

Télédétection passive s'appuie sur mesures de systèmes passifs :

- mesure du rayonnement réfléchi (principalement dans visible);
- mesure du rayonnement émis (principalement dans IR thermique).

Historiquement, premiers capteurs télédétection (photographiques) = passifs.
Capteurs actifs demandent + énergie et systèmes plus complexes.

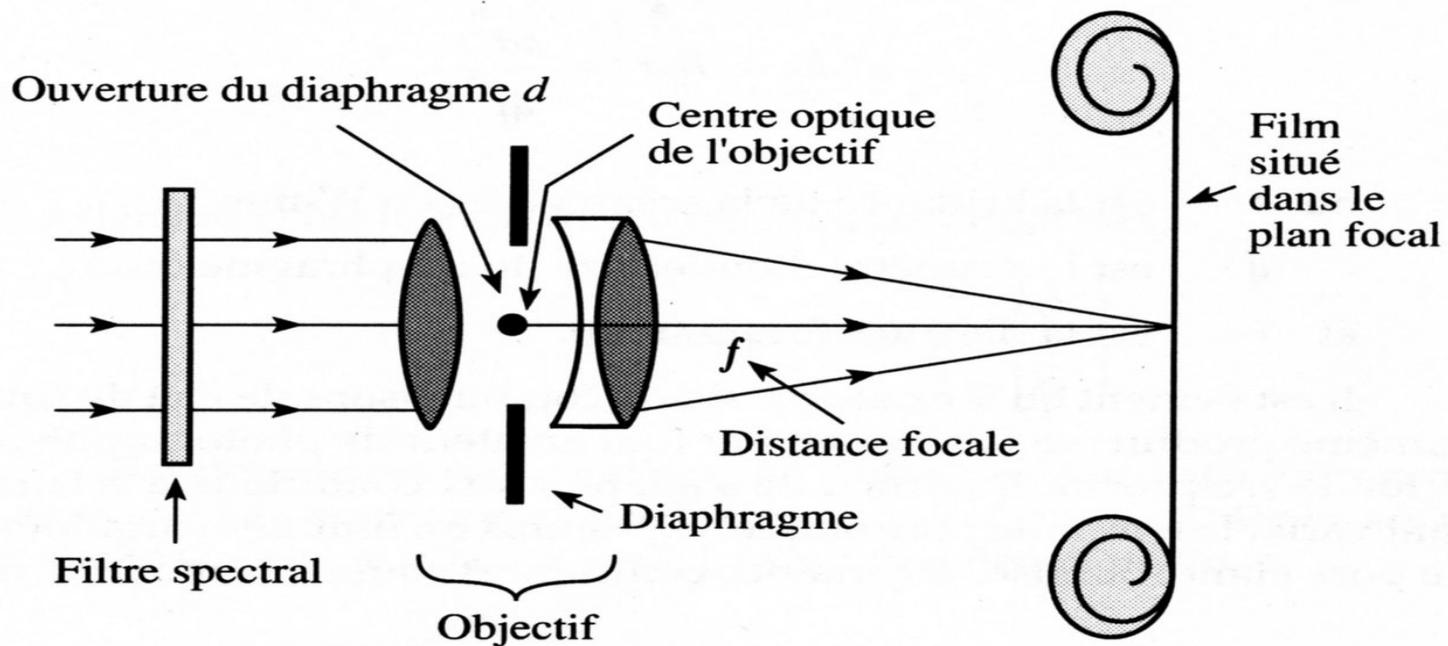
Plan du chapitre :

1. Imagerie photographique
2. Imagerie numérique
3. Radiométrie

Photographie inventée ~1840 (Daguerre et Niepce)

Appareil photographique comprend :

- un **objectif** formé d'une ou plusieurs lentilles, et caractérisé par sa distance focale f (séparant le film du centre optique).
- un **diaphragme** conditionnant la quantité de lumière traversant l'objectif, diamètre d'ouverture d .
- un **filtre spectral** déterminant la bande spectrale passant dans le système (généralement à l'entrée du système).
- une **pellicule photographique** (sous forme de rouleau) déroulée dans le plan focal de l'objectif.
- un **obturateur** situé dans l'objectif ou dans le plan focal, et qui permet de contrôler le temps d'exposition.



Composante importante d'un système photographique est le **film (pellicule)**:

Formé d'une base plastique recouverte d'une émulsion de **cristaux d'halogénure d'argent** (bromure ou iodure), d'où le nom argentique, solidifiés dans de la gélatine. Taille des cristaux varie entre 0.1 et 1mm.

Cristaux sensibles à la lumière : frappés par photons → brome (ou iodé) + argent absorbé dans gélatine.

Processus de développement :

- Réduction en argent métallique (grains noirs). Révélateur = réducteur doux qui ne transforme que les cristaux touchés par lumière.
- Fixateur dissout les sels non-réduits.

→ image en négatif → épreuves positives sur papier ou film.

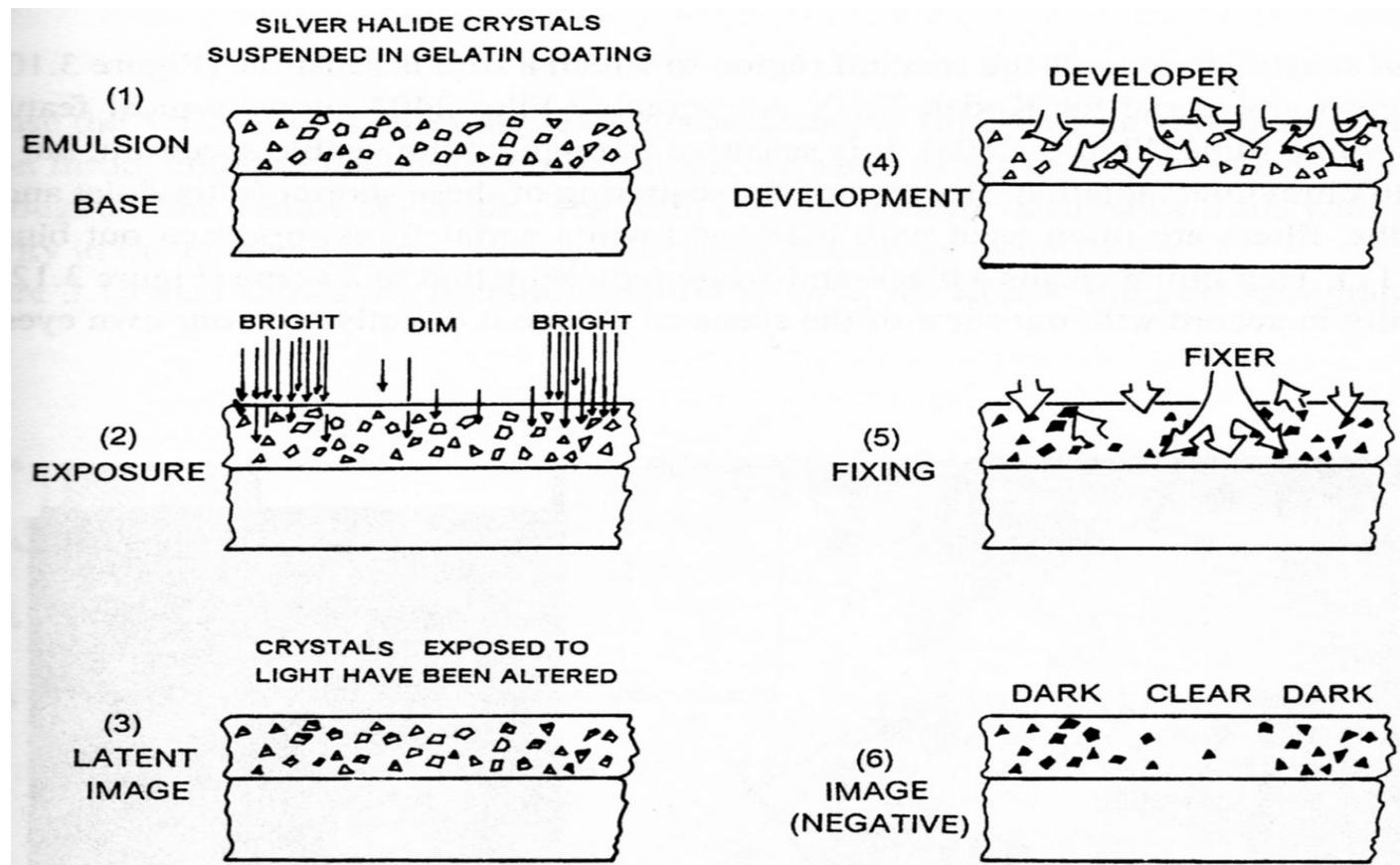


Image en négatif



Image en positif



Exposition [J mm^{-2}]

$$E_x = Et = \frac{sd^2t}{4f^2}$$

avec E éclairement [W mm^{-2}]
 t temps d'exposition [s]
 s brillance de la scène photographiée [W mm^{-2}]
 d diamètre de l'ouverture du diaphragme [mm]
 f distance focale [mm]

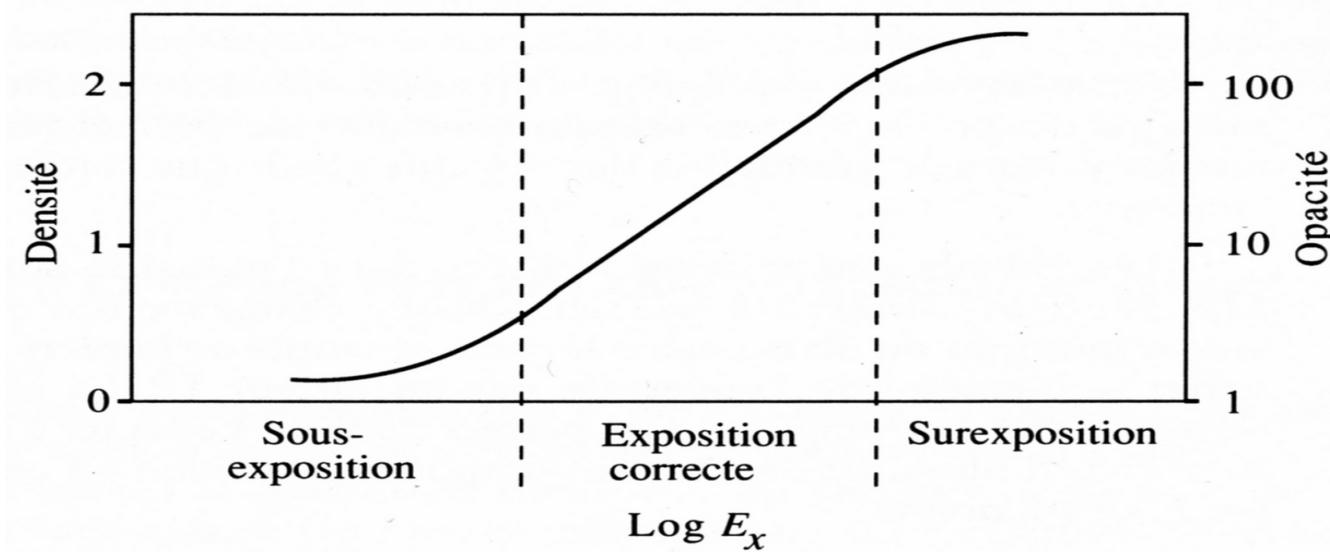
Noircissement du film peut être quantifié par

Opacité O = inverse de la transmittance T $O = \frac{1}{T} = \frac{\phi_0}{\phi}$

Densité D = log 10 de l'opacité $D = \log_{10} O = \frac{\ln(\phi_0/\phi)}{\ln 10}$

Densité + pratique qu'opacité car densité 2 clichés superposés = somme densités (produit des opacités).

Caractérisation d'un film par la variation de la densité en fonction de l'exposition E_x

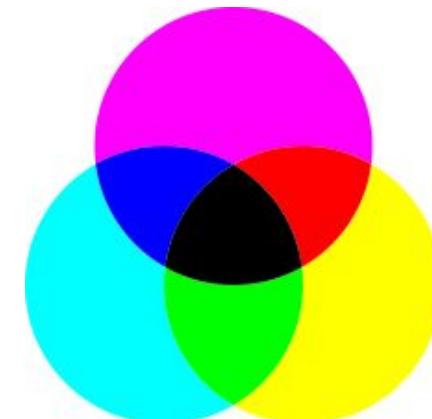
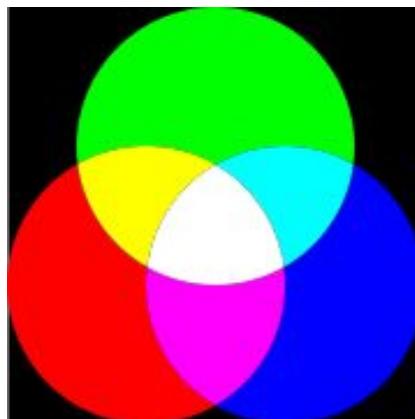


Bonn, Précis de télédétection, vol.1

Formation de la couleur

Toutes les couleurs peuvent être formées

- par addition des **3 couleurs primaires additives**: bleu, vert et rouge.
- par soustraction des **3 couleurs primaires soustractives** : cyan, magenta, jaune



Film noir et blanc :

- Film **orthochromatique** : sensible à une zone limitée du spectre.
- Film **panchromatique** : sensible à l'ensemble du spectre visible.
- Film **infrarouge noir et blanc** : sensible large portion du spectre entre ultraviolet et infrarouge, avec max de sensibilité dans bleu et IR.

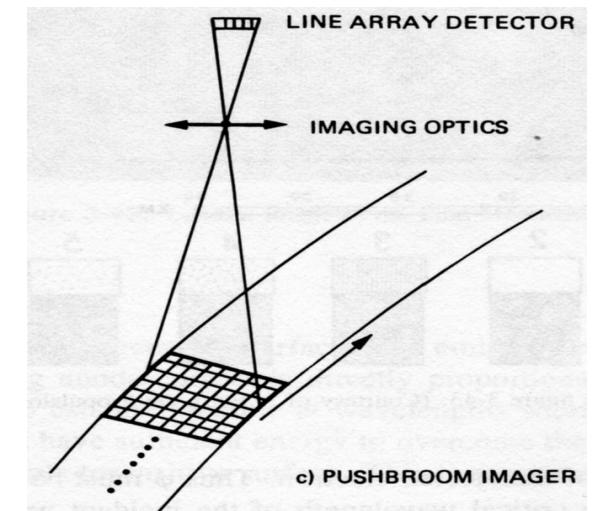
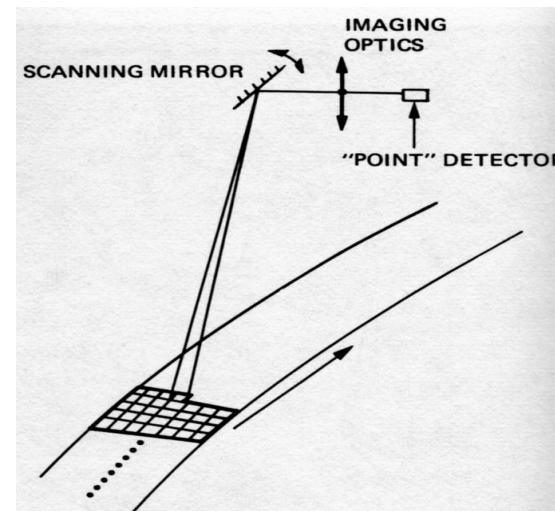
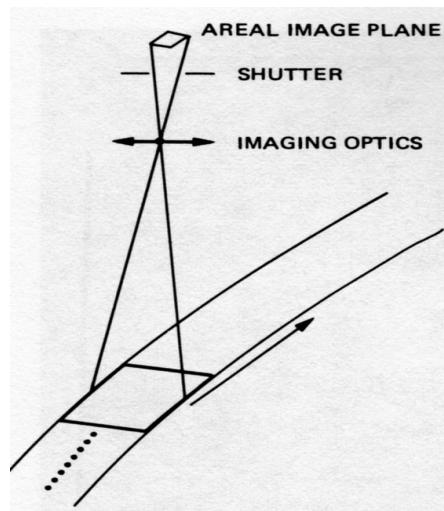
Film couleur :

- Film en **couleurs naturelles** : sensible à l'ensemble du spectre visible.
- Film en **fausses couleurs (ou infrarouge couleur)** : sensible au spectre visible et proche infrarouge.

Les **images numériques**, composées de **pixels** (picture element), permettent une analyse plus poussée.

3 principaux types de capteurs :

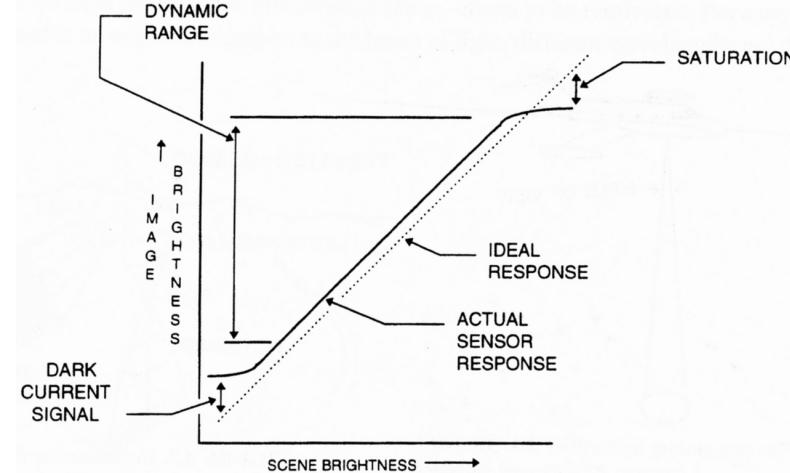
1. **Framing camera** : prise de vue instantanée (ex : Landsat RBV).
2. **Scanner** : miroirs mobiles qui renvoient sur un détecteur unique (ex : Landsat MSS et TM).
3. **Pushbroom imager** : barrette de détecteurs (ex : SPOT).



Elachi, Introduction to the physics and the techniques of RS, 1987

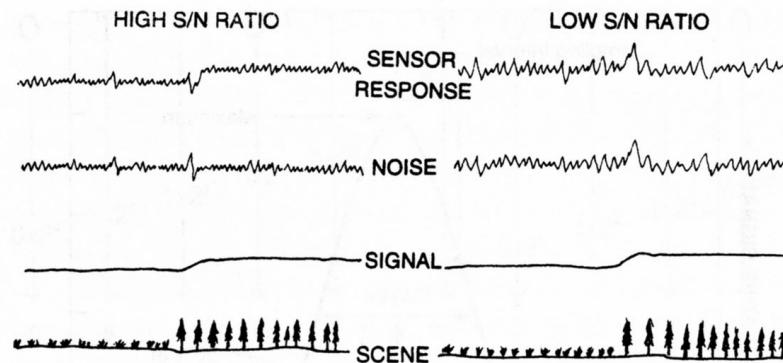
Capteurs multi/hyper-spectraux : plusieurs/grand nombre de bandes spectrales

De même que pour un film photographique, on peut définir une courbe caractérisant la sensibilité d'un capteur numérique :



Campbell, Introduction to RS, 2007

Grandeur importante pour qualifier une mesure numérique = rapport signal sur bruit (ou SNR en anglais) = $P_{\text{signal}} / P_{\text{bruit}}$.



Campbell, Introduction to RS, 2007

Données numériques

Données binaires : 0 ou 1. Poids ↴ gauche à droite

$$\begin{array}{cccc}
 1 & 1 & 1 & 1 \\
 2^3 & 2^2 & 2^1 & 2^0
 \end{array}$$

Ex : 48 = 01101 =

Octet = 8 bits, permet de coder entre

SI (depuis 1998):

KO (ou KB) = 1000 Octets (ou Bytes)

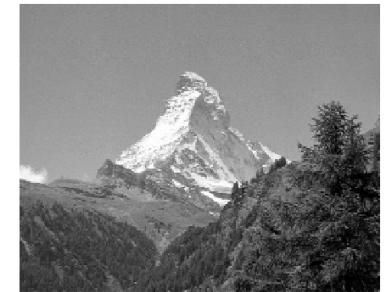
MO (ou MB)= 1000 KO

KiB (Kilo binary byte) = 1024 (2^{10}) Bytes

MiB (Mega binary byte)= 1024 (2^{20}) Bytes

International Electrotechnical Commission (IEC)

250 couleurs



4 couleurs

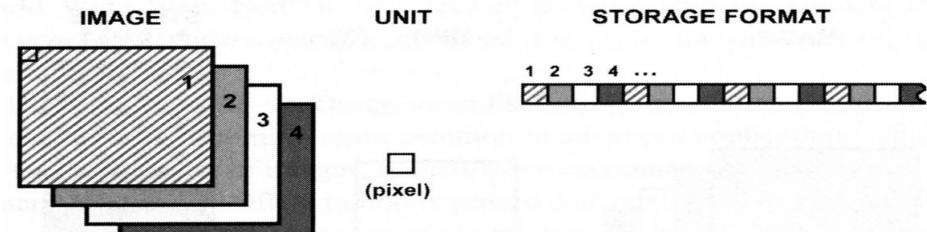


+ bruit

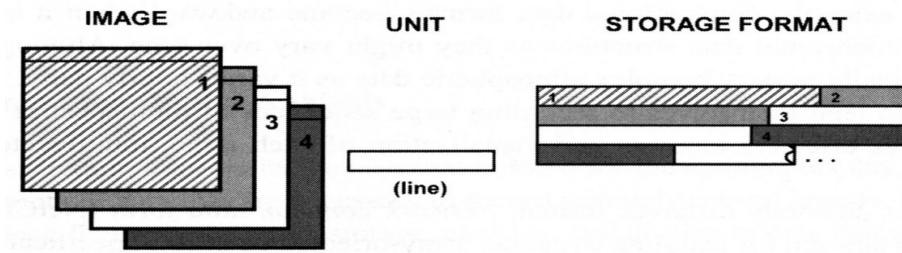


Format des données

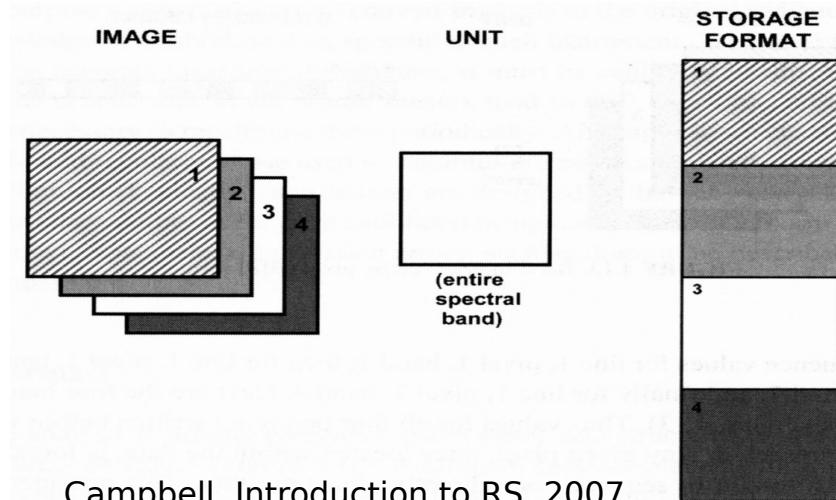
- Band interleaved by pixel (BIP)



- Band interleaved by line (BIL)



- Band sequential (BSQ)



Format des données

- Hierarchical Data Format (HDF) développé par le National Center for Supercomputing Applications.

<http://hdf.ncsa.uiuc.edu/>

- Network common data form (NetCDF).

<http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>

Compression des données

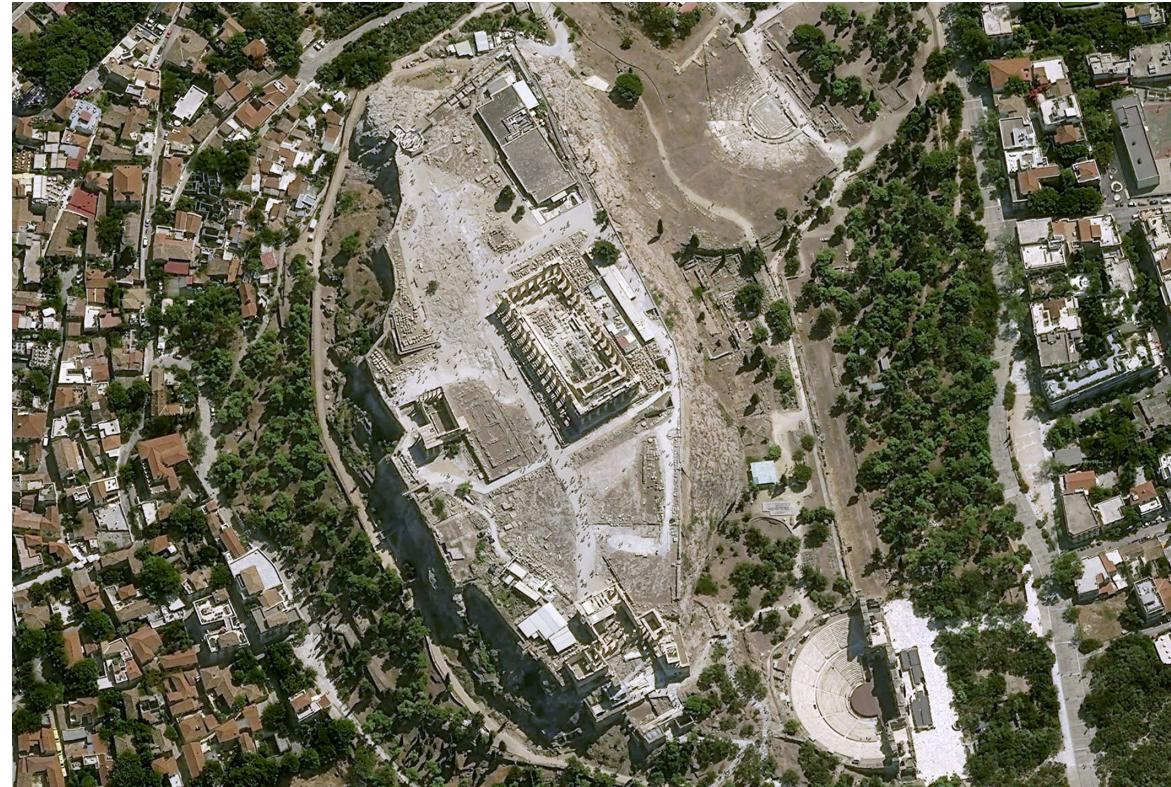
Nécessaire pour stockage, gestion et traitement efficaces des énormes volumes de données produits par télédétection. Ex : jpeg (joint photographic experts group).

Ouchy 1919
Panchromatique



[https://www.espazium.ch/fr/actualites/
lamenagement-du-littoral-lausannois-avant-1964](https://www.espazium.ch/fr/actualites/lamenagement-du-littoral-lausannois-avant-1964)

Acropole, Athènes, 2021
Airbus, Pléiades Neo, résolution = 0.3 m



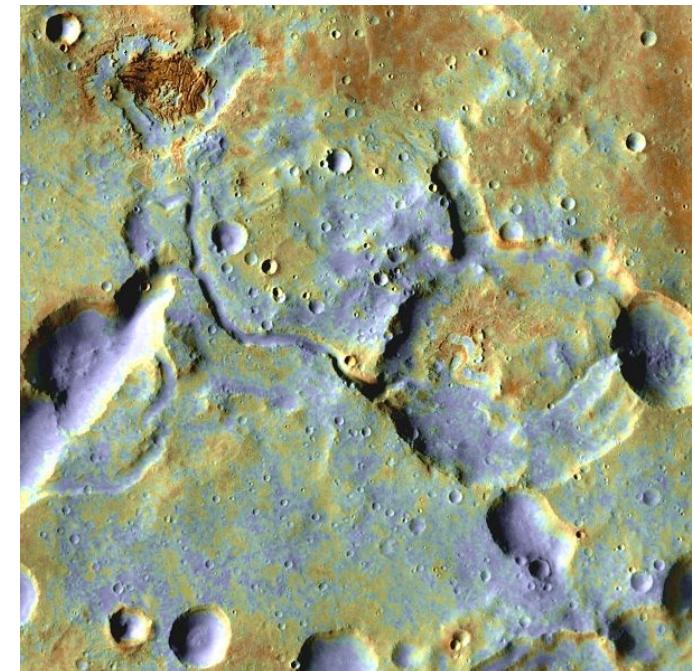
<https://space-solutions.airbus.com/newsroom/satellite-image-gallery/> 16

Les Alpes, infrarouge (noir et blanc)



<https://www.flickr.com/photos/bgeorgeday/35941952990/>

Mars, Arabia Terra, fausses couleurs



NASA/JPL/ASU

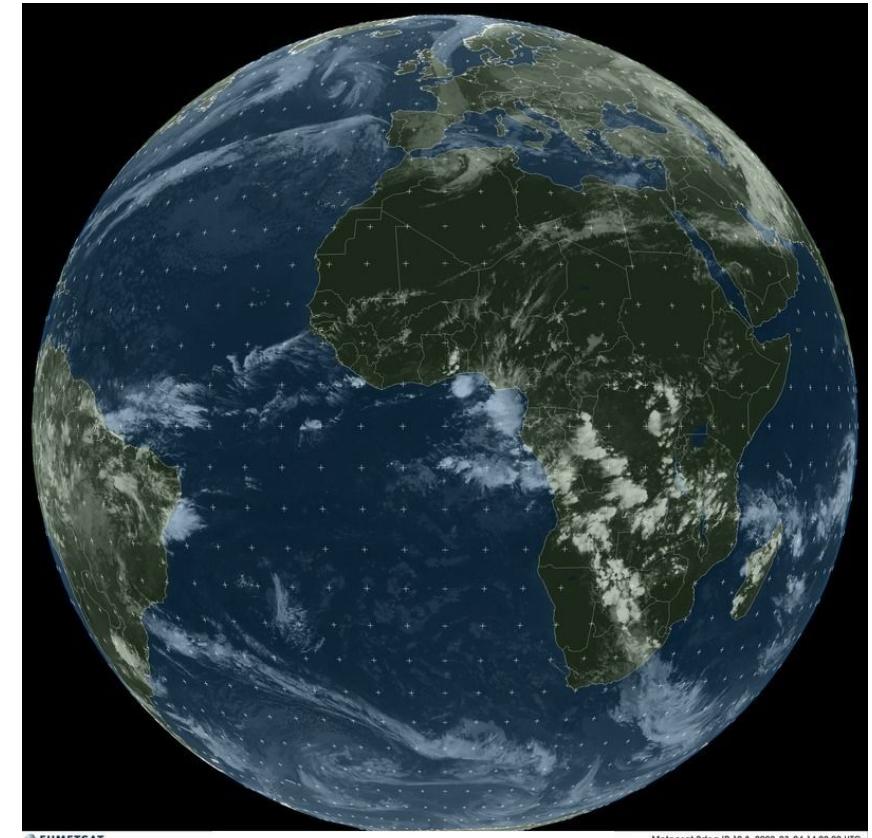
Visible → IR thermique : pour étude signatures spectrales dans bandes des capteurs satellitaires (Landsat, SPOT,...).

Landsat9 - Himalaya



<https://svs.gsfc.nasa.gov/13987>

Meteosat (infra-rouge th)



https://en.allmetsat.com/images/msg_ir.php

Imagerie dans le visible et proche visible n'est pas utilisée uniquement pour l'observation de la Terre : par ex. télescope spatial Hubble (UV, visible, IR).

Premières réparations... (1993)



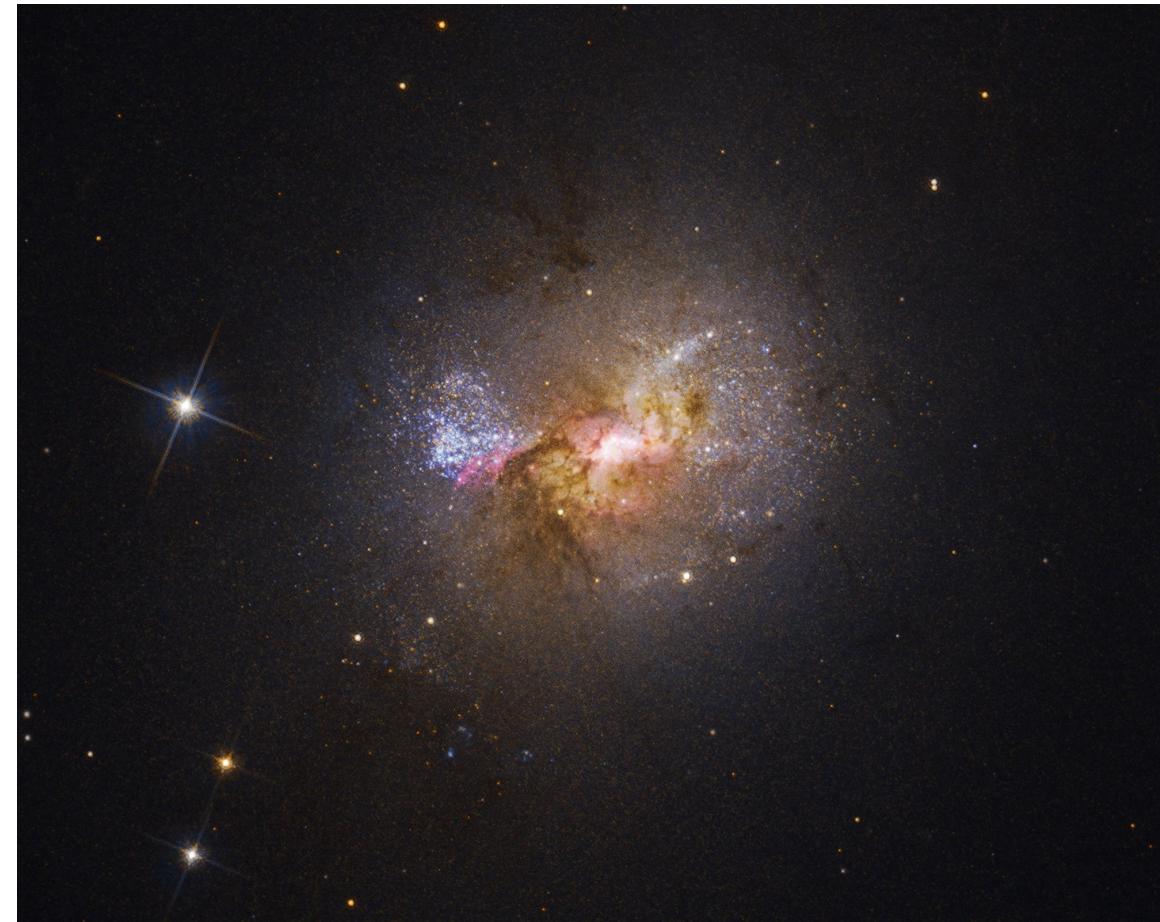
Après la mission service 4 (2009)



Nébuleuse de Hélix (2004)



Galaxie Henize 2-10 (2022)



Téléscope James Webb (proche et moyen infrarouge, NASA) – lancé en déc 2021

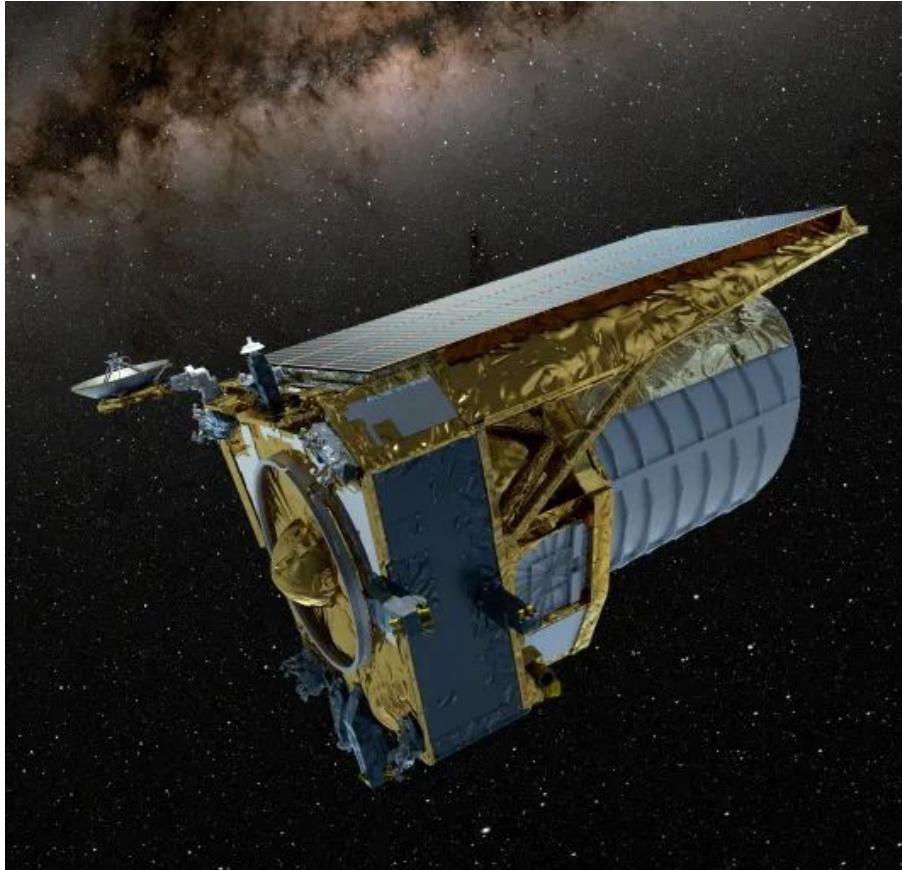
Galaxie Messier 74 (août 2022)

Téléscope (OTE)



Téléscope Euclid (visible + proche infrarouge, ESA) lancé en juillet 2023

Nébuleuse du Cheval (nov 2023)



<https://everydayastronaut.com/euclid-telescope-falcon-9-block-5/>



https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2023/11/Euclid_s_view_of_the_Horsehead_Nebula_-_zoom_2

Questions

1. Pourquoi utilise-t-on des télescopes en orbite pour observer l'univers dans le visible et proche IR ?
2. Si l'on veut augmenter le contraste sur un cliché panchromatique, quelle partie du spectre visible doit-on ordinairement atténuer à l'aide d'un filtre ? Pourquoi ?
3. Quelle est la courbe typique définissant la sensibilité d'un film photographique ou d'un capteur numérique ?

Image photographique (noir et blanc ou couleur) s'appuie sur une mesure du contraste.

Contraste C d'une image est une mesure de l'importance relative des différences d'intensités lumineuses perçues dans l'image :

$$C = \frac{E_{max}}{E_{min}} \quad C \in [1, \infty[$$

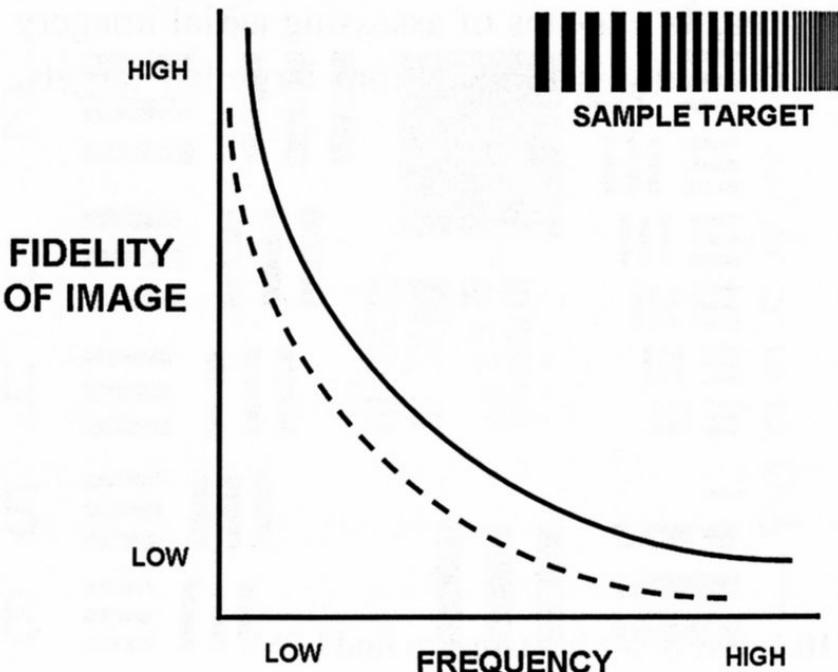
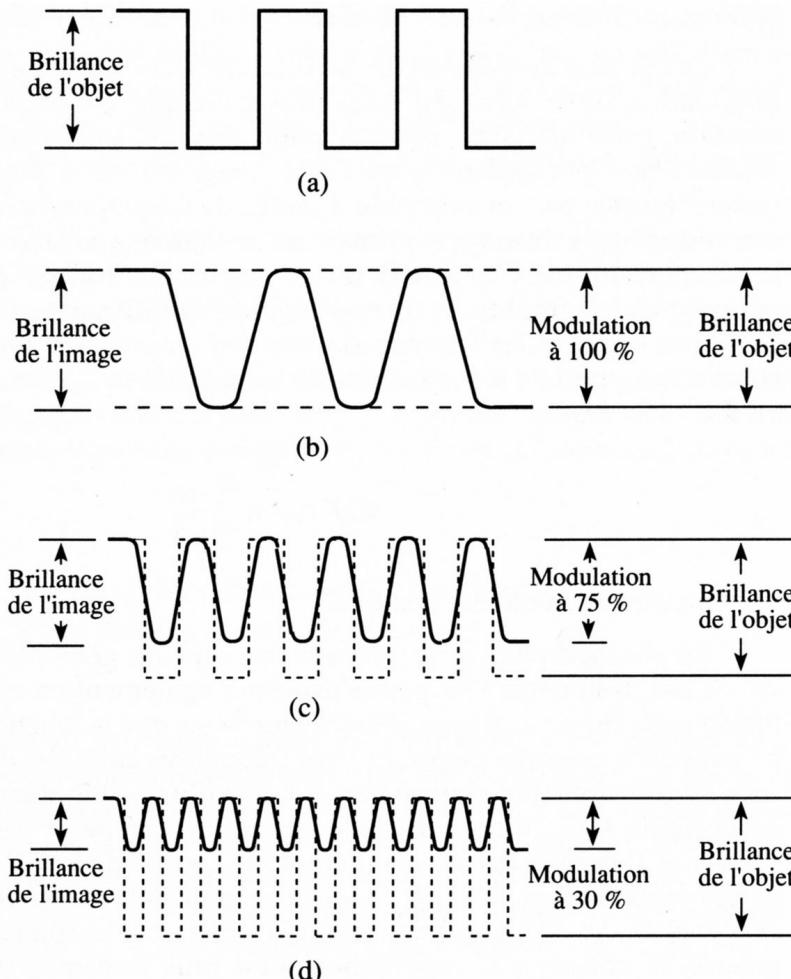
Modulation M

$$M = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{min} + E_{max}} = \frac{C - 1}{C + 1}$$

Fonction de transfert de modulation (FTM) exprime la manière dont la modulation d'une scène est transmise à l'image à travers le capteur.

FTM = modulation de l'image M_i divisée par la modulation de la scène M_0 pour fréquence spatiale ν

$$FTM(\nu) = \frac{M_i(\nu)}{M_0(\nu)}$$



FTM difficile à mesurer donc d'autres grandeurs ont été définies

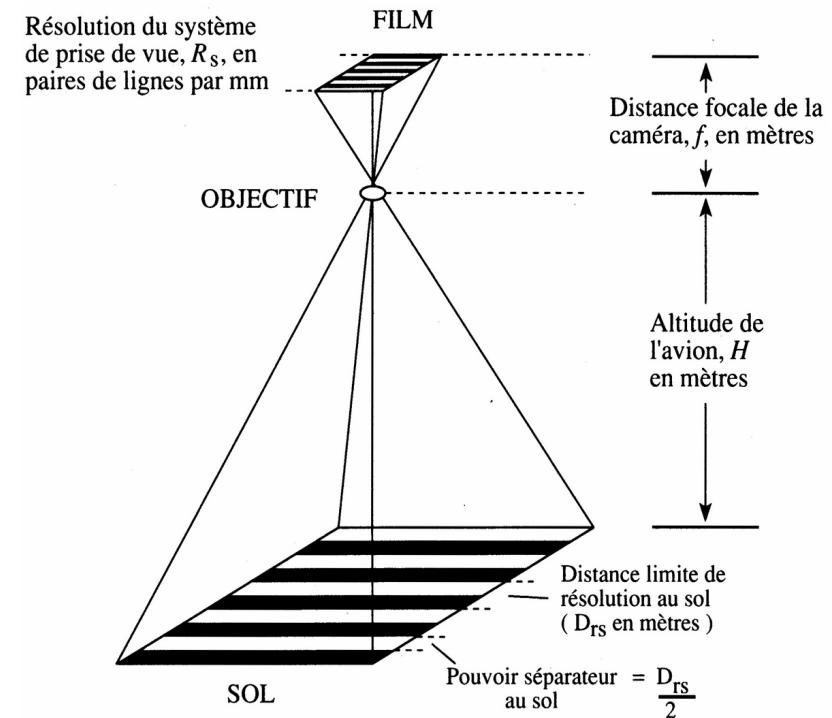
Distance limite de résolution au sol : $D_{rs} = \frac{H}{1000fR_s}$

H altitude du capteur [m]

f distance focale [m]

R_s limite de résolution du syst.
(en paires de lignes par mm)

Pouvoir séparateur au sol = $D_{rs} / 2$



1. Effets géométriques

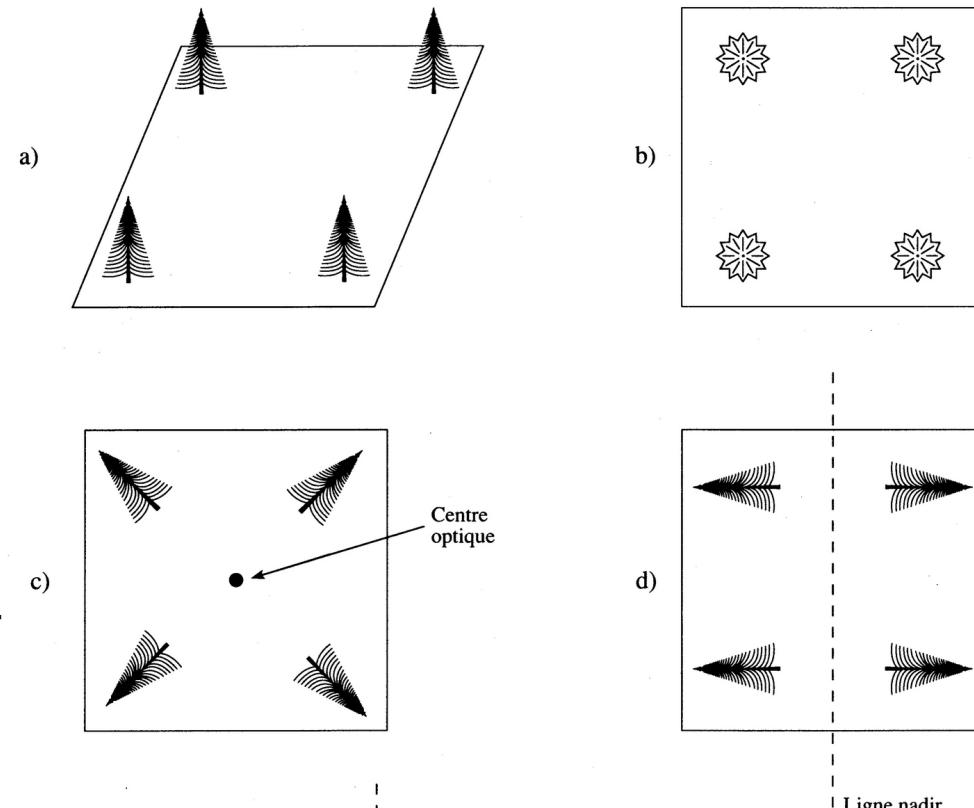
Déplacement apparent :

Données photographiques :

symétrie centrale autour du centre optique des déplacements apparents des objets dans l'image.

Données d'un système à balayage :

symétrie axiale autour de la ligne nadir.
Déplacement apparents vers l'extérieur de la ligne nadir.



Exemple



Source : Mammut / Robert Bösch
Photo du sommet de la Jungfrau

Effet du relief sur les photographies aériennes

Déplacement apparent d'un objet élevé augmente avec distance au point principal (~centre optique) et hauteur de l'objet.

$$d = \frac{hr}{H}$$

d déplacement apparent

h hauteur de l'objet

r distance entre l'objet et le point principal

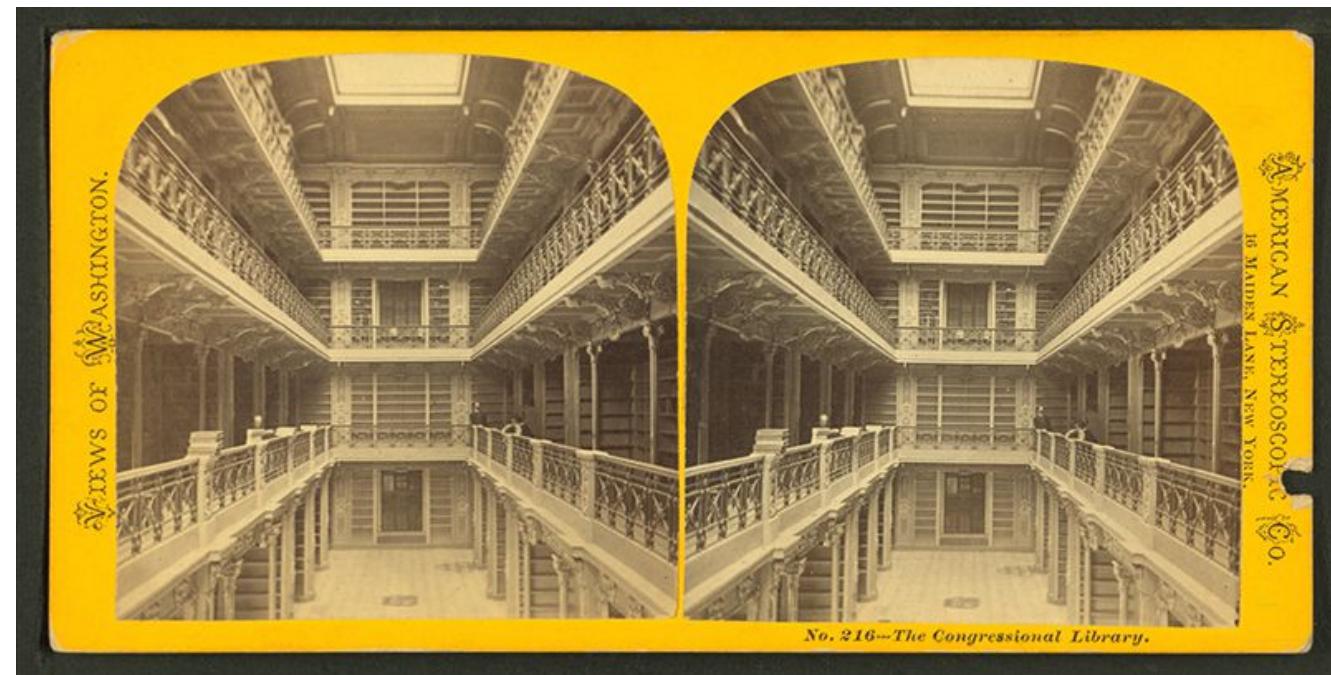
H altitude de la plateforme

Ce déplacement permet la vision stéréoscopique du relief à partir de photos aériennes successives ayant un certain recouvrement.
Base de la **photogrammétrie**.

Stéréoscopie

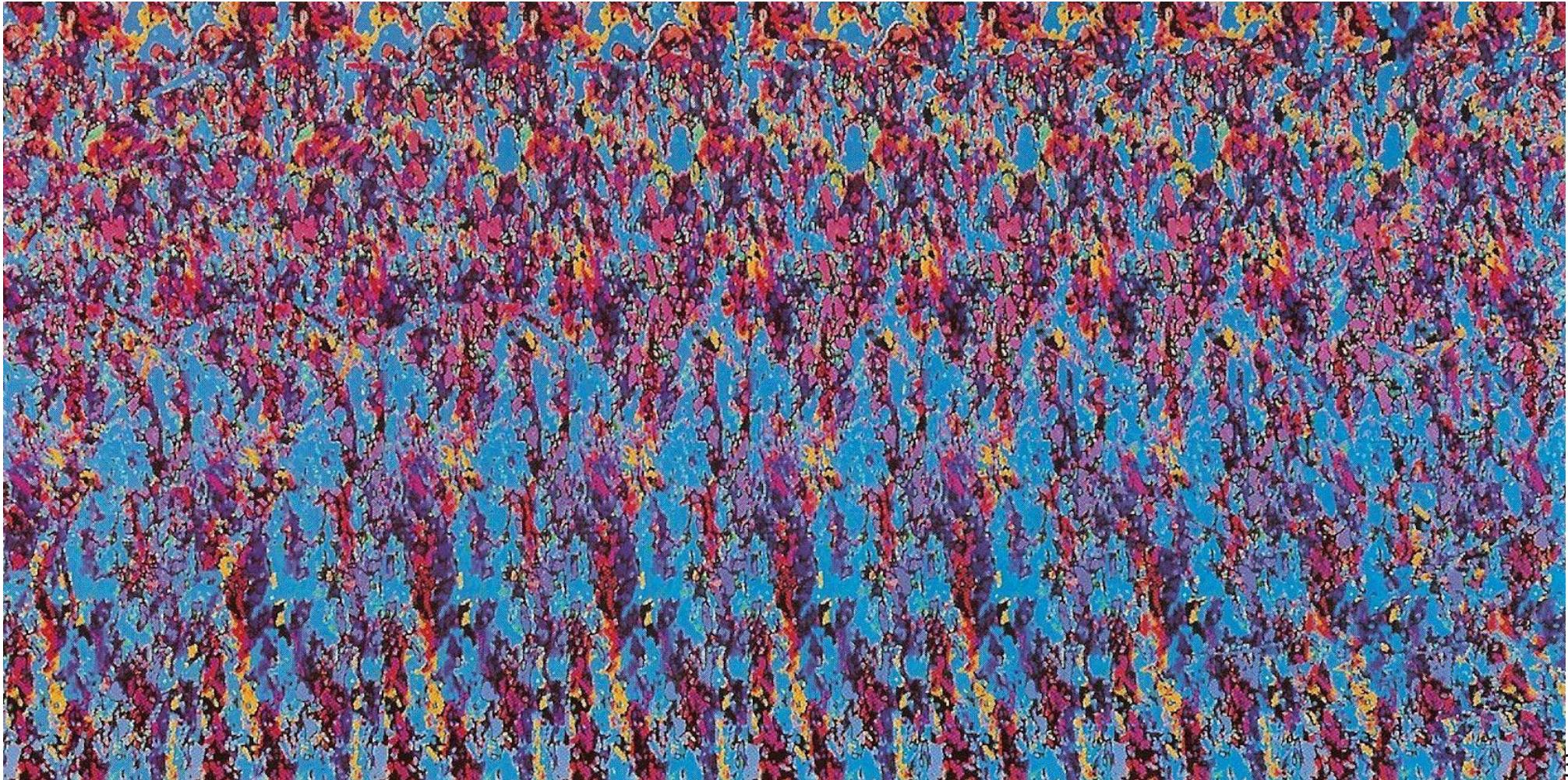
2 images de la même zone prises de 2 points de vue légèrement décalés
→ vision en relief (=fonctionnement vision 3D humaine).

Principe connu depuis les débuts de la photographie...

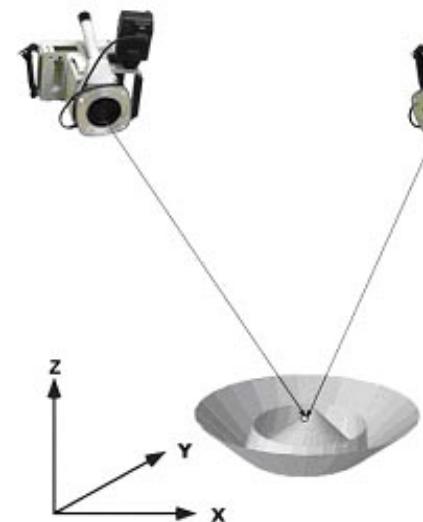


Stéréogramme

<https://techtipsnext.blogspot.com/2020/01/how-to-generate-your-own-magic-eye.html>



Déplacements apparents dans les images sont la base de la **photogrammétrie** (dont le but est de déterminer les propriétés géométriques des objets)

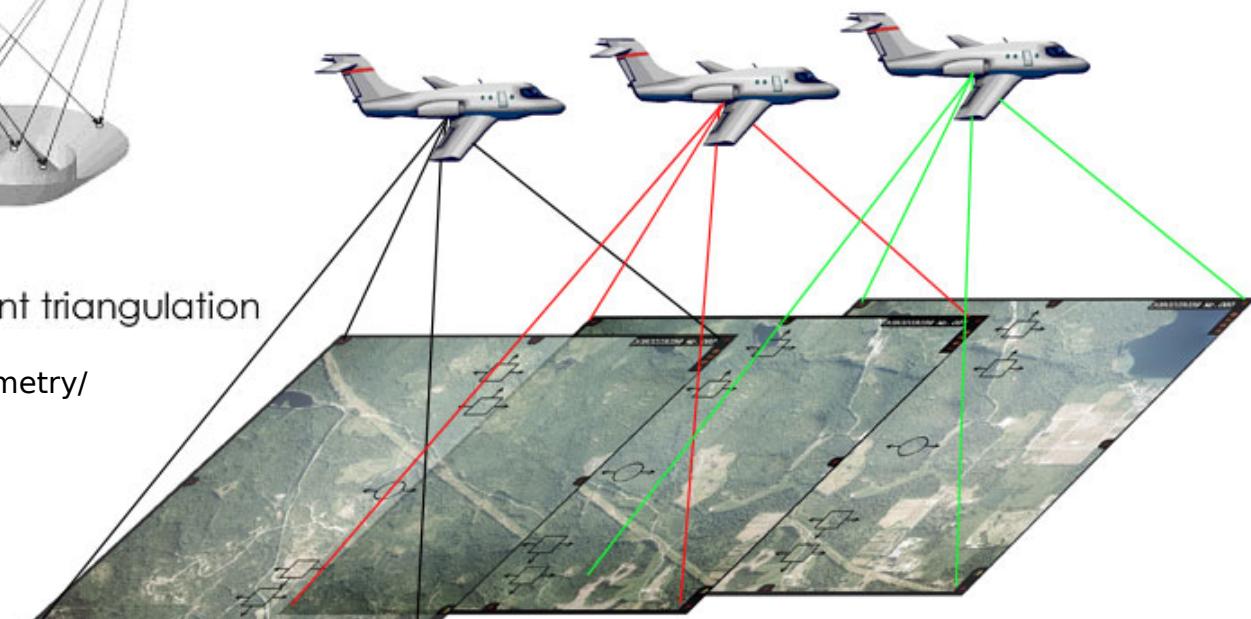


Single point triangulation



Multiple point triangulation

Repose sur la triangulation



<https://www.geodetic.com/v-stars/what-is-photogrammetry/>

https://scienceaid.net/Photogrammetry_and_Remote_Sensing

Applications diverses, par exemple urbanisme/architecture



<http://www.photogrammetry.eu/>



[https://www.pinterest.com/
pin/439593613613030191/](https://www.pinterest.com/pin/439593613613030191/)

Distorsion :

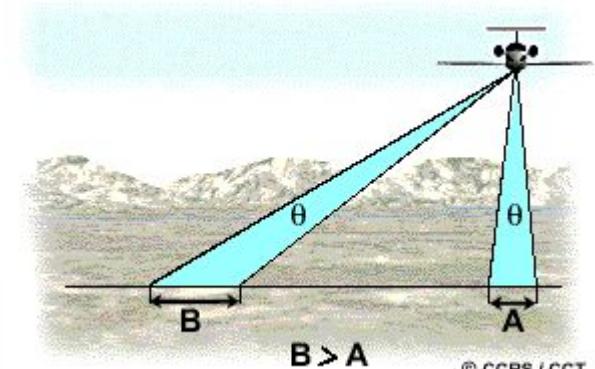
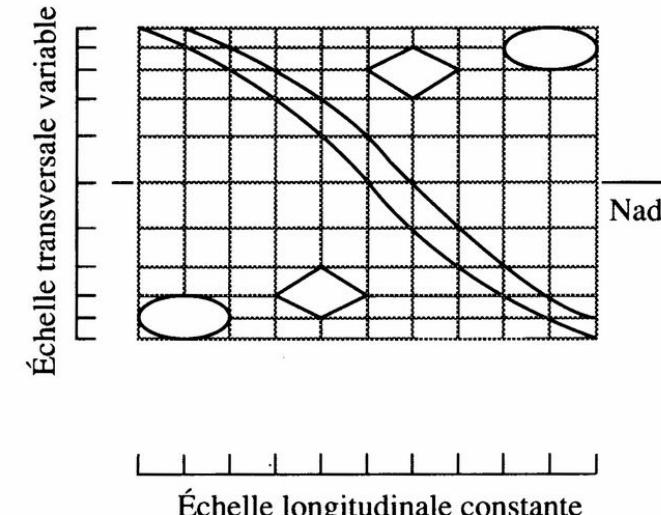
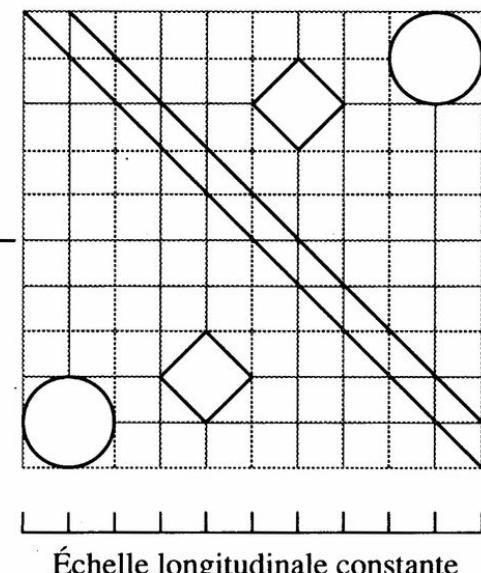
Variations de la limite de résolution spatiale en fonction de l'angle de visée.

Résolution diminue à grande inclinaison et grande distance \rightarrow distorsions.

a)

Ex. scanner à balayage

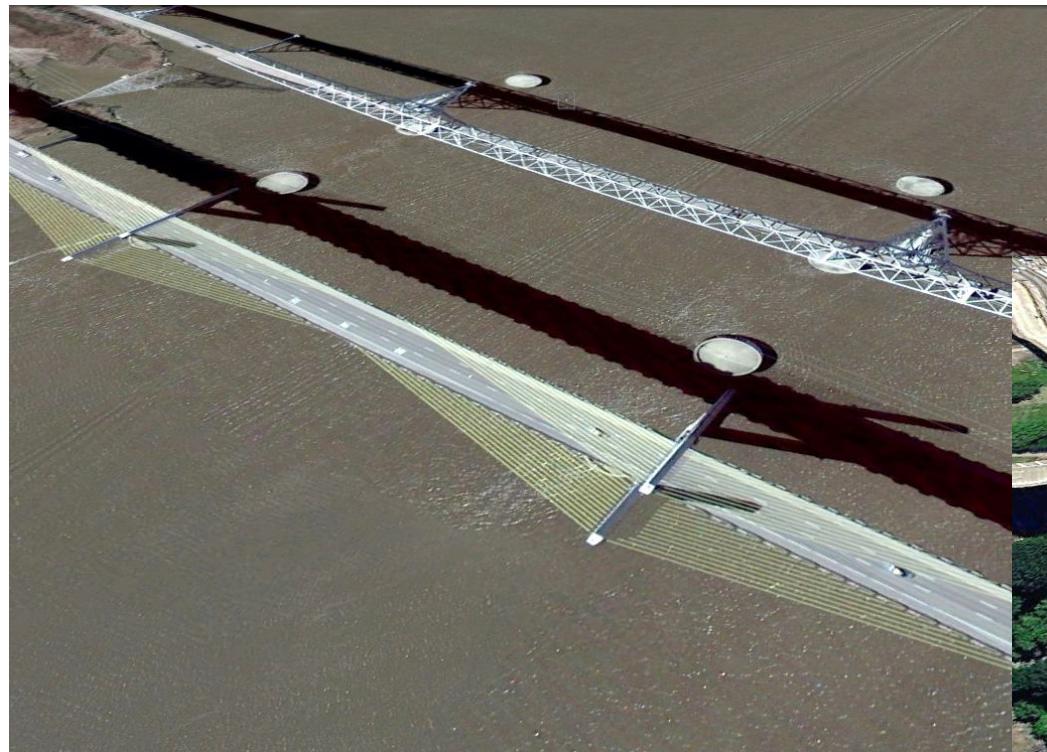
b)



<https://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/satellite-imagery-air-photos/satellite-imagery-products/educational-resources/9407>

En supposant que les pixels ont la même surface au sol.





<http://clementvalla.com>



Viaduc de Millau, France



Viaduc de Langwieser, Grisons

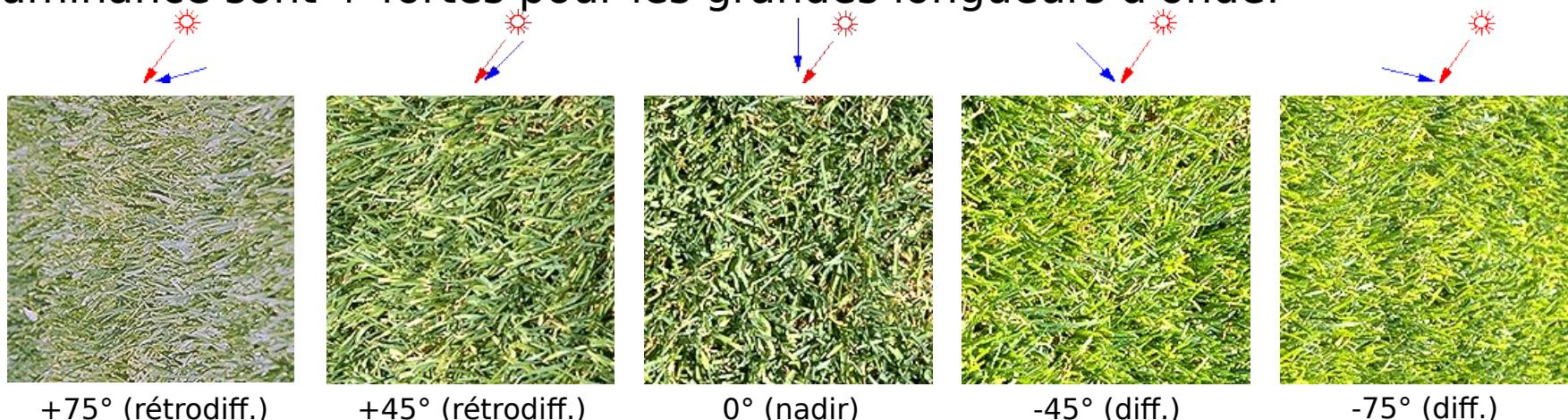
2. Effets radiométriques

Perte d'exposition :

Points éloignés du centre optique reçoivent moins de ray. que ceux proches de celui-ci. Donc le centre de la photo apparaît plus clair que la périphérie.

Réflectance bidirectionnelle :

Pour surfaces non-lambertiennes, il existe une inégalité spatiale du signal réfléchi. En général, 2 secteurs + brillants : 1 pour réflexion spéculaire + 1 pour max de rétrodiffusion (opposés / centre optique). Ces différences de luminance sont + fortes pour les grandes longueurs d'onde.



Questions

1. Quelle est la hauteur d'un immeuble si le déplacement apparent de son sommet est 10% de sa distance au centre optique d'une photographie aérienne prise à une altitude de 2000 m ?
2. Vous êtes passager d'un avion volant à 9000 m d'altitude au dessus du sol et vos yeux ont une limite de résolution angulaire normale de 0.2 milliradian. Quel est votre pouvoir de séparation minimum (en m) pour des objets au sol à haut rapport de contraste ?

Radiomètre = capteur qui mesure l'intensité du rayonnement reçu pour une (ou quelques) bande(s) spectrale(s) donnée(s) et pour un angle solide donné.



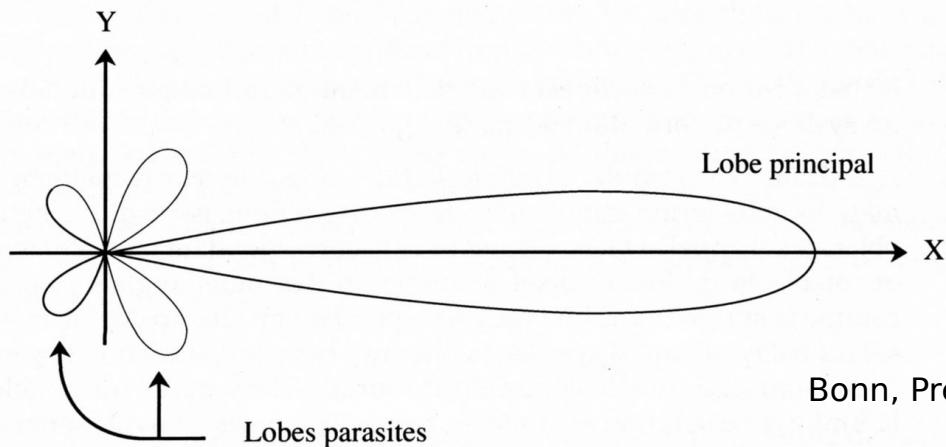
Westwater et al., 2005: Principles of surface-based microwave and millimeter radiometric remote sensing of the atmosphere

Spectroradiomètre = radiomètre capable de “découper” le rayonnement reçu en un grand nombre de bandes spectrales (→ signatures spectrales).

Visible → IR thermique : pour étude signatures spectrales dans bandes des capteurs satellitaires (Landsat, SPOT,...).

Micro-ondes : radiomètre composé d'une antenne, d'un système récepteur (amplificateur, détecteur, filtre passe-bas) et d'un système d'enregistrement des données.

Antenne : diagramme de rayonnement (patron)



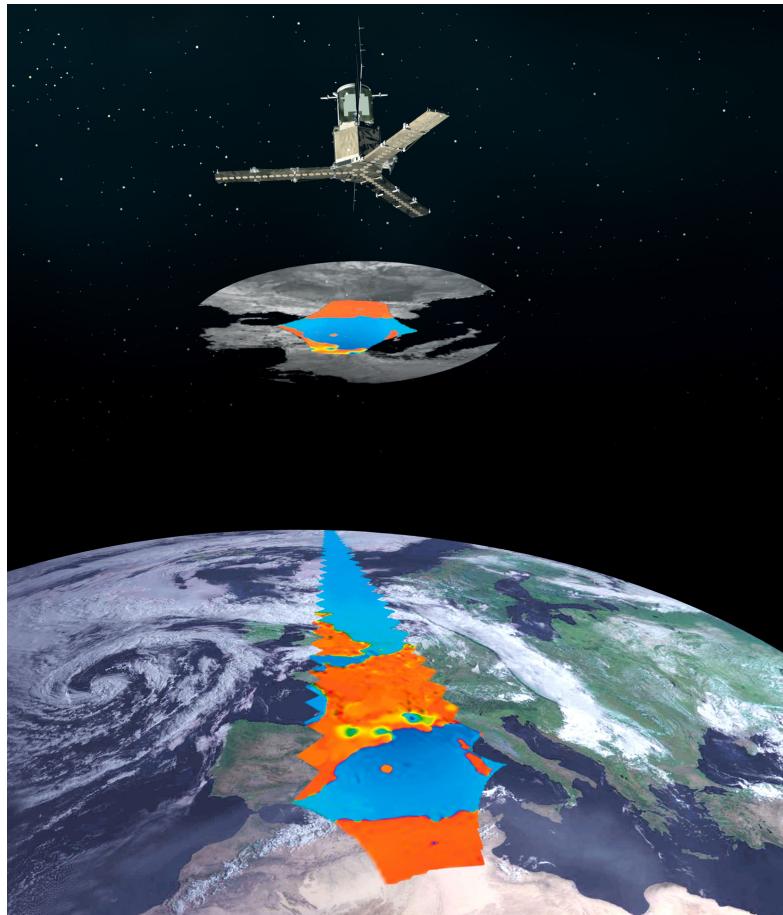
Ouverture du faisceau [rad]
 \approx long. onde / taille antenne

Bonn, Précis de télédétection, vol.1

Récepteur : très sensible car rayonnement capté par antenne $\sim 10^{-12}$ à 10^{-20} W pour majeure partie des surfaces terrestres. Importance amplificateur.

Radiomètre micro-onde

Satellite SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) lancé en 2009



Antenne à ouverture synthétique



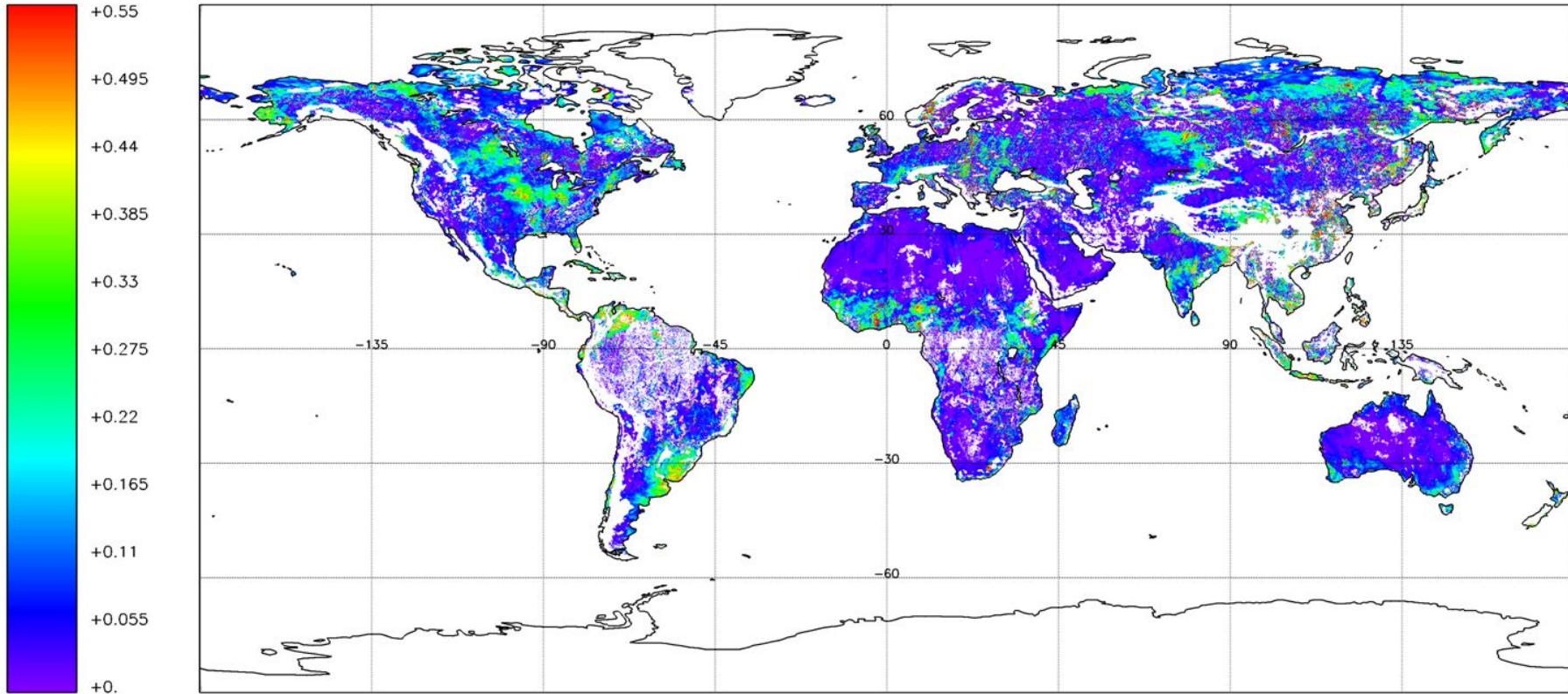
Exemples de données collectées par SMOS - Humidité des sols



MIR_SMUDP2 – Soil_Moisture (m3m-3) – 20100620T001100 – 20100623T004816

Cylindrical projection – 87 product(s) – Generated on 20100624T193111

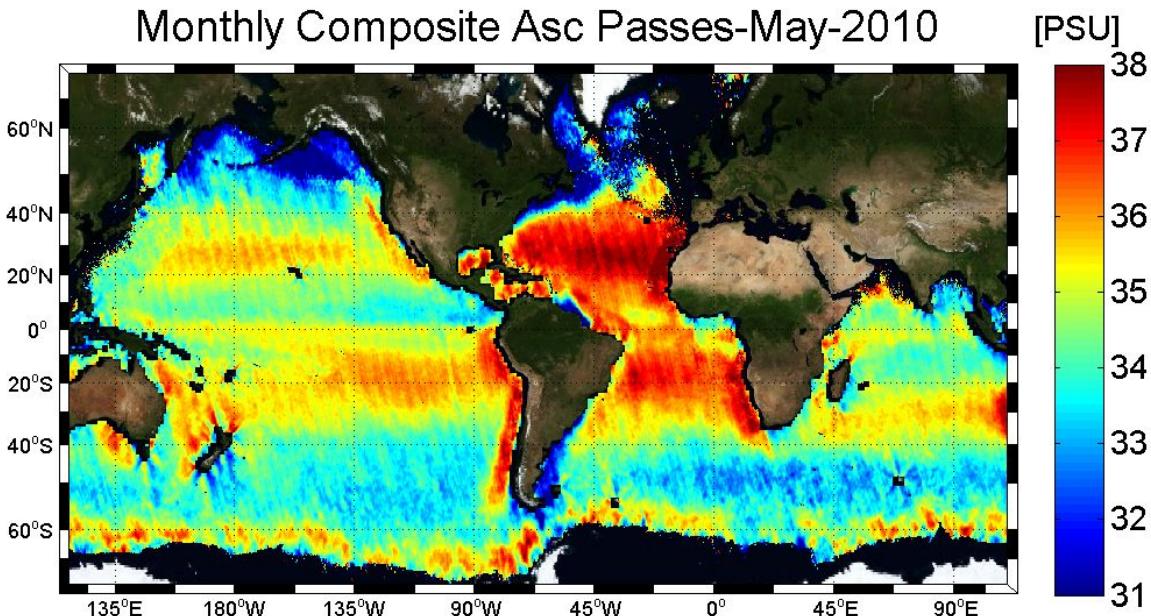
Orbits: All – Fill value: -999.0



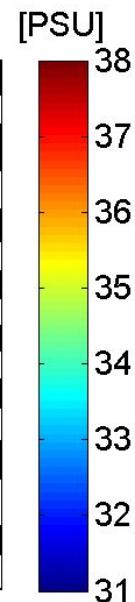
Exemples de données collectées par SMOS

Salinité des océans

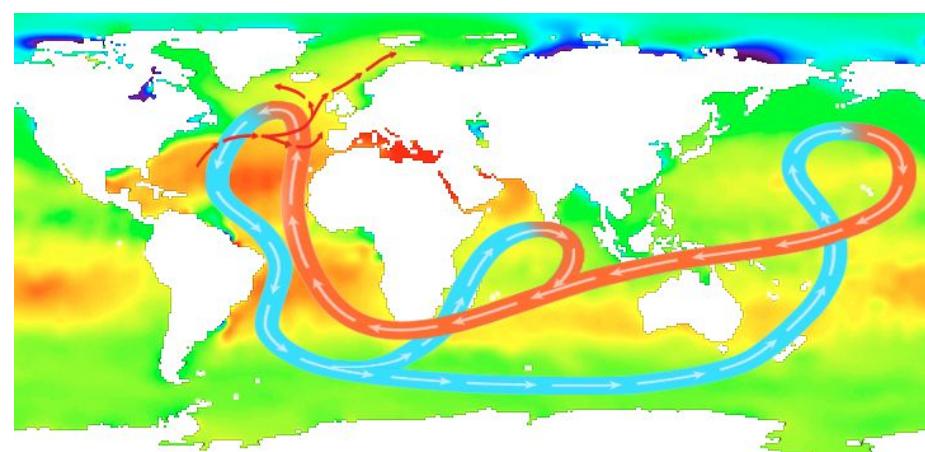
Monthly Composite Asc Passes-May-2010



source : ESA



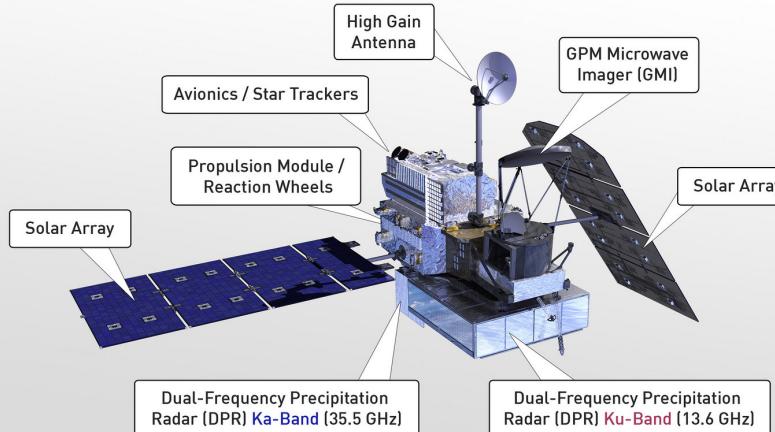
Average sea-surface salinity
and global circulation



GPM Microwave Imager (Global Precipitation Measurement Mission)



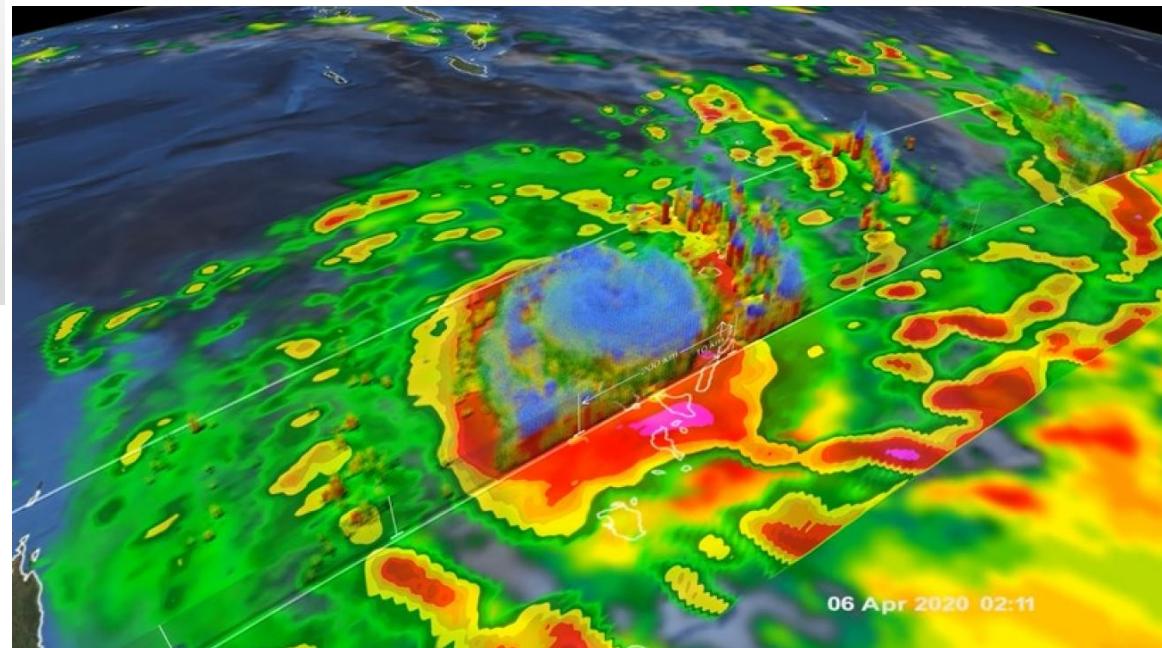
Global Precipitation Measurement Mission
Core Observatory



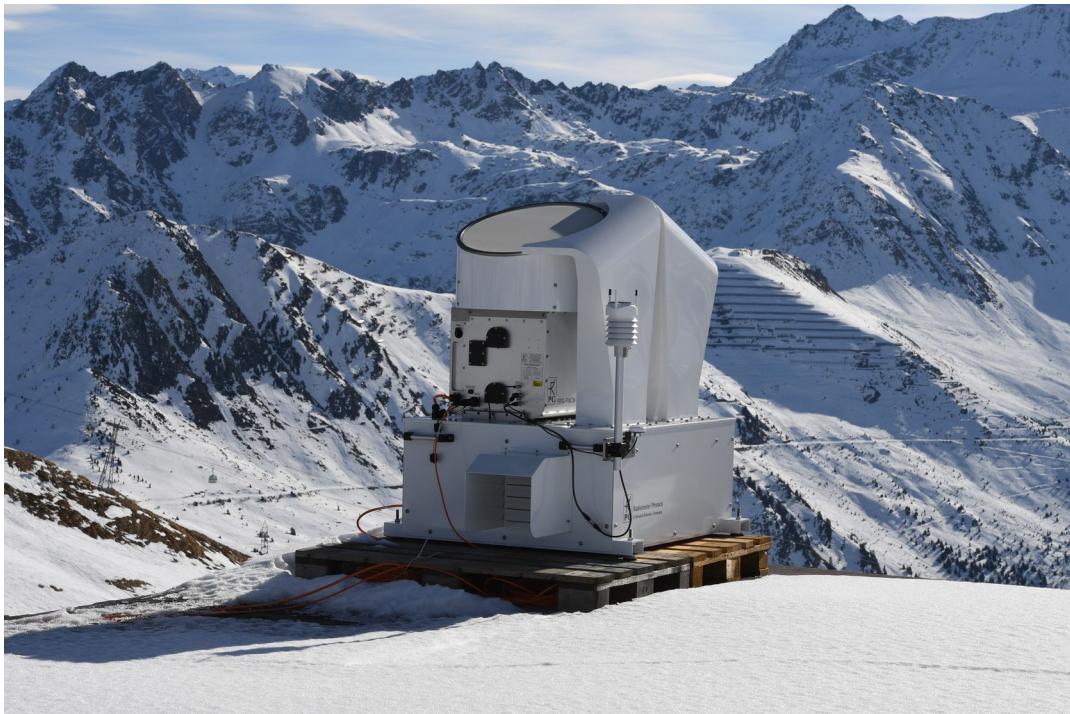
gpm.nasa.gov

NASA/Goddard Space Flight Center
Scientific Visualization Studio

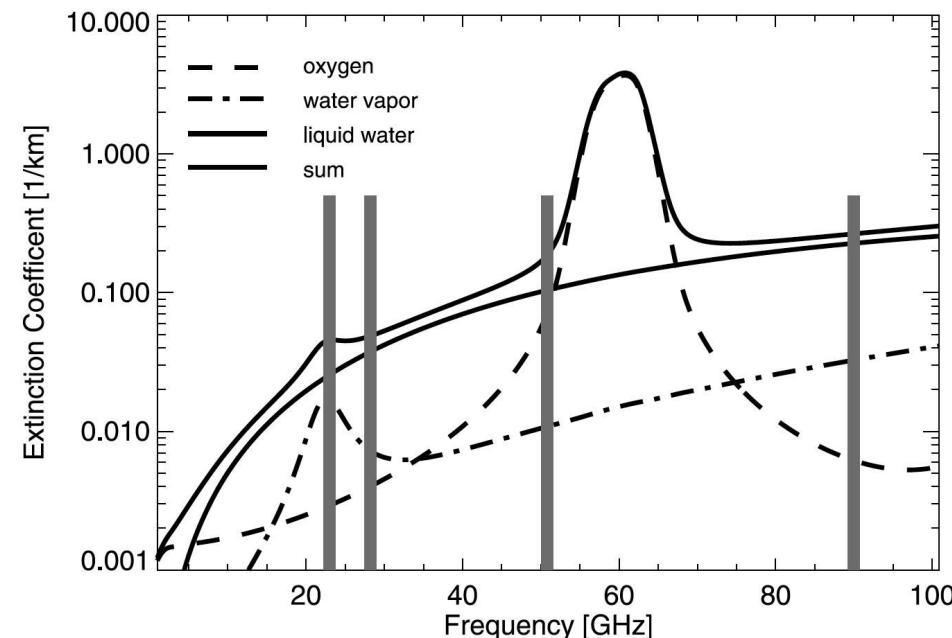
Ouragan Harold, Pacifique sud, 6 avril 2020.



Estimation de la vapeur et du contenu en eau dans l'atmosphère



Radar à 94 GHz + radiomètre à 89 GHz



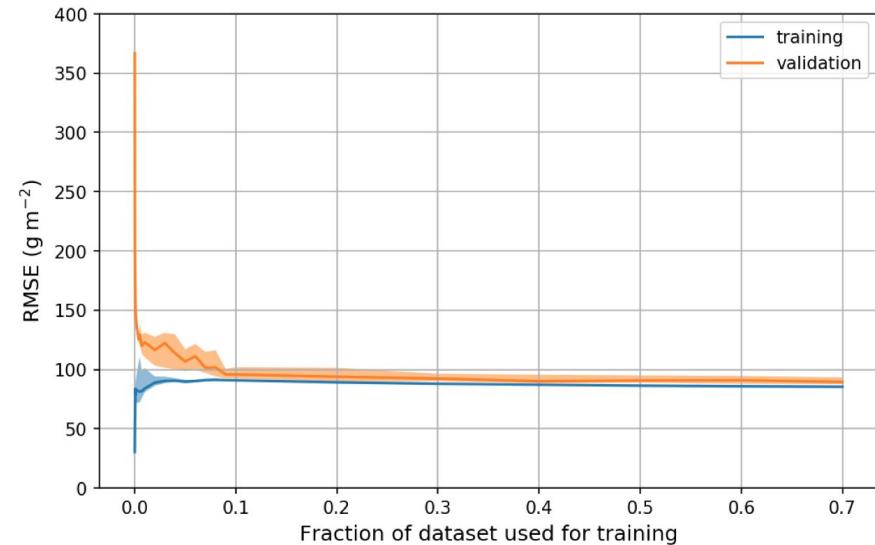
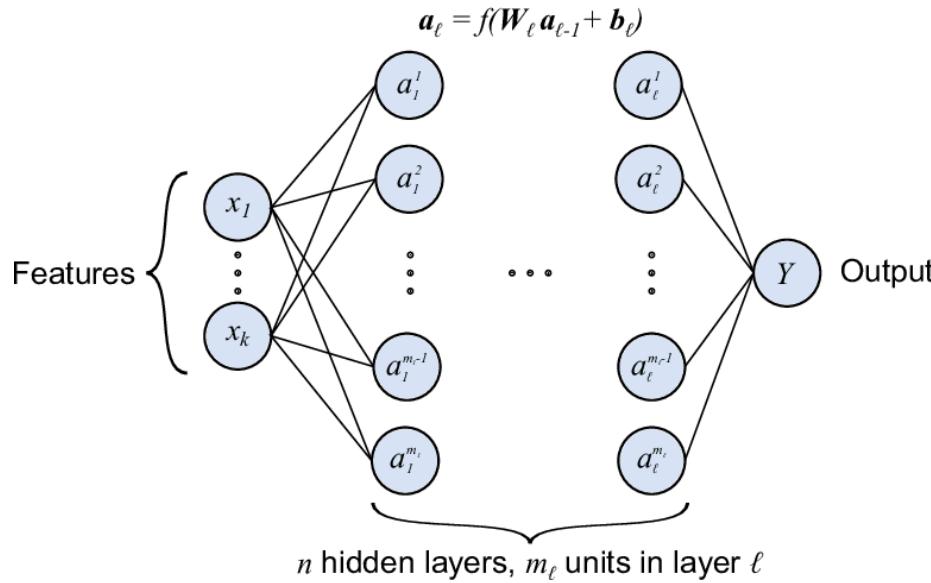
Löhnert and Crewell, 2003

Objectif : temp. brillance à 89 GHz → contenu en eau (vapeur + liquide)

Estimation de la vapeur et du contenu en eau dans l'atmosphère

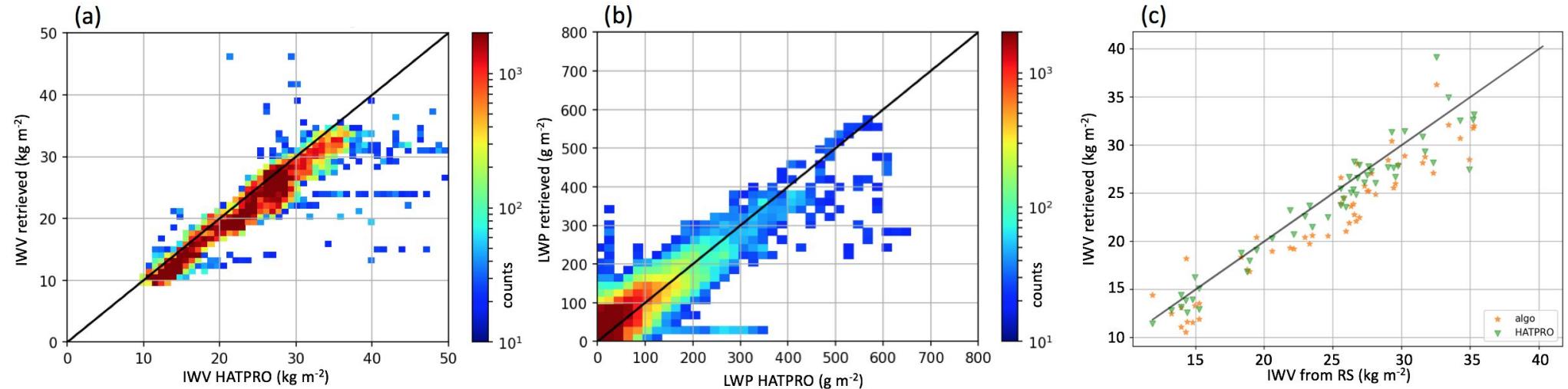
Radiosondages (base de données mondiale) : profil humidité relative
 → vapeur (IWV) + contenu en eau liquide (LWP) (modèle nuage)
 → température de brillance (modèle transfert radiatif)
 → 10^5 valeurs de IWV + LWP + temp. brillance associée

Approche : NN entraîné à estimer IWV + LWP à partir température brillance + infos météo + géographiques + saison



Estimation de la vapeur et du contenu en eau dans l'atmosphère

Vérification avec données collectées à Payerne (RS + radiomètre multi-fréq)



Erreur raisonnable, léger biais dans IWV

Méthode applicable partout

(Billault-Roux and Berne, AMT, 2021)

Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer - [AVIRIS](#)

1er imageur hyperspectral (1986)
224 bandes spectrales (~10 nm)

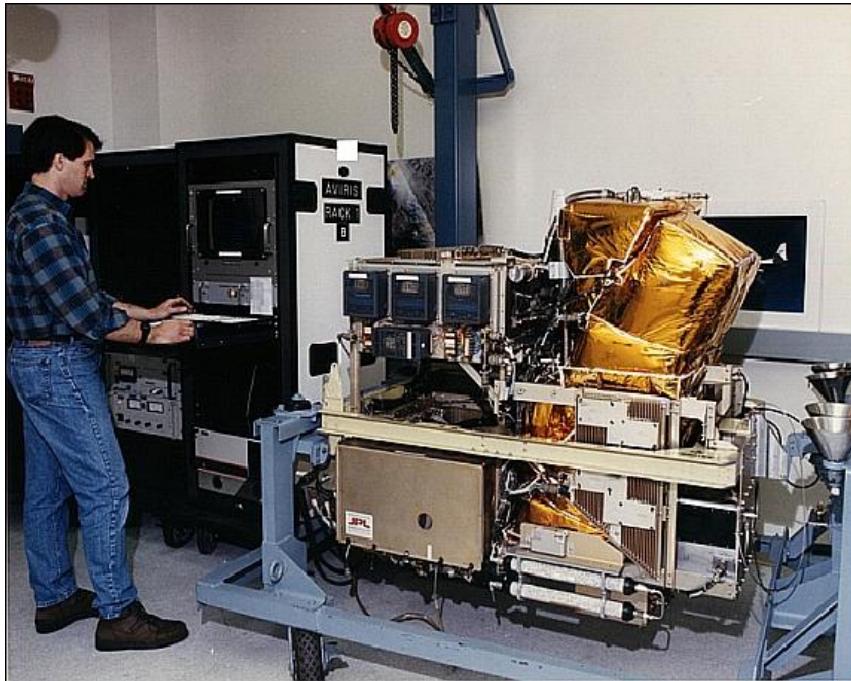
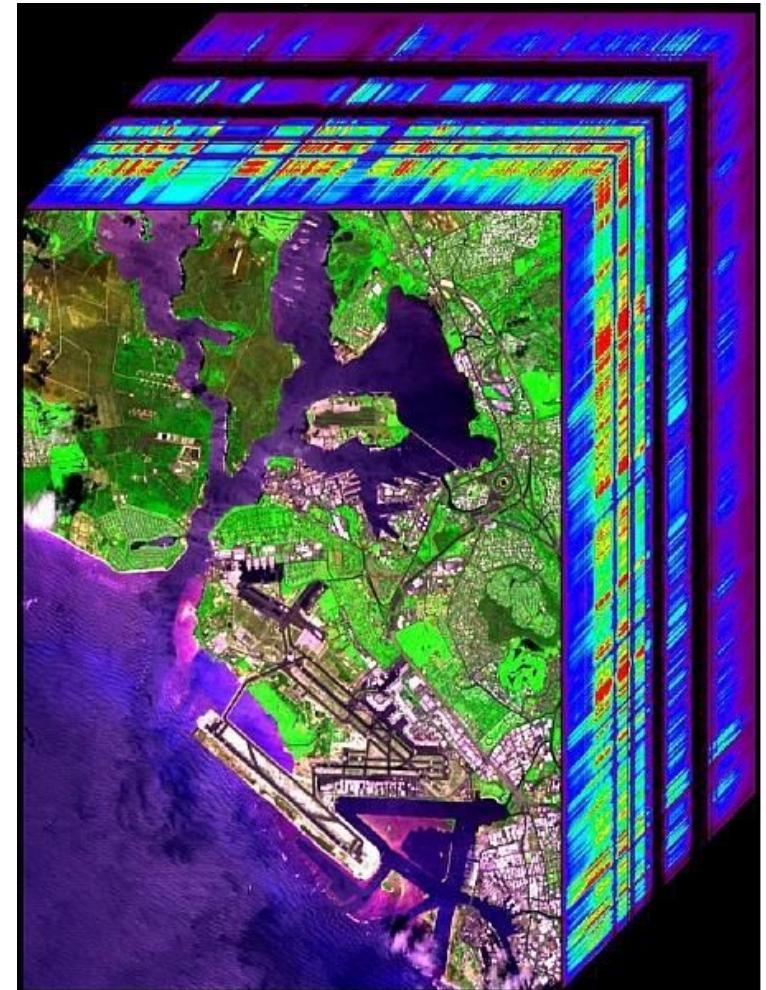


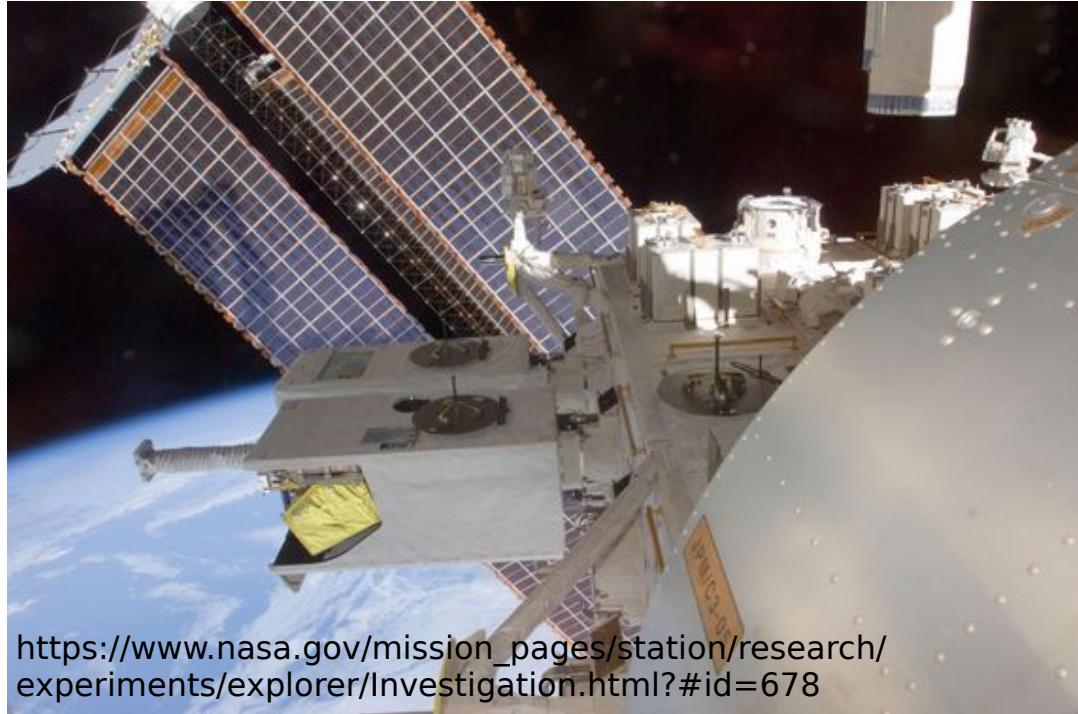
Image hyperspectrale



Hyperspectral Imagery for the Coastal Ocean - HICO

102 bandes spectrales entre 380 et 960 nm.

Expérience entre sep. 2005 et sep. 2014
(tempête solaire) à bord de l'ISS



https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/explorer/Investigation.html?id=678

Lac Erie



Chrischurch, NZ



1. Qu'est-ce qu'un radiomètre hyperspectral ?
2. Quelle sera la limite de résolution angulaire d'un radiomètre passif micro-onde en bande C (5 cm de longueur d'onde) et dont l'antenne mesure 1 m de diamètre ? Quelle sera la taille de la surface au sol visée par ce radiomètre à partir d'une plateforme située à 4 m de hauteur ?

1. Imagerie photographique (perspective historique) et numérique

Sensibilité d'un capteur (courbe en "s") et rapport signal sur bruit (grand = bonne qualité de signal)

2. Résolution : quantification du contraste, FTM, résolution au sol

3. Déformations

- Effets du relief : déplacement apparent (fonction de la hauteur de l'objet, du capteur et de la distance au centre optique).
- Distorsions (en fonction de l'angle de visée).

4. Effets radiométriques

- Perte d'exposition (loin du centre optique).
- Réflectance bidirectionnelle (directions privilégiées : réflexion spéculaire et rétro-diffusion).

5. Radiomètres

- Mesure du rayonnement réfléchi (visible + proche IR) ou émis (IR thermique + MO).
- Application MO : humidité des sols ou vapeur et eau liquide atm. Mesures hyperspectrales.