

**CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
ECOLE SUPERIEURE DES GEOMETRES ET TOPOGRAPHES**

**INTRODUCTION À LA
TÉLÉDÉTECTION SPATIALE**

Laurent POLIDORI

Professeur Associé à l'ESGT (Le Mans)

Responsable du Laboratoire Régional de Télédétection (Cayenne, Guyane Française)

INTRODUCTION A LA TELEDETECTION SPATIALE

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION

PREMIÈRE PARTIE : CONNAISSANCES DE BASE

1. HISTORIQUE DE LA TÉLÉDÉTECTION
2. BASES PHYSIQUES DE LA TÉLÉDÉTECTION
3. SYSTÈMES SPATIAUX
4. CAPTEURS OPTIQUES
5. CAPTEURS RADARS
6. GÉOMÉTRIE DES IMAGES

DEUXIÈME PARTIE : TRAITEMENT D'IMAGES

7. INTRODUCTION AU TRAITEMENT NUMÉRIQUE DES IMAGES
8. ÉLABORATION DE PRODUITS
9. ANALYSE MULTI-ÉCHELLE
10. PROBLÈME INVERSE EN TÉLÉDÉTECTION
11. INTERFÉROMÉTRIE RADAR

TROISIÈME PARTIE : APPLICATIONS DE LA TÉLÉDÉTECTION

12. PANORAMA DES APPLICATIONS THÉMATIQUES
13. ASPECTS OPÉRATIONNELS

INTRODUCTION A LA TELEDETECTION SPATIALE

INTRODUCTION

L'information géographique est une denrée de plus en plus précieuse, que ce soit à des fins commerciales (exploitation des ressources terrestres), stratégiques (surveillance des territoires) ou humaines (aide au développement, prévention des catastrophes). Depuis un siècle on a su "prendre de la hauteur" pour observer la Terre à bord de ballons, fusées, avions, hélicoptères, drones, satellites, navettes spatiales. La télédétection c'est (1) l'art d'acquérir à distance des informations, en général des images, et (2) l'art de traiter ces informations pour répondre à des problèmes.

Pourquoi fait-on de la télédétection à l'ESGT ?

Les images aériennes ou spatiales sont de plus en plus utilisées dans les professions de l'aménagement du territoire, en raison des différents services qu'elles sont susceptibles de rendre :

- sources d'information permettant de répondre à des questions concrètes ;
- outils de communication offrant un support visuel idéal pour des projets, des études d'impact ou des législations ;
- pièces à conviction dans des litiges.

Aujourd'hui la télédétection (qui fournit les données) et le SIG (qui gère les données) sont des techniques incontournables pour les géomètres et topographes. Cependant, le fait d'avoir accès à des données et de pouvoir les gérer sera toujours insuffisant, et les utilisateurs de la télédétection devront toujours avoir conscience des limites de ces outils et tenir compte des contraintes économiques ou sociales à partir desquelles est posée la question avant de rechercher la réponse dans les images ou dans toute autre donnée géographique. En d'autres termes, l'image de télédétection n'est pas un outil d'aide à la décision. C'est, au mieux, une source d'information, un outil de communication ou une pièce à conviction.

Connexion avec les autres cours

Le cours de télédétection n'est pas isolé dans la formation d'un élève ingénieur à l'ESGT. Du côté des principes de base, il fait abondamment appel aux cours de physique (mécanique céleste, rayonnement électromagnétique, optique...), de traitement du signal, de photogrammétrie et, dans une moindre mesure, de géodésie. Du côté des applications, le cours de télédétection est à relier à toutes les matières susceptibles de faire appel à la photogrammétrie et à la photo-interprétation (cartographie, urbanisme, géomorphologie, exploitation forestière, etc).

INTRODUCTION A LA TELEDETECTION SPATIALE

PREMIÈRE PARTIE
CONNAISSANCES DE BASE

INTRODUCTION A LA TELEDETECTION SPATIALE

1. HISTORIQUE DE LA TÉLÉDÉTECTION

L'histoire de la télédétection peut se décliner en plusieurs histoires plus ou moins indépendantes : les capteurs, les porteurs, les applications qui l'ont sollicitée ou découverte et, plus récemment, les moyens de traitement.

1.1. Histoire des capteurs

Le premier capteur utilisé en télédétection est la chambre photographique, constituée d'une optique et d'une plaque photosensible. Les besoins de la topographie ont tôt fait de ce capteur un instrument d'une grande précision métrique, destiné à la mesure des formes du terrain (photogrammétrie). Parmi les améliorations techniques et les diversifications apportées aux chambres photographiques pour la télédétection, on peut citer :

- les systèmes à balayage (*whisk-broom*, *push-broom*) ;
- les plans focaux numériques ;
- les filtres permettant l'acquisition de différentes longueurs d'onde.

Les caméras optiques fonctionnent dans le visible (0,4-0,8 micron) et dans le proche infrarouge (0,8-2,5 microns).

Les autres capteurs utilisés en télédétection sont :

- les caméras thermiques, qui permettent de mesurer la température de surface dans des bandes infrarouge (3-5 microns et 8-14 microns essentiellement).
- les radars imageurs, qui permettent d'observer par tout temps (de jour comme de nuit et indépendamment des conditions météorologiques).

D'autres capteurs plus spécifiques sont utilisés à des fins essentiellement scientifiques.

1.2. Histoire des porteurs (syn. vecteurs, plates-formes)

Si l'on exclut les photographies prises par des observateurs perchés sur des promontoires, le premier porteur utilisé en télédétection a été le ballon. En 1855, Nadar prend la première photographie aérienne de ballon et dépose en 1858 un brevet pour un "nouveau système de photographie aérostatique" permettant le "levé des plans topographiques, hydrographiques et cadastraux" ainsi que la direction des "opérations stratégiques par le levé des fortifications".

Par la suite, le développement de la télédétection a été intimement lié à celui de l'aviation, et même si l'hélicoptère, le ballon ou le drone* sont utilisés pour prendre des images, l'avion reste le porteur le plus répandu.

Depuis le début des années 60, des capteurs de télédétection sont régulièrement embarqués sur des satellites artificiels en orbite autour de la Terre, couvrant une vaste gamme d'altitudes :

- des orbites très basses (200 à 400 km) pour des missions de courte durée (typiquement quelques jours) à bord de la Navette Spatiale par exemple ;
- des orbites de 500 à 1500 km, polaires ou quasi-polaires, les plus utilisées en observation de la Terre (SPOT, ERS, LANDSAT, RADARSAT, NOAA...) ;
- l'orbite géostationnaire, utilisée par des satellites météorologiques comme METEOSAT (européen) ou GOES (américain).

* petit avion télécommandé

1.3. Histoire des applications de la télédétection

de celles qui en ont entraîné les progrès ...

Les deux applications motrices pour les techniques d'observation à distance ont toujours été l'astronomie et le renseignement militaire. Au début du 17^{ème} siècle Galilée dédie sa célèbre lunette aux militaires florentins pour mieux financer ses perfectionnements dans un but ... d'astronomie (observation de la Lune, de Vénus, des satellites de Jupiter). Plus près de nous, la photo-interprétation a connu son véritable essor durant la Première Guerre mondiale. Ces deux domaines ont toujours disposé d'importants moyens. Aujourd'hui encore ils contribuent au développement des instruments d'observation (optiques, thermiques, radar) et des moyens de traitement des images (techniques d'amélioration et d'analyse d'image).

... à celles qui en ont bénéficié

Au début du 20^{ème} siècle les archéologues découvrent sur des clichés aériens de sites très connus des détails importants qui avaient échappé à l'observation terrestre. A Rome, une photographie du Forum prise en ballon révèle l'existence sur le dallage d'une inscription géante qui n'avait jamais été remarquée. Pendant la Première Guerre mondiale, des officiers français se spécialisent dans la photo-interprétation ; après le conflit, certains se consacrent à l'archéologie : ils découvriront ainsi des vestiges enfouis dans les régions désertiques des colonies. L'archéologie aérienne se répand dans les années 50.

Après la Seconde Guerre mondiale, ce sont toutes les applications actuelles de la télédétection qui découvrent la richesse des photographies aériennes, bénéficiant de programmes réguliers et systématiques d'acquisitions par avion. Plus récemment les images radar et les thermographies révèlent à leur tour des informations inaccessibles jusque là pour la géologie, la surveillance de la pollution, la prévention des catastrophes naturelles et industrielles, etc. Au-delà de la simple découverte, de nombreuses activités liées à l'aménagement du territoire s'appuient sur la télédétection pour des raisons d'efficacité et de rentabilité.

1.4. Histoire des moyens de traitement

Pendant près d'un siècle, l'exploitation des photographies aériennes est restée purement visuelle. Géologues et archéologues utilisent la photo-interprétation dès le début du siècle, mais ce sont les photo-interprètes militaires qui donneront son véritable essor à cette technique, notamment pendant les deux guerres mondiales. Les premiers manuels de photo-interprétation ont été publiés dans les années 20.

L'exploitation topographique des images de télédétection a également bénéficié des progrès techniques dans le domaine des stéréoscopes et restituteurs. Les restituteurs analogiques, qui modélisent les prises de vues stéréoscopiques par des moyens optiques et mécaniques, sont adaptés à la géométrie conique des clichés aériens. Quant aux images acquises par des capteurs *push broom* (comme SPOT) ou radar, elles ne peuvent faire l'objet d'une restitution que sur du matériel analytique, où un ordinateur modélise la prise de vue au moyen d'équations souvent complexes.

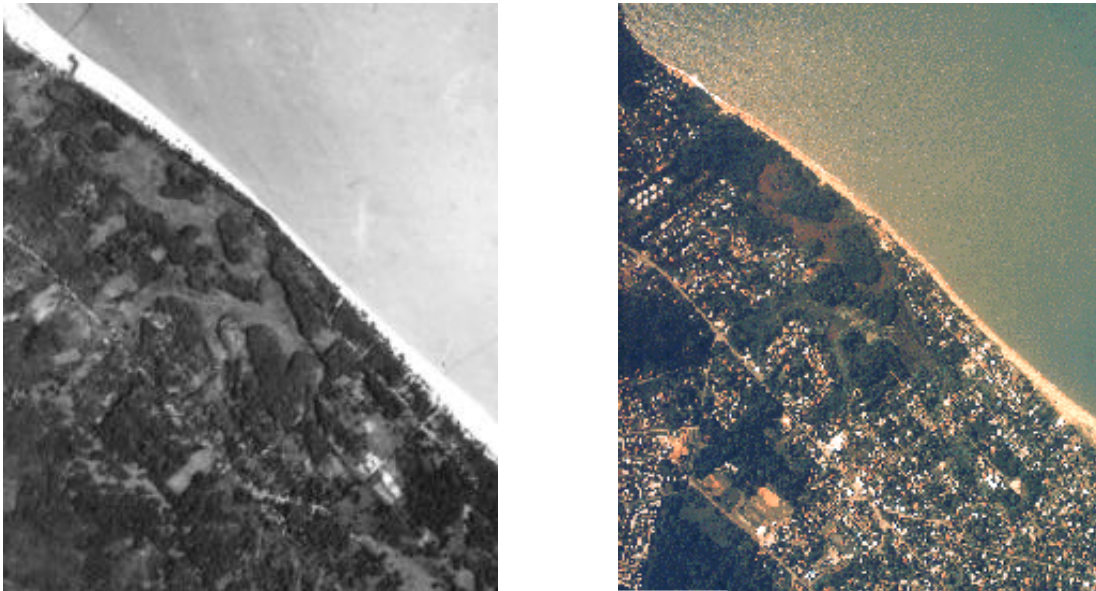
Depuis quelques années, la station de travail, puis le PC, ont réconcilié la photogrammétrie, la photo-interprétation, le prétraitement des images et la gestion des bases de données. Les deux principaux axes de ce récent développement sont les algorithmes d'analyse de scène (appariement stéréoscopique, reconnaissance des formes et des textures, classification,...) et les interfaces graphiques de plus en plus conviviales pour l'affichage et le traitement interactif des images.

1.5. Le facteur temps en télédétection

La plupart des pays du monde possèdent une couverture aérienne régulièrement mise à jour depuis plus d'un demi-siècle, et les archives d'images satellitales remontent à une trentaine d'années. Cette profondeur historique offre des possibilités qui n'étaient pas imaginables aux débuts de la télédétection :

- ◆ pour constater des évolutions dans un paysage naturel ou urbanisé
- ◆ pour retrouver la géologie ou les conditions environnementales initiales d'un site avant son urbanisation
- ◆ pour faciliter le dialogue entre générations au sujet de l'environnement, car un enfant peut découvrir l'enfance de son grand-père en se plongeant dans une photographie ancienne.

Au même titre que les cartes postales, on a fini par accorder une véritable valeur à des images qui en d'autres temps auraient été considérées comme "périmées".



Evolution de bourg de Montjoly (Guyane Française) entre 1950 et 1998.

2. BASES PHYSIQUES DE LA TÉLÉDÉTECTION

2.1. Pourquoi faut-il étudier l'électromagnétisme pour comprendre les images ?

Les capteurs utilisés en télédétection sont des radiomètres imageurs. En effet, ils mesurent des rayonnements et organisent ces mesures sous forme d'images. Ces images sont utilisées pour obtenir des informations sur les objets qu'elles représentent (c'est-à-dire sur les éléments du paysage). Or, le seul lien qui relie l'image à l'objet est le rayonnement émis ou réfléchi par cet objet et reçu par le radiomètre. La télédétection s'appuie donc avant tout sur une bonne connaissance des rayonnements électromagnétiques et de leur comportement au contact de la Terre et à travers l'atmosphère.

Bien entendu, la complexité des paysages terrestres et de l'atmosphère exclut une mise en équation rigoureuse, et l'analyse des images de télédétection s'appuie aussi, en grande partie, sur l'expérience et l'intuition du photo-interprète.

2.2. Principe du corps noir

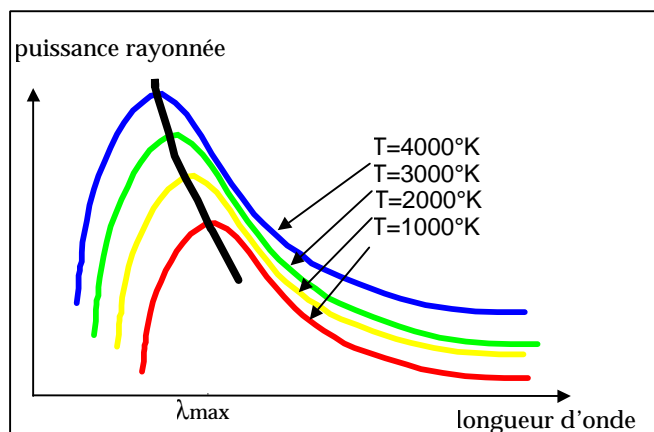
Le corps noir est un radiateur parfait qui transforme une énergie thermique en une énergie rayonnante maximale. La radiance (ou exittance) spectrale d'un corps noir est donnée par la loi de Planck :

$$M(\lambda) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right]} \quad \text{en } W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}$$

où $C_1 = 3,74 \cdot 10^{-16}$ S.I. et $C_2 = 1,44 \cdot 10^{-2}$ S.I.

La radiance totale (intégrée sur l'ensemble du spectre) augmente avec la température, selon la loi de Stefan-Boltzman :

$$M = \sigma T^4 \quad \text{en } W \cdot m^{-2}$$



A une température donnée, la radiance spectrale dépend de la longueur d'onde. La loi de Wien donne la longueur d'onde pour laquelle la radiance spectrale est maximale :

$$\lambda_{\max} = \frac{C}{T}$$

où $C = 3 \cdot 10^{-3}$ m.K. Cette relation relie la température de corps noir d'un objet à la longueur d'onde à laquelle on l'observe le mieux. Par exemple, la Terre, dont la radiance maximale se trouve dans l'infrarouge thermique (env. 10 mm) a une température de corps noir d'environ 300°K. De même, le soleil qui émet principalement dans le spectre visible (maximum autour de 0,5 mm) a une température de corps noir d'environ 6000°K.

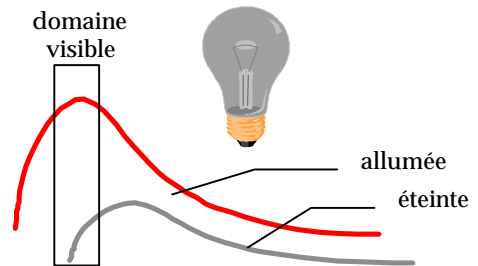
La puissance reçue par une surface de 1 m² perpendiculaire aux rayons solaires et située à la distance moyenne Terre-Soleil (env. 149 000 000 km) est appelée **constante solaire** et vaut 1353 W.m⁻². La puissance effectivement reçue par une surface de 1 m² à la surface de la Terre est diminuée par la présence de l'atmosphère et par l'obliquité des rayons. Ces deux effets se combinent et augmentent tous les deux avec la latitude.

Un corps pour lequel la loi de Stefan-Boltzman devient $M = \epsilon \sigma T^4$ (où $0 < \epsilon < 1$), est appelé un corps gris. ϵ est appelé l'émissivité du corps.

On retrouve la loi de Wien dans quelques expériences familières :

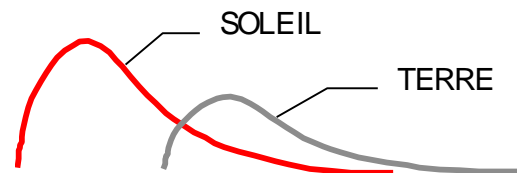
Un morceau de métal à température ambiante émet dans l'infrarouge thermique. Si on élève sa température au moyen d'un chalumeau, son émission maximale va se déplacer vers des longueurs d'onde plus courtes et pénétrer dans le spectre visible : il rougit. Si on élève encore la température, la longueur d'onde devient encore plus courte et l'objet devient orange puis

jaune.
Une ampoule allumée est portée à très haute température par l'action d'un courant électrique dans une résistance très élevée, ce qui lui permet d'émettre des longueurs très courtes (plus précisément des ondes visibles : c'est le but du jeu !). Lorsqu'on éteint la lumière, le maximum d'émission sort rapidement du domaine visible : la longueur d'onde émise augmente progressivement tandis que la température diminue (mais l'amortissement n'est pas instantané comme on peut s'en convaincre... en saisissant l'ampoule à pleine main !).



Les spectres d'émission du Soleil et de la Terre se croisent autour de 3 microns :

- les ondes plus courtes (domaine optique) sont majoritairement émises par le Soleil et réfléchies par la Terre ;
- les ondes plus longues (domaine thermique) sont majoritairement émises par la Terre.



L'observation de la Terre par imagerie thermique se heurte à deux principales difficultés :

- pour les longueurs d'onde les plus courtes (typiquement 3 à 5 microns) l'émission propre de la Terre est contaminée par la réflexion du rayonnement solaire : il est donc recommandé de faire des observations nocturnes ;
- pour les longueurs d'onde proches du maximum d'émission (typiquement 8 à 14 microns) il est nécessaire de refroidir le plan focal du capteur (par exemple en le maintenant en contact avec de l'air liquide) afin de diminuer son émission propre : le refroidissement a pour effet de diminuer la puissance émise et de décaler λ_{\max} vers des longueurs d'onde plus grandes.

2.2. Interaction onde-matière

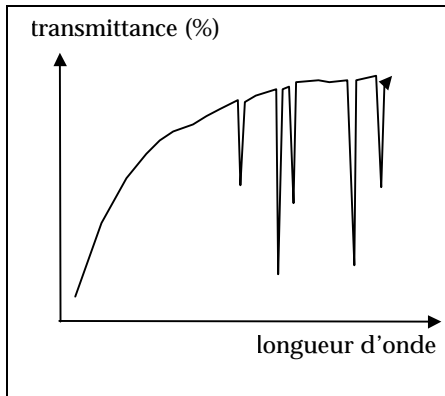
2.2.1. Interaction avec l'atmosphère

Le rayonnement propre de l'atmosphère se produit dans l'infrarouge thermique, il se superpose donc à celui de la Terre. Il dépend de la température et des constituants atmosphériques (gaz, aérosols).

Les interactions à prendre en compte en observation de la Terre sont essentiellement celles qui affectent la propagation de la lumière solaire à travers l'atmosphère, à l'aller (onde incidente) comme au retour (onde réfléchie).

Atténuation par l'atmosphère

Quant à la lumière solaire qui traverse l'atmosphère (qu'elle soit incidente ou réfléchiée par la Terre), elle subit un certain nombre de phénomènes, les plus importants étant l'absorption, la dispersion (ou diffusion), la réfraction et la polarisation. L'effet conjugué de la dispersion et de l'absorption est quelquefois appelé atténuation. L'atténuation, nulle dans le vide, est le complémentaire de la transmission.



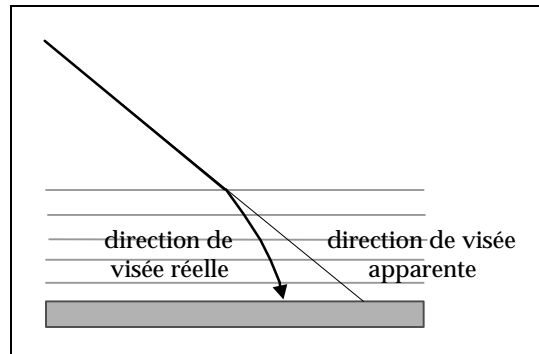
La proportion d'énergie rayonnée transmise à travers l'atmosphère sur une longueur donnée est appelée transmittance. Son comportement spectral est décrit par la courbe typique ci-contre.

Cette courbe montre une augmentation générale de la transmittance en fonction de la longueur d'onde, interrompue par quelques raies d'absorption dues à l'interaction (résonance) entre une molécule particulière et une longueur d'onde très précise. Les parties du spectre qui ne sont pas absorbées par l'atmosphère sont appelées des **fenêtres atmosphériques**.

Les longueurs d'onde optiques (lumière solaire) sont diffusées par l'atmosphère. Plusieurs phénomènes cohabitent :

- la diffusion de Rayleigh, proportionnelle à $1/\lambda^4$, affecte les ondes dont la longueur d'onde est beaucoup plus petite que les particules qui constituent le milieu traversé (par exemple la lumière bleue est fortement diffusée par l'atmosphère même sèche) ;
- la diffusion de Mie, proportionnelle à $1/\lambda$, affecte les ondes dont la longueur d'onde est comparable aux particules qui constituent le milieu traversé (par exemple les aérosols qui diffusent la lumière).

Comme le rappelle la figure page suivante, la diffusion de Rayleigh est très sélective, c'est-à-dire que les molécules atmosphériques ont un comportement très différent en fonction des longueurs d'onde. Cela se traduit par des couleurs très vives (ciel bleu en milieu de journée, soleil rouge au levant et au couchant). Au contraire, lorsque l'atmosphère est brumeuse, elle diffuse de manière moins sélective (diffusion de Mie) ce qui se traduit par la couleur grise.



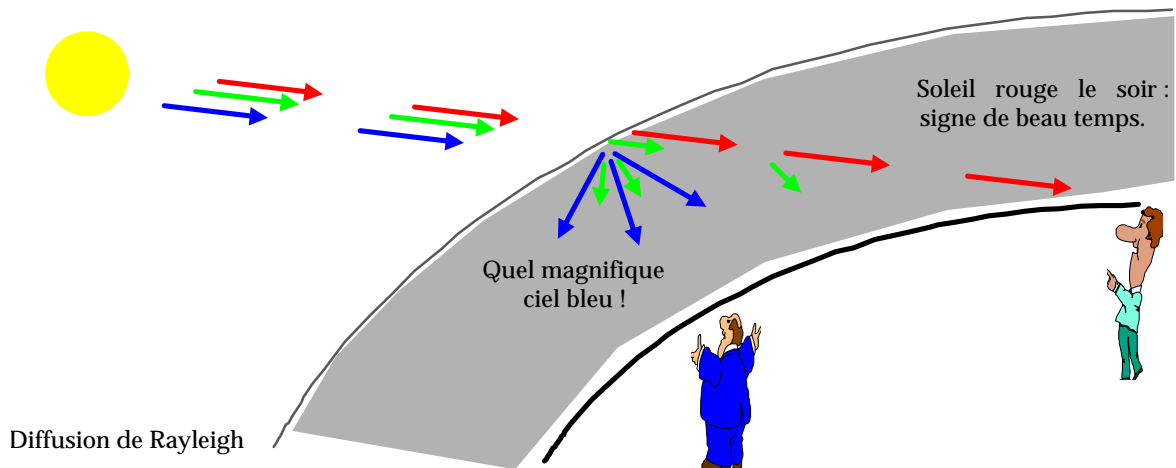
Ces effets contaminent les images optiques acquises par satellites. On peut les corriger partiellement, pour peu que les caractéristiques de l'atmosphère au moment de la prise de vue soient connues. Quant aux micro-ondes (longueurs d'onde centimétriques et métriques), elles sont, en première approximation, insensibles à l'atmosphère, ce qui explique le succès des radars pour la cartographie des pays tropicaux, souvent nuageux.

Réfraction atmosphérique

L'atmosphère dévie légèrement les rayons lumineux, d'un angle qui dépend des conditions atmosphériques et de l'angle de visée. Si on considère l'atmosphère comme un empilement de couches horizontales homogènes, la loi de Descartes permet d'affirmer que la quantité $n \cdot \sin(i)$ reste constante au cours de la propagation (n étant l'indice de réfraction et i l'angle de visée par

rapport à la verticale). La réfraction produit une erreur de localisation dans les images, qui atteint typiquement quelques mètres en visée oblique.

L'erreur de localisation engendrée par la réfraction atmosphérique est donc comparable aux résolutions spatiales typiques, et elle est de plus pratiquement uniforme dans une scène. C'est loin d'être la principale source d'erreur, ce qui fait qu'on en tient rarement compte. Par contre, une technique comme l'interférométrie radar, qui compare des mesure de distance, entre deux passages, avec une précision plus fine que la longueur d'onde (typiquement centimétrique) ne peut pas négliger la réfraction atmosphérique (cf. chap. 12).



La couleur, indicateur de la turbidité (image Landsat TM, delta du Mississippi)

2.2.2. Interaction avec la surface terrestre

La réflexion d'une onde incidente sur la surface terrestre dépend des caractéristiques de l'onde (longueur d'onde, polarisation, angle d'incidence, etc) et des caractéristiques de la surface (matériau, pente, rugosité, humidité, etc). En fonction de ces caractéristiques la réflexion peut être spéculaire (effet de miroir) ou diffuse.



Par exemple le radar imageur éclaire les surfaces avec un angle d'incidence oblique et mesure la fraction d'énergie "rétrodiffusée", c'est-à-dire réfléchi de manière diffuse vers l'antenne. La puissance reçue permet alors d'estimer un coefficient de rétrodiffusion caractéristique de la surface.

Le rapport de l'énergie réfléchi à l'énergie totale incidente est appelé albédo. En télédétection optique on a coutume de parler de réflectance pour désigner la proportion d'énergie réfléchi dans une direction donnée, notamment dans la direction du capteur. La variation de la réflectance en fonction de la longueur d'onde est appelée signature spectrale (cf. § 2.3).

La fraction d'énergie qui n'est pas réfléchi par la surface est transmise au milieu : à chaque profondeur, une partie est absorbée, l'autre partie continue sa propagation jusqu'à l'interface suivante (fond de l'eau par exemple). La profondeur de pénétration dépend de la longueur d'onde et des propriétés diélectriques du milieu :

- la lumière bleue peut pénétrer dans l'eau pure jusqu'à plusieurs dizaines de mètres (profondeur considérablement réduite dans une eau turbide) ;
- les ondes radar sont totalement réfléchies par l'eau, mais les grandes longueurs d'onde (20 cm à 1 m) peuvent traverser une couche de sable (plusieurs dizaines de mètres) ou de glace (plusieur kilomètres) pourvu que ce volume soit sec et homogène.

Dans le cas des ondes optiques, la diffusion atmosphérique affecte sensiblement la mesure de réflectance. En effet :

- la lumière qui atteint la cible provient majoritairement du soleil mais aussi de l'atmosphère et des cibles voisines ;
- la lumière réfléchi qui atteint le capteur provient majoritairement de la cible mais aussi de l'atmosphère et des cibles voisines.

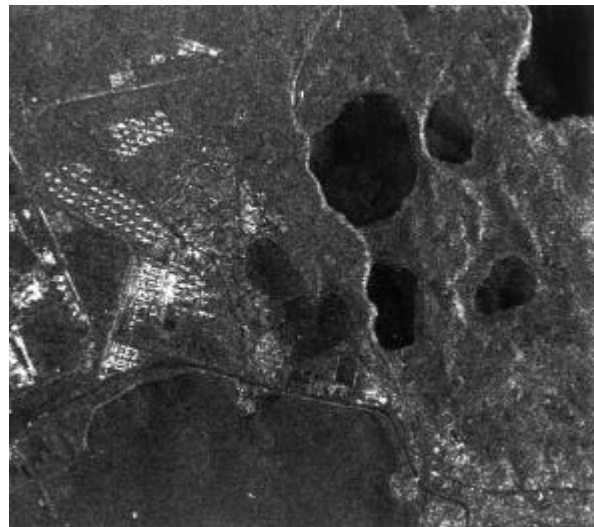
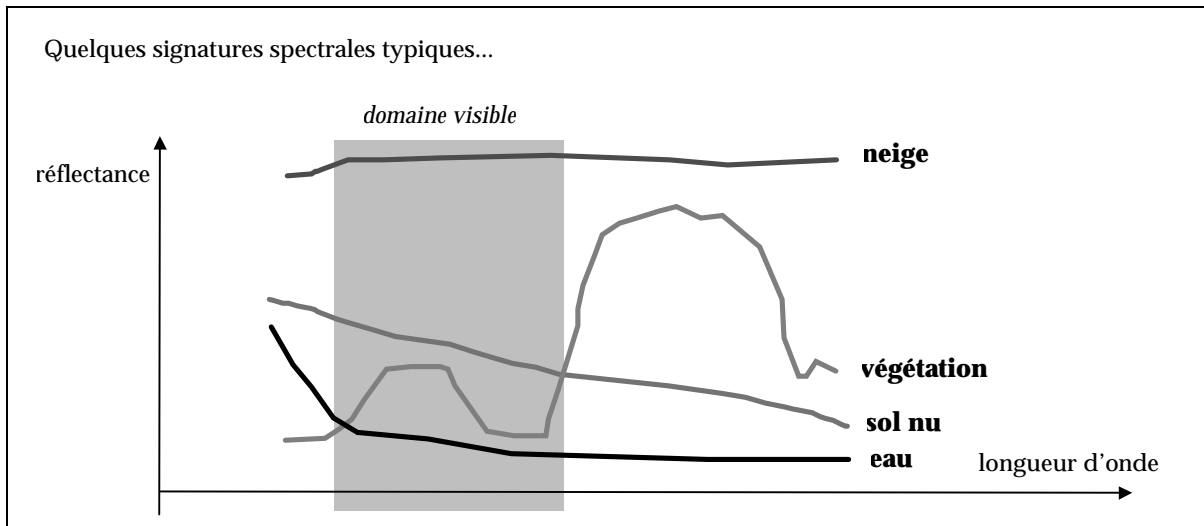
2.3. Notion de signature

La signature est une grandeur physique qui permet de caractériser les objets observés, et que l'on peut déduire à partir des images. Une signature peut être obtenue à partir de modèles théoriques (simulations) ou par des mesures réelles, soit en laboratoire soit dans des images acquises sur des sites parfaitement connus.

Pour caractériser la nature d'une surface, on a l'habitude d'utiliser des grandeurs normalisées, c'est-à-dire aussi intrinsèques que possible :

- la réflectance pour les images optiques ;
- l'émissivité pour les images thermiques ;
- le coefficient de rétrodiffusion pour les images radar.

La signature est une grandeur qui dépend d'une part des caractéristiques de l'onde incidente et d'autre part des caractéristiques de l'objet observé. Par exemple, la réflectance dépend de la nature du matériau mais aussi de la longueur d'onde. Les propriétés optiques des paysages sont assez bien caractérisées par la signature spectrale, dont on donne quelques exemples ci-après.



L'intensité d'une image optique (ici SPOT panchromatique) est liée à la **réflectance**, c'est-à-dire la capacité des surfaces à réfléchir la lumière solaire. La réflectance est un indicateur de la nature des matériaux, et dans le cas de l'eau, de sa profondeur et de sa turbidité.

L'intensité d'une image radar (ici le SAR du satellite ERS-1) est liée au **coefficient de rétrodiffusion**, c'est-à-dire la capacité des surfaces à renvoyer les ondes radar vers l'antenne du radar. Le coefficient de rétrodiffusion est un indicateur de la rugosité des surfaces et de leur humidité.

Signatures indirectes

On peut rechercher dans les images des signatures dites indirectes encore appelées **indicateurs**. Cette notion, bien connue des photo-interprètes depuis de nombreuses décennies, est un peu tombée en désuétude avec l'avènement des images numériques, propres à une exploitation quantitative. Pourtant, dès qu'un objet ou un phénomène est trop difficile à modéliser selon des lois physiques, la notion d'indicateur prend tout son sens. C'est ainsi que l'on peut étudier des phénomènes totalement abstraits comme le niveau de vie ou le niveau d'instruction de la population, susceptibles d'être corrélés (en tant que causes ou effets, peu importe) avec la densité de l'habitat, la couleur des toits, la nature du sol, etc. Cette approche connaît aujourd'hui un regain d'intérêt, dans la mouvance des travaux sur l'interprétation automatique d'images et devrait apporter une contribution décisive dans des domaines comme la démographie et l'épidémiologie, notamment dans des pays en développement où les méthodes efficaces et bon marché sont toujours les bienvenues.

3. SYSTEMES SPATIAUX

3.1. Généralités

Un système spatial est constitué d'un segment spatial (le satellite et, accessoirement, le lanceur chargé de le mettre en orbite) et d'un segment sol (infrastructure permettant de commander le satellite et d'en recueillir et traiter les données). Le satellite est constitué d'une **plate-forme** et d'une **charge utile**. Dans le cas d'un satellite de télédétection la charge utile est constituée d'un capteur (antenne, télescope) et d'une chaîne de détection ainsi que d'un certain nombre d'accessoires (unité de calcul, rétroreflecteurs laser, etc). Une plate-forme peut embarquer une charge utile constituée de plusieurs instruments. Ceux-ci doivent alors partager les ressources disponibles à bord, ce qui implique des contraintes de masse et de puissance.

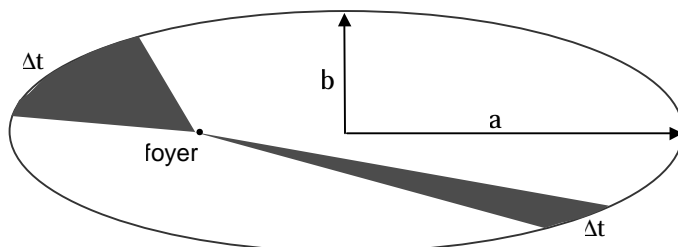
3.2. Orbitographie

3.2.1. Les lois de Kepler

L'orbite des satellites obéit en première approximation aux lois de Kepler (cf. encadré). Les lois de Kepler permettent d'expliquer les phénomènes suivants :

- dans le cas des orbites elliptiques, la vitesse du satellite est minimale à l'apogée et maximale au périégée ;
- la période de révolution croît avec l'altitude (1 heure pour une orbite basse à quelques centaines de kilomètres, 1 jour pour un satellite géostationnaire, et... 1 mois pour la Lune).

Au début du XVIIème siècle, l'astronome Johannes Kepler (1571-1630) découvrit, grâce aux observations de son prédécesseur Tycho Brahe, des caractéristiques communes aux trajectoires de toutes les planètes, ce qui l'amena à énoncer les 3 lois qui allaient porter son nom :



1. **les orbites des planètes sont des ellipses dont le soleil occupe l'un des foyers ;**
2. **les aires balayées par le rayon vecteur soleil-planète sont proportionnelles aux temps mis pour les parcourir ;**
3. **les carrés des périodes de révolution sont proportionnels aux cubes des grands axes.**

Les lois de Képler ont apporté une contribution majeure à la théorie de Newton (1642-1727).

Les lois de Képler s'appliquent aussi au cas des satellites en orbite autour de la Terre. Le foyer des orbites est le centre de masse de la Terre. La troisième loi de Kepler s'écrit :

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{GM}{4\pi^2}, \quad \text{où : } M = 6.10^{24} \text{ kg est la masse de la Terre}$$

$$G = 6,67.10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2} \text{ est la constante universelle de la gravitation.}$$

L'orbite d'un satellite est caractérisée par 5 paramètres appelés éléments képlériens (a,e,i,ω,W) correspondant à autant de degrés de liberté :

1. le demi-grand axe **a**
 2. l'excentricité **e** = $(a^2 - b^2)^{1/2} / a$
 3. l'inclinaison **i**
 4. la longitude du nœud ascendant **w**
 5. l'argument du périégée **W**
- un sixième degré de liberté est nécessaire pour déterminer la position du satellite : le **temps**

3.2.2. Perturbations et mesures

Les lois de Kepler ne sont qu'une approximation de la réalité. En effet, certaines perturbations exercent sur la plate-forme des forces qui s'ajoutent à l'attraction centrale de la Terre. Ces forces perturbatrices sont de 2 natures :

- **des forces d'origine gravitationnelle :**
 - ◊ marée (attraction de la Lune et du Soleil) ;
 - ◊ effet des inhomogénéités internes de la Terre ;
 - ◊ effet de l'aplatissement aux pôles.
- **des forces d'origine non gravitationnelle :**
 - ◊ traînée atmosphérique ;
 - ◊ pression de radiation (solaire et terrestre).

Bien que ces phénomènes soient identifiés et leurs ordres de grandeur à peu près connus, leur modélisation ne suffit pas à fournir une prédiction de la trajectoire. Celle-ci doit donc être mesurée, par télémétrie laser ou par radiolocalisation Doppler.

3.2.3. L'orbite géostationnaire

Un satellite géostationnaire est, par définition, immobile par rapport à la Terre. Il doit donc tourner autour de l'axe des pôles à raison d'un tour par jour. Une orbite perpendiculaire à l'axe des pôles est nécessairement équatoriale, et la troisième loi de Kepler permet de déterminer l'altitude que doit avoir le satellite pour que sa période de rotation soit d'un jour soit 86400 s : on trouve un rayon égal à 42300 km soit une altitude d'environ 36000 km. Cette orbite est utilisée par des satellites météorologiques et par des satellites de télécommunication.

3.2.4. Les orbites polaires

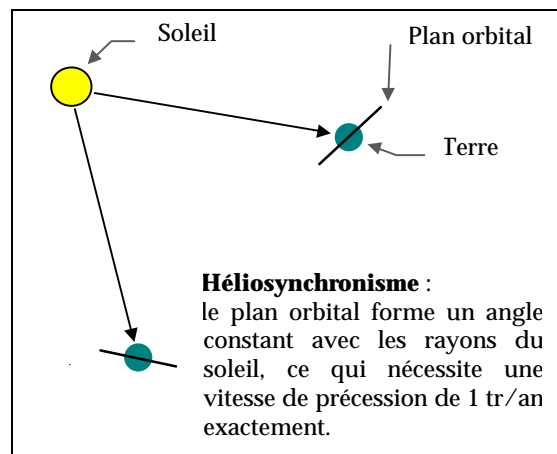
Une orbite polaire est une orbite dont le plan contient l'axe des pôles. Une telle orbite permet de survoler toutes les régions du globe. En effet :

- le balayage des latitudes est assuré par le déplacement du satellite sur son orbite ;
- le balayage des longitudes est assuré par la rotation de la Terre sous le satellite.

L'orbite polaire peut être légèrement modifiée pour donner

3.2.5. Les orbites héliosynchrones

Il est possible de modifier les caractéristiques d'une orbite polaire pour obtenir une propriété très intéressante : l'**héliosynchronisme**, c'est-à-dire le fait qu'un point donné du globe est toujours observé à la même heure locale. Cette possibilité est due à la forme aplatie de la Terre, qui crée un mouvement de précession, c'est-à-dire que le plan orbital tourne sur lui-même autour de l'axe des pôles. En choisissant convenablement l'inclinaison et le demi-grand axe de l'orbite, on peut faire en sorte que la vitesse de précession soit exactement de 1 tr/an, ce qui permet l'héliosynchronisme.



Notons que l'héliosynchronisme est contraire aux lois de Kepler, celles-ci faisant l'hypothèse que la Terre est une masse ponctuelle, qui créerait un champ gravitationnel à symétrie sphérique.

3.3. Plates-formes

La plate-forme (encore appelée porteur ou vecteur) est le véhicule qui porte la charge utile, c'est-à-dire le capteur. Une plate-forme spatiale (ou satellite) est constituée de plusieurs sous-systèmes fonctionnels (alimentation électrique, contrôle thermique, télécommunications...) qui concourent au bon fonctionnement de la charge utile. Le sous-système le plus important à connaître pour la photogrammétrie et la télédétection est le SCAO (système de contrôle d'attitude et d'orbite) :

- contrôle d'attitude : les angles de roulis, tangage et lacet, exprimés dans le repère orbital local*, sont mesurés régulièrement par différents procédés (roues à inertie, pointage stellaire) ;
- contrôle d'orbite : la position du satellite est mesurée régulièrement par télémétrie laser ou radiolocalisation.

La plupart des satellites d'observation de la Terre ont une masse comprise entre 1 et 3 tonnes. Cependant :

- il existe de grosses plates-formes qui embarquent plusieurs instruments (la plate-forme ENVISAT qui embarquera 12 instruments en 2001 pèsera 8 tonnes et ne pourra être mise en orbite que par Ariane 5) ;
- la tendance actuelle est de privilégier des plates-formes légères (quelques centaines de kg) et peu coûteuses (la plate-forme générique PROTEUS développée par le CNES s'inscrit dans cette tendance).

3.4. Segment sol

On appelle segment sol (par opposition au segment spatial) l'ensemble des infrastructures disposées sur la Terre et assurant le bon fonctionnement du satellite. Le segment sol permet de :

- envoyer des signaux vers le satellite (commandes d'acquisition d'images mais aussi consignes de vol : changement de configuration, corrections à apporter...) ;
- recueillir des signaux provenant du satellite (réception d'images mais aussi de données sur l'état de santé du satellite).

La mission d'un système d'observation de la Terre suppose un certain nombre de contraintes. En pratique, celles-ci sont partagées entre le segment spatial et le segment sol. Par exemple, si un satellite est relayé par peu de stations de réception, il devra disposer de bonnes capacités d'enregistrement à bord, de manière à pouvoir stocker les images en attendant d'être en visibilité d'une station.

* Repère orbital local : $(\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k})$ tel que \mathbf{k} est porté par la verticale ascendante, $\mathbf{i} = V_{\text{sat}} \wedge \mathbf{k}$ et $\mathbf{j} = \mathbf{k} \wedge \mathbf{i}$.

4. CAPTEURS OPTIQUES

4.1. Généralités

Les capteurs optiques sont des radiomètres imageurs, c'est-à-dire qu'ils mesurent une énergie rayonnée provenant d'une région bidimensionnelle et qu'ils organisent les mesures sous forme d'images. Ils fonctionnent dans les longueurs d'onde optiques, qui se situent entre l'ultraviolet (0,4 mm) et l'infrarouge thermique (3 mm).

Chaque détecteur reçoit, par le biais d'une optique et d'un certain nombre de mécanismes, une énergie $E(\omega, t, \lambda)$ qu'il mesure avec une réponse spectrale $R(\lambda)$ et intègre sur un angle solide $\Delta\omega$, pendant un temps d'intégration Δt et sur une bande spectrale $\Delta\lambda$. On obtient la mesure m , ajustée par un coefficient d'étalonnage A :

$$m = A \int_{\text{angle solide}} \int_{\text{temps d'intégration}} \int_{\text{bande spectrale}} E(\omega, t, \lambda) R(\lambda) d\omega \cdot dt \cdot d\lambda$$

Cette relation montre qu'on ne peut affiner l'une des dimensions d'intégration qu'au détriment des autres. Par exemple, pour accroître sensiblement la résolution spatiale (et donc l'angle solide d'intégration), il faut soit dégrader la résolution spectrale, soit intégrer des photons pendant plus longtemps (par exemple en faisant basculer le capteur pour qu'il reste « braqué » sur sa cible, ou au moyen d'un dispositif de transfert de charges appelé TDI - cf. plus loin).

4.2. Principe de fonctionnement d'un capteur optique

Un capteur optique analogique est conçu pour recueillir et focaliser un rayonnement lumineux (partie optique) et pour sensibiliser une surface photosensible (partie chimique).

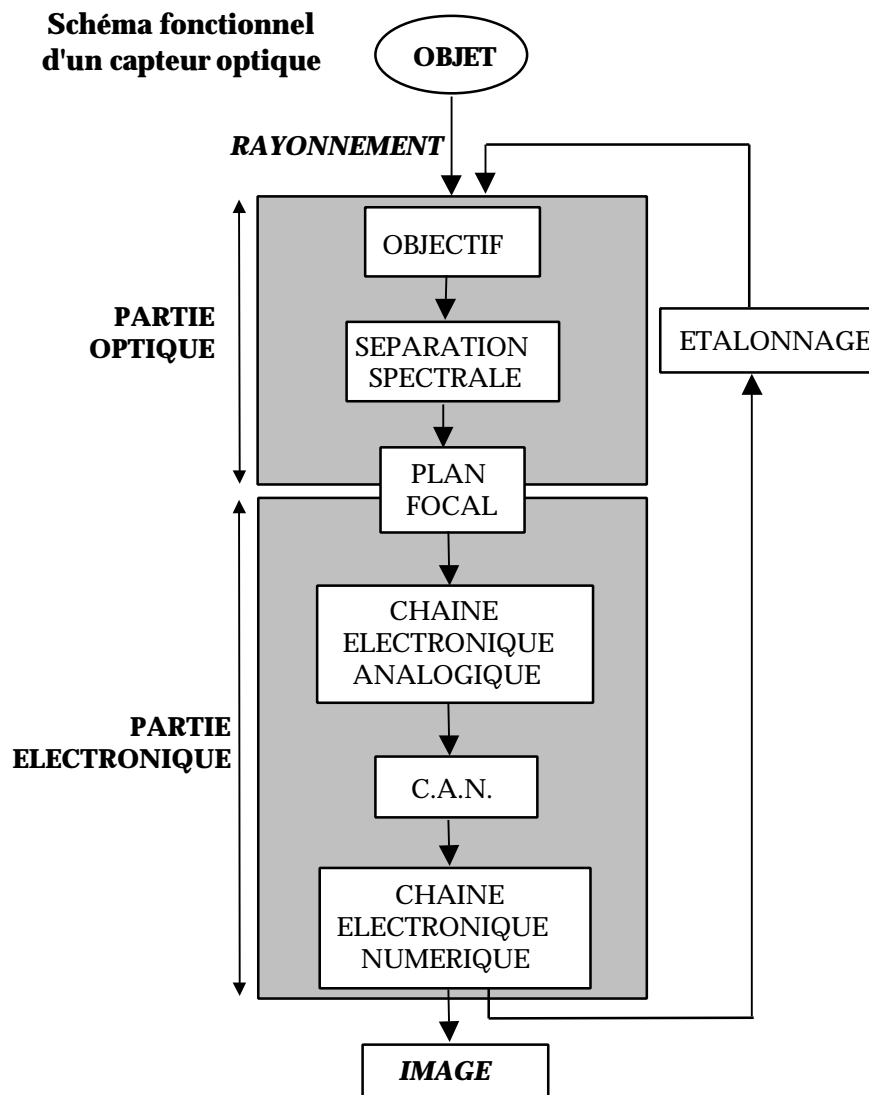
Un capteur optronique est conçu pour recueillir et focaliser un rayonnement lumineux (partie optique) et pour la convertir en un signal électrique (partie électronique). Le principe de fonctionnement d'un capteur optronique est décrit par le diagramme ci-après.

Plan focal

La surface contenant les détecteurs doit se situer le plus près possible de la surface focale de l'objectif. C'est pourquoi on conçoit les objectifs pour qu'ils aient une surface focale plane, et on appelle plan focal la plaque qui supporte les détecteurs.

Le détecteur est un matériau sensible aux rayonnements. Plusieurs phénomènes physiques peuvent être à la base du fonctionnement d'un détecteur :

- effet thermique : le rayonnement modifie la température du matériau (cf. loi du corps noir) ;
- effet électromagnétique : le rayonnement modifie les propriétés électromagnétiques du matériau (conductivité,...) ;
- effet photonique : le rayonnement libère des électrons dans le matériau. Ce dernier effet est utilisé dans les détecteurs CCD en télédétection optique. Ces détecteurs sont constitués d'alliages, généralement à base de silicium.



Le pouvoir séparateur spatial dépend de la taille des détecteurs (de l'ordre de 10 microns), le pouvoir séparateur temporel dépend du temps d'intégration (de l'ordre de la milliseconde). On améliore la résolution spatiale de l'instrument en réduisant la taille des détecteurs ou le temps d'intégration, toutefois cette amélioration s'accompagne d'une diminution de l'énergie reçue et donc du rapport signal-sur-bruit.

Méthodes de balayage

L'image est une information bidimensionnelle : son acquisition exige donc un balayage approprié du paysage qui dépend de la géométrie du plan focal.

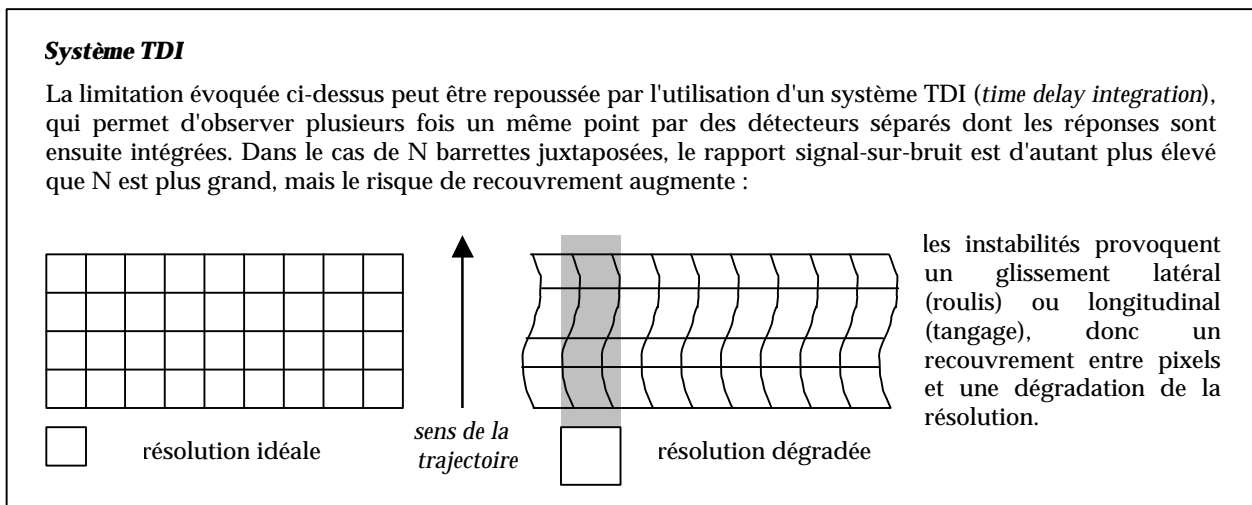
Un plan focal matriciel permet d'observer simultanément tous les points de la scène :

- pas de balayage ;
- risque de flou si le temps d'intégration est trop long vis-à-vis de la vitesse de la plate-forme.

C'est le cas de photographie aérienne traditionnelle.

Un plan focal à une dimension (barrette de détecteurs) exige un balayage à une dimension, dans la direction orthogonale : il est généralement assuré par le déplacement de la plate-forme. On parle de capteur *push-broom*. La résolution dans la direction du déplacement est proportionnelle

au temps d'intégration, compromis entre résolution spatiale (qui exige une intégration brève) et rapport signal-sur-bruit (qui exige une intégration longue).



Balayage mécanique

Un plan focal constitué d'un seul détecteur nécessite un balayage à deux dimensions, généralement constitué de la rotation d'un miroir pour l'une, et d'un mouvement de la plateforme (défilement ou spin) pour l'autre. On parle de capteur *whisk-broom*. L'efficacité du balayage est définie comme le rapport entre le temps utile (passé à observer) et la durée d'acquisition de l'image. Dans le cas d'un miroir tournant, le temps utile est directement proportionnel à l'ouverture angulaire du capteur.

4.3. Caractéristiques des images

La **résolution spatiale** est définie comme le pouvoir de séparation spatiale (à ne pas confondre avec le pas d'échantillonnage). C'est le produit de la résolution angulaire par la distance.

La **résolution spectrale** est définie comme le pouvoir de séparation spectrale, elle dépend de la réponse spectrale de l'instrument dans chaque canal.

La **résolution radiométrique** est définie comme le pouvoir de séparation entre différentes luminances reçues. Dans le cas de capteurs de type *push-broom* comme le HRV de SPOT, la résolution radiométrique est limitée par deux phénomènes :

- un bruit dans le sens des lignes, lié aux différences de sensibilité des différents détecteurs ;
- un bruit dans le sens des colonnes, lié au fonctionnement de la chaîne électronique (bruit thermique, qui augmente avec la température).

La **FTM (Fonction de Transfert de Modulation)** est une mesure du "flou" dans l'image (plus la FTM est élevée, plus l'image est contrastée). Elle est affectée par :

- l'objectif (mise au point) ;
- les détecteurs ;
- la diffusion atmosphérique ;
- le filé dans le cas d'un plan focal 2D ;
- le glissement dans le cas d'un système TDI.

INTRODUCTION A LA TELEDETECTION SPATIALE

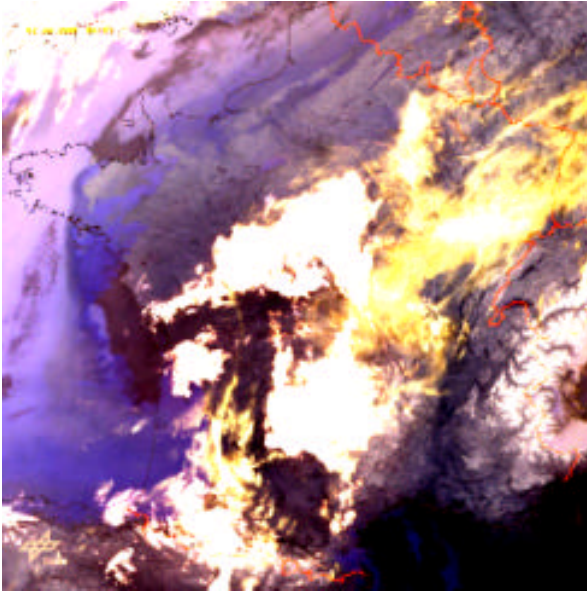
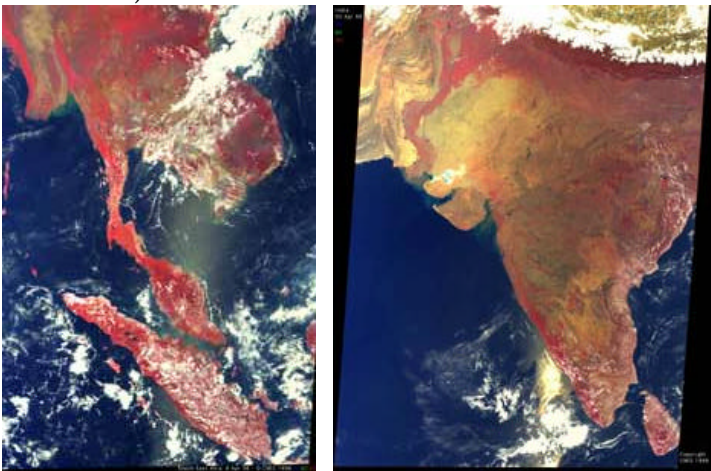


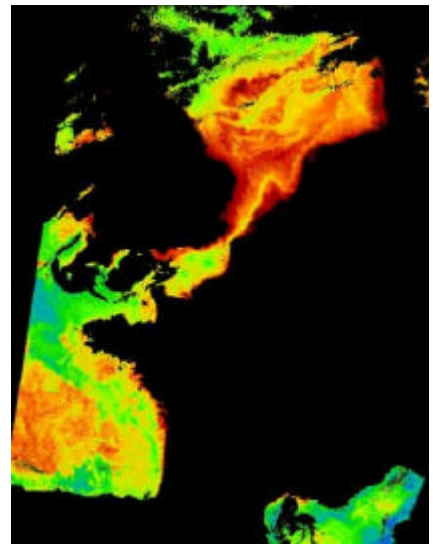
image du capteur AVHRR (advanced very high resolution radiometer) du satellite NOAA. Résolution : env. 1 km.



le satellite SPOT-4 en action



le Sud-Est asiatique et la péninsule indienne vus par le capteur Végétation (passager de SPOT-4)



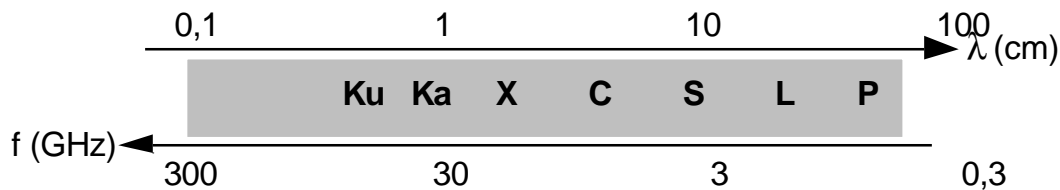
mesure de la chlorophylle par l'instrument japonais OCTS

5. CAPTEURS RADAR

5.1. Rappels sur les propriétés physiques des micro-ondes

Les micro-ondes sont des ondes électromagnétiques caractérisées par des longueurs d'onde comprises entre 1 mm ($f=300$ GHz) et 1 m ($f=300$ MHz).

Les principales bandes de fréquences sont baptisées par des lettres :



L'une de leurs principales caractéristiques est la quasi-transparence de l'atmosphère. Toutefois :

- les courtes longueurs d'onde sont affectées par la troposphère : dispersion de Rayleigh, proportionnelle au contenu en eau et à $1/\lambda^4$, et absorption totale de longueurs d'onde spécifiques par la vapeur d'eau ($f=22$ GHz) et par l'oxygène ($f=60$ GHz) ;
- les grandes longueurs d'onde sont déphasées par l'ionosphère.

Les micro-ondes ont tendance à pénétrer à travers le sol ou la végétation, la transmission étant favorisée par une grande longueur d'onde, une incidence plongeante et un milieu sec (plusieurs dizaines de mètres dans un sol sec et sableux, davantage pour de la neige sèche ou de la glace sèche).

La réflexion sur l'eau est totale. D'une manière générale, l'humidité favorise la réflexion.

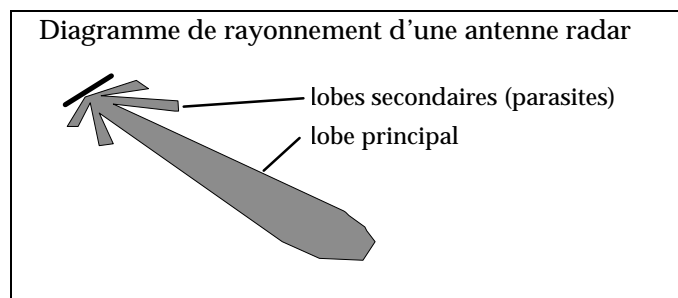
Le comportement de la réflexion dépend des caractéristiques de la surface, et notamment de sa rugosité à l'échelle de la longueur d'onde : un sol peut être rugueux en bande X (réflexion diffuse) et lisse en bande L (réflexion spéculaire).

Le radar imageur mesure la puissance rétrodiffusée par la surface. La puissance reçue est décrite par l'équation du radar :

$$P_r = \frac{P_e G^2 \eta \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma$$

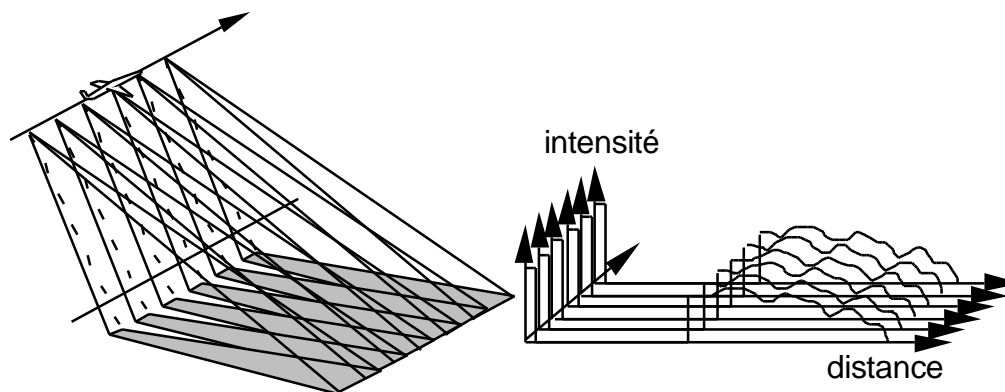
où P_e est la puissance émise, G et η sont le gain et l'efficacité de l'antenne, R est la distance antenne-terrain et σ est une grandeur appelée "section efficace de rétrodiffusion", c'est-à-dire la surface apparente de l'objet détecté pondérée par son coefficient de rétrodiffusion σ° (signature radar). Le coefficient de rétrodiffusion est en général d'autant plus élevé que la surface est plus rugueuse à l'échelle de la longueur d'onde.

Le radar utilise une antenne pour transformer l'énergie électrique en rayonnement (émission) et le rayonnement réfléchi en énergie électrique (réception). Cette antenne est caractérisée par un diagramme de rayonnement qui détermine la proportion d'énergie transmise dans chaque direction.



5.2. Principe de fonctionnement du radar imageur

Le radar imageur produit des images de la surface terrestre en émettant, au moyen d'une antenne, des impulsions de micro-ondes dans un plan perpendiculaire à la trajectoire du porteur.



L'écho de cette impulsion est recueilli par la même antenne et engendre une ligne de l'image, dans laquelle les différents réflecteurs sont localisés en fonction de leur éloignement (temps de propagation aller-retour). L'intensité de l'écho, qui varie du début à la fin de la fauchée, caractérise la réflectivité de la surface. La répétition des impulsions le long de la trajectoire assure la deuxième dimension. Les impulsions sont émises à une cadence notée PRF (*pulse repetition frequency*).

Le signal reçu par le radar est caractérisé par son amplitude et sa phase. C'est pourquoi il est commode de le représenter par une grandeur complexe que l'on peut stocker dans deux canaux notés I (partie réelle) et Q (partie imaginaire). Le niveau de gris est déterminé par le module (ou amplitude) du signal complexe.

L'image obtenue est une représentation 2D de la surface illuminée dans laquelle le niveau de gris, qui représente la réflectivité du terrain, dépend à la fois des caractéristiques de l'onde incidente (longueur d'onde, angle d'incidence, polarisation,...) et des caractéristiques géométriques et diélectriques du terrain (pente, rugosité, humidité,...).

Toutefois l'obtention du coefficient de rétrodiffusion à partir du niveau d'énergie reçue est contaminée par un certain nombre d'artéfacts radiométriques :

- bruit thermique ;
- lobes secondaires ;
- ambiguïtés ;
- défauts d'étalonnage ;
- *speckle*.

Le *speckle* est un chatoiement produit par l'intégration cohérente (c'est-à-dire en amplitude et phase) des échos provenant des constituants d'un même pixel. Les interférences entre ces échos entraînent donc des variations de l'amplitude totale entre pixels voisins. Ce phénomène est généralement décrit comme un bruit, car il entraîne des variations d'intensité entre des pixels de même coefficient de rétrodiffusion. Pourtant, il est déterministe car il dépend uniquement de l'état du terrain et de la géométrie d'acquisition. Il est difficile à filtrer, car il a un comportement multiplicatif (écart-type proportionnel à la moyenne).

Le relief entraîne des artéfacts radiométriques et géométriques dans les images :

- ombres (points ne recevant pas l'onde incidente) ;
- variations d'échelle, celle-ci pouvant devenir nulle (*foreshortening*) voire négative (*layover*).

Avant d'analyser une image le photo-interprète détermine la direction d'illumination et oriente l'image de manière à ce qu'elle soit illuminée de haut en bas.

5.3. Synthèse d'ouverture

L'image radar est référencée par deux coordonnées, appelées **distance** (liée au temps de propagation entre l'antenne et le réflecteur) et **azimut** (liée au numéro de l'impulsion). La résolution en distance est améliorée par compression d'impulsion, la résolution en azimut est améliorée par synthèse d'ouverture.

5.3.1. Compression d'impulsion

La résolution en distance est proportionnelle à la durée τ de l'impulsion émise, puisque deux points du terrain illuminés simultanément ne peuvent pas, en principe, être discriminés ($\delta_r = C\tau/2$). En effet, chaque point éclairé l'est pendant une durée égale à la durée de l'impulsion. Pour améliorer la résolution en distance, il faut donc une impulsion la plus brève possible et donc une très grande puissance d'émission si l'on souhaite recevoir suffisamment d'énergie pour que le signal soit détectable.

La compression d'impulsion permet de remplacer cette prouesse technologique par un traitement astucieux du signal. Elle consiste à émettre un signal fortement modulé en fréquence (ou *chirp*), de telle sorte que deux points du terrain, bien qu'illuminés simultanément, ne le soient pas avec la même fréquence, ce qui permet de les discriminer.

L'image est alors obtenue comme la corrélation entre le signal émis et le signal reçu, et la résolution (largeur du pic de corrélation) est d'autant meilleure que l'impulsion a une longue durée et une large bande de fréquence. Ce traitement, appelé "filtre adapté" (*matched filter*), a notamment pour effet d'augmenter le rapport signal à bruit de la réponse.

5.3.2. Synthèse d'ouverture

La résolution en azimut (c'est-à-dire le long de la trajectoire) est proportionnelle à l'ouverture angulaire du lobe d'antenne, elle-même égale, en première approximation, à λ/D (où λ est la longueur d'onde et D est la longueur de l'antenne dans le sens de la trajectoire). A la distance R on a donc :

$$\delta_{az} = \lambda R / D$$

Pour améliorer la résolution en azimut, il faut donc une antenne la plus longue possible.

Les premiers radars imageurs aéroportés utilisaient une antenne de plusieurs mètres et une longueur d'onde centimétrique pour obtenir une résolution acceptable. Par contre, sans traitement particulier, les caractéristiques instrumentales d'ERS-1 conduiraient à une résolution azimutale de l'ordre de 5 km.

Pour obtenir une résolution décimétrique sans traitement, il faudrait une antenne de plusieurs kilomètres de long, condition physiquement irréalisable. Là encore, on montre que l'on peut remplacer cette prouesse technologique par un traitement astucieux du signal : la synthèse d'ouverture.

Ce traitement est rendu possible par l'effet Doppler, c'est-à-dire par la variation de fréquence, en un point donné, au cours de sa traversée du faisceau. En effet, lorsqu'un point du terrain commence à être éclairé, il est en avant du radar et renvoie donc une fréquence légèrement supérieure à la fréquence porteuse. La fréquence Doppler, définie comme l'écart avec la porteuse, est donc positive. Impulsion après impulsion, la fréquence Doppler diminue, s'annule lorsque le point se trouve dans la direction perpendiculaire à la trajectoire, puis devient négative lorsque le point est à l'arrière du radar.

A une distance donnée, le signal azimutal est donc modulé en fréquence. Il peut donc faire l'objet d'un traitement de compression d'impulsion, pourvu que l'on soit capable de fournir le signal de référence : ceci est possible par le calcul à partir des caractéristiques cinématiques et géométriques du radar. Le résultat de ce traitement est une résolution azimutale constante, égale à la moitié de la longueur de l'antenne :

$$\delta_{az} = D / 2$$

5.3.3. Traitement SAR

Le SAR est un radar imageur qui utilise le principe de la synthèse d'ouverture en azimut. Le traitement SAR est l'ensemble des procédures qui transforment le signal brut (recueil des échos) en image : compression d'impulsion, synthèse d'ouverture, filtrage du *speckle*. Les premiers radars produisaient un signal brut analogique, qui était traité par un corrélateur optique.

L'image issue du traitement SAR contient la phase du signal pour chaque pixel : elle est donc décrite par des valeurs complexes et stockée dans deux canaux appelés partie réelle et partie imaginaire. L'image complexe fournit une amplitude et une phase en tout point :

- l'amplitude (résultat de la détection) permet de produire une image en niveaux de gris ;
- la phase est notamment liée à la géométrie d'acquisition : elle permet d'exploiter un couple d'images par des techniques d'interférométrie.

Quelques radars imageurs embarqués sur satellites

Des radars imageurs sont utilisés depuis les années 60, et les premiers instruments SAR aéroportés ont été développés dans les années 70. En 1978, le premier SAR civil spatial a été embarqué sur le satellite américain SEASAT (il n'a duré que 3 mois). Dans les années 80, deux missions expérimentales de la navette spatiale ont embarqué, pour quelques jours, les radars SIR-A (1981) et SIR-B (1984), en bande L comme SEASAT. La supériorité de SIR-B sur SIR-A résidait dans l'utilisation d'un corrélateur entièrement numérique et surtout dans la possibilité de faire varier l'angle de visée. Cette fonction a permis d'acquérir quelques couples stéréoscopiques, qui ont été très utiles dans la mise au point des techniques de radargrammétrie. Plus récemment ont été lancés les satellites ERS-1 (Agence Spatiale Européenne) et JERS-1 (Japon). En 1994, deux nouvelles missions de la Navette (SIR-C) ont permis ces acquisitions dans différentes longueurs d'onde. Enfin, en 1995, ERS-2 (copie conforme d'ERS-1) a été mis en fonction par l'Agence Spatiale Européenne et RADARSAT par l'Agence Spatiale Canadienne (RADARSAT est caractérisé par une grande souplesse de programmation : taille du pixel, fauchée et angle d'incidence sont au choix de l'utilisateur). De 1991 à 1993, la sonde Magellan, avec un radar imageur à son bord, a cartographié la planète Vénus presque entièrement. Dans les années 2005, la sonde Cassini observera par radar Titan, satellite naturel de Saturne, après un voyage interplanétaire de 8 ans.

5.3.4. Résolution et taille du pixel

La détection (conversion d'une image complexe en image d'amplitude) a pour effet de doubler la largeur de bande du signal. C'est pourquoi l'image d'amplitude doit être échantillonnée avec un pas deux fois plus fin que l'image complexe d'origine (théorème de Shannon). Par exemple, les images ERS-1 ont une résolution de 25 m et un pixel de 12,5m.

5.4. Radars aéroportés

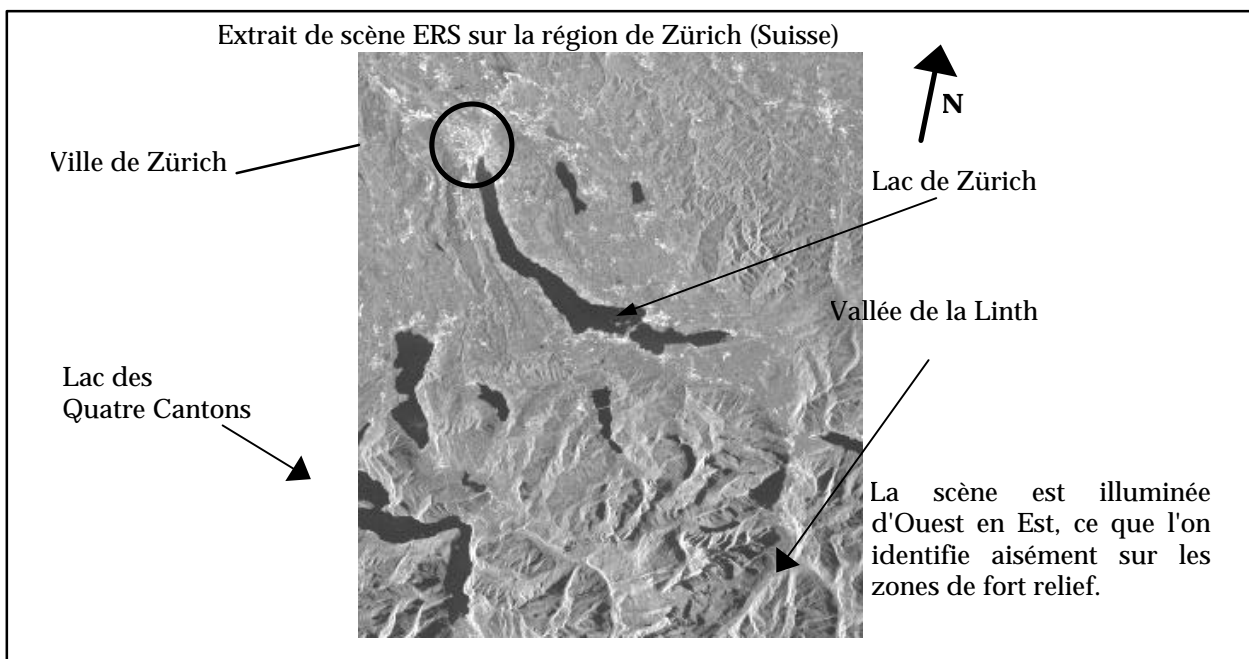
Bien avant d'être embarqués sur satellites, les radars imageurs ont été embarqués sur des avions. Les premiers d'entre eux n'utilisaient pas le principe de la synthèse d'ouverture. Ils ont été employés à des fins cartographiques dès les années 60. Aujourd'hui les radars aéroportés sont des SAR entièrement numériques et parfaitement étalonnés. Couplés à une navigation par GPS différentiel, ils permettent une couverture cartographique avec une précision de quelques mètres sans le moindre point d'appui (cf. chap. 6 sur les avantages du SAR en termes de précision de localisation).

Les radars aéroportés sont utilisés dans deux contextes :

- à des fins commerciales ou opérationnelles, pour des interventions ponctuelles préférant l'avion pour sa souplesse ;
- à des fins expérimentales, pour tester des concepts instrumentaux qui n'ont pas encore été implantés sur des satellites.

La conception des systèmes radars aéroportés et spatiaux ne se heurte pas aux mêmes contraintes techniques :

- pour un radar **spatial**, les contraintes sont de nature **radiométrique** (le capteur doit pouvoir former une image à partir d'échos qui sont toujours très faibles en raison de la grande distance qui sépare l'antenne et le terrain) ;
- pour un radar **aéroporté**, les contraintes sont de nature **géométrique** (les irrégularités de la trajectoire de l'avion doivent être corrigées avant de construire l'image, par un traitement appelé "compensation de mouvement").



6. GÉOMÉTRIE DES IMAGES

6.1. Généralités

Une image de télédétection fournit une représentation bidimensionnelle d'une région appelée **scène**, représentation dans laquelle chaque pixel correspond à un ou plusieurs points de la scène. La plupart des applications de la télédétection nécessitent la connaissance d'une relation assez précise entre une position dans l'image et une position sur le terrain.

6.1.1. Fonction de localisation

Cette relation géométrique entre l'image et le terrain est généralement décrite par une loi mathématique appelée **fonction de localisation**. Cette fonction associe, à chaque point de l'image et étant donnée une altitude, une position planimétrique définie par des coordonnées cartographiques ou géographiques :

$$\begin{array}{c} \text{LOC} \\ (i,j,z) \longrightarrow (x,y) \text{ ou } (l,f) \end{array}$$

La localisation est obtenue, à partir d'une description du capteur, en calculant le lieu de visée correspondant au point (i,j), c'est-à-dire l'ensemble des points de l'espace représentés dans ce pixel (les coordonnées (i,j) ne se limitent pas à des coordonnées entières car elles correspondent à n'importe quel point de l'image). Le lieu de visée est une droite dans le cas d'un capteur optique (axe de visée) et un cercle dans le cas d'un capteur radar (cercle distance-Doppler).

La position géographique ou cartographique est ensuite obtenue comme l'intersection du lieu de visée avec un modèle d'altitude (ellipsoïde de référence, ellipsoïde augmenté de z, MNT...).

La fonction de localisation dépend donc de deux données :

- les caractéristiques du capteur (caractéristiques instrumentales, position, vitesse, attitude,...) ;
- le modèle d'altitude.

6.1.2. Ajustement (ou calage)

En pratique, ces deux données étant incertaines, la fonction de localisation ne donne qu'une position approchée sur le terrain. Si on souhaite l'améliorer, il est alors nécessaire de recourir à une information supplémentaire, par exemple des points d'appui (points dont on connaît la position à la fois dans l'image et sur le terrain). On peut alors améliorer la localisation de deux manières possibles :

- (1) en analysant l'erreur observée en chaque point d'appui et en modélisant cette erreur par une loi d'interpolation de manière à pouvoir la corriger en tout point de l'image ;
- (2) en calculant une fonction de coût à partir des paramètres du capteur et des erreurs observées, et en ajustant les paramètres du capteur de manière à minimiser la fonction de coût.

La première méthode permet d'améliorer la localisation à condition que des points d'appui tridimensionnels soient disponibles. La deuxième méthode permet en outre d'améliorer la connaissance du capteur, pourvu que sa fonction de localisation ait été modélisée de manière générique ; en effet, la deuxième méthode consiste à identifier quels sont les paramètres du système qui sont responsables de l'erreur que l'on observe.

6.2. Géométrie des images optiques

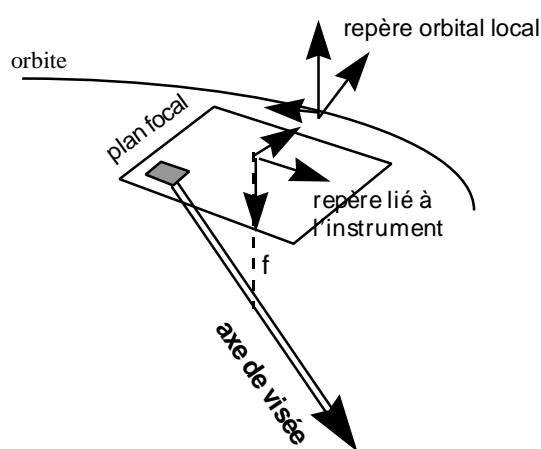
Dans le cas des images optiques, cette fonction de localisation est une droite. On connaît généralement le sens de visée (vers la Terre plutôt que vers le ciel) ce qui permet de le limiter à une demi-droite : en pratique il peut se définir par un point S et un vecteur \mathbf{v} . Deux choses peuvent changer d'un point à l'autre de l'image : le détecteur et la date. La distance focale étant connue, la connaissance du détecteur (et donc de sa position dans le plan focal) indique la direction de visée instantanée, dans un repère lié à l'instrument. La connaissance de la date indique la position de la plate-forme, son attitude, et éventuellement la position du miroir (la date permet donc de déterminer le repère lié à l'instrument).

Il convient ici de distinguer les trois types d'instruments optiques.

(1) Dans le cas d'un plan focal matriciel (ex. photographie aérienne), tous les points de la scène sont vus simultanément : seule change la position dans le plan focal. Le repère lié à l'instrument est donc calculé une seule fois pour toute l'image. Le point S est unique et le vecteur \mathbf{v} est calculé pour chaque détecteur.

(2) Dans le cas d'une barrette de détecteurs (système *push-broom*), tous les points d'une même ligne sont vus à la même date, et chacun de ces points correspond à un détecteur différent.

(3) Dans le cas d'un détecteur unique avec balayage mécanique (système *whisk-broom*), tous les points de l'image sont vus à des dates différentes : l'axe de visée est donc obtenu en composant deux mouvements : celui de la plate-forme (trajectoire, attitude) et celui du miroir.



Dans les 3 cas :

- la position du détecteur dans le plan focal est obtenue en connaissant la position (i,j) du pixel dans l'image et la loi d'échantillonnage ;
- le repère lié à l'instrument est obtenu en appliquant au repère orbital local les matrices d'attitude (roulis, tangage, lacet) et de rotation du miroir, et le repère orbital local est lui-même défini à partir de la position et de la vitesse de la plate-forme.

6.3. Géométrie des images radar

Dans le cas des images radar, le lieu de visée est un cercle. On connaît généralement le sens de visée (à gauche ou à droite) ce qui permet de le limiter à un demi-cercle.

Dans une image radar, les coordonnées i et j ont des sens physiques très différents :

- le numéro de ligne correspond à la date : $t = t_0 + (i-1) \Delta t$; c'est la connaissance de la date qui fournit les informations concernant position, vitesse et attitude.
- le numéro de colonne donne la distance antenne-cible: $R = R_0 + (j-1) \Delta R$.

Il convient ensuite de distinguer deux types de systèmes radar, dont les géométries sont différentes.

Le radar imageur à antenne réelle acquiert les lignes de l'image indépendamment les unes des autres : chacune d'elle est l'écho d'un faisceau qui se trouve dans un plan vertical perpendiculaire à la vitesse, mais qui est affecté par les mouvements de tangage et de lacet (le roulis n'a pas d'effet car il ne modifie pas la distance mesurée).

Quant au SAR (radar à synthèse d'ouverture), il permet de définir une ligne de l'image comme l'ensemble des points du terrain qui à une date donnée ont répondu avec la même fréquence Doppler. Le numéro de ligne correspond donc à un cône, qui a pour sommet la position du capteur, tandis que le numéro de colonne correspond à une sphère, dont le rayon est la distance antenne-cible. Le lieu de visée est l'intersection de ce cône et de cette sphère, c'est donc un cercle dit "distance-Doppler". Dans le cas le plus courant d'une fréquence Doppler très faible, le centre de ce cercle est peu éloigné du capteur et son rayon est peu différent de distance antenne-cible R . Comme le cône ne dépend que de la position et de la vitesse de la plate-forme, l'attitude est sans effet sur le lieu de visée.

L'attitude, qui constitue le poste d'erreur prépondérant dans la localisation des images optiques, n'a pas d'effet sur la géométrie des images SAR. C'est pourquoi la géométrie du SAR est beaucoup plus précise que la géométrie optique, ce qui permet même d'envisager les images SAR comme des sources de points d'appui, pour la rectification géométrique des images optiques, dans les régions qui en sont dépourvues.

6.4. Qualité géométrique des images

La qualité géométrique des images de télédétection peut être évaluée selon différents critères, les plus classiques étant :

- précision de localisation ;
- altération des longueurs (caractérise les distorsions géométriques) ;
- superposabilité (multibande, multitemporelle, etc.).

Par commodité, on a l'habitude de considérer séparément les performances géométriques et radiométriques des images. Cependant, même si la géométrie peut se modéliser indépendamment au moyen d'équations, la mise en œuvre d'une évaluation géométrique ne peut se concevoir sans une certaine qualité radiométrique. En effet, comment peut-on saisir des points de contrôle, mesurer des distorsions et plus généralement parler de géométrie dans une image que le bruit ou le filé auraient rendue illisible d'un point de vue radiométrique ?

INTRODUCTION A LA TELEDETECTION SPATIALE

DEUXIÈME PARTIE
TRAITEMENT D'IMAGES

INTRODUCTION A LA TELEDETECTION SPATIALE

7. INTRODUCTION AU TRAITEMENT NUMÉRIQUE DES IMAGES

7.1. Le traitement d'images, un outil pour la télédétection

Le traitement des images est utilisé dans de nombreux domaines scientifiques ou industriels, chacun de ces domaines ayant contribué à donner à cette discipline son jargon et ses performances : citons la robotique, l'astronomie, la sécurité, la médecine. Les notions générales présentées ici sont valables pour tous les domaines d'application, mais le jargon et les illustrations sont évidemment liés aux besoins propres de la photogrammétrie et de la télédétection.

7.2. Codage des images

Le codage d'une image de télédétection, c'est-à-dire sa représentation sur un certain nombre de niveaux radiométriques, doit être cohérent avec :

- la sensibilité du capteur (ou résolution radiométrique, c'est-à-dire son aptitude à distinguer deux luminances proches) ;
- les capacités de l'utilisateur en termes de stockage, de calcul, d'affichage, etc.

La plupart des images numériques sont codées sur 8 bits ou 1 octet (c'est-à-dire 256 niveaux), toutefois il est fréquent que les niveaux ne soient pas tous utilisés. On peut trouver aussi des stockages différents (par exemple 6, 12 ou 16 bits).

Le résultat du codage est une image numérique dont le volume en octets est :

$$\text{volume} = \text{nlig} \times \text{ncol} \times \text{nca} \times \text{noct}$$

où nlig est le nombre de lignes
 ncol est le nombre de colonnes
 nca est le nombre de canaux
 noct est le nombre d'octets par pixel

7.3. Format des images numériques

L'image est un tableau bidimensionnel de mesures radiométriques. Elle a une certaine géométrie, que l'on peut appréhender sur un écran d'ordinateur ou sur un tirage papier. Cependant, le fichier qui contient l'image n'a pas de géométrie, il est une simple succession d'octets. La manière dont ces octets doivent se réorganiser pour former une image bidimensionnelle doit donc être spécifiée par un **format**.

Il existe de nombreux formats (JPEG, GIF, EPS, TIF, RASTERSUN, BITMAP...). La première information dont doit disposer un logiciel au moment d'ouvrir un fichier image est le format dans lequel il peut lire cette image. Dans la plupart des cas, cette information est fournie avec l'image. Dans des cas moins favorables, il faut préciser le format de manière explicite. Dans des cas encore moins favorables, le logiciel est incapable de lire une image de ce format et il faut effectuer une conversion par ailleurs.

Le format définit est souvent associé à une procédure de compression, qui permet de réduire le volume de données avec une dégradation limitée de la qualité radiométrique. Plus on souhaite comprimer le volume des données, plus il faut s'attendre à ce que la radiométrie soit dégradée.

A titre d'exemple, on montre ici une image de 51 kilo-octets (à gauche), que l'on a ensuite enregistrée au format JPEG en la stockant sur 3 ko (au centre), puis sur 1 ko (à droite).



7.4. Principaux types de traitement numérique

Le traitement numérique intervient à plusieurs stades de la chaîne d'acquisition et d'exploitation des images de télédétection, en particulier :

- le prétraitement, qui consiste à construire l'image à partir d'un signal brut ou à améliorer la qualité de l'image avant l'exploitation ;
- l'élaboration de produits à base d'images, en général des iconocartes numériques, mais aussi des produits spécialisés ;
- l'exploitation d'images numériques, qui peut s'envisager de manière automatique, semi-automatique ou visuelle, et qui va jusqu'à l'analyse de scène.

L'extraction automatique d'information à partir d'images numériques est une opération délicate, car il est bien difficile d'automatiser l'interprétation d'une image, tâche normalement confiée à un photo-interprète c'est-à-dire à un être humain doté d'une intelligence, d'une mémoire, d'une faculté d'adaptation à des situations nouvelles, d'une conscience de son incertitude et d'une faculté de mise à jour de ses connaissances dont ne dispose aucune machine, aussi puissante soit-elle. On peut donc envisager :

- une exploitation visuelle assistée par ordinateur, dans laquelle l'opérateur a la responsabilité de l'interprétation mais l'ordinateur est utilisé pour l'affichage, pour les manipulations de base (zoom, déplacement, amélioration du contraste, filtrages,...) et pour la saisie (dessin de plans, sauvegarde de fichiers graphiques...) ;
- une exploitation semi-automatique dans laquelle des tâches simples et répétitives sont confiées à l'ordinateur sous le contrôle de l'opérateur, par exemple des tracés de contours, des détections d'objets prédéfinis, etc. le rôle de l'opérateur pouvant être :
 - l'amorce du traitement pour éviter à la machine la recherche fastidieuse d'un détail de l'image qui "saute aux yeux" ;
 - l'entraînement, c'est-à-dire la démonstration sur quelques échantillons d'un traitement que l'ordinateur va ensuite reproduire sur toute l'image ;
 - le contrôle et la correction des résultats proposés par l'ordinateur ;
- une exploitation automatique, généralement limitée à des tâches très simples et répétitives, par exemple la recherche d'une forme prédéfinie ou le calcul d'indices texturaux.

Contrairement aux prétraitements, qui sont généralement mis en œuvre de manière standard (c'est-à-dire sans préjuger de l'application), l'exploitation numérique contient souvent des étapes d'amélioration guidées par un besoin thématique, c'est-à-dire conçues pour faciliter l'extraction d'un type d'information bien défini.

7.5. Amélioration radiométrique

L'amélioration radiométrique consiste d'abord à corriger les effets des différents artefacts qui perturbent la mesure radiométrique, notamment les défauts du capteur et le voile atmosphérique. Après ces corrections, qui devraient se faire quel que soit l'usage que l'on veut faire de l'image, on peut envisager des améliorations plus sélectives, guidées par l'appréciation de l'utilisateur.

Le traitement le plus simple consiste à redistribuer les niveaux de gris (ou les couleurs) de manière à mieux utiliser la palette disponible. On parle d'étalement de l'histogramme ou de *stretching*.

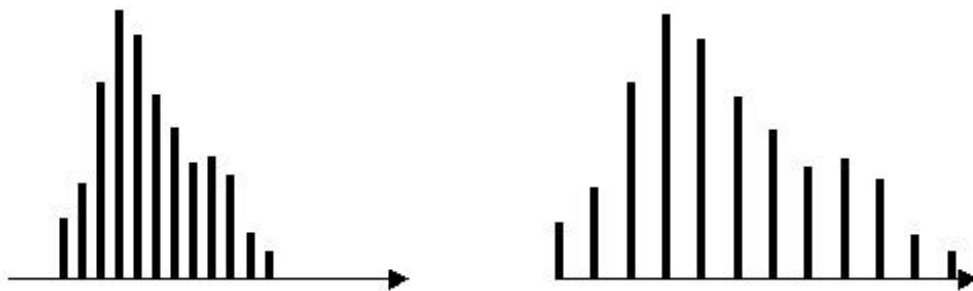
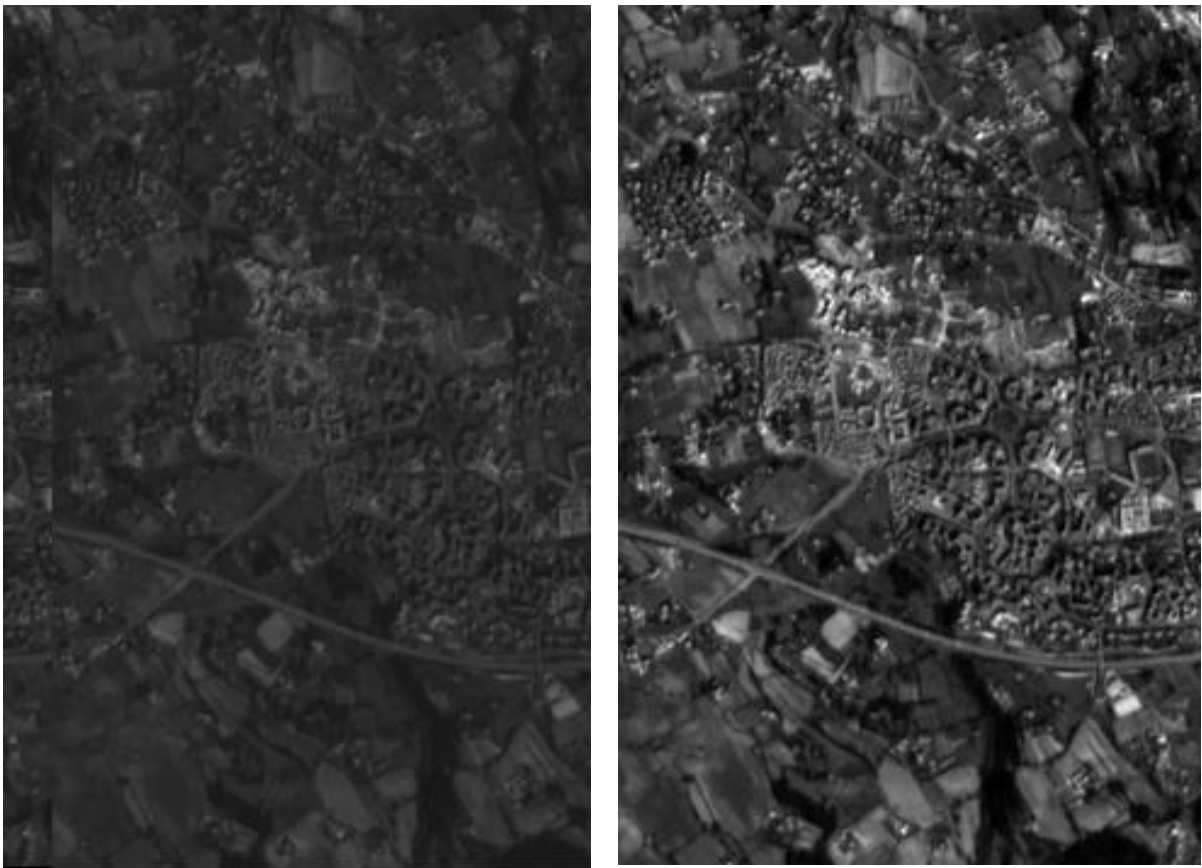
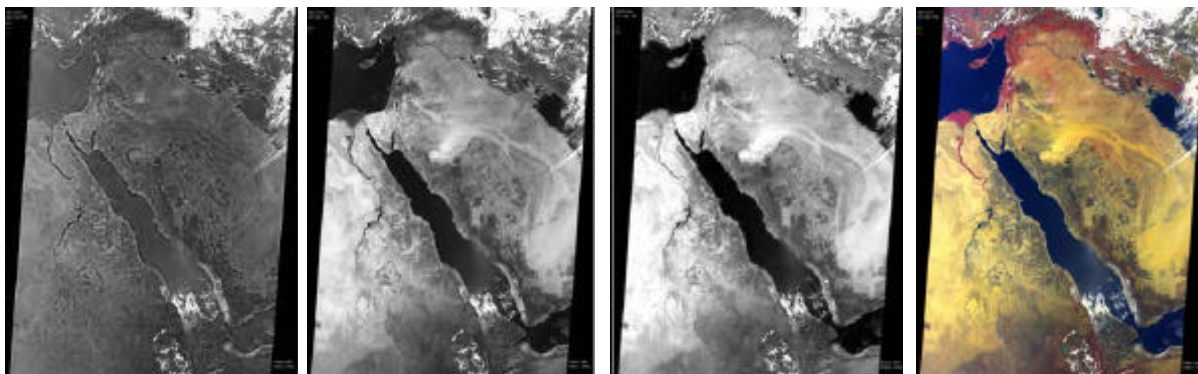


Image SPOT panchromatique sur une région péri-urbaine du Sud de la France, avant (à gauche) et après (à droite) étalement de l'histogramme.

7.6.1. Composition colorée

La composition colorée est une combinaison visuelle de 2 ou 3 différentes images, chacune étant affichée sur l'un des plans de couleur de l'écran. Dans l'exemple suivant, 3 canaux d'une scène végétation ont fait l'objet d'une composition en "fausses couleurs" (l'infrarouge est codé en rouge, c'est la couleur qui domine dans le delta du Nil en raison de la réflectance élevée de la végétation dans le proche infrarouge).



canal bleu

canal rouge

canal infrarouge

composition colorée



On peut faire une composition colorée avec n'importe quel type d'images, pourvu qu'elles soient superposables géométriquement. Ci-contre, composition colorée de 3 images du radar aéroporté E-SAR sur un site agricole : X-HH en bleu, C-HH en vert, C-VV en rouge (fusion multibande et multipolarisation)

7.6.2. Synthèse de néo-canaux

Un néo-canal est typiquement une opération arithmétique entre canaux, destinée à mettre en évidence certaines caractéristiques du paysage de manière plus nette que les images d'origine. Par exemple, l'indice de végétation exploite la signature spectrale de la végétation (réflectance très élevée dans le proche infrarouge et très basse dans le rouge) :

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R} \text{ où IR désigne la réflectance infrarouge et V la réflectance visible.}$$

Cet indice n'a pas de sens physique (il ne s'agit pas d'une grandeur mesurée) mais il constitue un indicateur relativement fiable de l'activité chlorophyllienne de la végétation.

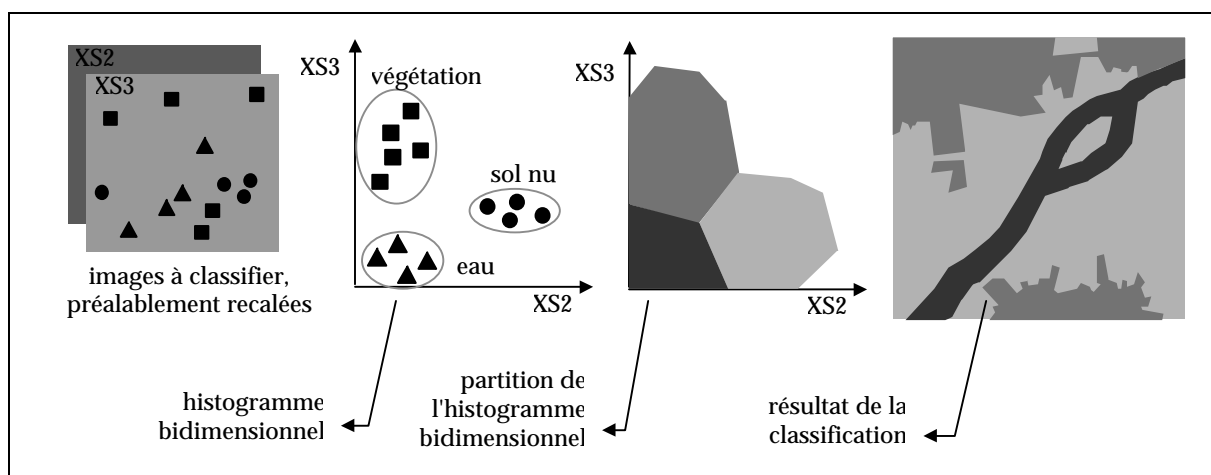
Ci-dessous un indice de végétation moyen calculé sur 10 jours à partir de mesures de l'instrument Végétation (passager de SPOT-4).



7.6.3. Classification

Les images recalées peuvent faire l'objet d'une classification, opération qui consiste à segmenter la scène en différentes catégories en s'appuyant sur les valeurs radiométriques fournies par différentes images. Dans une mise en œuvre au niveau du pixel, la classification consiste à analyser et partitionner l'histogramme à N dimensions correspondant à l'ensemble de N images. Si le choix des images est adapté aux catégories que l'on cherche, les pixels appartenant à la même classe doivent apparaître regroupés dans l'histogramme. L'illustration ci-après montre comment un histogramme à 2 dimensions peut être partitionné. Le résultat est une carte thématique divisée en classes d'occupation du sol.

On distingue les classifications supervisées, guidées par un opérateur qui impose les classes et choisit des échantillons représentatifs, et les classifications non supervisées qui regroupent les pixels en "paquets" de manière automatique.



7.7. Appariement

L'appariement consiste à rechercher des points homologues dans deux ou plusieurs images, c'est-à-dire des points qui représentent le même point du terrain. C'est donc une phase incontournable pour la plupart des opérations de fusion d'images. Ainsi, on utilise des techniques d'appariement pour recaler entre elles des images acquises sur un même paysage par des capteurs différents ou à des dates différentes, ou encore pour automatiser la vision stéréoscopique.

La méthode d'appariement la plus simple, utilisée notamment pour extraire un modèle numérique de terrain à partir d'un couple stéréoscopique d'images optiques (par exemple SPOT), est la **corrélation automatique** sur des fenêtres carrées (cf. encadré).

Le problème consiste, pour un point donné de l'image gauche, à trouver son point homologue dans l'image droite. Le candidat est celui qui maximise le coefficient de corrélation entre 2 fenêtres centrées sur les 2 points.

Le maximum théorique de la corrélation, appelé pic de corrélation, ne se situe généralement pas sur l'une des positions testées : on procède donc à une interpolation pour estimer la vraie position du pic. Ce qui permet d'apparier des images avec une précision sub-pixellaire.

La recherche de l'homologue serait très laborieuse si, pour chaque point de l'image gauche, on explorait toute l'image droite. En pratique, on limite le domaine d'exploration grâce à un prédicteur qui s'appuie sur les paramètres de prise de vue, mais aussi sur la solution trouvée pour le point précédent.

Le coefficient de corrélation est un critère de ressemblance entre deux signaux S_1 et S_2 . Il est défini par :

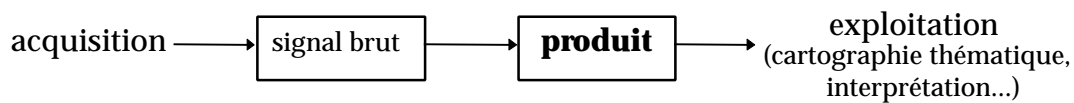
$$\text{COR}(S_1, S_2) = \frac{\sum_{i,j} (S_1(i, j) - \bar{S}_1)(S_2(i, j) - \bar{S}_2)}{\sqrt{\sum_{i,j} (S_1(i, j) - \bar{S}_1)^2} \sqrt{\sum_{i,j} (S_2(i, j) - \bar{S}_2)^2}}$$

Il vaut 1 lorsque les deux signaux sont égaux ou fonction affine l'un de l'autre, -1 lorsqu'ils sont le négatif l'un de l'autre, et se rapproche de 0 lorsqu'ils deviennent dissemblables.

8. ÉLABORATION DE PRODUITS

8.1. Généralités

Les utilisateurs de la télédétection utilisent des "produits" issus du signal transmis par un satellite. Un produit est donc une donnée qui se trouve à une phase intermédiaire entre le signal mesuré et l'information utile. Plusieurs niveaux de complexité peuvent être proposés, ils diffèrent par leur coût, leur délai d'exécution, leur géométrie, leur contenu en information, etc.



Le choix d'un produit dépend des moyens dont dispose l'utilisateur et de l'application envisagée. A un produit donné doivent être associées un certain nombre de données auxiliaires : plus le produit est élaboré, moins les données auxiliaires sont utiles, car elles ont déjà été prises en compte dans les étapes antérieures du traitement.

8.2. Prétraitement des images

On parle de prétraitement pour désigner deux types d'opérations :

- l'élaboration d'une image à partir d'un signal brut :
 - synthèse d'ouverture dans le cas d'un capteur SAR ;
 - raboutage dans le cas d'un *push broom* à plusieurs barrettes,...
- l'amélioration de l'image :
 - visant à rendre l'image conforme aux spécifications (correction des défauts, étalonnage radiométrique par exemple) ;
 - visant à rendre l'image plus lisible (lissage ou, au contraire, rehaussement des contrastes).

Le prétraitement suppose une bonne connaissance du capteur et des conditions d'acquisition. Il n'est pas soumis à une application thématique particulière.

8.3. Elaboration d'iconocartes numériques

L'interprétation d'images de télédétection se fait sur l'image (qui a souvent subi un prétraitement de base) ou sur un produit plus élaboré.

Une iconocarte (appelée spatiocarte dans le cas d'une image satellite) est une image que l'on a géocodée, c'est-à-dire rééchantillonnée dans une projection cartographique, et qui a subi éventuellement des surcharges graphiques, issues ou non de l'interprétation de l'image elle-même. Des exemples de photographies aériennes géocodées sont donnés à la fin de ce chapitre.

Le géocodage comporte toujours une phase de rééchantillonnage, qui affecte la radiométrie et la texture de l'image : cet effet doit être pris en compte lors de l'interprétation.

Principales phases de l'élaboration d'une iconocarte :

- prétraitements radiométriques (typiquement : correction des lignages, lissage) ;
- géocodage (i.e. mise en conformité sur un ellipsoïde ou un MNT, utilisant la fonction de localisation inverse) :
 - calcul de l'encombrement ;
 - détermination d'une grille de localisation inverse ;
 - rééchantillonnage ;
- ajustement inter-image (dans le cas d'une mosaïque) ;
- habillage cartographique (quadrillage, interprétation).

8.4. Elaboration de produits spécialisés

Certaines applications s'appuient sur un produit spécialisé, issu d'une ou plusieurs images, et dont l'usage répété justifie la mise en place d'une chaîne de traitement industrielle. Citons à titre d'exemples :

- une carte de température (issue d'images thermiques) ;
- une carte d'indice de végétation (issue d'images visible et infrarouge) ;
- un produit interférométrique (module, cohérence et franges) ;
- un produit multispectral haute résolution (SPOT P+XS) ;
- une composition colorée.

8.5. Caractéristiques des produits analogiques

Les produits analogiques sont caractérisés par :

- une géométrie : c'est la géométrie du produit numérique à l'échelle près ;
- une échelle : elle est définie comme l'échelle d'une carte ; pour un produit non rectifié l'échelle peut être anisotrope (si le pas d'échantillonnage est différent dans les deux directions) ;
- une palette de couleurs, liée à la nature de l'information radiométrique et à la technique d'impression ;
- d'éventuelles surcharges, décrites par une légende et liées à l'utilisation envisagée.

L'échelle à laquelle on peut tirer une image d'un capteur donné dépend de la résolution de l'imprimante (généralement exprimée en microns ou en nombre de points par pouce) et de la taille du pixel (en mètres).

Pour quelle résolution d'imprimante a-t-on :

- une image SPOT panchromatique au 1 : 100 000 ?
- une image Landsat TM au 1 : 250 000 ?
- une image Météosat (résolution optimale 2,5 km) au 1 : 40 000 000 ?

8.6. Exemples de niveaux de produits

<i>exemple des produits SPOT</i>	<i>exemple des produits ERS</i>
1A : corrections radiométriques (étalonnage des détecteurs)	RAW : signal brut complexe
1B : correction de l'effet panoramique et de la rotation de la Terre	SLC : image complexe une vue, en distance oblique
2A : mise en conformité sur un ellipsoïde (sans point d'appui)	PRI : image détectée, 3 vues, en distance horizontale
2B : mise en conformité sur un ellipsoïde (avec points d'appui)	GEC : mise en conformité sur un ellipsoïde
3 : mise en conformité sur un MNT	GTC : mise en conformité sur un MNT

9. ANALYSE MULTI-ÉCHELLE

9.1. Généralités

Dans les données géographiques en général et dans les images de télédétection en particulier, l'information représentée dépend étroitement de l'échelle (en termes simples : on ne voit pas la même chose de près et de loin). C'est notamment le cas lorsqu'on observe un paysage dans lequel plusieurs types de surfaces alternent à une cadence donnée. Par exemple :

- un paysage de mangroves (alternance d'eau, de vase et d'arbustes très denses) ;
- un paysage de vignes (alternance de feuillage et de terre) ;
- un paysage péri-urbain (alternance de bâtiments et d'espaces verts).

Dans ces exemples, un accroissement de l'échelle, autrement dit un zoom, permet de passer brutalement d'un mélange homogène (que l'on pourra baptiser "mangroves", "vignes" ou "péri-urbain") à l'identification de chaque composant. Parfois, cette apparition de détails est plus progressive : c'est le cas de tous les objets dits "fractals", comme les nuages, ou encore le relief terrestre, où chaque zoom laisse entrevoir des crêtes et des vallées de plus en plus petites, l'exemple le plus célèbre étant la côte de Bretagne popularisée par l'ouvrage de Benoît Mandelbrot "Les Objets Fractals" (1975).

Que cela se fasse par à-coups ou progressivement, un zoom laisse toujours apparaître de nouveaux détails. Pourtant, voir "plus" n'implique pas obligatoirement voir "mieux", et il faut se méfier de la tendance, malheureusement trop répandue, qui consiste à réclamer une résolution toujours plus fine.

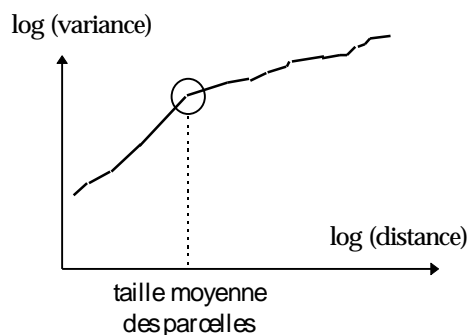
Par exemple, en zone forestière, l'analyse d'une photographie aérienne haute résolution (quelques décimètres) permet de voir chaque arbre, ce qui permet de repérer un arbre malade. Au contraire, une image Landsat TM (30 m de résolution) est plus adaptée à une cartographie par zones (feuillus, résineux, etc) car elle n'est pas contaminée par la présence d'un arbre isolé. Ainsi, le choix de l'échelle d'observation doit se faire en tenant compte du réel besoin de l'application.

Pour cela, il faut pouvoir représenter les données dans l'espace des échelles. Une telle représentation, appelée analyse spectrale, consiste à se demander à quelle cadence ont lieu, statistiquement, les transitions de niveaux de gris.

9.2. Outils d'analyse multi-échelle

Les principaux outils mathématiques utilisés pour l'analyse multi-échelle des images sont :

- le **variogramme** : c'est le graphique qui représente, dans une échelle logarithmique, la variance (critère d'hétérogénéité) en fonction de la distance. Le variogramme est le plus souvent croissant, c'est-à-dire que les variations radiométriques sont statistiquement plus importantes sur $n+1$ pixels que sur n pixels. La pente du variogramme est un critère de rugosité : une pente forte caractérise un signal « lisse », sans transitions brutales, tandis qu'une pente faible caractérise un signal « accidenté ». Une surface dont le variogramme a une pente constante présente la même texture à toutes les échelles. On dit qu'elle est auto-similaire ou fractale.



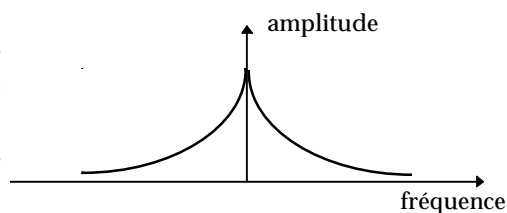
Lorsqu'un changement de pente apparaît dans le variogramme pour une distance donnée (c'est-à-dire à une échelle donnée), il révèle en général la présence d'une texture particulière, et la distance correspond à la taille des objets qui la constituent (maisons, arbres, parcelles agricoles, vagues, etc). Par exemple, le variogramme d'une image en région agricole (cf. ci-contre) peut présenter un changement de pente caractéristique pour une distance horizontale égale à la taille moyenne des parcelles :

◇ pour des distances plus courtes, les transitions radiométriques sont plus faibles car les pixels sont tirés majoritairement à l'intérieur d'une même parcelle ;

◇ pour des distances plus longues, les transitions radiométriques sont plus fortes car les pixels sont tirés majoritairement dans des parcelles différentes.

- la **transformée de Fourier** : elle permet de décomposer toute image en une série de "vagues" sinusoïdales, chacune d'elles correspondant à une fréquence spatiale (f_x, f_y) particulière. La transformée de Fourier d'une image (ou spectre de l'image) associe à chaque fréquence spatiale l'amplitude de la vague.

Les basses fréquences (c'est-à-dire les vagues les plus longues) ont généralement une plus grande amplitude que les hautes fréquences, ce qui donne aux spectre des paysages naturels l'allure typique ci-contre :



Comme le variogramme, le spectre d'une image fait apparaître les fréquences qui s'accompagnent d'un changement de texture.

Il existe d'autres outils mathématiques d'analyse fréquentielle des images : transformée en ondelettes, matrice de co-occurrences, autocorrélation, etc.

Tous ces outils permettent d'extraire, dans une image, un phénomène qui se caractérise par une échelle particulière. On peut ainsi sélectionner un champ de vagues dans une image ERS sur l'océan, les routes d'une largeur donnée dans une photographie aérienne etc.

9.3. Changement d'échelle

D'après le postulat posé au début de ce chapitre, il est évident qu'un changement d'échelle modifie l'information représentée. Il est donc important de bien spécifier les méthodes de changement d'échelle en fonction de ce que l'on souhaite préserver lors de ce changement.

Le **sur-échantillonnage** (ou zoom) consiste à extrapoler l'information à une échelle plus fine. Il existe deux principales familles de zoom : ceux qui sont fidèles à la valeur moyenne, et ceux qui sont fidèles à la texture.

- Les premiers cherchent à obtenir une bonne prédiction pour la valeur du nouveau pixel. Ils utilisent des outils d'interpolation de surfaces comme le "plus proche voisin" (qui crée un palier autour de l'ancienne) ou des fonctions continues, parfois dérivables, comme les interpolateurs bilinéaire (moyenne de 4 voisins) ou bicubique (moyenne de 16 voisins). Ces interpolateurs conduisent à des surfces localement lisses, ce qui, en termes d'image, se traduit par du flou.
- Les seconds fournissent souvent une mauvaise prédiction de la valeur moyenne, mais ils cherchent à reproduire, à une échelle inférieure au pixel, une texture comparable à celle que

l'on observe à l'échelle de plusieurs pixels. On citera par exemple l'IFS (*Iterated Function System*), le krigeage, et le RMD (*Random Midpoint Displacement*, une méthode de zoom fractal basée sur la théorie du mouvement brownien).

Le **sous-échantillonnage** consiste à comprimer l'image pour la faire tenir sur un nombre réduit de pixels. Cette opération est utilisée pour transmettre des données avec des débits modérés, ou encore pour afficher sur un écran une scène entière dans laquelle le photo-interprète pourra choisir une zone à afficher en pleine résolution. Plusieurs approches peuvent être envisagées :

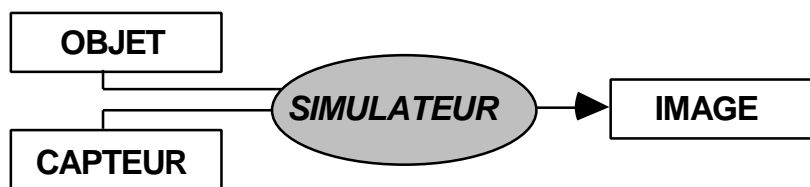
- l'approche la plus simple consiste à sélectionner un pixel sur N , elle conduit à des textures artificielles et, en fin de compte, à des panoramas difficilement interprétables ;
- l'approche la plus rigoureuse d'un point de vue physique consiste à moyenner des pixels voisins, simulant en quelque sorte l'image qu'aurait fourni un capteur moins résolu ;
- l'approche la plus efficace pour la lecture de l'image finale consiste à effectuer un sous-échantillonnage sélectif, pour conserver une résolution fine sur les détails sélectionnés et lisser fortement les autres secteurs.

10. PROBLÈME INVERSE EN TÉLÉDÉTECTION

10.1. Généralités

Dans de nombreux problèmes scientifiques, le raisonnement s'appuie d'abord sur une relation de causalité : une cause entraîne un effet. Or, le plus souvent, c'est l'effet que l'on observe : l'astronome observe le mouvement des étoiles, le médecin observe un symptôme, l'environnementaliste observe un taux de pollution, etc. L'autre partie du raisonnement, qui consiste à identifier les causes, se mène souvent par des approches intuitives ou, au mieux, récursives : on parle alors de problème inverse. La télédétection n'échappe pas à cette règle.

Les connaissances scientifiques permettent, dans les limites qui sont les leurs, de prédire l'image qu'un capteur donné offrirait d'un objet donné, sous réserve que l'on connaisse à la fois ce capteur et cet objet de manière parfaite. La prédiction de l'image résultante est en fait une simulation, comme l'indique le schéma ci-dessous.



Comme on va le montrer, la simulation est au cœur des problèmes de télédétection, car c'est grâce à elle que l'on peut "retourner en arrière", c'est-à-dire retrouver, par une technique d'inversion, les causes à partir des effets.

Dans tous les domaines scientifiques, le problème inverse suppose que l'on dispose à la fois :

- d'une observation ;
- d'une loi physique.

Faisons une analogie avec le tir à l'arc. Le tireur peut, après son premier essai, améliorer sa performance grâce à :

- une observation (la position de sa première flèche sur la cible) ;
- une loi physique (pour tirer plus haut sur la cible, il doit relever son arc d'un petit angle).

Cette loi physique peut être explicite (issue d'un calcul qui aurait identifié toutes les forces en jeu) ou, le plus souvent, implicite (donc affinée uniquement par les entraînements répétés). Comme cette loi est imparfaite, le tireur ne pourra parfaire son tir qu'au bout de plusieurs itérations.

10.2. Application à la télédétection

De même, en télédétection, le problème inverse s'appuie sur une observation (l'image) et sur une loi physique (visualisée par la simulation). Il permet de résoudre différentes catégories de problèmes :

- analyser l'objet en connaissant le capteur (c'est le problème le plus général en télédétection) ;
- analyser le capteur en connaissant l'objet (c'est le problème de l'étalonnage) ;
- enfin la télédétection s'appuie fréquemment sur une approche hybride dans laquelle on améliore à la fois la connaissance de l'objet et du capteur à partir d'une connaissance approximative de chacun d'eux.

11. INTERFEROMETRIE RADAR

11.1. Principe

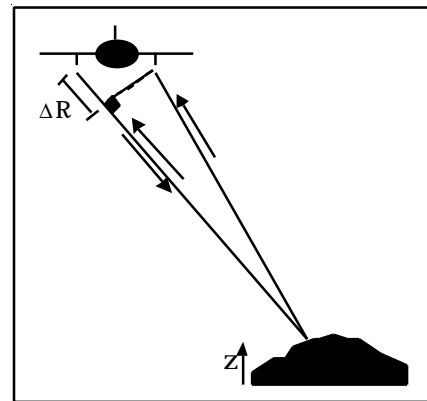
L'interférométrie radar consiste à exploiter l'information géométrique contenue dans la phase du signal radar. Plus précisément, si deux échos issus d'un même réflecteur sont recueillis en deux positions légèrement différentes, le déphasage $\Delta\Phi$ entre ces deux échos est proportionnel à la différence de chemin parcouru ΔR , elle-même liée à l'altitude z du terrain par une relation plus ou moins simple.

L'interférométrie radar est utilisée pour deux applications :

- la restitution du relief ;
- la mesure de déformations centimétriques.

La mise en œuvre de l'interférométrie radar peut se faire de deux manières :

- si le radar ne dispose que d'une antenne (c'est le cas le plus général, notamment pour les satellites), deux passages successifs sont alors nécessaires ;
- si le radar dispose de deux antennes, les échos peuvent être recueillis simultanément.



La relation entre $\Delta\Phi$ et z est soumise à trois contraintes importantes.

Première contrainte : le déroulement des franges

Le déphasage $\Delta\Phi$ n'est connu que modulo 2π et l'image des déphasages, appelée **interférogramme**, est constituée de franges d'interférence. Pour retrouver la phase absolue à une constante près, il faut "dérouler" les franges (de même que l'on doit dérouler une bobine de fil pour connaître la longueur du fil). Lorsque les franges sont larges et peu bruitées, le déroulement peut se faire automatiquement. En cas de fort relief (les franges sont alors resserrées) ou de modifications de la surface entre les deux acquisitions (le déphasage est alors bruité), le déroulement pose problème et une intervention manuelle s'impose.

Deuxième contrainte : la cohérence de phase

Idéalement, les deux valeurs de phase que l'on compare ne doivent différer que d'un écart qui dépend de la différence de chemin parcouru. Cela suppose que les deux échos représentent la même portion du terrain et que la surface n'a pas été modifiée. On dit alors que l'interférogramme présente une cohérence élevée. Deux causes peuvent dégrader la cohérence :

- les deux échos ne sont pas parfaitement recalés géométriquement, problème qui se pose souvent lorsque la base (ou écartement entre les deux orbites) devient trop grande : elle ne doit pas excéder une limite appelée base critique (de l'ordre du kilomètre pour un système comme ERS, de quelques mètres pour un radar aéroporté) ;
- la surface observée a été modifiée entre les deux acquisitions, typiquement sous l'effet de la pluie, du vent, de l'érosion, etc.

La précision des altitudes calculées dépend directement de la cohérence.

Troisième contrainte : les artéfacts

Les valeurs de $\Delta^2\Phi$ sont souvent affectées par des phénomènes de nature non topographique, en particulier :

- les variations de l'indice de réfraction atmosphérique ;
- les mouvements cohérents de la surface (glissements, affaissements...) ;
- les défauts de l'instrument lui-même.

Un nuage d'orage peut rajouter localement jusqu'à trois franges d'interférence. Plus généralement, l'atmosphère est l'une des principales sources d'erreur dans les MNT interférométriques*.

Ces artéfacts, qui s'ajoutent à la composante topographique de l'interférogramme, ne se produisent que dans le cas "une antenne - deux passages".

11.2. Application topographique

L'interférogramme à franges déroulées est une image du déphasage absolu entre les deux échos radar. Le déphasage est proportionnel à la différence de chemin parcouru :

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi}{\lambda}(R_2 - R_1)$$

et donc directement exploitable pour le calcul des altitudes.

Le déphasage varie, entre deux points voisins, d'une quantité $\Delta^2\Phi$ qui dépend notamment de la dénivelée Δz entre les deux points. La relation entre $\Delta^2\Phi$ et Δz peut s'écrire sous la forme d'un développement limité, justifié par le caractère négligeable, tant de la base stéréoscopique B que de la dénivelée entre les points, en regard de la distance R entre l'antenne et le terrain.

$$\Delta^2\Phi = \left(\frac{4\pi B}{\lambda R \sin\theta} \right) \Delta z$$

Les paramètres B , R et θ varient d'un point à l'autre, mais ces variations sont supposées être connues, ce qui permet de calculer z en tout point. Le produit ainsi obtenu, où les altitudes sont représentées dans la géométrie de l'image radar (distance, azimuth), doit ensuite être géocodé : on obtient un MNT interférométrique.

La précision du MNT obtenu dépend notamment de la base B , qui a deux effets opposés :

- plus B est petite, plus la cohérence est élevée car les franges deviennent larges et nettes ;
- plus B est grande, plus le calcul de z est précis.

Il existe une valeur intermédiaire de B qui donne la meilleure précision, et qui dépend des paramètres d'acquisition du radar utilisé.

11.3. Interférométrie différentielle pour la mesure de déformations

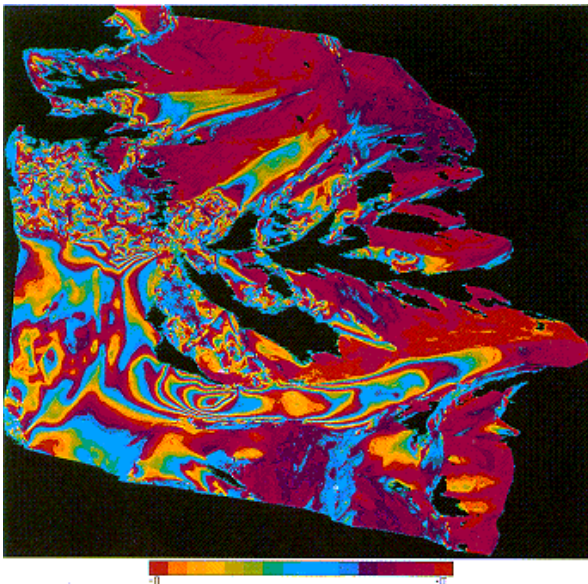
Les équations de l'interférométrie s'appuient sur l'hypothèse d'un terrain parfaitement statique entre les deux acquisitions. Si cette hypothèse n'est pas vérifiée, un mouvement infime (centimétrique) de la surface affecte le déphasage dans l'interférogramme. Ce phénomène est une importante source d'erreur pour la cartographie du relief, mais il constitue un moyen précieux de mesurer les déformations de l'écorce terrestre.

* ce qui soulève une question cruciale : si l'imagerie radar ne permet de restituer le relief que par beau temps, en quoi les techniques radar sont-elles préférables aux techniques optiques ?

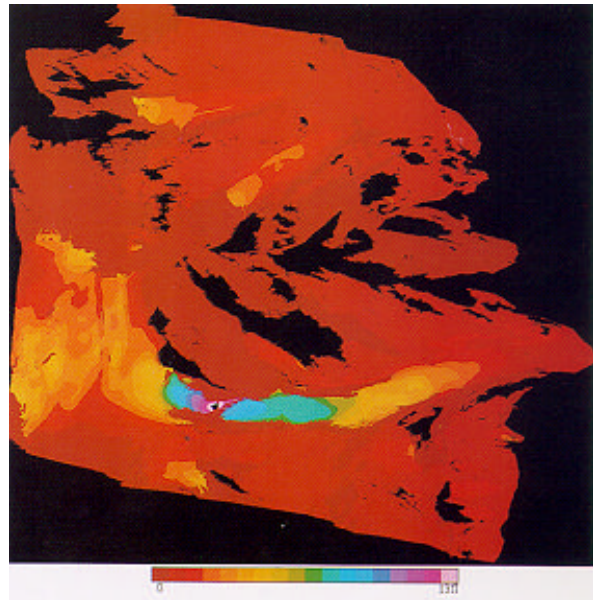
En effet, si l'influence d'une déformation se superpose, dans l'interférogramme, aux franges dues au relief, il est possible si l'on dispose d'un MNT de déterminer ces dernières pour isoler les premières. Si l'on ne dispose pas d'un MNT, une troisième image est nécessaire pour séparer l'influence du relief de celle des mouvements de terrain.

L'interférométrie différentielle offre donc la possibilité de mettre en évidence et de cartographier de petites déformations de la surface terrestre : glissement de terrain, déplacement de glacier, affaissement consécutif à une exploitation gazière ou pétrolière ou à l'arrivée d'une masse d'eau (marée, mise en eau d'un barrage...), gonflement de volcan annonciateur d'éruption, etc.

Beaucoup moins robuste que la topométrie conventionnelle ou que le GPS différentiel, l'interférométrie différentielle a cependant le mérite d'offrir une information bidimensionnelle et continue. On peut donc l'utiliser pour expertiser de manière globale un mouvement de terrain, sur lequel on pourra ensuite mettre en œuvre une surveillance plus robuste, mais limitée à quelques points de mesure.



interférogramme sur une région glaciaire (issu d'un couple radar ERS-1 / ERS-2)



interférogramme différentiel : les effets du relief ont été éliminés, et les franges résiduelles mettent en évidence la progression des glaciers.

TROISIÈME PARTIE
APPLICATIONS DE LA TÉLÉDÉTECTION

INTRODUCTION A LA TELEDETECTION SPATIALE

12. PANORAMA DES APPLICATIONS THÉMATIQUES

12.1. Généralités

La télédétection a aujourd'hui des applications dans de nombreux domaines thématiques. Toutefois, il faut distinguer les applications opérationnelles (c'est-à-dire qui donnent lieu à un service éprouvé, comme la météorologie) et les applications qui sont encore au stade de la recherche (c'est-à-dire dont la faisabilité a été démontrée mais dont les limites sont trop mal connues pour qu'un service opérationnel soit envisagé).

12.2. Météorologie

La météorologie a été la première application civile de la télédétection spatiale. Stimulés par un important besoin de données, des programmes spatiaux ont été conçus pour cette seule application. Il s'agit principalement de satellites géostationnaires (GOES, METEOSAT) ou de satellites défilants (NOAA). Dans les deux cas, les prévisions s'appuient sur des acquisitions très fréquentes dans les domaines visible et infrarouge. Au système européen METEOSAT (satellite géostationnaire effectuant une acquisition toutes les 30 mn dans 3 canaux : panchromatique, thermique, bande de vapeur d'eau), succédera une deuxième génération (MSG) caractérisée par une résolution accrue, une douzaine de canaux, et une acquisition toutes les 15 mn.



image METEOSAT
(juillet 1981)

A ces observations il faut ajouter les acquisitions de capteurs radar à basse résolution (altimètres, diffusiomètres) très utiles en météorologie marine (missions ERS et TOPEX-POSEIDON notamment).

12.3. Océanographie

L'océanographie s'appuie sur deux types d'observations :

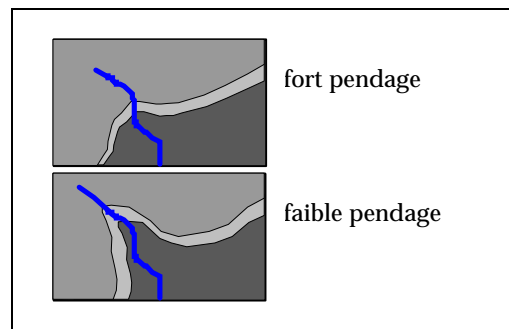
- les images radar sont sensibles à l'état de la surface (rugosité, niveau moyen et instantané...) et permet donc des applications en océanographie physique (ondes internes, courants, bathymétrie, marées...);
- les images optiques, en particulier multispectrales, sont sensibles à la couleur de l'eau, donc à sa constitution (sédiments, plancton) et à la nature du fond en zone peu profonde.

Ces deux techniques sont complémentaires pour l'étude des zones côtières. Au large, les acquisitions SAR sont limitées par l'absence de stations de réception, mais les capteurs radar à basse résolution (altimètres, diffusiomètres) ne sont pas tributaires de cette contrainte.

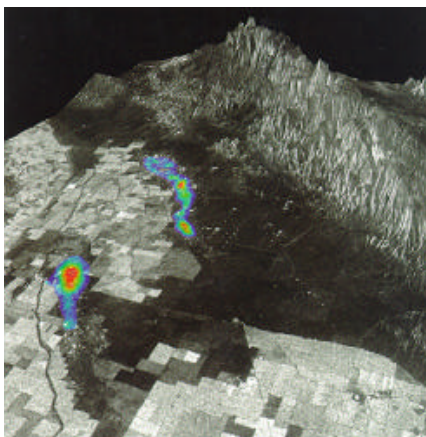
12.4. Sciences de la Terre

La géologie a utilisé depuis longtemps les images de télédétection car elles montrent le terrain d'une manière globale qui facilite l'identification de grandes structures (failles, limites lithologiques).

L'imagerie optique permet d'enrichir la cartographie géologique. En effet elle permet de détecter de nombreux linéaments, et la couleur change souvent d'une formation géologique à l'autre, qu'il s'agisse de la couleur de la roche qui affleure, ou de la couleur du paysage (sol, végétation) dont les variations spatiales peuvent être induites par la géologie. L'image donne même des informations sur les pentages* aux intersections des talwegs et des limites lithologiques (cf. ci-contre).



L'imagerie thermique est sensible aux variations spatiales de l'émissivité. Celle-ci peut être un indicateur de présence de certains minerais.



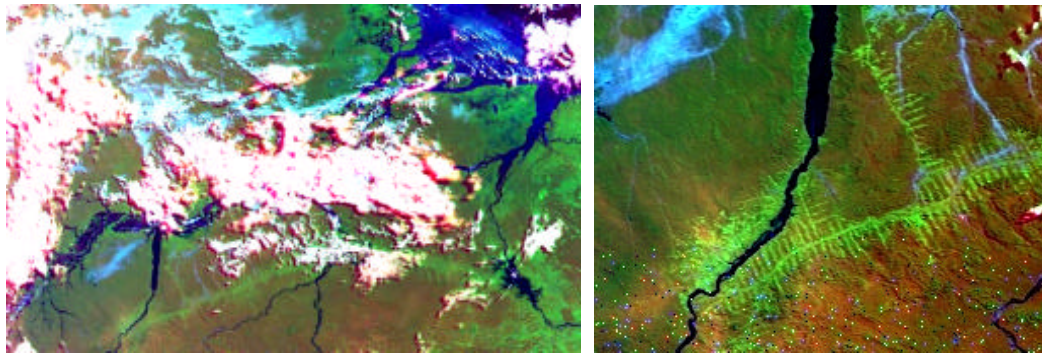
L'imagerie radar est particulièrement appréciée des géologues en raison de sa sensibilité aux changements de pente, de la pénétration des ondes qui permet dans certains cas une analyse du sous-sol, et des possibilités interférométriques qui permettent la détection et la mesure de déformations centimétriques de la croûte terrestre. Enfin, en radar comme en optique, la stéréoscopie permet une meilleure appréhension des formes de relief.

Ci-contre : mesure par interférométrie radar différentielle de subsidences consécutives à l'exploitation de gaz naturel (mise en perspective sur fond d'image radar, la mesure devient intelligible pour un non spécialiste).

* pente des couches géologiques en relief sédimentaire

12.5. Biosphère

Les sciences du sol et de la végétation ont tiré un grand bénéfice de la photographie aérienne. Le passage à l'imagerie numérique a été plus délicat en raison de la difficulté d'inversion des modèles (en particulier en ce qui concerne l'estimation des proportions entre sol nu et végétation dans un pixel). La végétation est plus facile à caractériser dans le domaine optique (grâce à la photo-synthèse) que dans les domaines infrarouge (propriétés thermo-optiques) et radar (structure du couvert). La signature spectrale de la végétation est très caractéristique (réflectance très élevée dans le proche infrarouge et très basse dans le rouge) ce qui permet de définir des indices de végétation, le plus classique étant le NDVI (cf. chap. 7).



Un grand front pionnier amazonien vu par NOAA-AVHRR (à droite : détail)

12.6. Cryosphère

La neige et les glaces peuvent être étudiées par télédétection, que ce soit pour la cartographie de leur étendue (géométrie) ou pour leur caractérisation (radiométrie). L'étude des glaciers est peu opérationnelle bien qu'elle soit stimulée par l'application aux bilans hydriques (évaluation de l'eau disponible dans un bassin versant pour les applications agricoles et hydro-électriques).

Par contre la cartographie des glaces marines a atteint un stade opérationnel pour le guidage des brise glace. Cette activité fait un usage important d'images fournies par des SAR spatiaux, en raison de :

- leur grande précision de localisation (il est difficile d'utiliser des points d'appui dans des zones qui se transforment sans arrêt) ;
- leur caractère « tout temps » (les régions polaires sont peu ensoleillées) ;
- leur sensibilité à la nature de la glace (critères de rugosité et de contenu en eau) qui permet non seulement d'identifier la nature et l'âge de la glace, mais aussi de déterminer des détails planimétriques indispensables à la cartographie du mouvement.

12.7. Aménagement et urbanisme

Dans le domaine de l'aménagement l'image de télédétection joue un double rôle :

- c'est une source d'information, sur laquelle s'appuient des techniques de photo-interprétation, qu'elles soient conventionnelles ou, de plus en plus, assistées par des logiciels ;
- c'est un moyen de communication, qui permet de rendre plus « parlants » des projets d'aménagement en fournissant un fond sur lequel tous les acteurs se retrouvent.

Un certain nombre d'applications de la télédétection sont directement applicables à l'aménagement :

- la cartographie tridimensionnelle des bâtiments (technique de photogrammétrie numérique s'appuyant sur des outils de corrélation particuliers et à peu près impossibles à automatiser intégralement) ;
- l'analyse multispectrale, qui peut s'envisager pour des hautes résolutions (3m à moins d' 1m : identification des objets urbains) ou pour des moyennes résolutions (10 à 50 m : classification des types de paysages urbains) ;
- l'analyse de produits « spécialisés », par exemple des thermographies acquises dans l'infrarouge thermique (3 à 5 mm de nuit ou 8-14 mm) pour le contrôle de l'isolation des bâtiments.

13. ASPECTS OPÉRATIONNELS

13.1. Généralités

Des considérations physiques permettent, pour une application donnée, de choisir un capteur, un mode d'acquisition (cadence, paramètres instrumentaux,...) ou encore une procédure de traitement. Pourtant, un certain nombre de contraintes peuvent limiter la faisabilité d'une application, par exemple :

- la nécessité d'obtenir une image en un temps donné ;
- les difficultés de nature informatique (coût des ordinateurs, des périphériques et des logiciels, problèmes liés aux formats - encore peu standardisés, volume de données) ;
- le besoin de formation des opérateurs, souvent mal préparés à l'exploitation de données "ésotériques" comme celles fournies par un radar, une caméra thermique ou un spectro-imageur ;
- le besoin d'une prise en compte rigoureuse de la géométrie des images, aspect trop souvent négligé mais nécessaire si l'on doit superposer différentes images ou effectuer des mesures géométriques (distances, surfaces,...) ;
- la difficulté du choix d'un capteur pour une acquisition, choix souvent guidé par des compromis dans la mesure où le capteur idéal n'existe pas ;
- la nécessité, pour beaucoup d'applications, d'un contrôle de terrain.

L'importance variable de ces contraintes fait que certaines applications, comme la météorologie, sont devenues opérationnelles, tandis que d'autres se limitaient à des démonstrations de faisabilité.

On s'intéresse ici aux principales étapes qui voient l'apparition de ces contraintes opérationnelles.

13.2. Conception d'un système spatial

La conception d'un système spatial d'observation de la Terre doit être guidée par l'expression d'un besoin thématique. La traduction de ce besoin en paramètres instrumentaux et orbitaux est une opération délicate appelée "analyse de mission" et faisant intervenir plusieurs acteurs, spécialistes de l'application thématique pour les uns et de la technologie spatiale pour les autres.

Certaines missions spatiales mettent en œuvre, lors de la conception, des bilans de performances, c'est-à-dire des évaluations de ce qu'apporteront les images lorsqu'elles seront disponibles. Ces évaluations peuvent se faire de deux manières :

- au moyens de bilans analytiques qui consistent à quantifier la qualité des images en fonction de l'état du système (par exemple : quelle est l'erreur de localisation produite par une instabilité en roulis de 50 microradians d'amplitude ?) ;
- au moyen de simulateurs d'images qui permettent de visualiser, à partir d'une cartographie d'un paysage et d'une description d'un capteur, des images représentatives des performances de ce capteur : ces images simulées peuvent être utilisées pour former les futurs utilisateurs ou pour tester des méthodes de traitement.

Dans les deux cas, si le système provisoire s'avère inadapté au besoin thématique, il doit être possible d'agir sur les spécifications du système en cours de conception.

13.3. Le segment sol

Le segment sol est l'ensemble des infrastructures terrestres utilisées pour le fonctionnement du satellite. Une partie du segment sol concerne le contrôle du satellite (attitude, orbite, etc.). L'autre partie, qui intéresse davantage les utilisateurs, concerne la commande d'images ainsi que la réception et le traitement de ces images.

Le transfert d'information de l'utilisateur vers le capteur (expression du besoin, commande de l'acquisition) et du capteur vers l'utilisateur (acquisition, transmission, prétraitement, expédition) se fait à travers un certain nombre d'intermédiaires dont l'intervention prend du temps.

13.4. La « vérité de terrain »

De nombreuses applications de la télédétection s'appuient en partie sur l'acquisition d'un minimum de données sur le terrain. En effet, il est souvent nécessaire de :

- sélectionner quelques échantillons pour permettre des traitements de classification ;
- identifier un objet que l'image décrit de manière ambiguë ;
- contrôler ponctuellement le résultat d'un traitement systématique ;
- localiser un point visible dans l'image, par exemple par GPS.

L'acquisition de cette vérité de terrain se heurte à deux types de difficultés :

- des difficultés de nature thématique, car la collecte d'information doit tenir compte à la fois de l'application envisagée (que cherche-t-on dans l'image ?), des caractéristiques de l'instrument (résolution, longueur d'onde,...), et éventuellement de l'écart temporel entre l'acquisition de l'image et la mission de terrain ;
- des difficultés de nature logistique (coût et durée du transport, stockage de l'information, risques divers...).