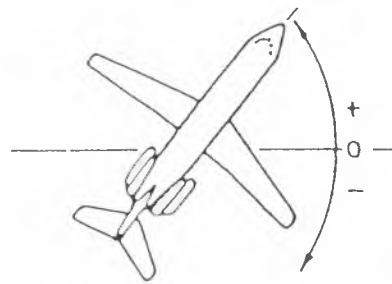
Variation d'altitude



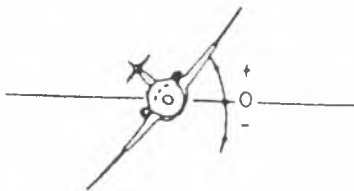
Tangage



Dérive



Lacet



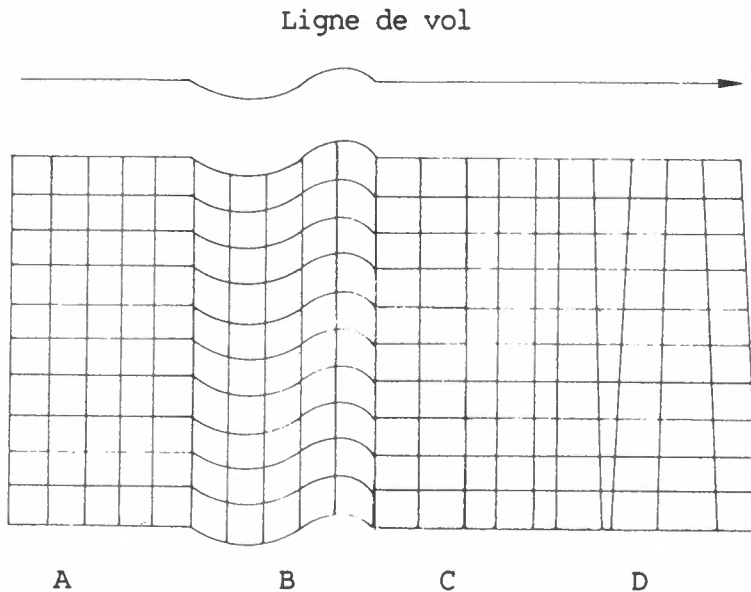
Roulis



Variation de vitesse

Fig.21: Paramètres influençant l'acquisition de données aéroportées (d'après ESRO)

La Figure 22 présente des exemples de distorsions de l'image radar liées au déplacement et variations d'attitude de l'avion.



- A: image idéale en distance au sol ("ground range")
- B: déviation transversale
- C: tangage ou changement de vitesse
- D: Lacet

Fig.22: Image radar sur grille carrée sans correction des variations de l'attitude de l'avion
(d'après Ulaby, Moore, Fung, 1982)

Les effets sur l'image des variations d'attitude de la plateforme peuvent être corrigés, par exemple en compensant les mouvements de l'antenne; de plus, il est possible de prendre en compte les différences entre les données d'attitude enregistrées à bord de la plateforme et les données de navigation INS ("Inertial Navigation System").

2.2 Rétrodiffusion et angle d'incidence local

Il s'agit d'extraire de l'image radar une information thématique utile concernant la surface terrestre. Il est donc important de comprendre le mode d'acquisition des données afin que, lors de l'analyse de l'image, l'influence de la surface terrestre soit clairement différenciée de l'influence de la configuration géométrique de la prise d'image.

La force de l'écho rétrodiffusé vers l'antenne dépend de l'angle de dépression (angle entre le plan horizontal et la ligne antenne/cible) et de l'angle d'incidence qui varie avec la topographie locale. (Fig.23) Une pente faisant face au faisceau aura une rétrodiffusion plus élevée qu'une pente située à l'opposé et apparaîtra donc sur l'image avec une tonalité plus claire.

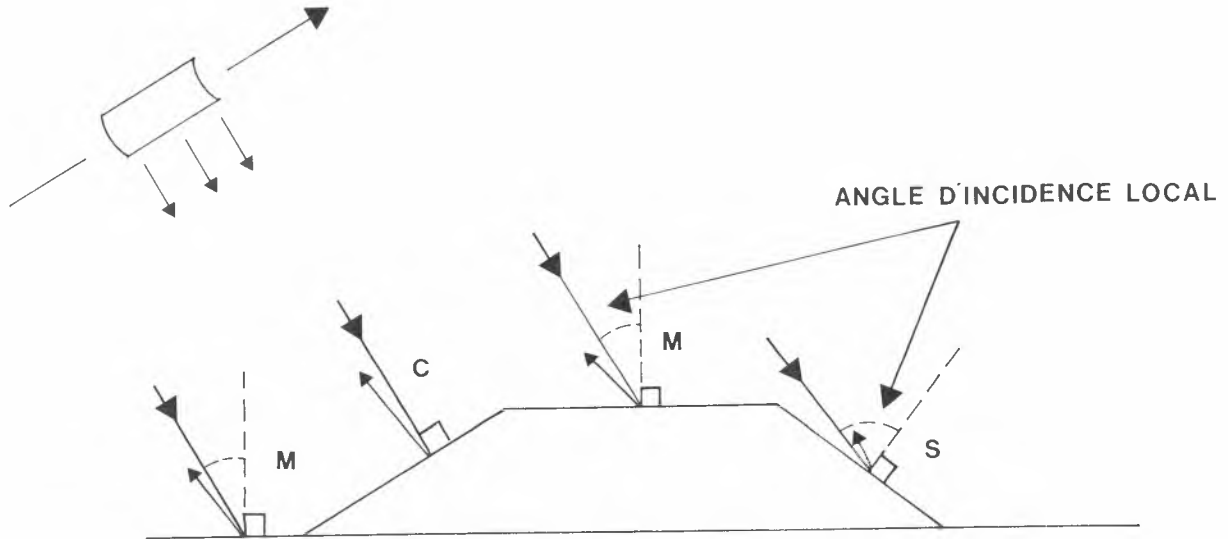


Fig.23: Relation sur image radar entre tonalité et angle d'incidence (M = Moyenne, C = Claire, S = Sombre)

2.3 Ombre portée ("shadowing"), déversement radar ("layover") et raccourcissement des distances ("foreshortening")

Des pentes ayant un angle plus abrupt que l'angle de dépression sont sujettes à des ombres portées. Il est à noter que les ombres radar d'objets de même taille sont plus importantes pour les points éloignés ("far range") que pour les points rapprochés ("near range") (Fig.24).

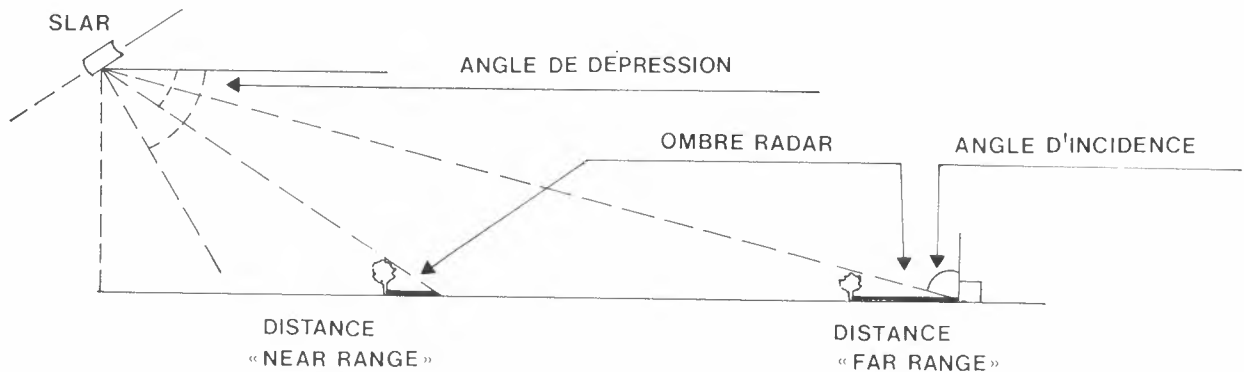


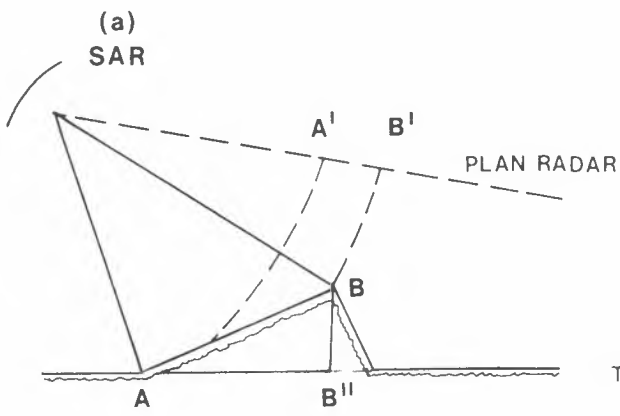
Fig.24: Relation sur image radar entre ombre et distance oblique (d'après Smit, 1978)

Du fait des ombres, l'imagerie radar SLAR peut parfois ressembler à une photographie aérienne acquise avec un angle bas d'élévation solaire; mais ces deux produits sont entièrement différents, et pas seulement en ce qui concerne les bandes spectrales utilisées. Si dans le cas des photographies aériennes une certaine information se trouve dans les zones d'ombre, dans le cas du radar il n'y a absolument aucune information dans les zones d'ombre, du fait de l'absence d'écho. Ce problème peut être résolu par une acquisition d'images radar selon des lignes de vol opposées, la deuxième ligne permettant de discerner des détails cachés dans l'ombre lors de la première ligne. Ces bandes sont généralement acquises de façon à avoir une superposition de 60%. Des bandes d'imagerie radar devraient de préférence être interprétées avec l'ombre vers l'utilisateur, i.e. avec l'illumination "provenant" de la partie supérieure gauche. Ceci permet d'éviter une fausse impression de vision en 3 dimensions rencontrée particulièrement dans le cas de terrains accidentés.

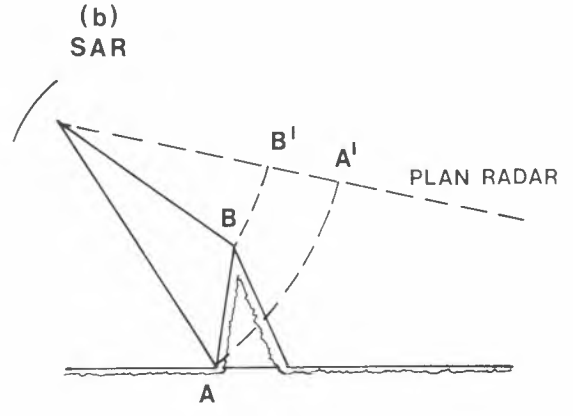
Sur une image radar, la présence d'ombres portées n'est pas le seul effet géométrique que provoquent des élévations différentes sur le terrain. Dans le cas d'une superficie parfaitement plane, les éléments les plus proches du point situé à la verticale du SAR réfléchiraient les impulsions radar avant les éléments plus distants. Séquentiellement dans le temps, seraient progressivement enregistrés les échos des éléments les plus proches ("near range") puis des plus distants ("far range"). Si un élément de la superficie est plus élevé que le voisinage, il interceptera le signal radar plus tôt et apparaîtra donc sur l'image radar comme étant plus proche.

La Figure 25-a montre comment ceci provoque un raccourcissement apparent des pentes inclinées vers le radar: la pente AB sur le terrain devient raccourcie sur l'image radar distance oblique en A'B'.

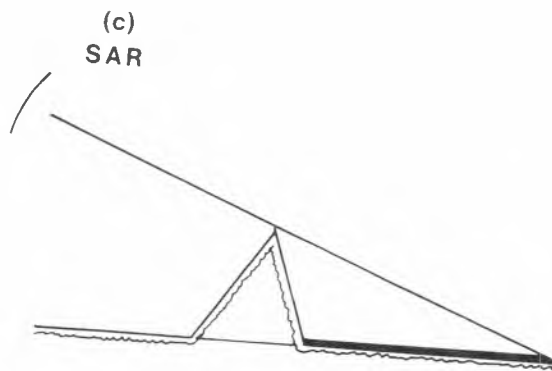
Pour des cas extrêmes de raccourcissement (Fig.25-b), la position des éléments de la superficie sur l'image radar en distance oblique est inversée par rapport à leur position sur le terrain: B' correspond à une distance oblique plus courte que A' alors qu'en réalité, A devrait être cartographié avant B pour une localisation correcte. Ce phénomène est le déversement radar ("layover"), aussi appelé basculement du relief.



Raccourcissement
des distances
 $A'B' < AB''$



Basculement
du relief



Ombre portée

Fig.25: Effet des variations locales de la topographie sur une image radar SAR

2.4 Géocodage d'images radar

Une description de méthodes de géocodage se trouve dans les publications du DIBAG (1987) ainsi que dans la Publication FAO/ESA RSC No 52 (1990).

Le principe d'un SAR à visée latérale est de mesurer le temps que met le signal électromagnétique émis pour atteindre l'objet et en revenir, afin de déterminer les distances obliques ("slant range"). Ce type de fonctionnement provoque plusieurs types de distorsions géométriques. En particulier, des distorsions sévères apparaissent si un terrain accidenté se trouve sur la zone imagée. L'ampleur des distorsions dépend de la géométrie spécifique de la visée latérale et des variations du relief sur la surface terrestre (Voir Section IV.2.3). Dans le cas de nombreuses applications, les distorsions provoquées par le terrain limitent l'utilité d'images SAR; elles peuvent même parfois empêcher l'extraction d'information des données acquises.

Le géocodage d'images SAR permet de corriger les distorsions géométriques en transformant la géométrie de l'image par rapport à une carte topographique de référence; en d'autres termes, géocoder une image consiste à introduire des distorsions sur l'image originale afin que la distribution spatiale des points sur l'image finale corresponde à leur distribution spatiale dans une projection cartographique donnée. Cependant, certaines distorsions radiométriques doivent être considérées comme une propriété inhérente des images SAR, même géocodées, et ne peuvent être corrigées. De plus, le rééchantillonnage de l'image dans la géométrie de la carte peut introduire des erreurs radiométriques additionnelles.

Pour toutes ces raisons, le thématicien a besoin d'information sur le contenu qu'il peut attendre des images géocodées pour une application spécifique. En outre, pour un contrôle effectif de la qualité des produits géocodés, une évaluation du contenu d'information de l'image géocodée par rapport à des éléments connus sur le terrain doit être réalisée.

La Figure 26 présente le principe de géocodage d'une image SAR.

La Figure 27 présente un système de géocodage de données SAR constitué à partir de trois bases de données:

- paramètres orbitaux
- données radar brutes
- base de données géographiques (Modèle Numérique de Terrain, Points de contrôle et paramètres de projection cartographique).

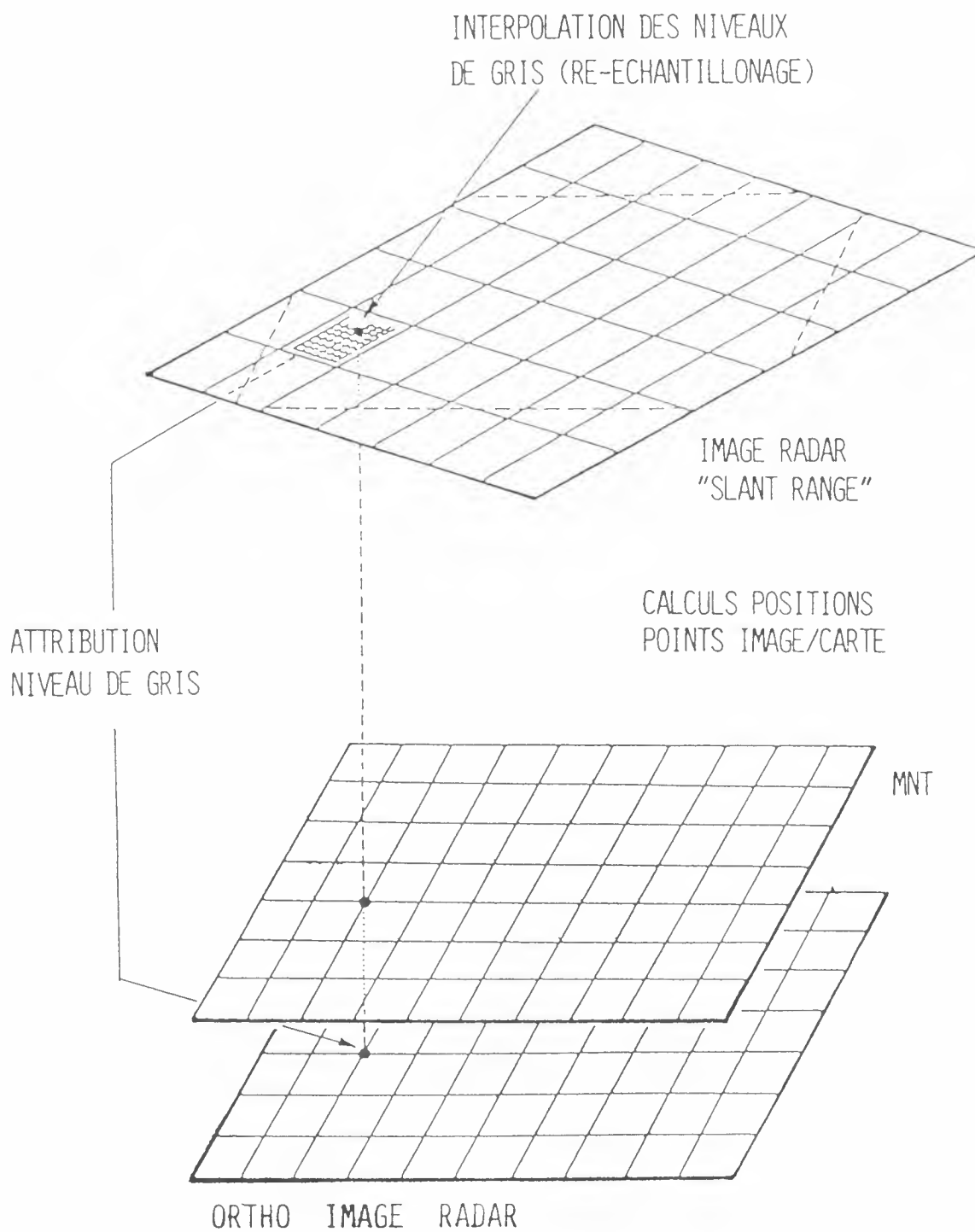


Fig.26: Principe de gécodage d'une image radar
(d'après DIBAG, 1990)

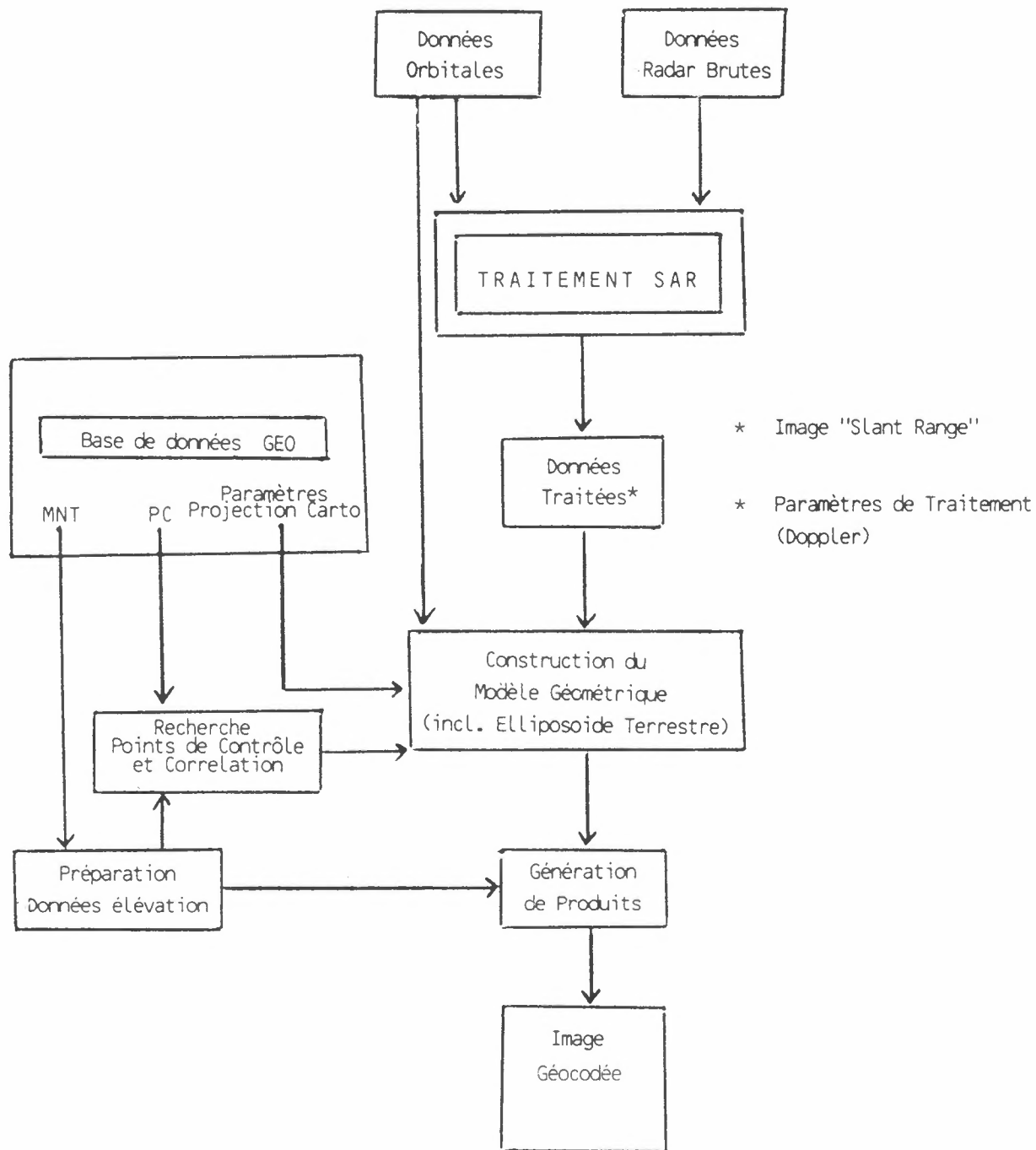


Fig.27: Système de correction topographique et de géocodage de données SAR (d'après Sowter et al. 1988)

Le raccourcissement des distances est l'effet prédominant sur les images SAR de zones montagneuses (Voir Section IV.2.3). Plus particulièrement dans le cas de capteurs orbitaux à angle de visée abrupte, les différences de distance oblique entre deux points situés sur une pente sont plus courtes qu'elles ne le seraient sur des zones planes. Ce phénomène provoque dans le plan transversal une compression de l'information radiométrique rétrodiffusée par les zones situées sur les pentes; cet effet doit être compensé lors du géocodage. Il faut noter que sur des données corrigées par rapport à un ellipsoïde de référence (altitudes de référence constante), les effets de raccourcissement des distances sont encore présents.

Si, dans le cas d'une pente très abrupte, les points d'une vallée ont une distance oblique plus grande que celle associée au sommet de la montagne, la pente est inversée dans l'image radar. Ce phénomène porte le nom de basculement du relief ("Layover") (Voir Section IV.2.2). En général, ces zones de basculement, opposées à l'illumination du radar, apparaissent plus brillantes sur l'image du fait du faible angle d'incidence local. De plus, l'information radiométrique dans une telle zone de basculement est le résultat de la superposition de la réponse de nombreux objets. Les ambiguïtés résultant de la représentation en un seul point sur l'image de plusieurs points sur le terrain ne peuvent être résolues par le géocodage; ces zones apparaissent brillantes également sur l'image géocodée.

Le sommet d'une montagne peut aussi provoquer un effet d'ombre ("Shadow") (Voir Section IV.2.3) avec une absence de rétrodiffusion de pentes abruptes non illuminées. Même si leur forme est correctement représentée par la correction du terrain, les régions d'ombre apparaissent sombres (signal de retour zéro), avec des niveaux de gris seulement provoqués par le système.

Il est à noter que le radar SAR ERS-1 (Voir ESA BR-36, 1989) détectera la surface terrestre avec un angle d'incidence de 23° . De ce fait, les images auront un effet d'ombre limité mais des effets de basculement et de raccourcissement accentués. Avec le fichier des données géocodées, il sera possible d'obtenir un fichier indiquant les zones de basculement.

La Figure 30 présente un exemple de géocodage dans le cas de la scène Seasat SAR de Genève (Suisse). En A, l'image radar en distance oblique présente de fortes distorsions géométriques, particulièrement évidentes dans la forme du lac. En B, cette même image est présentée après correction géométrique dans un système de coordonnées géographiques.

V. APPLICATIONS

1. Etudes forestières

Pour ce qui concerne la végétation, l'information obtenue par le radar est très différente de celle obtenue dans le visible et le proche infrarouge où la signature spectrale dépend de la couleur, de la teneur en chlorophylle et de la structure cellulaire. Le radar est plus sensible à la rugosité de la couche superficielle du couvert et à la structure de la plante et à l'humidité.

Pour des études forestières, un système d'interprétation d'images radar basé sur les éléments physiographiques a été proposé par Stellingwerf et al (ITC, 1983); l'imagerie radar aéroporté SLAR est un outil efficace de cartographie forestière. Si une bonne partie de la recherche sur les applications de l'imagerie radar a été effectuée en zones tempérées (Etats-Unis, Canada, Europe), les images SLAR ont été particulièrement utiles pour la cartographie forestière en zones tropicales, à un niveau de reconnaissance. Dans ces régions où les photographies aériennes conventionnelles sont particulièrement difficiles à acquérir du fait du couvert nuageux, l'imagerie radar aéroporté (Fig.31), malgré son coût kilométrique relativement élevé, est parfois la seule option. Une documentation précise existe notamment sur les projets Radam (Brésil), Proradam (Colombie), NIRAD (Nigeria). Le Tableau 2, préparé par Raney et al (1990) présente les résultats obtenus avec des données SAR aéroportées ou orbitales en forêts tropicales. Un travail de terrain est toutefois toujours nécessaire et, dans le cas des régions tempérées, l'imagerie radar ne peut substituer les photographies aériennes détaillées pour l'identification des espèces forestières.

Si les images radar sont souvent moins détaillées que les photographies aériennes, les futures images SAR orbitales seront associées à des échelles de travail de l'ordre de 1:50 000 ou 1: 100 000. Même en ne tenant pas compte des problèmes d'acquisition d'images et de volume de données à traiter, les images radar orbitales ne pourront donc pas être utilisées pour une cartographie globale de la végétation, comme c'est le cas des données NOAA-AVHRR. Par contre, les images radar orbitales pourraient être fort utiles pour le suivi de la déforestation dans des zones soumises à une forte pression ou pour le suivi de zones d'échantillonnage.

DOMAINE D'APPLICATIONS	REGION	BANDE	RESOLUTION
Détection de routes	Sarawak,	X	6 m
	Malaisie Péninsulaire,	X	6 m
	(Cameroun ¹ Belize	L L,P,C ²	40 m 10 m
Inventaire forestier	Malaisie Péninsulaire,	X	6 m
	(Nigeria	X	> 30 m)
	(Colombie	K _a ,X,L	10-22,16,40 m)
Détection de zones défrichées	Cameroun	L	40 m
	Venezuela	L	40 m
	Indonésie	L	40 m
	Brésil	L	40 m
	Colombie	K _a ,X,L	10-22,16,40 m
	Costa Rica	X ^a	6 m
	Belize	L,P,C	10 m
Repousse après défrichage	Cameroun	L	40 m
	Venezuela	L	40 m
	Indonésie	L	40 m
	Costa Rica	X	6 m
Colonisation	Nigeria	X	30 m
	Paraguay	L	40 m
	Indonésie	L	40 m
	Sarawak	X	6 m
	Colombie	X	6,12 m
Implantation d'agriculture	Paraguay	L	40 m
	Sarawak	X	6 m
	Malaisie Péninsulaire	X	6 m
	Colombie	X	6,12 m
Plantations d'arbres	Guatemala	K _a	10-22 m
	Indonésie	L ^a	40 m
	Australie	X	6 m
	Congo	X	6 m
	Malaisie Péninsulaire	X	6 m
	Belize	L,P,(C)	10 m

DOMAINE D'APPLICATIONS	REGION	BANDE	RESOLUTION
Forêts de mangroves	Indonésie	X,L	40 m
	Panama	K	
	Sarawak	X ^a	6 m
	Australie	X	12 m
	(Bangladesh (Florida	L L	16-33 m) 25 m)
Inondations	Bangladesh	L	28 m
	Australie	L	40 m
	Indonésie	L	28 m
	Guatemala	L	25 m
	Colombie	X	6,12 m
	Indonésie	L	20-30 m
Drainage	Nigeria	X	> 30 m
	Colombie	K,X,L	10-22,16,40 m
	Brésil	X ^a ,L	16,40 m
	Cameroun	L	40 m
	Sarawak	X	6 m
Classes de végétation	Brésil	X	16 m
	Nicaragua	K	10-20 m
	Togo	K ^a	> 20 m
	Nigeria	X ^a	30 m
	Colombie	X	10-22 m
	Colombie	K,X,L	10-22,16,40 m
	Colombie	X ^a	6,12 m
	Australie	X	6 m
	Indonésie, Borneo (Brésil	L X	20-30 m 16 m)

Note:

1. Les études entre parenthèses font état d'observations négatives pour l'application considérée.
2. Succès partiel dépendant des conditions locales.
3. Longueurs d'onde
 $K = 1\text{ cm}$ $X = 3\text{ cm}$ $C = 6\text{ cm}$ $S = 10\text{ cm}$
 $L^a = 23\text{ cm}$ $P = 68\text{ cm}$

Tab.2: Utilisation de données SAR en forêts tropicales, résultats résumés (d'après Raney, Dams, Werle, 1990)

2. Cartographie de l'utilisation du sol

Les images radar permettent de différencier des types d'utilisation du sol (zones urbaines, zones agricoles, forêts, étendues d'eau) notamment du fait de la diversité de la rugosité de la superficie. De plus, dans la région des microondes, la réponse des objets est très affectée par la teneur en eau, et beaucoup moins par les propriétés chimiques de la cible.

Pour la cartographie des cultures l'idéal est de pouvoir adopter une approche multitemporelle, multifréquence (Bandes L, C ou X) et multipolarisation (horizontale, verticale ou croisée). Une telle approche peut permettre d'améliorer la séparation des cultures liée à des paramètres tels que la hauteur de la plante, la géométrie de la plante et des feuilles, la direction des lignes de semis. La campagne européenne SAR 580, menée par l'Agence Spatiale Européenne et le Centre de Recherches d'Ispra aborde ces aspects (Référence ESA TM-01, 1988).

En 1988 et 1989, le Centre de Télédétection de la FAO et l'ESA ont exécuté en Tunisie deux études pilote, en collaboration avec le Ministère de l'Agriculture, dans le cadre de la préparation du lancement du satellite ERS-1. Ces études avaient pour objectif d'évaluer l'utilité d'images SAR pour la cartographie de l'utilisation du sol.

Une des zones-test choisies était la région semi-aride de M'Saken, en Tunisie Centrale, qui a un relief légèrement ondulé et où se trouvent des plantations d'oliviers, des céréales et des cultures maraîchères en bordure de rivières. Des données optiques (Landsat MSS de 1978 et 1981, Landsat TM de 1986 et SPOT de 1987) ont été comparées à des données microondes (Seasat de 1978 et SIR-A de 1981). Une superposition d'image à image a été effectuée, en prenant comme référence les données Seasat avec 25 mètres de résolution. L'interprétation visuelle fut effectuée sur des tirages papier à l'échelle du 1:100 000; elle permit une classification de l'utilisation du sol, avec d'intéressantes observations sur l'humidité du sol et la topographie locale. Des talus de conservation de l'eau et du sol d'une hauteur de 30 cm (donc d'une taille inférieure au pixel) furent identifiés sur les données Seasat; ces talus avaient une orientation perpendiculaire à la direction d'illumination du radar. Des classifications par maximum de vraisemblance furent ensuite réalisées avec ou sans intégration de données SAR. La précision de classification fut vérifiée en utilisant une photographie aérienne numérisée; cependant, l'intégration des données SAR ne provoqua aucune amélioration significative du résultat (Références Rebillard 1985 et FAO/ESA RSC No 51, 1989).

Une deuxième zone-test fut choisie à Grombalia, dans la péninsule du Cap Bon, au Nord Est de la Tunisie. Une agriculture intensive est présente, avec des agrumes irrigués, des cultures maraîchères, de la vigne et des céréales. Des données optiques (Landsat MSS de 1978, Landsat TM et SPOT de 1988) ont été comparées à des données microondes (Seasat de 1978). Un Modèle Numérique de Terrain fut produit à partir des cartes topographiques existantes au 1: 50 000, et ensuite utilisé pour le géocodage des données

satellites dans la Projection Lambert utilisée en Tunisie. Comme dans le cas de M'Saken précédemment exposé, l'interprétation visuelle fournit de bons résultats pour ce qui concerne la structure foncière, la délimitation des plantations d'agrumes, la caractérisation de la topographie, l'identification des zones urbaines. Mais dans le cas des zones montagneuses, la cartographie de la végétation à partir de données radar présenta de fortes limitations, même après géocodage (Référence FAO/ESA RSC No 52, 1990).

La Figure 33 présente une composition colorée optique-microonde de la zone de Grombalia, avec les associations de couleurs suivantes:

- Rouge = Landsat TM 4 (Proche Infra-rouge)
- Vert = Landsat $\frac{TM 2 + TM 3}{2}$ (Composante panchromatique)
- Bleu = Seasat SAR
(Composante liée à la rugosité superficielle)

Ce type de composition colorée permet d'intégrer l'information sur la rugosité superficielle (fournie par le radar) à l'information sur la végétation (fournie par les bandes visible et proche infra-rouge); il est donc possible d'améliorer la séparation des cultures, notamment entre cultures fruitières et cultures basses, et de mieux caractériser l'état de préparation des sols.

Les deux études réalisées en Tunisie permirent d'observer une amélioration substantielle de l'interprétation visuelle en utilisant un jeu combiné de données optiques et microondes. Il fut également montré que le radar ne doit pas être considéré uniquement comme un substitut aux capteurs optiques pour des zones couvertes de nuages. En effet, le radar fournit une contribution utile à la cartographie de zones arides, notamment du fait de sa sensibilité à la rugosité et à l'humidité du terrain. Par contre, il ne fut pas obtenu une amélioration significative de la précision des résultats du traitement numérique. Deux raisons peuvent être invoquées:

- nécessité dans certains cas d'améliorer la précision de la superposition des données.
- nécessité d'un filtrage approprié des données SAR avant classification statistique.

Lors d'un Atelier de Travail, une autre étude de cartographie de l'occupation du sol a été exécutée par l'ESA en 1990 dans le Sud de la Thaïlande (Référence Bulletin Observation de la Terre No 31, 1990). La zone test, située près de la ville de Songkla, a une activité économique surtout liée aux plantations de riz et de palmiers.

Les images SPOT utilisées furent géocodées dans la projection cartographique UTM. Les données SIR-A furent numérisées à partir d'un film photographique puis rééchantillonnées de façon à obtenir une taille de pixel de 20 mètres. Des données SAR non filtrées furent comparées à des données SAR après double filtrage EPS (Filtre de type passe-bas conservant les bordures).

Une composition colorée fut réalisée à partir de la bande 3 du SPOT (en rouge), de l'image SAR filtrée (en vert) et de la bande 1 du SPOT (en bleu). Il est intéressant de noter que sur cette composition

colorée, les nuages, provenant de l'image SPOT, sont associés à des couleurs différentes selon qu'ils sont situés au dessus de palmiers (blanc) ou de champs de riz et de marécages (magenta). Ceci est lié à l'information fournie par le radar, capteur tout-temps:

blanc = surface rugueuse, i.e. végétation haute;
magenta = surface lisse, i.e. champs de riz.

Une classification numérique supervisée fut ensuite exécutée en tenant compte des zones couvertes de nuages, à l'ombre des nuages ou sans nuages. Sur l'image classifiée résultante, l'influence des nuages avait disparu; cette méthode permit ainsi de mettre à profit une image SPOT partiellement couverte de nuages pour cartographier l'utilisation du sol.

3. Géologie et géomorphologie

Les images radar sont utiles pour la détection et la cartographie de linéaments; pour cet objectif, des images de la même zone à angle de vue différents sont particulièrement utiles. Les réseaux de drainage apparaissent généralement assez clairement sur les images SAR où se note également un effet de rehaussement de la topographie: ceci permet donc une bonne caractérisation de la géomorphologie de la région étudiée.

La Figure 34 illustre les capacités de pénétration du radar en permettant une comparaison, pour les pentes du Sud du Hoggar (Algérie) entre:

- Image Caméra Métrique (Spacelab-1 de l'ESA, Novembre 1983)
- Image SAR du SIR-A (1982).

Sur l'image supérieure de la Caméra Métrique apparaît à droite une formation rocheuse nettement érodée et à gauche une plaine couverte de sable. Il est intéressant de remarquer sur l'image inférieure du SIR-A que, grâce à la capacité du radar de pénétrer la couche de sable sec, des détails de structure des formations rocheuses sub-superficielles apparaissent.

4. Hydrologie

L'utilisation de la télédétection microonde de l'humidité du sol pour la modélisation hydrologique a été abordée par Engman (1990).

Dans le cas des sols, les mesures effectuées dans la région microonde du spectre électromagnétique ont une forte sensibilité à l'humidité de la couche superficielle; c'est pourquoi les microondes actives et passives sont utilisées pour détecter l'humidité du sol. L'humidité du sol est caractérisée par une très forte variabilité spatiale et temporelle qui résulte de la non homogénéité des propriétés du sol, de la couverture végétale et des différences de pluviométrie. Les mesures effectuées sur le terrain ne sont généralement valables qu'à un niveau ponctuel et difficilement extrapolables.

En général, il est difficile de séparer sur données radar les composantes rétrodiffusées liées à la rugosité, à la couche de végétation ou à l'humidité du sol. Cependant pour un suivi à court terme, le changement dû à la rugosité est inférieur et parfois négligeable par rapport à la variation d'humidité. Il faut cependant noter qu'une information indirecte sur l'humidité du sol peut être acquise dans d'autres régions du spectre électromagnétique (visible, infrarouge moyen et thermique...) que dans la région microonde.

De ce fait, il est important de définir des méthodes de quantification de la variabilité spatiale de l'humidité du sol afin de déterminer des unités hydrologiques. Il est également utile d'établir des cartes d'humidité du sol à un niveau global ou continental, avec une fréquence élevée. Ce type d'information peut ensuite être utilisé comme donnée d'entrée dans des modèles météorologiques; la vision synoptique qu'offre la télédétection satellitaire est donc un avantage pour ce type d'application.

5. Océanographie et études de zones côtières

Les images SAR du Seasat ont été utiles pour des études concernant par exemple la détermination de la direction des vagues et de la longueur des vagues, la détection des bateaux et la mesure de leur vitesse. Les diffusiomètres et altimètres permettent de mesurer la hauteur et la longueur des vagues, la direction et la vitesse du vent, informations utiles pour la navigation maritime.

Dans la zone arctique, des images radar ont été utilisées pour détecter et suivre le déplacement des icebergs ou caractériser l'état de la glace. Ce type d'application permettant d'optimiser les déplacements des brise-glace a été à l'origine du projet canadien Radarsat. Il est également possible sur des données radar de détecter indirectement des rochers immergés ou des bancs de sable, dans la mesure où ils provoquent des courants marins superficiels.

6. Surveillance de l'environnement

Un exemple d'utilisation de données radar aéroportées SAR 580 (Bandes L et X) a été fourni en 1979 par Lowry et al pour la caractérisation de l'étendue d'inondations dans la vallée de la Red River (Manitoba, Canada), avec des résultats satisfaisants. Une mosaïque d'images radar fut produite puis transférée d'abord sur des cartes au 1: 50 000, ensuite sur des cartes au 1:250 000 et 1:500 000; ceci permit de préciser l'étendue maximum des crues. Il est à noter que les données optiques, aériennes ou spatiales, sont difficilement utilisables au plus fort des inondations du fait de la couverture nuageuse.

La détection de la pollution marine par hydrocarbure est un autre domaine prometteur d'utilisation de données radar pour la protection de l'environnement. La possibilité de détection de zones polluées s'explique par le fait que la présence d'hydrocarbures modifie la rugosité superficielle de la mer et donc la réponse du radar, particulièrement sensible à ce paramètre. Cet aspect est illustré par l'image Seasat de la zone de Pantelleria (Sud de l'Italie) acquise le 19/8/1978 (ESA-JRC Imaging Radar Applications in Europe, 1988).

V. CONCLUSIONS

L'imagerie provenant de radars aéroportés a déjà démontré son utilité pour les études de ressources renouvelables dans les pays en voie de développement situés en zone équatoriale ou tropicale (Panama, Brésil, Nigeria, Colombie, Indonésie). Suite aux missions expérimentales de courte durée Seasat (1978), SIR-A (1981) et SIR-B (1984), une base de données orbitales radar est disponible en bande L.

En Europe, les campagnes aéroportées SAR 580 Agrisar et Agriscatt ont fourni des résultats encourageants. En 1991 sera lancé par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) le satellite ERS-1; il s'agira de la première mission spatiale de longue durée comportant un radar imageur, continuée par ERS-2 (Voir Annexe 3).

Il est également à noter que les missions JERS-1 (Japon) et RADARSAT (Canada) sont en préparation, avec des lancements respectifs prévus pour 1992 et 1994. Ces deux satellites seront équipés de radar imageur. Il apparaît donc qu'au cours des prochaines années, une plus grande quantité de données radar orbitales sera disponible. Toutefois pour l'utilisateur, l'important n'est pas la quantité de données analogiques ou numériques disponibles mais le contenu d'information qui peut être extrait des images de satellite et utile pour les études de ressources terrestres.

Pour extraire cette information thématique, il importe donc de développer des outils opérationnels de traitement d'image dans les domaines par exemple du filtrage, de la segmentation, de l'analyse de texture des données SAR et également de l'analyse combinée de données microondes et optiques. Un autre point important avec lequel la communauté d'utilisateurs devra se familiariser est le géocodage des données SAR. Le géocodage requiert en zone de collines et de montagnes le recours à un Modèle Numérique de Terrain, avec donc des coûts de production élevés. En zone plane des résultats thématiques satisfaisants peuvent être obtenus dans le cadre d'une superposition d'image à image optique/microonde. La contribution des microondes pour l'étude des paramètres physiques de la superficie est particulièrement intéressante. Pour des études détaillées, l'intégration de données radar et d'autres données satellitaires à des systèmes d'informations géographiques semble prometteuse.

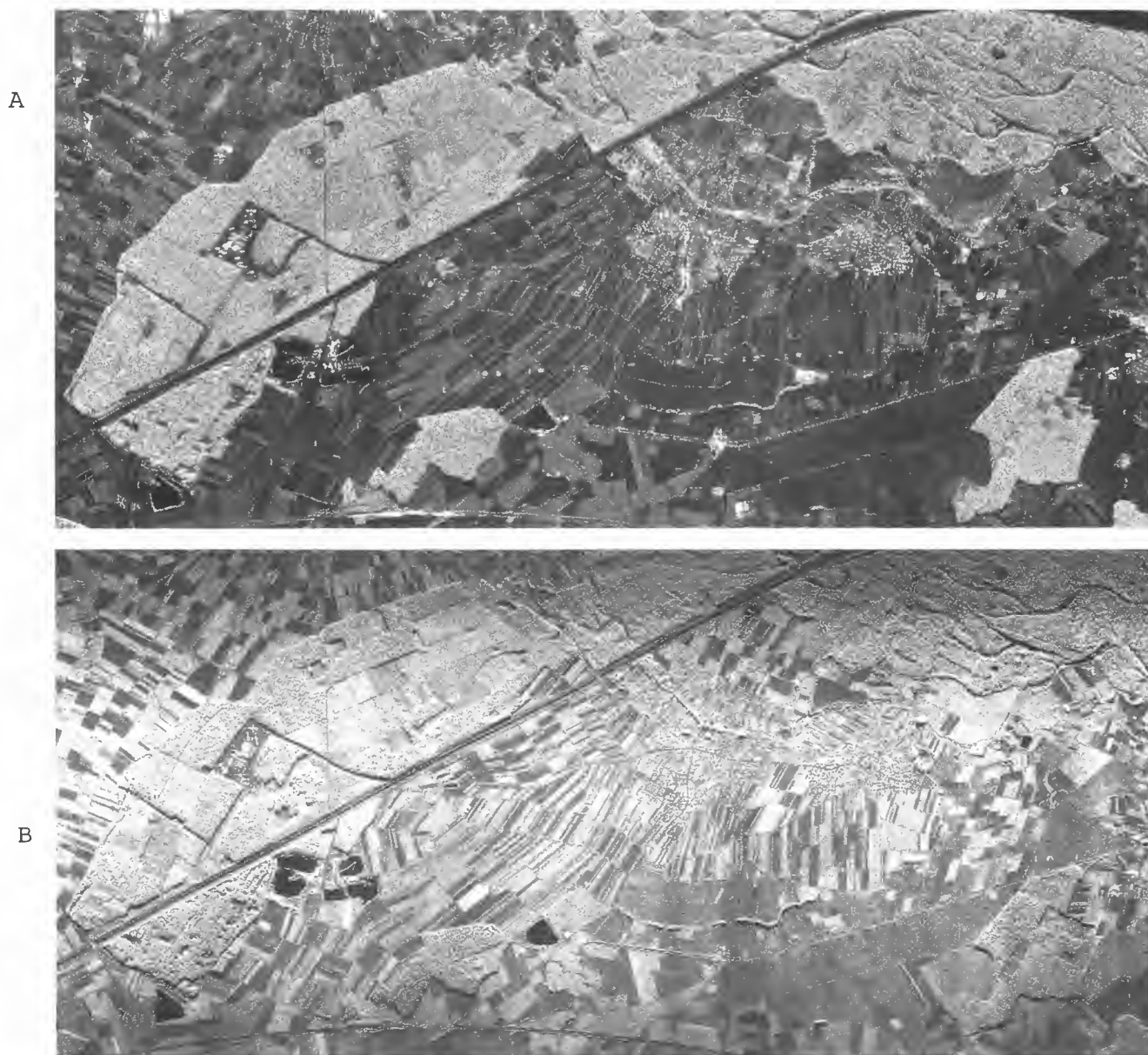


Fig.28: Influence de la longueur d'onde utilisée
Images SAR 580, polarisation HH du 12/7/1984
A. Bande L B. Bande X
(Sieber et Noack, 1986)



Fig.29: Exemple de speckle sur image radar
Zone agricole de Flevopolder (Pays-Bas)
Image de SAR aéroporté, 6.4 km X 6.4 km
SAR 580, 28 Août 1978, Traitement 3 looks

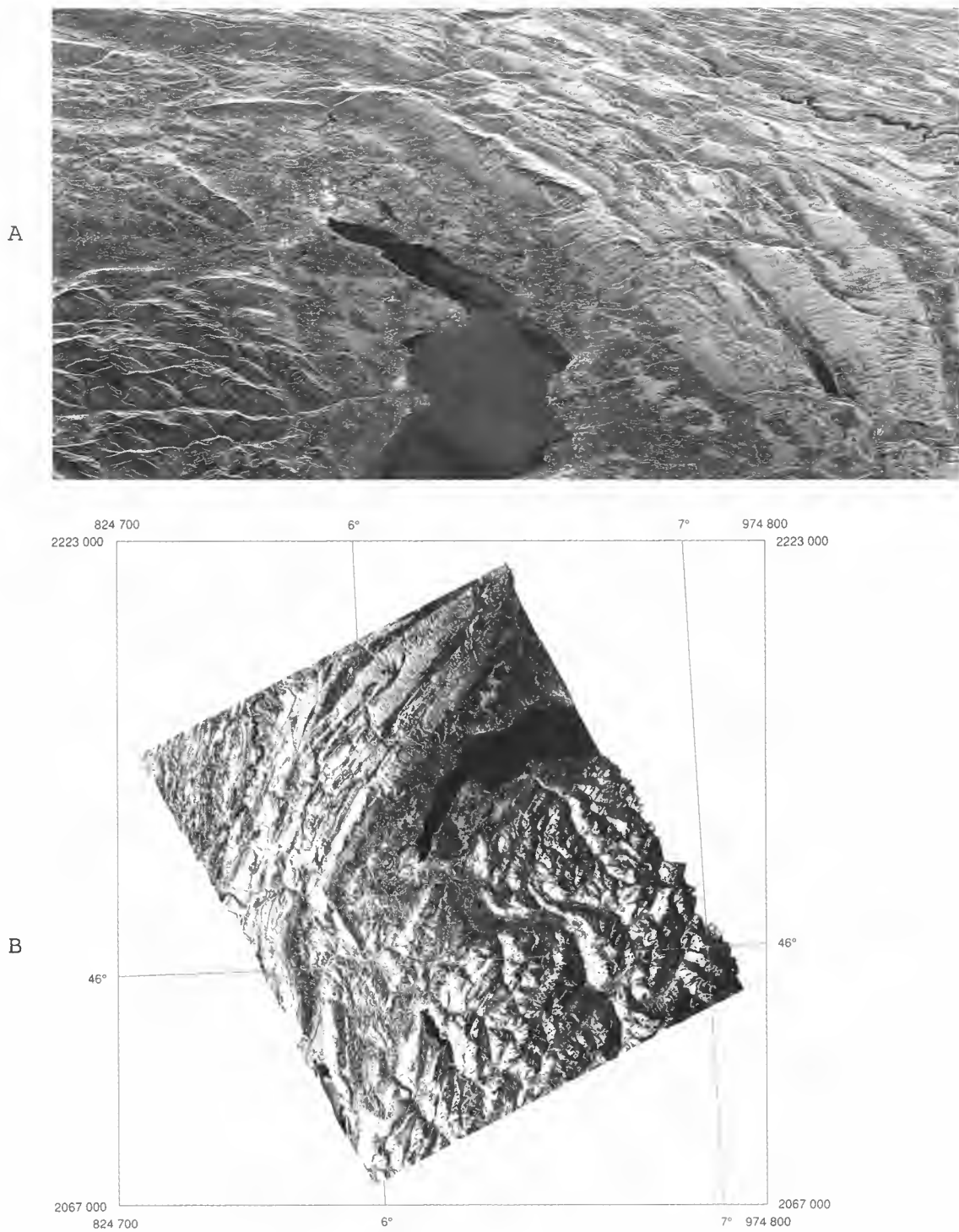


Fig.30: Exemple de géocodage d'image SAR Seasat
 (Scène de Genève, Suisse, 19/8/1978)
 A Image en distance oblique B Image géocodée
 Acquisition: ESA/Earthnet Oakhanger/RAE
 Traitement: DLR Oberpfaffenhofen
 Géocodage: RSL, Université de Zurich



Fig.31: Exemple d'image de radar SAR aéroporté
Echelle 1: 100 000, Bande X, Polarisation HH,
Résolution 6 mètres x 6 mètres,
Région de Pointe Noire, Congo, 1989
(Système STAR, INTERA Technologies, Calgary, Canada)
A Conifères B Eucalyptus

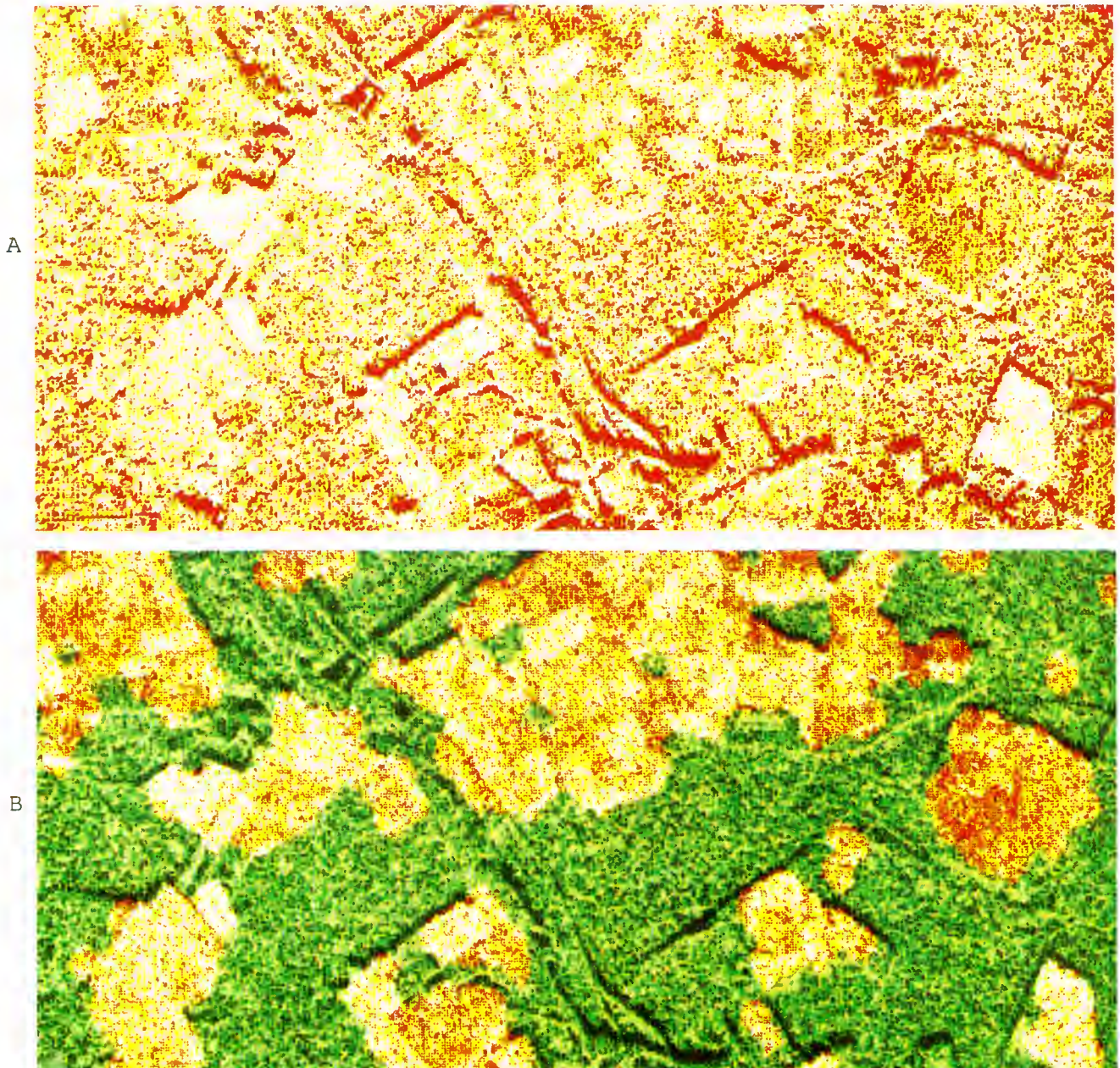


Fig.32: Utilisation d'analyse de texture en classification forestière (Site d'Orléans, France)

A. Image originale (jaune blanc: forte rétrodiffusion; rouge sombre: faible rétrodiffusion)

B. Image après segmentation texturale (vert: forêt; jaune orangé: champs)

Capteur SAR 580 aéroporté, bande X, résolution 6 mètres (Laur et al. 1987)

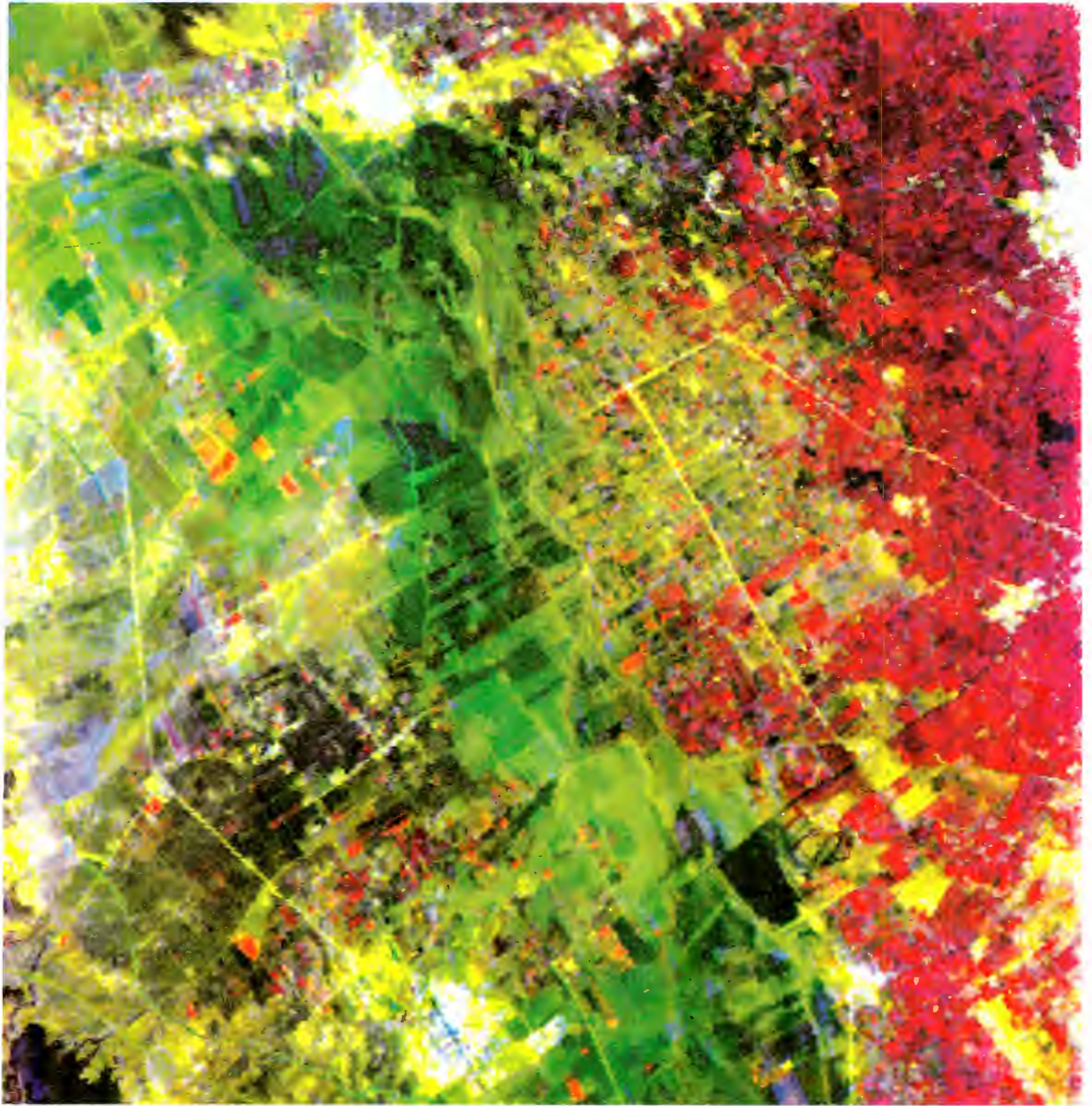


Fig.33: Composition colorée optique-microonde,
Zone de Grombalia, Tunisie
Rouge = Landsat TM 4 (Proche infrarouge)
Vert = Landsat $\frac{\text{TM 2} + \text{TM 3}}{2}$
Bleu = Seasat SAR

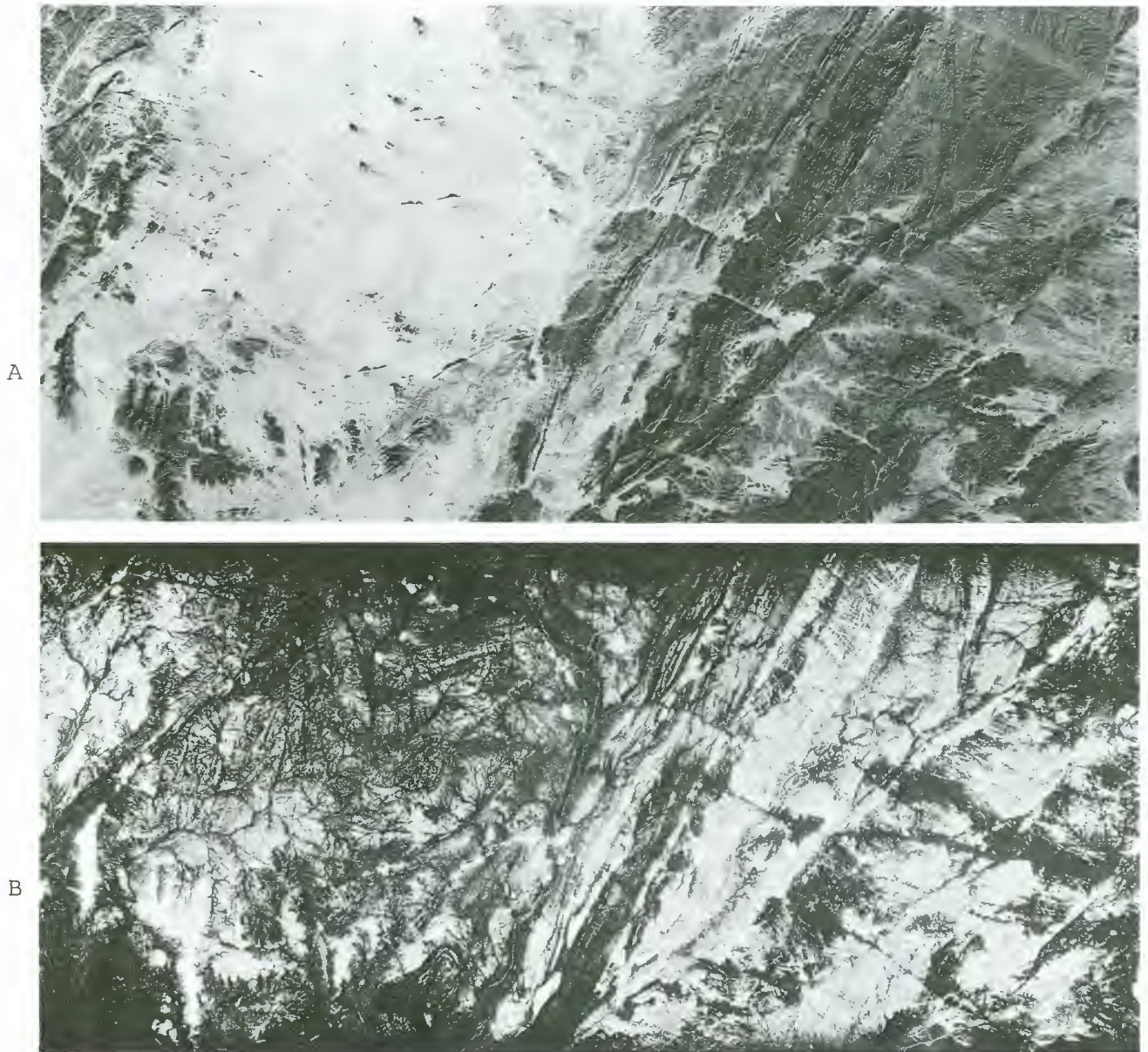


Fig.34: Capacité de pénétration du sable sec par le radar.
Comparaison (Sud du Hoggar, Algérie) entre:
A. Image Caméra Métrique (Spacelab-1, ESA; Novembre 1983)
B. Image radar SAR (SIR-A, 1982).

GLOSSAIRE

Ce glossaire consacré à la technologie microondes et plus particulièrement aux radars imageurs a été préparé par les auteurs en se basant principalement sur les documents suivants:

- Glossaire des termes officiels de la télédétection aérospatiale préparé par la Commission Ministérielle de Télédétection Aérospatiale (COMITAS), publié dans le Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection (SFPT No 112/1988-4).
- Télédétection, Remote Sensing, Telepercepcion, Bulletin de Terminologie FAO No 36 (Rome, 1985)
- Manual of Remote Sensing (American Society of Photogrammetry, 1983)

Altimètre radar

("Radar altimeter")

Instrument qui sert à mesurer la hauteur de vol d'un vecteur au-dessus du terrain par impulsions radioélectriques.(FAO)

Angle d'incidence

("Angle of incidence")

Dans le cas de systèmes SLAR, angle entre la verticale et la ligne antenne/cible.

Angle d'incidence local

("Local incidence angle")

Angle entre la verticale par rapport au terrain et la ligne cible/antenne.

Angle de dépression

("Angle of depression")

Angle défini par l'axe principal du faisceau radar et le plan horizontal de la plateforme. Aussi appelé: angle d'inclinaison. (COMITAS)

Antenne

("Antenna")

Dispositif qui émet un rayonnement électromagnétique et peut également en recevoir, en provenance d'autres antennes ou d'autres sources.

Atténuation atmosphérique

("Atmospheric attenuation")

Diminution du flux d'une radiation électromagnétique ou d'une onde sonore (par absorption, diffusion, réflexion) par l'atmosphère, milieu traversé. (FAO)

Avers de pente radar

("Radar foreslope")

Partie du terrain faisant face au front d'onde.
(COMITAS)

Azimut

("Azimuth")

Orientation géographique d'une ligne exprimée en angle mesuré à partir du nord.

Bande spectrale

("Spectral band")

Intervalle du spectre des longueurs d'onde (ou des fréquences) du rayonnement électromagnétique. (FAO)

Bruit

("Noise")

Perturbation du signal qui peut avoir pour conséquence d'altérer le contenu d'information de l'image.

Calibrage

("Calibration")

Détermination de l'appartenance d'une mesure à une classe d'intensité comprise entre deux valeurs limites prédéterminées. (COMITAS)

Capteur

("Sensor")

Instrument qui recueille de l'énergie radiative provenant de la scène visée et délivre un signal électrique correspondant et mesurable.
(COMITAS)

Capteur actif

("Active sensor")

Capteur auquel est incorporé ou associé un émetteur qui irradie la scène dans la bande spectrale du récepteur. (COMITAS)

Carte

("Map")

Représentation sur une surface plane, à une échelle donnée, d'éléments physiques (naturels, artificiels...) de la superficie terrestre, avec un système d'orientation.

Carte à grande échelle

("Large-scale map")

Carte dont l'échelle est supérieure à 1: 100 000. (FAO)

Carte à moyenne échelle

("Medium-scale map")

Carte dont l'échelle est comprise entre 1: 100 000 et 1:1 000 000, bornes incluses. (FAO)

Cartographie thématique

("Thematic mapping")

Représentation d'un ou plusieurs thèmes (géographique, social, économique, historique, etc.) sur un fond-repère à une échelle déterminée. (FAO)

Chatoiement

("Speckle")

Ensemble de petites taches rapidement fluctuantes qui apparaissent dans la texturation instantanée d'une image et dû, soit à l'observation à l'aide d'un faisceau cohérent d'une cible présentant des irrégularités à l'échelle de la longueur d'onde, soit à la propagation d'un faisceau cohérent dans une atmosphère caractérisée par des variations aléatoires d'indice de réfraction. (COMITAS)

Cible

("Target")

1. Objet sur le terrain d'un intérêt particulier dans le cadre d'une étude de télédétection.
2. Portion de la superficie terrestre qui produit par réflexion ou émission la radiation mesurée par le système de télédétection.

Coherent

("Coherent")

Désigne une radiation électromagnétique en phase comme dans le cas de la production d'une énergie laser.

Constante diélectrique

("Dielectric constant")

Pour un diélectrique déterminé, grandeur qui décrit la réponse de cet isolant placé dans un champ électrique. (FAO)

Couloir exploré

("Swath")

Bande de terrain dont l'axe est parallèle à la trace du vecteur et dont la largeur dépend de caractéristiques de la mission définie par l'association capteur/vecteur. (FAO)

Decibel

("Decibel")

Coefficient exprimant l'amplification ou l'atténuation d'un signal à travers un milieu.

Densité de flux

("Flux density")

Flux d'énergie à travers un élément d'aire d'une surface définie. (FAO)

Déplacement du relief
 ("Relief displacement")

Erreur planimétrique liée au dénivelé du terrain.

Dérive
 ("Drift")

En navigation aérienne, déplacement latéral d'un aéronef par rapport à sa direction de vol, le plus souvent sous l'action du vent.

Déversement-radar
 ("Layover")

Représentation de l'effet de rapprochement sur une radargraphie.
 (COMITAS)

Diagramme de gain d'antenne
 ("Antenna pattern")

Représentation graphique plane du gain directionnel d'une antenne.
 (COMITAS)

Diffusion
 ("Scattering")

Phénomène par lequel les diverses parties d'un fluide homogénéisent leur composition, leur température, leur répartition, etc. (FAO)

Distance ambiguë
 ("Range ambiguity")

Distance qui, étant déduite d'une mesure temporelle, présente une ambiguïté sur sa valeur réelle. (COMITAS)

Distance-temps
 ("Slant range")

Distance parcourue par l'onde électromagnétique entre le capteur actif et la cible, obtenue par la mesure du temps de parcours.
 (COMITAS)

Distance-temps au sol
 ("ground range")

Distance entre la projection de la verticale du capteur actif et l'intersection du front d'onde, sur la surface de référence au sol. (COMITAS)

Donnée en polarisations croisées
 ("Cross polarization data")

Donnée obtenue dans un plan de polarisation orthogonal à celui du signal émis. (COMITAS)

Donnée en polarisations parallèles
 ("Like polarization data")

Donnée obtenue dans un plan de polarisation parallèle à celui du signal émis. (COMITAS)

Dynamique d'un dispositif

("Dynamic range")

Rapport du signal maximal mesurable au signal minimal détectable, dans un dispositif électronique. (FAO)

Echelle

("Scale")

En photographie aérienne, rapport de la distance entre deux points mesurée sur la photographie et celle entre les deux points correspondants du terrain. (FAO)

Echo radar

("Radar echo")

Signal hyperfréquence, de faible amplitude, produit par réflexion sur une cible du signal émis par une antenne radar. (FAO)

Effet Doppler

("Doppler effect" or "Doppler shift")

Décalage de fréquence apparent d'un signal qui se propage (ondes sonores ou électromagnétiques) lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur, physique ou humain, change de façon continue. (FAO)

Effet de rapprochement

("Radar foreshortening")

Délocalisation apparente de certaines parties de la cible écartées du plan horizontal de référence au sol (COMITAS). Aussi appelé raccourcissement des distances.

Emittance en hyperfréquence

("Microwave emittance")

Emittance qui se manifeste dans la bande spectrale des hyperfréquences. (FAO)

Exactitude

("Accuracy")

Egalité de la mesure avec la grandeur mesurée. (FAO)

Faisceau radar

("Radar beam")

Faisceau d'énergie radioélectrique produit par une antenne radar dans une direction déterminée. (FAO)

Fenêtre atmosphérique

("Atmospheric window")

Partie du spectre électromagnétique pour lequel l'atmosphère n'atténue pratiquement pas le rayonnement. (FAO)

Fréquence

("Frequency")

Nombre d'oscillations par unité de temps ou nombre de longueurs d'onde qui passent en un point par unité de temps. Les bandes de fréquences radar furent d'abord désignées avec des lettres pour des raisons de secret militaire. Les intervalles de fréquences des bandes radar sont indiqués ci-dessous (Source Ullaby, Moore, Fung, 1982).

<u>Bande de</u> <u>Fréquence</u>	<u>Intervalle</u> <u>de fréquence</u> (Gigahertz)	<u>Intervalle de</u> <u>Longueur d'onde</u> (Centimètres)
Bande P	0.22 à 0.39	140 à 76.90
Bande L	0.39 à 1.55	76.9 à 19.30
Bande S	1.55 à 4.20	19.3 à 7.10
Bande C	4.20 à 5.75	7.1 à 5.20
Bande X	5.75 à 10.90	5.20 à 2.75
Bande K	10.90 à 36.00	2.75 à 0.83

Fréquence de récurrence

("Pulse repetition frequency")

Inverse de l'intervalle de temps qui sépare l'émission de deux impulsions consécutives. (FAO)

Gain

("Gain")

Augmentation ou amplification.

Gain d'antenne

("Antenna gain")

Renforcement du signal résultant de la concentration de l'énergie microonde en un faisceau étroit au moyen du dispositif d'antenne.

Géocodage

("Geocoding")

Attribution de références géographiques ou codification de la localisation des données.

Hertz

("Hertz")

Hertz (Hz)	1 cycle par seconde
Kilohertz (KHz)	10^3 Hertz
Mégahertz (MHz)	10^6 Hertz
Gigahertz (GHz)	10^9 Hertz

Image plurielle par radar

("Radar multi-look image")

Image radar d'une cible résultant du traitement simultané des signaux en provenance de plusieurs impulsions. (COMITAS)

Image simple par radar

("Radar single-look image")

Image radar d'une cible obtenue à partir d'une seule impulsion.

(COMITAS)

Impulsion

("Pulse")

Courte émission d'énergie électromagnétique produite par l'antenne d'un émetteur. (FAO)

Lacet

("Yaw")

En navigation aérienne, mouvement d'un corps autour d'un axe (appelé axe de lacet) perpendiculaire aux axes de roulis et de tangage. Il s'agit d'une rotation dans le plan horizontal.

Largeur de faisceau radar

("Radar beam width")

Dimension caractéristique d'un faisceau radar, définie par la valeur de l'angle dans lequel une antenne radar émet et reçoit l'énergie électromagnétique. (FAO)

Limite de résolution en portée

("range resolution")

Ecart minimal, en distance-temps, que peut déceler un capteur actif en hyperfréquence. (COMITAS)

Lobe d'antenne

("Antenna lobe")

Volume spécifique à chaque antenne, qui représente les caractéristiques directionnelles d'émission (ou de réception) de celle-ci. Dans le cas d'une antenne anisotrope ce volume se décompose en lobes principaux et lobes secondaires ou latéraux.

(COMITAS)

Longueur d'onde

("Wavelength")

Longueur d'onde = vitesse/fréquence

Micromètre

("Micrometer")

Unité de longueur égale à un millionième (10^{-6}) de mètre ou un millièmètre (10^{-3}) de millimètre.Microonde

("Microwave")

Onde électromagnétique ayant une longueur d'onde comprise entre 1 millimètre et 1 mètre (ou une fréquence entre 300 GHz et 0.3GHz). La portion microonde du spectre électromagnétique est située entre l'infrarouge lointain (1mm) du côté des ondes plus courtes et les ondes radio du côté des ondes plus longues. Il existe des systèmes passifs opérant dans les microondes (radiomètres) et des systèmes actifs, parmi lesquels les radars.

Modulation

("Modulation")

Fluctuation provoquée de la phase ou de l'amplitude de la microonde porteuse, par opposition aux fluctuations aléatoires ou "bruit" parasite.

Mosaïque d'images

("Mosaic")

Document résultant d'un montage d'images de scènes, ou de parties de scènes, connexes, issues d'une même famille de capteurs, et prétraitées pour être raccordables géométriquement et radiométriquement. (COMITAS)

Multispectral

("Multispectral")

Qualifie un appareil, un système ou un processus qui met en oeuvre deux ou plusieurs bandes spectrales.

Nadir

("Nadir")

Lieu de la sphère céleste situé verticalement en dessous de l'endroit où l'on se tient. Point opposé au zénith. (FAO)

Ombre-radar

("Radar shadow")

Etendue de terrain non éclairée par l'onde radar émise, par suite de l'interception de tout ou partie du faisceau par un obstacle et de l'absence de diffusion atmosphérique. (COMITAS)

Ouverture

("Aperture")

En technologie radar, projection d'une antenne sur un plan perpendiculaire au sens de propagation du faisceau électromagnétique. (FAO)

Pixel

("Pixel")

Plus petite surface homogène constitutive d'une image enregistrée, définie par les dimensions de la maille d'échantillonnage. (COMITAS)

Point d'appui

("Ground control point")

Point de canevas utilisé pour effectuer le prétraitement et/ou le traitement géométriques des données. (COMITAS)

Polarisation

("Polarization")

Caractéristique d'une onde électromagnétique transversale, qui concerne la manière dont la direction de vibration varie au cours de la propagation de l'onde. (FAO)

Portée distale

("Far range")

Distance-temps au sol qui correspond au rayon dont l'angle avec la verticale du capteur actif est maximal. (COMITAS)

Portée proximale

("Near range")

Distance-temps au sol qui correspond au rayon dont l'angle avec la verticale du capteur actif est minimal. (COMITAS)

Précision

("Accuracy")

Qualité de l'exécution de la mesure d'une grandeur physique qui n'est entachée que d'une faible incertitude (exprimée en %). (FAO)

Profondeur de pénétration

("Depth penetration")

Pour un milieu de propagation déterminé, longueur du trajet que peut parcourir un rayonnement électromagnétique incident avant d'être totalement absorbé par ce milieu. (FAO)

Radar

("Radar" "Radio detection and ranging")

Appareil qui émet des impulsions en hyperfréquence très brèves et reçoit l'écho de ces impulsions après leur réflexion sur des obstacles. (FAO)

Radar à force brute

("Brute force radar")

Radar imageur utilisant une antenne longue afin d'obtenir un faisceau en éventail étroit permettant d'améliorer la résolution. Aussi appelés radar à ouverture réelle.

Radar à antenne synthétique

("Synthetic Aperture Radar") éclairée par l'onde radar émise, par suite de l'interception de tout ou partie du faisceau par un obstacle et de l'absence de diffusion atmosphérique. (COMITAS)

Ouverture

("Aperture")

En technologie radar, projection d'une antenne sur un plan perpendiculaire au sens de propagation du faisceau électromagnétique. (FAO)

Pixel

("Pixel")

Plus petite surface homogène constitutive d'une image enregistrée, définie par les dimensions de la maille d'échantillonnage. (COMITAS)

Point d'appui

("Ground control point")

Point de canevas utilisé pour effectuer le prétraitement et/ou le traitement géométriques des données. (COMITAS)

Polarisation

("Polarization")

Caractéristique d'une onde électromagnétique transversale, qui concerne la manière dont la direction de vibration varie au cours de la propagation de l'onde. (FAO)

Portée distale

("Far range")

Distance-temps au sol qui correspond au rayon dont l'angle avec la verticale du capteur actif est maximal. (COMITAS)

Portée proximale

("Near range")

Distance-temps au sol qui correspond au rayon dont l'angle avec la verticale du capteur actif est minimal. (COMITAS)

Précision

("Accuracy")

Qualité de l'exécution de la mesure d'une grandeur physique qui n'est entachée que d'une faible incertitude (exprimée en %). (FAO)

Profondeur de pénétration

("Depth penetration")

Pour un milieu de propagation déterminé, longueur du trajet que peut parcourir un rayonnement électromagnétique incident avant d'être totalement absorbé par ce milieu. (FAO)

Radar

("Radar" "Radio detection and ranging")

Appareil qui émet des impulsions en hyperfréquence très brèves et reçoit l'écho de ces impulsions après leur réflexion sur des obstacles. (FAO)

Radar à force brute

("Brute force radar")

Radar imageur utilisant une antenne longue afin d'obtenir un faisceau en éventail étroit permettant d'améliorer la résolution. Aussi appelés radar à ouverture réelle.

Radar à antenne synthétique

("Synthetic Aperture Radar" = SAR)

Radar à visée latérale dont le fonctionnement en vol introduit une antenne virtuelle de plus grande dimension que l'antenne réelle par l'utilisation conjuguée de la phase du signal reçu et du déplacement du vecteur. (COMITAS)

Radar à visée latérale

("Side-Looking radar")

Radar imageur qui explore en vol un couloir décalé latéralement par rapport à la trace du vecteur.

Note: Le terme angloaméricain "Side-looking airborne radar" (SLAR), en français radar aéroporté à visée latérale, désigne l'appareil en mode opératoire aérien. (COMITAS)

Radargrammétrie

("Radargrammetry")

Techniques d'exploitation des images-radar qui permettent de déterminer les caractéristiques géométriques du terrain et d'en représenter des formes ainsi que des détails. (COMITAS)

Radiation électromagnétique

("Electromagnetic radiation")

Energie se propageant sous la forme d'une interaction entre des champs électriques et magnétiques.

Radiomètre

("Radiometer")

Instrument destiné à la mesure du flux radiatif. (FAO)

Réflexion

("Reflection")

Renvoi dans le milieu matériel d'incidence d'un rayonnement électromagnétique incident par l'interface qui sépare le milieu considéré d'un autre milieu d'indice de réfraction différent, sans changement de fréquence des radiations qui composent le rayonnement. (FAO)

Réflexion spéculaire

("Specular reflection")

Type de réflexion qui obéit aux lois optiques établies pour les miroirs. (FAO)

Résolution

("Resolution")

Terme général employé pour évoquer:

1. Dans le cas d'un système de mesurage, l'aptitude à séparer deux niveaux d'un signal.
2. Dans le cas d'une image, l'aptitude à rendre distincts deux points voisins. (COMITAS)

Revers de pente radar

("Radar backslope")

Partie du terrain au revers de celle qui fait face au front d'onde. (COMITAS)

Roulis

("Roll")

Rotation de l'avion autour de l'axe longitudinal du fuselage.

Rugosité de surface

("Surface Roughness")

Aspérités ou irrégularités présentées par une surface naturelle dont la vigueur constitue un paramètre intervenant dans l'analyse des données recueillies par télédétection active.

Seconde
("Second")

Milliseconde (ms) 10⁻³ seconde
Microseconde (s) 10⁻⁶ seconde
Nanoseconde (ns) 10⁻⁹ seconde

Signal
("Signal")

Impulsion émise (signal de sortie) ou reçue (signal d'entrée), de nature électromagnétique, issue de, ou transformée en courant électrique, par un capteur actif ou passif.

Signature spectrale
("Spectral signature")

Ensemble des caractéristiques conditionnant l'interaction du rayonnement électromagnétique avec la matière, nécessaires et suffisantes pour identifier une surface déterminée. (COMITAS)

Spectre
("Spectrum")

Résultat de la décomposition d'un rayonnement électromagnétique en ses fréquences constituantes.

Stéréoscopie
("Stereoscopy")

Procédé qui permet d'obtenir la sensation du relief à partir de deux images stéréoscopiques d'un objet, prises de deux points de vue différents. Sensation du relief donnée par la vision binoculaire. (FAO)

Stéréoradargrammétrie
("Stereoradargrammetry")

Techniques d'exploitation d'un couple d'images-radar impliquant la corrélation visuelle ou instrumentale des points homologues de ce couple. (COMITAS)

Structure
("Pattern")

Critère d'environnement définissant l'organisation et les relations entre les éléments texturaux.

Superposition d'images
("Images Registration")

Procédé qui consiste à faire coïncider géométriquement plusieurs images, représentant la partie commune d'une scène, obtenues soit à des dates distinctes, soit au même instant mais dans des bandes spectrales différentes. (COMITAS)

Surface équivalente d'une cible
("Radar cross-section")

Surface interceptant une quantité de puissance qui, si elle est renvoyée uniformément dans toutes les directions, produit un écho dans le radar, égal à celui renvoyé par la cible.

Tangage

("Pitch")

Mouvement de rotation provoquant le relèvement et/ou l'abaissement du nez de l'avion.

Téledétection

("Remote sensing")

Ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci. (COMITAS)

Temps réel

("Real time")

Mode de fonctionnement d'un système qui permet l'admission de données à un instant quelconque et l'obtention immédiate des résultats tout en préservant les contextes.

Texture

("Texture")

En photographie, aspect pris par les plus petites zones individualisables à la surface de l'image, caractère lié à l'échelle, à la limite de résolution spatiale du document et au grain de l'émulsion. (FAO)

Ton

("Tone")

En photographie, degré d'intensité d'une couleur. (FAO)

Tout-temps

("All-weather")

Qualifie un système de détection capable d'opérer, de jour comme de nuit, dans n'importe quelle condition atmosphérique. (FAO)

Trace en long

("Along-track")

Trace d'un capteur, longitudinale à la trajectoire au sol de la route d'un vecteur aérospatial. (FAO)

Trace en travers

("Across-track")

Trace d'un capteur, transversale à la trajectoire au sol de la route d'un vecteur aérospatial. (FAO)

Traitement de données

("Data processing")

Suite d'opérations sur des données corrigées selon des règles précises, à des fins de classification, de calculs statistiques, principalement. (FAO)

BIBLIOGRAPHIE

- ALLEN P.E.T. The use of Side-Looking Airborne Radar (SLAR)
1979 imagery for the production of a land use and vegetation
study of Nigeria, UN/FAO Training Seminar on Remote
Sensing of the Earth's Resources, Ibadan, Nigeria
- AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING Manual
1983 of Remote Sensing, Vols.I and II, Sheridan Press
- ASCHBACHER J., LICHTENEGGER J., Complémentarité des données
1990 SAR et des données optiques, une étude de cas dans les
tropiques, Bulletin trimestriel "Observation de la Terre"
No 31, ESA ESTEC, Noordwijk
- BARIOU R., Manuel de Télédétection, Edition Sodipe, Paris
1978
- COMITAS Glossaire des termes officiels de la Télédétection
1988 aérospatiale, Société Française de Photogrammétrie et
de Télédétection, Bulletin 112/4
- CRANDALL C.J. Radar Mapping in Panama, Photog.Eng., 35(7)
1967
- DALLEMAND J.F., LICHTENEGGER J., BUCHROITHNER M., REICHERT P.,
1990 Multi-sensor analysis for land use mapping in Tunisia,
3rd Workshop on Image Rectification of Spaceborne Synthetic
Aperture Radar,"Geocoded products: Intercomparison and
Applications", Farnham Castle
- DEANE R.A., DOMVILLE A.R., Side-Looking Radar Systems and their
1973 potential application to Earth resource surveys, ESRO
CR-137
- DEANE R.A., HASLAN R.J., Side-Looking Radar Systems and their
1973 potential application to Earth resource surveys, ESRO
CR-139
- DIBAG, Synthetic Aperture Radar Image Rectification Techniques,
1987 Institute for Image Processing and Computer Graphics,
Report 29, Graz
- DIBAG, Radargrammetric Image Data Evaluation, Final Report,
1987 Institute for Image Processing and Computer Graphics,
Report 30, Graz
- ELACHI C., Introduction to the Physics and Techniques of Remote
1987 Sensing, Wiley Interscience Publication

- ELACHI C., Spaceborne Radar Remote Sensing: Applications and Techniques, IEEE Press
1988
- ELACHI C., FONTANEL A., L'observation de la Terre par radar, La Recherche No 128, Vol.12, Paris
1981
- ENGMAN E.T., Microwave Remote Sensing of Soil Moisture Applied to Hydrologic Modeling, Watershed Planning and Analysis in Action Symposium Proceedings of IR Conference Watershed Mgt/IR Div/ASCE, Durango
1990
- ESA Géocodage des images produites par radar SAR embarqué, Bulletin Trimestriel "Observation de la Terre", Septembre, Noordwijk
1987
- ESA ERS-1, European Remote Sensing Satellite, ESA BR-36, Noordwijk
1989
- ESA-JRC Imaging Radar Applications in Europe, Illustrated experimental results (1978-1987), ESA TM-01
1988
- FAO Utilisation de la Télédétection par le radar aérien à vision latérale pour les inventaires de forêts tropicales, FO 75/10, Rome
1975
- FAO Télédétection/Remote Sensing/Telepercepcion, FAO Terminology Bulletin 36, Rome
1985
- FAO/ESA Principles of radar imagery, Série RSC FAO 46, Rome
1989
- FAO/ESA Evaluation de l'utilisation d'images SAR pour la cartographie de l'utilisation du sol en Tunisie: le cas de M'Saken, Série RSC FAO 51, Rome
1989
- FAO/ESA Evaluation de l'emploi d'images SAR géocodées pour la cartographie de l'utilisation du sol en Tunisie: le cas de Grombalia, Série RSC FAO 52, Rome
1990
- FORD J.P., CASEY D.J. Shuttle radar mapping with diverse incidence angle in the rain forest of Borneo, Int. Journal of Remote Sensing, Vol.9, No 5
1988
- FROST V.S., STILES J.A., SHANMUGAN K.S., HOLTZMAN J.C. A model for radar images and its application to adaptive digital filtering of multiplicative noise, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.4, No2
1982
- GOODYEAR AEROSPACE CORPORATION Basic concepts of Synthetic Aperture Side-Looking Radar, GIB 9167
1971
- HUNTING TECHNICAL SERVICES LIMITED, NIRAD Project Interpretation Phase, Final Report, Borehamwood Herts
1978

- JENSEN H., GRAHAM L.C., PORCELLO L.J., LEITH E.M. Side-Looking Airborne Radars, Scientific American 237, 84
1984
- JET PROPULSION LABORATORY Seasat Synthetic Aperture Radar data user's manual, Publication 82-90
1983
- JOINT RESEARCH CENTER (EEC) Investigators Final Report, Vols. I and II, The European SAR 580 Experiment, Ispra
1985
- KOOPMANS B.N. Drainage analysis on radar images, ITC Journal 3, 1973
- LAUR H., Analyse d'images radar en Télédétection: Discriminateurs radiométriques et texturaux, Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, No 403, Toulouse
1989
- LAUR H., LE TOAN T., LOPES A., Textural segmentation of SAR images using first order statistical parameters, Proceedings Symposium IGARSS, Ann Arbor
1987
- LEBERL F. Evaluation of SLAR image quality and geometry in Project PRORADAM, ITC Journal 4
1974
- LEBERL F. Radargrammetric Image, Artech House, Norwood, MA
1990
- LE TOAN T., Télédétection hyperfréquence active/Fondements physiques/Applications aux surfaces agricoles et forestières, CETEL 81/82, GDTA/ENSG, Toulouse
1982
- LOWRY R.T., LANGHAM E.J., MUDRY N., A preliminary analysis of SAR mapping of the Manitoba flood, Satellite Hydrology, American Water Resources Association
1979
- Mc COY M. An evaluation of radar imagery as a tool for drainage basin analysis, CRES Technical Report 61-31, University of Kansas
1967
- MEGIER J., MEHL W., RUPPELT R. Per field classification and application to SPOT simulated, SAR and combined SAR-MSS data, 18th ERIM Symposium, Paris
1984
- NASA Earth Observing System, SAR Synthetic Aperture Radar, Instrument Panel Report, Vol IIf,
1988
- RANEY R.K., DAMS R.V., WERLE D. A review of Radar Remote Sensing for Tropical Forest Management, UN/FAO/ESA Microwave Workshop, INPE, Sao José dos Campos
1990
- RANEY R.K. Canada's RADARSAT Programme, UN/FAO/ESA Microwave Workshop, INPE, Sao José dos Campos
1990

- REBILLARD Ph., BALLAIS J.L. Interprétation d'enregistrements
1983 digitaux de données SIR-A, Seasat et Landsat sur les chotts
algériens, Compte Rendu Acad. Sc. Paris, t.296 série II-103
- REBILLARD Ph., PASCAUD P.N., SARRAT D. Complémentarité des
1985 superpositions d'images spatiales multispectrales et
multitemporelles: un cas d'application à la Tunisie,
Revue Photointerprétation, No.2, Fascicule 2, Paris
- SICCO SMIT G. SLAR for forest type classification in a semi-
1978 -deciduous tropical region, ITC Journal 3
- SIEBER A., NOACK W. Results of an Airborne Synthetic Aperture
1986 Radar (SAR) Experiment over a SIR-B (Shuttle Imaging
Radar) Test Site in Germany, ESA Journal, 10 No 3
- SOWTER A., SMITH D.J., TRIEBNIG G., STROBL D., RAGGAM J., Error
1988 contributions of geocoding input data, Working Note for ESA
contract No 7689/88/HGE-I, GEC-Marconi, Londres
- STELLINGWERF D.A., SICCO SMIT G., REMEIJN J.M. Applications of
1983 aerial photographs and other remote sensing imagery in
forestry, ITC Publication No 3, Part 1
- STONE T.A., WOODWELL G.M. Shuttle imaging radar A analysis of
1988 land use in Amazonia, Int. Journal of Remote Sensing,
Vol.9, No 1
- STROBL D. The effects of control point location errors on SAR
1989 geocoding in mountainous terrain, DIBAG Report No 37,
Institute for Image Processing and Computer Graphics, Graz
- SUWITO LAKSONO, KING R.B. Application of radar imagery in
1985 transmigration planning, Proceedings of the Regional
Symposium on Remote Sensing Applications for socio-
economic aspects of the Environment, UNDP-ESCAP,
Yogyakarta
- TOUZI R., Analyse d'images radar en Télédétection: améliorations
1988 radiométriques, filtrage du speckle et détection des
contours, Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier,
No 258, Toulouse
- ULABY F.T., MOORE R.K., FUNG A.K. Microwave Remote Sensing, Vols.
1982 I,II,III, Addison Wesley Publishing
- WAN AHMAD W.Y., MAC CALLUM F., DAMS R.V., MOKHTAR S.B., CHEAH H.
1988 Landsat MSS, SPOT and SAR for Tropical Applications in
Malaysia, 9th Asian Conference on Remote Sensing, Bangkok
- WERLE D., Radar Remote Sensing, a Training Manual, Dendron
1988 Resource Surveys Ltd/Canada Centre for Remote Sensing,
Ottawa

Paramètres	SIR-A (US)	SIR-B (US)	SIR-C/X SAR (US)
Année de lancement	1981	1984	1993
Résolution (m)	40	25*	15*
Largeur de fauchée (km)	50	30*	35-100
Fréquence (GHz)	1.28(L)	1.28(L)	1.28(L) 5.3(C) 9.6(X)
Polarisation	HH	HH	Crois./VV
Angle de vue	47°	15-60°	15-60°
Flux de données (Megabits/sec)	N/A	34	46/bande
Données	Opt.	Num.	Num.
Longueur d'antenne (m)	9.4	10.7	12.1
Puissance crête (W)	1000	1000	3600(C) 5500(L)
Altitude de l'orbite	259	225	250

* Varie avec l'angle d'incidence et le mode d'acquisition

Annexe 1: Caractéristiques des radars embarqués sur la navette spatiale

Paramètres	Seasat (US)	ERS-1 (ESA)	JERS-1 (Japon)	Radarsat (Canada)
Année de lancement	1978	1991	1992	1994
Résolution (m)	25	30	20	28
Largeur de fauchée (km)	100	80	75	130
Fréquence (GHz)	1.28(L)	5.3(C)	1.2(L)	5.3(C)
Polarisation	HH	VV	HH	VV
Angle de vue	20 ^o	23 ^o	44 ^o	20-45 ^o
Flux de données (Megabits/sec)	110	165	60	110
Longueur d'antenne (m)	10.74	10	12	14
Puissance crête (W)	1000	4800	744	1200
Altitude de l'orbite (km)	800	785	568	1000

Annexe 2: Caractéristiques des missions radar de longue durée

PRESENTATION DU SATELLITE ERS-1

ERS-1 et ERS-2 assureront la couverture systématique des zones océaniques à une haute fréquence, permettant ainsi une surveillance des phénomènes à l'échelle du globe en vue d'applications océanographiques, météorologiques et écologiques. Le radar imageur à haute résolution fournira des données tout temps pour des applications terrestres telles que la géologie, mais aussi le suivi de végétation, la caractérisation de la déforestation, l'hydrologie...

ERS-1, avec son ensemble d'instruments actifs, disposera entre autres des capacités suivantes:

- AMI Mode Image ("Active Microwave Instrument"). Le radar à synthèse d'ouverture SAR du satellite, fonctionnant en mode image, prendra des images à haute résolution (30 mètres) dans une bande de 100 km de large. La Fig.35 présente la géométrie d'acquisition de données SAR en Mode Image. Le Tableau 3 présente les spécifications techniques du Mode Image.

Fréquence	5.3 GHz (Bande C)
Polarisation	VV ₀
Angle d'incidence	23° en milieu de fauchée
Résolution spatiale	30 m
Résolution radiométrique	2.5 db à -18 db
Largeur de fauchée	100km
Flux de données	< 105 Mbps

Tab.3: ERS-1: Spécifications techniques du SAR Mode Image

- AMI Mode Vent. Ce diffusiomètre a pour objet de fournir des informations sur la vitesse et la direction du vent à la surface des océans.
- AMI Mode Vague. En mode vague, le radar à synthèse d'ouverture permet d'estimer les spectres directionnels des vagues (énergie des vagues en fonction de leur direction et de leur longueur d'onde à la surface de l'océan) en évaluant le rayonnement rétrodiffusé des zones échantillonnées.
- Altimètre. L'altimètre radar (Bande Ku, 13.8 GHz) permet des mesures de haute précision de l'altitude du satellite et l'obtention d'informations sur la hauteur des vagues, les limites de zones de glace et la forme du géoïde.

- ATSR-M ("Along Track Scanning Radiometer and Microwave Sounder"). Cet instrument passif est constitué d'un radiomètre infrarouge (4 bandes) et d'un sondeur microonde (2 bandes); il donnera des mesures sur les températures à la surface des océans, au sommet des nuages et sur le contenu atmosphérique en vapeur d'eau; il fournira également des paramètres utiles pour la calibration des capteurs.
- PRARE (Precise Range and Range-rate Equipment). Ce système microonde permettra une détermination très précise de l'orbite de ERS-1, en complément aux données altimétriques.
- LASER. Cet instrument permettra également l'obtention de données précises sur l'orbite du satellite.

Les données acquises seront ensuite transmises au segment sol de la mission ERS-1 qui comprend plusieurs stations de réception. Toutes les acquisitions figureront dans le catalogue du service central des utilisateurs CUS ("Central User Service"), situé au Bureau du Programme Earthnet de l'ESRIN à Frascati (Italie). Ce service sera responsable des contacts avec les utilisateurs et de la gestion de la charge utile du satellite.

Il est important de noter dans le cas d'ERS-1 qu'il n'y a de capacité d'enregistrement à bord que pour les données de basse densité (scattéromètre, altimètre...) et pas pour les données SAR Mode Image. Même si ERS-1 est destiné en priorité à des applications océanographiques, des images terrestres seront toutefois disponibles; ce point peut être particulièrement important pour les pays en voie de développement caractérisés par une forte dynamique et une cartographie thématique insuffisante.

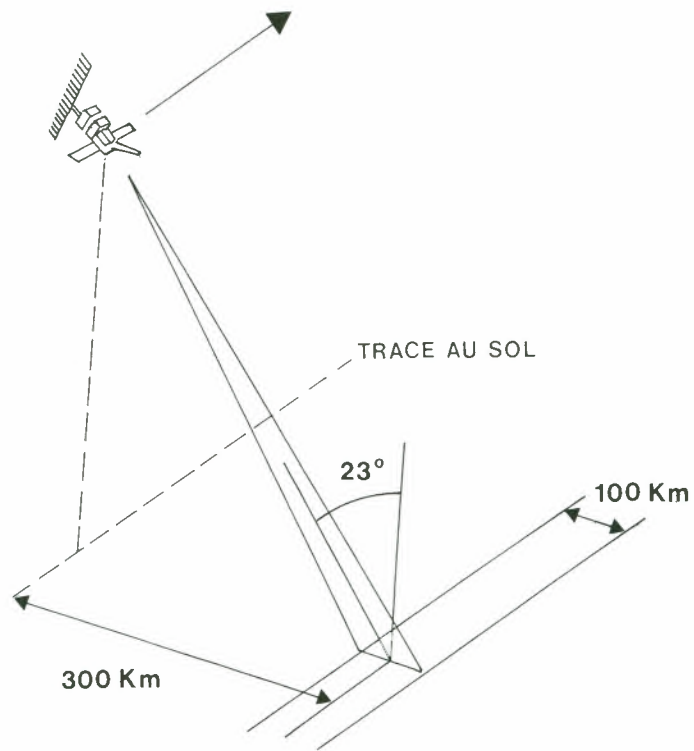


Fig.35: Géométrie d'acquisition de données ERS-1 SAR en Mode Image

