

Bulletin de l'Union des Physiciens

Association de professeurs de Physique et de Chimie

Enseignement des Sciences physiques et télédétection *

par J. CASSANET,
Lycée Descartes, Tours.

La télédétection se présente comme un ensemble de techniques d'observation et d'étude de l'atmosphère et de la surface terrestre.

Elle met en œuvre un vecteur (ballon, avion, hélicoptère ou satellite) capable de transporter en altitude un ou plusieurs capteurs de rayonnements ainsi que les systèmes de retransmission des données acquises vers une station de réception où s'effectue leur gestion.

L'origine de la télédétection se confond avec les débuts de la photographie aérienne. Les historiens attribuent volontiers à Félix Tournachon, dit « Nadar » la première photographie aérienne prise en 1855, au-dessus de Paris, depuis un ballon, à 80 m d'altitude. Au début du xx^e siècle, l'avion devint un vecteur privilégié pour l'observation de la Terre et la photo-intégration aérienne se répandit très vite, surtout pour des raisons militaires. Depuis cette époque, les techniques ont rapidement évolué et la télédétection aérospatiale est apparue sous son aspect opérationnel au début des années 70, avec la mise sur orbite du premier satellite LANDSAT ayant pour mission exclusive d'observer la Terre.

En 1986, la France vient de prendre une place de premier plan dans ce domaine grâce à la mise sur orbite de SPOT 1.

(*) *N.D.L.R.* : Cet article, ainsi que le suivant, reprend la matière d'exposés et de T.P. proposés au stage du C.N.E.S. au Bourget-du-Lac en septembre 1987.

I. LA TÉLÉDÉTECTION AÉROSPATIALE.

En fonction des sources de rayonnement, on distingue télé-détection passive et active. La première fait appel aux sources naturelles de rayonnement (Soleil, Terre), alors que la télé-détection active nécessite l'embarquement à bord du vecteur d'une source artificielle (laser, radar) qui émet vers la région observée et dont on recueille le signal réfléchi. En fonction des propriétés absorbantes de l'atmosphère, la télé-détection aérospatiale met en œuvre des domaines privilégiés du spectre électromagnétique.

Les principes physiques fondamentaux mis en jeu reposent sur les interactions rayonnement électromagnétique - matière. Nous renvoyons à ce sujet les lecteurs à l'article très complet de F. BECKER, de l'Université Louis-Pasteur à Strasbourg, intitulé « Application des techniques spatiales à l'observation de la Terre ou télé-détection électromagnétique aérospatiale », publié dans le numéro 630 du B.U.P. (janvier 1981, pages 435 à 497).

Le développement de cette technologie s'appuie sur les progrès très importants réalisés ces dernières années dans les trois domaines suivants :

- *Le lancement et la mise sur orbite de véhicules spatiaux*, soit à basse altitude pour les satellites à défilement, soit en orbite géostationnaire par le biais d'une orbite de transfert.
- *L'optoélectronique*, avec la réalisation de détecteurs miniaturisés, sensibles à différents domaines de longueur d'onde, ce qui a considérablement élargi le champ des informations recueillies, autrefois limité au domaine du visible.
- *L'informatique*, maillon fondamental dans la chaîne d'acquisition et de traitement des données de télé-détection, puisque le flot d'informations déversé depuis le satellite sur la station de réception est considérable.

I.1. Un exemple : La télé-détection des températures de surface par le satellite H.C.M.M. (Heat Capacity Mapping Mission).

Le satellite H.C.M.M. fut lancé le 26 avril 1978 par une fusée SCOUT depuis la base de Vandenberg, en Californie. Il avait pour mission d'établir par télé-détection un relevé des températures de surface de la Terre, toutes les douze heures sur une même région afin de déterminer l'amplitude maximum de la variation de température entre jour et nuit et d'en déduire éventuellement l'inertie thermique des sols.

I.1.1. CARACTÉRISTIQUES ORBITALES.

Altitude moyenne : 620 km.

Inclinaison : $i = 97,6^\circ$.

Période : 97,2 min.

Heure de survol du nœud descendant N : 2 h.

Espacement à l'équateur entre deux traces consécutives : 2712 km.

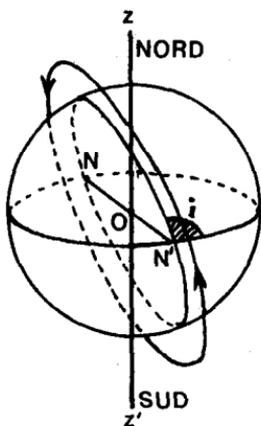


Fig. 1

I.2.2. PARTICULARITÉS DE L'ORBITE.

Le plan orbital est animé d'un mouvement de précession dû à la non-sphéricité et au manque d'homogénéité de la Terre. La ligne des nœuds, NN' tourne doucement autour de l'axe z'Oz. Cette précession peut être mise à profit pour maintenir le plan orbital selon une orientation constante par rapport à la direction Terre-Soleil. Il suffit de faire en sorte que le plan orbital précessionne environ de 1° par jour. Cette condition est réalisée lorsque l'inclinaison vaut de 97° à 102° . L'orbite est alors qualifiée d'héliosynchrone. H.C.M.M. appartient donc à la catégorie des satellites à défilement héliosynchrones.

De plus, H.C.M.M. peut survoler une même région à 12 heures d'intervalle tous les 16 jours, voire tous les 5 jours à certaines latitudes.

I.1.3. LE CAPTEUR H.C.M.R. (HEAT CAPACITY MAPPING RADIO-METER).

H.C.M.R. est un capteur à balayage à deux canaux :

- un canal dans le visible et le proche infrarouge, de 0,5 à $1,1 \mu\text{m}$,
- un canal dans l'infrarouge thermique, de 10,5 à $12,5 \mu\text{m}$.

Le champ instantané du radiomètre est de 0,83 milliradian, ce qui, compte tenu de l'altitude du satellite, correspond à 500 m

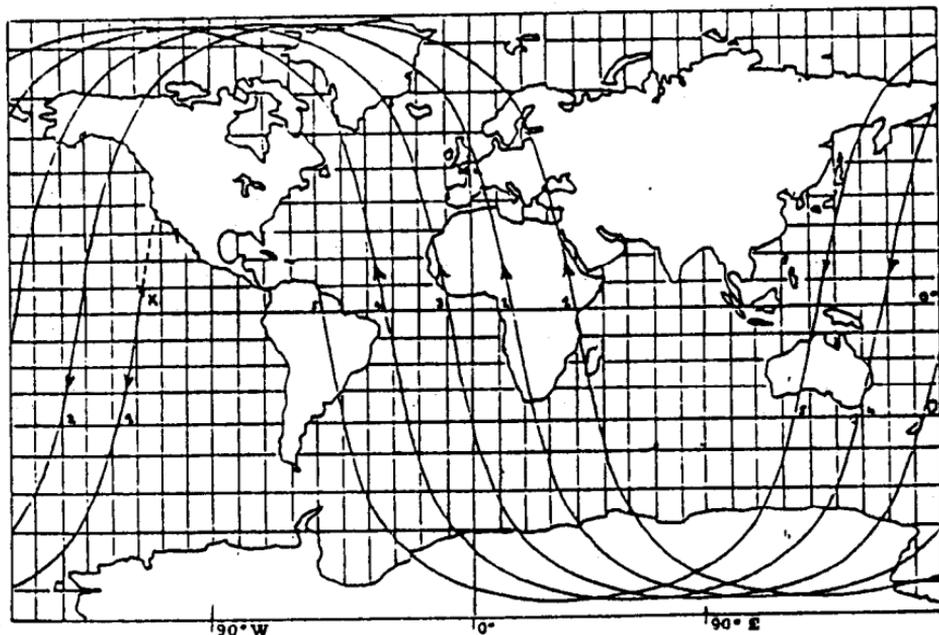


Fig. 2. — Traces de l'orbite du satellite à défilement H.C.M.M. à la surface de la Terre
(d'après le *H.C.M.M. User's Handbook*).

K : mise sur orbite du satellite,
1, 2, 3 : survols successifs du satellite.

au nadir. Un miroir elliptique, incliné de 45° sur son axe effectue 14 tours par seconde. Ce miroir tournant permet l'acquisition du signal électromagnétique émis par le sol sur une étroite bande transversale à la trace de 500 m de large et 700 km de long, l'angle total de balayage étant de 60° .

Le rayonnement électromagnétique reçu par le miroir tournant est réfléchi et concentré par une optique de 20 cm de diamètre vers un miroir dichroïque qui assure la séparation spectrale en 2 canaux ; un jeu de filtres affine cette séparation avant que le signal ne parvienne au détecteur correspondant.

A chacun des canaux correspond un détecteur :

- une photodiode SiO_2 pour le visible et proche IR,
- une cellule Hg, Cd, Te pour l'infrarouge thermique.

Le détecteur IR est maintenu à une température constamment contrôlée de 115 K.

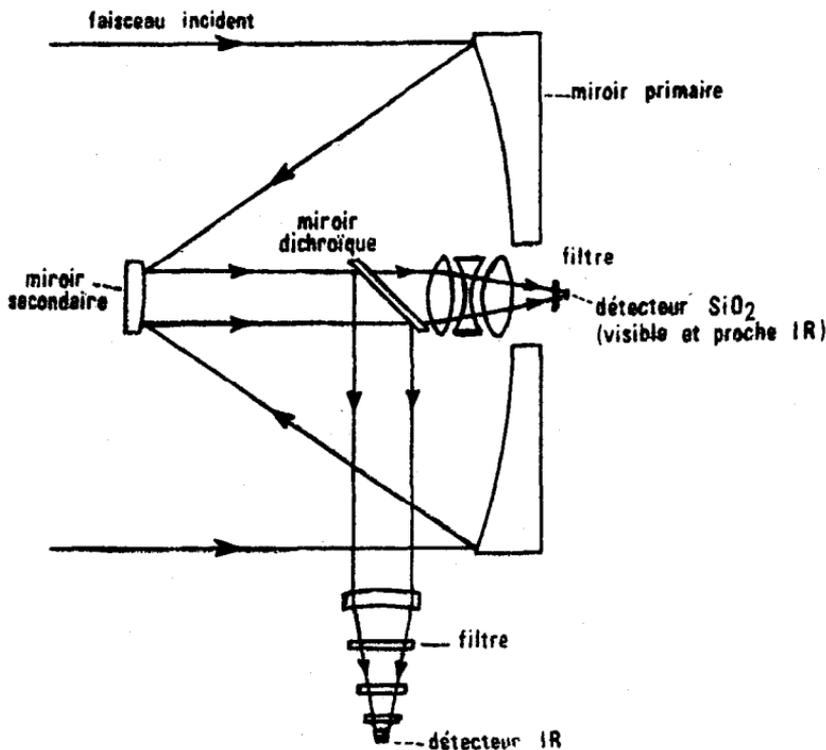


Fig. 3. — Dispositif optique du radiomètre H.C.M.R.)

(d'après le *H.C.M.M. User's Handbook*).

(doc. N.A.S.A. - E.N.S.)

A chaque élément d'image, ou pixel (picture element), correspondant au sol à une tache élémentaire de 500 m de côté, sont associées deux mesures de rayonnement, l'une dans le visible et l'autre dans l'infrarouge thermique.

I.1.4. LES DONNÉES.

Les données acquises par le radiomètre H.C.M.R. sont codées sur un octet.

Dans la bande spectrale de l'infrarouge thermique (10,5 à 12,5 micromètres), il est possible de convertir les données numérisées, I, en températures radiométriques. Le tableau ci-après donne quelques conversions :

I	52	53	54	55	56	57	58	59	60
T (°C)	7,94	8,30	8,67	9,03	9,39	9,75	10,11	10,47	10,83

Ces températures radiométriques diffèrent des températures de surface réelles des objets observés en raison de l'émissivité spectrale des substances considérées qui ne sont jamais des corps noirs idéaux et en raison du rôle joué par l'atmosphère sur la transmission du signal.

Des opérations de calibration et de vérité-terrain sont donc nécessaires.

Une scène H.C.M.M. est constituée de 1440 lignes de 1550 pixels dans chaque bande spectrale. Ainsi, près de 5 millions de mesures sont effectuées, converties en nombres, transmises au sol en un peu moins de 2 minutes, le temps qu'il faut au satellite pour parcourir 700 km.

Avant diffusion des données aux utilisateurs un prétraitement est effectué. Il a pour but d'offrir des documents réellement utilisables, géométriquement corrigés, éventuellement radiométriquement corrigés.

A partir de là, différentes étapes de traitement peuvent être développées au gré de l'utilisateur :

- filtrage,
- délignage,
- lissage,
- renforcements de contraste,
- mise à une échelle choisie,
- classifications,
- visualisations sur écran (n et b ou couleur),
- cartographie automatique,
- restitutions photographiques,
- compositions colorées...

L'informatique intervient considérablement au cours de cette phase et l'évolution technologique dans le domaine de la micro-informatique au cours des dernières années rend chaque jour plus accessible et plus interactif le traitement de ces images.

Les documents suivants illustrent le résultat de certains de ces traitements.



Fig. 4. — Scène H.C.M.M. du 15 septembre 1978 à 2 h 22 min.
Infrarouge thermique

en noir : températures de surface les plus basses,

en blanc : températures de surface les plus hautes.

(doc. N.A.S.A. - E.N.S.)

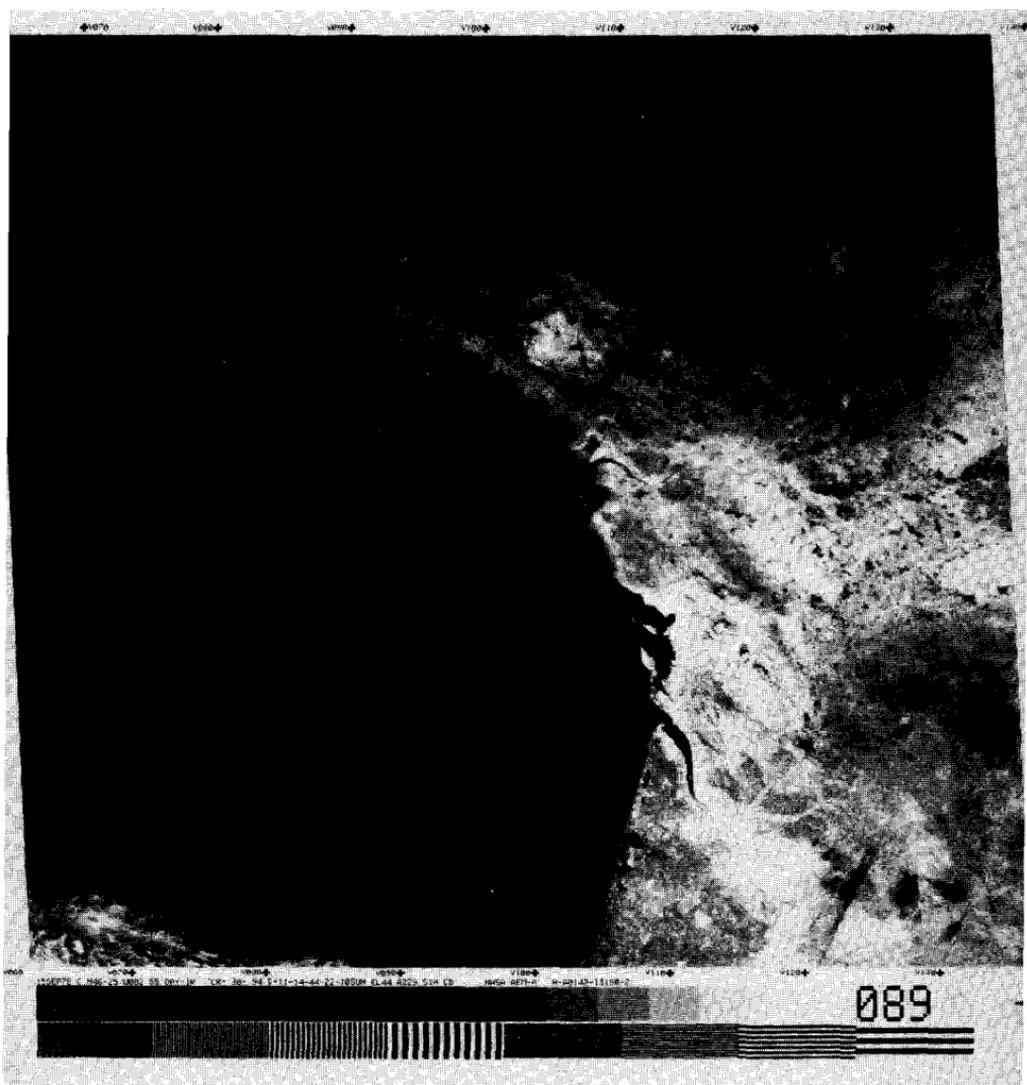


Fig. 5. — Scène H.C.M.M. du 15 septembre 1978 à 13 h 19 min.
Infrarouge thermique

en noir : températures de surface les plus basses,

en blanc : températures de surface les plus hautes.

(doc. N.A.S.A. - E.N.S.)

Les 2 restitutions photographiques précédentes résultent de l'acquisition de données effectuées à 11 heures d'écart lors d'un survol descendant du satellite, de nuit, puis au cours d'un survol ascendant, de jour. La composition du mouvement de rotation de la Terre avec le mouvement du satellite se traduit par la forme caractéristique, en parallélogrammes, des images. L'inclinaison de ces derniers dépend du sens de passage du satellite (Nord → Sud, ou Sud → Nord).

Dans le domaine radiométrique, on peut remarquer la très forte inversion thermique jour-nuit entre les températures de surface de l'océan d'une part et du continent d'autre part. Sur l'image-nuit, l'émission thermique des villes du Val-de-Loire est aisément identifiable, de même que les formations nuageuses d'altitude, froides, au-dessus du Golfe de Gascogne. Sur cette même image, des fronts thermiques sont repérables en mer d'Iroise ainsi qu'à proximité des îles du littoral Atlantique, des upwellings (remontées d'eaux froides) se manifestent au large, à l'aplomb du talus continental. Ces structures thermiques superficielles de l'océan sont également identifiables sur l'image-jour et le fait de disposer de vues synoptiques d'une même zone à une demi-journée d'intervalle apporte des informations très riches sur l'évolution des phénomènes à court terme.

La perception des phénomènes révélés par les restitutions photographiques peut être notablement améliorée par le traitement informatique des données numériques et la cartographie automatique. La fig. 6 présente un extrait de la scène du 15 septembre (de Saint-Nazaire à l'Île d'Yeu), mis à l'échelle, lissé, seuillé et cartographié à l'aide d'un traceur. Par rapport à la photographie, on peut évaluer la finesse des détails mis en évidence, bien que la dimension du pixel soit de $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$. Il est à noter que ces structures thermiques côtières qui sont dues au brassage vertical des eaux par les courants de marée et à la destruction de la thermocline n'avaient jamais été vraiment identifiées avant la mise en œuvre de ces satellites de télédétection.

1.2. Les missions de télédétection ; leur évolution.

En une quinzaine d'années, des progrès importants ont été accomplis au niveau des capteurs embarqués à bord des satellites de télédétection :

— les limites de résolution spatiale :

Par exemple, dans le domaine du visible, les dimensions du pixel sont passées de $79 \text{ m} \times 56 \text{ m}$ en 1972-1973 (LANDSAT 1 et 2) à $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ en 1982-1984 (LANDSAT 4 et 5) puis à $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ en 1986 (SPOT). La quantité d'informations recueillies depuis la surface terrestre a donc été multipliée

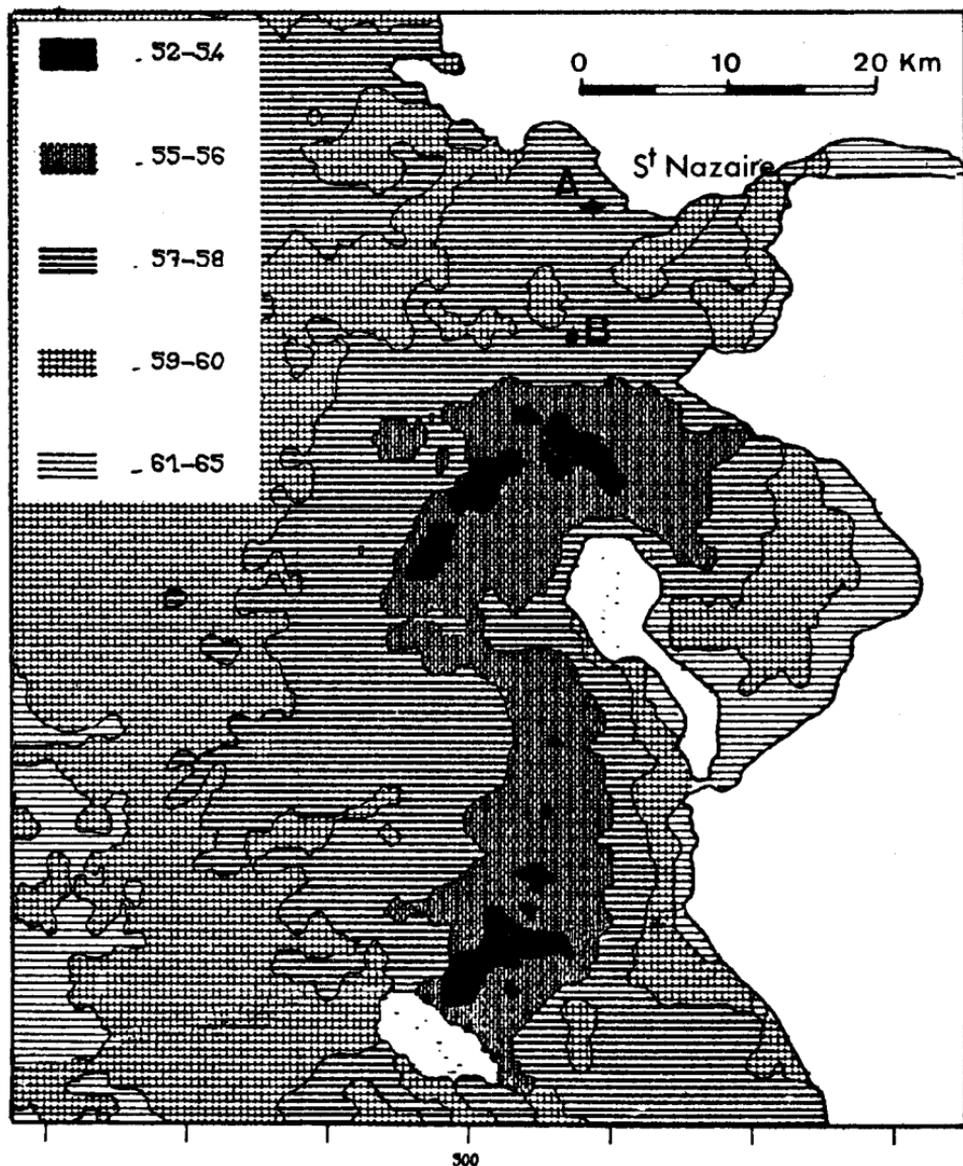


Fig. 6. — Scène H.C.M.M. du 15 septembre 1978 à 13 h 19 min.

Infrarouge thermique ; codage numérique de T_0 ($I = 52$)
à $T_0 + 4,5^\circ\text{C}$ ($I = 65$)

A et B sont des stations de vérité-mer.

considérablement puisque 44 mesures sont effectuées par SPOT sur un élément de paysage correspondant à un pixel LANDSAT 1 ;

— les limites de résolution radiométrique :

Là aussi, l'évolution est très sensible. Par exemple dans le domaine de l'infrarouge thermique, la précision relative des radiomètres embarqués à bord des satellites NOAA est passée du degré en 1972 (NOAA 2) au dixième de degré en 1983-1984 (NOAA 9).

Simultanément, les utilisateurs ont appris à mieux cerner les apports spécifiques des différentes bandes spectrales des capteurs et l'évolution technologique de ces derniers a pris en compte cet aspect.

Le tableau suivant présente quelques missions de télédétection spatiale dont les données sont diffusées en France.

Domaine de sensibilité spectrale des capteurs	Mission	Origine	Date
Visible et infrarouge proche	LANDSAT 1 à 5	U.S.A.	1972 à 1984
	NOAA 2 à 9	U.S.A.	1972 à 1985
	NIMBUS 7	U.S.A.	1978
	HGMM	U.S.A.	1978
	METEOSAT 1 et 2 ⁽¹⁾	Europe	1977 et 1981
	SPACELAB	Europe	1983
	SPOT 1	France	1986
Infrarouge thermique	NOAA 2 à 9	U.S.A.	1972 à 1985
	LANDSAT 3 à 5	U.S.A.	1978 à 1984
	NIMBUS 7	U.S.A.	1978
	HGMM	U.S.A.	1978
	METEOSAT 1 et 2 ⁽¹⁾	Europe	1977 et 1981
Ondes centimétriques	NIMBUS 7	U.S.A.	1978
	SEASAT 1 ⁽²⁾	U.S.A.	1978

(1) : satellites géostationnaires ; (2) : télédétection active radar.

1.3. Spot.

Dès 1978, le gouvernement français a décidé de réaliser, avec la participation de la Suède et de la Belgique, un satellite d'observation de la Terre, SPOT. La mise en œuvre fut confiée au Centre National d'Etudes Spatiales.

Le 22 février 1986 à 11 h 44 min (T.U.), la mise sur orbite de SPOT 1 par le lanceur Ariane, depuis la base de Kourou (vol V 16), a concrétisé plusieurs années d'efforts.

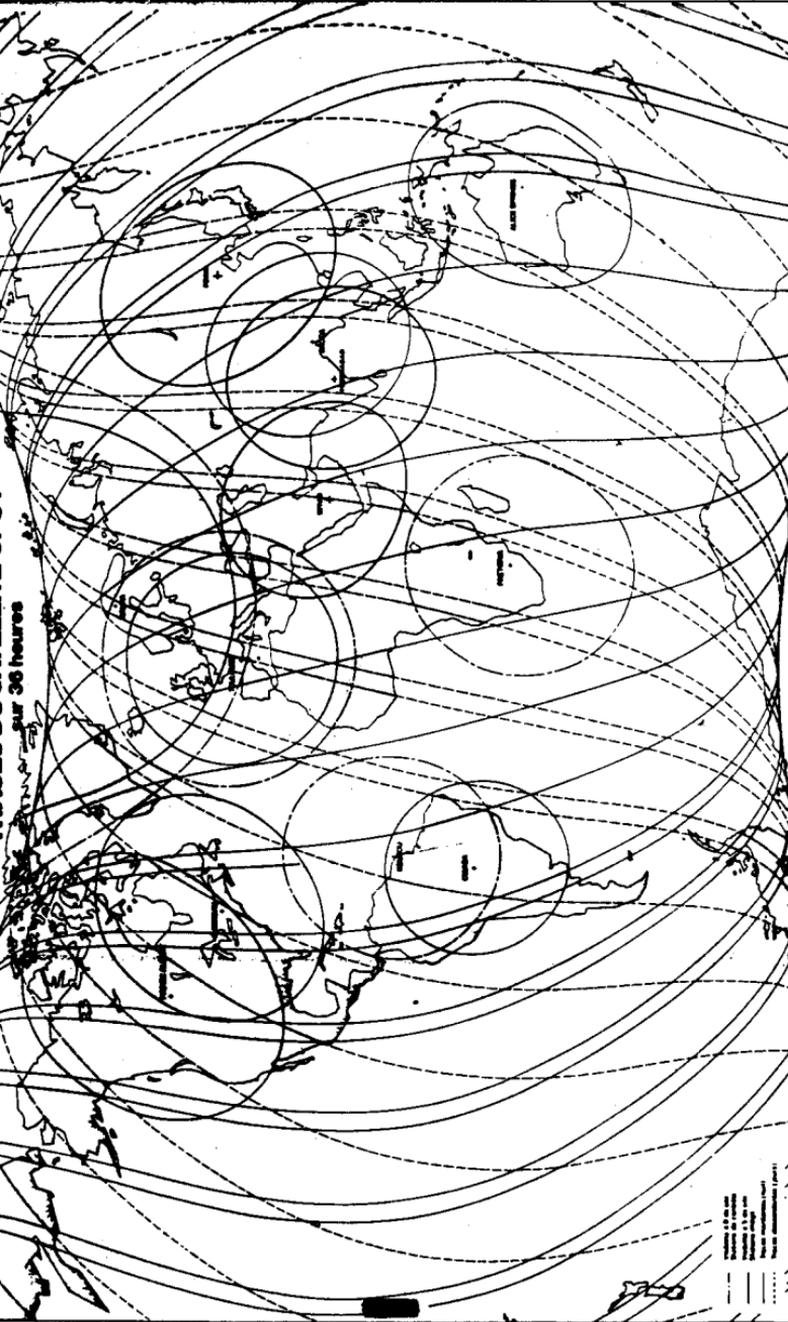


Fig. 7. — Traces du satellite SPOT (doc. C.N.E.S.; Spot Image)

— : traces ascendantes (de nuit),
- - - : traces descendantes (de jour).

I.3.1. CARACTÉRISTIQUES ORBITALES.

- * Orbite quasi-circulaire :
 - altitude du périégée : 818 km,
 - altitude de l'apogée : 833 km.
- * Inclinaison de l'orbite : 98,77°.
- * Période : 101 min.
- * Espacement à l'équateur entre 2 traces consécutives : 2 818 km.
- * Heure de passage au nœud descendant : 10 h 30 min.

Du fait de l'inclinaison, il y a héliosynchronisme. En raison de la rotation de la Terre et de la précession orbitale, la coïncidence rigoureuse entre deux traces ne peut s'effectuer que toutes les 370 révolutions, ce qui correspond à un cycle orbital de 26 jours. La distance moyenne entre les traces adjacentes est de 108 km au maximum et le champ total d'observation des capteurs en visée verticale est de 117 km. Ceci permet d'assurer une couverture complète de la Terre (sauf les régions polaires, à cause de l'inclinaison) en 26 jours.

I.3.2. CONFIGURATIONS DU SATELLITE.

- * Masse totale : 1 850 kg.
- * Dimensions :
 - corps du satellite : $2 \times 2 \times 3,5$ m,
 - envergure (panneau solaire déployé) : 15,7 m.
- * Equipement :

SPOT 1 est constitué de 3 parties principales :

 - une plateforme multidimension conçue pour assurer l'ensemble des servitudes communes aux véhicules spatiaux : — télémessure et télécommande,
 - stabilisation 3 axes,
 - propulsion pour le maintien de l'orbite,
 - alimentation électrique,
 - calculateur de bord ;
 - une charge utile représentée par 2 capteurs HRV (Haute Résolution Visible) ;
 - un panneau solaire de 1 800 W.

I.3.3. LES CAPTEURS HRV.

* Caractéristiques :

- acquisition d'une ligne transversale à la trace du satellite par barrette de 6 000 détecteurs à transfert de charge, au lieu du balayage par miroir couramment en usage,
- possibilité de fonctionnement en mode panchromatique ou multibande,
- possibilité de visée au nadir ou de visée oblique ($\pm 27^\circ$) à l'aide d'un miroir orientable par télécommande, la valeur de l'inclinaison étant choisie par l'utilisateur lui-même.

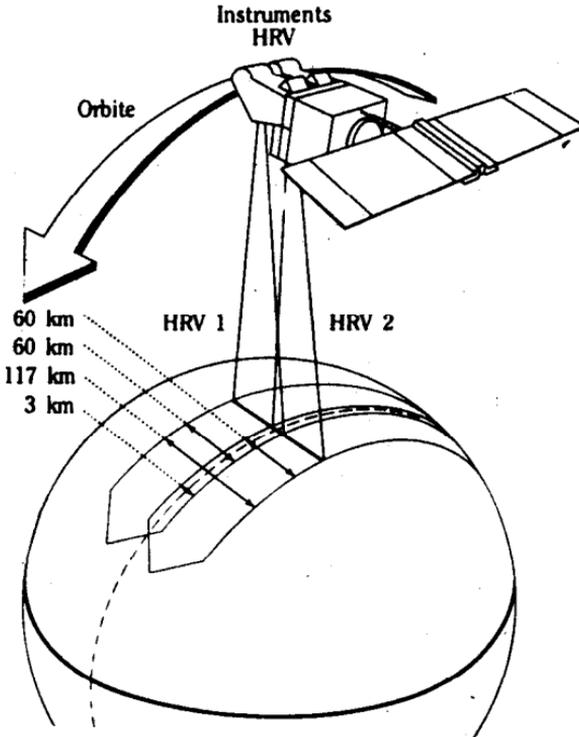


Fig. 8. — En visée verticale, un léger dépointage de HRV 1 de $+1,8^\circ$ et de HRV 2 de $-1,8^\circ$ offre un champ d'observation de 117 km au sol.

(doc. C.N.E.S. - SPOT Image)

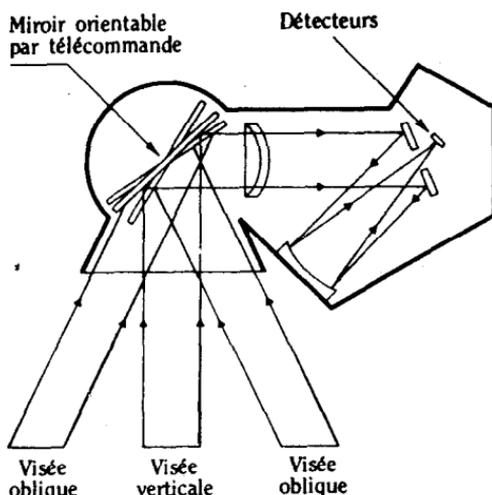


Fig. 9. — Le dépointage possible de l'axe de visée permet d'accroître la répétitivité des observations (1, 4 ou 5 jours au lieu de 26 jours pour le cycle orbital) et d'obtenir des couples d'images stéréoscopiques.

(doc. C.N.E.S. - SPOT Image)

	mode panchromatique	mode multibande
— Domaines de longueur d'onde .	de 0,51 à 0,73 μm	de 0,50 à 0,59 μm de 0,61 à 0,68 μm de 0,79 à 0,89 μm
— Champ angulaire total	4,13°	4,13°
— Champ total d'observation au sol	60 km	60 km
— Nombre de pixels par ligne ..	6 000	3 000
— Dimensions de la tache élémentaire	10 m \times 10 m	20 m \times 20 m
— Capacité d'enregistrement	22 minutes	22 minutes

SPOT 1 est actuellement le plus performant des satellites civils de télédétection en service. Au cours des 20 premiers mois de fonctionnement, 300 000 images de 60 km \times 60 km ont été acquises sur l'ensemble de la planète, soit par la station d'Aus-saguel, près de Toulouse soit par la station de Kiruna, en Suède. En 1986-1987, 4 autres stations de réception des données ont été mises en service au Canada, en Inde et en Espagne. Plu-

sieurs stations sont en cours de montage en Chine, au Pakistan, au Brésil, en Arabie Saoudite.

En France, le prétraitement des images est assuré par le Centre de rectification des Images Spatiales (C.R.I.S.), de Toulouse, mis en œuvre par le C.N.E.S. et l'I.G.N. La commercialisation des images sous différentes formes est assurée par la société SPOT IMAGE (environ 10 000 H.T. pour une scène SPOT géométriquement corrigée sur bande magnétique C.C.T., en janvier 1988).

L'excellente qualité des images acquises au cours des 20 premiers mois de fonctionnement donne encore plus de vigueur à la suite du programme SPOT qui prévoit la réalisation et la mise sur orbite de 2 autres satellites identiques d'ici 1990. Une deuxième génération verra le jour avec SPOT 4, dont le lancement est envisagé pour 1992.

Par ailleurs, l'Agence Spatiale Européenne prévoit la relève des satellites géostationnaires METEOSAT dont elle assure la gestion ainsi que le lancement d'un satellite à défilement muni d'un système actif de télédétection radar, ERS 1.

II. ENSEIGNEMENT DES SCIENCES PHYSIQUES ET TELEDETECTION.

II.1. Introduction de la télédétection dans l'enseignement secondaire.

Depuis quelques années, la télédétection a fait une entrée discrète, en géographie, essentiellement, par le biais des manuels scolaires et seulement à titre d'illustration. Il semble que ce soit l'aspect esthétique des images de télédétection spatiale qui ait été recherché le plus souvent car, ainsi que le souligne F. VERGER (1) dans la revue « L'information géographique », les commentaires relatifs à ces illustrations sont souvent pauvres et parfois erronés.

On assiste actuellement à une diffusion croissante des données de télédétection. Les médias y font d'ailleurs de plus en plus fréquemment appel, surtout depuis le lancement de SPOT, pour commenter un certain nombre d'événements : à l'occasion de la catastrophe de Tchernobyl, à l'occasion du « Mondial 86 », les journaux télévisés ont diffusé des images LANDSAT 5 et SPOT de ces endroits. Quant aux informations météo-

(1) Ecole Normale Supérieure de Jeunes Filles, Montrouge ;
Ecole Pratique des Hautes Etudes, U.A. 910, Paris ;
Imagéo, Paris.

rologiques télévisées, elles présentent, depuis plusieurs années, des images METEOSAT.

Il est aisé de prévoir que face à cette tendance, nos collègues géographes et naturalistes seront amenés à se référer de plus en plus souvent à des images-satellites, à les commenter, éventuellement, à évoquer la nature des informations véhiculées par ces images.

Une équipe s'est donc constituée, à l'Institut National de la Recherche Pédagogique avec, pour thème de travail : « L'Introduction expérimentale de la télédétection dans l'enseignement secondaire ».

Constituée d'enseignants de Géographie, de Sciences naturelles, Sciences physiques et Mathématiques, elle a analysé les rapports entre la télédétection et les contenus enseignés dans chacune de ces disciplines. Plusieurs modes d'introduction ont été proposés et expérimentés, s'appuyant sur des documents existants (photographies et images numériques) et utilisant des moyens matériels et logiciels développés spécialement (montages de travaux pratiques et logiciels d'analyse d'image). Dans la mesure du possible, cette introduction a été menée en tenant compte de l'articulation entre les différentes disciplines concernées.

II.2. Introduction expérimentale de la télédétection en Sciences physiques.

Les Sciences physiques se situent à la fois en amont et en aval de la télédétection. En effet, la mise en œuvre d'un certain nombre de concepts physiques a permis la naissance de la télédétection qui, à son tour, contribue maintenant à une meilleure connaissance des phénomènes physiques et à leur modélisation, par exemple en météorologie, ou en océanographie (cf l'article de M. CRÉPON et J. CASTAGNE : « Quelques caractéristiques des mouvements océaniques à moyenne et grande échelle », pages 617 à 643 du B.U.P. n° 682, de mars 1986).

L'utilisation de la télédétection à des fins de modélisation de phénomènes physiques complexes semble réservée à l'Enseignement supérieur et à la Recherche. Par contre, la compréhension des concepts fondamentaux mis en jeu lors de l'acquisition des données-images fait appel à des notions acquises essentiellement au cours du second degré. L'utilisation de ces données dans le cadre des cours de Géographie ou de Sciences naturelles ne peut guère s'envisager sans l'appui de ces notions fondamentales de Sciences physiques.

S'il est vrai que les physiciens peuvent choisir de multiples domaines d'applications pour illustrer les principes fondamentaux qu'ils exposent sans avoir recours aux Sciences spatiales, il serait dommage d'ignorer sciemment celle-ci à l'heure où elles occupent une place importante à l'extérieur de l'école et où elles motivent une proportion non négligeable d'élèves.

Une enquête fut effectuée à ce propos auprès de 2 000 élèves du secondaire, au début de l'expérimentation, par I. SOURBES. Il ressort de cette étude que le meilleur niveau d'intérêt et de connaissances des Sciences de l'espace par les élèves correspond à la classe de première, suivie de la classe de seconde, puis de la classe de terminale (le baccalauréat ?) Les sources de connaissance citées par ordre décroissant sont : la télévision, les périodiques, les quotidiens, le cinéma, l'enseignement et les ouvrages spécialisés.

En fonction de ces différents aspects, nous nous sommes efforcés de dégager les contenus scientifiques ainsi que des modes d'introduction envisageables.

II.2.1. LES CONTENUS SCIENTIFIQUES.

Les images de télédétection recèlent des informations :

- * de caractère spatial :
 - localisation de la scène,
 - échelle,
 - géométrie,
 - texture et structure ;
- * de caractère temporel :
 - date et heure de prise de vue,
 - répétitivité,
 - quasi-instantanéité ;
- * de caractère spectral :
 - domaines de longueur d'onde,
 - valeurs radiométriques.

Tirer parti de ces informations suppose l'acquisition préalable de concepts se rapportant aux domaines suivants :

- * Notions de mécanique spatiale :
 - inertie et mouvement,
 - gravitation universelle,
 - référentiels terrestre et géocentrique,
 - mouvement d'un satellite artificiel de la Terre.

* Interactions rayonnement - matière :

- notions d'onde progressive,
- lumière,
- ondes électromagnétiques,
- rayonnement électromagnétique et énergie,
- émission et détection des rayonnements,
- radiométrie,
- absorption, diffusion, réflexion,
- corps noir.

* Acquisition des données :

- optoélectronique,
- conversion analogique-numérique.

Il est évident que bon nombre des points évoqués précédemment sont étudiés de façon plus ou moins approfondie dans les programmes actuels, de la classe de Quatrième à celle de Terminale. Par contre, en ce qui concerne l'acquisition des données, par exemple, il n'y est jamais fait allusion, alors que l'automatisation des mesures physiques se développe rapidement (cf « Ordinateurs en physique - chimie », I.N.R.P./U.d.P., 1985, « Informatique et pédagogie des Sciences physiques », I.N.R.P./U.d.P./I.G., 1986 et « Cours et T.P. de Physique et Chimie avec Ordinateur », I.N.R.P./U.d.P., 1987).

II.2.2. LES MODES D'INTRODUCTION.

Trois modes d'introduction furent développés dans des établissements scolaires différents :

a) Dans le cadre d'un P.A.E. interdisciplinaire réalisé au niveau de la classe de Seconde avec la participation des enseignants de Géographie et de Sciences naturelles. Axé sur l'exploitation de données régionales de télédétection, ce P.A.E. intégrait également des travaux de terrain.

Le pré-niveau requis en Sciences physiques était celui de la classe de Quatrième (programme d'optique : lumière, analyse de la lumière, notions d'astrophysique). Des notions élémentaires concernant les ondes, leurs interactions avec la matière, la radiométrie et les caractéristiques orbitales des satellites furent exposées dans un délai relativement court, afin de permettre le passage aux applications.

b) Une approche thématique fut développée dans le cadre normal du cours, dans les classes de Première A et B. Certains des thèmes proposés par le programme actuel offrent un très bon support à l'introduction de la télédétection :

- Avions et engins spatiaux.
- Spectroscopie ; analyse spectrale.
- Des ondes hertziennes aux rayons X et γ .

Ce thème s'est révélé attrayant pour les élèves de ces classes en raison des possibilités de manipulations offertes : étude des détecteurs photoélectriques ; réalisation d'un capteur capable de détecter des rayonnements dans plusieurs domaines de longueur d'onde ; radiométrie ; détermination de la signature spectrale d'objets. D'autre part, tout ce qui se rapporte à l'étude de la lumière (synthèse additive et soustractive ; rôle de l'atmosphère sur la transmission de la lumière) a fortement intéressé les élèves. En ce qui concerne la mécanique spatiale, l'étude du mouvement des satellites s'est faite à partir des images de télé-détection dont la géométrie particulière permet d'introduire un certain nombre de notions de façon concrète.

Les limites de cet enseignement se situent au niveau des concepts suivants, difficiles d'accès pour les élèves de ces classes :

- corps noir ; rayonnement thermique,
- synthèse soustractive de la lumière,
- composition du mouvement du satellite avec celui de la Terre,
- héliosynchronisme.

c) Une approche diffuse, par insertion dans les programmes existants à partir de points d'appui privilégiés fut développée en classe de Seconde et en classe de Première S, dans le strict cadre des heures de cours prévues.

A) En classe de Seconde :

L'enseignement des Sciences physiques souffre de la faiblesse de l'horaire imparti vis-à-vis de l'importance du programme et de l'hétérogénéité de niveau et d'aptitude des élèves.

Nous nous sommes efforcés de faire converger les trois composantes suivantes :

- * Les connaissances acquises par les élèves au cours du premier cycle où sont abordées les notions suivantes :
 - Sources et récepteurs de lumière,
 - Propagation de la lumière,
 - Images,
 - Analyse de la lumière. Notions d'astrophysique.

Les commentaires du programme de Quatrième suggèrent d'ailleurs la réalisation d'expériences simples de spectroscopie visant à introduire les notions de spectre continu, de rayonnement visible et infrarouge, de spectre de raies : « ... Les termes de spectre d'émission, de spectre d'absorption, ne sont pas au programme, mais le professeur doit se tenir prêt à répondre à une question à ce sujet ou à indiquer une documentation accessible aux élèves... » (brochure C.N.D.P. n° 6097).

- * Le vécu de l'élève qui, de par la vie courante, possède déjà quelques informations sur le rayonnement (photographie, radiographie, émission et réception radio, radar, énergie solaire, absorption du rayonnement lumineux par certaines substances...) et sur les satellites.
- * Les possibilités offertes par le programme de la classe de Seconde en mécanique et en électronique, tout en y insérant éventuellement des éléments d'information complémentaires mais limités.

Pratiquement, il nous est apparu souhaitable de traiter en premier lieu « électrocinétique et électronique expérimentale », de façon à introduire assez tôt dans l'année la notion de capteur de rayonnement. En effet, l'usage des données de télédétection en Géographie et en Sciences naturelles y fait référence.

α) Electrocinétique et électronique expérimentales.

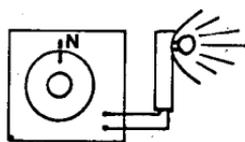
Le programme, dans sa version actuelle, offre la possibilité d'étudier des détecteurs de rayonnements et de réaliser un capteur.

En premier lieu, lors de l'étude de dipôles, on peut mettre l'accent sur ceux qui sont sensibles à la lumière.

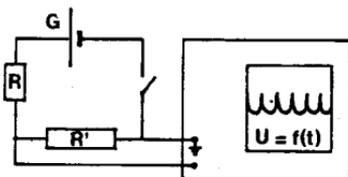
Les expériences suivantes permettent par exemple de mieux cerner les propriétés de ces dipôles :

- 1 : Visualiser à l'oscillographe la caractéristique d'un photorésistor.
- 2 : Montrer l'aptitude d'un photorésistor à suivre des variations périodiques d'éclairement.

Comparer à l'œil humain.



STROBOSCOPE

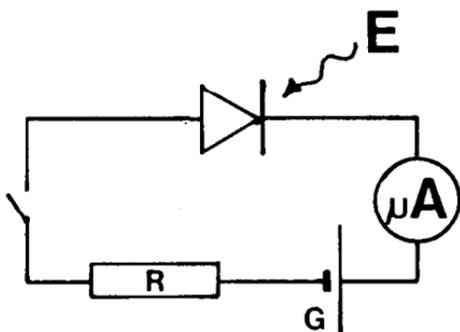


OSCILLOGRAPHE

R : PHOTORESISTANCE

Faire varier la fréquence des éclairs de 10 Hz à 300 Hz, par exemple.

- 3 : Photodiode : Mettre en évidence l'effet photovoltaïque (on trouve chez les revendeurs des photodiodes dont la surface sensible est de 2 à 10 mm² pour une dizaine de francs). Montrer que la tension délivrée par la photodiode tend vers une limite lorsqu'on la soumet à un éclairement de plus en plus important.
- 4 : Photodiode polarisée en inverse : En l'absence de lumière incidente, elle se comporte comme une simple diode ; en présence de lumière, elle laisse passer un courant (quelques microampères) qui présente la particularité d'être proportionnel à l'éclairement.



De plus, tout comme le photorésistor, elle peut suivre des variations très rapides de lumière.

- 5 : En second lieu, lors de la réalisation d'un montage électronique simple, on peut envisager la construction d'un radiomètre :

Une photodiode polarisée en inverse délivre en présence de lumière un courant trop faible pour être aisément mesurable. Il est donc nécessaire d'amplifier ce signal. Un transistor, ou éventuellement un ampli op. peuvent (2) jouer ce rôle. L'appareil de sortie doit être lisible dans l'obscurité (multimètre à affichage par diodes, ou oscillographe).

Il convient toutefois de laisser la photodiode sur un support spécifique, mobile, qui va constituer la tête de mesure dans la suite des expériences.

(2) Voir dans le B.U.P. l'article de J. VOGR : « Construction d'un radiomètre simplifié », dans ce numéro page 189.

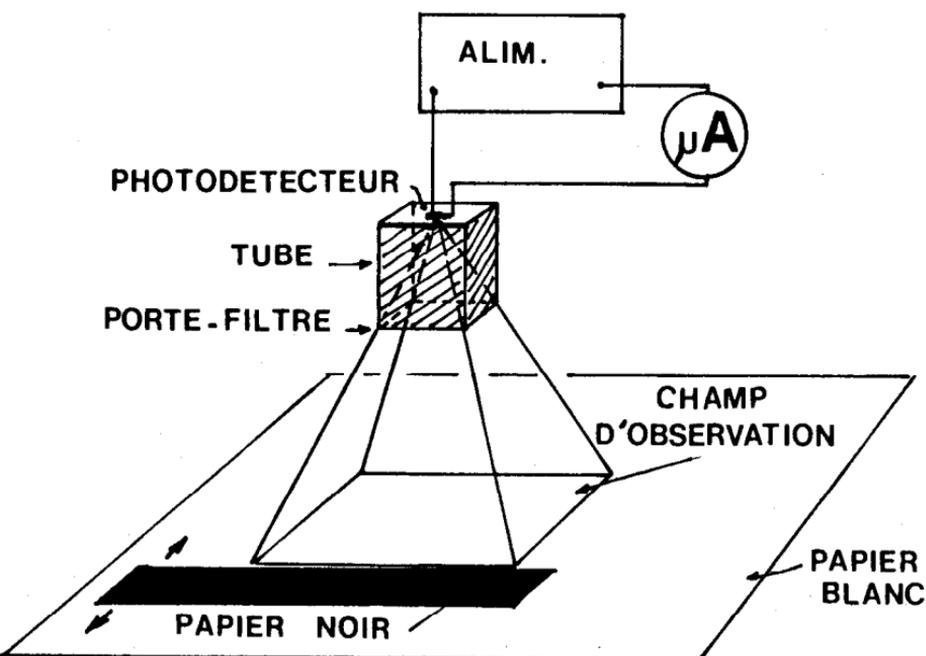


Fig. 10. — Maquette de radiomètre.

- 6 : Adjoindre à la photodiode un cache en carton (noir), de façon à délimiter un champ d'observation. Orienter la photodiode vers une feuille blanche posée à plat ; faire délimiter aux élèves le « champ élémentaire d'observation », en déplaçant une bande de papier noir.
- 7 : Disposer à l'intérieur du champ d'observation, 2 ou 3 pastilles de papier noir ; faire modifier leurs positions. Le signal de sortie n'est pas modifié : le détecteur « intègre » tout ce qui provient du champ d'observation élémentaire.
- 8 : Réaliser un spectre de la lumière blanche et déplacer la photodiode en travers du spectre (pour ceci nous avons fait usage d'une photodiode montée sur la vis micrométrique d'un palmer, lui-même fixé à un support. Ce

dispositif offre une grande stabilité et une bonne précision de guidage). La sensibilité spectrale de ce type de détecteur permet de mettre en évidence la présence de rayonnement infrarouge.

9 : Monter le capteur sur un support, de façon à viser un plan horizontal.

Faire défiler sous celui-ci des objets variés soumis à un même éclairage. On remarque que le signal de sortie dépend de l'aptitude des objets à renvoyer vers le capteur les rayonnements qu'ils reçoivent. La notion de réflectance peut alors être introduite.

En adjoignant des filtres au capteur, on peut affiner les renseignements fournis par l'appareil et accroître les informations concernant le milieu observé.

Il est alors souhaitable de commenter à l'aide de diapositives le fonctionnement d'un radiomètre de télédétection et de montrer des images acquises par un satellite (de préférence, une même scène dans plusieurs bandes spectrales).

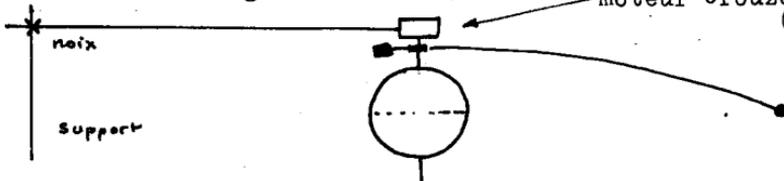
β) Mécanique.

L'introduction de quelques éléments de mécanique spatiale a été fort bien accueillie. La tâche nous a été grandement facilitée par la mise en œuvre de maquettes animées de satellites à défilement et géostationnaire.

Satellite géostationnaire :

Satellite géostationnaire :

moteur Couznet, à réducteur
(2 tr/min)



Satellite à défilement :

moteur de tourne-broche
(alim : 1,5 v) ; 6 tours
par minute

globe
terrestre

moteur
+ réducteur
(0,4 tr/min)

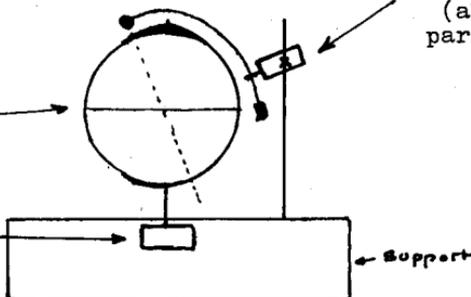


Fig. 11. — Maquettes de satellites.

En dehors de toute considération « télédétection », ces deux maquettes se sont révélées indispensables. En effet, elles apportent une aide importante à l'introduction des notions de référentiel, de vitesse angulaire... etc. à différents niveaux, dans les classes de second cycle. De plus, leur réalisation ne pose pas de problème insurmontable et l'investissement financier est limité (moteur à réducteur : 75 F ; moteur de tourne-broche : 25 F ; globe : 120 F).

Nous avons par ailleurs utilisé des documents de mécanique spatiale comme base d'exercices. L'étude d'une séquence de lancement d'un satellite (position et vecteur vitesse de la fusée pendant les premières minutes de vol) suscite davantage d'intérêt que l'étude du mouvement d'un autoporteur... Tout ce qui touche au mouvement des engins spatiaux éveille facilement la curiosité des élèves.

Au niveau de cette classe, les notions abordées, utiles pour une meilleure compréhension des images de télédétection existent, tant en mécanique qu'en électricité. Elles demeurent cependant insuffisantes puisque l'aspect « ondes » n'est pas au programme.

B) En classe de Première

L'insertion de la télédétection s'est effectuée assez naturellement dans le déroulement du cours dont on sait qu'une partie importante est consacrée à l'étude des ondes.

L'apport spécifique de la télédétection est ici très enrichissant ainsi qu'en témoigne l'exemple suivant :

L'étude des spectres d'absorption se limite usuellement à la présentation de spectres de solutions variées.

Les images de télédétection peuvent dans ce cas illustrer de façon extrêmement concrète le phénomène d'absorption :

Compte tenu de ses propriétés physiques et de sa composition chimique, l'atmosphère absorbe plus ou moins fortement certaines radiations, ainsi que le montre la courbe de transmission atmosphérique présentée ci-après :

METEOSAT, satellite géostationnaire, dispose de capteurs opérant dans 3 bandes spectrales :

- le canal 1 correspond au visible et proche IR ; on constate que l'atmosphère offre une bonne transmission dans ce domaine ;
- le canal 2 correspond à une bande d'absorption atmosphérique due à la présence de vapeur d'eau ;

— le canal 3 correspond à l'infrarouge thermique ; l'atmosphère offre une transmission assez satisfaisante dans ce domaine.

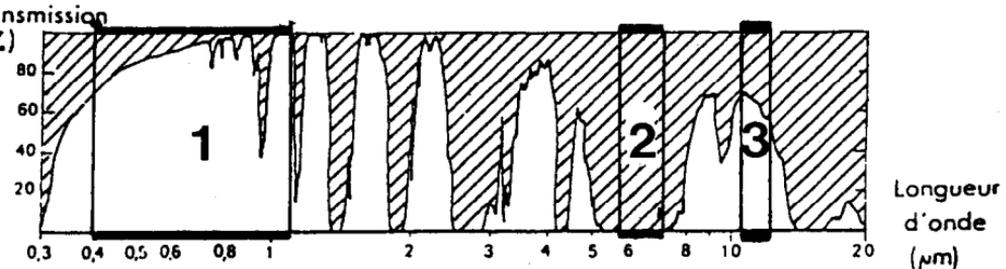


Fig. 12. — Transmission d'une atmosphère standard
(d'après F. Y. Knetzys, 1980).

Atmosphère standard : — température : 288 K,
— pression : 1 013 hPa,
— masse volumique : 1,225 kg/m³.

1, 2, 3 : domaines de sensibilité spectrale des capteurs du satellite METEOSAT.

Les deux images présentées ci-après résultent de l'acquisition de données effectuées par le satellite METEOSAT au même instant, dans deux bandes spectrales.

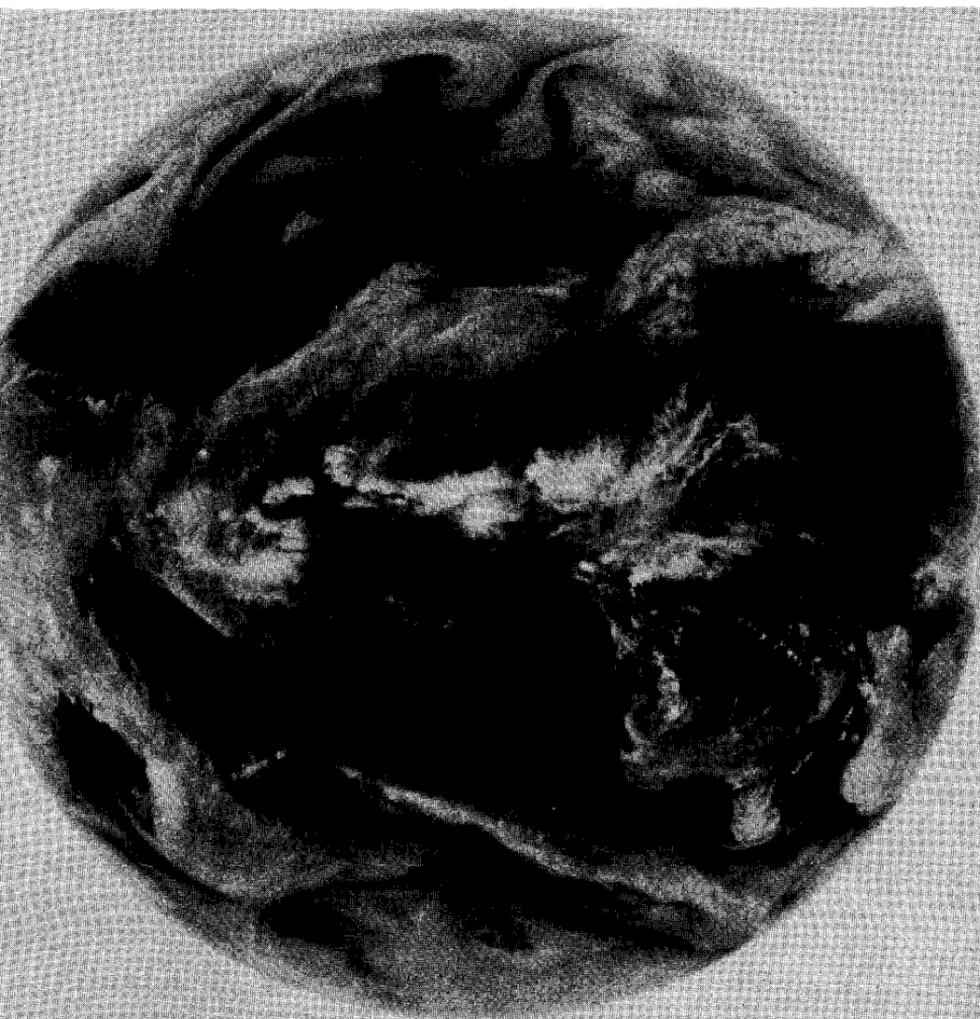
L'étude de ce document, les corrélations avec la courbe de transmission atmosphérique, le parti que l'on peut en tirer, les applications dans le domaine de la climatologie motivent aisément les élèves. L'étude de l'absorption apparaît ainsi beaucoup moins « gratuite » ; de surcroît, ils établissent mieux le lien entre certaines disciplines.

Quant à l'investissement horaire consacré à l'examen de ces documents et au commentaire de la courbe de transmission atmosphérique, en regard de l'enrichissement du cours apporté par cette étude, il est dérisoire.

En ce qui concerne la partie du programme consacrée à la mécanique, on relève également la présence de points qui permettent d'introduire des éléments de mécanique spatiale :

- mouvement de rotation d'un solide, vitesse angulaire, vitesse d'un point du solide ;
- travail et puissance des forces agissant sur un solide en mouvement de rotation autour d'un axe fixe ;
- énergie potentielle de pesanteur...

Dans ce domaine également, les données de télédétection offrent des possibilités de travaux dirigés orientés vers des applications concrètes et nouvelles. Exemple :

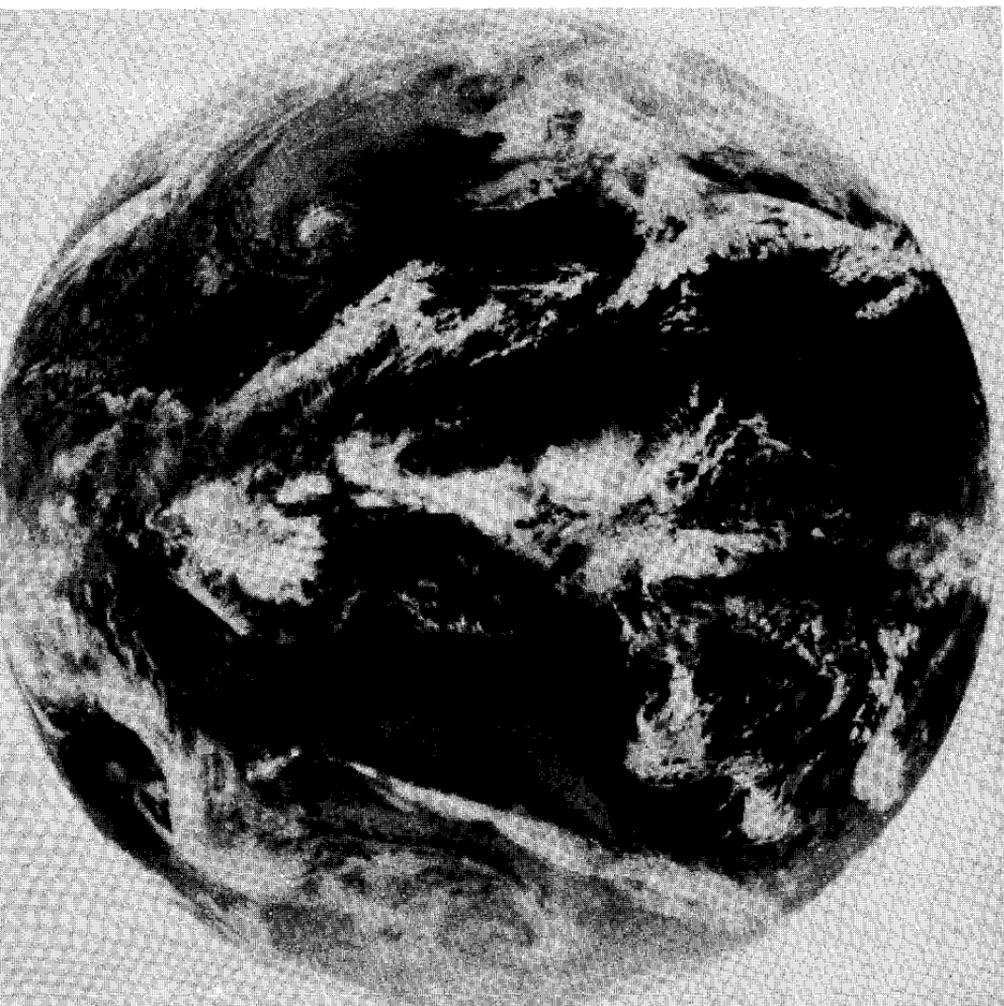


(doc. E.S.A.)

Fig. 13. — Scène METEOSAT dans le canal « vapeur d'eau ».

La surface de la Terre n'est pas perceptible en raison de l'absorption atmosphérique liée à la présence de vapeur d'eau.

En blanc : zones de forte teneur en eau (zone équatoriale, par exemple).



(doc. E.S.A.)

Fig. 14. — Scène METEOSAT dans le canal infrarouge thermique. Le codage adopté traduit *en blanc* les températures de surface les plus basses et *en noir* les températures de surface les plus élevées.

Une scène satellite complète présente un format tel que celui qui est schématisé ci-après en raison de la composition des mouvements de rotation de la Terre et du satellite.

Pour un satellite survolant la Terre dans le sens Nord-Sud, le décalage du balayage, AB, s'effectue vers l'Ouest. Connaissant

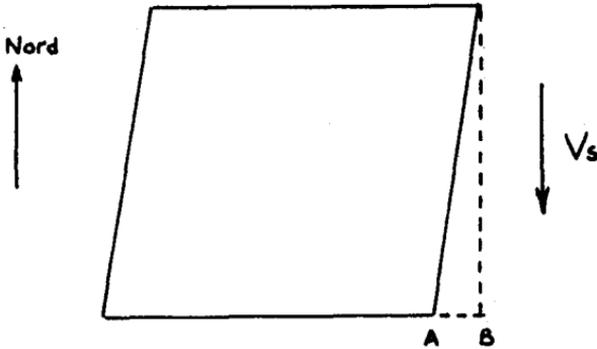


Fig. 15. — Format d'une image de satellite à défilement.

la latitude du centre de l'image et après mesure de AB , on peut calculer la vitesse de survol du satellite.

Ce type de travail constitue un bon exercice de réflexion pour des élèves de Première S et simultanément, favorise leur perception des images spatiales.

Quelques limites subsistent néanmoins. Elles se rapportent :

- à quelques aspects de radiométrie (confusion fréquente entre luminance et réflectance) ;
- au corps noir ;
- à l'héliosynchronisme.

CONCLUSION.

Au cours de cette introduction expérimentale de la télédétection en Sciences physiques, nous avons rencontré des difficultés :

- d'ordre théorique : notions de luminance et d'héliosynchronisme, pour ne citer que les points les plus délicats ;
- d'ordre méthodologique : articulation par rapport aux programmes actuels - progression - prise en compte des apports des autres disciplines - organisation d'une démarche pluridisciplinaire.

Les aspects positifs se rapportent :

- à l'intérêt réel d'un bon nombre d'élèves pour ce qui a trait à l'espace. Il nous faut cependant rechercher et créer le maximum de dispositifs propres à concrétiser les notions abordées ;

- au caractère expérimental et technologique de cet enseignement ;
- aux ouvertures dans les domaines suivants :
 - perception de l'environnement : couleur - atmosphère,
 - numérisation et traitement de l'information,
 - optoélectronique ;
- à la vocation interdisciplinaire de la télédétection ;
- à l'opportunité de l'effort de la France et de l'Europe dans ce domaine.

Depuis la rentrée 1987, la Direction des Lycées, prenant le relais de l'I.N.R.P., a élargi l'expérimentation de l'utilisation des images de télédétection dans l'enseignement secondaire à l'ensemble des Académies.

ELEMENTS DE BIBLIOGRAPHIE

- F. BECKER. — *Application des techniques spatiales à l'observation de la Terre ou télédétection électromagnétique aérospatiale*. 1981. B.U.P. n° 630, pages 435 à 497.
- A. COUZY. — *La télédétection*. 1981. N° 1919 de la collection « Que sais-je ? ». P.U.F., 126 p.
- F. VERGER. — *L'observation de la Terre par les satellites*. 1982. N° 1989 de la collection « Que sais-je ? ». P.U.F., 126 p.
- Revue du Palais de la Découverte. 1980. Numéro spécial 19 ; *La conquête de l'espace*, 392 p.
- Documentation Française. 1982. *Les enjeux de l'espace*. Les cahiers français, n° 206-207, 128 p.
- Espace Information :
Les apports de la télédétection spatiale. 1982. N° 23, C.N.E.S., pages 1 à 13.
La télédétection spatiale : un outil pédagogique. 1984. N° 27, C.N.E.S., pages 1 à 30.
La télédétection au lycée. 1985. N° 31, C.N.E.S., pages 22 à 28.
- Rencontres pédagogiques. 1987. N° 17, I.N.R.P. *Du Satellite à la classe*, 128 p.
-

Construction d'un radiomètre simplifié (*)

par Jean VOGT,

Lycée Fustel-de-Coulanges, Strasbourg.

I. INTRODUCTION.

La nécessité de disposer d'un radiomètre apparaît chaque fois que l'on a besoin d'évaluer l'énergie rayonnante émise, réfléchi ou reçue par un milieu. Il en est ainsi, par exemple, en télédétection aérospatiale, dans l'enseignement de la Physique (étude de l'absorption, de la réflexion, de l'émission thermique, des corps colorés, de la trichromie, des filtres...) et en Sciences naturelles (étude de l'absorption chlorophyllienne en fonction de la longueur d'onde, comparaison des éclaircissements des plantes...).

Le radiomètre décrit dans cet article a été construit dans le cadre d'une recherche de l'I.N.R.P. sur l'« Introduction expérimentale de la télédétection dans l'enseignement secondaire ». Il donne des résultats quantitatifs et a pour mission de permettre aux élèves de mieux concrétiser le principe de l'acquisition des données en télédétection. Au cours de son utilisation il est apparu que cet appareil pouvait rendre service dans l'enseignement de la Physique et des Sciences naturelles.

Principales caractéristiques de ce radiomètre :

- fonctionne dans le visible et le proche infrarouge pour des longueurs d'onde allant de 400 à 1 100 nm,
- permet des mesures dans 6 bandes spectrales différentes,
- suffisamment simple afin de pouvoir être étudié et compris par un élève de Seconde,
- donne des mesures quantitatives,
- bon marché (environ 180 F pour la version la moins chère).

Sur le plan de la précision, cet appareil ne peut évidemment pas concurrencer les radiomètres professionnels dont le prix est au moins cent fois plus élevé, mais son intérêt pédagogique (voir § VI.) et la simplicité de la construction justifient sa réalisation.

(*) *N.D.L.R.* : Cet article, ainsi que le précédent, reprend la matière d'exposés et de T.P. proposés au Stage du C.N.E.S. au Bourget-du-Lac en septembre 1987.