

**Observation de la Terre
par satellite :
Contexte et principes
fondamentaux**



CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES

Jean-Claude Souyris

Centre National d'Études Spatiales (CNES)

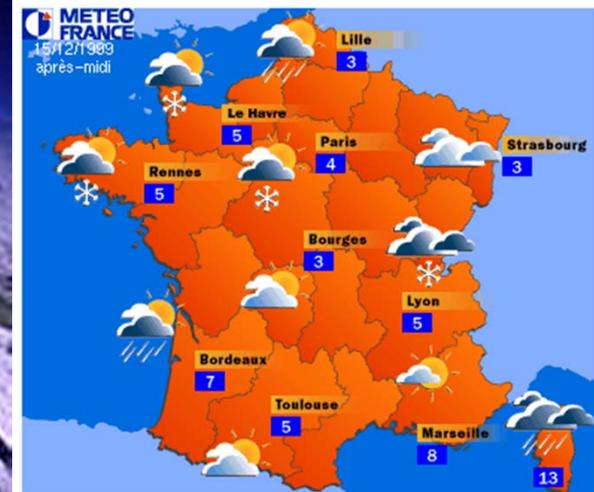
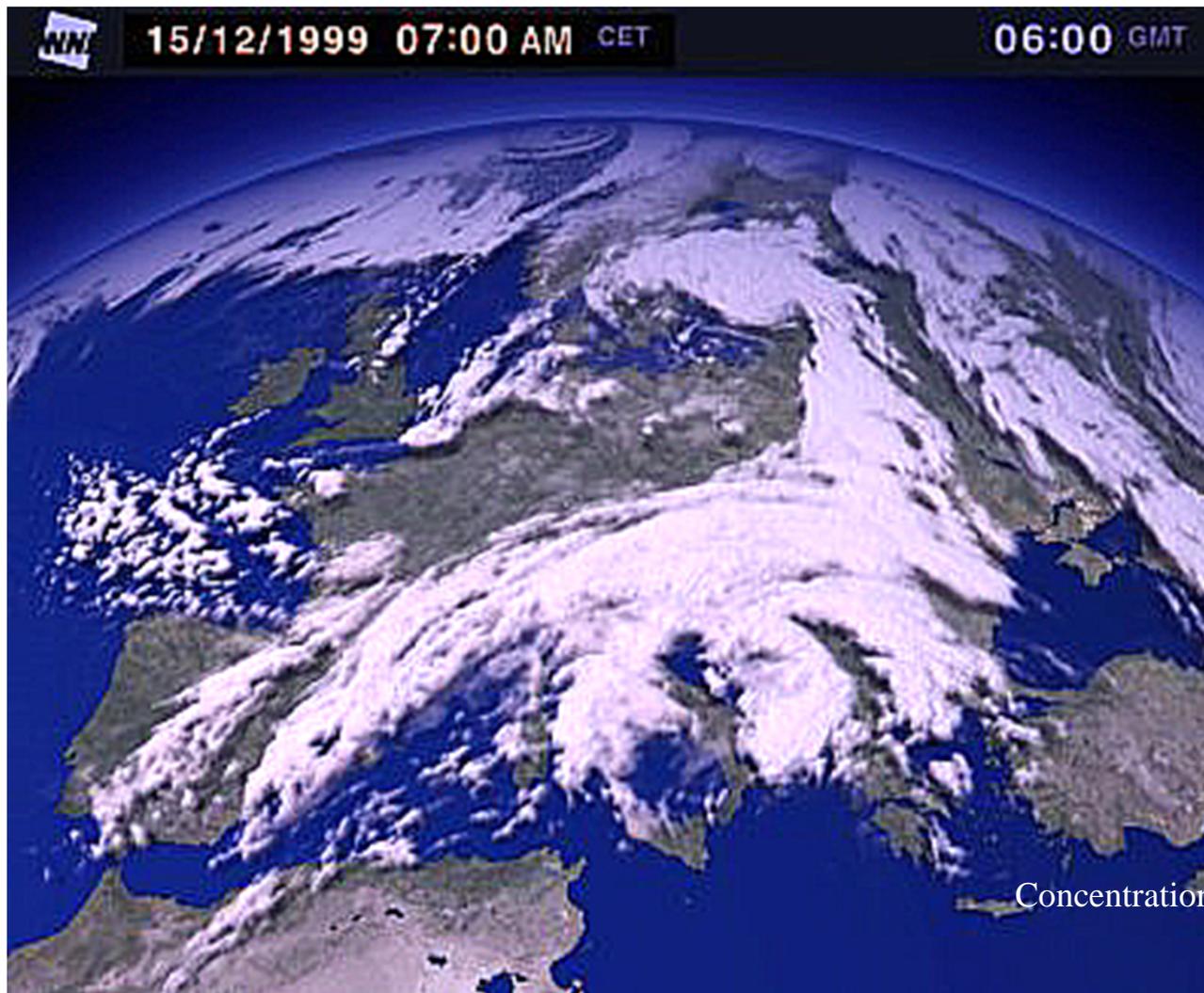
Service Altimétrie & Radar

**Remerciements : Christophe Valorge, CNES, + service SI/QI (cours de
télédétection optique)**

Utilité de l'observation de la Terre

Météorologie

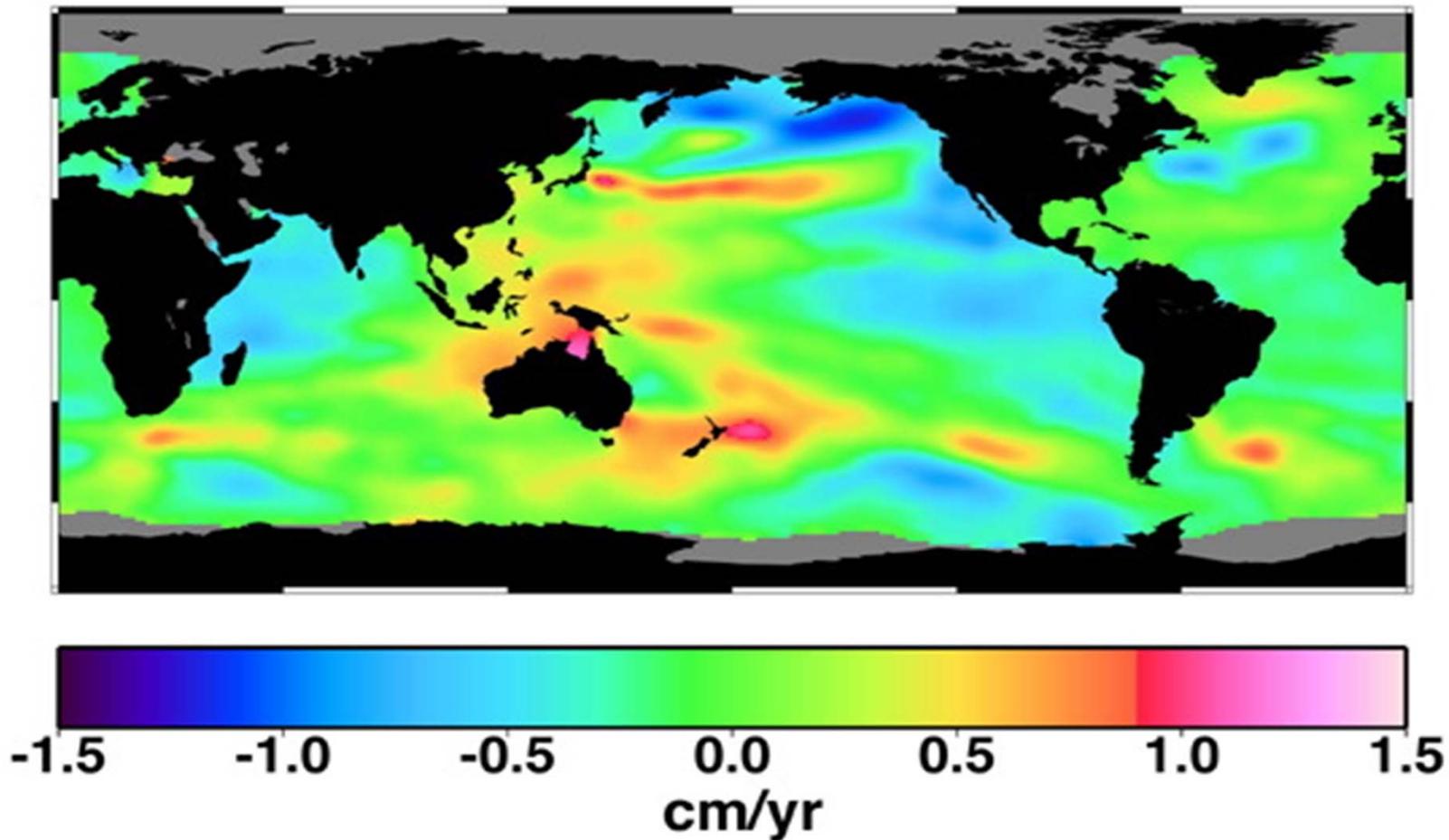
Prévision



Utilité de l'observation de la Terre

Océanographie

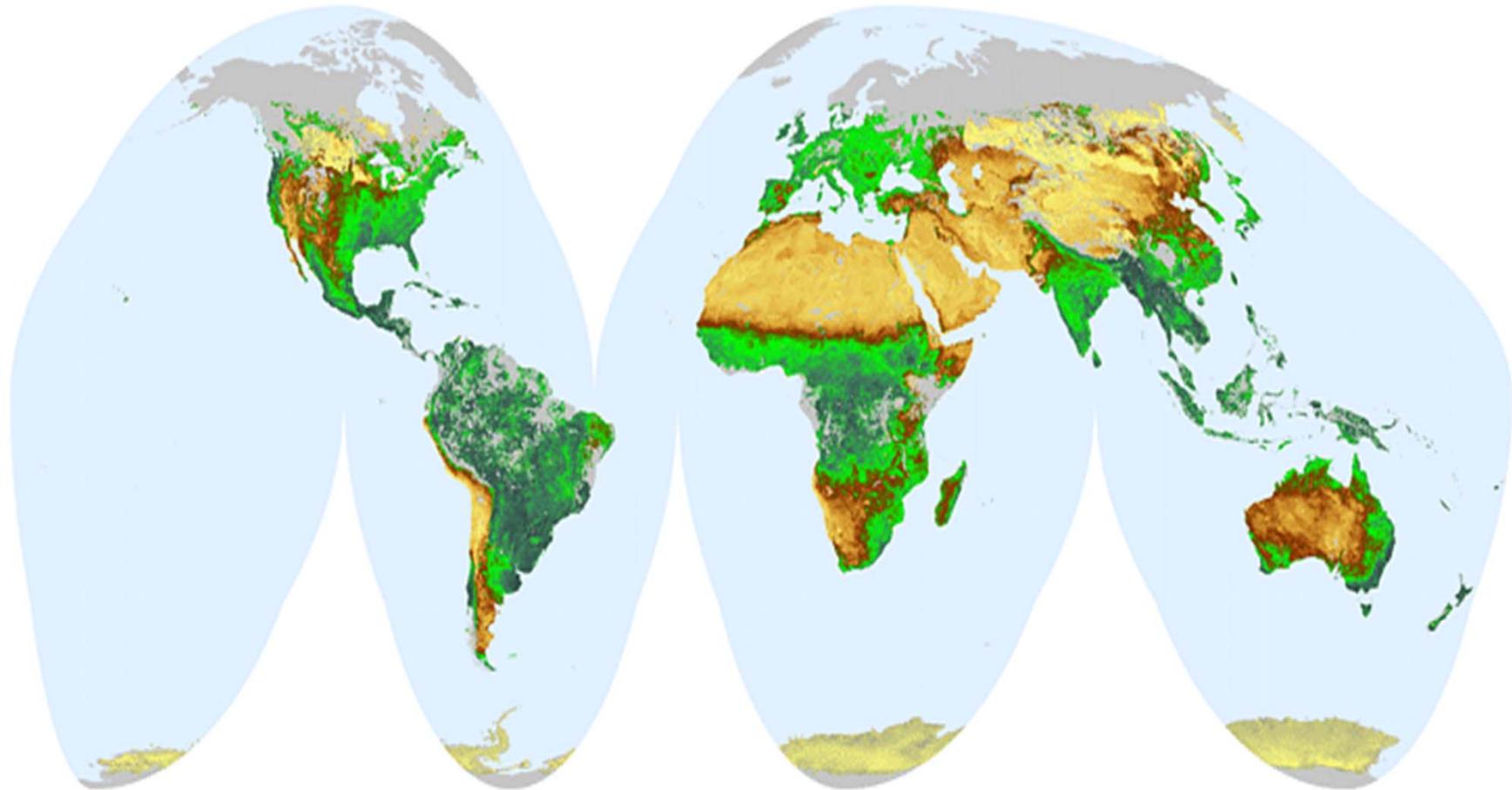
Variation de hauteur moyenne des océans (étude du climat)



Utilité de l'observation de la Terre

Cartographie végétale

(Etude du cycle du carbone)

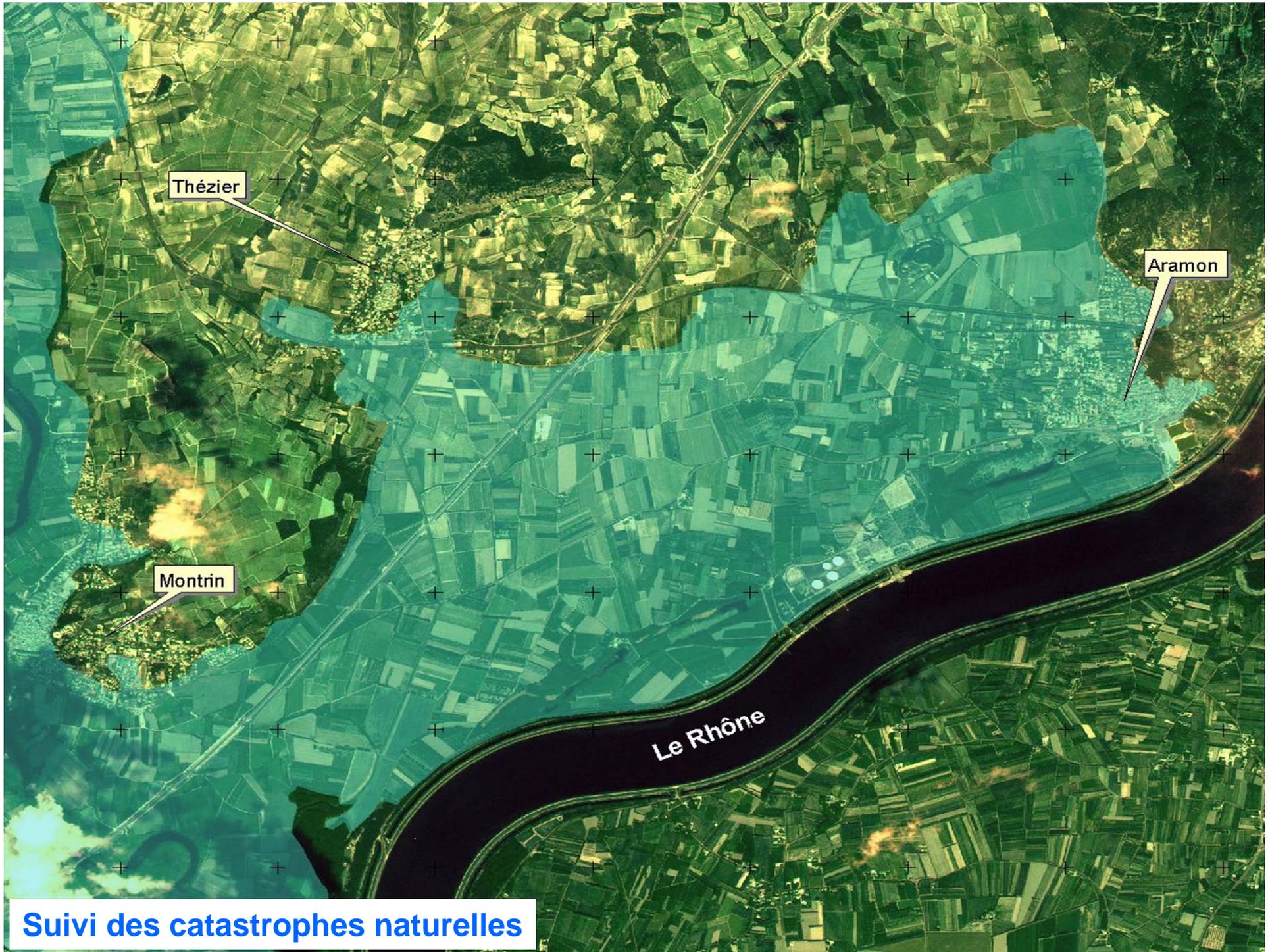


POLDER Data: CNES/NASDA
Processing: CESBIO/LSCE

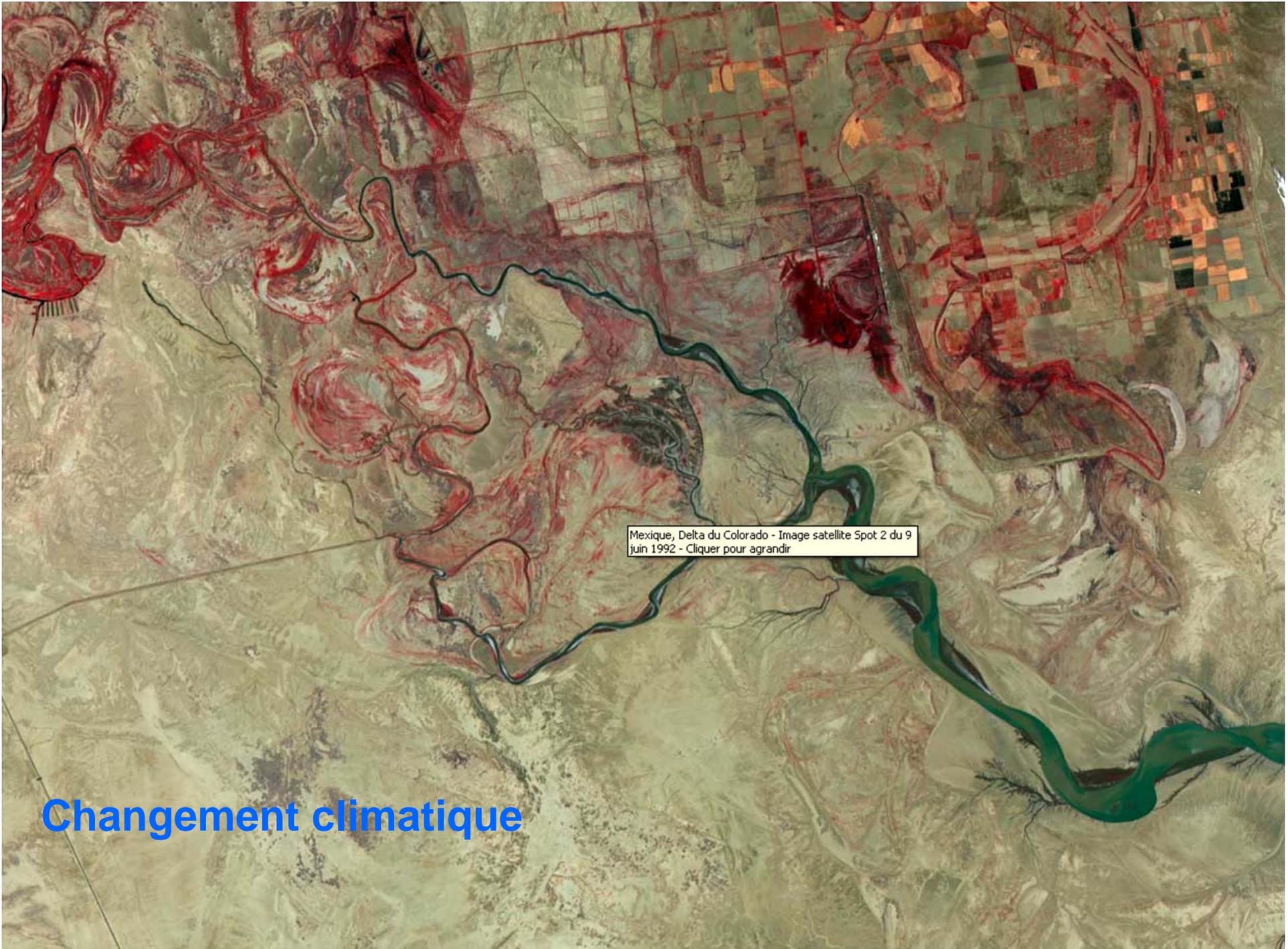
Utilité de l'observation de la Terre



Mesure du relief (cartographie)



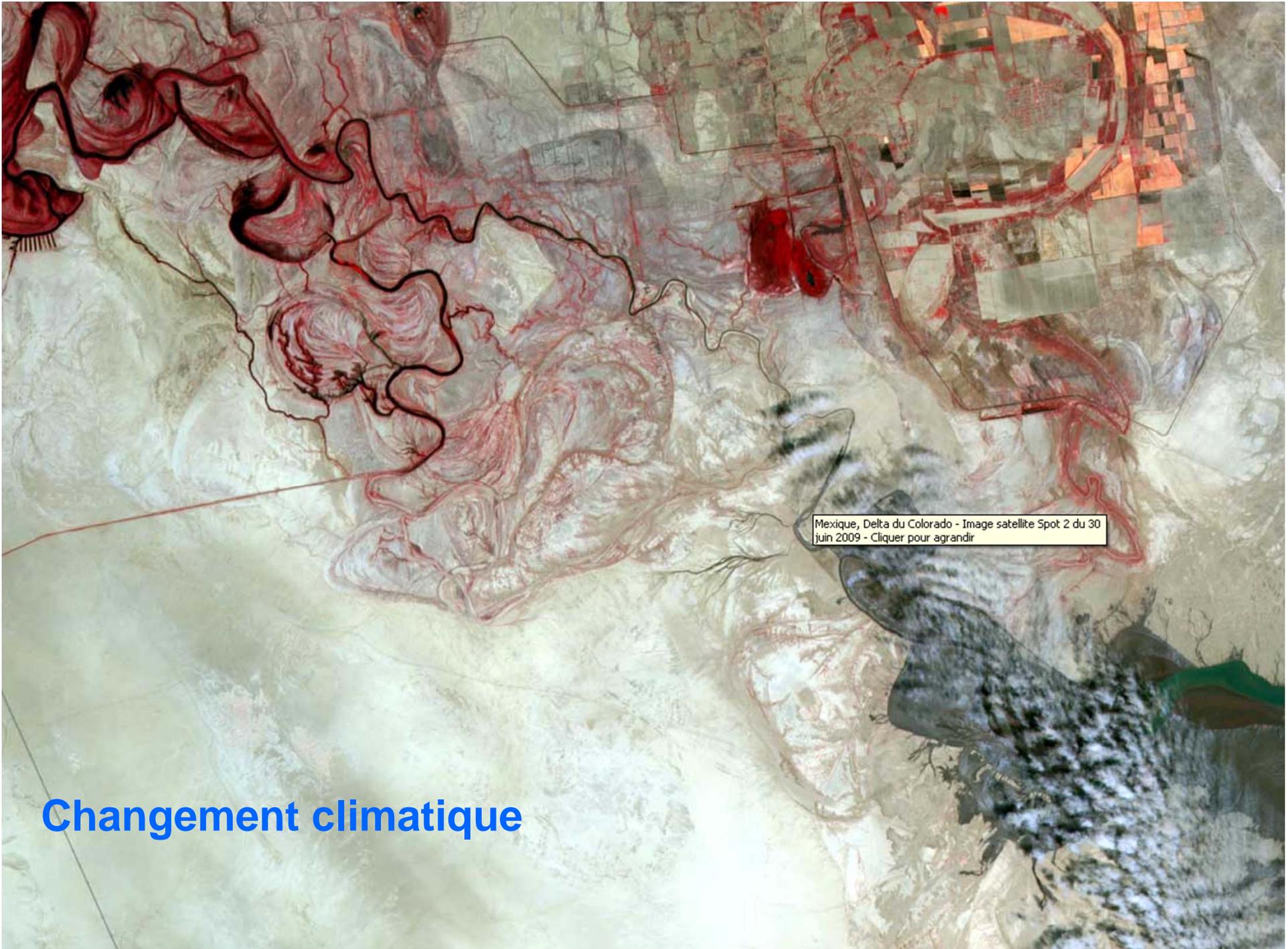
Suivi des catastrophes naturelles



Mexique, Delta du Colorado - Image satellite Spot 2 du 9 juin 1992 - Cliquer pour agrandir

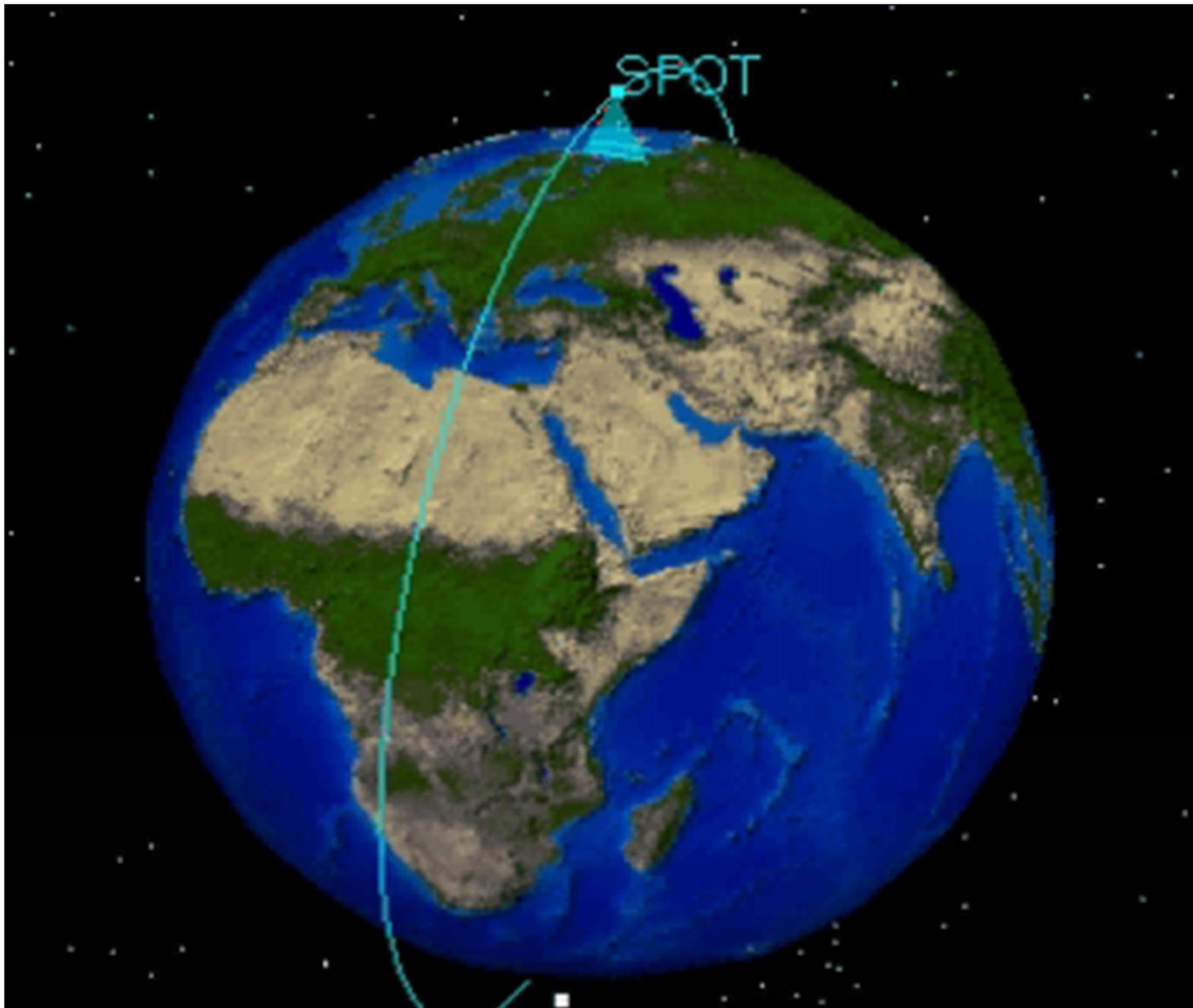
Changement climatique

Mexique, Delta du Colorado - Image satellite Spot 2 du 9 juin 1992 - Cliquer pour agrandir



Changement climatique

Mexique, Delta du Colorado - Image satellite Spot 2 du 30 juin 2009 - Cliquer pour agrandir



Ronde d'un satellite d'observation de la Terre

Sommaire

- **Principes physiques**
- **Généralités sur les orbites, les orbites de la télédétection**
- **Principes d'acquisition de la donnée optique**
- **Architecture et fonctionnement d'un système de télédétection**
- **Panorama de quelques missions d'observation de la Terre optique**

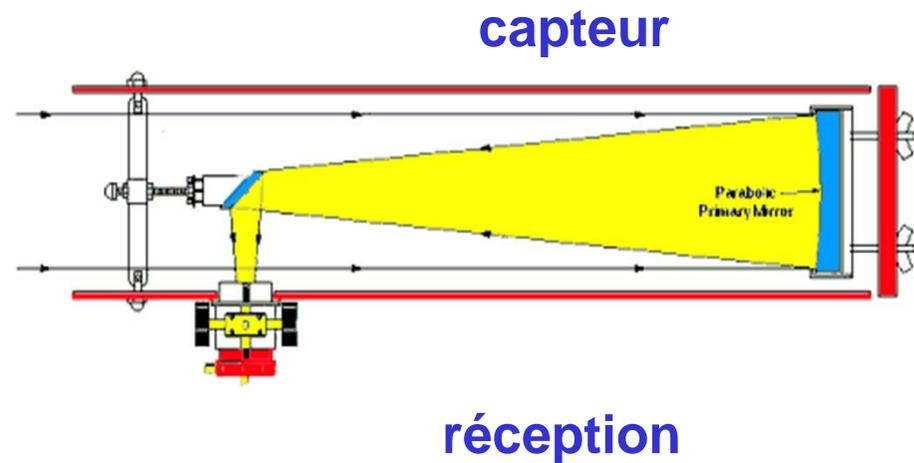
Principes Physiques

- Télédétection = ensemble de techniques utilisées pour déterminer les propriétés des objets à partir de leur comportement en diffusion

objet

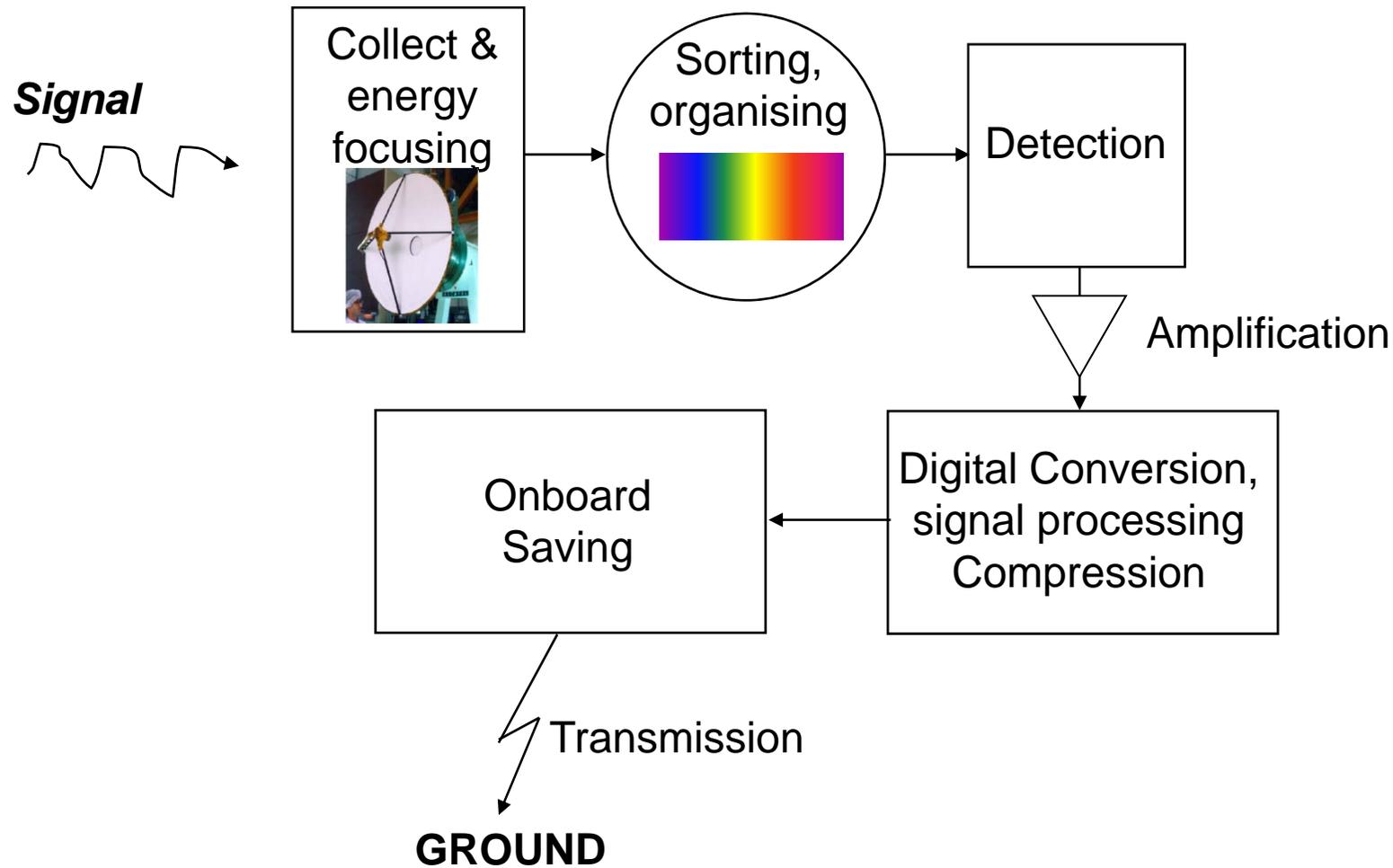


diffusion



Principes Physiques

→ Chaîne de réception type



Principes Physiques

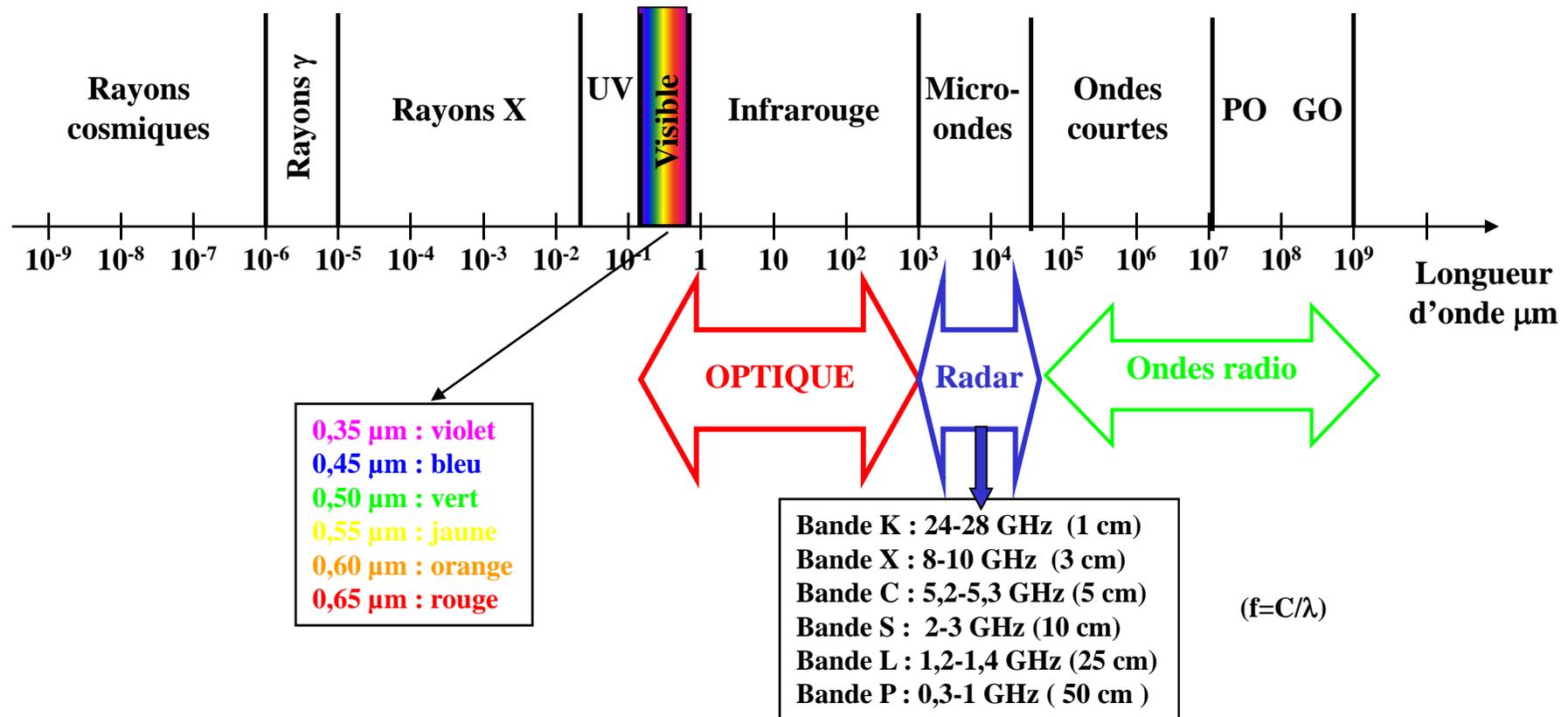
- Gamme étendue de **signaux observés** , incluant :

Rapport entre les longueurs d'onde : 100.000 ...

- Spectre visible : [0.4 , 0.7] μm : Le monde tel qu'on le voit
- Proche infra-rouge : [0.7 , 3] μm : **vegetation, humidité de surface...**
- Infra-rouge [3, 50] μm : signatures dépendante de la **température**
- Micro-ondes [3 cm - 100 cm] : rugosité, humidité, biomasse, océanographie, objets métalliques, mouvements, ... **radar**

Principes Physiques

- Selon leurs longueurs d'onde (\Leftrightarrow leurs fréquences), les ondes électro-magnétiques portent des noms différents :

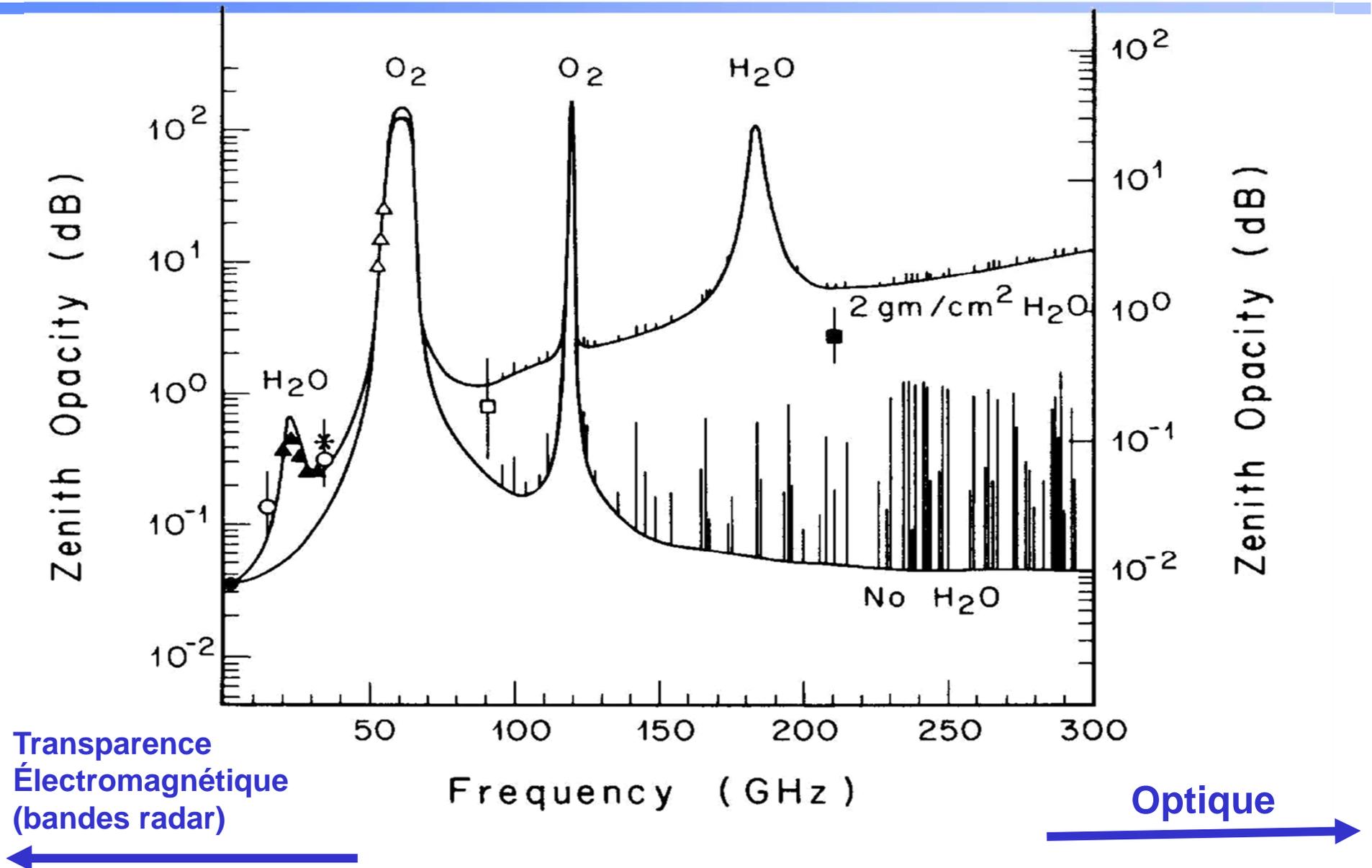


Principes Physiques

- **Noms courants des bandes spectrales optiques :**
 - **VIS** (visible) ~ 0.40 - 0.75 μm
B0~0.40-0.50 μm Bleu **B1~0.45-0.55 μm Vert** **B2~0.60-0.70 μm Rouge**
PA ou PAN (panchromatique) bande large ~ 0.45-0.7 à 0.9 μm
 - **PIR** (Proche Infrarouge) ou **NIR** (Near Infrared) ~ 0.75 - 1.3 μm
B3~0.75-0.90 μm
 - **MIR** (Moyen Infrarouge) ou **SWIR** (Short Wave Infrared) ~ 1.3-3 μm
MIR SPOT : 1.52-1.75 μm
 - **IRT** (Infrarouge thermique) : 3-50 μm
- **Noms des bandes Radar : lettres (K, X, C, S, L, P)**

Principes physiques

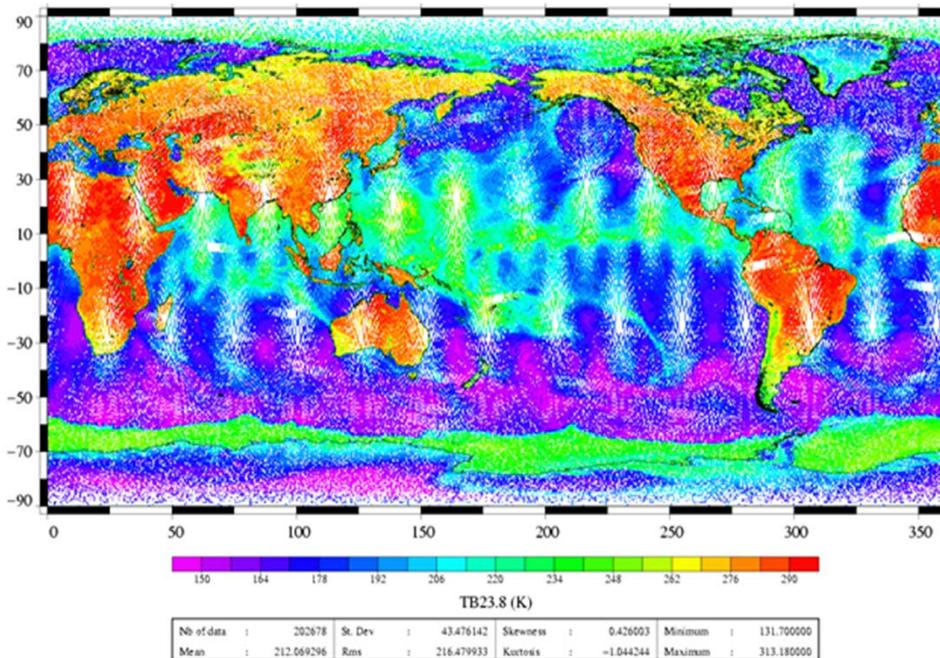
→ Raies d'absorption de l'atmosphère



Principes physiques

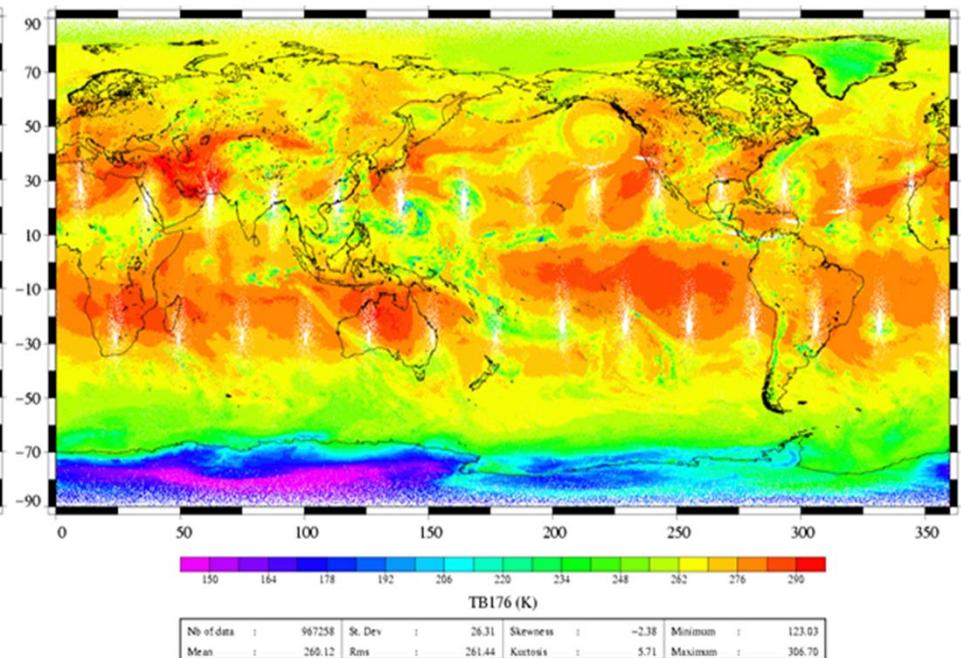
→ Raies d'absorption de l'atmosphère

Atmosphère : les limites de la transparence électromagnétique



TB @ 23.8 GHz

Transparence : signal de Terre



TB @176.31 GHz

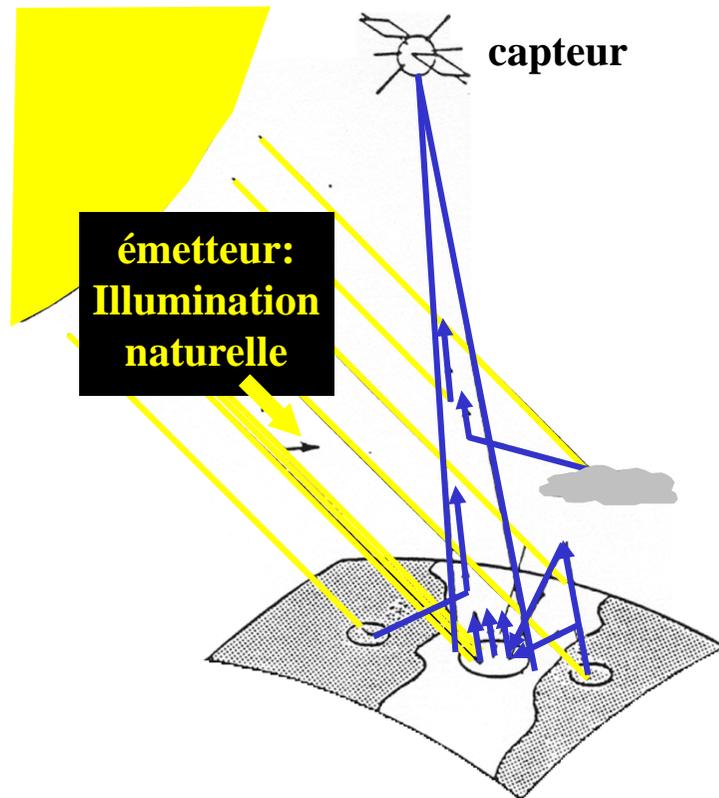
Signal atmosphérique dominant

Courtesy : Estelle Obligis (CLS)

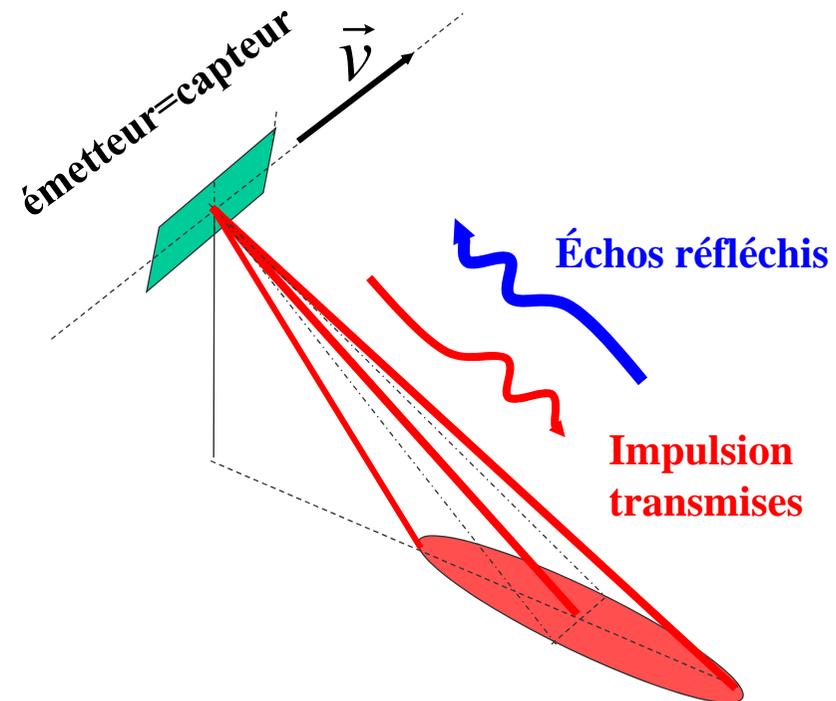
Principes physiques

→ Imagerie passive, imagerie active

OPTIQUE : *PASSIVE*

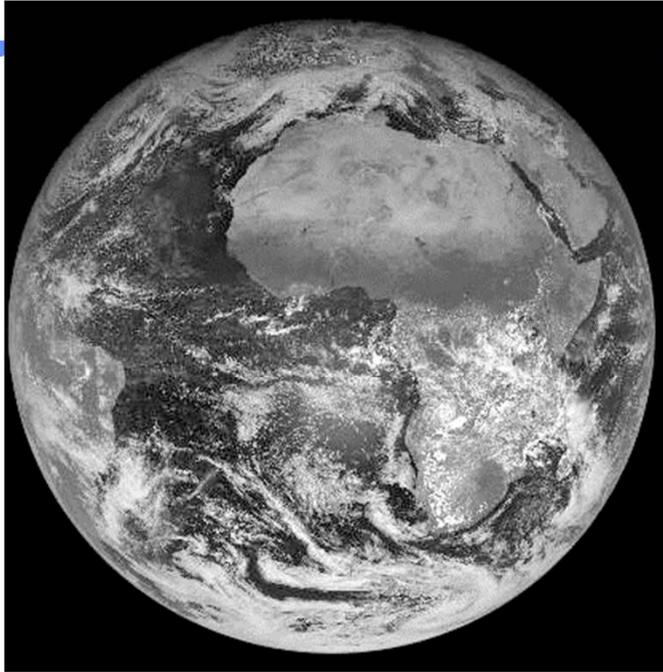


RADAR : *ACTIVE*

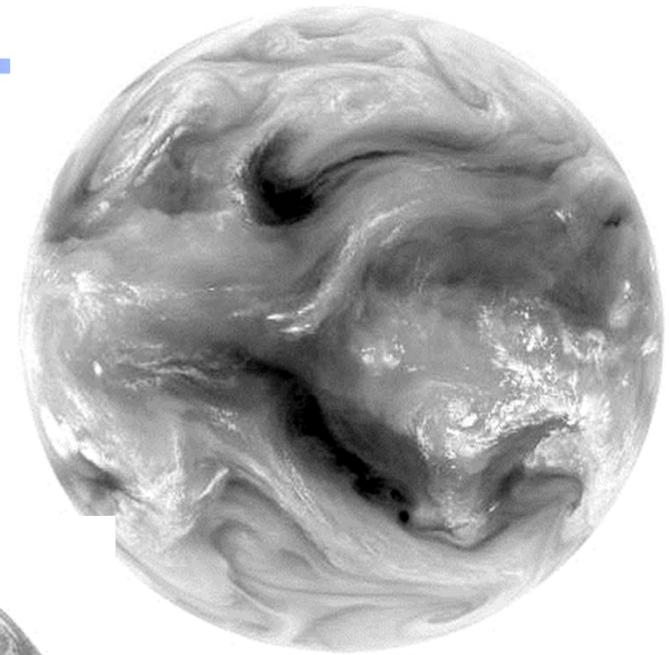


Principes physiques

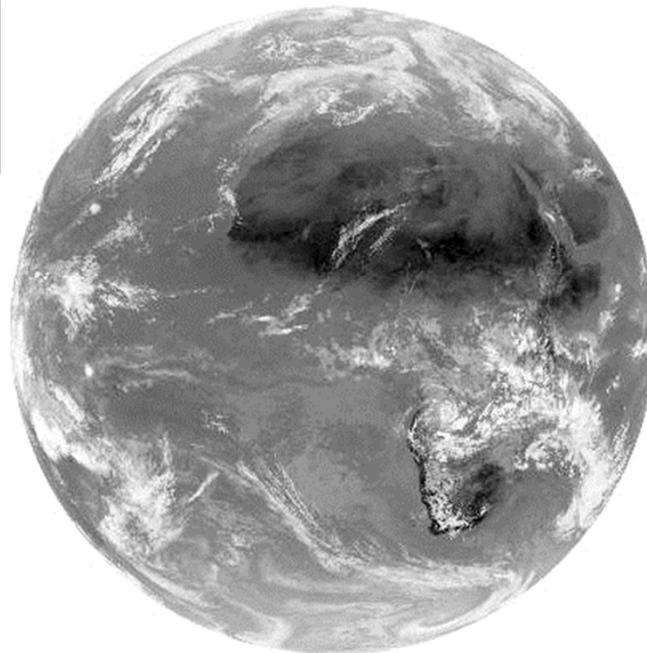
→ Diversité spectrale



Visible
0.4-1.1 μm



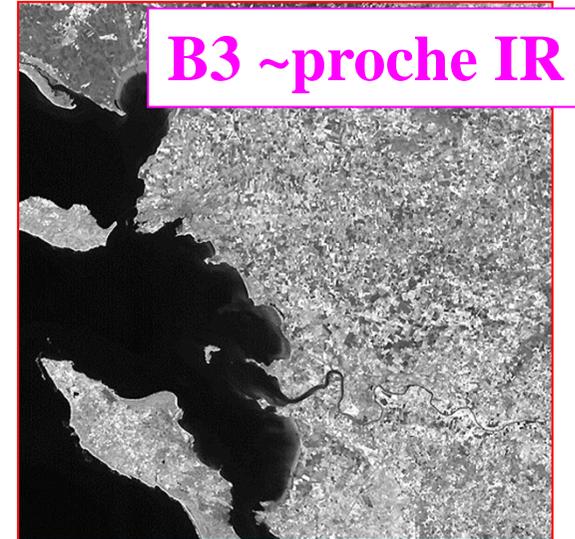
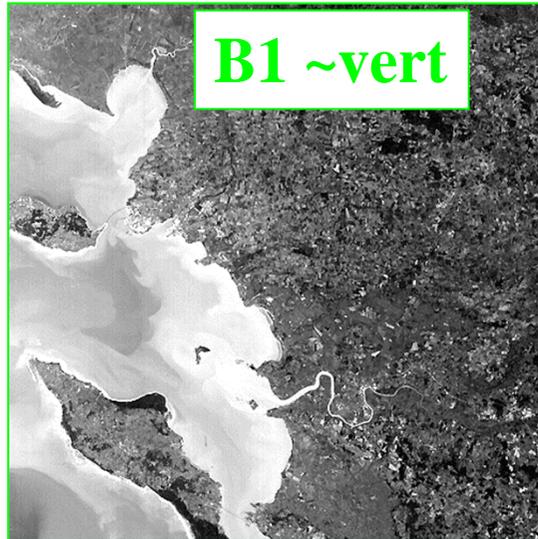
Vapeur d'eau
5.7-7.1 μm



Infrarouge : 10.5-12.5 μm

Principes physiques

→ Diversité spectrale (SPOT)

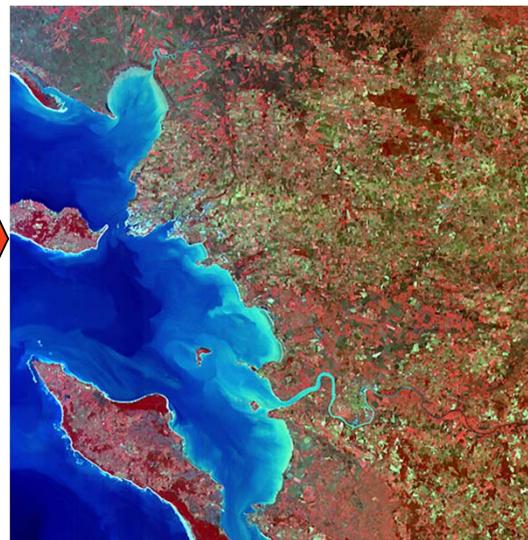
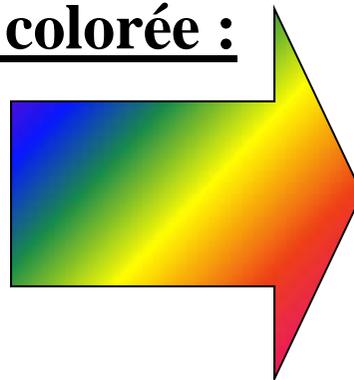


Composition colorée :

Bleu = B1

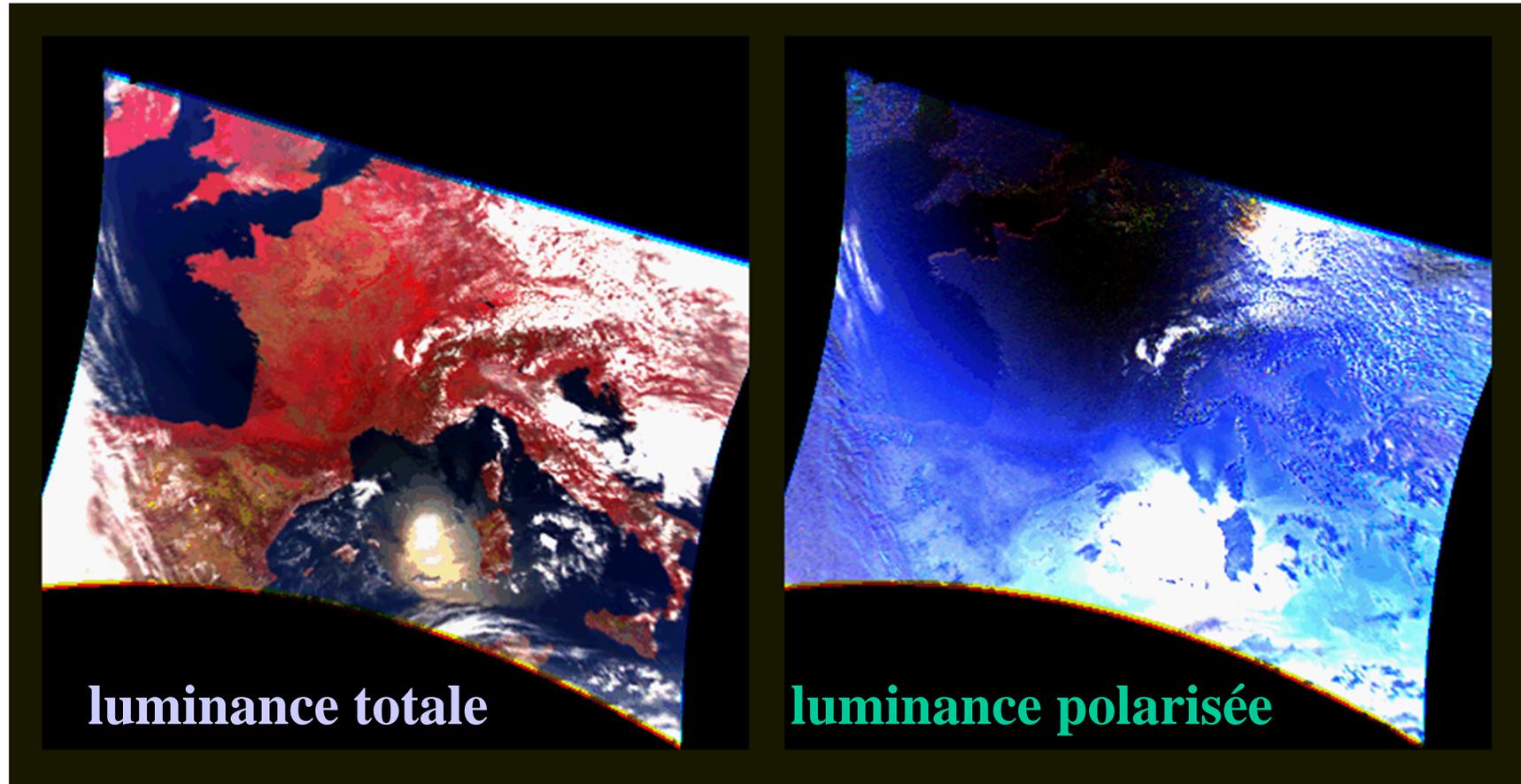
Vert = B2

Rouge = B3



Principes physiques

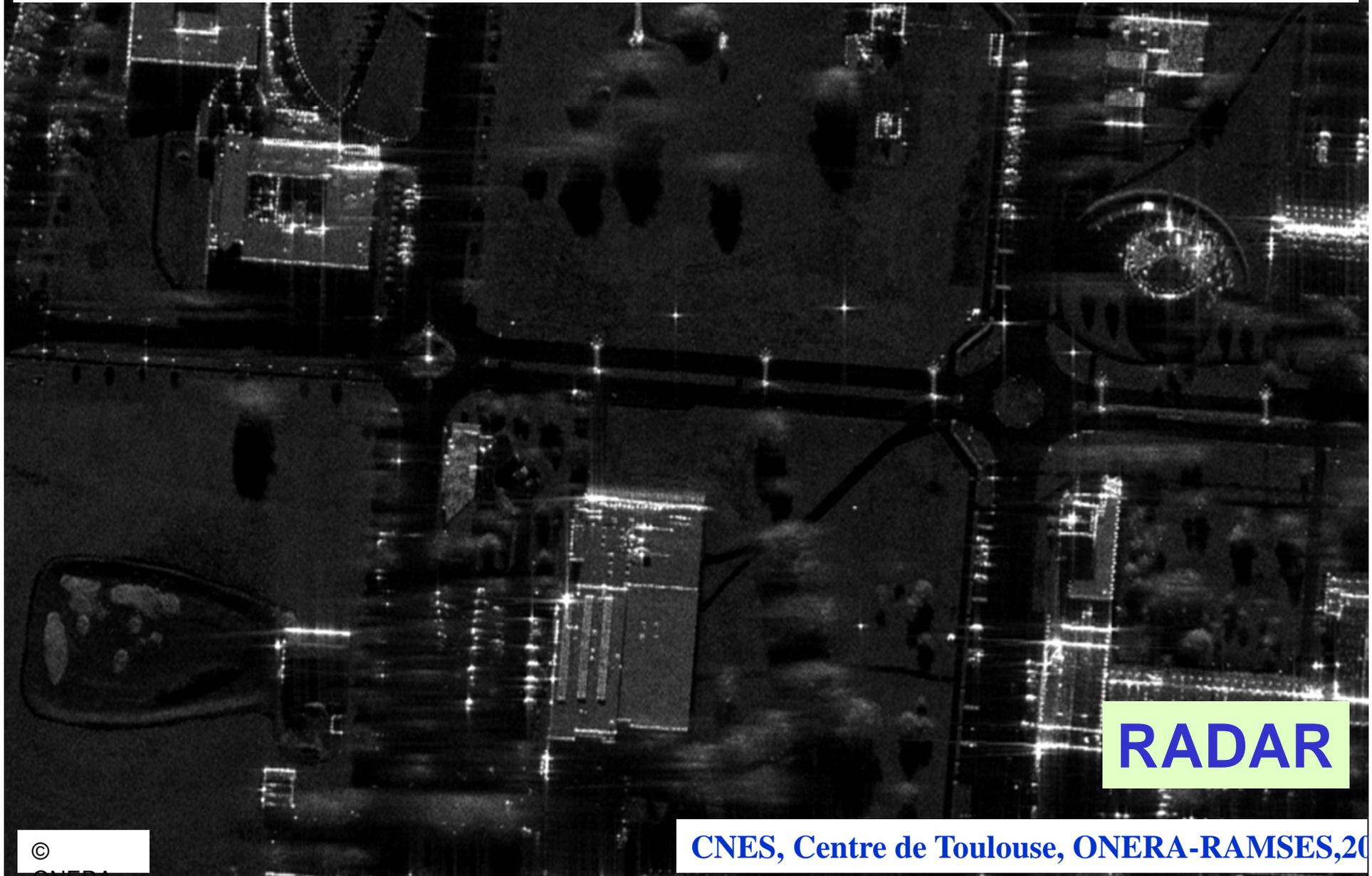
→ Diversité spectrale (et lumière polarisée ...)



Composition colorée POLDER : PIR/Rouge/Bleu

Principes physiques

→ Diversité spectrale : optique - radar



Principes physiques

→ Diversité spectrale : optique - radar



OPTIQUE

CNES, CST PELICAN (IGN-ONERA) 20 cm 2005

Principes physiques

→ Diversité spatiale

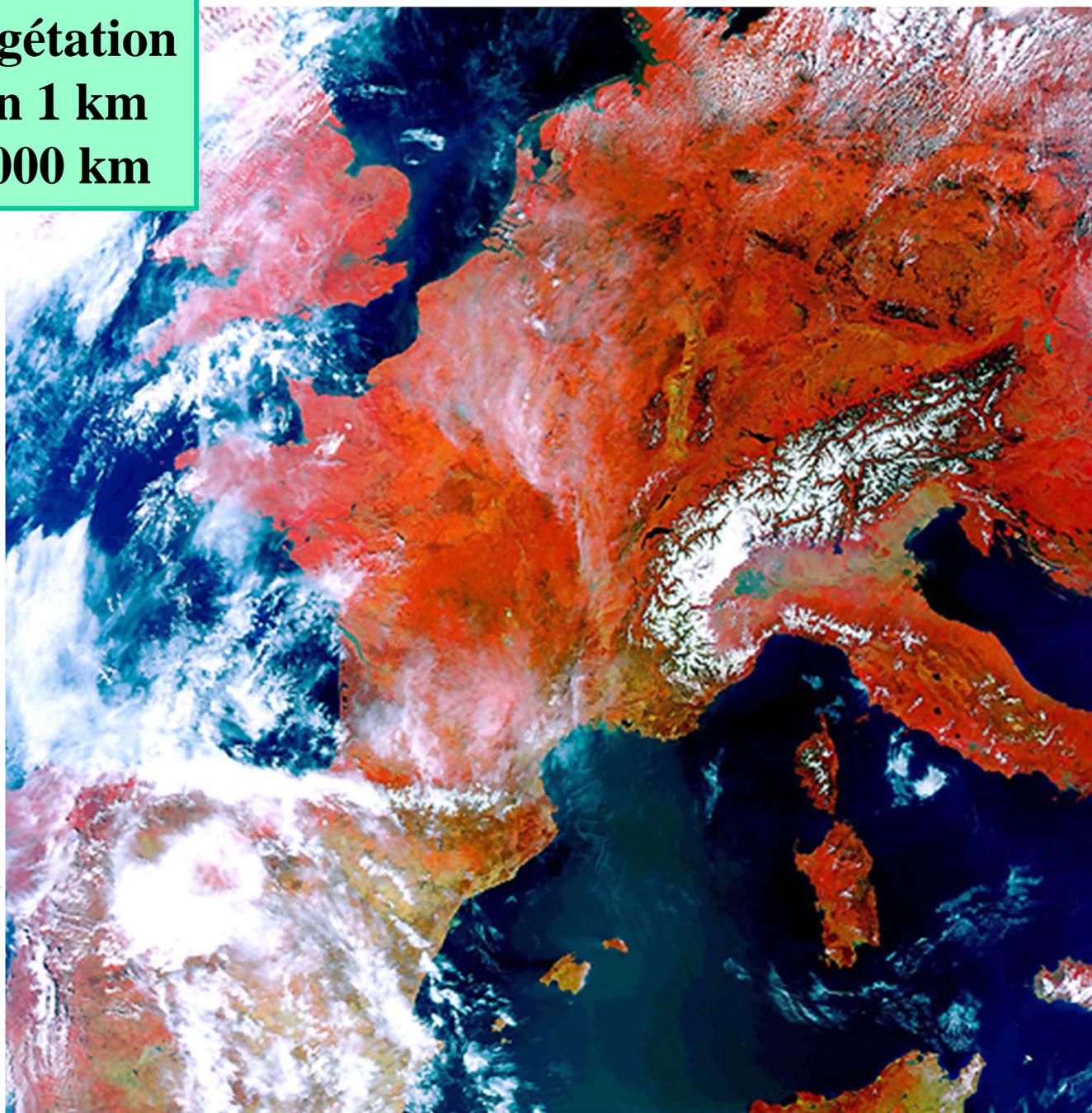
- Grande variété des **échelles d'observation** :
 - pixel ~ 1 à 100 km : bilan radiatif, météorologie, atmosphère
 - **échelle globale ou continentale**
 - pixel ~ 100 à 1000 m : agriculture, forêt, océanographie, environnement
 - **échelle régionale ou continentale**
 - pixel ~ 10 à 100 m : agriculture, cartographie, géologie, gestion des risques
 - **échelle régionale ou locale**
 - pixel ~ 1 à 10 m : cartographie de précision, urbanisme, forêts
 - **échelle locale**
 - pixel ~ quelques cm : renseignement militaire
 - **cibles**

**Image Météo
résolution 4 km
champ 12000 km**



Courtesy Christophe Valorge, CNES, SI/QI

Image Végétation
résolution 1 km
champ 2000 km

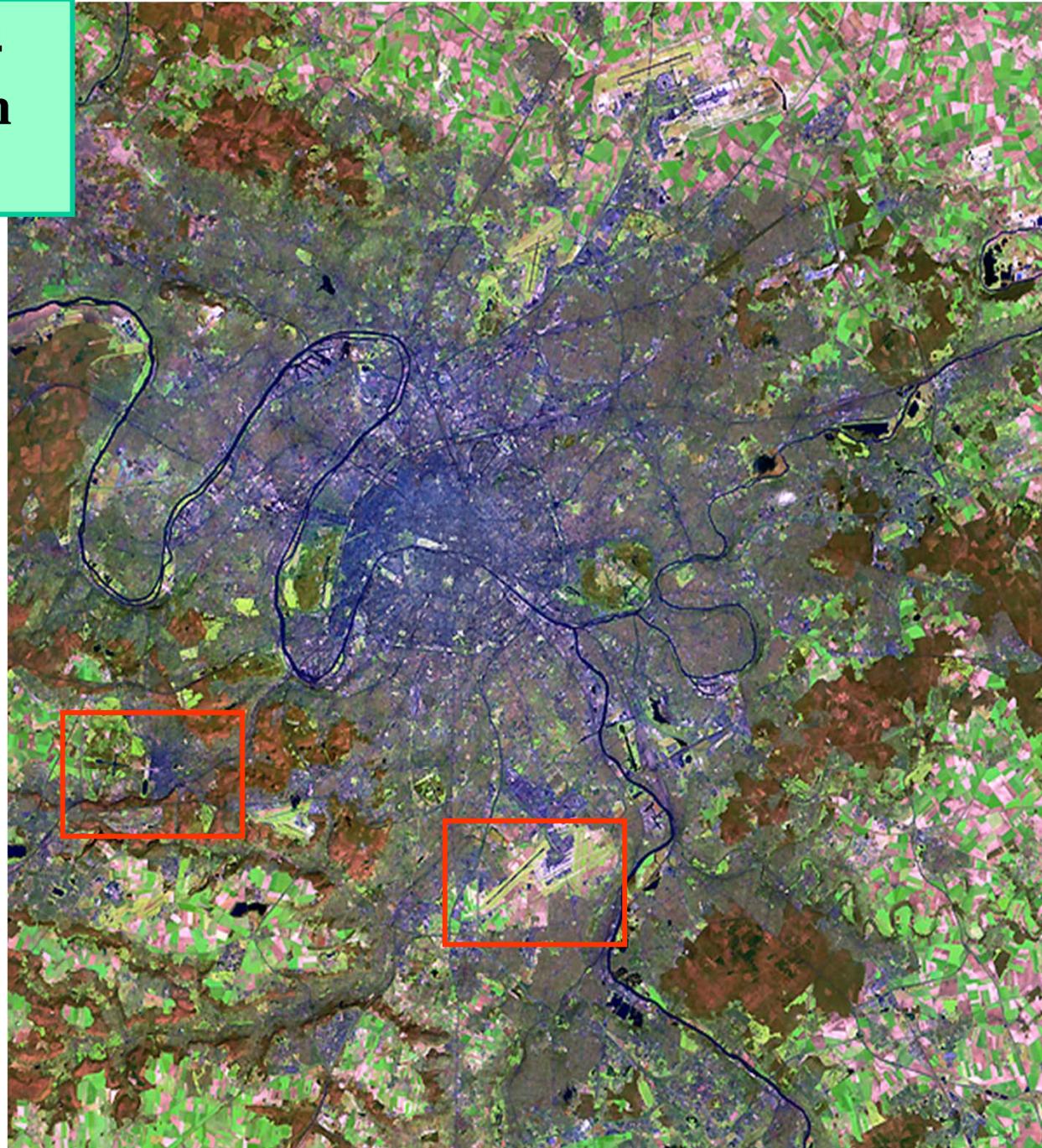


composition
colorée
B3 B2 B0

Courtesy Christophe Valorge, CNES, SI/QI

**Image SPOT4
résolution 10m
champ 60 km**

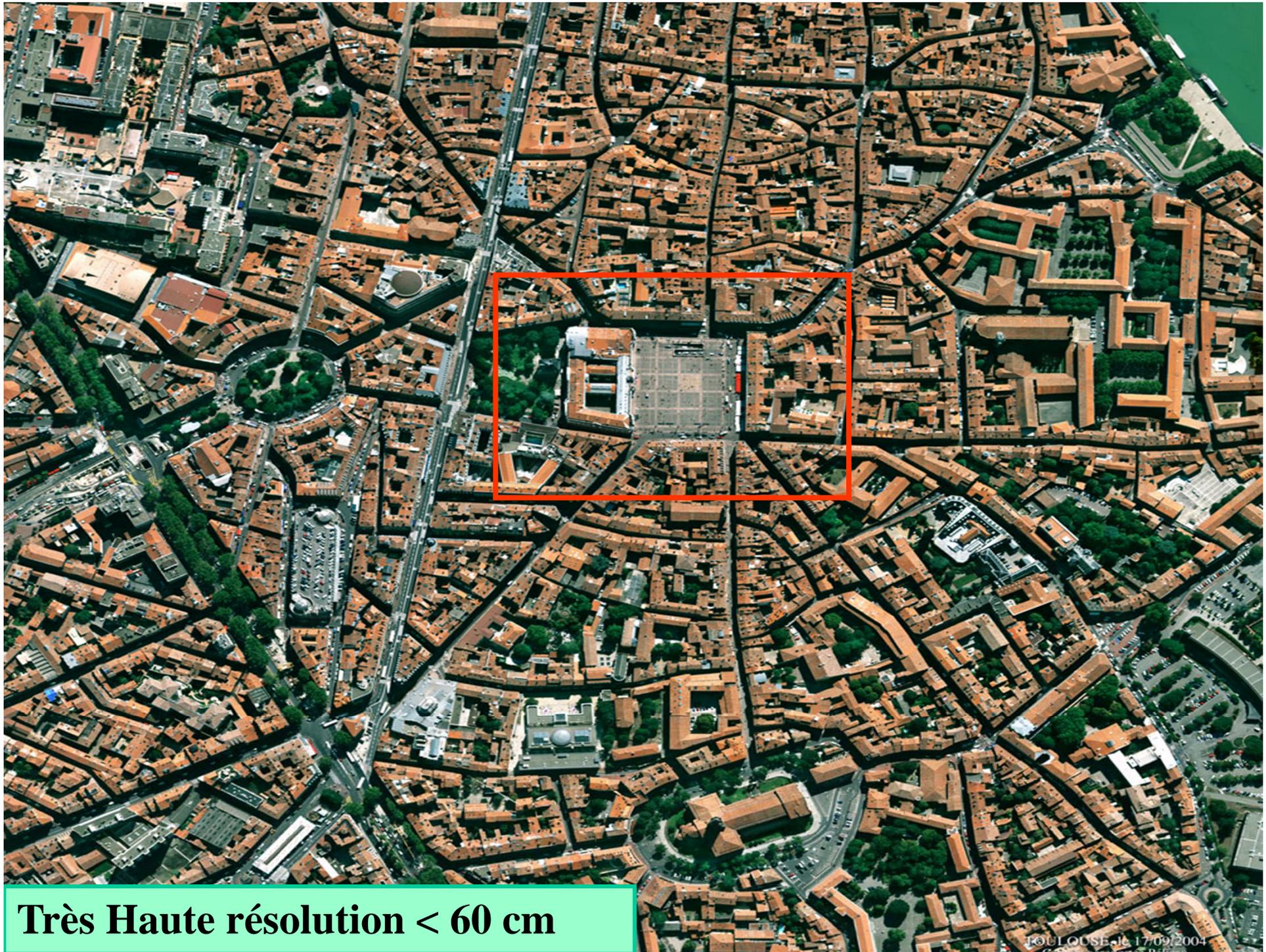
**Extrait 50x50 km²
Paris en
composition
colorée
MIR B3 B1**



Courtesy Christophe Valorge, CNES, SI/QI



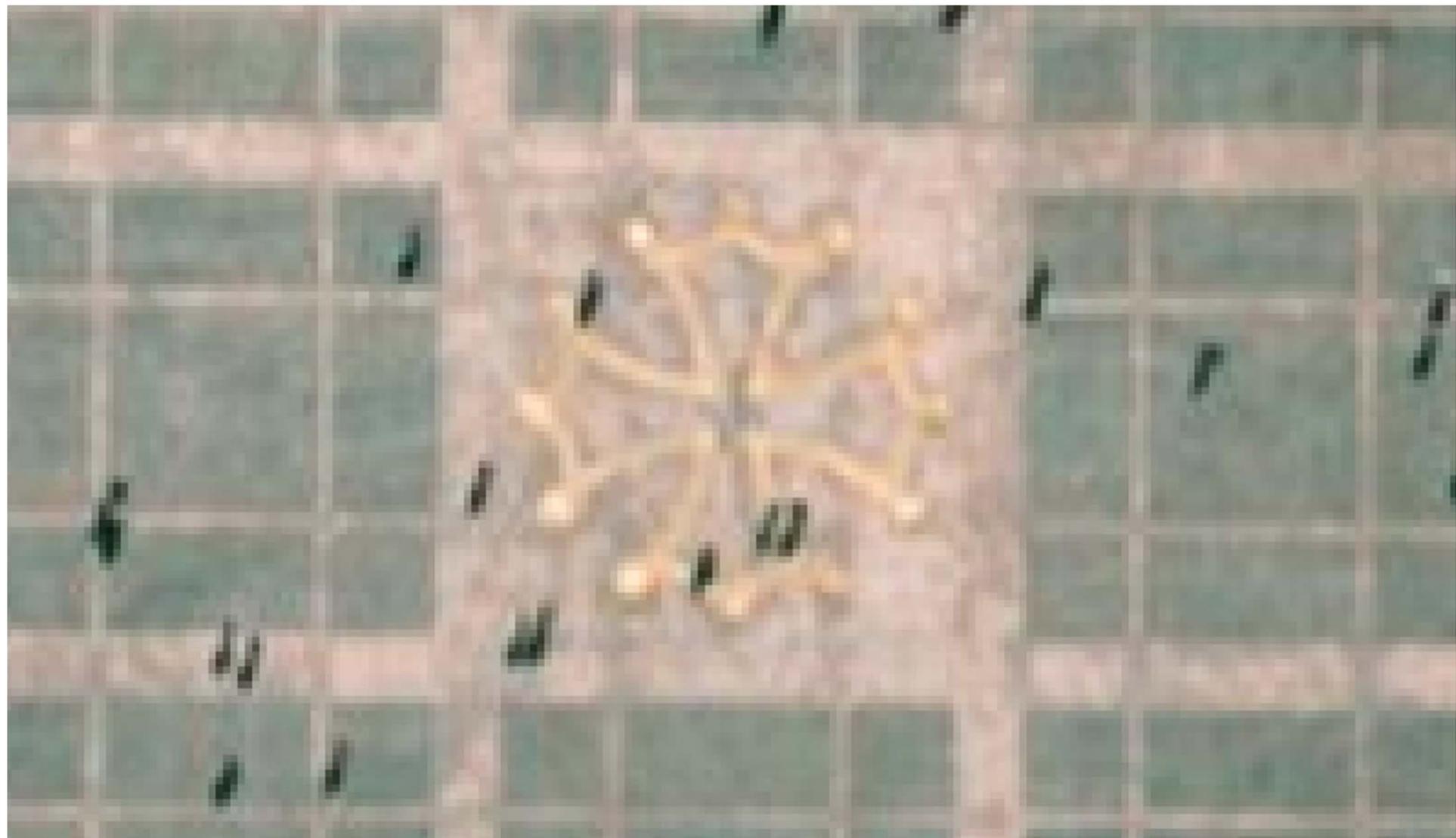
Image aérienne, résolution 60 cm



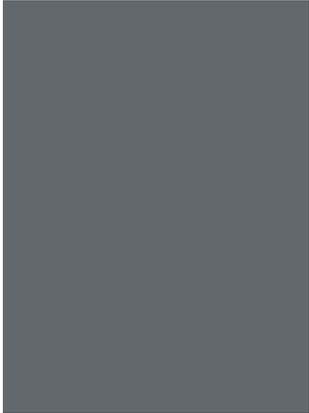
Très Haute résolution < 60 cm



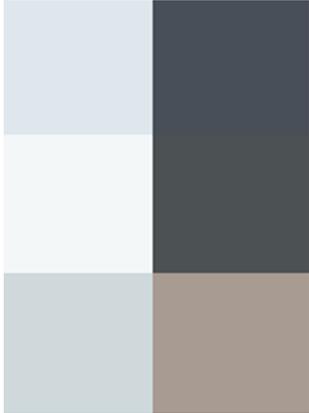




Design Drivers : Spatial Resolution for identification and interpretation



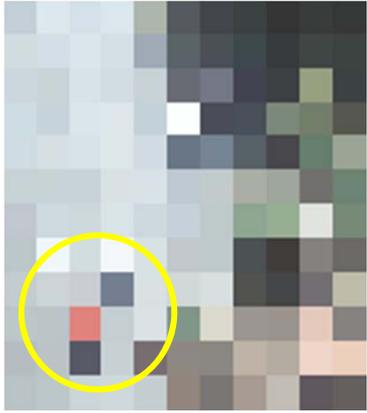
12.8m



6.4m.



3.2m



1.6m



0.80m



0.40m



0.20m



0.10m

Courtesy, Jean-Baptiste Behar, CNES

Généralités sur les orbites

- Trajectoires **képlériennes** (terre sphérique et homogène) :

- Planes
- Coniques de foyer le centre attracteur (centre Terre)
- Loi horaire est décrite par la loi des aires :

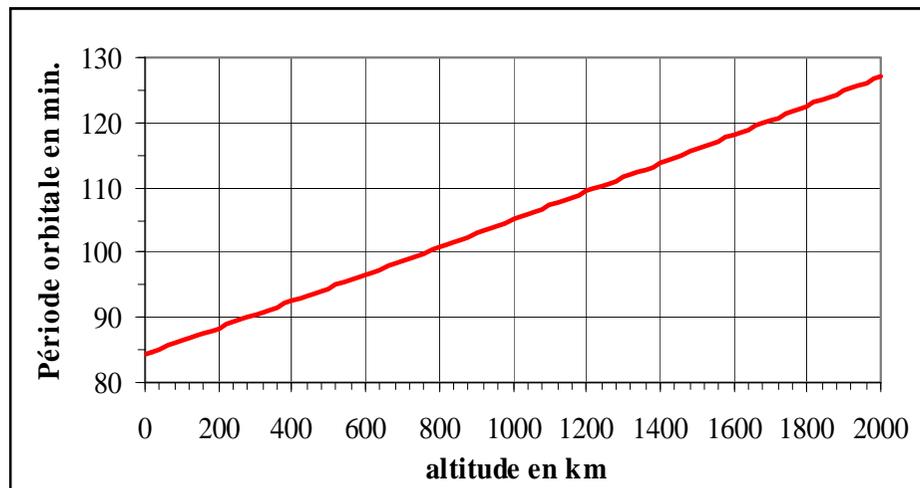
$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{\mu}$$

avec μ , constante de gravitation terrestre : $\mu = 398600 \text{ km}^3/\text{s}^2$

T est la période et a le demi grand axe de l'orbite

- Orbites utilisées pour l'observation de la Terre :

- circulaires (ou faiblement elliptiques) => altitude h et vitesse inertielle constantes



En orbite basse (h~800 km) :

Période T ~ 1 h 40

Vitesse orbitale ~ 7 km /s

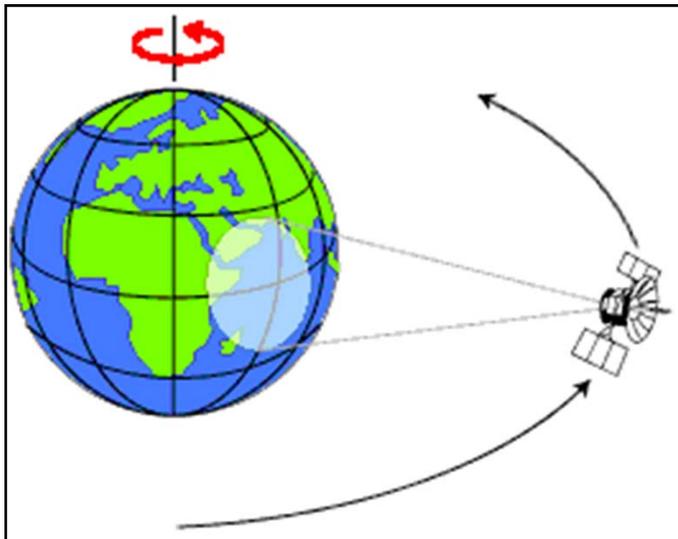
$$a = r_{eq} + h$$

$$r_{eq} = 6378 \text{ km}$$

Principales orbites pour la télédétection

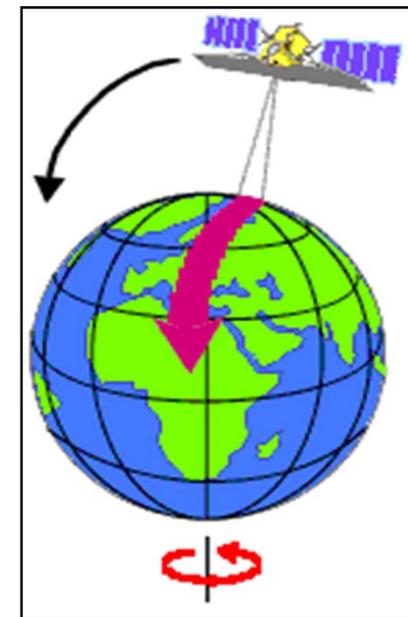
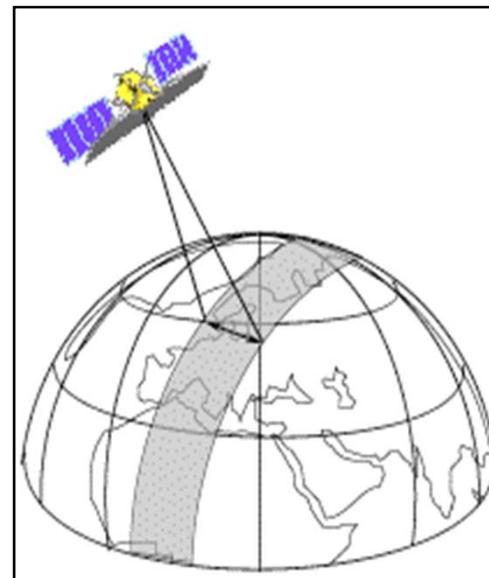
- **Satellite Géostationnaire**

- Le champ de vue est toujours le même => intérêt pour les missions de type surveillance d'une même région en temps quasi-réel (météo...)
- Altitude élevée (36000 km)



- **Satellite Polaire**

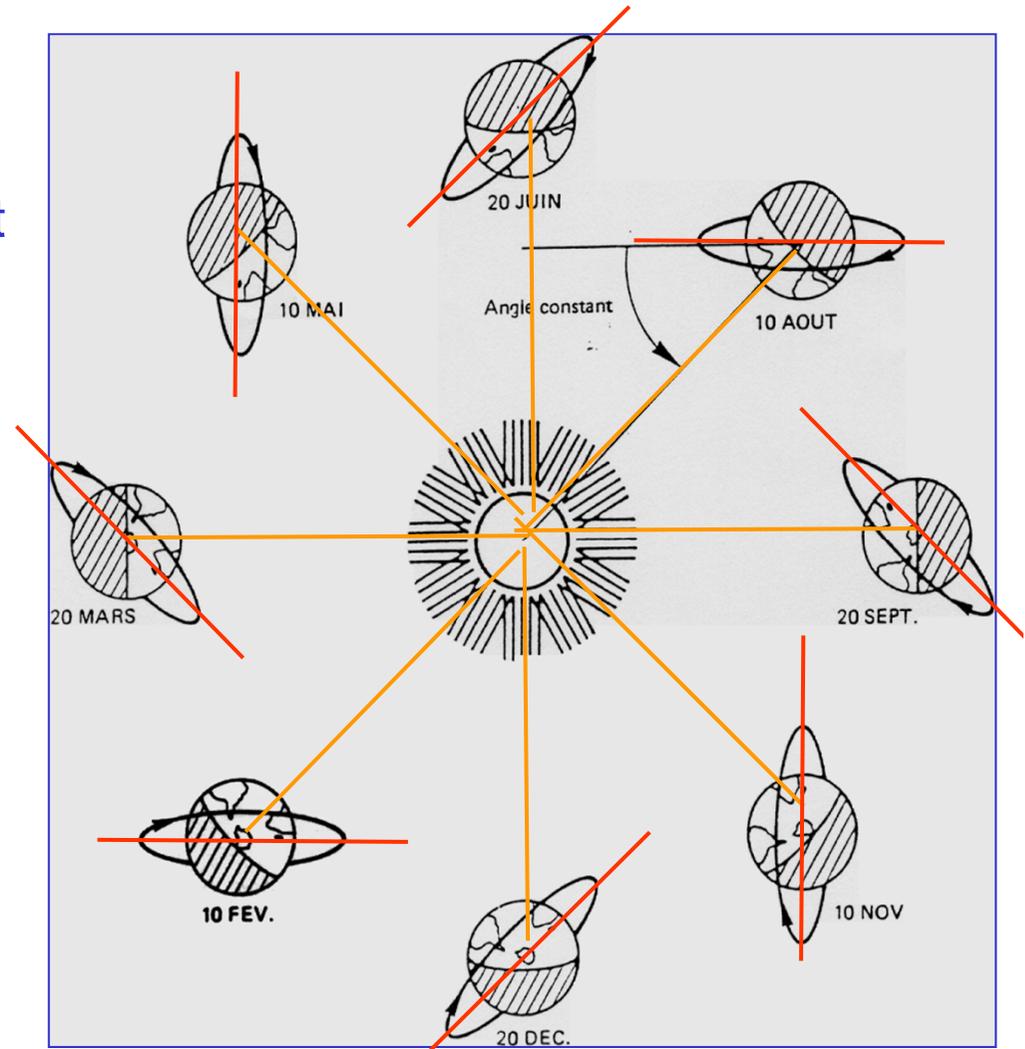
- Couverture quasi-mondiale
- Accessibilité limitée (dépend de la période, du débattement autorisé, de la latitude...)
- Altitudes faibles possibles



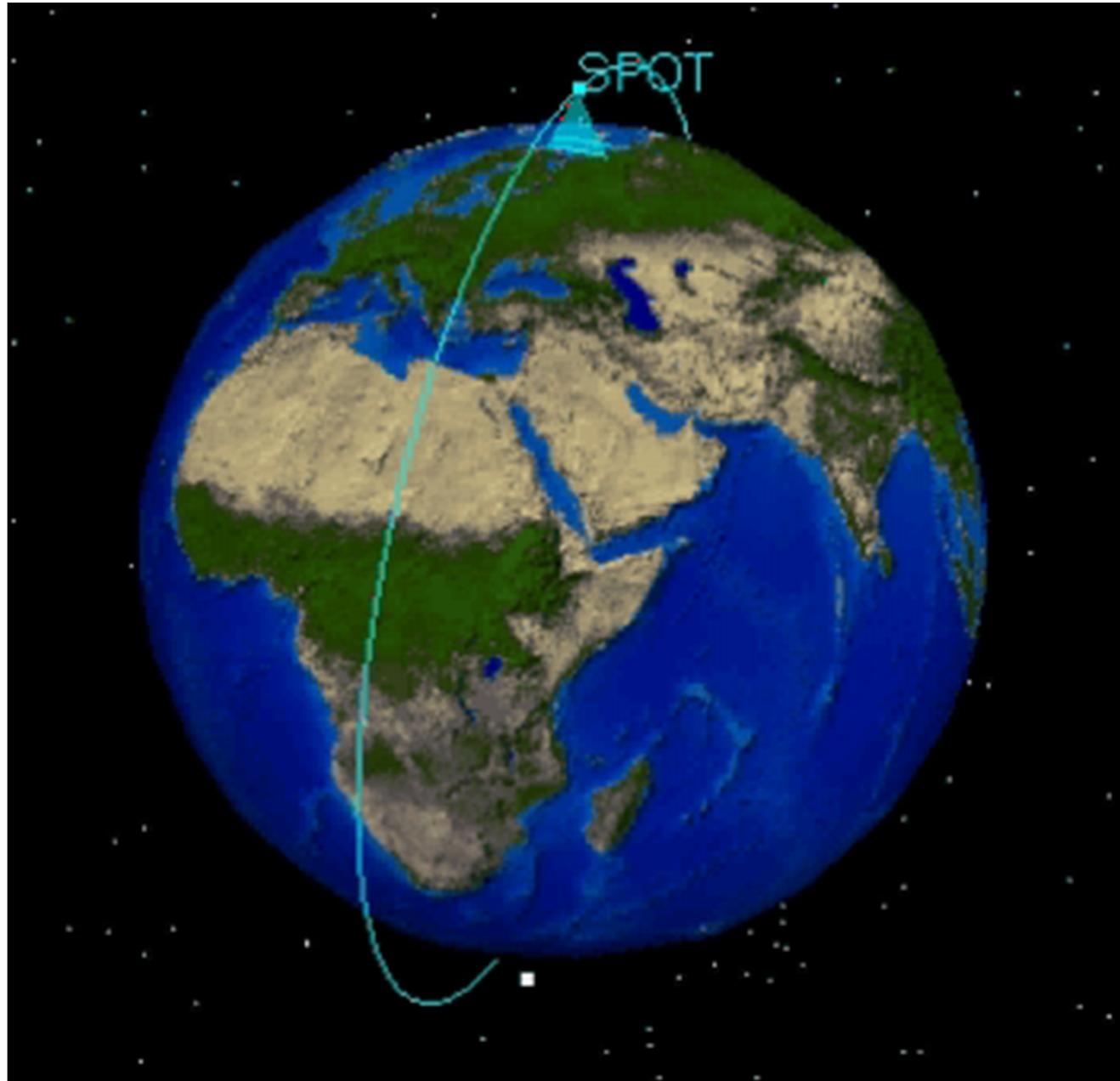
Principales orbites pour la télédétection

→ L'héliosynchronisme

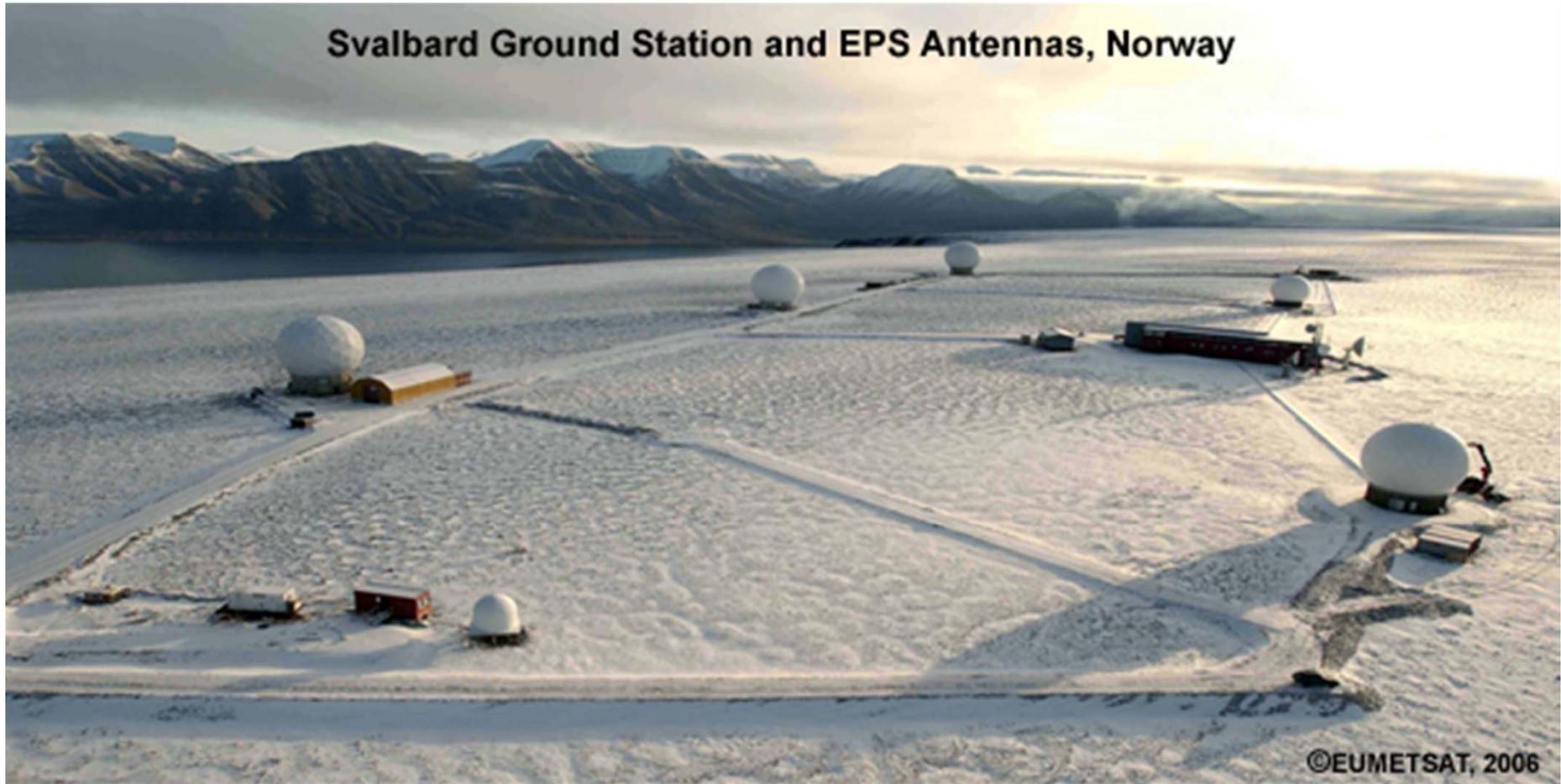
- Aplatissement terrestre aux pôles
→ rotation du plan orbital, fonction de l'inclinaison i , de l'excentricité et du demi grand-axe a de l'orbite
- Pour une orbite circulaire, une relation entre i et a assure que cette rotation compense celle de la Terre autour du Soleil :



SPOT : orbite polaire héliosynchrone



Svalbard Ground Station and EPS Antennas, Norway



©EUMETSAT, 2006

Cycle orbital

→ Le phasage des orbites

- Pour une orbite circulaire, le nombre n d'orbites décrites en une journée est :

$$n = \frac{\text{DuréeJour}}{T} = \frac{\text{DuréeJour}}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{(r_{\text{eq}} + h)^3}}$$

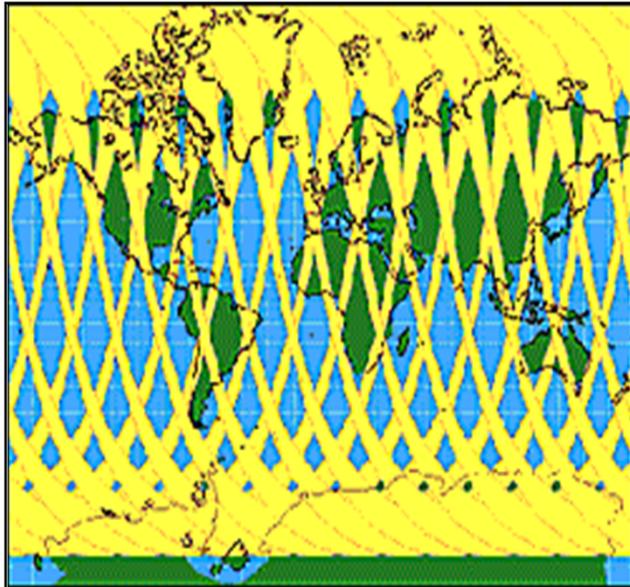
- Si n s'écrit $n = m + p/q$ avec m , p et q entiers
 - $p < q$ et (p, q) premiers entre eux
 - Au bout de q jours, le satellite a effectué un nombre entier d'orbites ($m \cdot q + p$).
 - Il se retrouve alors à la verticale du même point (la Terre a tourné de q tours).
 - Les traces au sol du satellite se recouvrent donc après q jours, qui est la durée du cycle de répétitivité de l'orbite.
 - Ce nombre fini de traces ($m \cdot q + p$) définit la grille au sol du satellite
- **Sous-cycle** : nombre de jour k séparant le passage sur 2 traces orbitales adjacentes
 - Au bout de k jours, le nombre d'orbites doit valoir $k \cdot n = N \pm 1/q$
 - Donc k est le plus petit entier tel que $k \cdot p \equiv \pm 1 \pmod{q}$ (possible car p et q premiers entre eux). Ex: SPOT : $n=14+5/26$

Cycle orbital

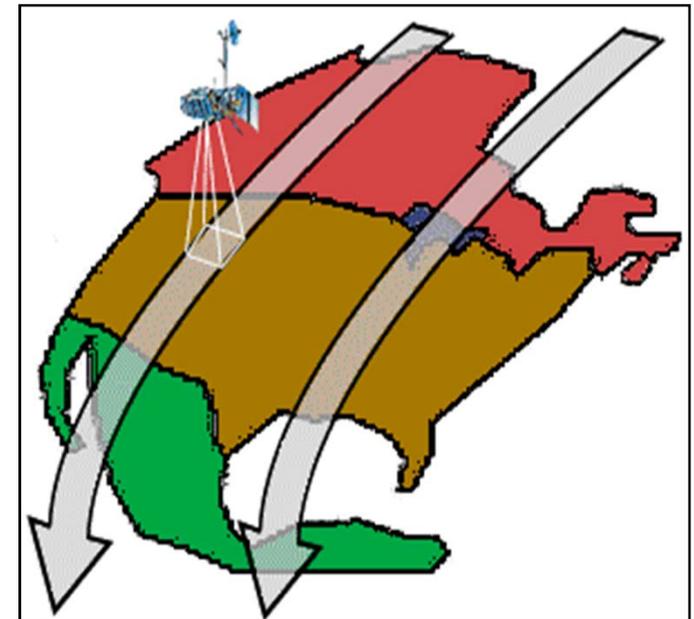
→ Les traces au sol

- Le nombre d'orbites décrites par jour (donc le nombre de traces au sol) dépend de l'altitude du Satellite : quand h décroît, ce nombre augmente.
- L'inclinaison de l'orbite conditionne la latitude maximale survolée.
- Choix des paramètres orbitaux en fonction des besoins mission
 - Pour des orbites héliosynchrones :
 $h \sim 1000 \text{ km}$: $i \sim 98^\circ$ et ~ 14 orbites/jour

“Pincement” des orbites : hautes latitudes plus souvent accessibles



Espacement de 2 traces consécutives : accessibilité fonction des capacités de dépointage



Résumé : choix d'une orbite (mission optique)

- Durée de vie, stabilité
 - altitude > 300 km
- Haute résolution géométrique
 - basse altitude
- Capacité d'accès rapide (site visé, station)
 - haute altitude
- Échelle constante
 - orbite circulaire
- Minimisation des variations d'éclairement
 - orbite héliosynchrone
- Maximisation de la surface couverte
 - orbite quasi polaire ($i \sim 90^\circ$)
- Répétitivité
 - phasage de l'orbite (notion de cycle)
- Couverture complète
 - nombre important d'orbites (cycle assez long) ou large fauchée

Acquisition optique : historique (1/3)

- Images aériennes

- Films photographiques, depuis ballons et avions
- Passage récent au numérique (matrice, barrettes)
- Très utilisées en cartographie de précision (ex: IGN)

- Images spatiales

- **années 60** : Premiers programmes de reconnaissance américains et russes : énormes appareils photos en orbite, dont on récupère les « pellicules » éjectées du satellite et récupérées par des avions à filet !

Imagerie numérique ↔ transmission des données par liaison radio

- **années 70** : premiers détecteurs opto-électroniques → acquisition point à point (scanner) : Landsat
- **années 80** : premières barrettes de détecteurs → acquisition ligne à ligne (push-broom) : SPOT
- **années 90** : premières matrices de détecteurs: acquisition 2D

Acquisition optique : historique (2/3)

- Avions militaires :

- 1914-1918: premiers vols de reconnaissance
- Avions espions U2 (Crise de Cuba en 62)
- Drones (avions sans pilote)



- Avions civils :

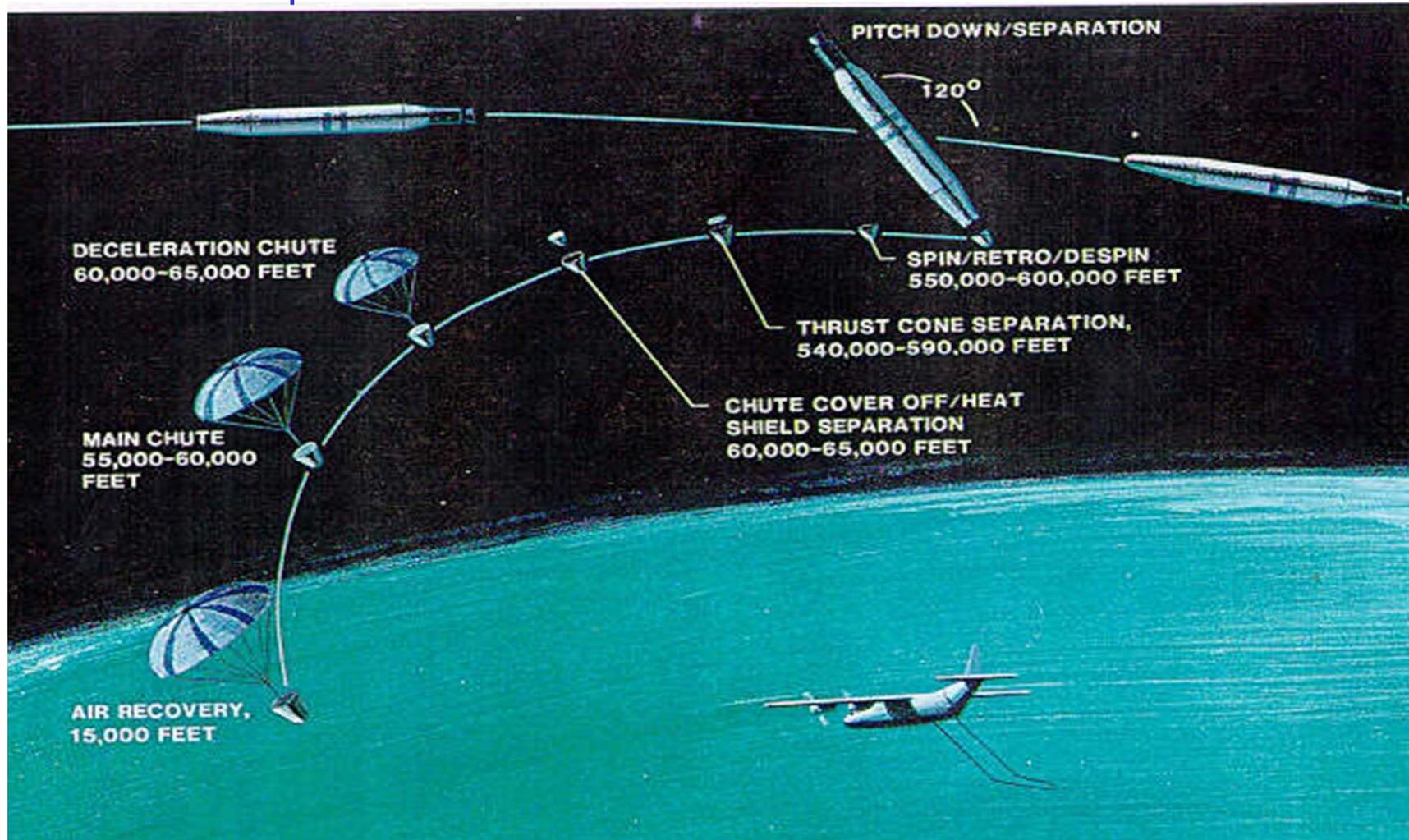
- Instituts géographiques nationaux (ex: IGN)
- Mise à jour périodique des cartes
- Photographie argentique NB et couleur
- Evolution en cours vers le tout **numérique**



Acquisition optique : historique (3/3)

Premiers satellites : l'époque des pionniers et des grands moyens .

Récupération des films CORONA dans les 60 's



Intérêt de la télédétection spatiale

- Possibilité de couvrir un large champ
 - Fauchée HRV : 60 km x 2
 - Fauchée TM : 180 km
 - Fauchée AVHRR : 2500 km
 - Fauchée VEGETATION : 2250 km
 - Fauchée ERS1 : 80 km
- Disponibilité du système
 - Pas de campagne aéroportée à organiser : acquisition systématique
 - Possibilité de suivi multitemporel
 - Facilité d'accès pour des régions éloignées
- Qualité géométrique des images
 - Position sur orbite quasi-déterministe
 - Peu de perturbations sur les angles d'attitude



MAIS rapport qualité/prix ...

Acquisition optique : Principe (line detector = push broom)

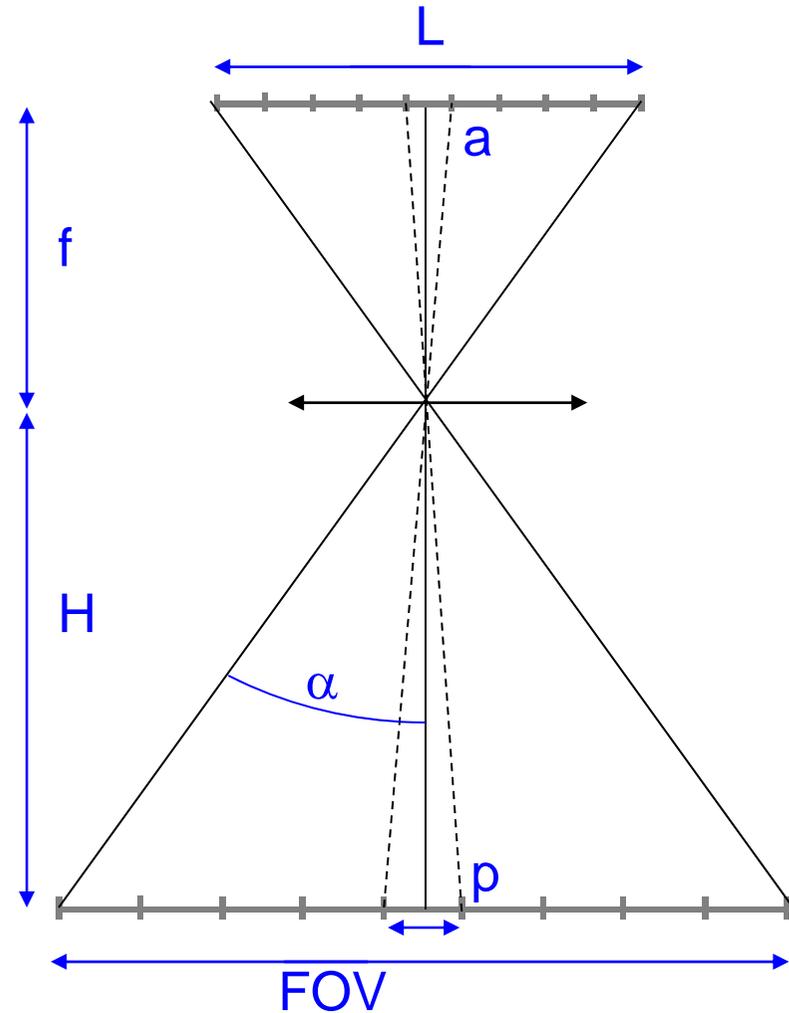
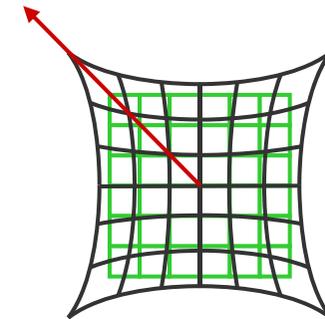
- The detector (of width L) contains N detectors (of width a).

$$\frac{f}{L} = \frac{H}{FOV}$$

- With no distortion, ground sampling p is regular:

$$\frac{f}{a} = \frac{H}{p}$$

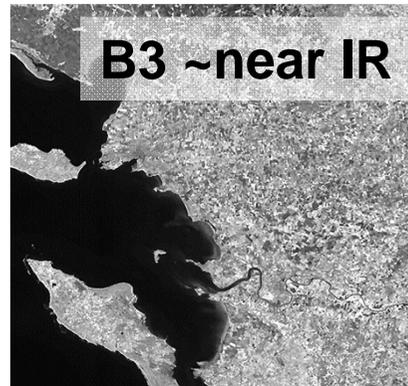
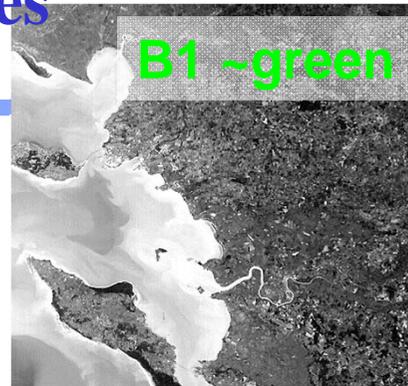
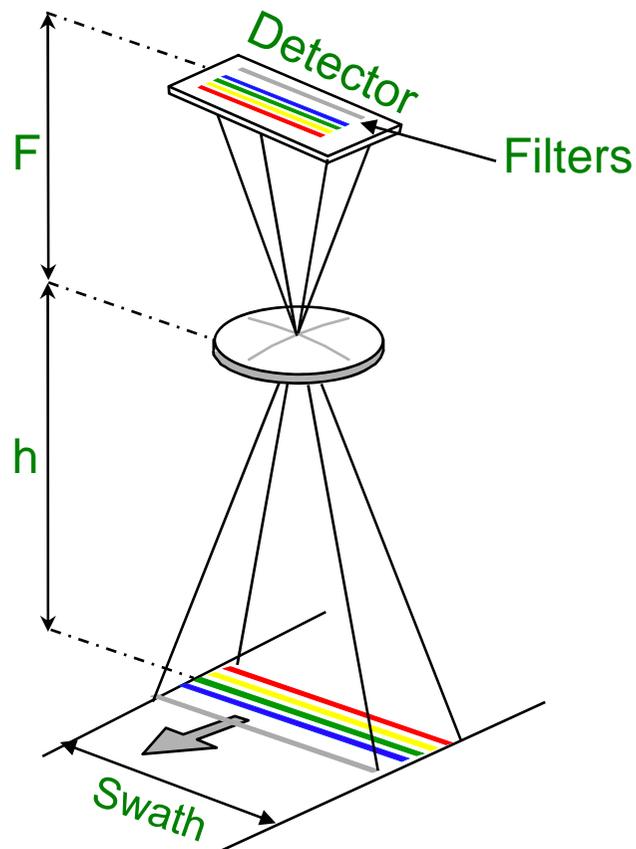
Typical distortion :



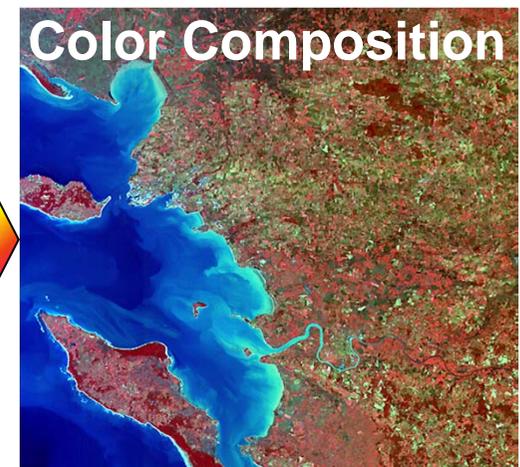
Acquisition optique : Principe (line detector = push broom)

→ Acquisition multi-bandes

Color Bands acquisition:

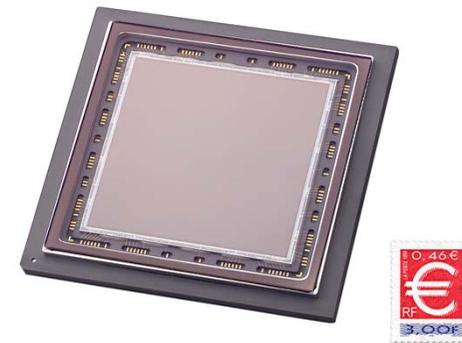
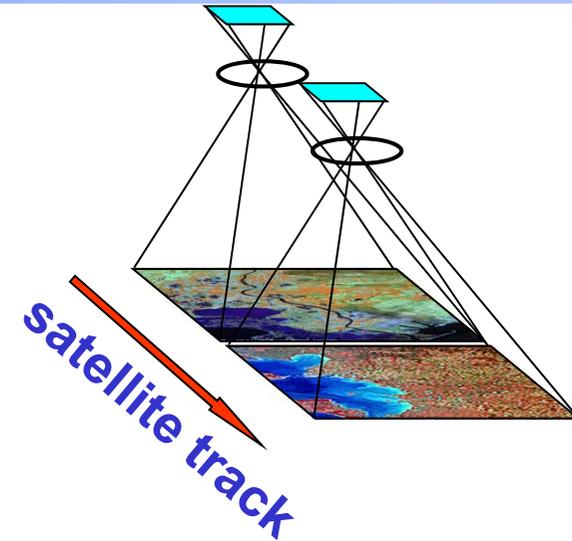


B1 in **Blue**
B2 in **Green**
B3 in **Red**

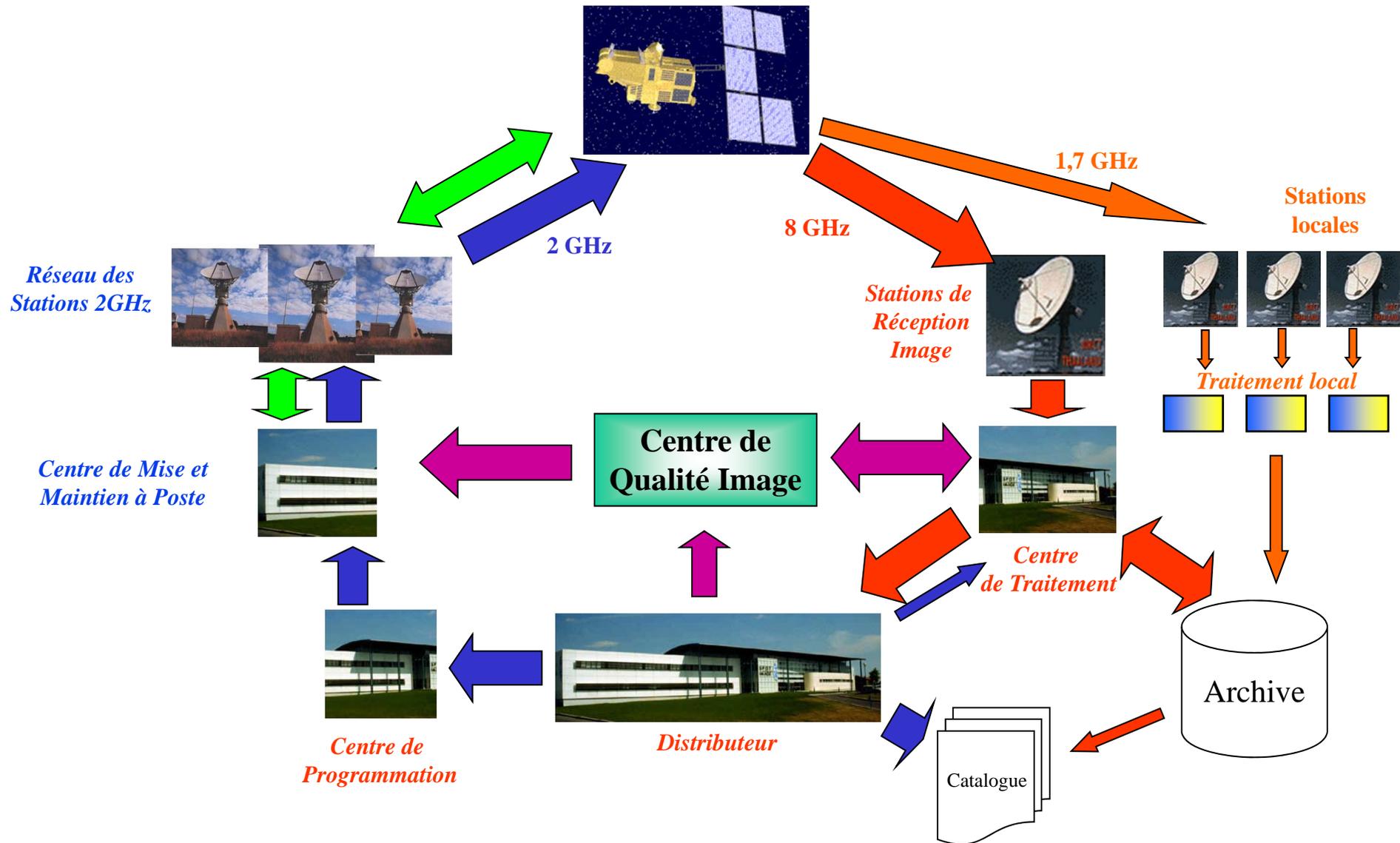


Acquisition optique : Principe (Array detector)

- photographic acquisition type:
 - 1 pixel = 1 detector
- Advantages:
 - Geometrical Quality
- Drawbacks:
 - Technological limitation of CCD matrix
(detector number, size, emptying...)
 - satellite orbital movement smears picture
 - radiometry coherence inside the FOV



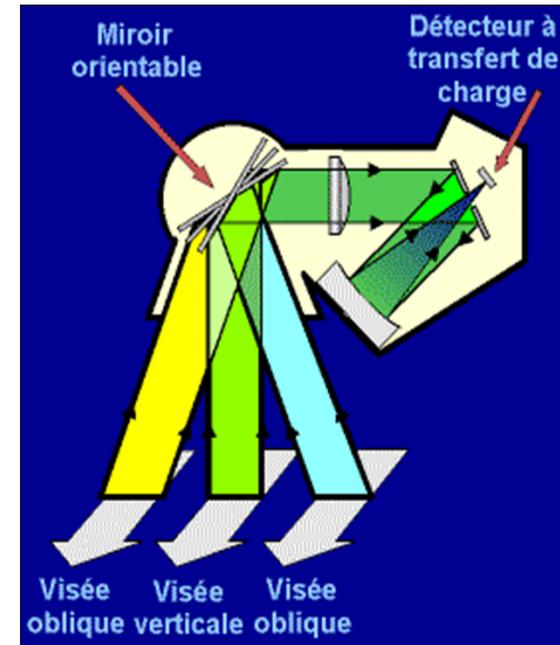
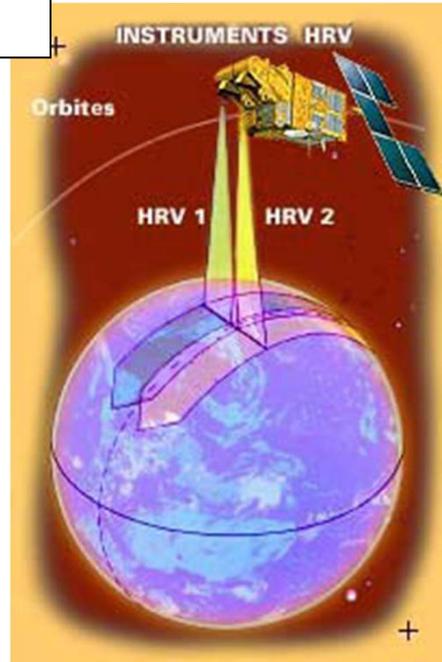
Architecture et fonctionnement d'un système de télédétection



SPOT 4



Masse : 2800 kg
Tir : 03/1998



HRV: Focale 1.08 m, Diamètre 33 cm
dépointage latéral par miroir

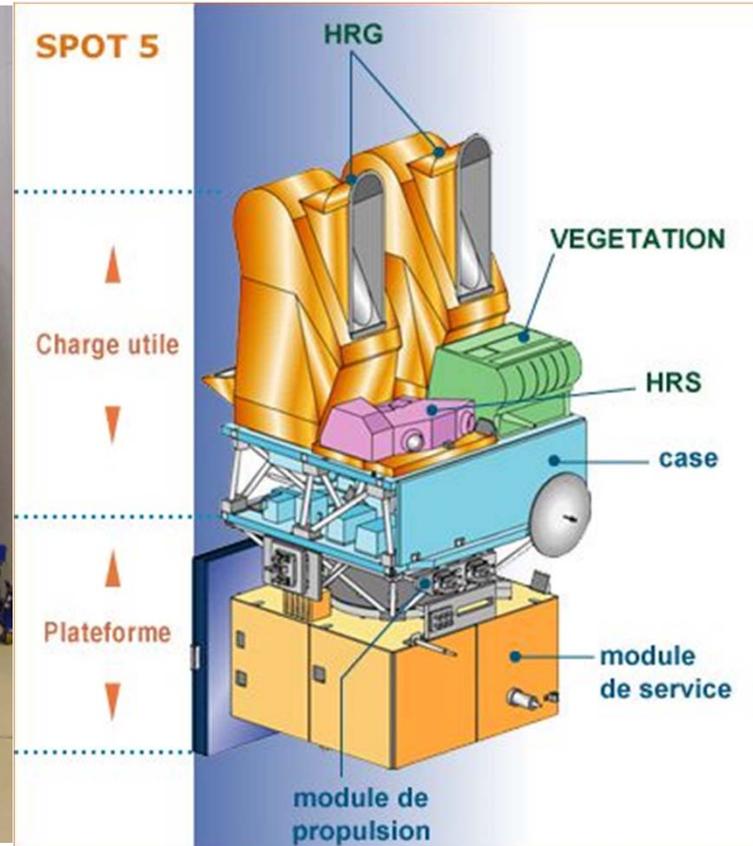
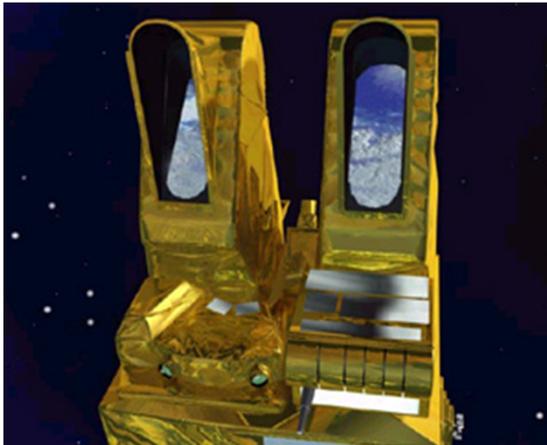
Satellite civil français (CNES) , acquisition Push-broom
Bandes : B2 10 m, B1-B2-B3-MIR 20m Fauchée : 2 x 60 km
Orbite : cycle 26 jours Heure locale : 10:30 Altitude: 832 km
Codage 8 bits
Stockage des données: enregistreurs magnétiques + mémoire à état solide

SPOT 5

Masse : 3000 kg

Tir : 05/2002

HRG: Focale 1.08 m,
Diamètre 33 cm
Dépointage latéral par
miroir



Satellite civil français (CNES) , acquisition Push-broom

Bandes : PAN 5 m et 2.5 m, B1-B2-B3 10m, MIR 20m

Orbite : cycle 26 jours

Heure locale : 10:30

Codage 8 bits

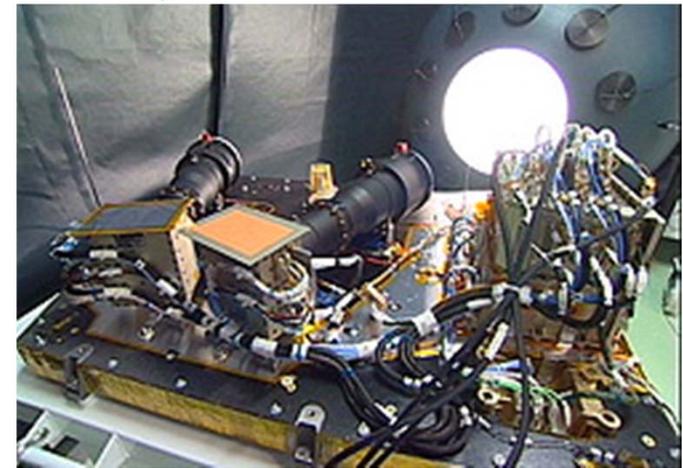
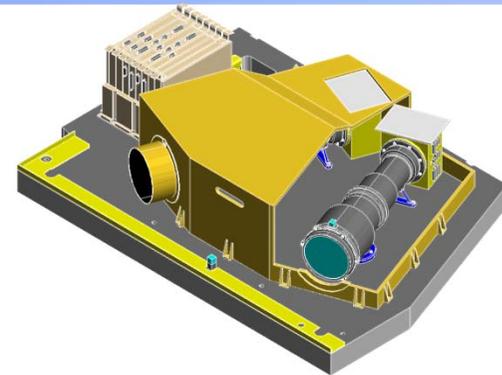
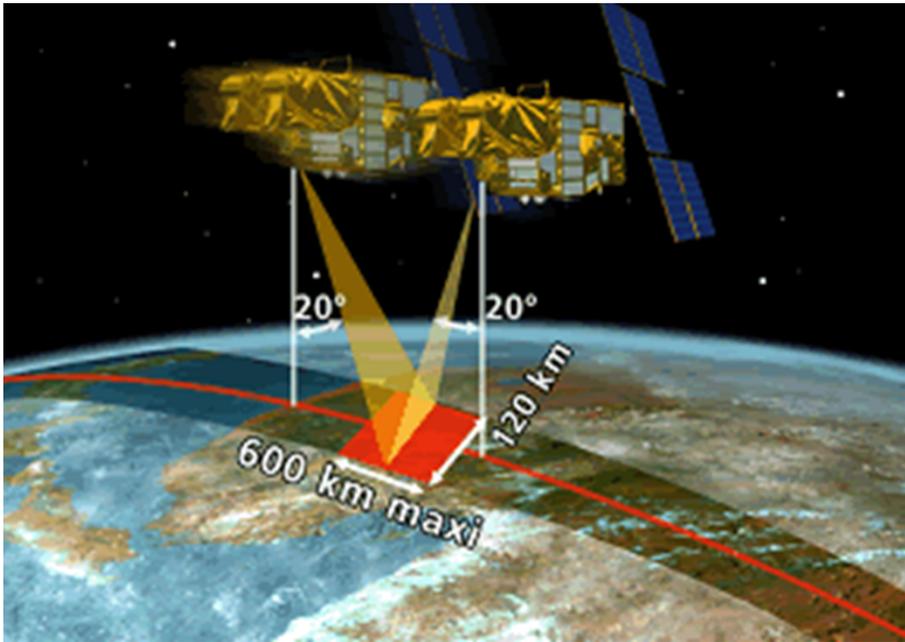
Stockage des données : mémoire à état solide

Fauchée : 2 x 60 km

(HRG)

Altitude: 832 km

HRS



Instrument français (CNES/DGA) à bord de SPOT5, acquisition Push-broom

Bandes : PAN 5 m x 10 m

Fauchée : 120 km

B/H : 0.8

Orbite : cycle 26 jours

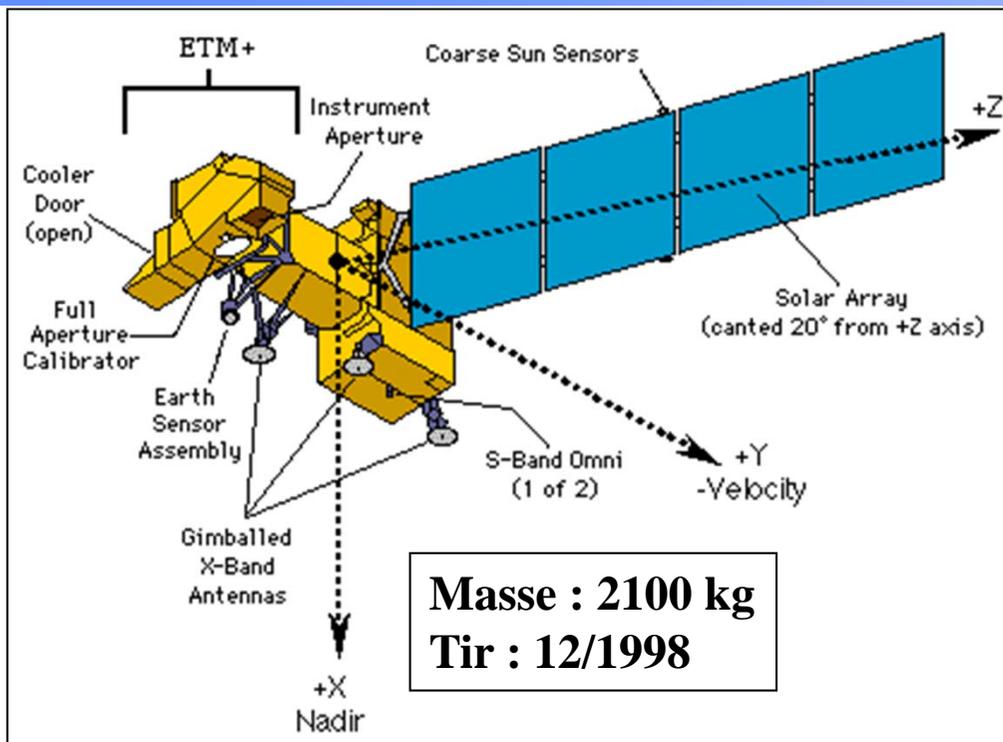
Heure locale : 10:30

Altitude: 832 km

Codage 8 bits

Stockage des données : mémoire à état solide

LANDSAT 7



ETM+ : Focale 2.43m, Diamètre 18cm

Satellite civil américain (NASA/NOAA/USGS)

Acquisition par Scanner, pas de dépointage

Bandes : PA 15 m, VIS-PIR-MIR 30m, IRT 60m (7 bandes + PA)

Orbite : cycle 16 jours

Heure locale : 10:30

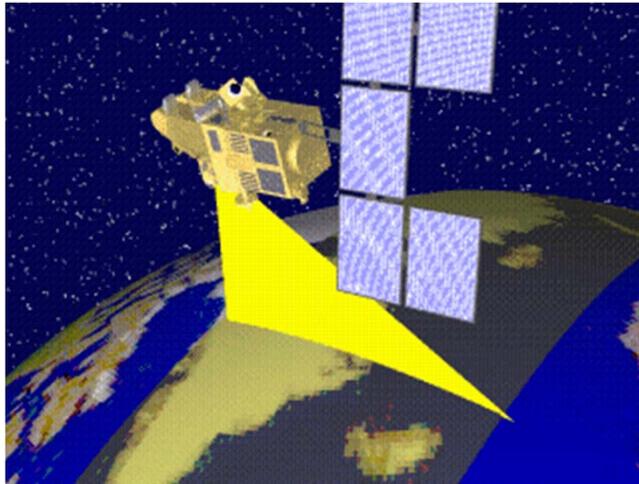
Fauchée : 185 km

Altitude: 705 km

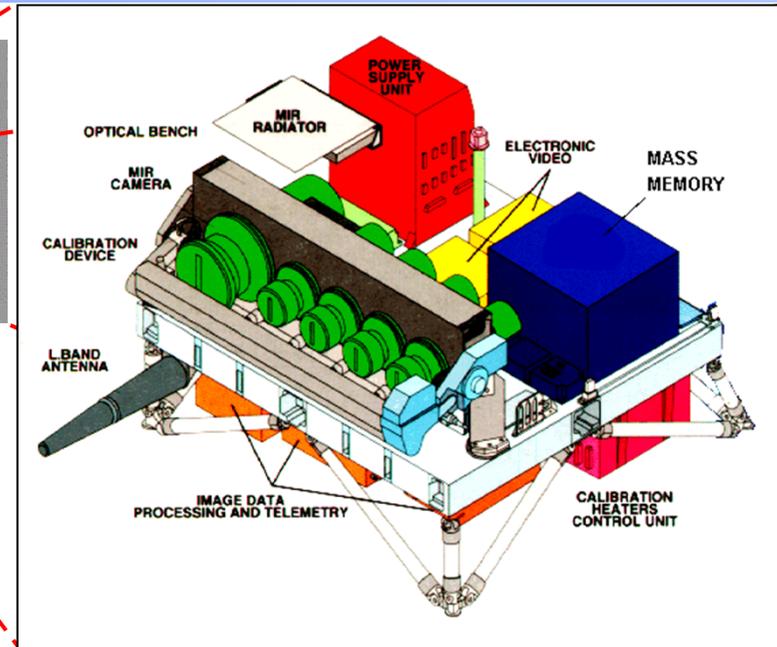
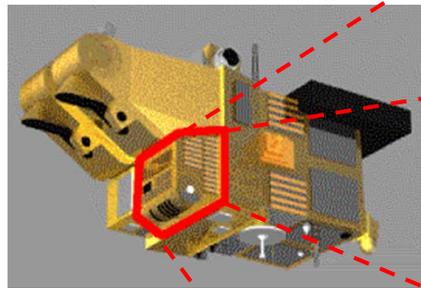
Codage 8 bits

Stockage des données: enregistreurs magnétiques

VGT



Satellite SPOT4



Masse 160 kg, focale 9mm

Instrument passager de SPOT4, de la Commission Européenne

Acquisition push-broom à grand champ (101 °)

Bandes : B0-B2-B3-MIR 1.16 km

Orbite : cycle 26 jours (équateur) Heure locale : 10:30

Codage 10 bits

Stockage des données: Mémoire à état solide

Fauchée : 2250 km

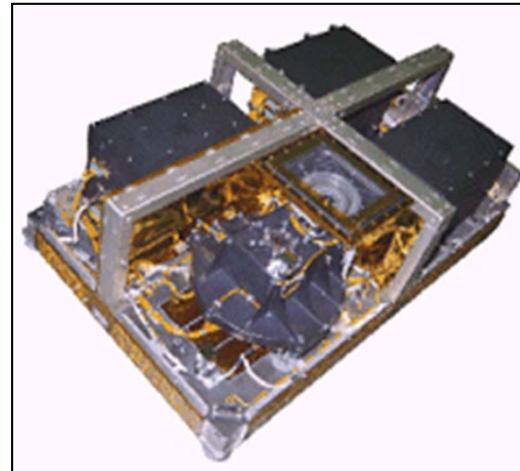
Altitude: 832 km

POLDER

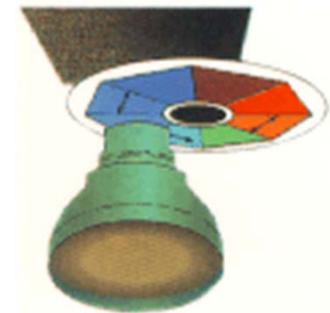


Masse: 3500 kg
Tir : 08/1996

Satellite ADEOS1



Instrument Polder: masse 32 kg



Principe de la
roue porte-filtres

Instrument français (CNES/CNRS/CEA) passager du satellite japonais ADEOS1

Acquisition multidirectionnelle par matrice CCD

résolution 6 km

Bandes : 9 bandes fines (de 443 à 910 nm) dont 3 polarisées

Champ : 2400x1800 km²

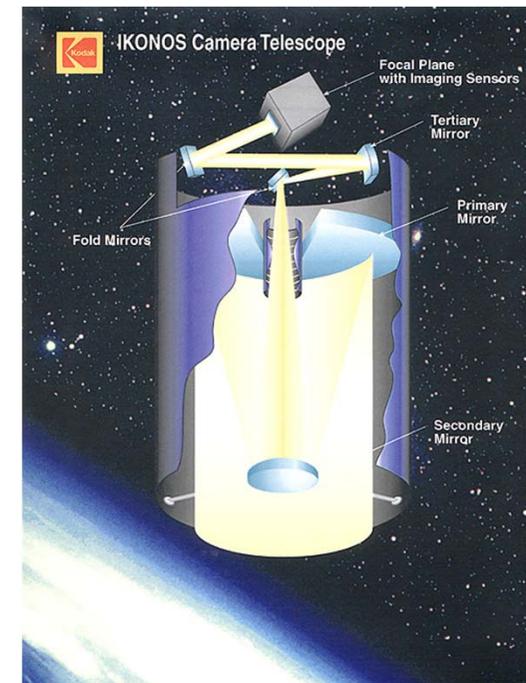
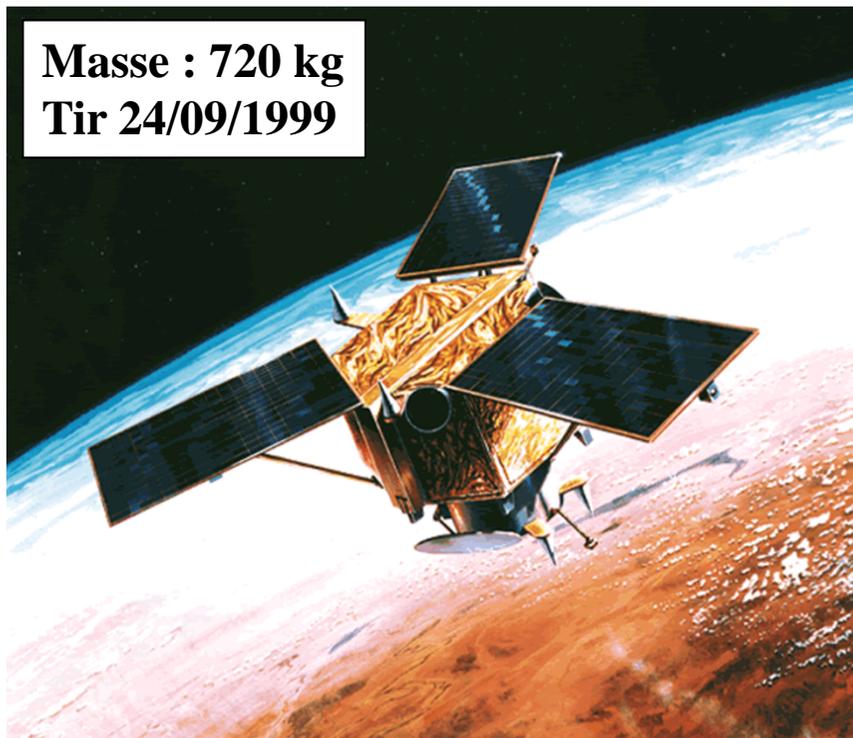
Orbite : cycle 41 jours Heure locale : 10:30

Altitude: 797 km

Codage 12 bits

Stockage des données: Mémoire à état solide

IKONOS 2



Caméra : Focale 10 m, Diamètre 70 cm

Satellite civil US (Space Imaging) , acquisition Push-broom

Bandes : PA **1m**, B0-B1-B2-B3 **4m**

Orbite : cycle **11** jours

Heure locale : **10:30**

Fauchée : **11 km**

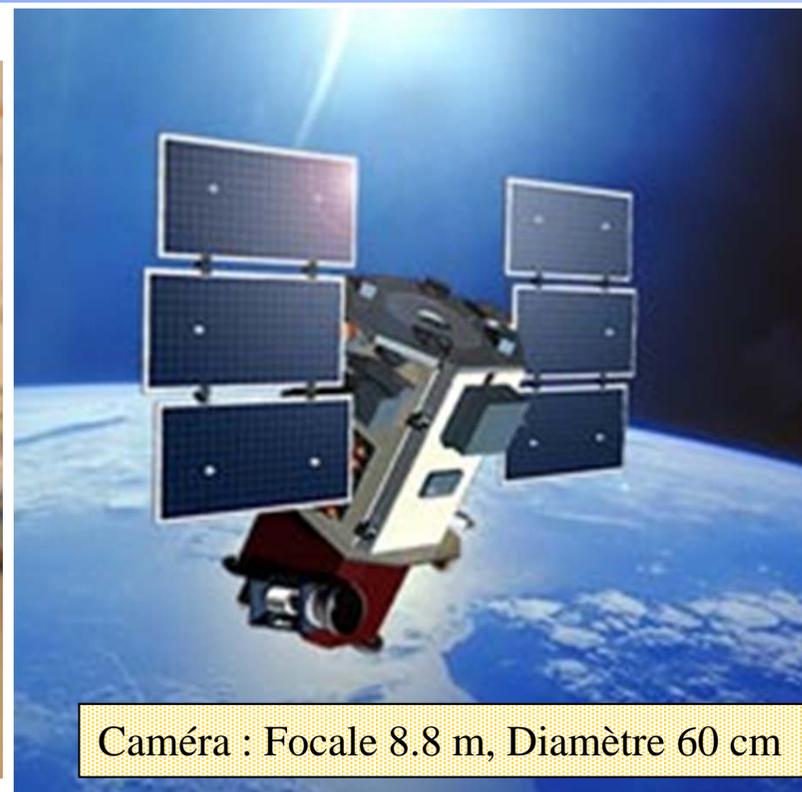
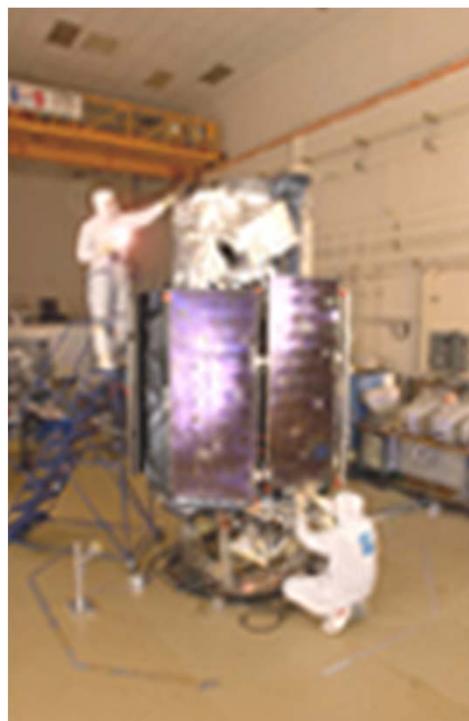
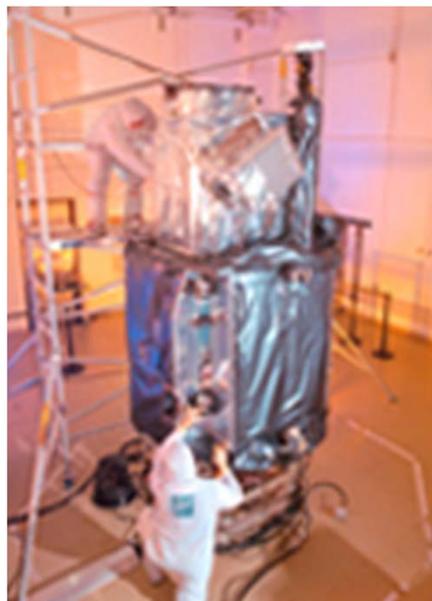
Altitude: **682 km**

Codage **11 bits**

Stockage des données: mémoire à état solide

QUICKBIRD

Masse : 930 kg
Tir 18/10/2001



Caméra : Focale 8.8 m, Diamètre 60 cm

Satellite civil US (DigitalGlobe) , acquisition Push-broom TDI

Bandes : PE 0.61m,

B0-B1-B2-B3 2.44m

Fauchée : 16.5 km

(Nadir)

Orbite : cycle 11 jours

Heure locale : 10:30

Altitude: 450 km

Codage 11 bits

Stockage des données: mémoire à état solide