

Télédétection

A. Berne

Laboratoire de Télédétection Environnementale

GR C2 564

alexis.berne@epfl.ch

Qu'est-ce que la télédétection ?

Télédétection (remote sensing en ang.) = ensemble des méthodes qui permettent d'obtenir des informations sur un objet à partir de mesures faites à distance et sans contact.

- Ex :
- ouïe.
 - vue.
 - photographie.
 - imagerie satellitaire.
 - etc...

Utilité de la télédétection

La question de l'utilité de la télédétection en comparaison avec les méthodes traditionnelles se pose en raison de la complexité et des coûts (surtout pour satellites) de la mise en oeuvre de ces techniques.

En science/ingénierie de l'environnement, l'apport est manifeste pour :

- Compréhension de nombreux processus environnementaux
 - atmosphère : météorologie (dynamique et circulation), climat, ozone, aérosols, température...
 - continents : cartographie, occupation des sols, végétation, ...
 - océans : courants, altimétrie, faune,...
- Cartographie (topographie, mensuration), aménagement (hydrauliques, routiers), ressource en eau (cartographie et estimation des réserves).

Historique (1)

Avant 1960 : photographie

1800 Découverte rayonnement infra-rouge.

1839 Daguerre et Niépce inventent photographie.

1850-1860 Photographie à partir de ballons.

1873 Théorie de l'énergie électromagnétique par J. Maxwell.

1909 Photographie à partir d'avions.

1920-1930 Dév. de la photo aérienne et de la photogrammétrie.

1930-1940 Dév. radar en Allemagne, Angleterre et USA.

Introduction

Première photographie :
Point de vue du Gras, Nicéphore Niépce, 1826



http://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_de_la_photographie



Nadar. Vues aériennes du quartier de l'Étoile, 1868.
Épreuve sur papier albuminé.
© BnF

Bataille de la Somme 1916



Collection d'archives George-Metcalf

Chemin des Dames, Plateau de Californie, mai 1916



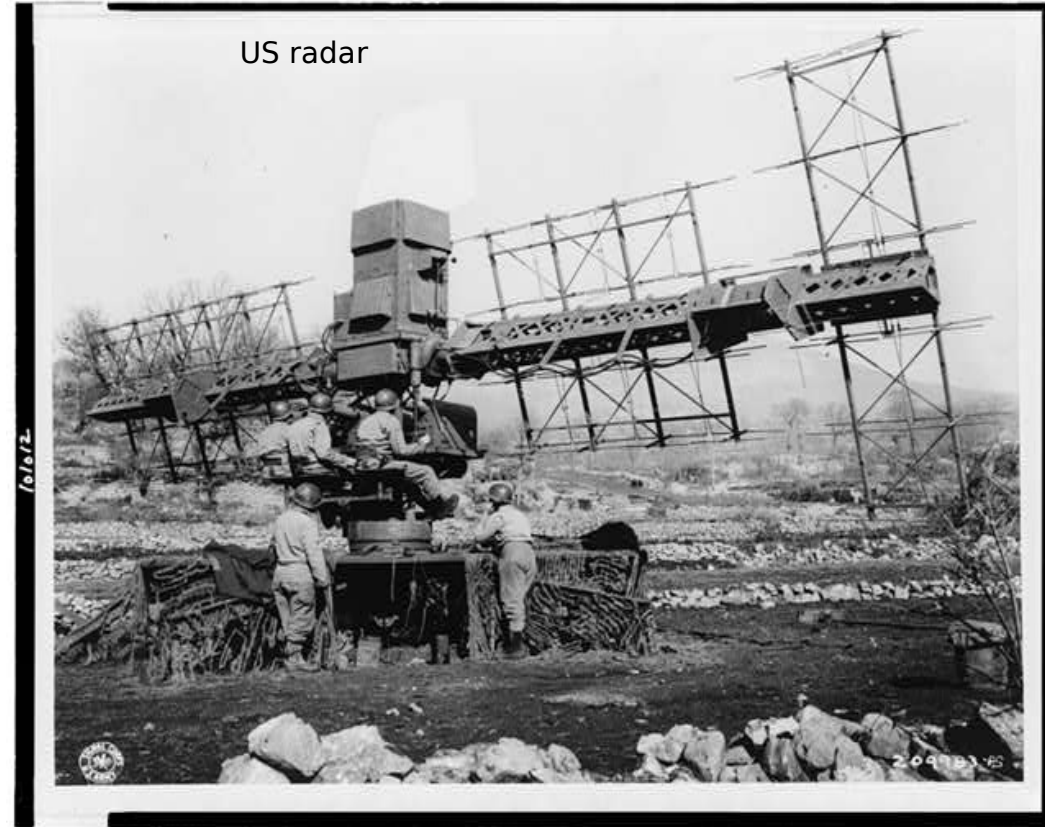
<https://www.chemindesdames.fr/fr/le-chemin-des-dames/visiter/les-lieux-de-memoire/les-principaux-sites/le-plateau-de-californie>

Introduction



Radar in UK, 1945

© Bettmann/CORBIS



US radar

Historique (2)

Après 1960 : satellites

1960 Lancement satellite TIROS pour météo.

1972 Lancement Landsat1.

1970-1980 Progrès rapide dans le traitement des images numériques.

1986 SPOT1

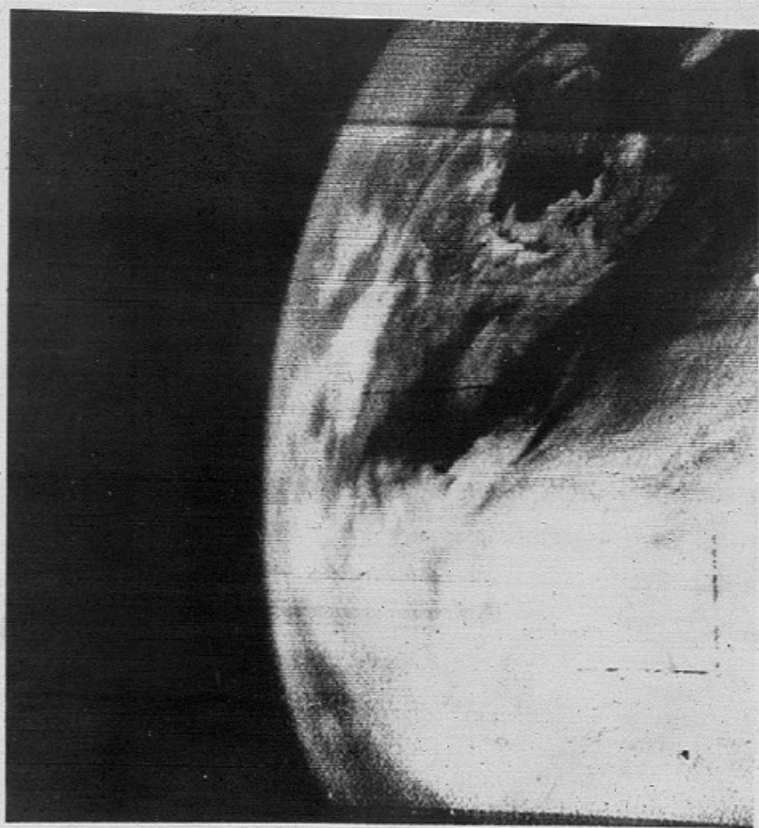
1980s Développement des capteurs hyperspectraux.

1990s Observation globale de la Terre, radar et lidar embarqués.
2000s

2010- "Petits" satellites (femto - mini), constellations

Introduction

FIRST TELEVISION PICTURE FROM SPACE
TIROS I SATELLITE
APRIL 1, 1960



<http://en.wikipedia.org/wiki/File:TIROS-1-Earth.png>

Landsat 1 - Salt-Lake-City, 1972



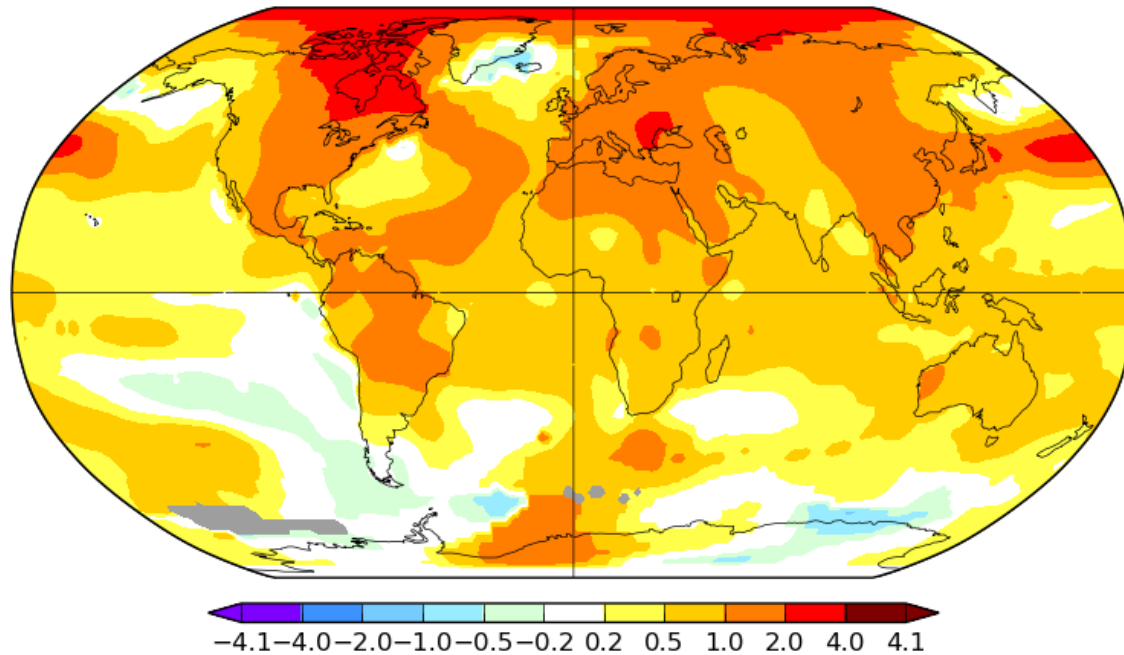
NASA/Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio

Introduction

Annual J-D 2024

L-OTI(°C) Anomaly vs 1991-2020

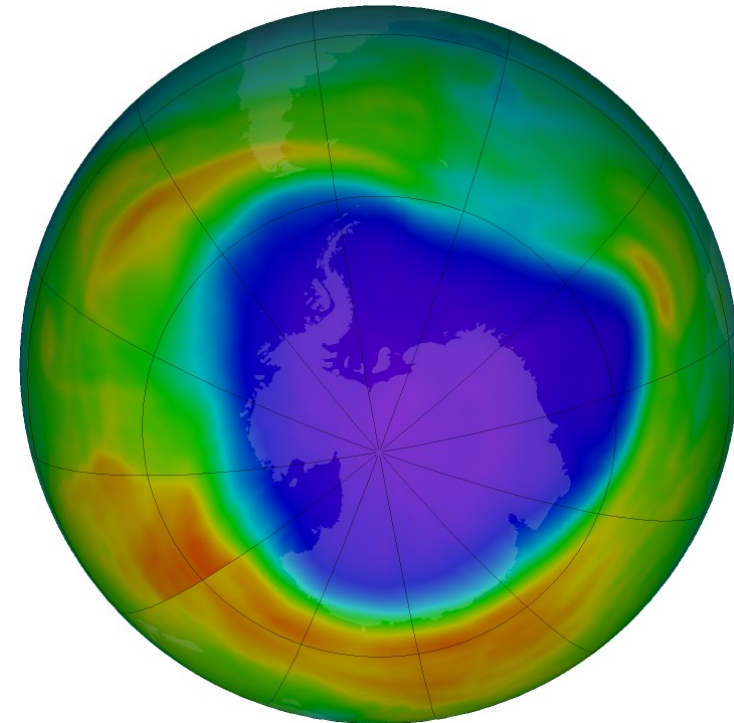
0.67



Anomalie de température 2024

<https://data.giss.nasa.gov/gistemp/maps/>

Ozone stratosphérique
vue par le satellite Suomi NPP
2024.09.28
<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov>



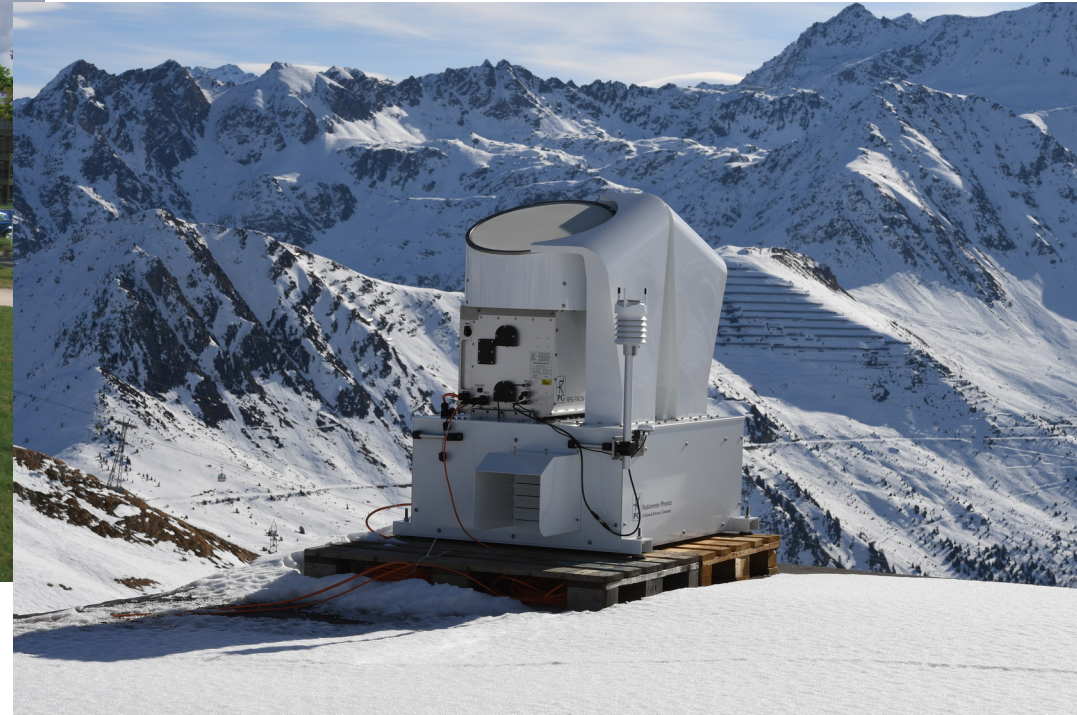
0 100 200 300 400 500 600 700
Total Ozone (Dobson units)

Téledétection au LTE



Radar météorologique (précipitation)
(bande X Doppler double-polarisation)

Profileur radar nuage
(bande W Doppler)



Télédétection au LTE (plus récemment)



Radar météorologique (précip + nuages)
(bande X Doppler double-polarisation)

Profileur radar nuage (bande Ka Doppler)



(Source : CNR Italie)

Différentes campagnes de mesure

En montagne...

Kleine Scheidegg (2014)



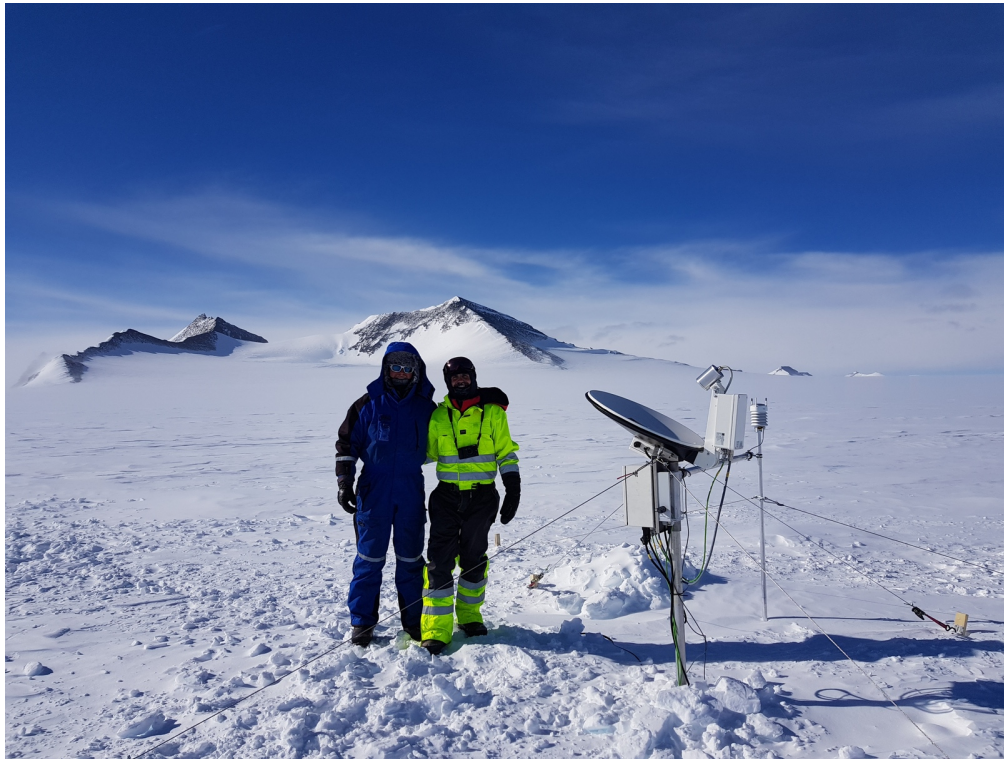
Corée (JO Hiver 2018)



Différentes campagnes de mesure

... Et en Antarctique !

Dronning Maud Land (2019-20)



Dumont d'Urville, Terre Adélie (2024-28)



Objectifs du cours

Présentation des concepts et notions de base en télédétection.

Aperçu des différents types de capteurs et de leurs applications.

Introduction au traitement et à l'analyse d'images.

Plan du cours

Chap. 1 : Rayonnement électromagnétique

Chap. 2 : Télédétection avec capteur passif.

Chap. 3 : Télédétection avec capteur actif.

Chap. 4 : Traitement et analyse d'images.

Exercices d'applications avec QGIS et Python

Introduction

Date	Cours (lundi 13:15-15:00, GR A3 30)	Exercice (jeudi 11:15-12:00, SG 0 213)
17/02/2025	Intro + Chap.1-1	
24/02/2025	Chap.1-2	
03/03/2025	Chap.1-3	Lab.1 = intro QGIS
10/03/2025	Chap.1-4	
17/03/2025	Chap.2-1	Lab.2 = Remote Sensing of the ocean (passive)
24/03/2025	Chap.2-2 + Chap.3-1	
31/03/2025	Chap.3-2	Lab.3 = Remote Sensing of snow cover (passive)
07/04/2025	Chap.3-3	
14/04/2025	Test + presentation (H. Corden)	Lab.5 = Radar and satellite analysis of an intense precipitation event (active)
21/04/2025	Vacances printemps	
28/04/2025	Chap. 4.1	
05/05/2025	Chap.4-2	Lab.6 = Fourier and Wavelet Transforms
12/05/2025	Visite Payerne	
19/05/2025	Chap.4-3	Lab.7 = PCA and Classification
26/05/2025	Q&R	Ascension

Ce programme est susceptible d'être modifié au cours du semestre...

Notation

Examen final (écrit, formulaire A4 personnel)	80%
---	-----

Test intermédiaire (écrit, sans documentation)	20%
--	-----

14/04/2025

Références

Livre

F. Bonn et G. Rochon, “Précis de télédétection, Vol. 1: Principes et méthodes”, PUQ / AUF, 1993

R. Caloz et C. Collet, “Précis de télédétection, Vol. 3: Traitements numériques d'images de télédétection”, PUQ / AUF, 2001

J. Campbell, “Introduction to Remote Sensing”, 4th ed., Guilford Press, 2007

Internet

Tutoriel : <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/satellite-imagery-and-air-photos/tutorial-fundamentals-remote-sensing/9309>

Plan du chapitre :

1. Onde : définition, description, propriétés.
2. Ondes électromagnétiques : définition, propagation et génération.
3. Interactions avec la surface et l'atmosphère.
4. Application à la télédétection.
5. Les plates-formes de télédétection.

Rayonnement électromagnétique (REM) :

Propagation d'une énergie qui peut interagir avec la matière.
Champ de force dont les variations affectent les propriétés EM de la matière.

Tous les objets émettent et/ou réfléchissent un rayonnement électromagnétique, excepté à 0 K.

Télédétection = analyse du REM émis ou réfléchi afin d'obtenir des informations sur les caractéristiques de la cible.

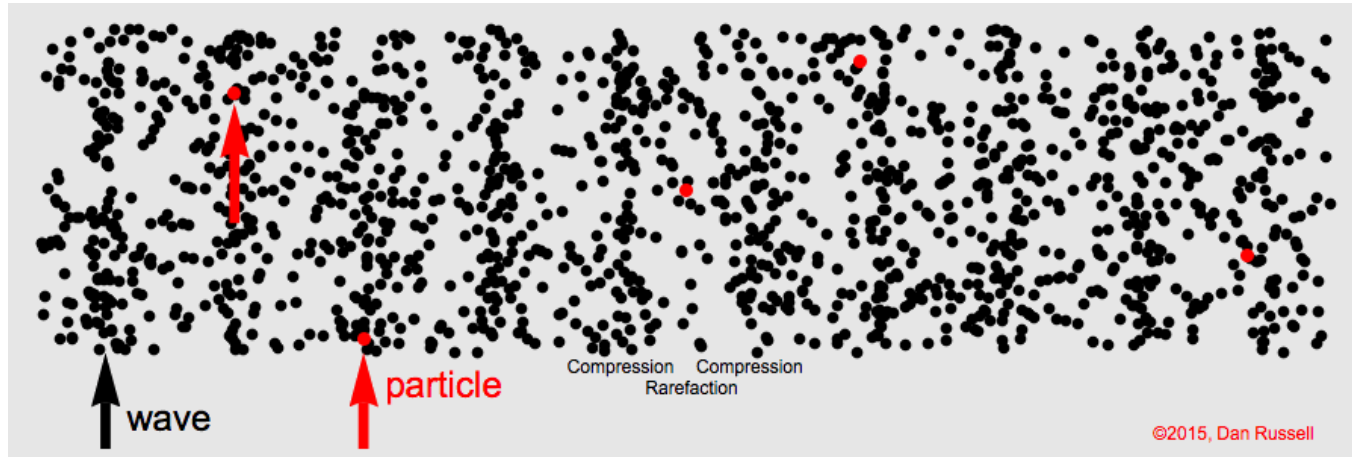
Dans le cadre de ce cours, on se centrera sur le REM sous forme d'**ondes électromagnétiques transversales** (voir plus loin) et sur l'aspect **ondulatoire** du REM (aspect corpusculaire ne sera pas abordé).

Onde = perturbation qui se propage dans l'espace.

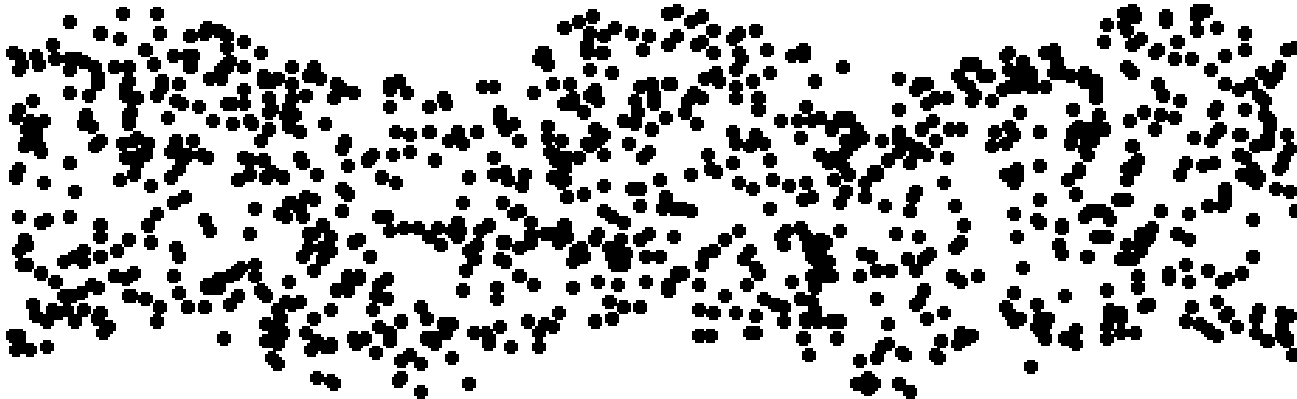
Onde est caractérisée par :

- Longueur d'onde λ : longueur d'un “motif” élémentaire [m].
- Période T : temps de passage d'un “motif” élémentaire [s].
Fréquence $f = 1/T$ (nb de motifs pendant une seconde) ($\text{Hz} = [\text{s}^{-1}]$).
- Amplitude A_0 : “hauteur” de chaque “pic”. Énergie onde $\sim A_0^2$
- Polarisation : évolution temporelle du champ de force dans plan d'onde.
- Phase : définit la situation instantannée dans le cycle de l'onde (rad).
- Direction de propagation (rad).

Onde longitudinale



Onde transversale

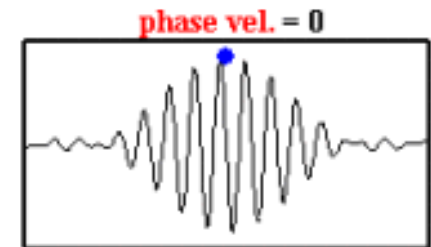
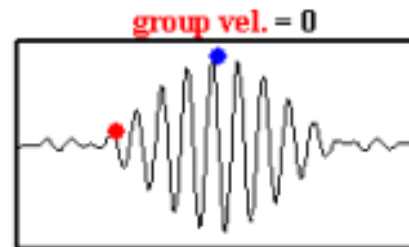
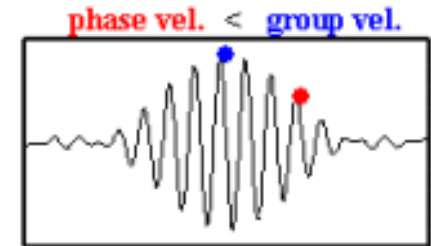
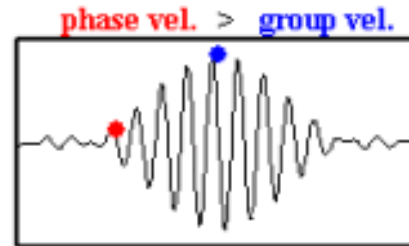
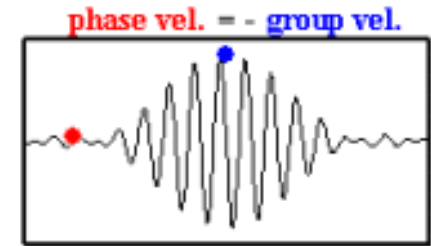
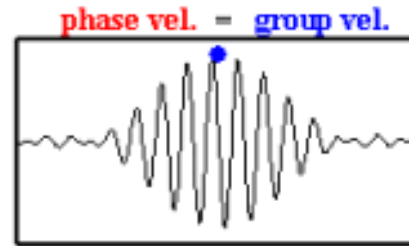


Vitesse de phase

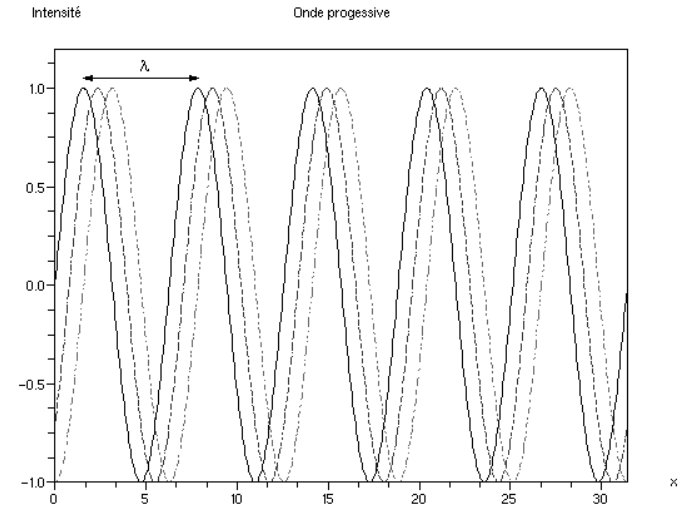
vitesse de déplacement dans l'espace
du plan de phase (point fixe sur l'onde)

Vitesse de groupe

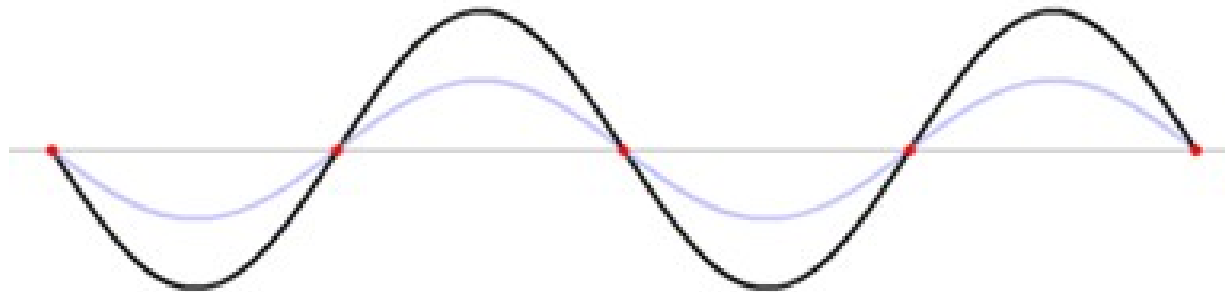
vitesse de déplacement du “paquet”
d'ondes (vitesse de l'enveloppe)



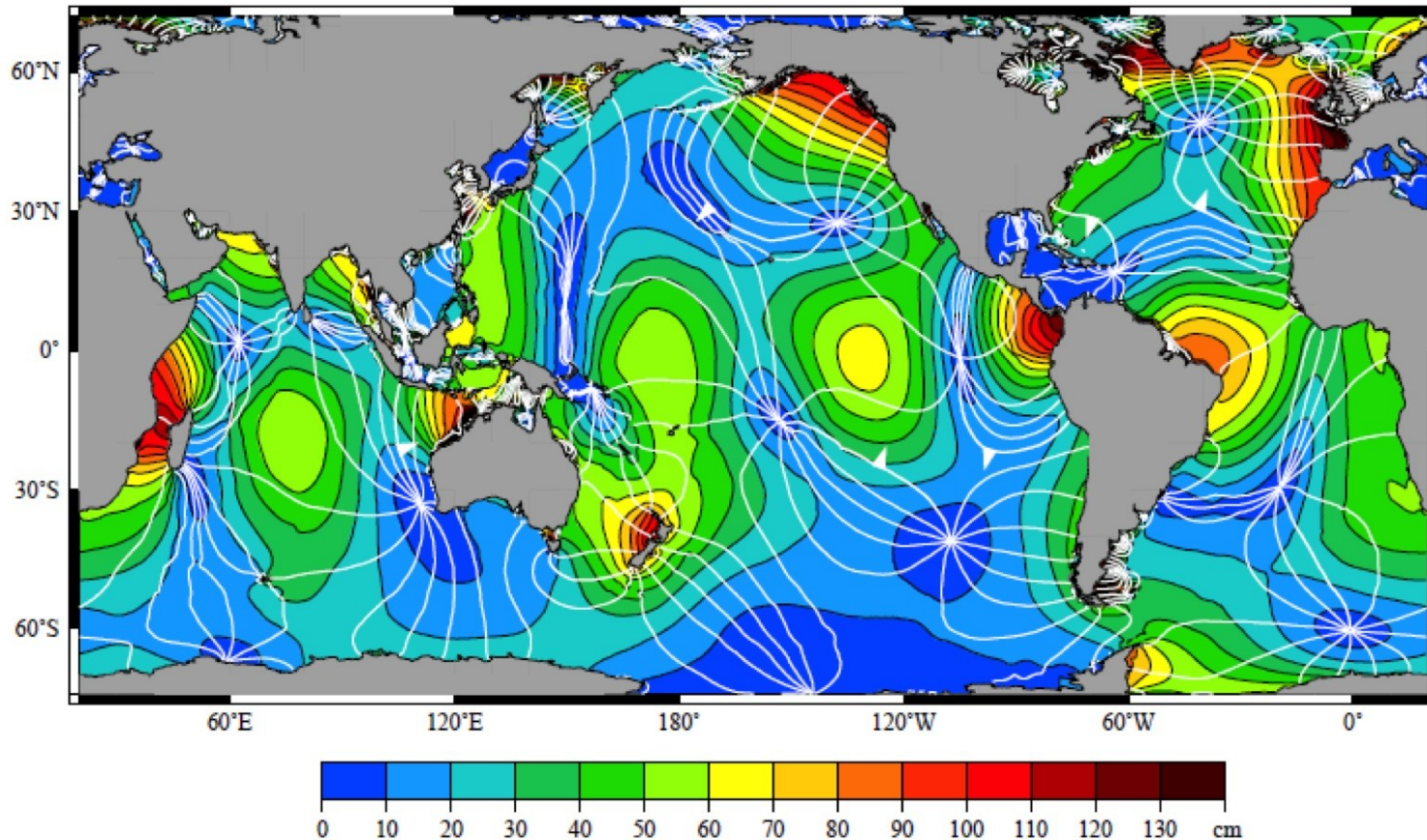
Onde progressive : la perturbation se propage dans l'espace.



Onde stationnaire : points invariants dans temps (noeuds) et vibration stationnaire. Résulte de la superposition de plusieurs ondes progressives de même fréquence.

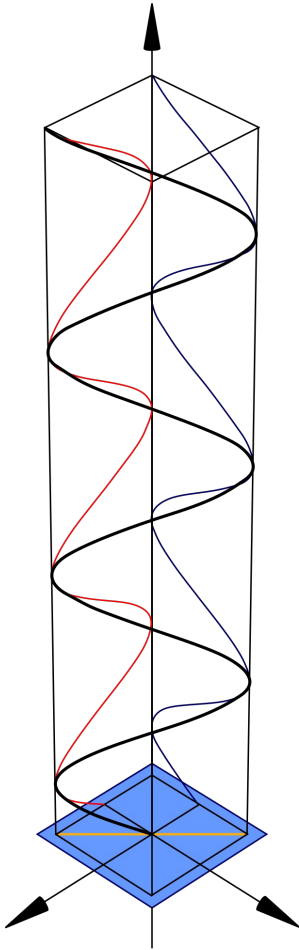


Ondes de marée : points stationnaires (marnage = 0) = points amphidromiques

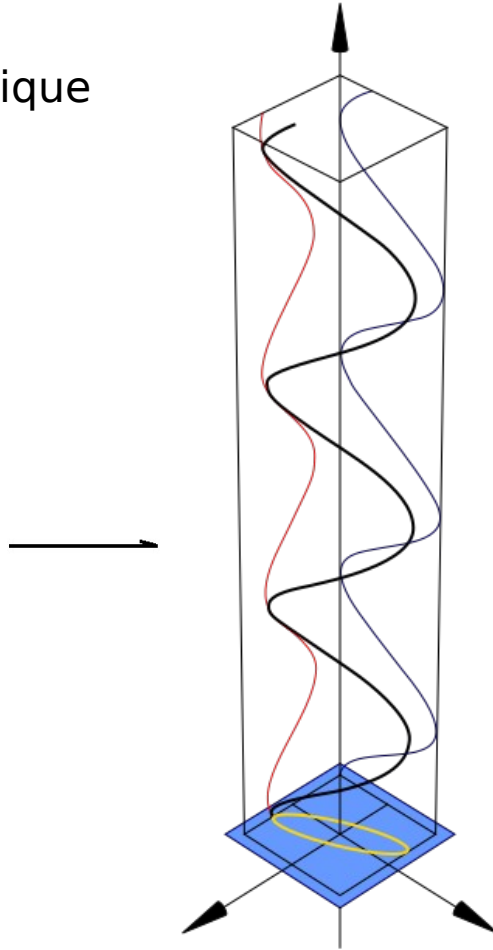


Polarisation : décrit l'orientation des oscillations associées à l'onde (transversale).

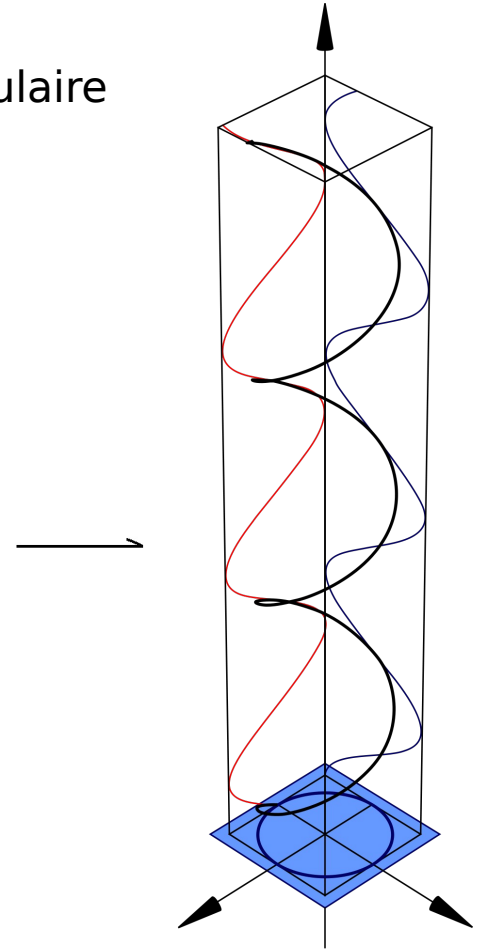
Linéaire



Elliptique



Circulaire



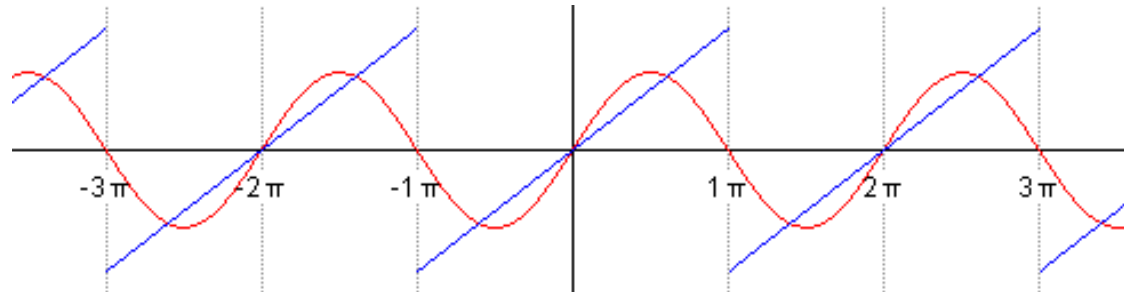
Téledétection s'appuie principalement (mais pas exclusivement) sur le rayonnement électromagnétique.

Onde électromagnétique (OEM) = représentation d'un REM.

OEM = superposition de plusieurs OEM monochromatiques.

Théorème de Fourier :

Toute fonction périodique continue de fréquence f peut être définie comme une somme infinie de fonctions sinusoïdales de fréquences multiples de f (harmoniques)



Décomposition en 5 harmoniques d'un signal en dents-de-scie

Émission : tout corps dont $T > 0$ K émet un rayonnement EM. Le corps émetteur est appelé source et les ondes émises se propagent en ligne droite tant que l'indice de réfraction du milieu reste constant.

Absorption : tout corps dont la surface reçoit un REM peut en absorber une partie. Cette énergie absorbée modifie l'énergie interne du corps.

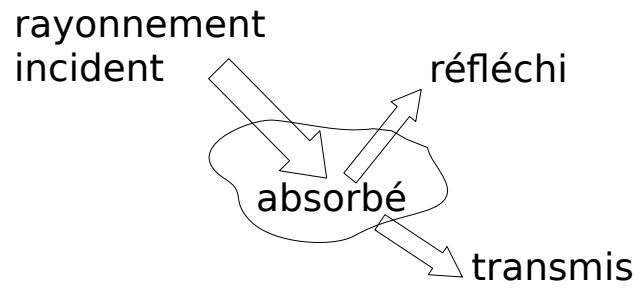
Coefficient d'absorption = rapport énergie absorbée / énergie incidente.

Réflexion : tout corps qui reçoit un REM peut en réfléchir une partie.

Réflectance = rapport énergie réfléchi / énergie incidente. Dans le cas du rayonnement solaire et de surfaces terrestres, réflectance = **albédo**.

Transmission : tout corps qui reçoit un REM peut en transmettre une partie.

Transmittance = rapport énergie transmise / énergie incidente.



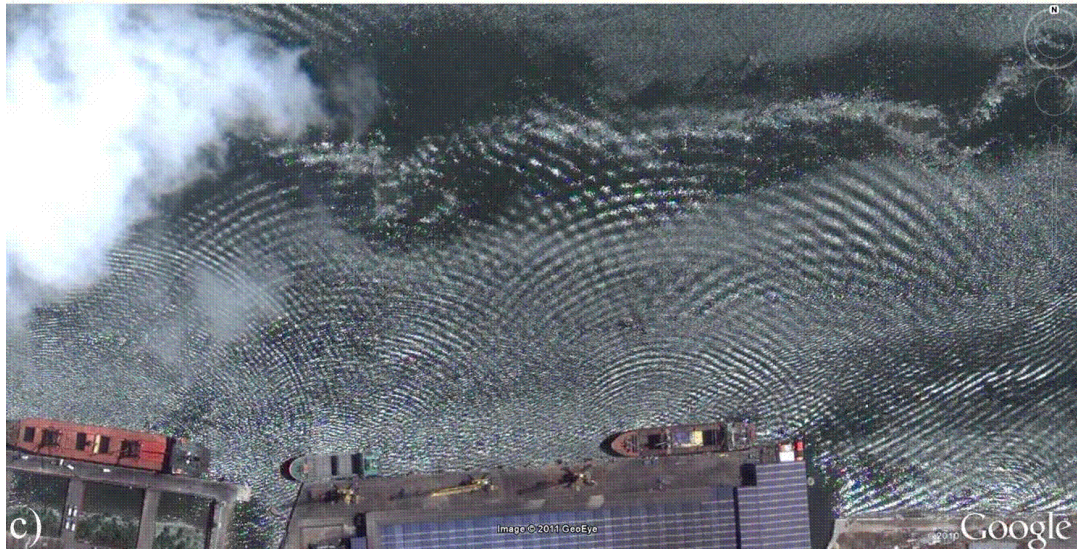
$$r. \text{ incident} = r. \text{ réfléchi} + r. \text{ transmis} + r. \text{ absorbé}$$

$$\text{réflectance} + \text{transmittance} + \text{coef. absorption} = 1$$

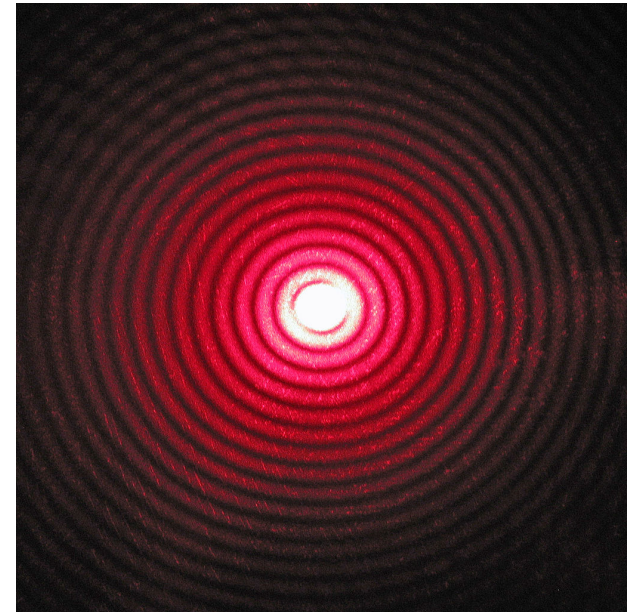
Interférences : résultent de la conjonction de plusieurs sources de REM. Les sources doivent être cohérentes (relation entre les phases des \neq OEM).

Diffraction : effet de bordure (\rightarrow interférences) qui entraîne la variabilité de l'amplitude (alternance de bandes claires et sombres).

Interférences de vagues liées à des bateaux



Diffraction d'un laser à travers un trou circulaire

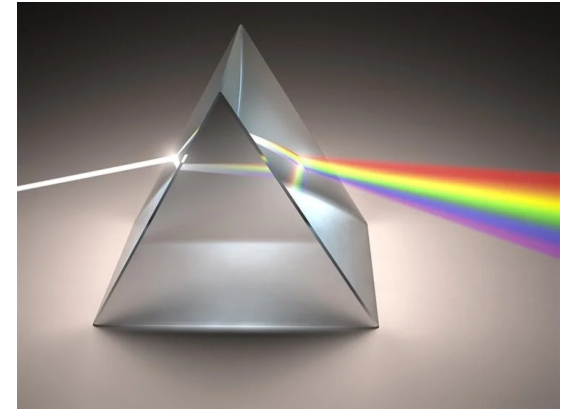


<http://www.physicscentral.com/buzz/blog/index.cfm?postid=2754732179498882742>

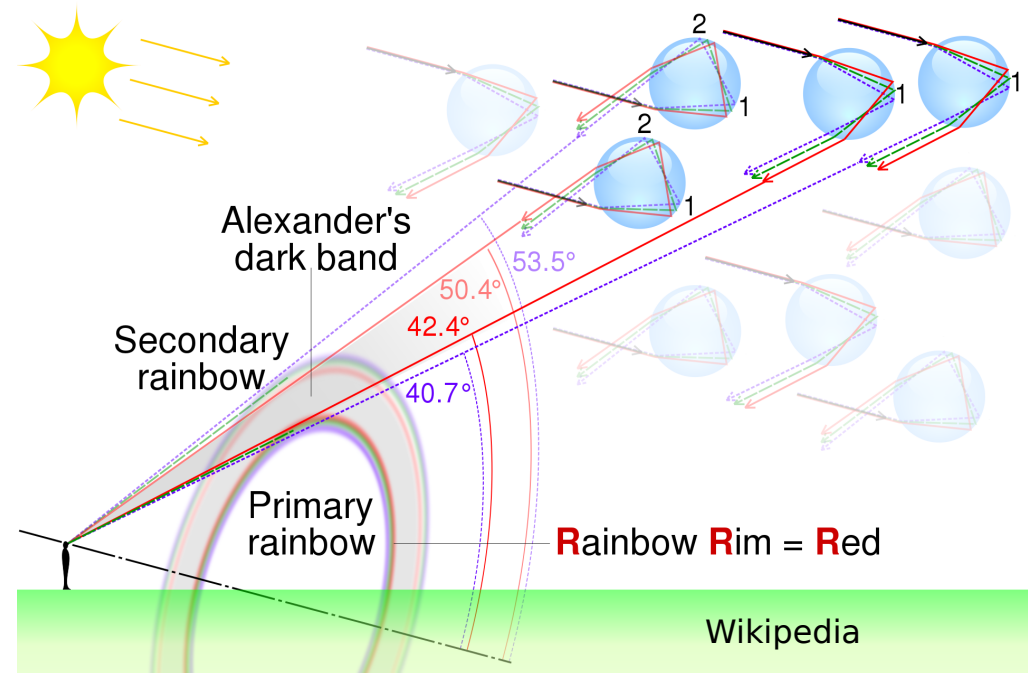
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15113998>

Diffraction \neq réfraction !

Réfraction = dispersion liée au changement de direction de l'onde dû au changement de vitesse à l'interface de 2 milieux différents.

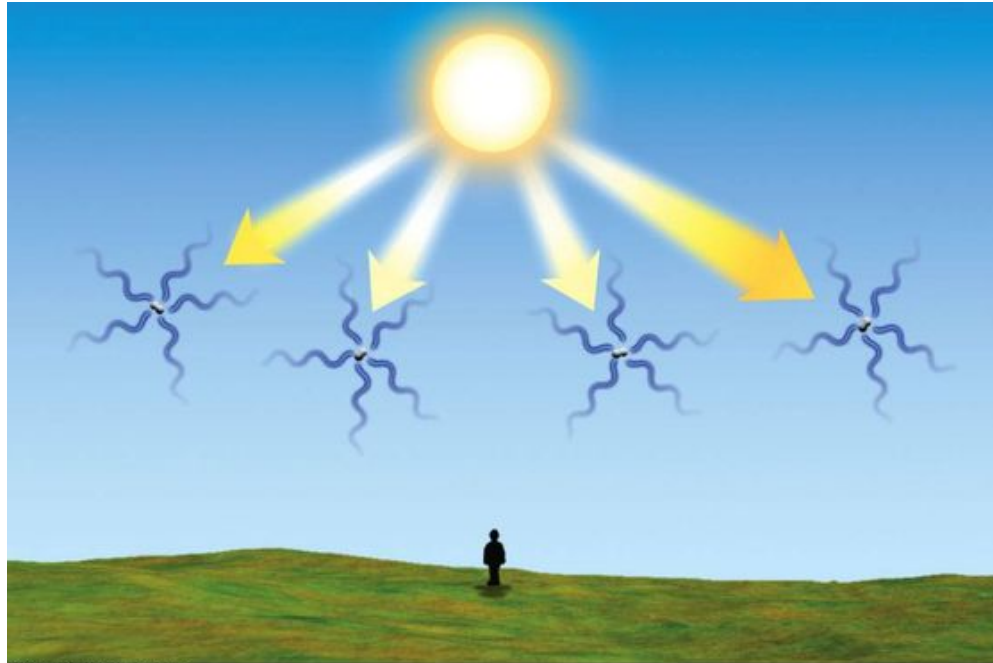


Arc-en-ciel = réfraction de la lumière blanche du soleil par les gouttelettes de pluie.



Diffusion : Réflexion dans toutes les directions. Dépend de la longueur d'onde : pour un même objet, plus la longueur d'onde est petite, plus la diffusion sera importante.

Le ciel est bleu à cause de la diffusion du rayonnement solaire par les molécules et particules de l'atmosphère...



© 2007 Thomson Higher Education

1. Quel est le lien entre la télédétection et le rayonnement électromagnétique ?
2. Donnez des exemples d'ondes transversales et longitudinales.
3. Donnez des exemples de diffraction et de réfraction.

OEM monochromatique = modèle du dipôle vibrant

Composée d'un **champ électrique E** et d'un **champ magnétique B**

E et B sont reliés par les **équations de Maxwell** (ici pour le vide):

Maxwell-Gauss $\text{div} \vec{E} = 0$

Flux électrique à travers
surface fermée = 0
(pas de source)

Maxwell-Thomson $\text{div} \vec{B} = 0$

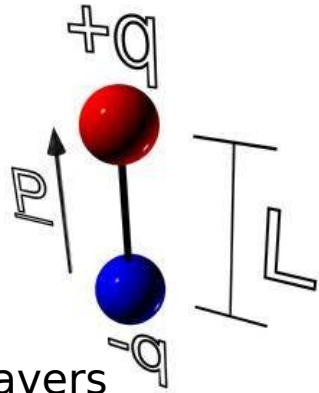
Flux magnétique à travers
surface fermée = 0
(monopôle n'existe pas)

Maxwell-Faraday $\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

La somme de E le long d'une
boucle fermée = - variation
temporelle de B

Maxwell-Ampère $\text{rot} \vec{B} = \mu_0 \eta_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

μ_0 perméabilité du vide [H.m^{-1}]
 η_0 permittivité du vide [F.m^{-1}] (souvent noté ϵ_0)



Équation OEM monochromatique plane

$$\vec{F} = (F_x, F_y, F_z)$$

$$\operatorname{div} \vec{F} = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} \quad \operatorname{rot} \vec{F} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \\ \frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} \\ \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \end{pmatrix}$$

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \vec{X}) = \operatorname{grad}(\operatorname{div} \vec{X}) - \Delta \vec{X}$$

En combinant les équations de Maxwell, on obtient l'équation de propagation d'une OEM monochromatique plane (1D) :

Équation de d'Alembert

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{\mu_0 \eta_0} \Delta \vec{E} = c^2 \Delta \vec{E} \quad \Delta \vec{F} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 F_x}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 F_y}{\partial y^2} \\ \frac{\partial^2 F_z}{\partial z^2} \end{bmatrix}$$

Similaire pour B.

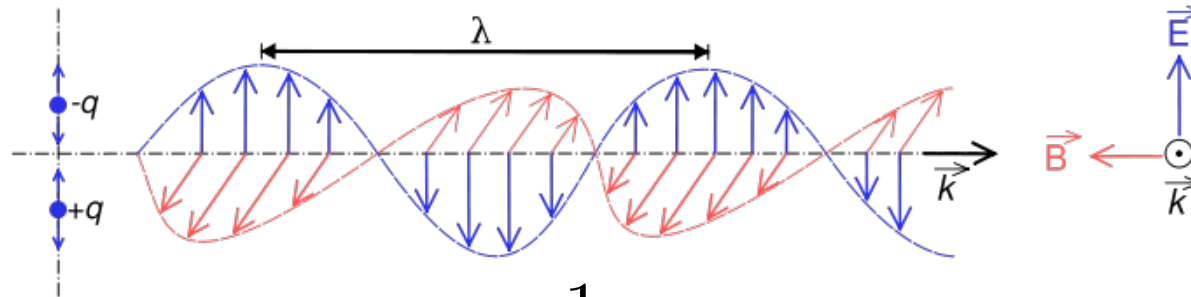
Solution = une fonction sinusoïdale : $\vec{E} = E_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{x} + \phi_0)$

Amplitude E_0 [V.m⁻¹]

Pulsation $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ [s⁻¹]

Vecteur d'onde $\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \vec{e}_x$ [m⁻¹]

Phase à l'origine ϕ_0 [] (rad or °)



$$\text{Vitesse de phase} = \frac{\omega}{||\vec{k}||} = c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \eta_0}}$$

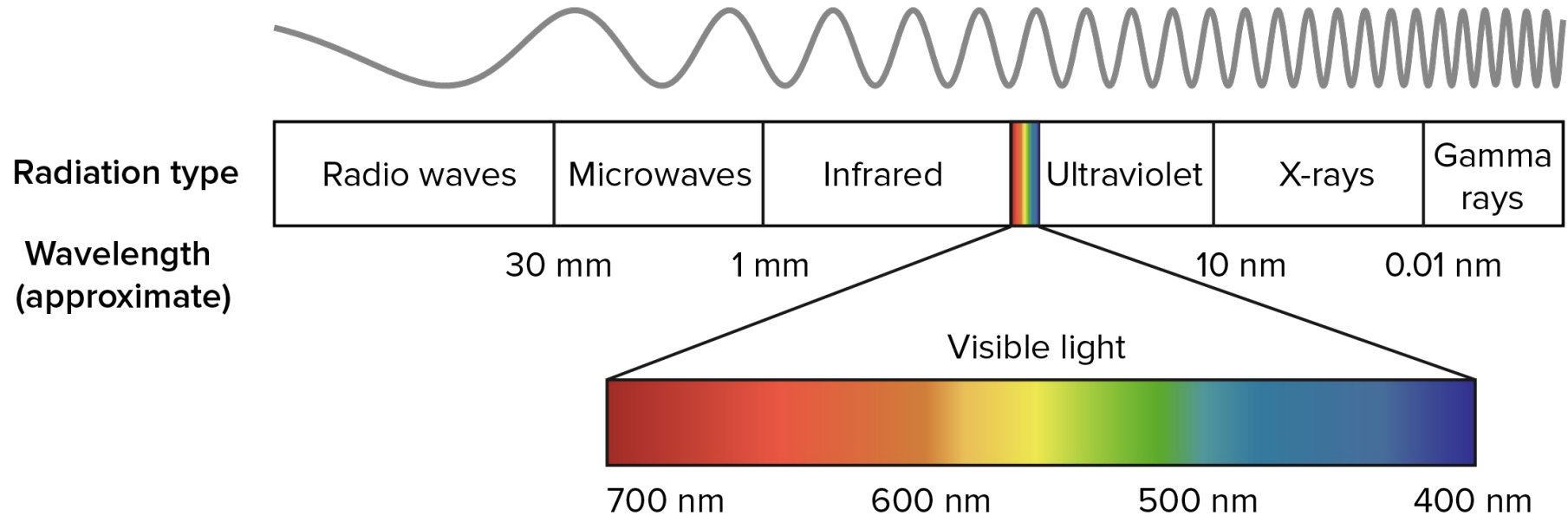
$$\text{Vitesse de groupe} = \frac{d\omega}{d||\vec{k}||}$$

Caractérisation d'une OEM (voir p.20)

- Longueur d'onde.
- Fréquence ou période.
- Amplitude (ou intensité).
- Polarisation.
- Phase
- Direction de propagation.

Spectre EM

Electromagnetic spectrum



<https://www.khanacademy.org/science/biology/photosynthesis-in-plants/the-light-dependent-reactions-of-photosynthesis/a/light-and-photosynthetic-pigments>

Visible ~ [0.4 - 0.75 μm]

L'énergie des photons augmente avec la fréquence : $E = hf$
 (h = cst de Plank $\sim 6.62 \cdot 10^{-34}$ J.s)

Spectre EM

- Ultraviolet ~ [0.01 - 0.4 μm]
- Visible ~ [0.4 - 0.75 μm]
- Infrarouge
(ISO 20473) ~ proche [0.78 - 3 μm] Near-IR [0.75 - 1.4 μm]
 moyen [3 - 50 μm] Short-wavelength IR [1.4 - 3 μm]
 lointain [50 - 1000 μm] Mid-wavelength IR [3 - 8 μm]
 Long-wavelength IR [8 - 15 μm]
 Far IR [15 - 1000 μm]
- Micro-onde ~ [1 mm - 1 m]

Radiométrie = mesure des grandeurs physiques liées au rayonnement EM.

Quantités énergétiques :

Éclairement (irradiance) E :

puissance totale φ_i reçue par hémisphère
par unité de surface.

$[E] = \text{W.m}^{-2}$

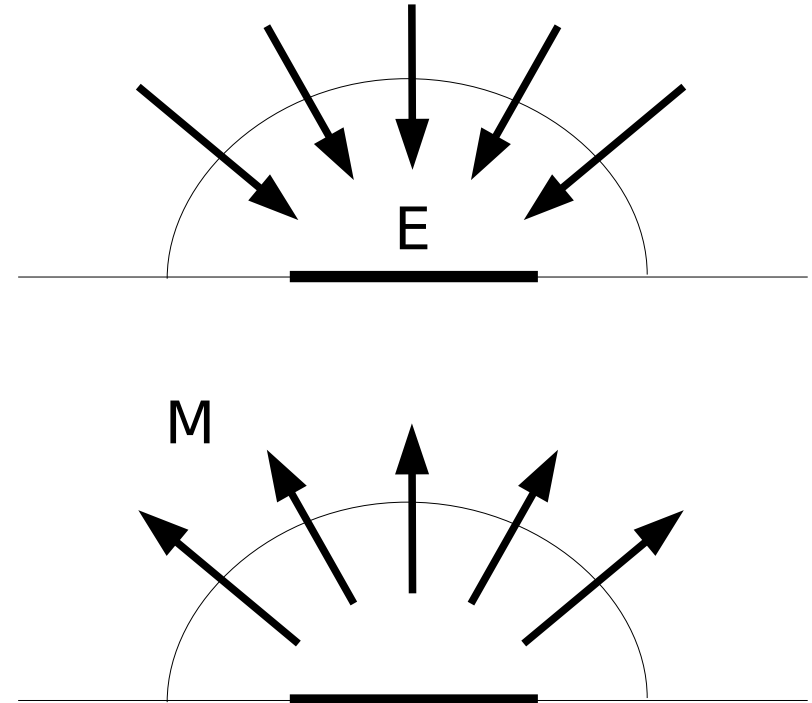
$$E = \frac{d\varphi_i}{dA}$$

Émittance (exitance) M :

puissance totale φ_e émise par hémisphère
par unité de surface de la source.

$[M] = \text{W.m}^{-2}$

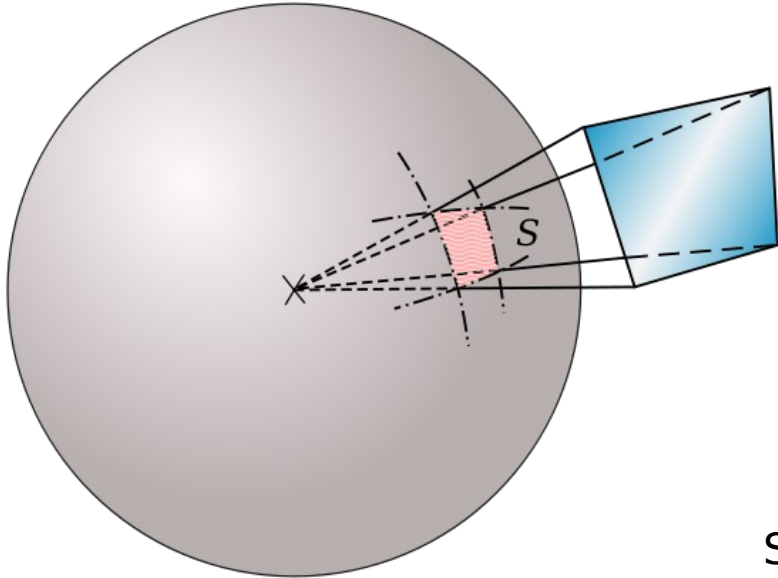
$$M = \frac{d\varphi_e}{dA}$$



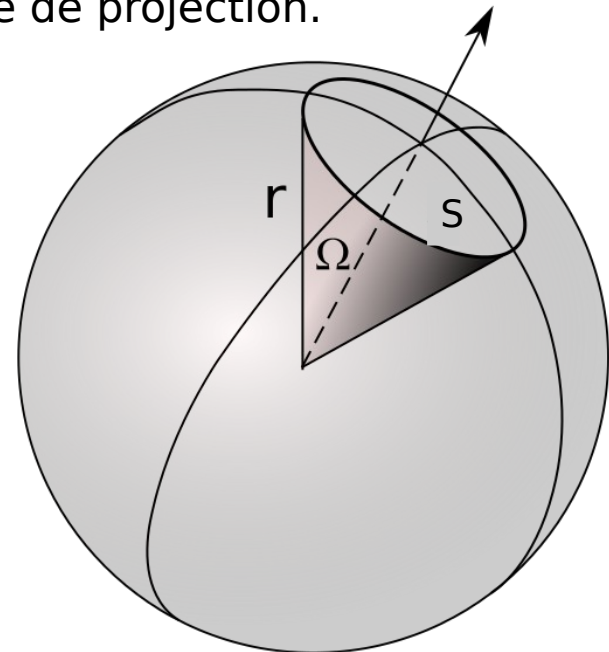
Angle solide :

Rapport entre l'aire de la projection d'un objet à la surface d'une sphère et le carré de son rayon. Unité = stéradian (sr).

$$\Omega = \frac{S}{r^2}$$



L'angle solide Ω correspond à un cône de révolution d'angle Ω inscrit dans la sphère de projection.



Intensité rayonnante (radiant intensity) I :

Mesure du rayonnement émanant d'une source ponctuelle
Flux rayonnant par unité d'angle solide quittant la source
dans une direction donnée θ .

$[I] = \text{W.sr}^{-1}$

$$I = \frac{d\varphi_e}{d\Omega}$$

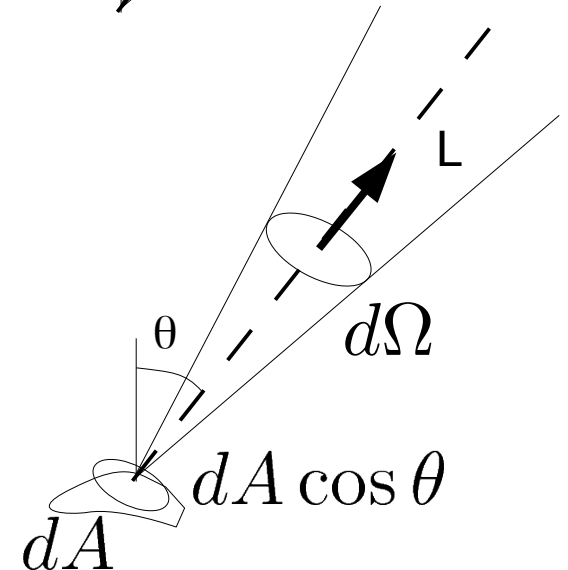
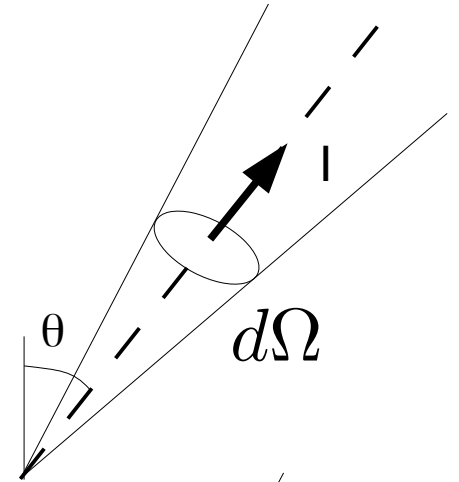
Luminance (radiance) L :

Intensité émise par unité de surface apparente selon la
direction θ pour une source non-ponctuelle de superficie
 dA rayonnant à travers un angle solide $d\Omega$

$[L] = \text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$

$$L = \frac{d^2\varphi_e}{d\Omega dA \cos \theta} = \frac{dI}{dA \cos \theta}$$

Corps lambertiens : luminance est cst dans toutes les
directions (ex : feuille papier blanc mat).



Quantités spectrales :

Pour les OEM composées de plusieurs longueurs d'onde (données multibandes), la puissance transportée est égale à la somme des puissances transportées par chacune des longueurs d'onde. Variations de ces quantités spectrales = signature spectrale.

Analogie avec quantités énergétiques

- Émittance spectrale M_λ $M_\lambda = \frac{dM}{d\lambda}$
- Éclairement spectral E_λ $E_\lambda = \frac{dE}{d\lambda}$
- Intensité spectrale I_λ $I_\lambda = \frac{dI}{d\lambda}$
- Luminance spectrale L_λ $L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda}$

Émission d'OEM

Corps noir

Un corps noir ne réfléchit ni ne transmet aucun rayonnement : il absorbe la totalité des rayonnements qu'il reçoit.

On peut le schématiser comme une cavité réfléchissante munie d'un orifice infiniment petit. Tout le rayonnement reçu par l'orifice est absorbé à l'intérieur du corps et sert à augmenter son énergie interne (\sim température).

Il émet donc un rayonnement qui ne dépend que de sa température.

Rayonnement émis par un corps noir :

Puissance totale du rayonnement émis par un corps noir est décrite par la [loi de Stefan-Boltzmann](#) :

$$M = \pi L = \sigma T^4$$

M émittance [W.m^{-2}]

L luminance [$\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$]

σ constante de Stefan-Boltzmann : $5.67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$

T température en K

Corps noir est lambertien (i.e., sa luminance est indépendante de la direction)

Exemples de corps noirs : soleil ; eau (pour infrarouge).

Capteurs mesurent en général la luminance plutôt que l'émittance.

Distribution spectrale du rayonnement émis par un corps noir :

Rayonnement émis par un corps noir n'est pas uniforme en fréquence. Il varie selon la **loi de Planck** :

$$M_{\lambda} = \pi L_{\lambda} = \frac{\pi 2hc^2 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1}$$

M_{λ} émittance [W.m^{-3}]
 L_{λ} luminance [$\text{W.m}^{-3}.\text{sr}^{-1}$]

λ longueur d'onde en m

h constante de Planck $6.62 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

c vitesse de la lumière $3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

k constante de Boltzmann $1.38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$

T température du corps en K

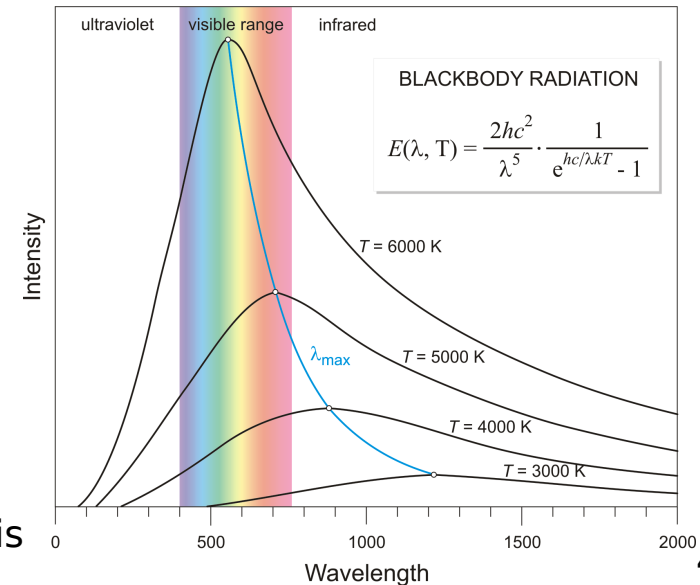
Integ. de la loi de Planck / $\lambda \rightarrow \sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3}$

Longueur d'onde du max du rayonnement décrit par la **loi de Wien** :

$$\lambda_{max} = \frac{2.8978 \times 10^{-3}}{T}$$

$T=300 \text{ K} \rightarrow \lambda_{max} = 9.7 \text{ } \mu\text{m} \text{ (IR)}$
 $T=6000 \text{ K} \rightarrow \lambda_{max} = 0.5 \text{ } \mu\text{m} \text{ (vis)}$

<https://glossary.periodni.com/glossary.php?en=blackbody+radiation>



Approximation de Rayleigh-Jeans :

Pour grandes longueurs d'onde ($\lambda > 1 \text{ mm}$), la loi de Planck est approchée :

$$M_\lambda = \pi L_\lambda = \frac{2\pi c}{\lambda^4} kT$$

Luminance (émittance) \sim proportionnelle à la température du corps noir.

Rayonnement d'un corps naturel :

Corps naturel peut réfléchir et transmettre une partie du rayonnement incident. Il suit approximativement lois des corps noirs (d'où corps gris).

Pour un corps gris, la loi de Stefan-Boltzmann s'écrit : $M = \pi L = \epsilon \sigma T^4$

l'approximation de R-J s'écrit : $M_\lambda = \pi L_\lambda = \epsilon \frac{2\pi c}{\lambda^4} kT$

ϵ = émissivité = $M(\text{corps}) / M(\text{corps noir})$

$0 < \epsilon < 1$

Température de brillance T_b (brightness temperature) :

Température qu'aurait un corps noir pour émettre la même luminance que l'objet considéré.

$$L_\lambda = \frac{2hc^2 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T_B}\right) - 1} \quad \Rightarrow \quad T_B = \frac{hc}{\lambda k} \left[\ln \left(1 + \frac{2hc^2}{L_\lambda \lambda^5} \right) \right]^{-1}$$

Loi de Stefan-Boltzmann : $M = \epsilon \sigma T_0^4 = \sigma T_B^4 \quad \Rightarrow \quad T_B = \epsilon^{1/4} T_0$

Température de brillance T_B avec Rayleigh-Jeans :

Dans le cadre de l'approximation Rayleigh-Jeans, la température de brillance apparente d'un corps est proportionnelle à l'énergie émise et donc à l'émissivité :

$$L_\lambda = \frac{2kcT_B}{\lambda^4} \quad \Rightarrow \quad T_B = \frac{L_\lambda \lambda^4}{2kc}$$

$$T_B = \epsilon T_0$$

ϵ émissivité
 T_0 température du corps

Notion utile en télédétection passive, notamment pour radiométrie.

Note : pour un corps réel, l'émissivité est fonction de T et λ

1. Qu'est-ce qu'un corps noir ?
2. Pourquoi peut-on dire d'un objet qu'il est “chauffé à blanc” ?
3. Qu'est-ce que l'émissivité ?
4. Qu'est-ce que la température de brillance ?

Télédétection environnementale vise principalement à collecter des informations (qualitatives ou quantitatives) sur l'état de la surface terrestre (surfaces continentales ou océaniques) et de l'atmosphère.

Ces milieux sont composés de matière (atomes, molécules), elle-même composée de charges électriques. Le champ EM qui règne au sein de la matière résulte de la superposition de tous les champs engendrés par les charges individuellement.

Pour comprendre et interpréter correctement l'information portée par le REM émis ou réfléchi par la surface et/ou l'atmosphère, il est donc nécessaire de s'intéresser à l'interaction entre REM et matière.

2 principales catégories d'interactions :

1. Interactions élastiques

Le REM ne subit aucune perte d'énergie (par ex. le milieu est totalement transparent ou réfléchissant).

2. Interactions inélastiques

Le REM est en partie convertie en énergie calorifique (temp. augmente) ou chimique (ex : photosynthèse) ou électrique (ex : cellule photovoltaïque).

Pour caractériser propriétés EM d'un milieu :

- permittivité η → champ électrique E (capacité de polarisation)
- perméabilité μ → champ magnétique B (capacité de magnétisation)

Vide : $\eta = \eta_0 = 8.89 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$; $\mu = \mu_0 = 12.6 \times 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$

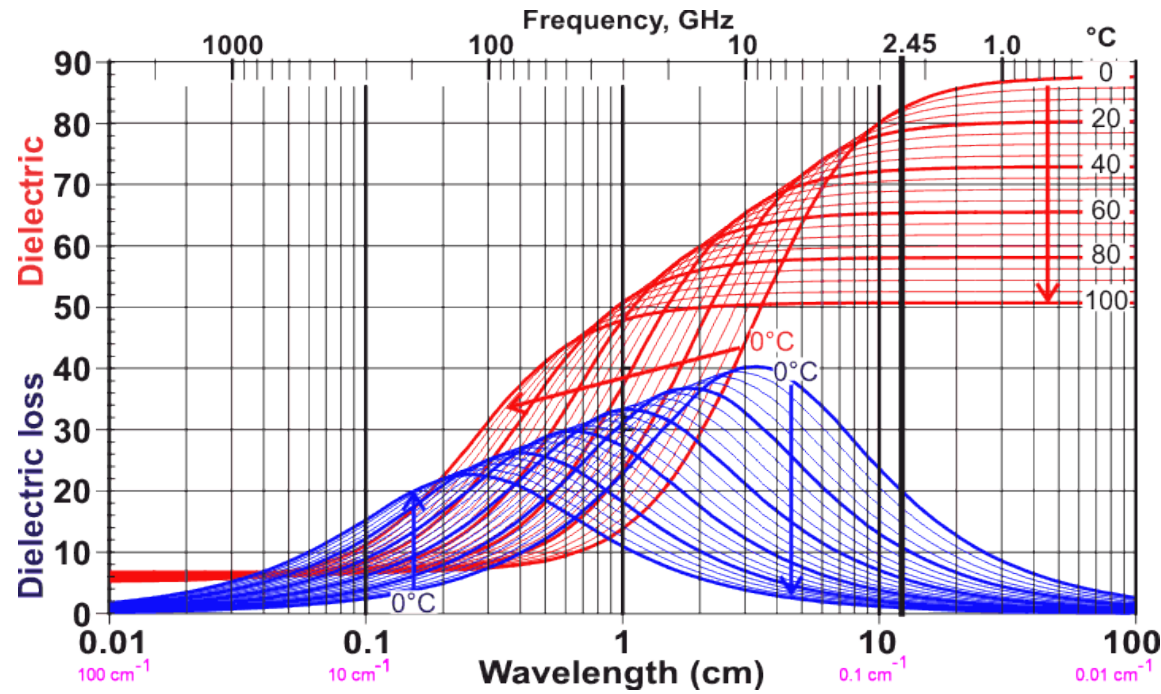
Milieu \neq vide

Permittivité relative $\eta_r = \eta_{\text{matière}}/\eta_0$

Perméabilité relative $\mu_r = \mu_{\text{matière}}/\mu_0$
pour cibles télédétection, $\mu_r \sim 1$.

Permittivité complexe $\eta = \eta' + i\eta''$
 η' caractérise interaction élastique
 η'' caractérise interaction inélastique
(η'' grand = forte absorption)

Ex : η_r eau



Flèches indiquent temp. ↗

<https://www.mdpi.com/1424-8220/16/11/1843/htm>

Principales interactions du REM avec la matière

Diffusion

REM peut être absorbé par atomes et molécules. Électrons changent de niveau d'énergie, puis reviennent à leur niveau initial en émettant l'énergie reçue sous forme photons dans une direction aléatoire. Il n'y a donc pas absorption puisqu'il n'y a pas perte d'énergie.

Absorption

Transformation REM en énergie calorifique, chimique ou électrique. Intensité du rayonnement diminue au fur et à mesure qu'il pénètre plus avant dans le milieu.

Diffusion

3 types de diffusion :

1. Diffusion non-sélective

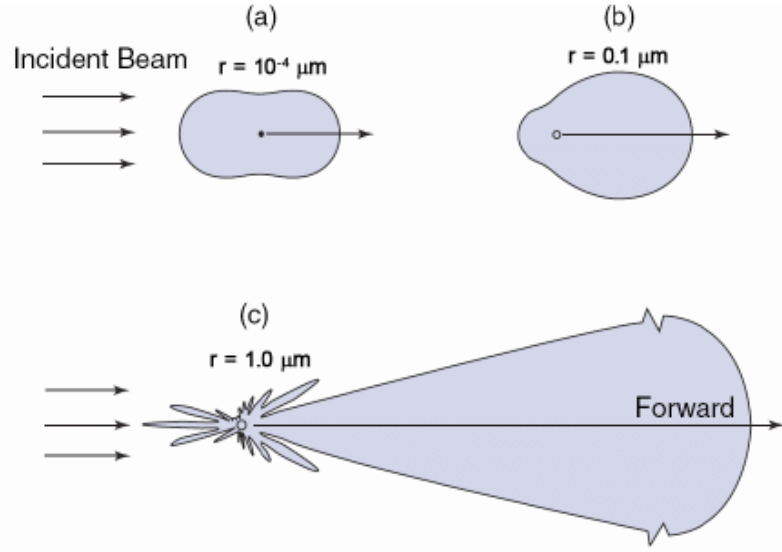
Taille des particules (taille radiométrique = $\pi D/\lambda$) \gg longueur d'onde.
Diffusion similaire pour toutes fréquences.

2. Diffusion de Mie

Taille des particules \sim longueur d'onde.
Éq. Mie = solution analytique des éq. Maxwell pour particules sphériques.
Formulation math complexe...

3. Diffusion de Rayleigh

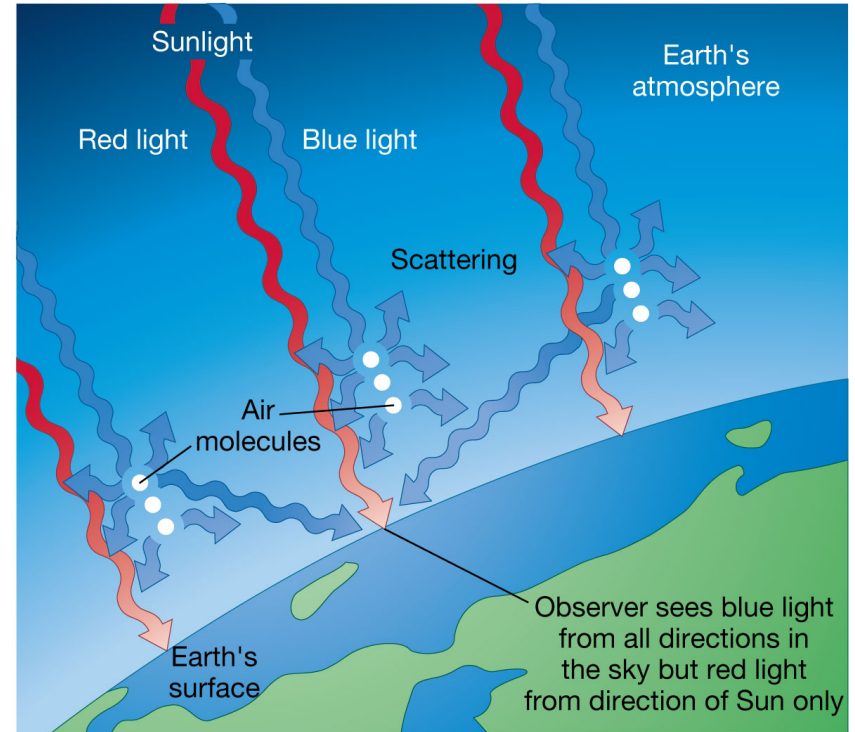
Taille des particules \ll longueur d'onde.
Approximation de la solution de Mie.
Puissance diffusée est proportionnelle à f^4 ou $\lambda^{-4} \rightarrow$ forte diffusion pour UV.



Diffusion d'un rayonnement à 500 nm par des particules sphériques de différentes tailles.

(Petty, 2006: A 1st course in atmospheric radiation)

La couleur bleu du ciel est due à la diffusion de Rayleigh du rayonnement solaire par les molécules de gaz atm.



© 2011 Pearson Education, Inc.

<http://pages.uoregon.edu/jimbrou/ast121/Notes/Chapter7.html#atmo>

Absorption

L'absorption est décrite par loi de **Beer-Lambert-Bouguer** :

$$I = I_0 e^{-aCd}$$

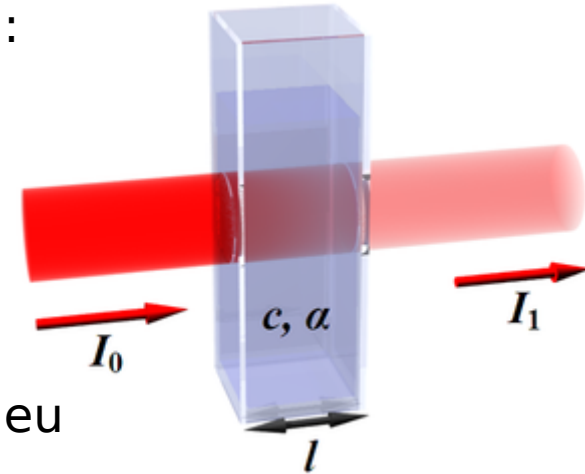
I_0 intensité du rayonnement incident

I intensité du rayonnement

a **coefficient d'absorption**

C concentration en substances absorbantes dans le milieu

d distance parcourue au sein du milieu



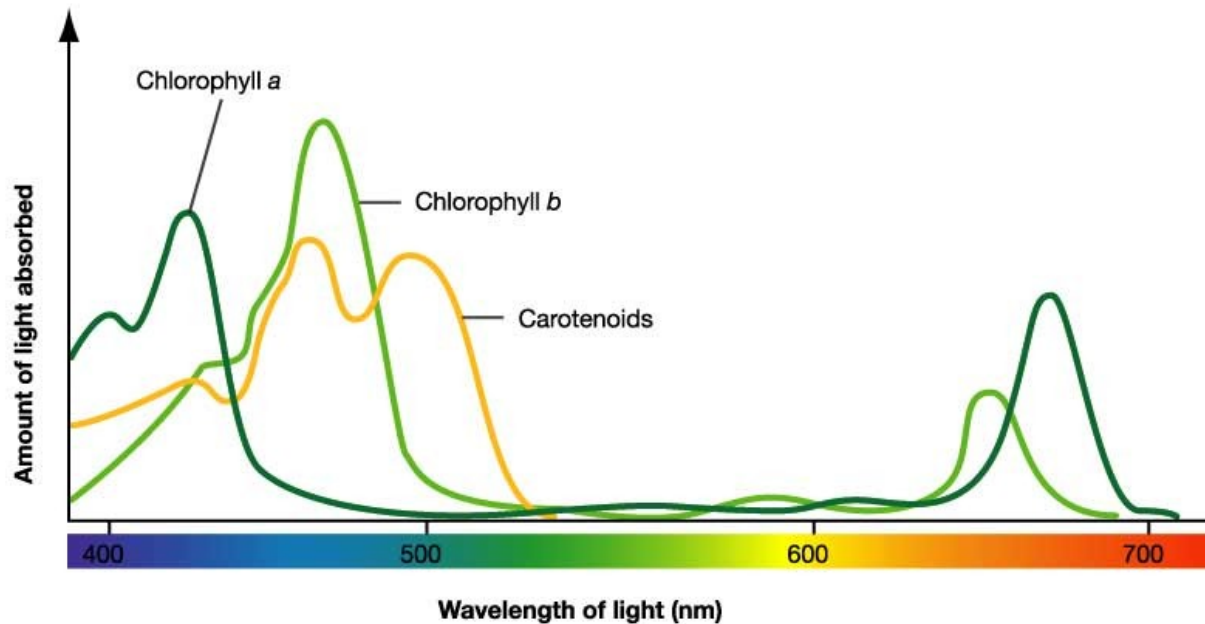
<https://www.aps.org/publications/apsnews/201108/physicshistory.cfm>

Transmittance

$$T = \frac{I}{I_0} = e^{-aCd}$$

N.B : il existe différentes versions de cette loi, suivant le type de milieu considéré

Exemple : absorption par composés impliqués dans la photosynthèse



<http://apbiomarkip7.blogspot.com/2015/11/investigation-5-photosynthesis.html>

Atténuation

Lors de la propagation d'un REM, atténuation = diminution du REM transmis. Donc l'atténuation résulte de la combinaison de la diffusion et de l'absorption affectant le REM.

L'atténuation peut aussi être décrite par la loi de Beer-Lambert-Bouguer :

$$I = I_0 e^{-\alpha d}$$

I intensité du rayonnement

I_0 intensité du rayonnement incident

α coefficient d'atténuation

d distance parcourue dans le milieu

Facteur d'atténuation

$$A = e^{-\alpha d}$$

On peut définir différentes grandeurs reliées à l'absorption/atténuation

Épaisseur optique

$$\tau = \int_{s_1}^{s_2} \alpha ds$$

Quantifie la transparence d'un milieu

$\tau \gg 1 \rightarrow$ milieu opaque

$\tau \sim 0 \rightarrow$ milieu transparent

τ sans dimension mais en log

Profondeur de pénétration électromagnétique

$$d = \frac{1}{\alpha}$$

Distance à laquelle l'amplitude du REM

est réduite à $1/e$ x l'amplitude incidente ($\sim 0.37 A_0$).

Donc l'énergie est réduite à $(1/e)^2$ x l'énergie incidente ($\sim 0.137 E_0$).

1. Qu'est-ce que la permittivité d'un milieu ? La perméabilité ?
2. Quels sont les trois principaux régimes de diffusion d'une OEM par la matière ?
3. Qu'est-ce que l'atténuation ?

Interaction d'un REM à l'interface de 2 milieux

Indice de réfraction

Vitesse de propagation de l'onde
dans le milieu considéré

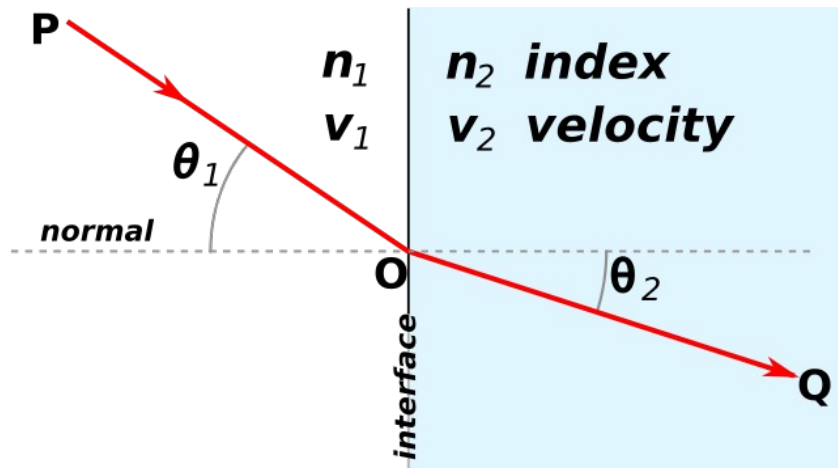
$$n = \sqrt{\eta_r \mu_r} \simeq \sqrt{\eta_r}$$

$$v = c/\Re(n)$$

Réfraction = changement de direction du rayon incident à l'interface de 2 milieux avec diff. indices de réfraction, décrit par la loi de **Snell-Descartes**

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

<https://etc.usf.edu/clippix/picture/refraction-of-pencil-in-cup-of-water.html>



$$n_i = \Re(n_i)$$



Réflexion peut avoir un effet sur la polarisation, en fonction de l'angle d'incidence.

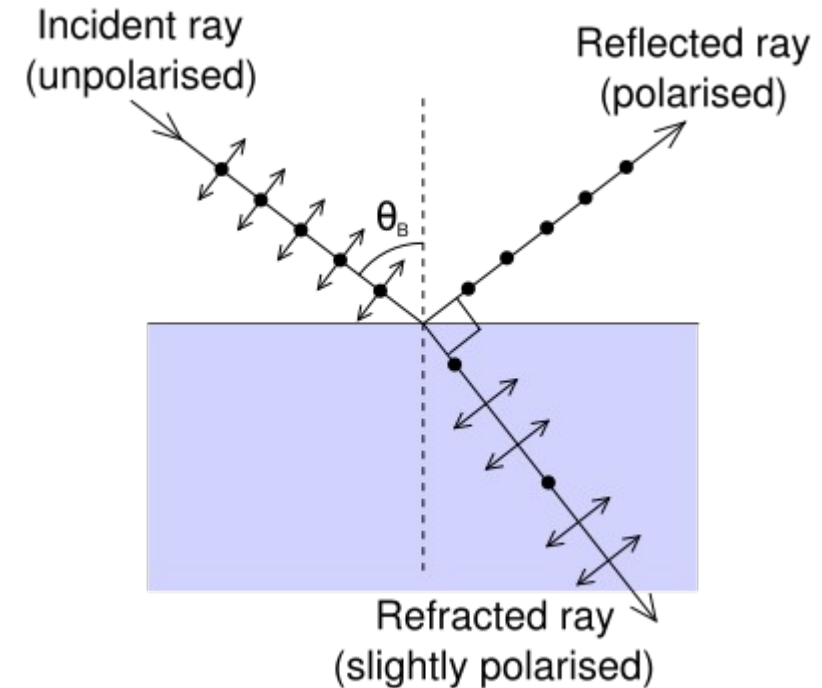
Loi de Brewster $\tan \theta_B = n_1/n_2$

À l'incidence θ_B , l'onde réfléchie est polarisée dans le plan de l'interface

Applications: filtrer les reflets du soleil



[https://en.wikipedia.org/wiki/Polarizing_filter_\(photography\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Polarizing_filter_(photography))



http://en.wikipedia.org/wiki/Brewster%27s_angle

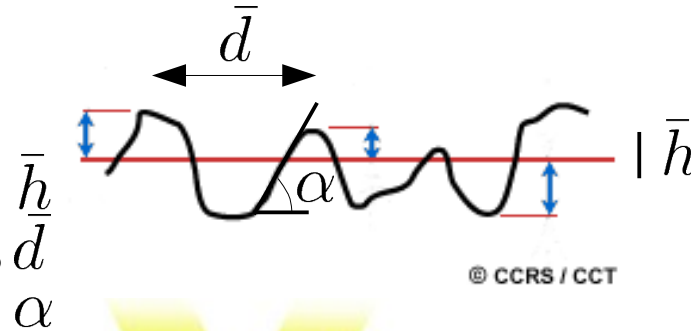
État de surface joue un rôle prépondérant dans la **réflexion** du REM incident

On caractérise la rugosité par :

hauteur moyenne des aspérités \bar{h}

distance moyenne entre sommets \bar{d}

pente moyenne des aspérités α

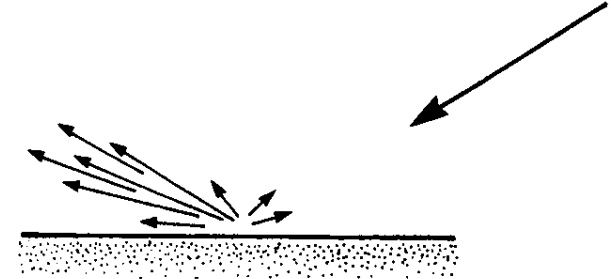


<https://www.mcan.gc.ca/cartes-outils-et-publications/imagerie-satellitaire-et-photos-aeriennes/tutoriel-notions-fondamentales-teledetection/interaction-avec-la-cible-et-apparence-de-limage/interaction-avec-la-cible-et>

Rugosités (h) \ll long. onde

→ **interface optiquement lisse**

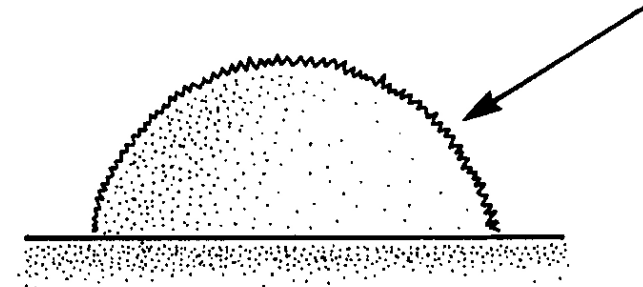
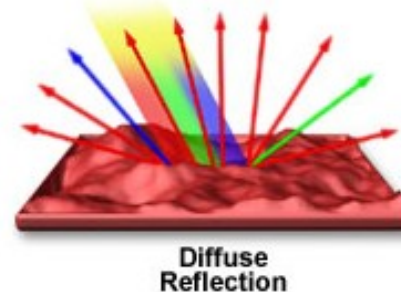
→ **réflexion spéculaire**



Rugosités (h) \geq long. onde

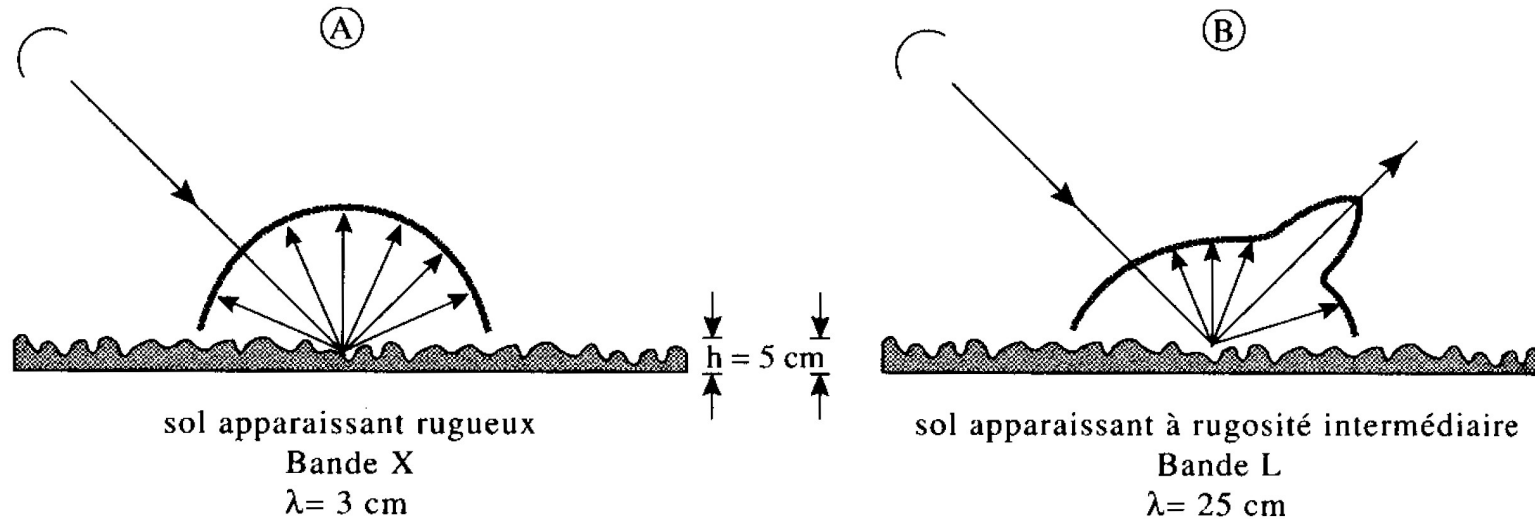
→ **interface optiquement non-lisse**

→ **réflexion diffuse**



Réflexion spéculaire ou diffuse suivant rapport long. onde / rugosité

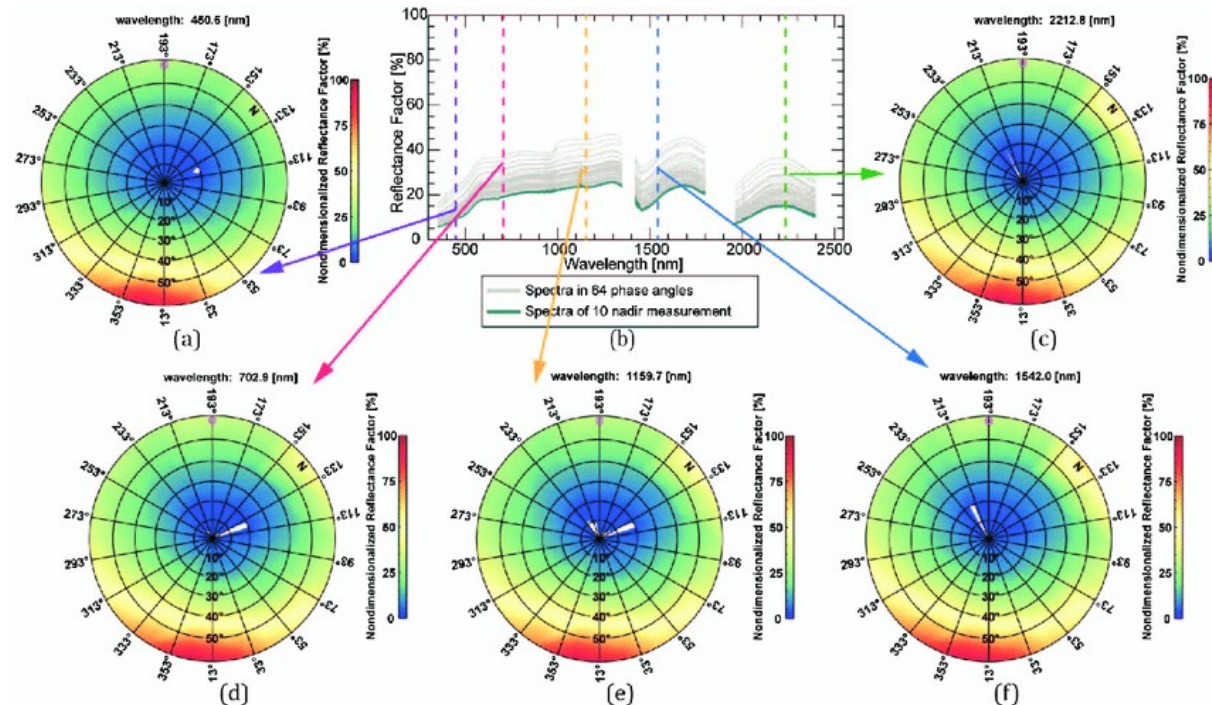
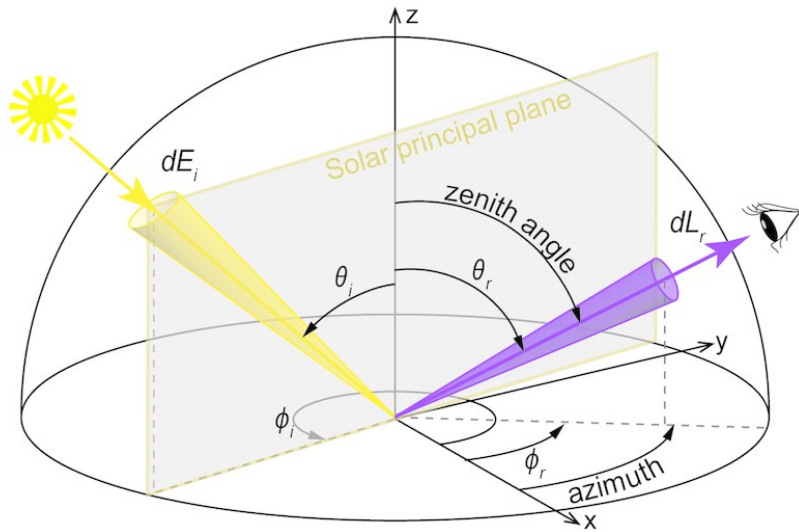
(significatif pour grandes longueurs d'onde i.e., micro-ondes)



Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF)

Décrit le rayonnement réfléchi dans une direction donnée en fonction du ray. incident dans une direction donnée

$$\text{BRDF}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{dL_r(\theta_r, \phi_r)}{dE_i(\theta_i, \phi_i)}$$



BRDF est mesurée avec un gonio-réflectomètre (ou spectromètre)

Appareil encombrant et de manipulation délicate sur le terrain...



Peltoniemi et al., 2007, ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing, vol.62(6), pp.434-446



Milton et al., 2009, Remote Sensing of Environment, vol.113(1), pp.92-109

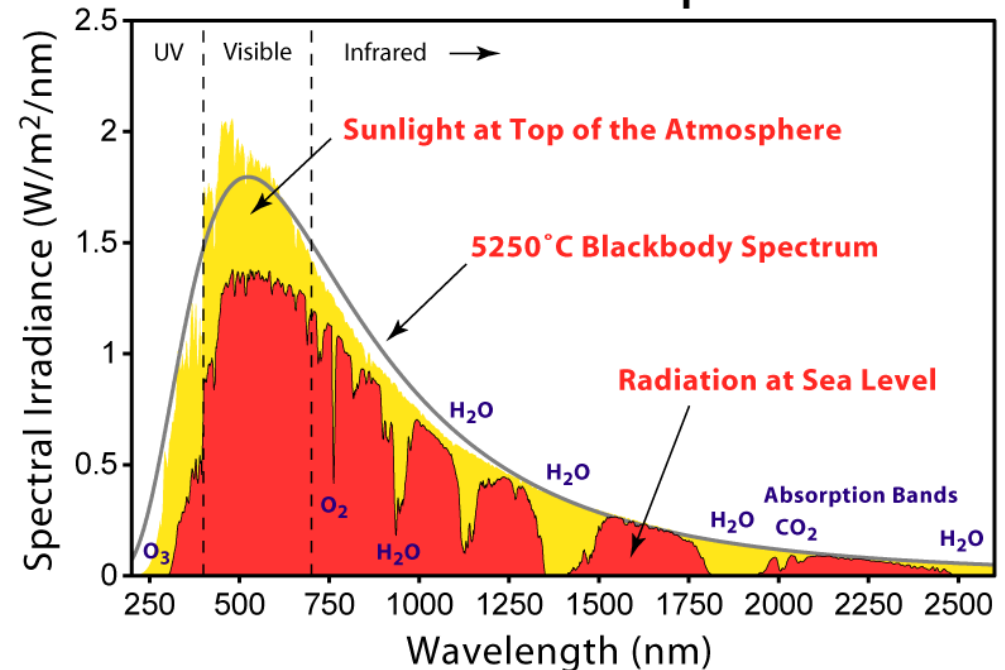
Interactions avec la surface terrestre

Essentiel des processus environnementaux prend place à la surface terrestre (\pm qq m). Principale source d'énergie = rayonnement solaire.

→ importance interaction rayonnement solaire - surface terrestre.

→ Rayonnement solaire incident est principalement dans visible et proche IR

Solar Radiation Spectrum



Rayonnement net

Quantité d'énergie radiative disponible à la surface terrestre et pouvant être transformée en d'autres formes d'énergies (calorifique, chimique, électrique...)

$$R_N = R_S(1 - \alpha) + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow}$$

<https://www.atdd.noaa.gov/sebn/>

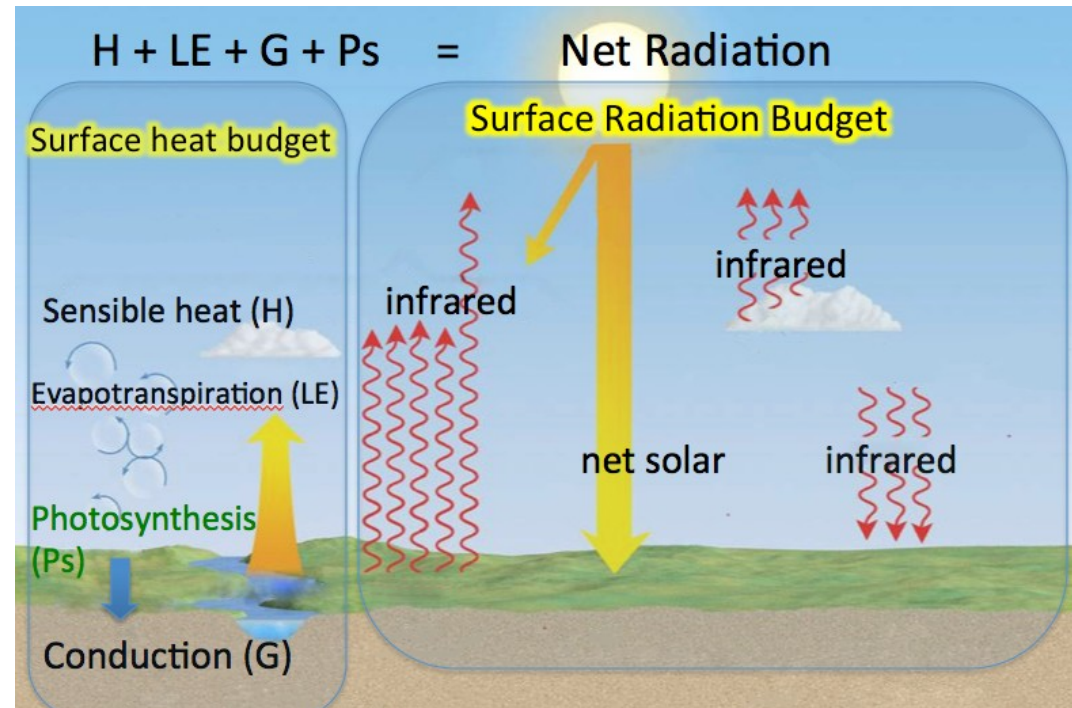
R_N ray. net

R_S ray. solaire incident global (direct + diffus) de petite long. onde.

α albédo de la surface

$R_{L\downarrow}$ ray. thermique descendant de grande long. onde émis par atm.

$R_{L\uparrow}$ ray. thermique ascendant de grande long. onde émis par surface.
[W.m⁻²]



Nuit :

$$R_N = R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow}$$

Rayonnement émis dépend de la température de la surface :

$$R_{L\uparrow} = \epsilon \sigma T_S^4$$

T_S température de la surface

ϵ émissivité de la surface

σ constante de Stefan-Boltzmann

Température de surface a une grande influence sur rayonnement net disponible à la surface pour échanges d'énergie.

Le bilan énergétique conditionne le climat, le cycle de l'eau et les chaînes alimentaires.

Bilan d'énergie à la surface

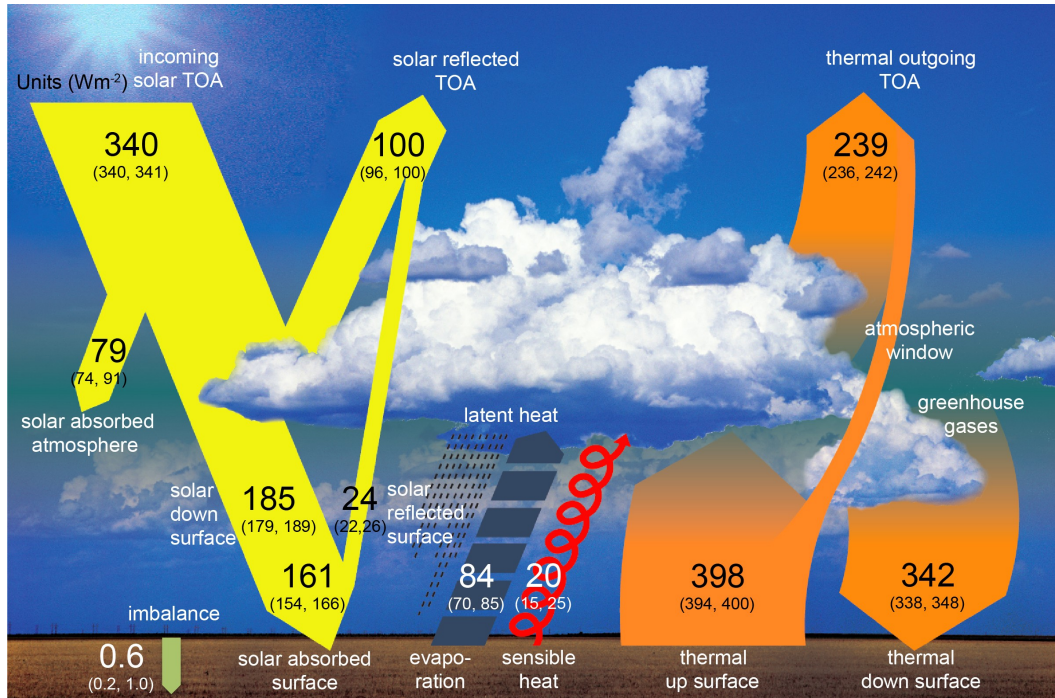
Pas d'accumulation énergie à la surface (1er principe thermodynamique)
→ somme énergies reçues = somme énergies dépensées.

Une partie de l'énergie sert à réchauffer le sol par conduction, à modifier l'atmosphère par convection, à évaporer en partie l'eau présente et enfin aux mécanismes photochimiques.

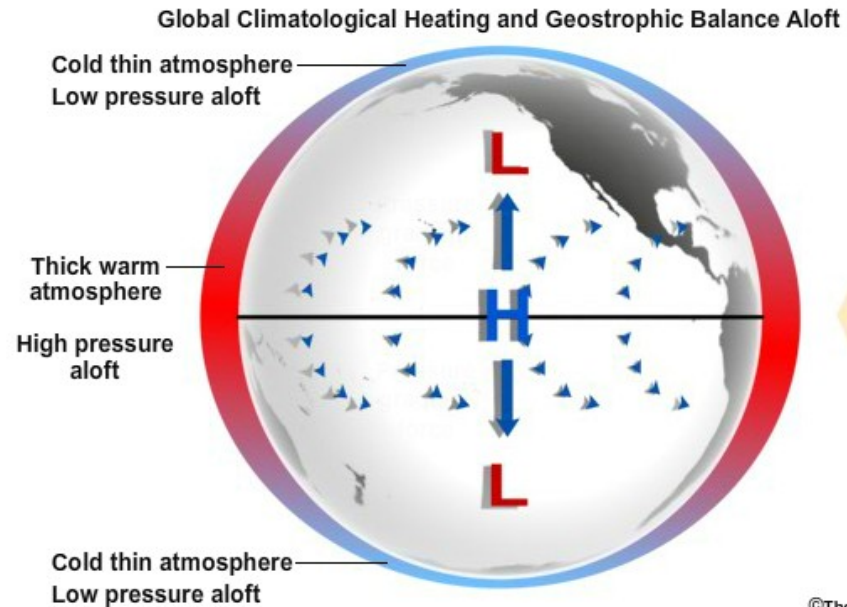
Bilan d'énergie s'écrit : $R_N + LE + G + H + s = 0$

R_N	rayonnement net
L	chaleur latente d'évaporation de l'eau
E	quantité d'eau évaporée par unité de temps.
LE	flux d'énergie utilisée pour évaporation de l'eau.
G	flux énergie utilisée pour conduction de la chaleur dans le sol
H	flux chaleur sensible = énergie utilisée pour convection de l'air
s	énergie utilisée par photosynthèse (~1% autres termes)

Rayonnement net et bilan énergie global



<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1>



©The COMET Program

1. Expliquer la réfraction.

2. Comment la rugosité d'une surface influence-t-elle le type de réflexion ?

3. Quels sont les termes du bilan d'énergie à la surface ?

Réflexion/émission REM à la surface terrestre est fonction du bilan en énergie.

En télédétection, les objets peuvent être caractérisés par :

- signature par mesure de l'intensité du signal émis ou réfléchi
- signature spectrale ("couleur")
- signature spatiale exprimant forme et arrangement des objets
- signature angulaire associée à l'anisotropie
- signature temporelle
- signature polarimétrique du signal
- signature par mesure de la phase du signal

Dans ce chapitre, on se centrera sur la signature spectrale

Visible – proche IR (0.4 – 3 μm)

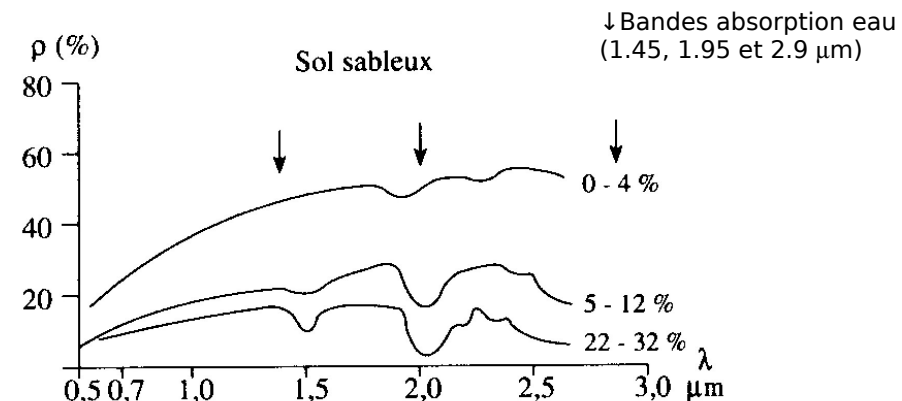
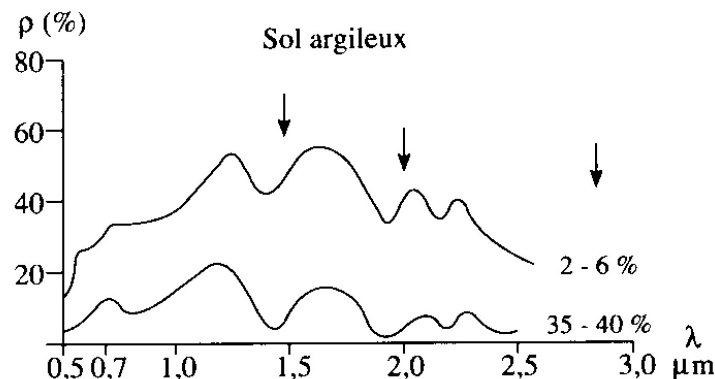
Sol

Milieu hétérogène complexe :

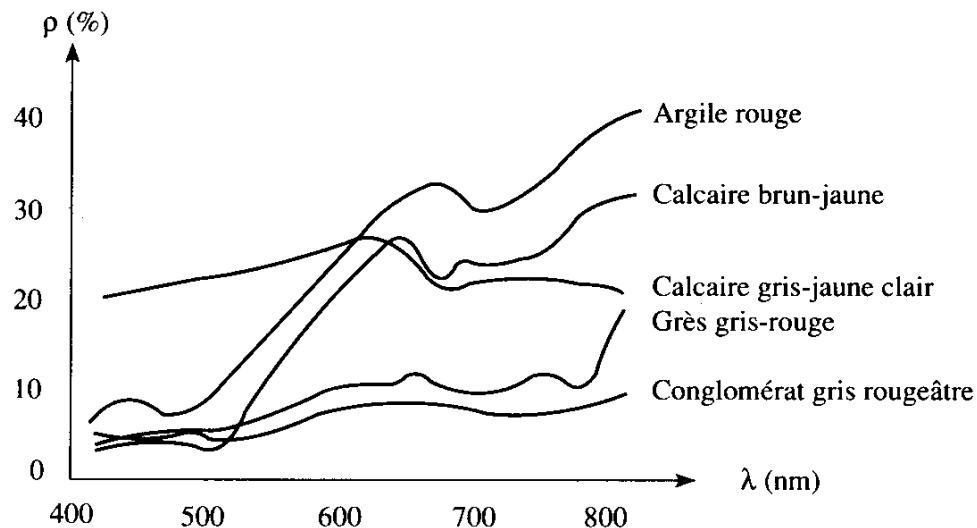
- mélange minéraux, matière organique, eau
- phase solide, liquide et gazeuse

Signature spectrale complexe et influencée par humidité, teneur en minéraux, teneur en matière organique, rugosité de surface, texture (teneur en sable, limon et argile).

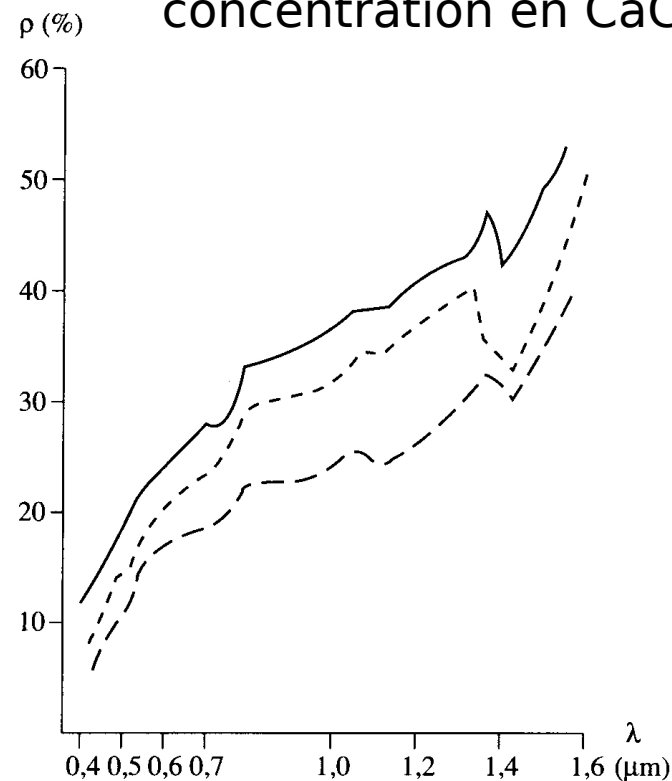
Humidité



Teneur en minéraux

Réflectance de
différents minéraux

Bonn, Précis Télédétection vol.1, 1991

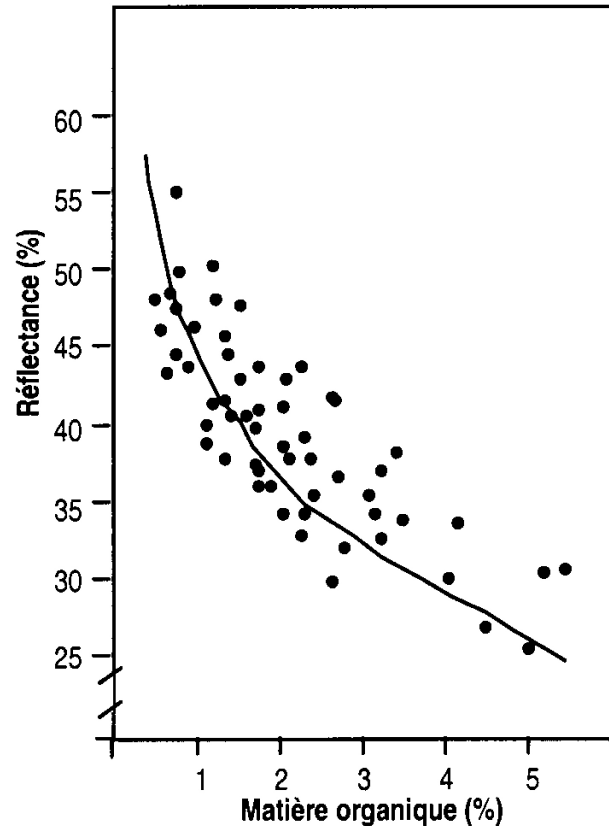
Réflectance d'un sol /
concentration en CaCO_3 

—————	CaCO_3 : 67 %	Fe : 0,6 %
- - - - -	CaCO_3 : 65 %	Fe : 1,3 %
- . - . -	CaCO_3 : 57 %	Fe : 3,3 %

Teneur en matière organique

La matière organique produit un “assombrissement” du sol

→ réflectance diminue lorsque la teneur en matière organique augmente.



D'après Swain, Remote sensing a quantitative approach, 1978

Texture du sol (composition relative sable/argile/limon)

Chaque minéral a sa réflectance propre → composition influe sur réflectance globale du sol.

Rugosité du sol

Rugosité importante → réflexion diffuse donc réflectance plus faible.

Signature spectrale du sol dans le visible et proche-moyen IR

Humidité	↗	réflectance	↘
Rugosité	↗		↘
Matière organique	↗		↘

+ influence complexe teneur en minéraux, texture du sol...

Végétation

Végétation est un milieu complexe dont propriétés spectrales varient avec type de végétation, saison et phase de croissance.

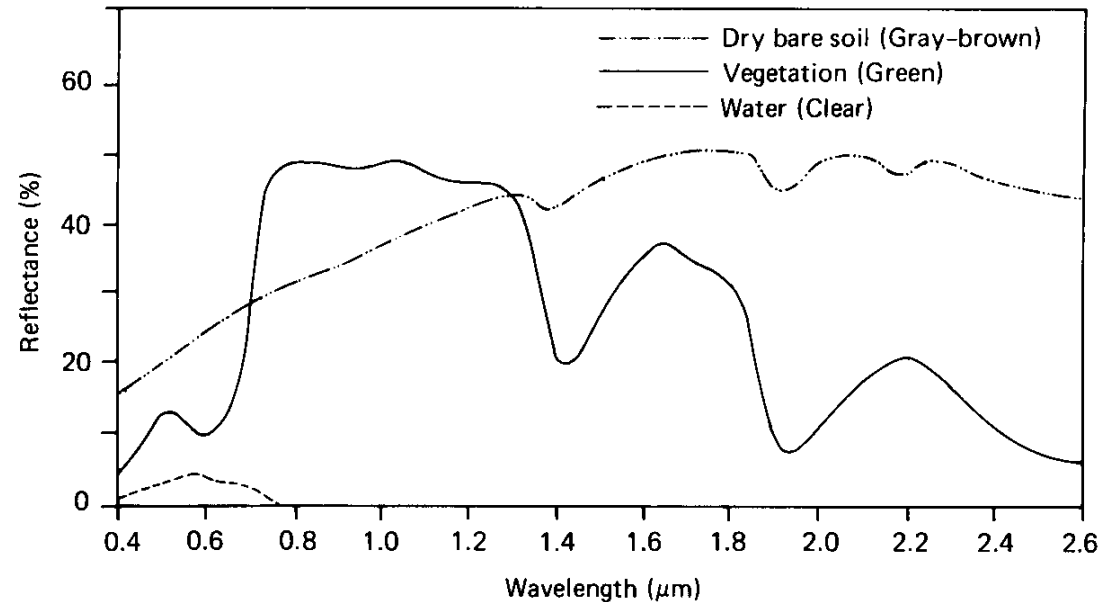
Au niveau feuille, réflexion limitée (réflectance $< 15\%$) dans visible, plus importante dans IR.

Au niveau plante et couvert végétal, réponse spectrale = combinaison réponse feuilles, tiges/troncs + sol.

Indice foliaire = Leaf Area Index (LAI) = rapport entre surface feuilles et surface de terrain occupé par végétation.

Réponse spectrale de la végétation est typiquement celle de la figure ci-contre.

Allure générale, valeur indicative.



<http://www.met.reading.ac.uk/~swsgrime/artemis/ch3/ndvi/ndvi.html>

Pic ~ 0.54 μm : pigmentation verte de la chlorophylle (faible réflectance dans bleu et rouge)
~ 0.8 μm : caractéristique de la chlorophylle.

Bandes d'absorption ~ 1.5 - 1.9 - 2.5 μm : absorption eau

Réponse spectrale végétation dépend de l'espèce, du stade évolutif, de la teneur en eau et du biotope.

Ces différences de réflectance sol/végétation/eau libre → identification

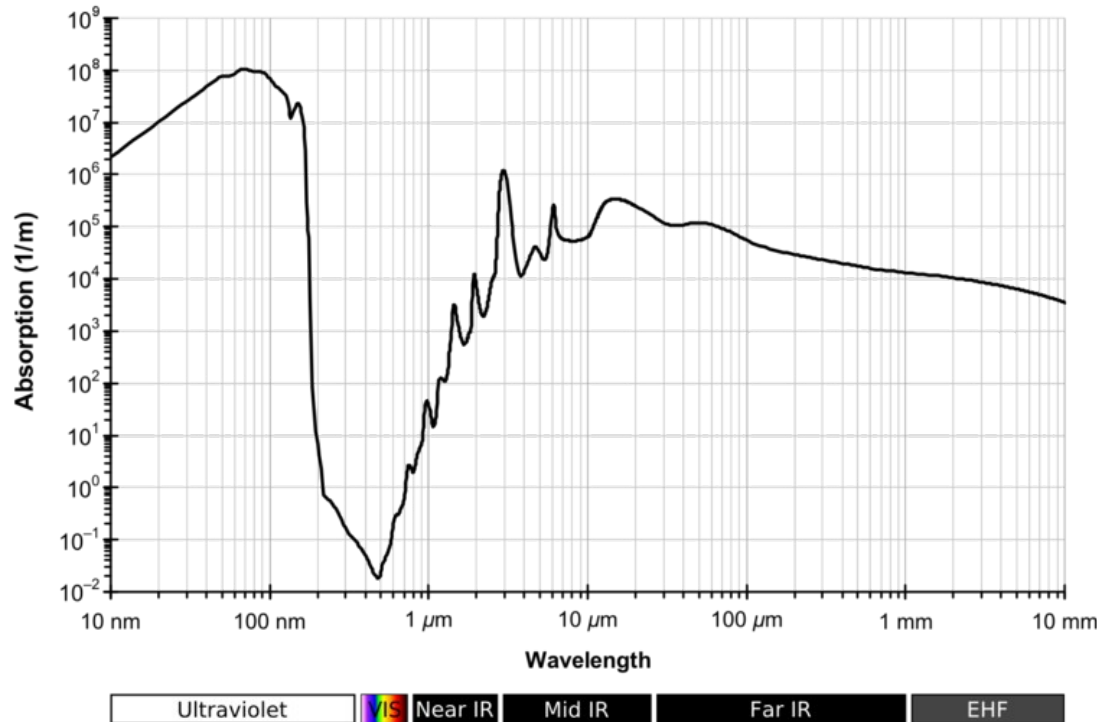
Ex : végétation en proche IR (IR thermique enlevé)



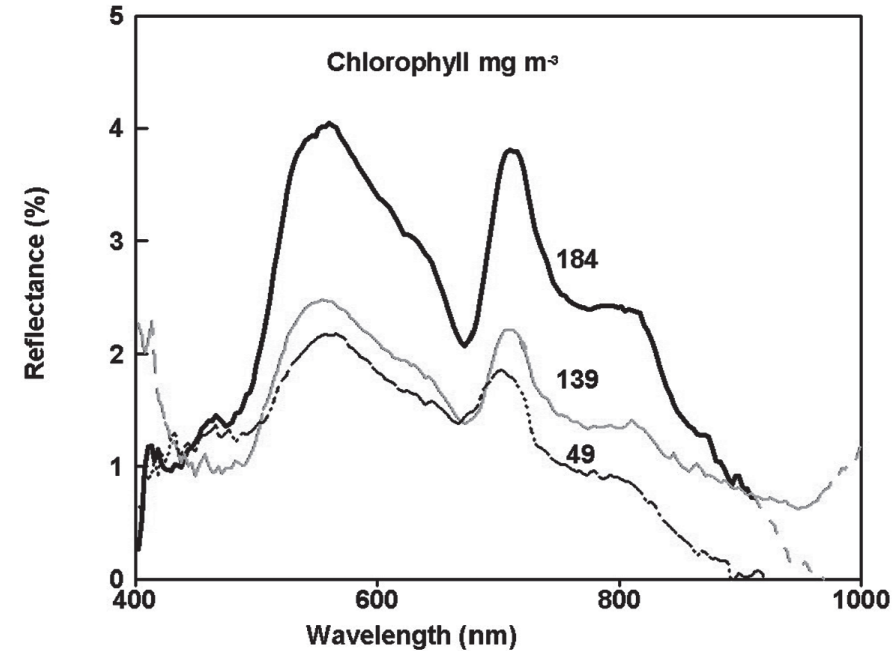
<https://lisakimmorley.files.wordpress.com/2015/02/storm-clouds-gathering.jpg>

Eau liquide

Bandes absorption à 1.5, 1.9 et 2.5 μm .



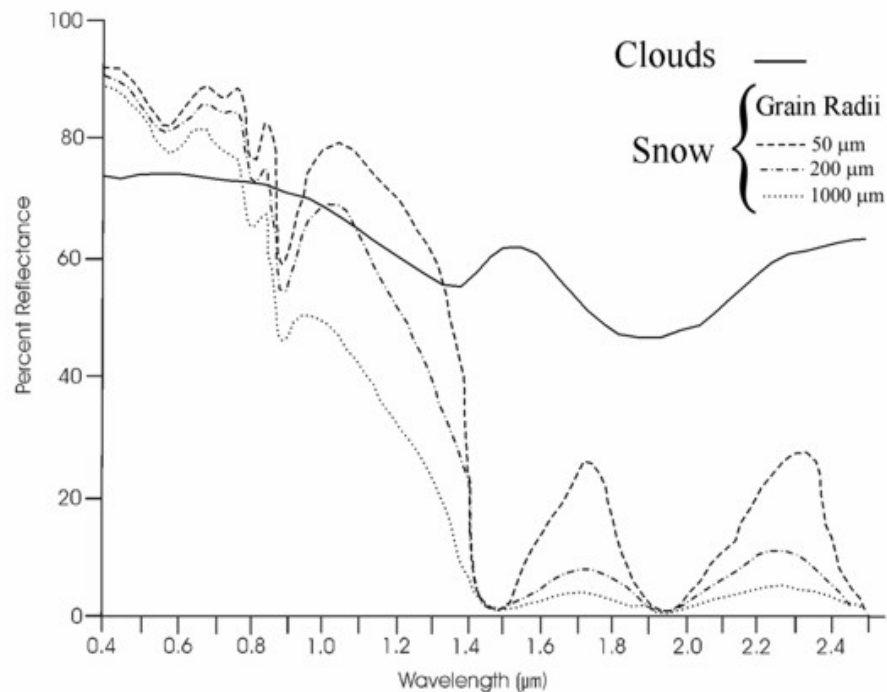
Réflectance / couleur
(contenu en chlorophylle)



Schalles et al., 1997

Neige

Varie en fonction de la densité et granulométrie des cristaux.



1. Pourquoi la courbe obtenue en représentant les variations de la réflectance en fonction de la longueur d'onde s'appelle-t-elle une signature spectrale ?
2. Pourquoi l'eau de mer a-t-elle une coloration bleu-vert ?
3. Comment peut-on distinguer la neige des nuages sur une image satellite (visible et proche-moyen IR) ?

IR thermique (3-15 μm)

Émissivité corps noir $\sim 300\text{ K}$ présente un max $\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ \rightarrow dans IR thermique.

\rightarrow pour nombreux matériaux la mesure du rayonnement IR thermique fournit une bonne approximation de la température “physique” (cf loi Wien).

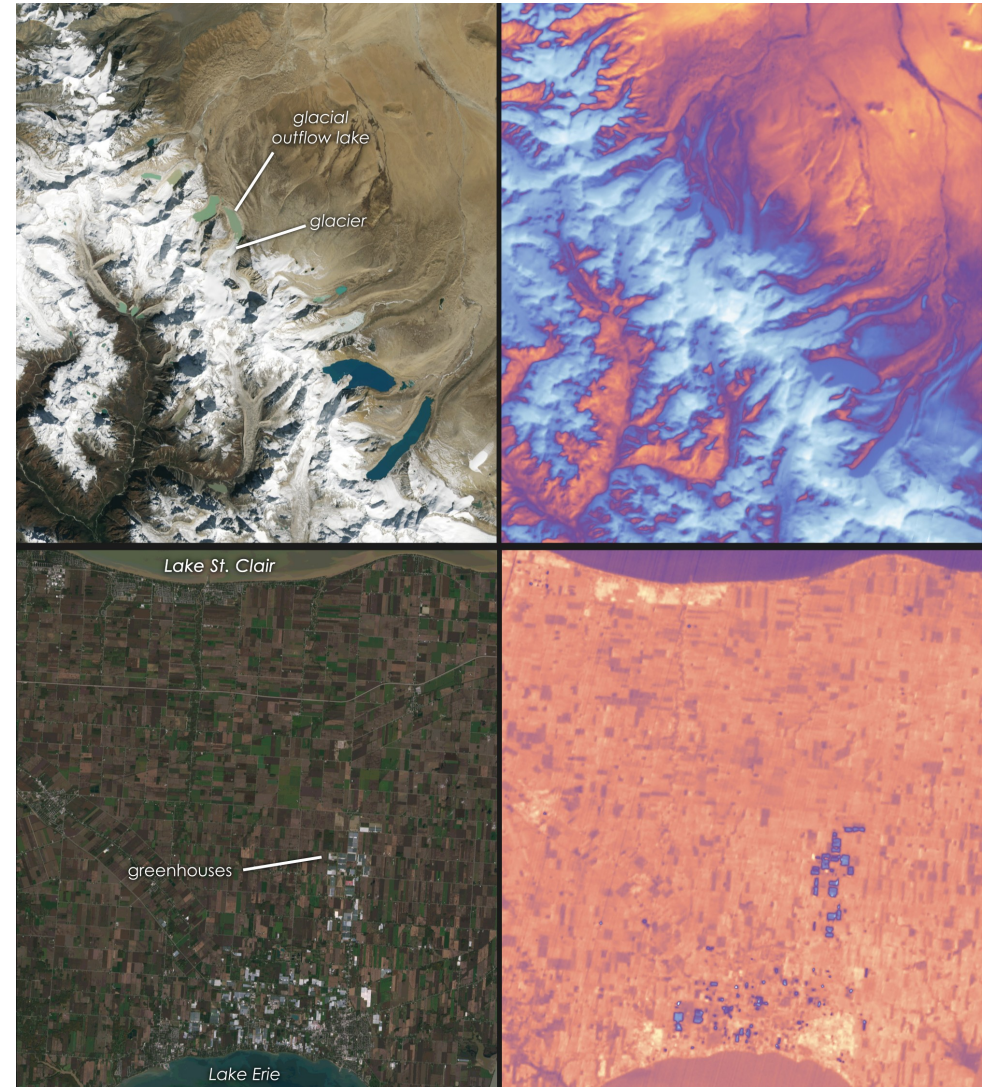
<i>Matériau</i>	<i>émissivité</i>
corps noir	1
eau pure	0.999
granite	0.96
gravier	0.95
sable quartzeux mouillé	0.94
sable quartzeux sec	0.93
bois, porcelaine, papier	0.85-0.95

En télédétection, la bande IR-thermique fournit une estimation de la température de surface (utile par ex pour évapotranspiration, isolation bâtiments, etc...)

Images dans le visible (OLI, gauche) et l'IR thermique (TIRS2, droite) de Landsat9 :

1. Transition Himalaya / Plateau tibétain (haut).

2. Champs cultivés en Ontario (bas).



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

Caméra thermique pour SmartPhone



Détection des
défauts d'isolation

Inertie thermique

Propriétés thermiques des surfaces naturelles varient fortement en fonction conditions climatiques et hydriques.

2 principaux cycles : journalier (24h)
 annuel (365j)

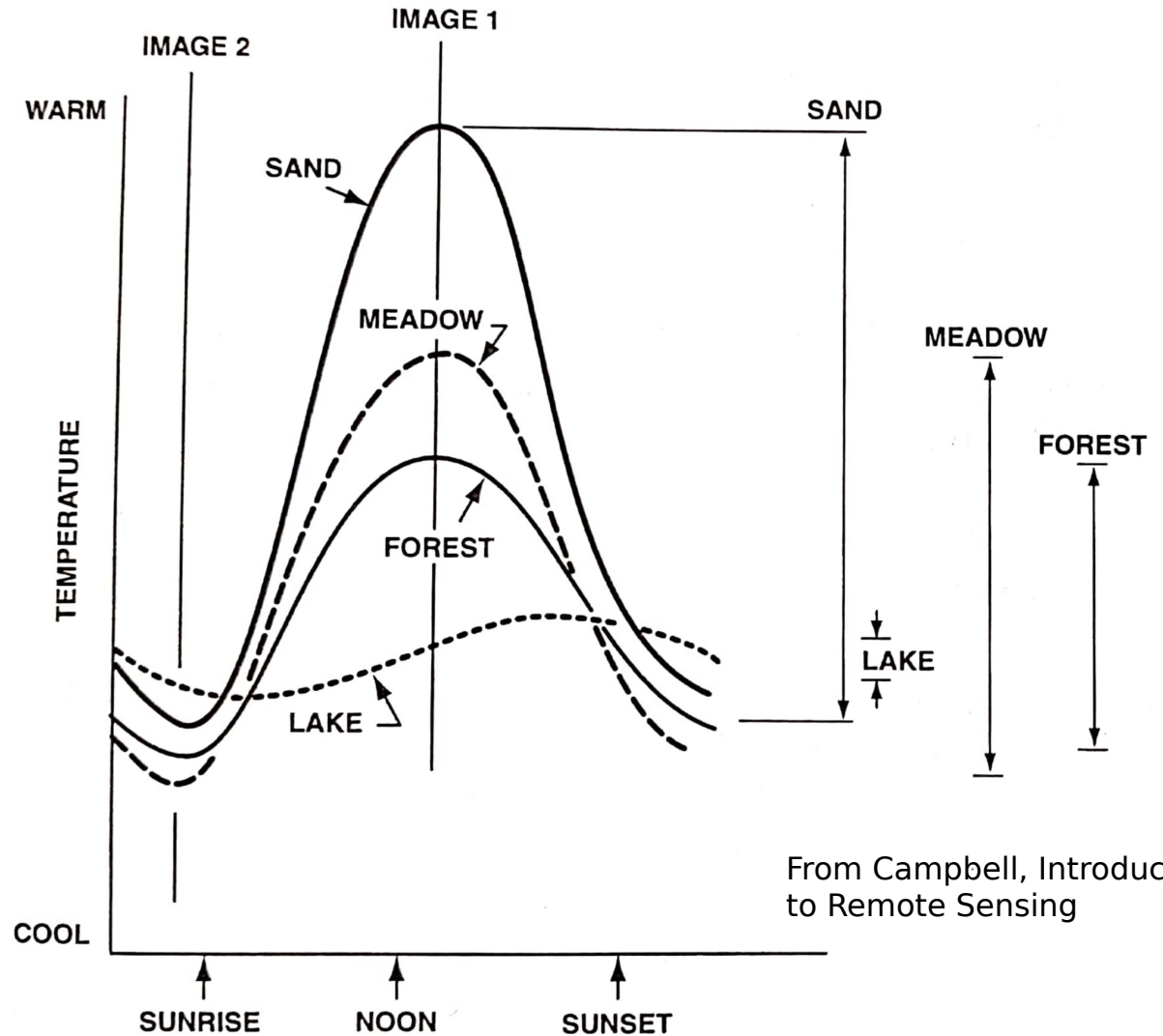
Connaissance propriétés thermiques des matériaux terrestres nécessaire pour comprendre comment les temp. de surface sont des indicateurs des conditions du milieu comme teneur en eau ou minéralogie.

Capacité thermique massique (chaleur spécifique) eau >> sol
→ inertie thermique eau >> sol

zones humides apparaissent + froide la journée et + chaude la nuit

→ concept d'inertie thermique peut être utilisé pour distinguer zones + ou – sèches ou humides.

Variations schématiques de température pour des surfaces naturelles



Jour ?
Nuit ?



Micro-ondes ou hyper fréquences (1 mm – 1 m)

REM dans gamme des micro-ondes ont propriétés intéressantes :

- **Atmosphère est transparente** à + de 90% pour fréquences 1 à 20 GHz.
Donc prise de vue par tous les temps (au contraire du visible et IR).
- Aux fréquences MO, eau et sol ont constantes diélectriques très différentes.
Environ 70 pour eau et 3 pour sol → **présence d'eau modifie considérablement propriétés EM sols** → possibilité d'estimer teneur en eau...
- Pour long. onde ~qq cm, la réflexion à l'interface sol-air est volumique. Donc énergie réfléchie dépend d'une **couche significative (qq cm) de sol**. Visible ~qq μm ...

2 approches :

- **active** : on envoie un signal et on regarde ses propriétés après réflexion.
- **passive** : on mesure les émissions naturelles.

Profondeur d'auscultation et de pénétration :

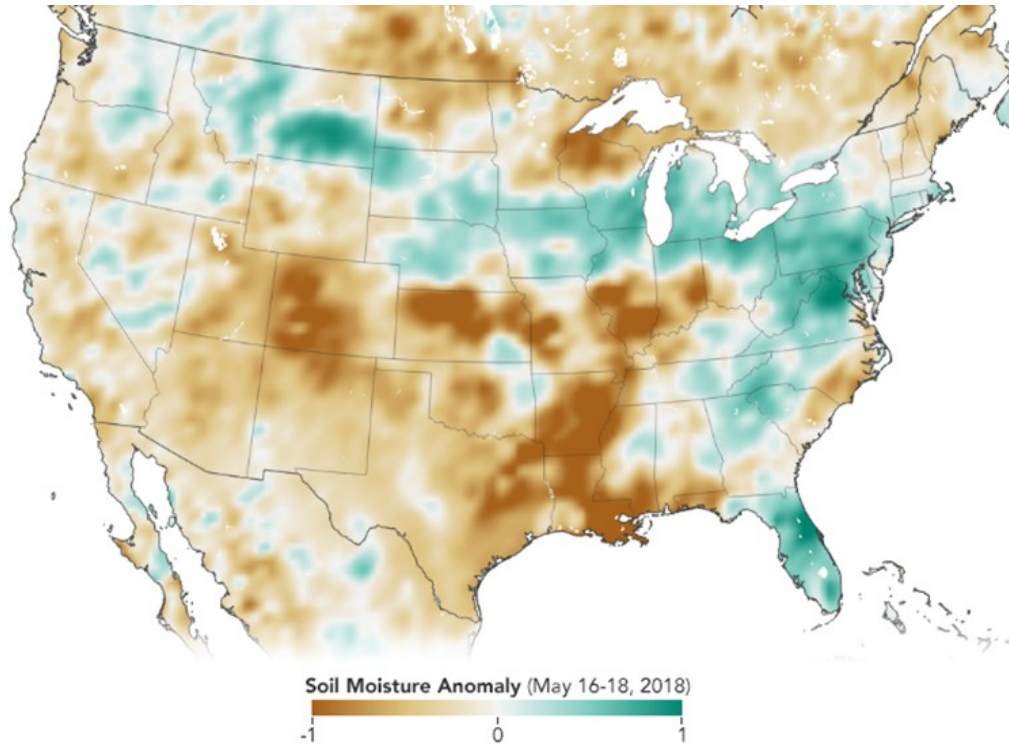
- La réflectivité est gouvernée par la composante réelle de la permittivité. La profondeur de pénétration $\sim 1/10$ de la long. onde ($\sim 1\text{cm}$).
- L'émissivité dépend de la composante complexe de la permittivité et en particulier de l'humidité du sol. La profondeur d'auscultation $>$ profondeur pénétration : $\sim 1\text{cm}$ pour sol proche saturation jusqu'à $\sim 30\text{ cm}$ pour sol sec.

Effet rugosité :

Rugosité plus sensible pour systèmes actifs car réflexion dépend de l'angle d'incidence et de la longueur d'onde.

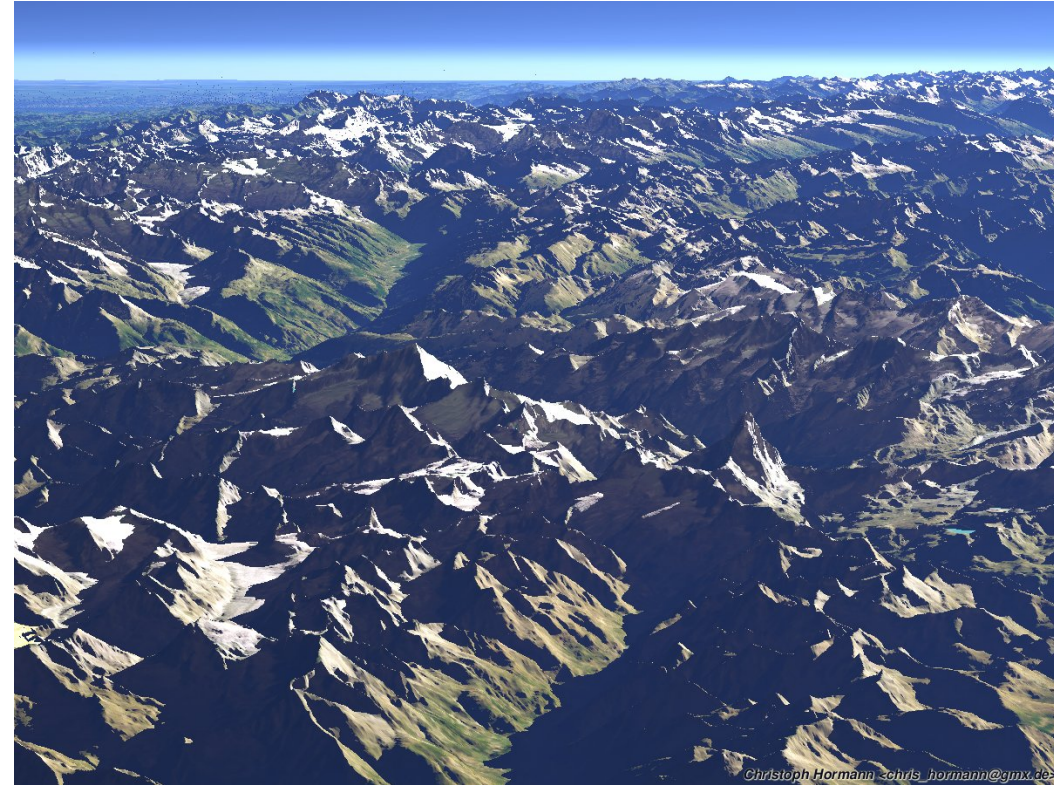
Estimation par télédétection MO de la teneur en eau d'un sol est complexe (+ effet végétation...) et constitue toujours un domaine de recherche actif.

Soil Moisture (Active) and Passive
Passif, humidité des sols



<https://smap.jpl.nasa.gov/news/1266/nasa-soil-moisture-data-advance-global-crop-forecasts/>

Shuttle radar topography mission
(SRTM). Actif, topographie.



http://www.imagico.de/pov/pict/alps4_1.jpg

1. Quelle est l'influence de la teneur en eau sur les paramètres thermiques des sols ?

2. Expliquer pourquoi les micro-ondes sont plus adaptées à la télédétection de l'humidité des sols ?

Interactions avec l'atmosphère

Atmosphère est soit

1. **Une source de bruit** perturbant la mesure quand l'objectif est d'étudier la surface terrestre. Pour les capteurs aéroportés ou satellitaires, présence d'une couche d'atmosphère qui interagit avec les REM utilisés pour télédétection. Fréquences choisies pour minimiser les effets atmosphériques.
2. **Le milieu à étudier** (circulation générale, pollution,...). On s'intéresse aux processus atmosphériques eux-mêmes. Fréquences choisies pour maximiser les interactions avec les processus étudiés.
Ex : radar météorologique, lidar pour concentration en ozone.

Influence de l'atmosphère sur propagation et propriétés du REM vient de 2 entités distinctes : **molécules de gaz** et **particules liquides ou solides** (aérosols, gouttelettes nuageuses, de pluie...).

On retrouve 3 principaux types d'interactions REM-matière :

- **Absorption.**
- **Diffusion.**
- **Réfraction.**

L'atmosphère = milieu stratifié dans lequel répartition spatiale et temporelle des gaz et particules est variable

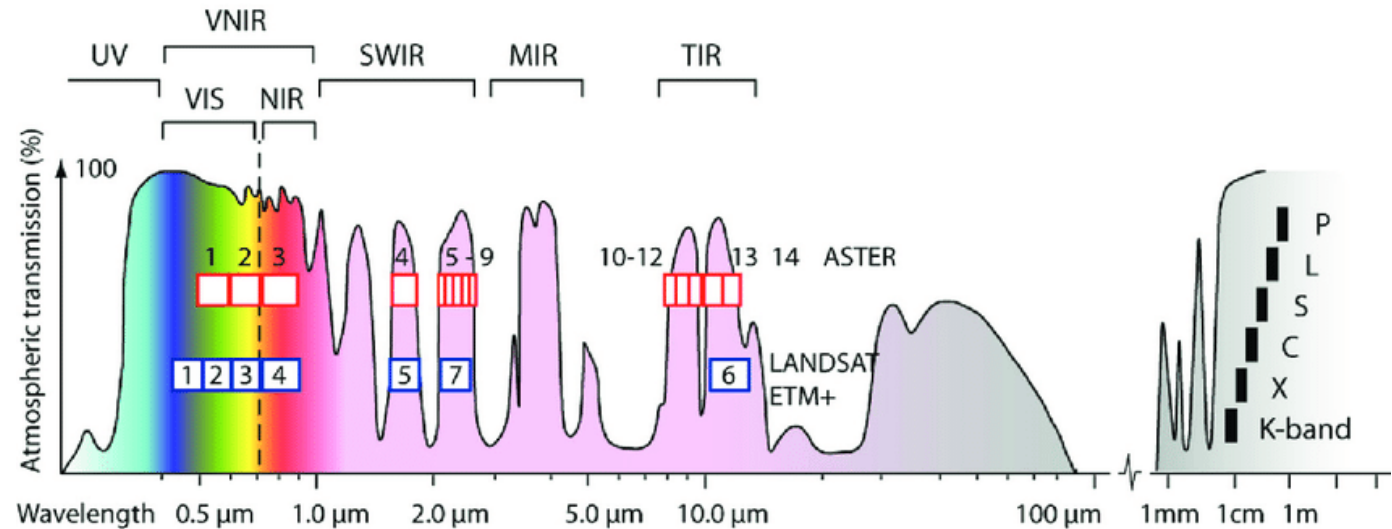
→ influence complexe sur la propagation des REM et donc sur mesures de télédétection.

Absorption - fenêtres atmosphériques

Zones du spectres EM où l'atmosphère est relativement transparente au rayonnement sont appelées fenêtres atmosphériques.

Essentielles pour la télédétection de la surface terrestre.

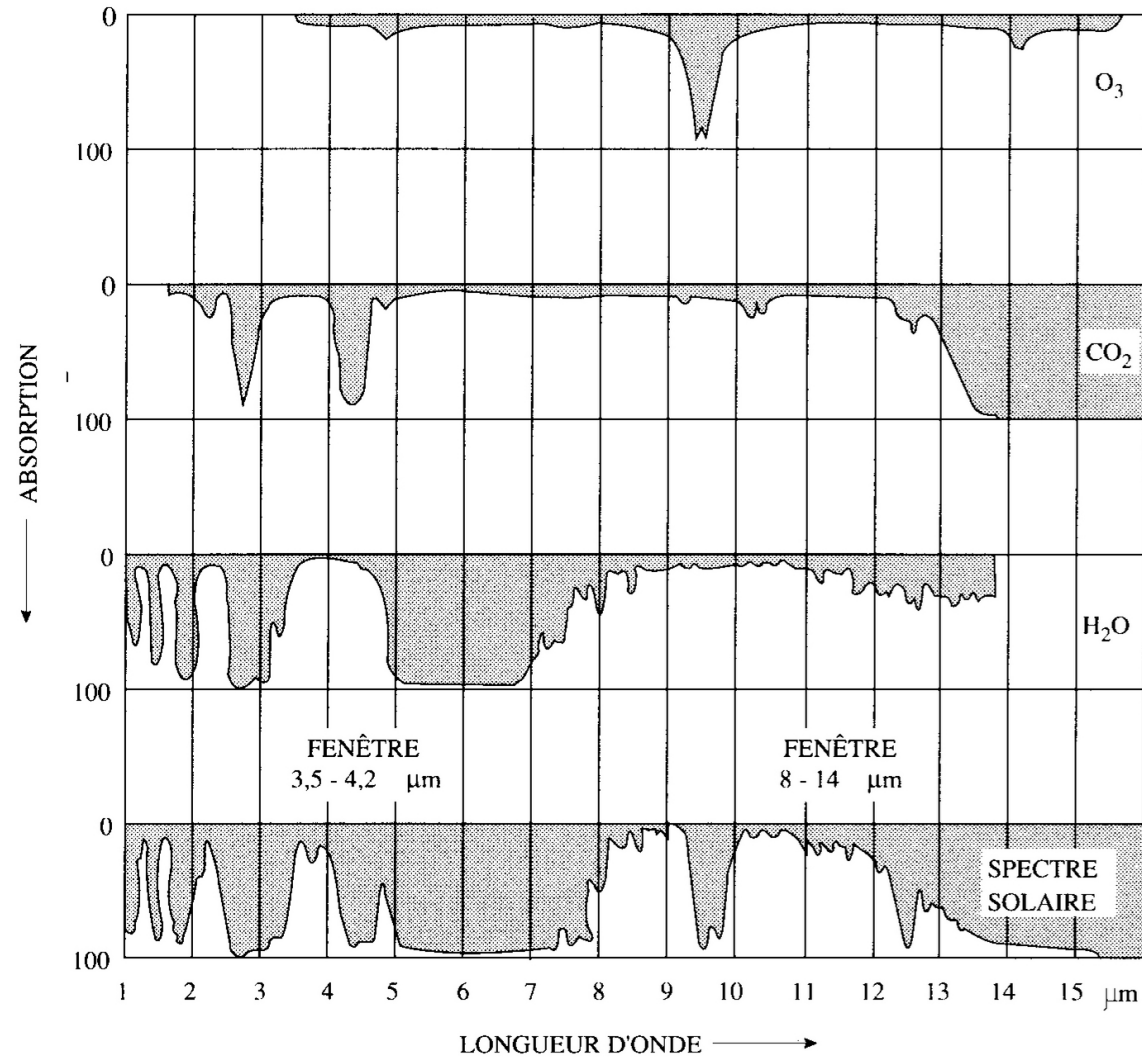
Visible
Proche IR



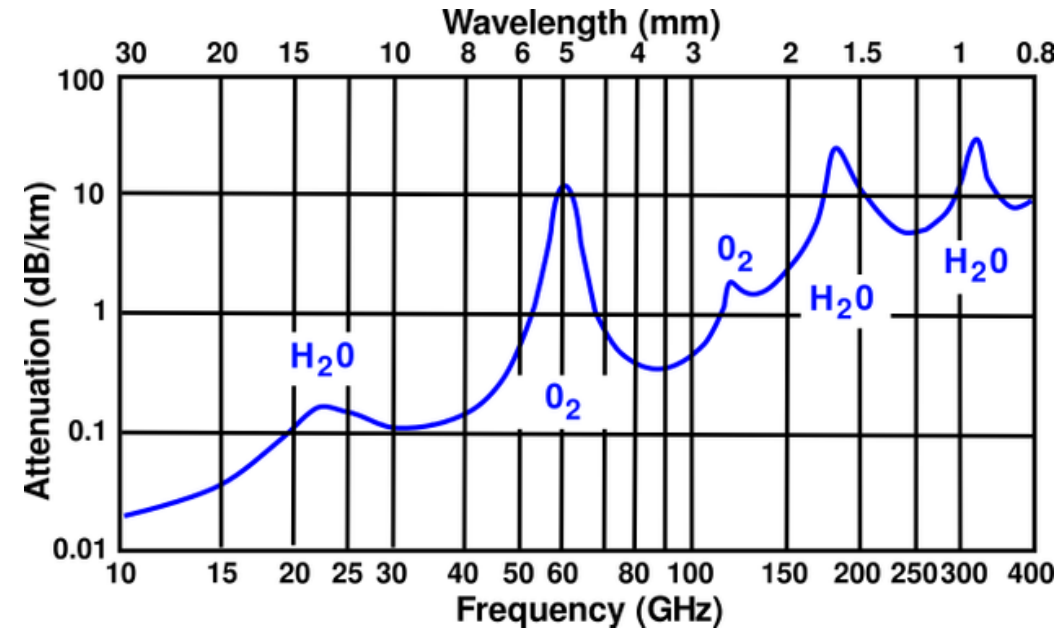
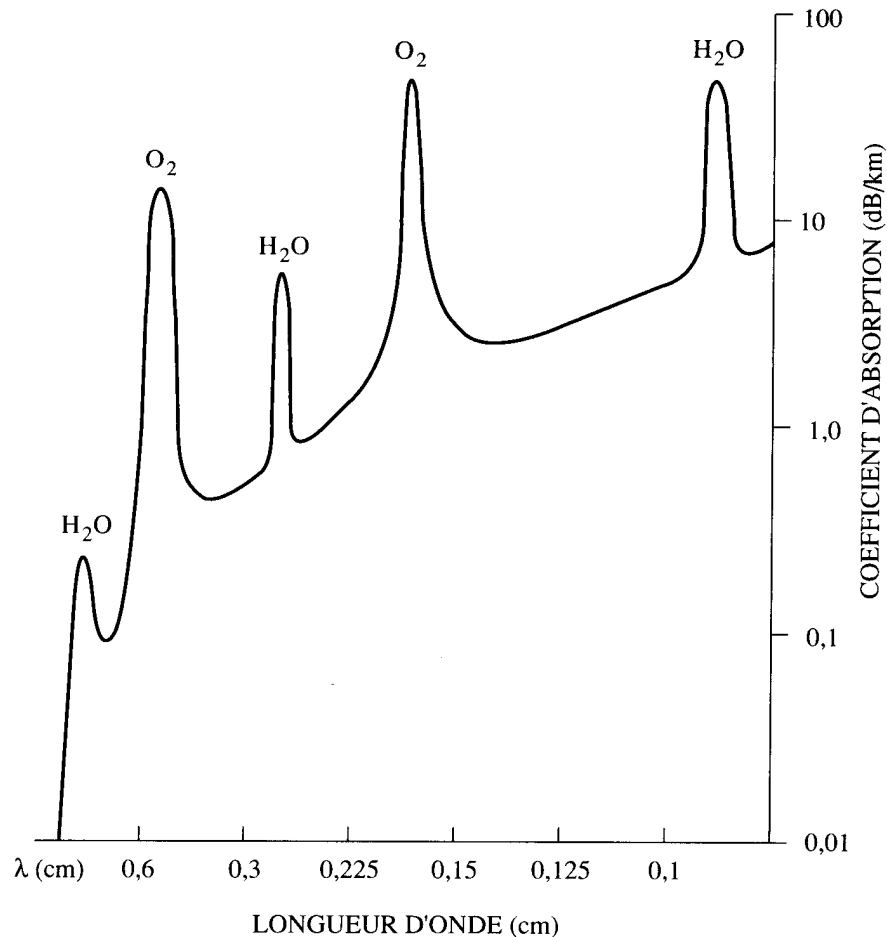
Pics d'absorption liés au gaz atm (H₂O, CO₂, O₃...)

Kääb et al., 2014

IR moyen

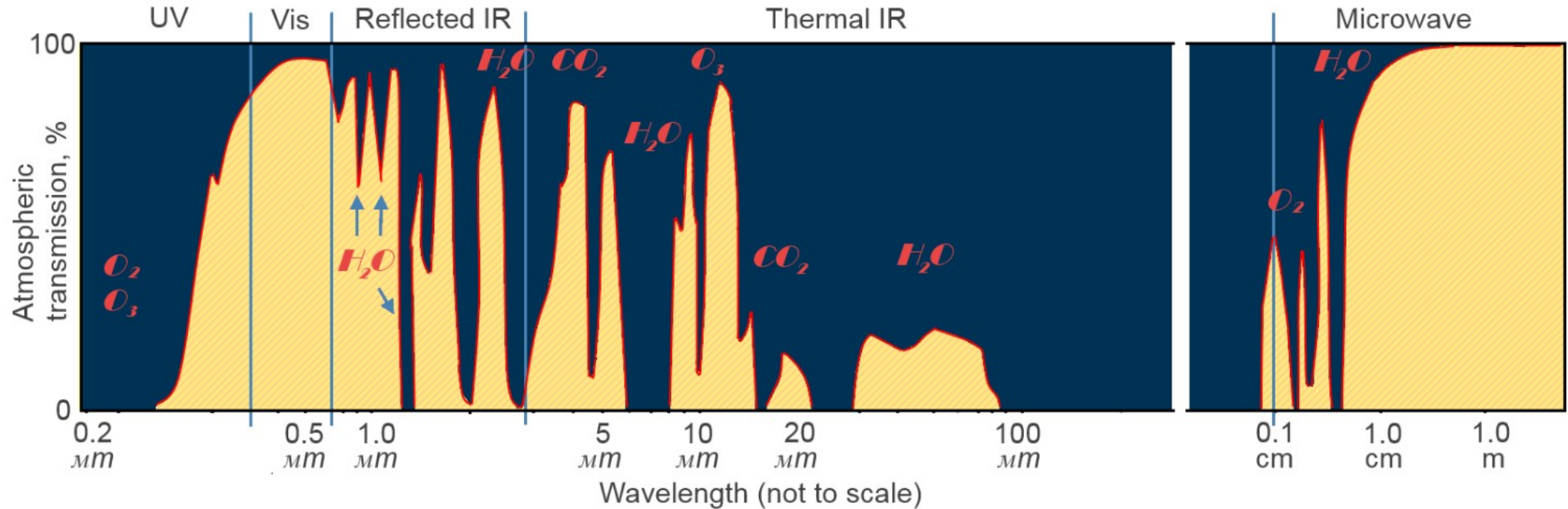


Micro-ondes



https://www.tkn.tu-berlin.de/tknteaching/student_projects/project_summaries/neighbor_discovery_and_tracking_in_mm_wave_networks/

Principales fenêtres atmosphériques pour visible - IR - MO



<http://www.50northspatial.org/intro-to-remote-sensing-part-2/>

Diffusion

Suivant le rapport taille des particules / longueur d'onde du REM :

- Diffusion de Rayleigh (particule \ll long. onde).
- Diffusion de Mie (particule \sim long. onde).
- Diffusion non-sélective (particule \gg long. onde).

Diamètre des divers types de particules atmosphériques diffusantes et absorbantes

Fumée de tabac, noir de charbon, sulfates, nitrates, aérosols marins	de 0,001	à 0,5 μm
Fumées industrielles, brouillard, poussières	de 0,5	à 50 μm
Pollens, cendres volantes	de 10	à 100 μm
Nuages, brume	de 20	à 300 μm
Gouttes de pluie	de 500	à 5 000 μm

Bonn, Précis Télédétection vol.1, 1991

Réfraction

Atmosphère = milieu stratifié avec indice réfraction variable

→ REM ne se propage pas en ligne droite (sauf verticale)

Effet réfraction significatif pour mesures reposant sur propagation oblique. 101

Effets de l'atmosphère sur les mesures de télédétection

Visible – proche IR

Absorption et diffusion joue un rôle majeur :

- absorption : diminue rayonnement réfléchi par la surface.
- diffusion : ajoute rayonnement “parasite”.

IR moyen

Absorption par les gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 , H_2O) du rayonnement émis.

Micro-ondes

Effet surtout pour télédétection passive car faible énergie en jeu et émissivité très variable.

Effets atmosphériques doivent être corrigés pour certaines applications.
(quantitative, signature spectrale)

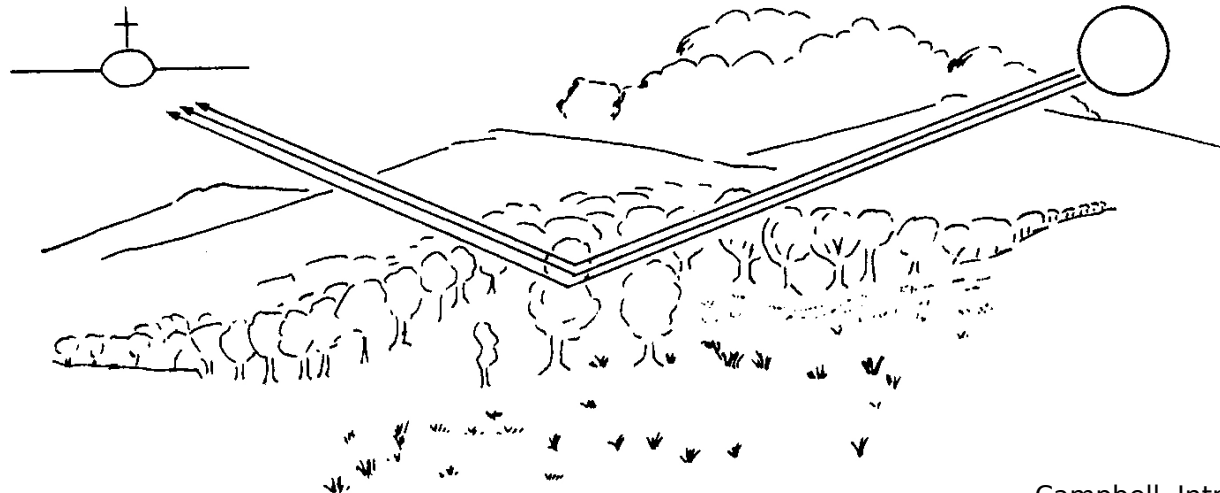
Compte tenu - génération et propagation REM
- interactions avec surface et atmosphère

on définit 3 principaux types de mesures par télédétection :

1. Utilisation du rayonnement réfléchi

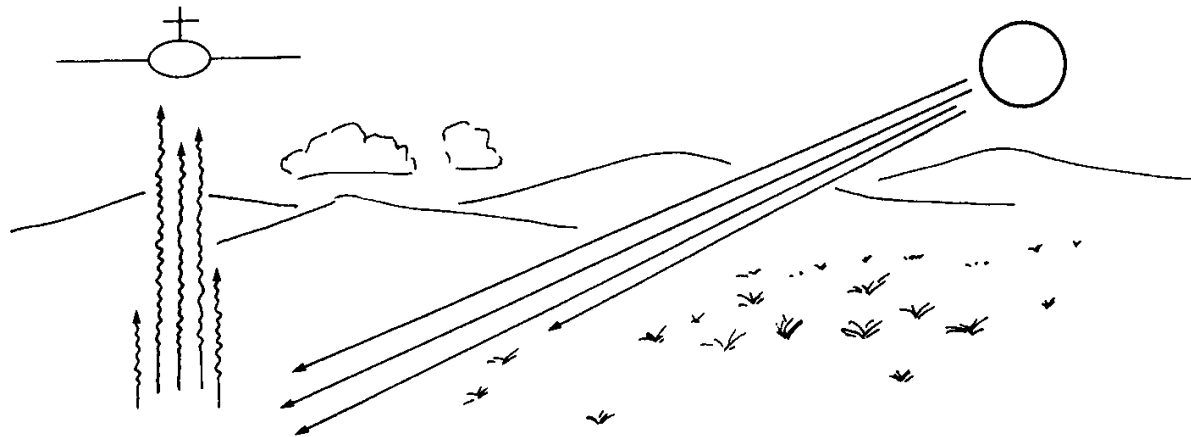
Principalement dans visible et proche et moyen IR (majeure partie -75%-
énergie solaire est reçue dans visible).

Télédétection passive



2. Utilisation du rayonnement émis

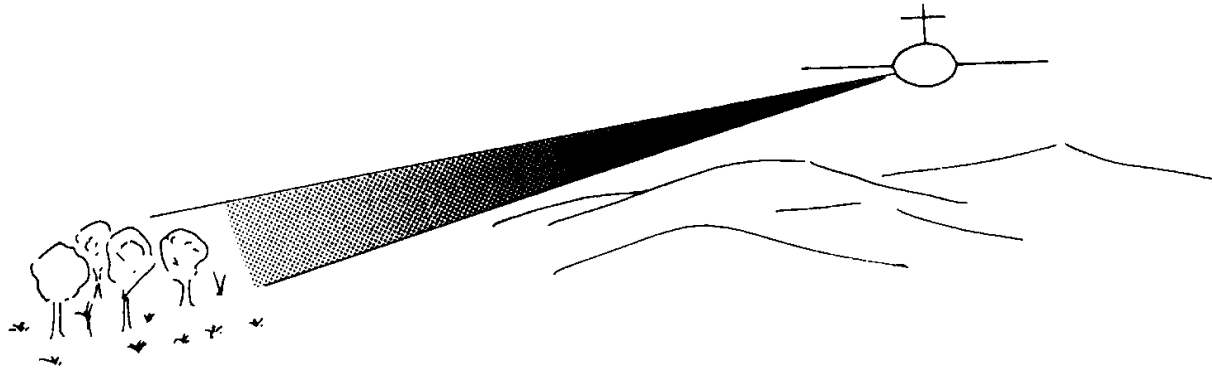
Principalement dans IR thermique (corps noir et gris $\sim 300\text{K}$).
Télédétection passive



Campbell, Introduction to RS, 2007

3. Utilisation du rayonnement émis par le capteur et réfléchi par la cible

Principalement radar et lidar (voir chapitres suivants).
Télédétection active.



Campbell, Introduction to RS, 2007

1. Pourquoi ne peut-on pas observer la surface terrestre entre 9.4 et 9.8 μm à partir d'un satellite alors que c'est possible à partir d'un avion ?
2. Pourquoi le ciel paraît-il bleu ? Pourquoi le soleil prend-il une teinte rouge-orangée lorsqu'il est près de l'horizon ?
3. Quels sont les 3 principaux types de source de REM pour la télédétection de la surface terrestre ?

Plate-forme = véhicule terrestre, aérien ou spatial capable de porter un capteur dans les conditions d'opération souhaitées.

1. Plates-formes terrestres (voisinage du sol jusqu'à qq m)
2. Plates-formes aériennes (altitude entre qq dizaines de m et 50 km)
3. Plates-formes spatiales (> 200 km)

Les plates-formes terrestres

Plates-formes mobiles

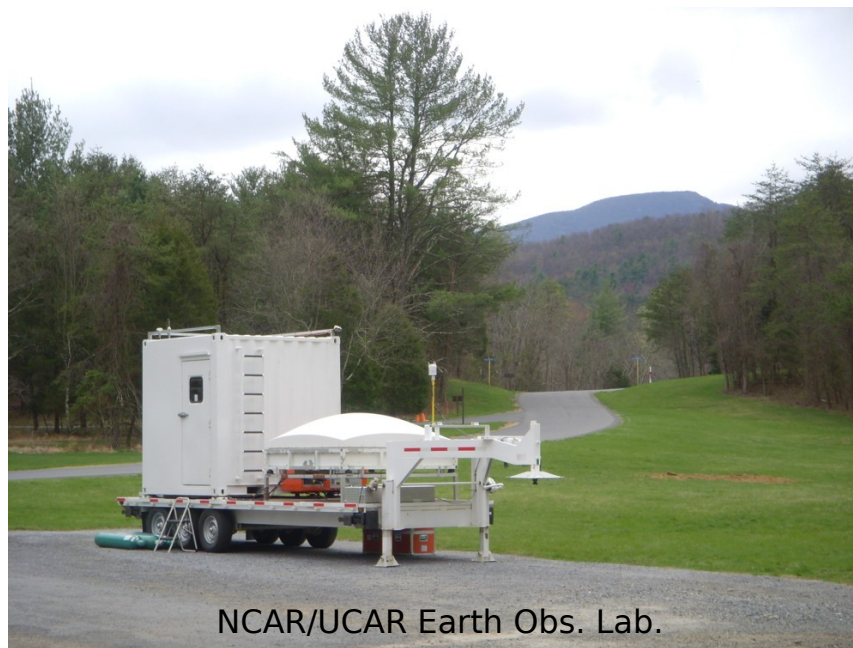
- Imagerie haute résolution sur domaine limité.
- Utilisées principalement à des fins d'expérimentation et d'étalonnage.
(par ex. des capteurs spatiaux)

Radiomètre



Brucker et al., 2017

Profileur de vent



NCAR/UCAR Earth Obs. Lab.

Les plates-formes terrestres

Plates-formes fixes

Réseaux (opérationnels) de capteurs : radars météo, profileurs vent...



Les plates-formes aériennes

Avions :

- + trajectoire contrôlée, charge importante.
- coûts, répétitivité difficile.

<https://www.vtg.admin.ch/en/einsatzmittel/luft/twin-otter.html>



Ballons : captifs ou libres

- + faible coût, altitude élevée (libres).
- charge limitée
- trajectoire non-contrôlée (libres).

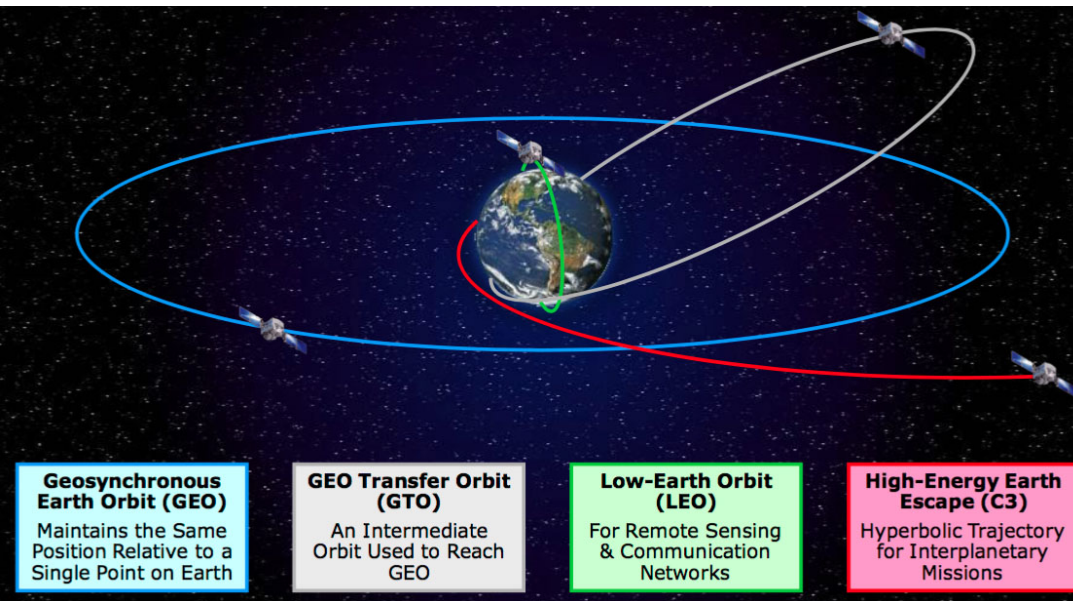
<https://radiosondemuseum.org/what-is-a-radiosonde/>



Les plates-formes spatiales

Satellites en orbite autour de la Terre.

Trajectoire = ellipse dont un des centres est le centre de la Terre.



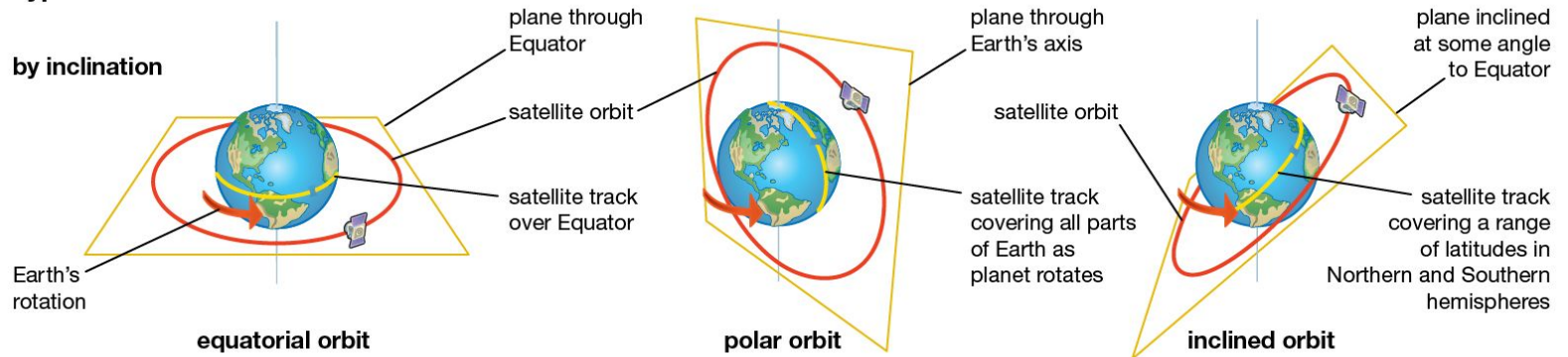
Déplacement décrit par lois de Kepler.
3e loi stipule :

$$T^2 = \frac{a^3 4\pi^2}{g(M + m)} = \frac{a^3}{K}$$

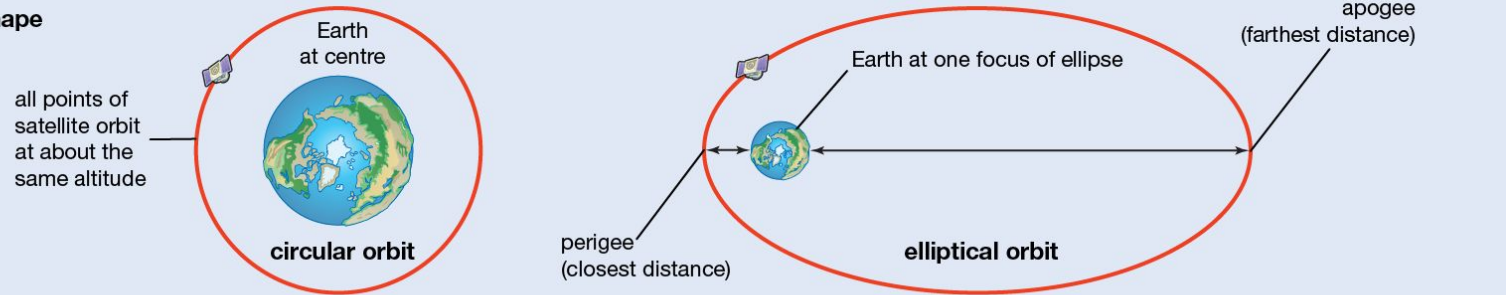
- T période de rotation [s]
a demi grand axe de l'ellipse [m]
g const. gravitation [$6.674 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$]
M masse du soleil ($\sim 2 \times 10^{30} \text{ kg}$)
M masse de la Terre ($\sim 6 \times 10^{24} \text{ kg}$)
K const de Kepler = $1 \times 10^{13} \text{ [s}^2 \text{m}^{-3}]$ (Terre)

Types of Earth orbit

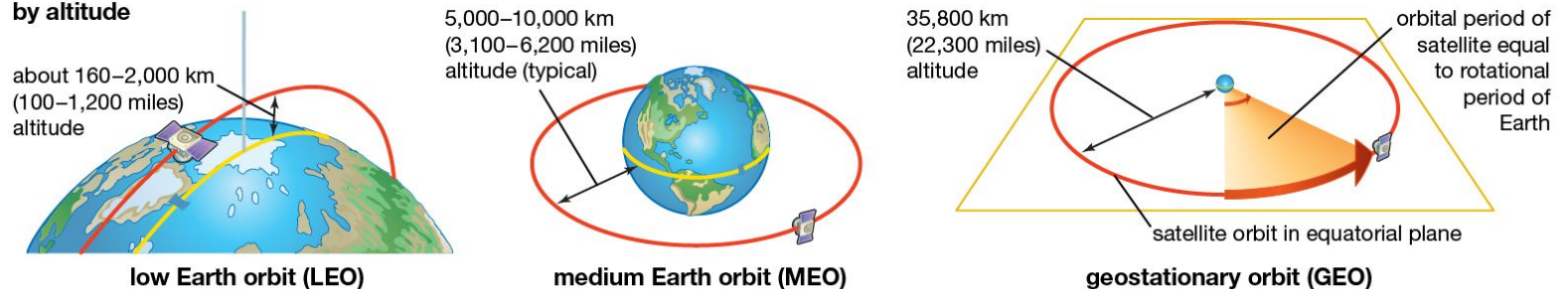
by inclination



by shape



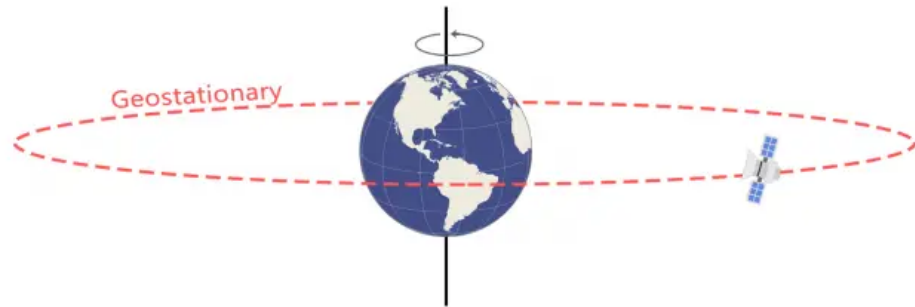
by altitude



Orbite géostationnaire

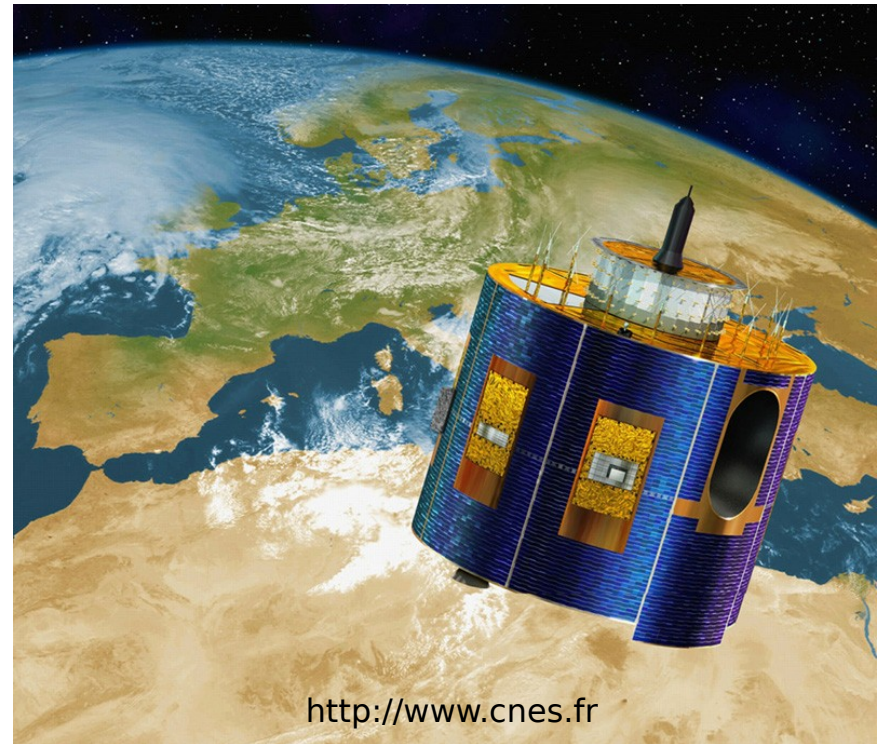
Le satellite reste au-dessus du même point de la surface terrestre.
Orbite équatoriale et circulaire (nécessairement).

Altitude $\sim 36'000$ km.



<https://gisgeography.com/geosynchronous-geostationary-orbits/>

Meteosat 2e génération



<http://www.cnes.fr>

Orbite circulaire

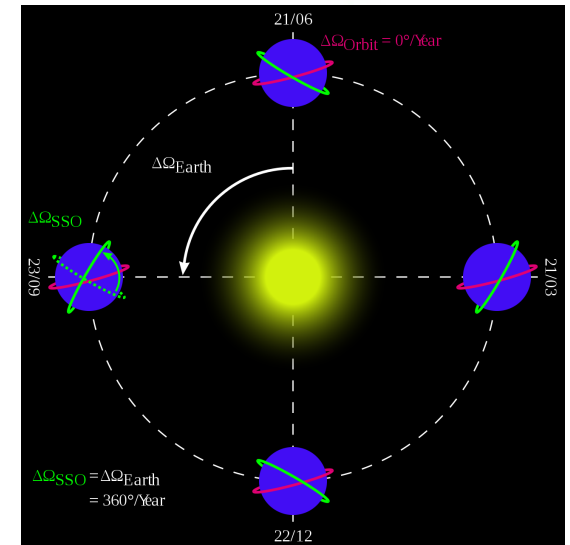
Altitude du satellite / Terre reste constante.
Possible inclinaison / plan équatoriale de la Terre.
Inclinaison $\sim 90^\circ \rightarrow$ **orbite polaire**.

Orbite héliosynchrone

Précession rétrograde $\sim 1^\circ$ / jour + orbite circulaire

\rightarrow plan orbital satellite \sim angle const / plan orbital Terre - Soleil.

\rightarrow satellite passe au-dessus d'un point donné à la même heure solaire locale ! **Important pour TD env !**
(alt : 300 et 1500 km, 700 km en moyenne)



Mission LANDSAT

LAND SATellite, initiée par NASA en 1972.

Landsat 9 (2021) :

- altitude ~ 705 km
- orbite circulaire quasi polaire (incli. $\sim 98,2^\circ$) héliosynchrone.

Un tour de la Terre = 98,9 min (14 révolutions par jour).

Un cycle orbital (passage au-dessus du même point) dure 16 jours.

Capteurs :

- Operational Land Imager (OLI-2) : 9 bandes de 0.43 à 1.39 μm
résolution de 30 m, domaine de 185x180 km².
- Thermal InfraRed Sensor (TIRS-2) : 2 bandes (10.6-11.2 et 11.5-12.5 μm).
rés. de 100 m, domaine de 185x180 km².

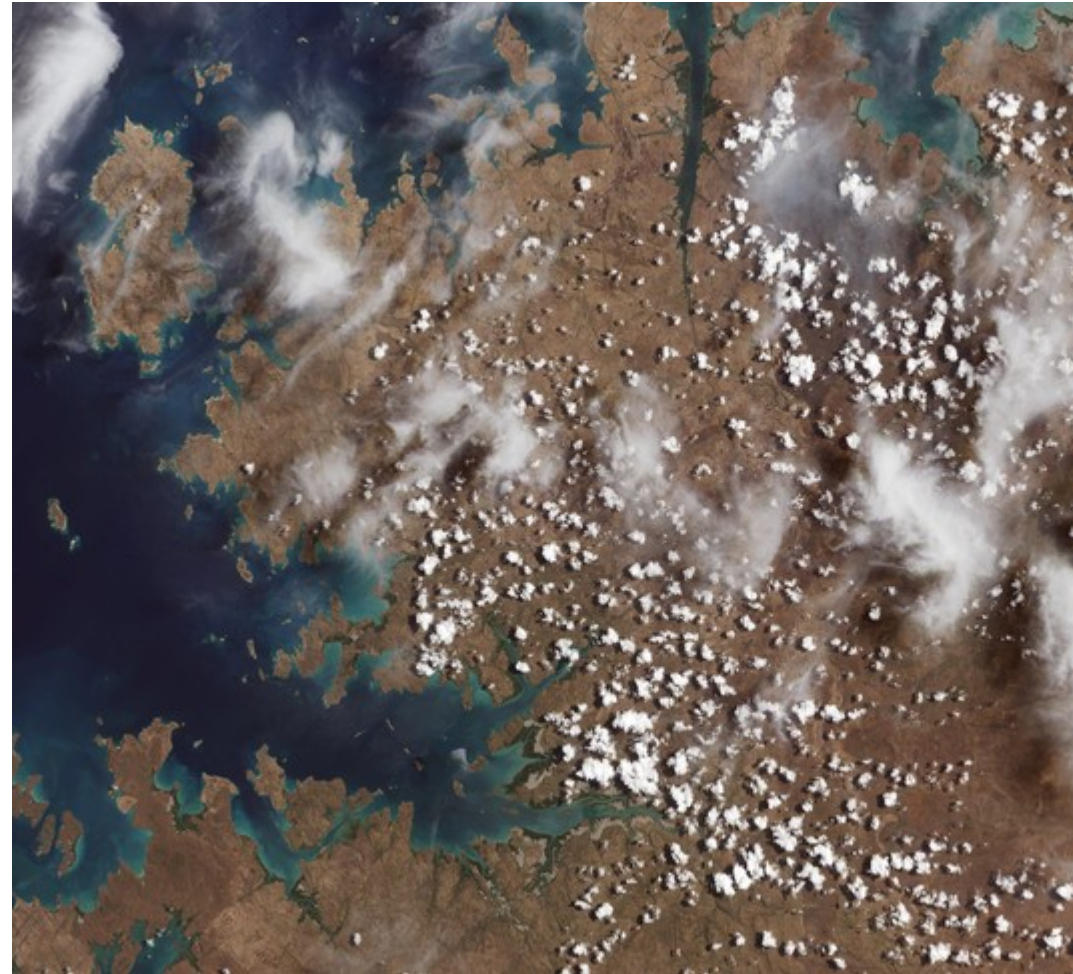
Plus d'info: <http://landsat.gsfc.nasa.gov>

Mission LANDSAT

LANDSAT 9 (2021)



<https://www.usgs.gov/media/images/rendering-landsat-9>



1re image collectée par OLI-2, 31/10/2021, Australie

Mission Meteosat

EumetSat (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites)

Meteosat-1 lancé en 1977 (meteosat first generation).

Meteosat-8 lancé en 2004 (meteosat second generation).

Meteosat-11 lancé en juillet 2015.

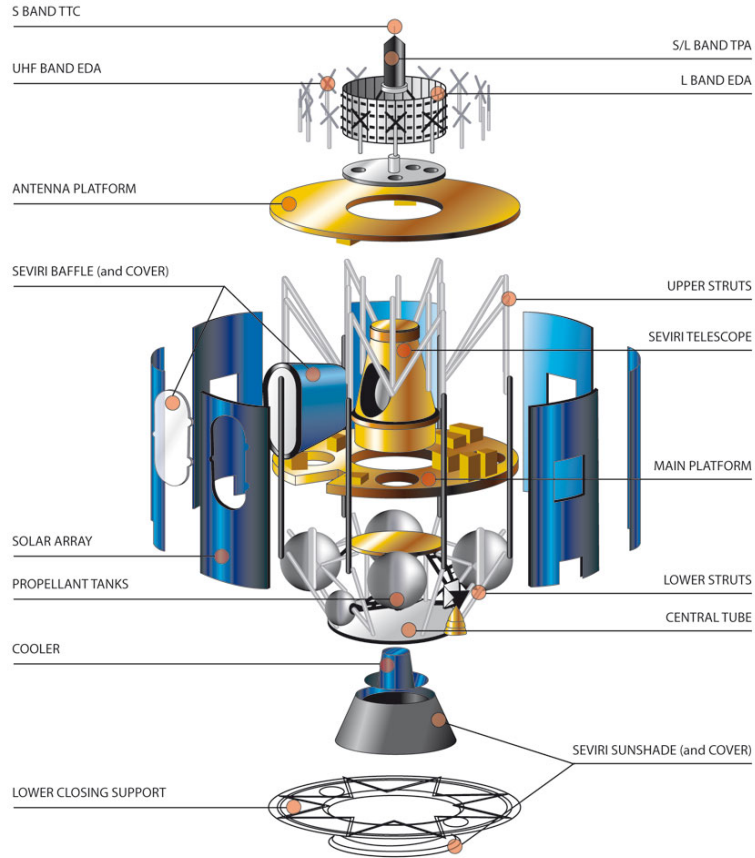
-orbite géostationnaire

Capteurs (visible et IR)

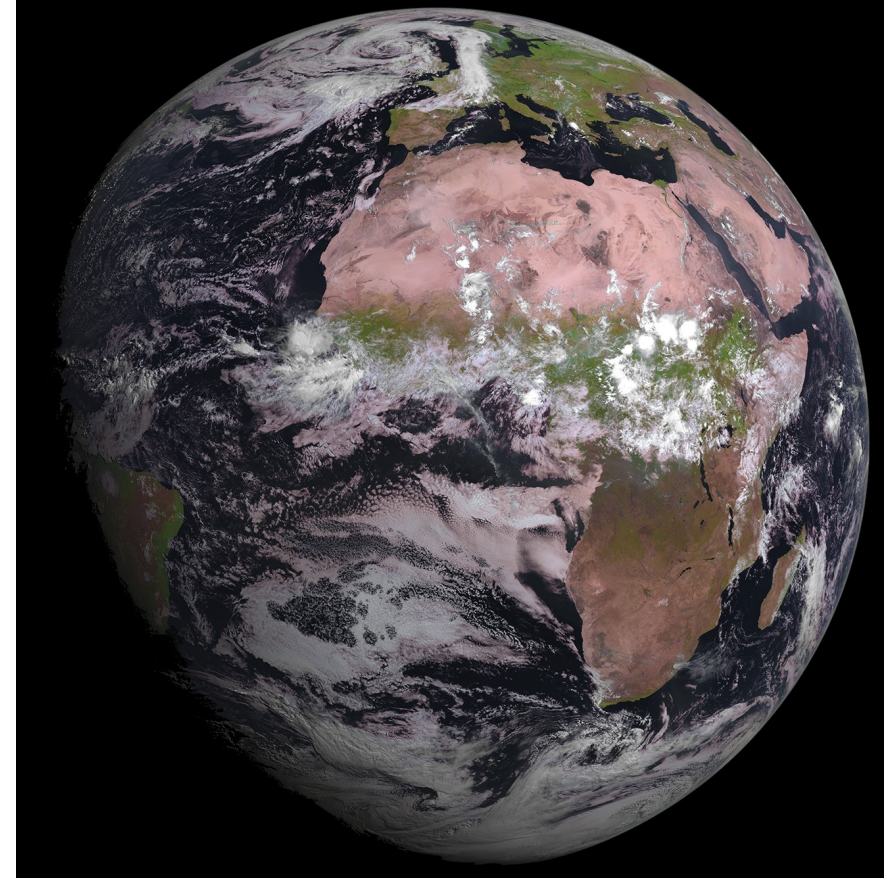
- Meteosat Visible and InfraRed Imager (MVIRI, Meteosat-7).
- Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager (SEVIRI).
- Geostationary Earth Radiation Budget (GERB) : radiomètre visible-infrarouge pour bilan de rayonnement terrestre.
- Search and Rescue signal repeater (SARR) : détection de signaux de détresse.

Mission Meteosat

MSG



Meteosat-11 , 04/08/2015



Mission Sentinel - Programme ESA (European Space Agency)

Sentinel 1 : 2 orbiteurs (Sentinel-1A, 2014, et Sentinel-1B, 2016)

- observation des océans et continents, **SAR 5.4 GHz**
- altitude ~ 693 km (séparés de 180°), résolution de 5×5 m² à 20×40 m²
- orbite circulaire quasi-polaire (incl. $\sim 98,18^\circ$) héliosynchrone.

Sentinel 2 : 2 orbiteurs (Sentinel-2A, 2015, et Sentinel-2B, 2017)

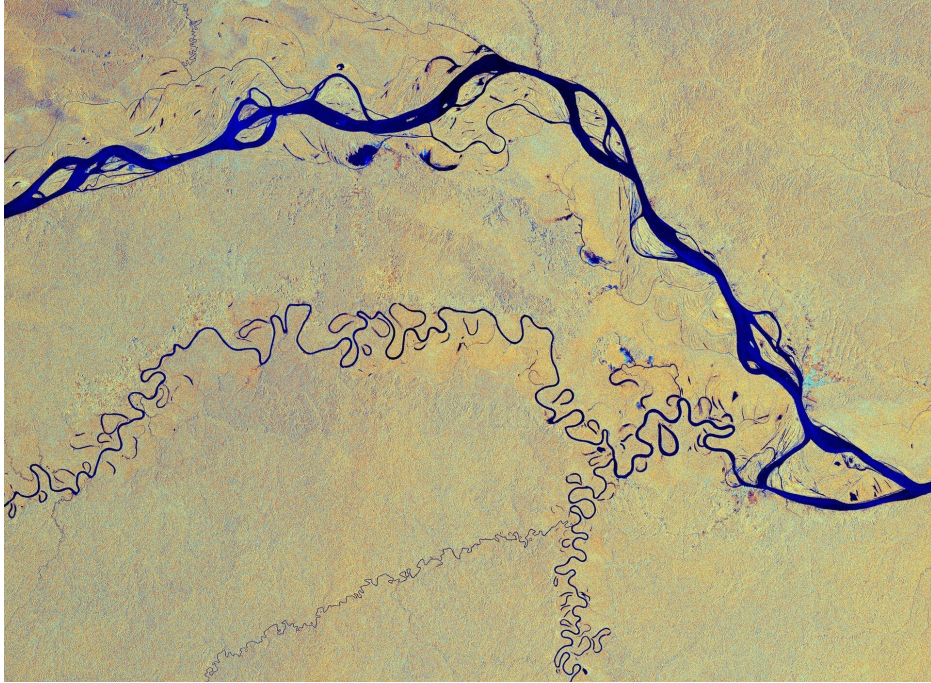
- observation surface des continents, **optique** (13 bandes spectrales)
- altitude ~ 786 km (séparés de 180°), résolution de 10×10 m² à 60×60 m²
- orbite circulaire quasi-polaire (incl. $\sim 98,56^\circ$) héliosynchrone.

Sentinel 3 : 2 orbiteurs (Sentinel-3A, 2016, et Sentinel-3B, 2018)

- observation topographie océans + température et couleurs, optique et MO
- altitude ~ 814.5 km (séparés de 140°)
- orbite circulaire quasi-polaire (incl. $\sim 98,65^\circ$) héliosynchrone.

Sentinel 6 lancé en nov 2020, 4 et 5 à venir.

Mission Sentinel



S1 : Amazone



S2 : éruption Etna (novembre 2023)

https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-x

x=1,2 ou 3

Mission ADM-Aeolus

Atmospheric Dynamics Mission - Aeolus (European Space Agency)

Aeolus lancé le 22 août 2018.

- altitude ~ 320 km.
- orbite circulaire quasi-polaire (incli. $\sim 97^\circ$) héliosynchrone.

Un tour de la Terre = 90 min (16 révolutions par jour).

Un cycle orbital dure 7 jours.

Capteur :

- ALADIN (Atmospheric Laser Doppler Instrument) : lidar Doppler pour la mesure des vents dans la basse atmosphère (< 30 km), à 355 nm (UV).

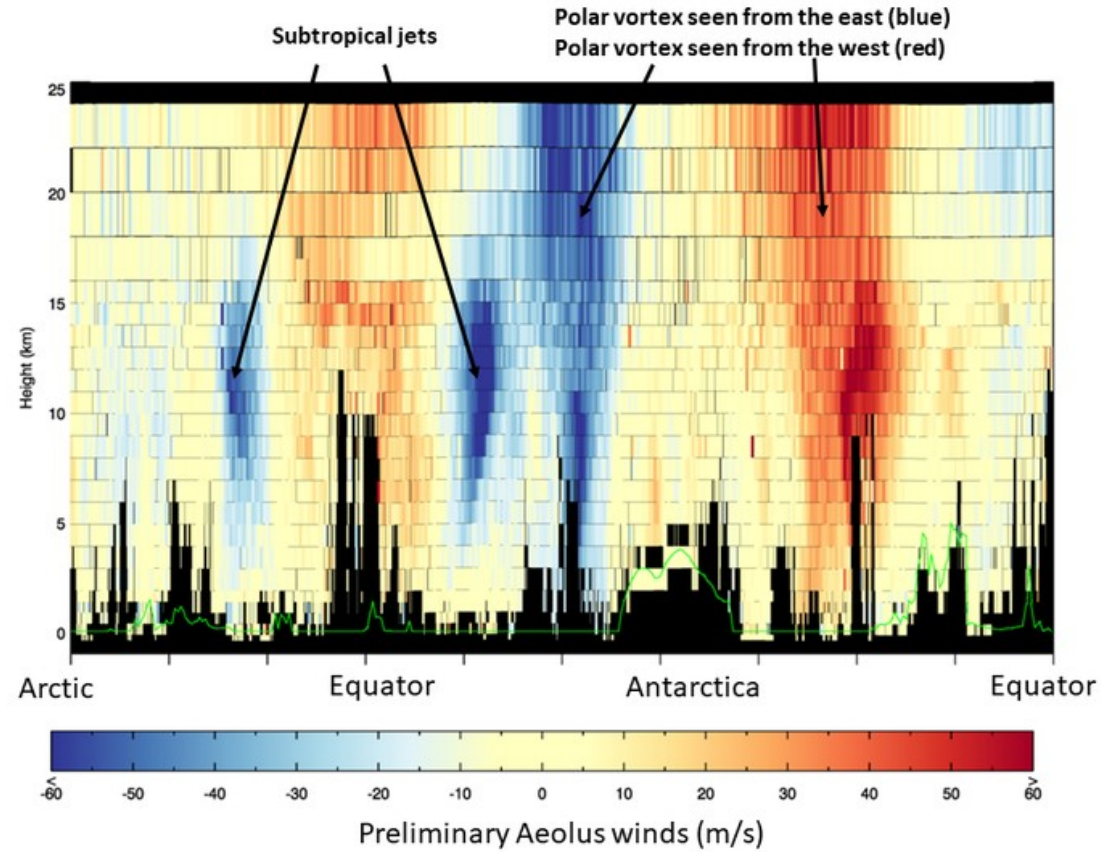
Pour plus d'infos :

https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Aeolus

Mission Aeolus



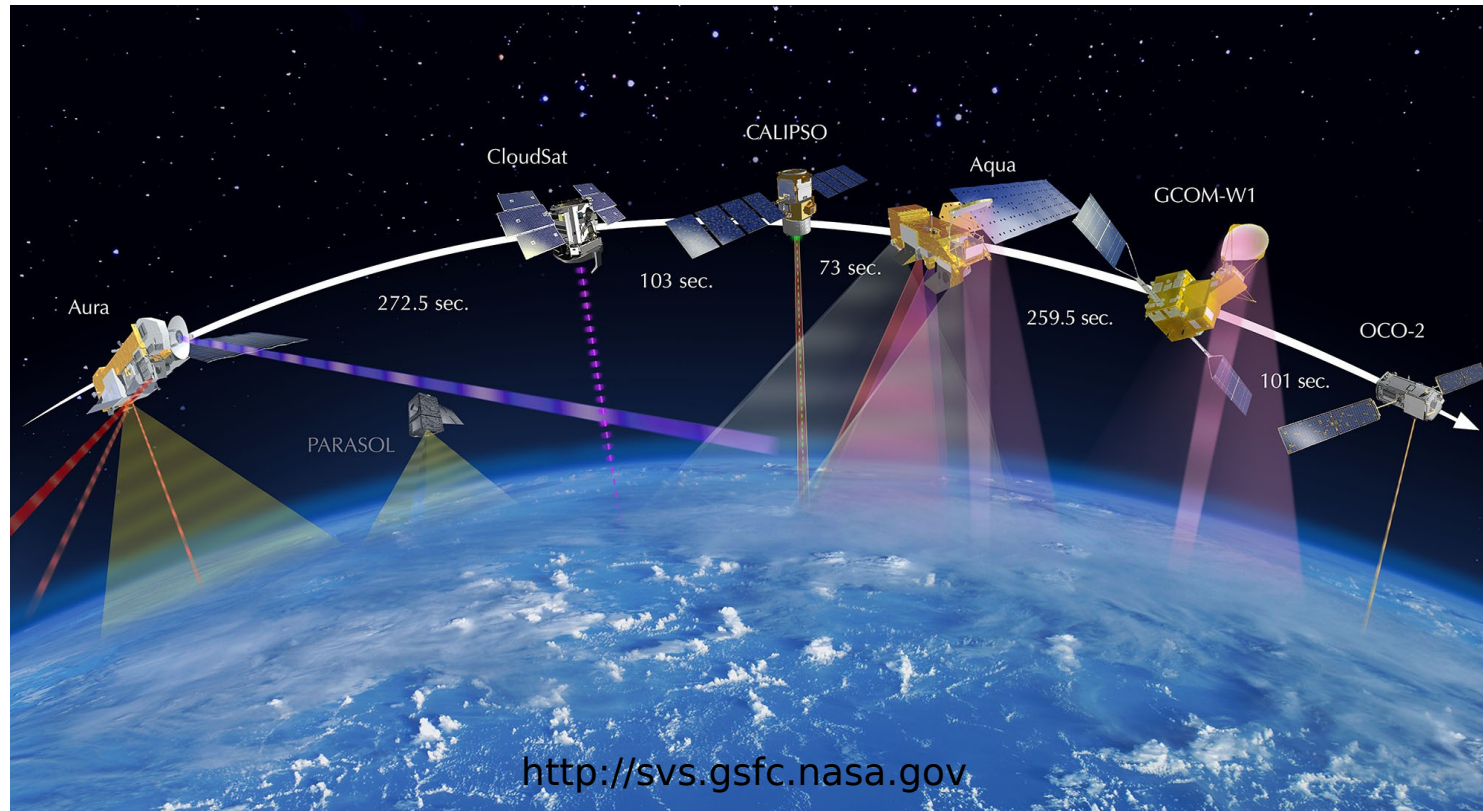
Source : ESA



Mission A-Train - NASA

Mission pour observation et étude du climat.

Constellation de 7(4) satellites se suivant de qq dizaines de s !



Mission A-Train

AQUA : observation de l'atmosphère et des océans.

AURA : observation de la chimie atmosphérique.

CALIPSO : observation des aérosols et des nuages. Changement orbite 2018

CLOUDSAT : observation des nuages. Changement orbite 2018. Arrêt déc 2023

GCOM-W1 : observation de la circulation de l'eau (océans, atm., cont.)

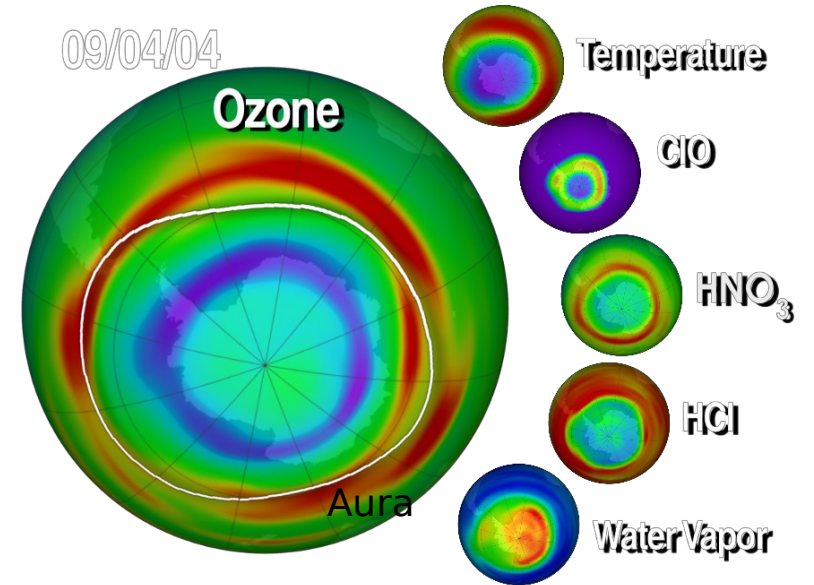
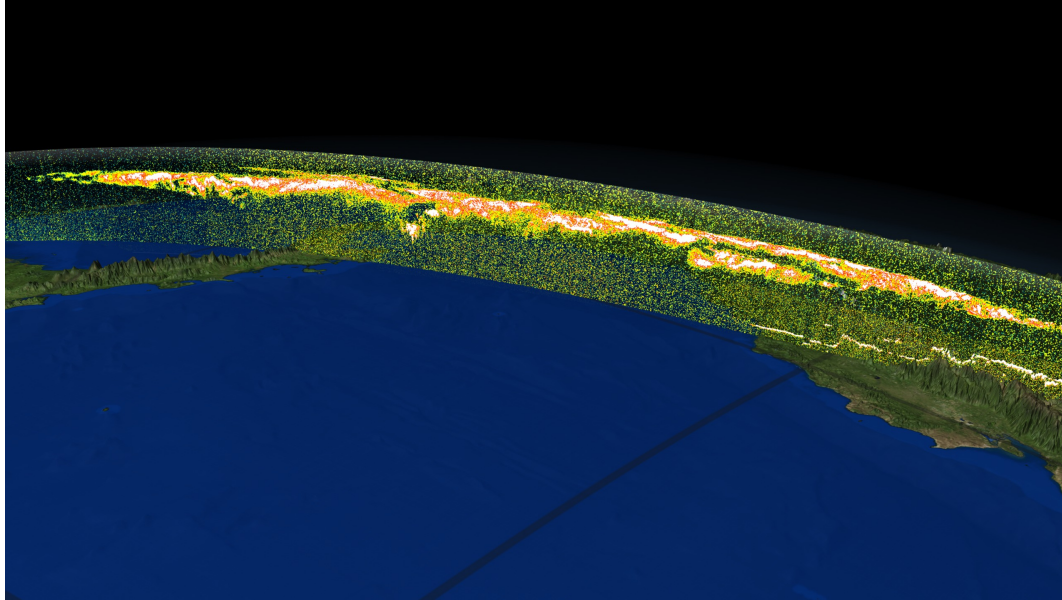
OCO2 : observation concentration CO₂ dans l'atmosphère.

PARASOL : observation de la microphysique des nuages et des aérosols.
(changement orbite 2009, arrêt 2013)

OCO : observation concentration CO₂ dans l'atmosphère. Détruit 24.02.2009.

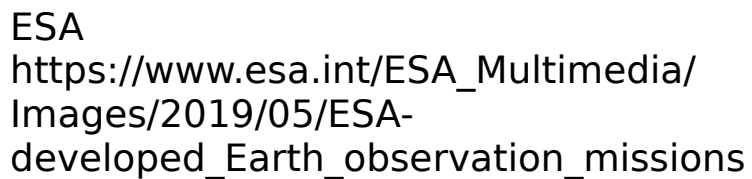
GLORY : observation des aérosols dans l'atmosphère. Détruit 4.03.2011.

Calipso "curtain"



<http://svs.gsfc.nasa.gov>

NASA
<https://svs.gsfc.nasa.gov/30065>



1. Expliquez le principe de fonctionnement d'une orbite héliosynchrone et d'une orbite géostationnaire.
2. Pourquoi les orbites des satellites dédiés à l'observation de la Terre sont, en général, beaucoup plus basses que celles des satellites dédiés aux télécommunications ?

1. Ondes électromagnétiques

a) Définition : amplitude, fréquence/période, vitesse phase/groupe, long. d'onde, phase, polarisation ; spectre électromagnétique.

b) Propagation : - rayonnement d'un corps noir (Stefan-Boltzmann, Planck, Wien...)
- absorption, réflexion, transmission, diffusion + interférences, diffraction, réfraction
- interface de 2 milieux : Snell-Descartes, Brewster

2. Interactions avec la surface

a) Bilan radiatif/énergie, rayonnement net.

b) Sol, eau, végétation dans le visible, infrarouge et micro-onde.

3. Interactions avec l'atmosphère

a) Absorption, diffusion par gaz atmosphériques et aérosols.

b) Définition des fenêtres atmosphériques pour l'observation de la surface.

4. Plateformes pour la télédétection environnementale

Terrestre (étalonnage, obs. atm.), aérienne (ballon ou avions), spatiale (orbites, ex. missions).