
Différents types de capteurs en télédétection

Présentation du projet Spot

Teledetection probes

Michel Cazenave

Centre National d'Études Spaciales
18, avenue Édouard Belin, 31055 Toulouse - Cedex

Les techniques de télédétection ont vu le jour dès que l'homme a pu s'élever au-dessus du sol à l'aide d'avions ou de ballons.

Les premières photos aériennes ont montré tout l'intérêt à attendre de cette technique mais la première application a été l'élaboration de cartes de plus en plus précises et détaillées.

Encore maintenant l'activité de cartographie peut être considérée comme la toute première application de la télédétection.

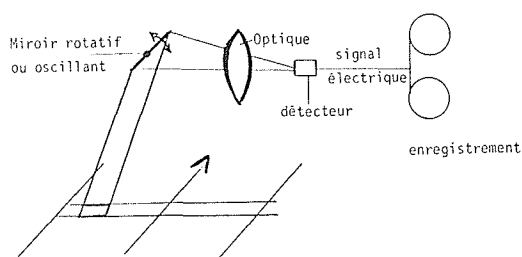
Avec les progrès réalisés dans la réalisation d'émulsions photographiques nouvelles, d'autres applications ont vu le jour ; la couleur, puis la fausse couleur, les émulsions sensibles à l'infrarouge fournissant des photos dites infrarouges couleur furent autant de progrès qui, combinés, permirent d'obtenir des renseignements couvrant et différenciant mieux les diverses émissions spectrales du sol : l'analyse multispectrale du rayonnement du sol était maîtrisée, mais l'interprétation de ces documents n'était encore possible que par la technique dite de photo-interprétation.

Cette technique, quoiqu'encore très utile pour analyser un problème, est limitée par le pouvoir de discernement de l'œil des différents niveaux de gris ou de couleur, et reste subjective et qualitative.

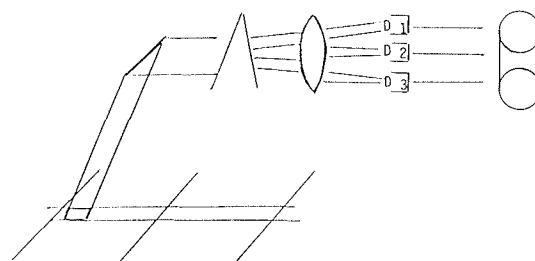
Les progrès réalisés dans la détection électronique des flux lumineux ont permis d'envisager l'analyse des flux émis par le paysage par des radiomètres.

Un radiomètre à balayage analyse ligne par ligne le paysage, l'autre dimension du balayage étant réalisée par le mouvement du porteur (avion ou satellite).

De tels instruments permettent "d'enregistrer" des images sous forme numérique donc avec des niveaux de gris quantifiés susceptibles d'être analysés quantitativement et objectivement par ordinateur.



La possibilité de décomposer la lumière reçue en différentes bandes de largeur d'onde et d'enregistrer simultanément les différentes images d'une même scène, sous forme numérique, ouvre la voie à l'analyse numérique multispectrale du paysage.



En simplifiant, on peut dire qu'à un stade phénologique donné une plante possède une "signature spectrale" unique et que donc la connaissance multispectrale d'un paysage permettra d'inventorier et de différencier les différentes cultures.

Ces radiomètres multispectraux à balayage ne sont pas limités à l'observation dans le spectre visible et le proche infrarouge mais peuvent être utilisés dans le

spectre d'émission thermique (infrarouge thermique) et dans le domaine des microondes.

La détection de la réflexion de la lumière du soleil dans le domaine visible et le proche infrarouge ainsi que celle de l'émission dans l'infrarouge thermique ne sont possibles, surtout depuis l'altitude de satellites, que par ciel clair alors que dans le domaine micro-onde, l'émission traverse l'atmosphère et une éventuelle couverture nuageuse. Malheureusement pour cette dernière technique, la faiblesse de l'émission et la technique de détection (dimension d'antenne du récepteur) ne permettent pas d'atteindre des résolutions au sol fines.

Une dernière technique, plus nouvelle, permet d'effectuer de l'observation par tout temps, de jour comme de nuit. Il s'agit de la technique du radar latéral. Le radar embarqué sur un avion ou sur un satellite émet vers le sol une onde traversant l'atmosphère et la couverture nuageuse. Le sol suivant des caractéristiques propres (humidité, rugosité, etc.) rétrodiffuse le rayonnement reçu vers le haut et le radar embarqué reçoit ainsi l'onde rétrodiffusée significative du terrain observé.

De tels radars imageurs sont utilisés depuis plusieurs années et peuvent fournir de précieux renseignements sur la cartographie et la morphologie des sols. Dans des zones telles que les zones tropicales où la couverture nuageuse est presque permanente, le radar est un capteur tout-à-fait irremplaçable.

Avant d'être embarqués sur satellites, ces différents capteurs ont fait l'objet d'expérimentations sur avion. Certaines applications, où la finesse d'analyse géométrique du paysage est fondamentale, ne peuvent être d'ailleurs envisagées qu'à partir d'avion. Pour donner quelques chiffres, on peut dire qu'excepté pour la radiométrie microonde, les résolutions que l'on peut obtenir avec l'ensemble des autres techniques sont de l'ordre de 1 m pour une altitude de vol d'environ 5000 m. En d'autres termes, par avion il est possible d'analyser avec 1 m de résolution des bandes de paysages de 5 à 10 km de large.

Malheureusement la qualité cartographique demandée et l'intérêt des études d'évolution du paysage, nécessitant l'observation du paysage à intervalles réguliers, limitent l'intérêt opérationnel des méthodes aéroportées. La superposition d'images diachroniques suppose une navigation extrêmement précise des avions (à 1 m près si la résolution est de 1 m) souvent impossible à obtenir.

Les contraintes météorologiques immobilisant longuement les avions, et le volume de corrections par ordinateurs pour obtenir des images superposables entre elles augmentent énormément le coût des méthodes aéroportées et dans bien des cas limitent leur utilisation à des programmes de recherche méthodologique.

L'apparition des satellites et les premières images de la Terre ramenées par les astronautes ont montré les extraordinaires possibilités offertes, et dès 1968 l'étude des premiers satellites de télédétection des ressources naturelles était entreprise aux Etats-Unis. Le premier lancement de Erts-A baptisé ultérieurement Landsat-A eut lieu en juillet 72 et depuis, Landsat-B (1975) et

Landsat-C programmé en avril 1978 ont assuré et assureront en permanence une observation régulière de la Terre.

Les caractéristiques principales de ces satellites sont l'observation dans le domaine du visible de quatre canaux simultanés :

- 0,5 μ - 0,6 μ (bleu-vert)
- 0,6 μ - 0,7 μ (jaune-rouge)
- 0,7 μ - 0,8 μ (rouge infrarouge)
- 0,8 μ - 1,1 μ (proche-infrarouge)

avec une cellule élémentaire de résolution au sol de 80 m (champ de vue instantané).

La largeur de la bande balayée à chaque passage du satellite est de 185 km.

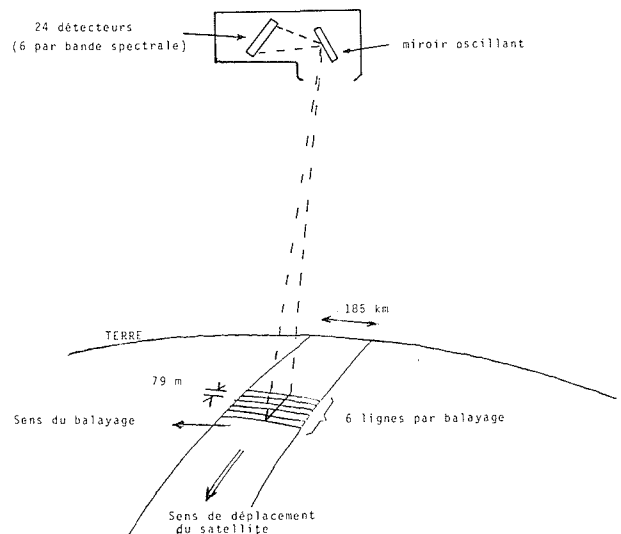


Figure 1 - Landsat-D. radiomètre multispectral à balayage.

Ces satellites sont placés sur des orbites circulaires dites héliosynchrones à 900 km d'altitude : ainsi l'heure de passage au-dessus d'une zone est toujours 9 H. 30. En conséquence deux images d'une même zone prises à intervalles de quelques jours seront obtenues dans des conditions d'éclairement solaire identiques et l'interprétation des différences deviendra possible.

La répétitivité de passage d'un Landsat au-dessus d'une même zone est de 18 jours.

Landsat-B est décalé de 180° par rapport à Landsat-A et sur une orbite identique à Landsat-A. Ainsi en combinant les images recueillies par les deux satellites on peut obtenir une répétitivité de 9 jours si pour les deux observations la couverture nuageuse était nulle.

La très large distribution des images recueillies a permis, aussi bien aux Etats-Unis que dans le reste du monde, d'entreprendre de nombreuses études dans le domaine de la géologie, l'hydrologie, l'agriculture, du suivi de la couverture neigeuse et même de l'océanographie, des pollutions, etc.

Toutes ces études ont bien mis en évidence les possibilités mais aussi les lacunes de ces premiers satellites. Depuis leur lancement de nombreux projets ont été étudiés et certains d'entre eux se concrétiseront dès

1978-1979 par la mise en orbite de nouveaux satellites expérimentaux :

- HCMM (Heat Capacity Mapping Mission)
 - Objectif prioritaire : Ressources terrestres
 - Orbite 600 km, héliosynchrone 14 H. locale, répétitivité 1,5 à 3 jours.
 - Capteurs :
 - 1 canal visible
 - 1 canal thermique
 - Résolution au sol 500 m
 - Largeur de la bande balayée : 700 km.
 - Nimbus-G
 - Objectifs : pollution atmosphérique, océanographie, météorologie.
 - Orbite circulaire : 925 km
 - Capteurs :
 - 1) CZCS (Coastal Zone Color Scanner) 6 bandes étroites
 - Largeur bande balayée : 1000 km
 - 2) SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer) 5 canaux compris entre 5 et 37 GHz
 - Largeur balayée : 600 km
 - 3) MAPS (Measurement of Air Pollution from Satellite).
 - Seasat : Satellite océanographique.
 - Objectifs :
 - Mesure
 - hauteur et spectre des vagues
 - des vents de surface
 - topographie de la surface marine
 - détection des courants.
 - Orbite 800 km circulaire.
 - Capteurs :
 - Altimètre radar
 - Scattéromètre radar
 - Radar latéral à antenne synthétique
 - Radiomètre microonde
 - Radiomètre à balayage visible et infrarouge.
- Une nouvelle génération de satellites sera mise en orbite entre 1981 et 1983. Il s'agit essentiellement des satellites Landsat-D et Spot destinés à l'étude de l'utilisation du territoire.
- Landsat-D, réalisé par la NASA, tout en poursuivant la mission des Landsat(s) précédents (80 m de résolution, 4 canaux simultanés) embarquera un nouvel instrument expérimental (Thematic Mapper) ayant un plus grand nombre de canaux (7 en comptant l'infrarouge thermique) et surtout une résolution très nettement améliorée.
- Landsat-D permettra d'observer dans le visible avec une résolution de 30 m.
- La répétitivité de prises de vues de Landsat-D sera de 16 jours.
- Le programme Spot est un programme de satellite d'observation de la Terre français ; conçu comme un système polyvalent autour d'une plateforme multi-mission, il permettra dès fin 1983 de mettre en orbite, avec le lanceur européen Ariane, une instrumentation importante et variée.
- Conformément aux priorités dégagées et aux possibilités de réalisation d'instruments (techniques et surtout budgétaires), la première mission est relative à l'utilisation

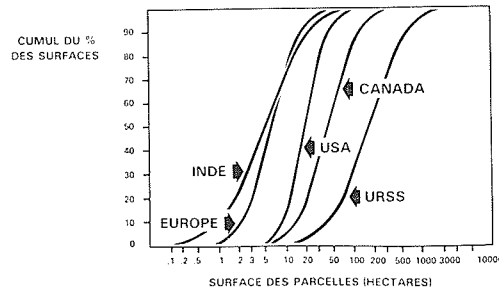


Figure 2 - Distribution cumulative des fréquences des surfaces des parcelles

du territoire, (Europe, pays en voie de développement).

Elle portera sur :

- la cartographie et la réalisation systématique des inventaires
- la surveillance et la gestion des ressources agricoles
- l'étude des formations végétales naturelles et provoquées
- l'étude de l'impact du développement urbain sur l'environnement.

La figure 2 représente la distribution cumulative des fréquences des surfaces des parcelles dans différents pays.

Elle montre que par exemple si l'on veut effectuer des inventaires avec une précision de 80 % il faut pouvoir identifier toutes les parcelles de surface supérieure à 3 hectares en Europe et celles supérieures à 20-25 hectares au Canada : la résolution spatiale de Spot, à résultat égal, devra donc être environ 2,5 à 3 fois meilleure que celle d'un satellite assurant les inventaires au Canada ou aux Etats-Unis.

La fragmentation du parcellaire européen conduit à rechercher des résolutions spatiales de 20-25 m.

Les problèmes cartographiques et l'étude de l'impact du développement urbain demandent eux aussi des résolutions de l'ordre de 20 m, voire 10 m.

Cette résolution très ambitieuse techniquement, franchit les limites des systèmes à balayage mécanique utilisés à ce jour. Elle conduit pour l'instrument à un montage de type nouveau dit technique de balayage "push-broom" (Fig. 3).

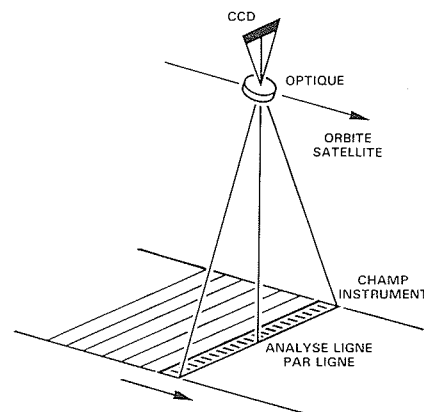


Figure 3 - Illustration de la technique du balayage push broom.

Sa particularité essentielle est de réaliser les prises de vues sans aucune pièce mobile (miroir de balayage, obturateurs ou disque modulateurs)

- la formation d'une ligne de l'image résulte de la présence d'une ligne de détecteurs dans le plan focal de l'instrument ;
- la succession des lignes de l'image résulte quant à elle, du mouvement du satellite sur son orbite.

Cette technique basée sur l'utilisation de barrettes de détecteurs à transfert de charge (DTC) comportant 1728 éléments sensibles de 13 microns conjugue trois intérêts considérables :

- un temps de pose maximal sur chaque point de paysage
- grande simplicité mécanique
- excellente qualité géométrique des images.

Le C.N.E.S. a déjà développé des instruments basés sur ce principe et réalisé des campagnes aéroportées depuis avril 1976 avec ce type d'instruments.

La première charge utile

– La première charge utile du programme Spot comporte donc deux instruments identiques, basés sur ce principe, dit HRV (Haute Résolution Visible).

Chaque instrument peut fonctionner, indépendamment de l'autre, suivant deux modes :

Le *mode multispectral*, avec un champ de vue instantané de 20 m ;

Le *mode panchromatique*, avec un champ de vue instantané de 10 m.

De plus chaque instrument est équipé en entrée d'un miroir de renvoi de la lumière. Ce miroir peut par télé-

commande tourner d'un angle donné autour d'un axe parallèle au vecteur vitesse.

Ce "dépointage" ou débattement possible du miroir est limité à $\pm 26^\circ$.

Les principales caractéristiques de la première charge utile sont résumées dans le tableau ci-dessous.

- Deux instruments HRV identiques de caractéristiques :

	Mode 1	Mode 2
Champ de vue instantané	20 m	10 m
Champ instrument au nadir	60 km	60 km
Bandes spectrales simultanées	0.50 - 0.59 μ 0.61 - 0.69 μ 0.79 - 0.90 μ	0.50 - 0.90 μ
Temps de balayage d'une ligne	3 ms	1,5 ms
Angle de "dépointage"	$\pm 26^\circ$	$\pm 26^\circ$
Focale de l'instrument	1040 mm	1040 mm
Débit d'information	24 Mbits/sec.	24 Mbits/sec

– Sélection des modes et de l'angle de dépointage (par pas de $0,6^\circ$) par téléchargement.

– Stockage et transmission de l'information.

Enregistreurs de bord avec un capacité maximum de 30 mm.

Bande de fréquence 8025 - 8 500 GHz

Rythme digital 2×24 Mbits/sec

Puissance d'émission 2×20 W

Modulation quadriphase

Le choix de l'orbite et les différentes possibilités offertes par la première charge utile

Le choix de l'orbite héliosynchrone la mieux adaptée à la mission est un compromis où interviennent de nombreux paramètres (résolution, répétitivité, stabilité, etc.). La possibilité de "dépointer" les instruments a conduit à chercher le meilleur compromis permettant de satisfaire les buts suivants :

- Possibilité de couverture systématique de la Terre (intertrace inférieur à 120 km)
- Accessibilité importante à tout point du globe (un maximum de 5 jours s'écoule entre deux observations successives d'une zone quelconque sélectionnée)
- Possibilité de réaliser, à titre expérimental, des couples stéréoscopiques.

• L'accessibilité à une zone donnée est obtenue par observation oblique à l'orbite n et l'orbite $n + p$ (Fig. 4).

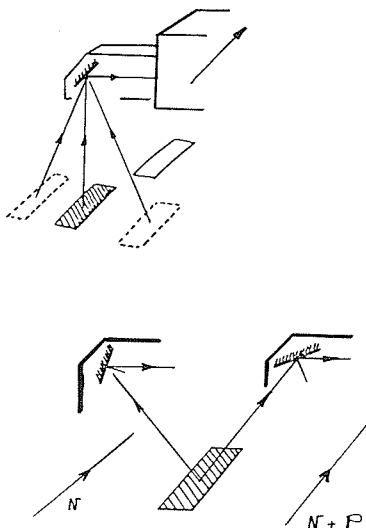


Figure 4

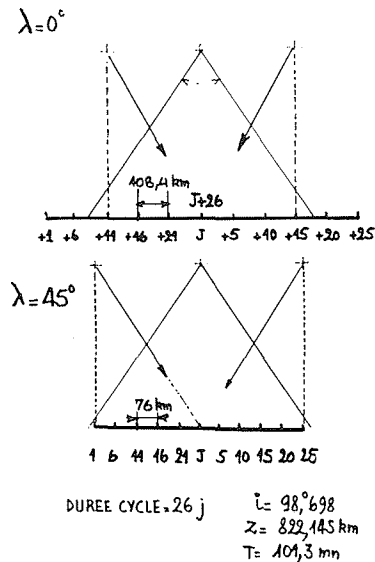


Figure 5 - Orientation du miroir d'entrée HRV : Accès à une zone donnée.

Plus p sera faible plus haute sera l'accessibilité.

• L'observation d'une même zone sous deux angles identiques (ou voisins) avec un intervalle de temps aussi court que possible permet d'obtenir des couples stéréo

apportant une information nouvelle très utile pour l'interprétation.

L'orbite choisie est définie par les paramètres suivants :

inclinaison : $i = 98^\circ 7$
 altitude : $z = 822 \text{ km}$
 période : $T = 101.3 \text{ mn}$
 durée de cycle : 26 jours

La figure 5 montre, à deux latitudes du globe (équateur et 45°) la succession des jours où le satellite voit le point J (au nadir le jour J), sous des angles à 26° .

A l'équateur on peut voir le point J à J, J + 5, J + 10, J + 11, J + 15, J + 16, J + 21, J + 26.

L'accessibilité est donc définie par des délais de 5j, 5j, 1j, 4j, 1j, 5j, 5j, sur un cycle de 26j ; soit un délai moyen d'accès voisin de 4 jours et, deux fois par cycle de 26 j la possibilité d'obtenir un couple stéréo.

A une latitude de 45° on peut voir le point J à J, J + 1, J + 5, J + 6, J + 10, J + 11, J + 15, J + 16, J + 20, J + 21, J + 25, J + 26.

L'accessibilité est définie par des délais de 1j, 4j, 1j, 4j, 1j, 4j, 1j, 4j, 1j.

Le délai moyen d'accès est de 2,5 jours, et 6 couples stéréoscopiques à un jour d'intervalle sont possibles par cycle de 26 jours.

Discussion

Président : M. J.M. de LAMARE

Le Président remercie M. CAZENAVE et lui demande d'apporter quelques précisions sur les possibilités d'un développement ultérieur des missions de Spot dont l'équipement est encore assez limité du point de vue spectral.

M. CAZENAVE indique que, faute d'avoir pu bénéficier en temps voulu de l'assise budgétaire Européenne initialement espérée, l'opération Spot avait dû s'en tenir au développement du seul capteur haute résolution présenté.

Si les projets Européens prennent corps, ils pourraient mettre à profit la plateforme déjà développée et y associer une charge utile adaptée à d'autres problèmes et notamment à ceux de l'Eau qui - le reconnaît M. CAZENAVE - n'ont guère été pris en considération dans la conception de la première charge utile de Spot.

Le Président a pour sa part bon espoir de voir les Européens travailler parallèlement au développement de Spot et à des générations d'opérations ultérieures basées par exemple sur l'emploi des hyperfréquences.

M. MUSY. - Spot est un satellite français ; les données qu'il captera seront-elles accessibles à des organisations étrangères et, dans l'affirmative, comment ?

M. CAZENAVE. - Les données à 20 mètres seront disponibles. Les demandes concernant les données à 10 mètres seront dans un premier temps - examinées cas par cas. Quant aux conditions, il est certain que, comme pour les données Landsat, il faudra payer quelque chose.

M. LEBRETON. - Quelles sont les résolutions obtenues dans le domaine militaire, dans l'invisible et dans l'infrarouge ?

M. CAZENAVE. - Les renseignements à ce sujet ne sont pas très faciles à obtenir. Il semble que des moyens soient en place donnant des résolutions de la trentaine de centimètres au sol. Les principes ne sont plus les mêmes : les satellites sont lancés avec des caméras et du film. Ces films - une fois impressionnés - sont récupérés avec une logistique assez complexe, puis développés. On arrive à avoir des bandes d'un kilomètre avec 50 cm de résolution.

M. BECKER et M. NOEL demandent quelles dispositions sont envisagées au niveau Français, ou Européen, pour le stockage et la diffusion des masses de données recueillies.

M. CAZENAVE indique que l'on s'inspirera sans doute de l'expérience américaine et que des études sont en cours tenant compte des installations déjà en service pour les satellites en exploitation depuis 10 ans. Il lui paraît souhaitable d'assurer, pour les utilisateurs exploitant la répétitivité de 4 jours des équipements, des délais de livraison du même ordre de grandeur. Par contre un "circuit non urgent" avec des délais de l'ordre de deux mois pourrait convenir à d'autres utilisateurs moins pressés, comme les géologues par exemple.

Le Président rappelle à ce sujet que l'Agence Spatiale Européenne a créé un réseau dit "Horfner" destiné à recueillir l'ensemble des informations sur les satellites et à examiner les problèmes généraux de stockage et d'archivage en Europe.