

A satellite with gold-colored panels and a central circular antenna is shown in orbit above the Earth's blue and white cloud-covered surface. The satellite is oriented towards the viewer, with its solar panels extended.

# Cours Télédétection 1

Pour les étudiants de 2<sup>ème</sup> année Topographie  
et Géomatique

**Dr SADOUNI Salheddine**

# **Chapitre 1**

## **Introduction à la photo-interprétation et à la Télédétection**

# LA TÉLÉDÉTECTION : DÉFINITIONS

- Le mot télédétection (en anglais « *remote sensing* ») désigne l'ensemble des **techniques** qui permettent d'étudier **à distance** des **objets ou des phénomènes**.
- Le néologisme « *remote sensing* » fait son apparition aux **Etats-Unis** dans les **années soixante**, lorsque des **capteurs nouveaux** viennent compléter la traditionnelle **photographie aérienne**.
- Le terme de **télédétection** a été introduit officiellement dans la langue **française en 1973** et sa définition officielle est la suivante :

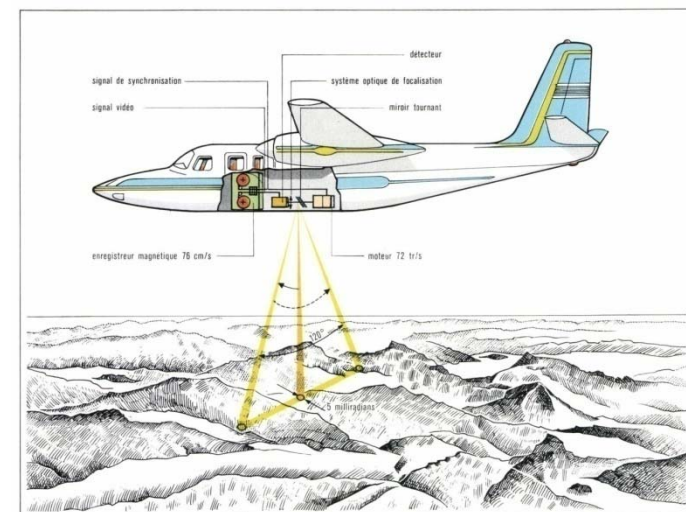
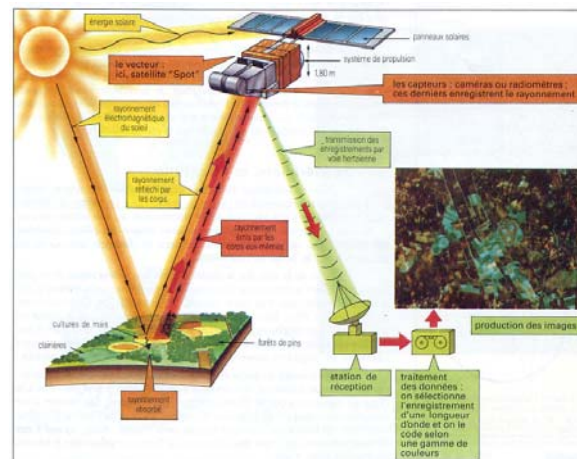
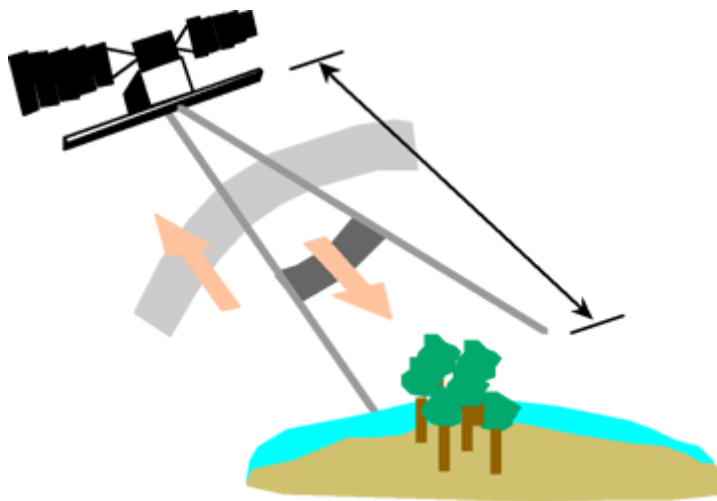


Schéma de fonctionnement d'un balayeur.

# Définition officielle

- Ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci.
- *Commission interministérielle de terminologie de la télédétection aérospatiale, 1988.*
- Selon cette définition très vaste, la télédétection peut se pratiquer de la surface de la Terre vers l'atmosphère ou vers l'espace,
- comme de l'espace vers la Terre,
- l'astronomie utilise largement la télédétection.



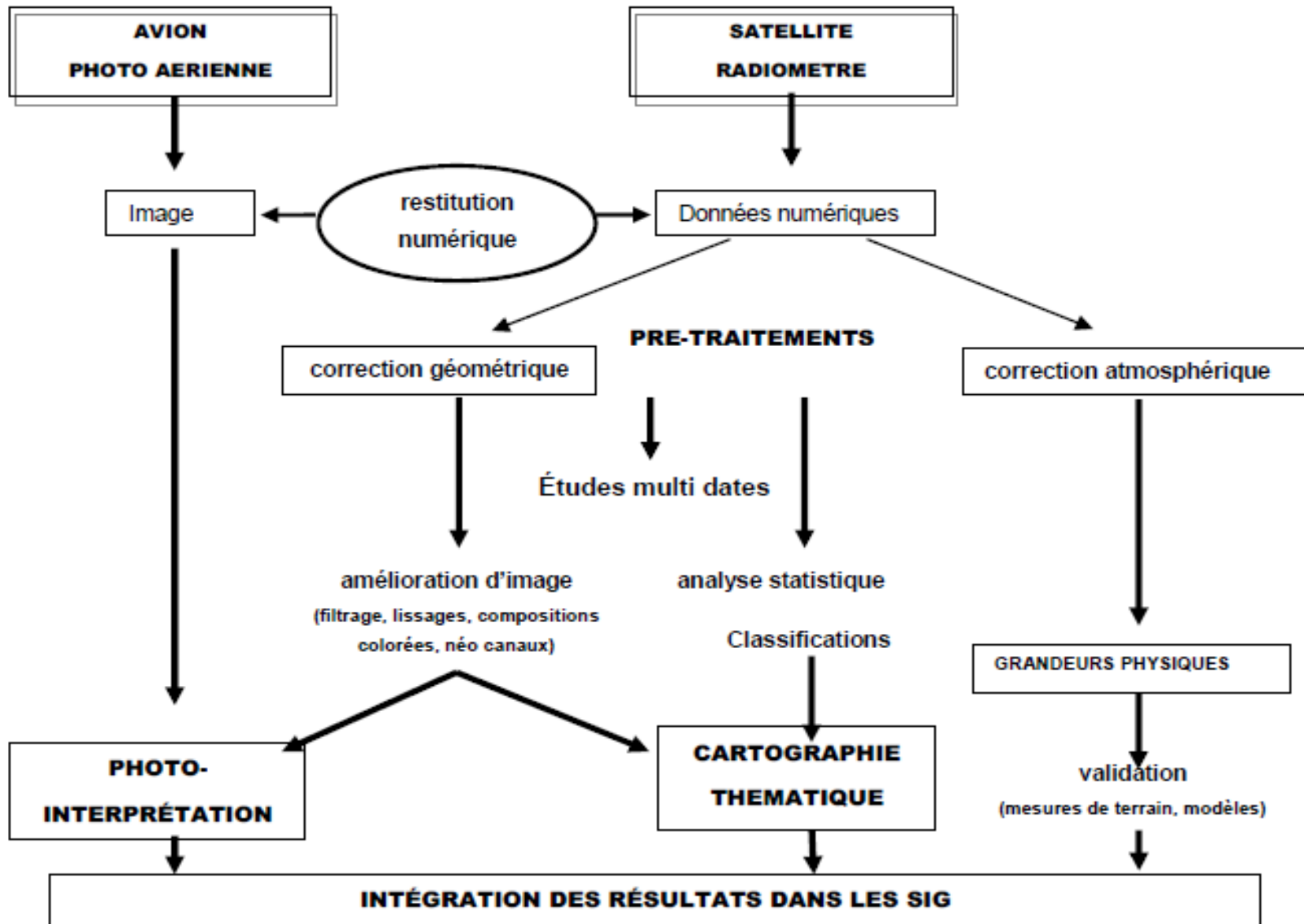
# Ce Cours

- ce cours concerne plus précisément les techniques de la
- *téledétection aérospatiale*, qui a pour but l'étude de la
- *surface de la Terre*,
- *des océans*
- *et de l'atmosphère*
- à partir d'avions, de ballons ou de satellites,
- en utilisant les :
- propriétés du *rayonnement électromagnétique*
- *émis*,
- *réfléchi*
- *ou diffusé par les corps ou surfaces que l'on étudie.*

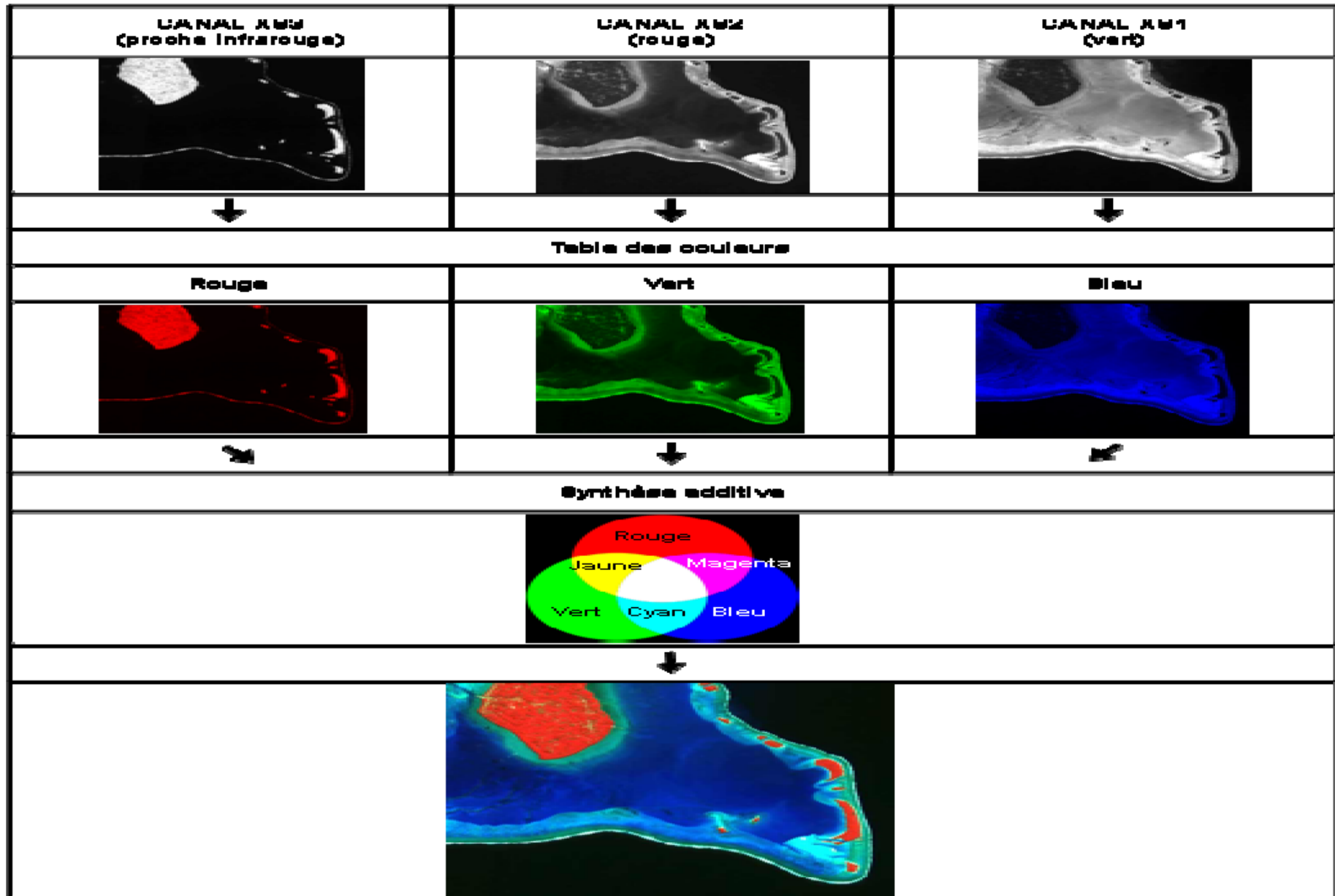
# définition plus précise

- La télédétection est l'ensemble des techniques qui permettent, par **l'acquisition d'images**, d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre (y compris l'atmosphère et les océans), **sans contact direct avec celle-ci**.
- La télédétection englobe tout le processus qui consiste à
- **capter et enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi,**
- **à traiter et analyser l'information qu'il représente,**
- pour ensuite **mettre en application** cette information.

# Analyser l'information et mise en application des informations de la Télédétection



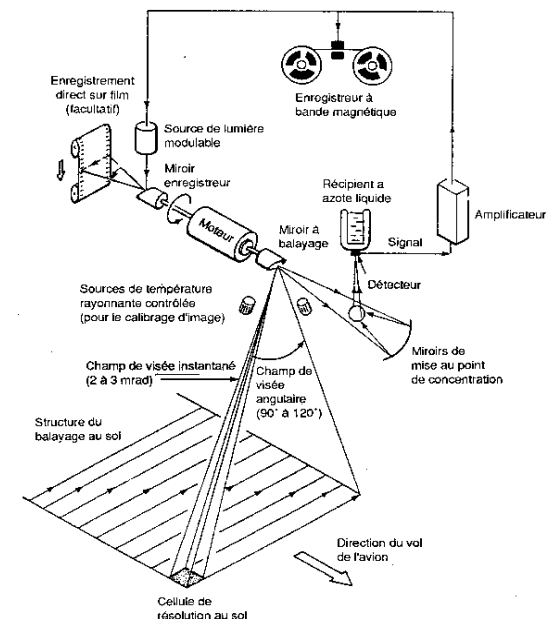
# Principe de la composition colorée pour un capteur satellite à trois bandes spectrales





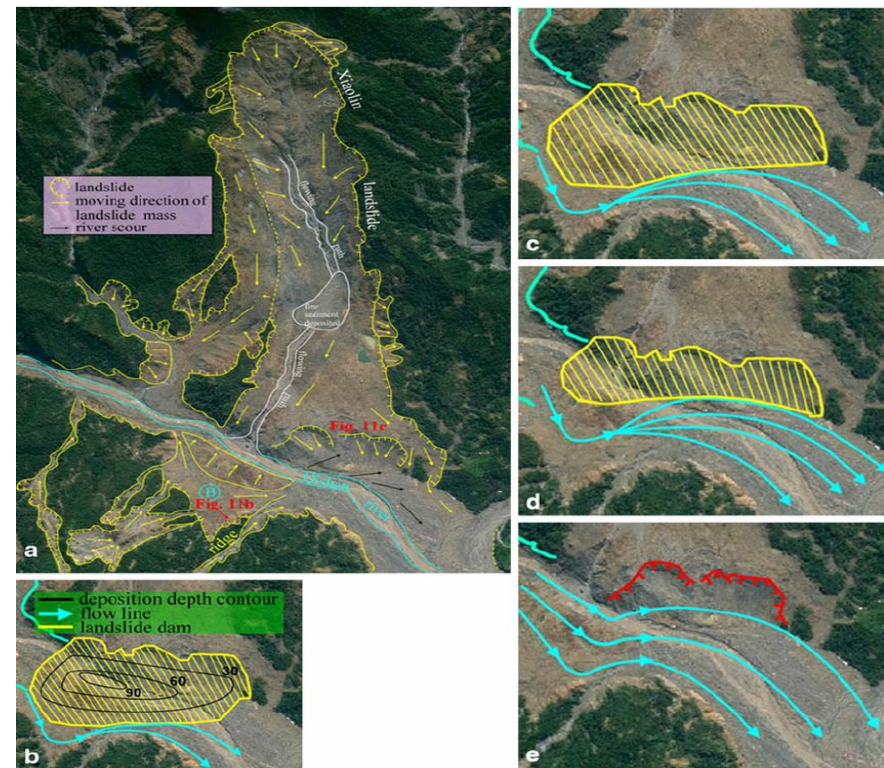
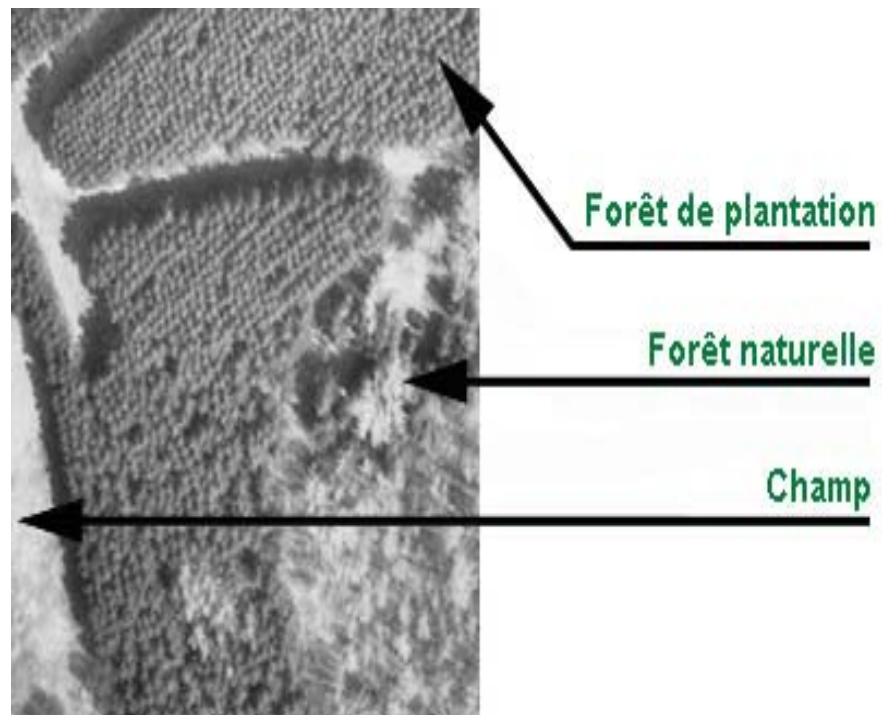
# Le développement des techniques de la télédétection

- Le développement des techniques de la télédétection résulte de la conjonction entre
- l'invention des **vecteurs: ballons, avions ou satellites**, permettant de s'éloigner de la surface du sol ou de la Terre dans son ensemble,
- et le constant **perfectionnement des capteurs**, c'est à dire des appareils permettant d'enregistrer le rayonnement électromagnétique
- Pour **reconstituer les caractéristiques**
- de la surface (terre ou océan),
- ou de l'atmosphère.



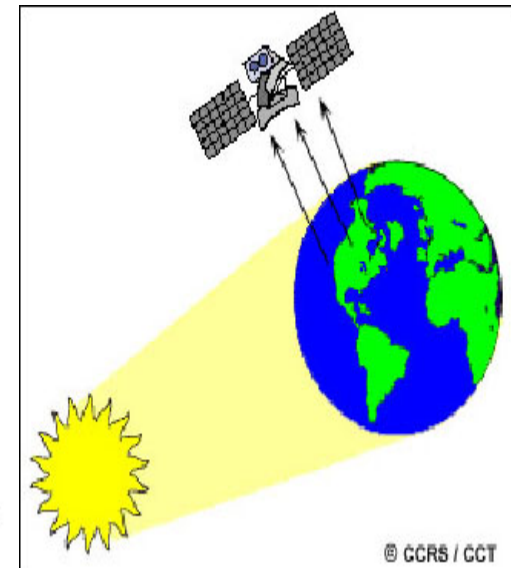
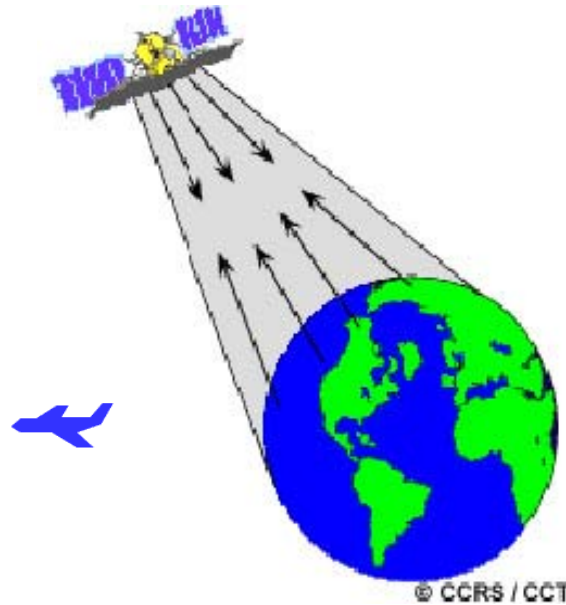
# Les Capteurs

- Jusqu'il y a environ 30 ans, le principal capteur utilisé était l'appareil **photographique**,
- un capteur **analogique utilisant des émulsions chimiques photosensibles** (sensibles à la lumière visible essentiellement)
- pour produire des photographies aériennes ; l'utilisation de la télédétection se confondait alors avec la **photo-interprétation**, *interprétation visuelle des documents photographiques*.



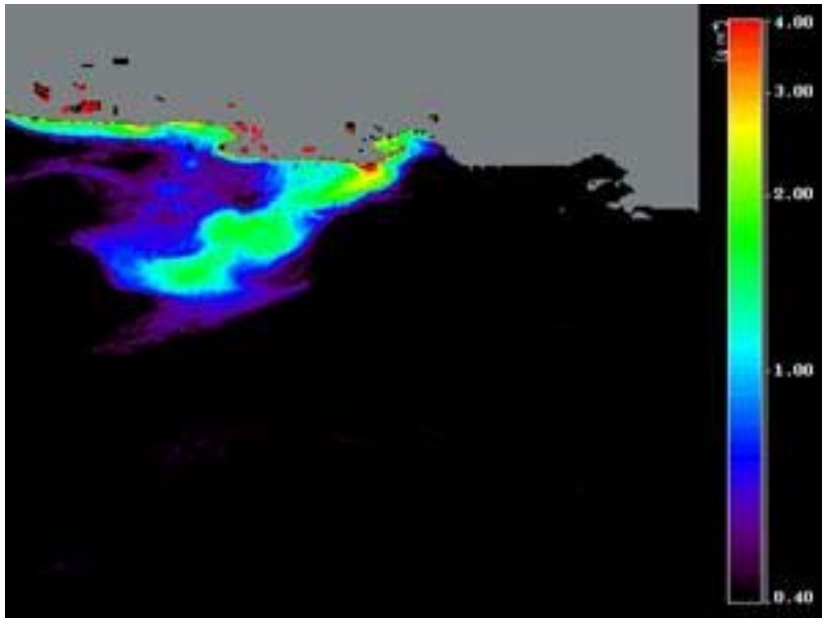
# Capteurs actifs passifs

- Les types de capteurs se sont depuis multipliés et perfectionnés :
- les *radiomètres* sont des *capteurs passifs*, qui *enregistrent le rayonnement naturel*,
- *lumière visible*
- *infrarouge*
- *microonde, sous forme numérique* ;
- les *capteurs actifs* (radars) émettent artificiellement un rayonnement pour en *étudier les interactions avec l'objet à étudier*.



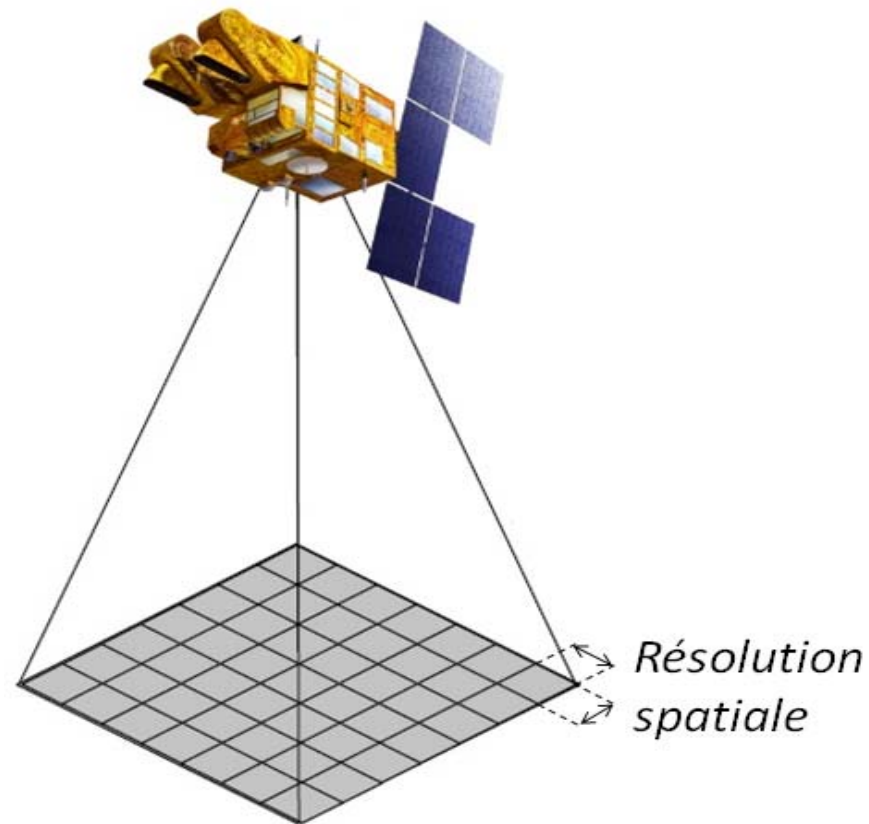
# Capteur Numérique

- Les capteurs actuels produisent des **données numériques**, qui peuvent faire **l'objet d'une restitution** pour fournir des **documents à interpréter** selon les méthodes de **la photo interprétation**,
- mais sont de plus en plus l'objet **d'un traitement informatique** aboutissant à la **cartographie automatique des surfaces**,
- soit **en fin de calibrations** et **de corrections** qui permettent d'obtenir des mesures **géophysiques telles que des températures**



# *résolution spatiale*

- Ces nouveaux capteurs sont en constant développement depuis leur apparition ; la caractéristique de ces capteurs qui a connu l'amélioration la plus spectaculaire
- est la *résolution spatiale*, c'est à dire leur capacité à discerner des portions de la surface terrestre de plus en plus petites.



# Applications de la télédétection

- les applications de la télédétection se sont multipliées, dans de nombreux domaines
- la météorologie
- la climatologie
- l'océanographie
- la cartographie
- de la géographie.
- Quel que soit le domaine d'application considéré, une **bonne interprétation des documents** de télédétection ou **une bonne utilisation des données numériques** nécessite
- la **compréhension des principes physiques** sur lesquels est fondée la technique de télédétection employée.

# Objectif du cours

- Le but de ce cours est :
- de fournir une **présentation de ces principes** s'adressant à des **non-physiciens**, c'est à dire
- dépouillée au maximum de l'appareil des formules physiques mais en conservant dans la mesure du possible toute la **rigueur nécessaire**.
- de fournir aux **utilisateurs que sont**
  - **les géographes,**
  - **les gestionnaires de l'environnement ou**
  - **les aménageurs,**
- **une introduction aux méthodes d'utilisation de traitement** des données de télédétection, à partir d'exemples simples.

# HISTORIQUE DE LA TÉLÉDÉTECTION

## de 1856 à la première guerre mondiale

- L'histoire des techniques de la télédétection peut être découpée en **cinq grandes époques** :
- de **1856**, date à laquelle, pour la première fois, **un appareil photographique a été installé de façon fixe à bord d'un ballon**, à la **première guerre mondiale**,
- se déroule **l'époque des pionniers**, pendant laquelle sont explorées les possibilités de la photographie aérienne verticale pour la cartographie ;
- les **lois fondamentales de la stéréoscopie** et de la
- **photogrammétrie** sont découvertes à la fin du XIXe siècle.



# HISTORIQUE DE LA TÉLÉDÉTECTION.

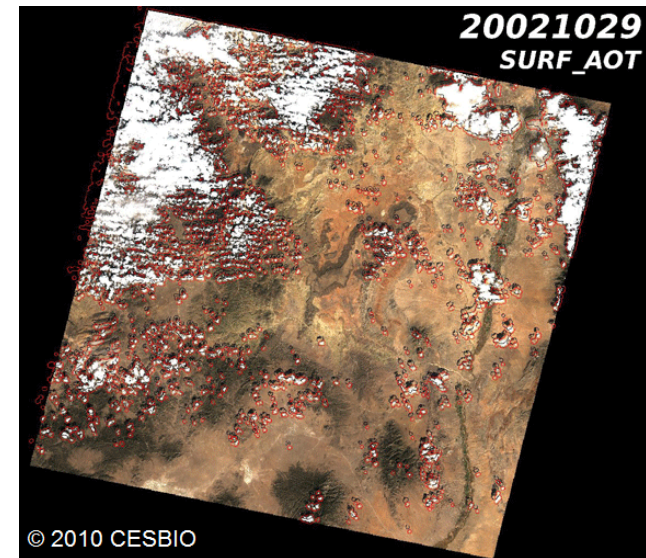
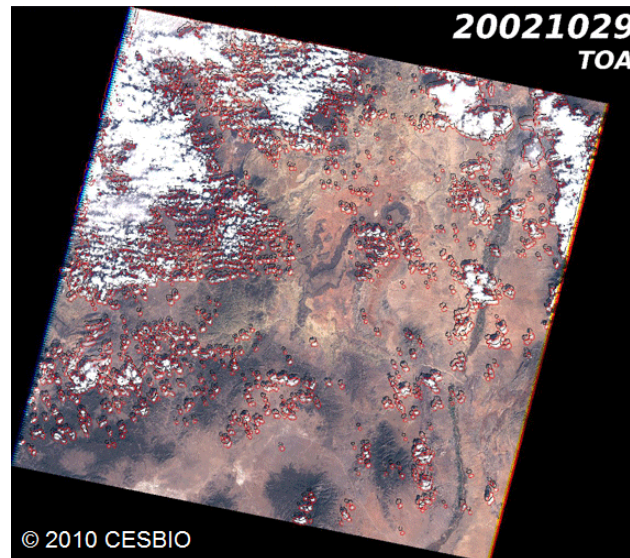
de la première guerre mondiale à la fin des années 50

- la photographie aérienne devient un outil opérationnel pour:
  - **la cartographie,**
  - **la recherche pétrolière,**
  - **la surveillance de la végétation.**
- On assiste à un progrès continu de:
  - **l'aviation,**
  - **appareils photographiques**
  - **émulsions** (couleur, infrarouge noir et blanc, infrarouge fausse couleur).
  - Les méthodes de la **photo-interprétation** sont **précisées et codifiées.**



# de 1957 à 1972

- **l'exploration de l'Espace et l'avènement de la télédétection actuelle.**
- **Le lancement des premiers** satellites et vaisseaux spatiaux habités à bord desquels sont embarqués des caméras, **révèle l'intérêt de la télédétection** depuis l'espace.
- Parallèlement, les **radiomètres-imageurs** sont mis au point et perfectionnés, de même que les premiers **radars embarqués à bord d'avions.**
- La première **application opérationnelle de la télédétection spatiale** apparaît dans les années 60 avec les **satellites météorologiques** de la série ESSA.



# 1972

- le lancement en 1972 du **satellite ERTS (Landsat 1)**, **premier satellite de télédétection des ressources terrestres**, ouvre l'époque de la **télédétection moderne**.
- Le **développement constant des capteurs** et des **méthodes de traitement des données numériques**
- ouvre de plus en plus le champ des applications de la télédétection
- en fait **un instrument indispensable de gestion de la planète**, et, de plus en plus, un **outil économique**.

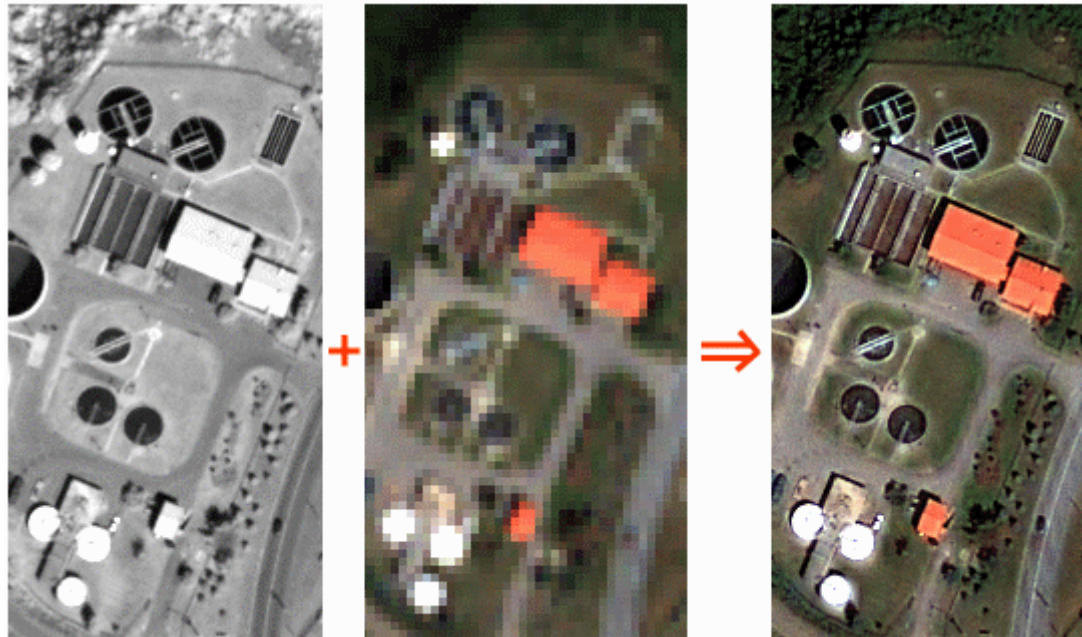
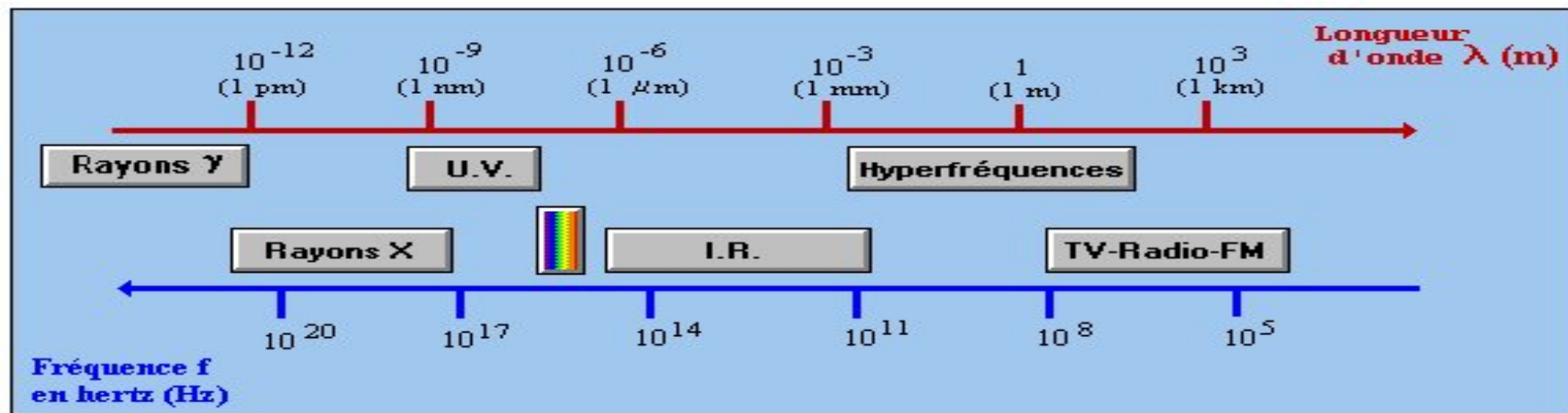


Image Source: ©2004 DigitalGlobe, Inc. All RIGHTS RESERVED

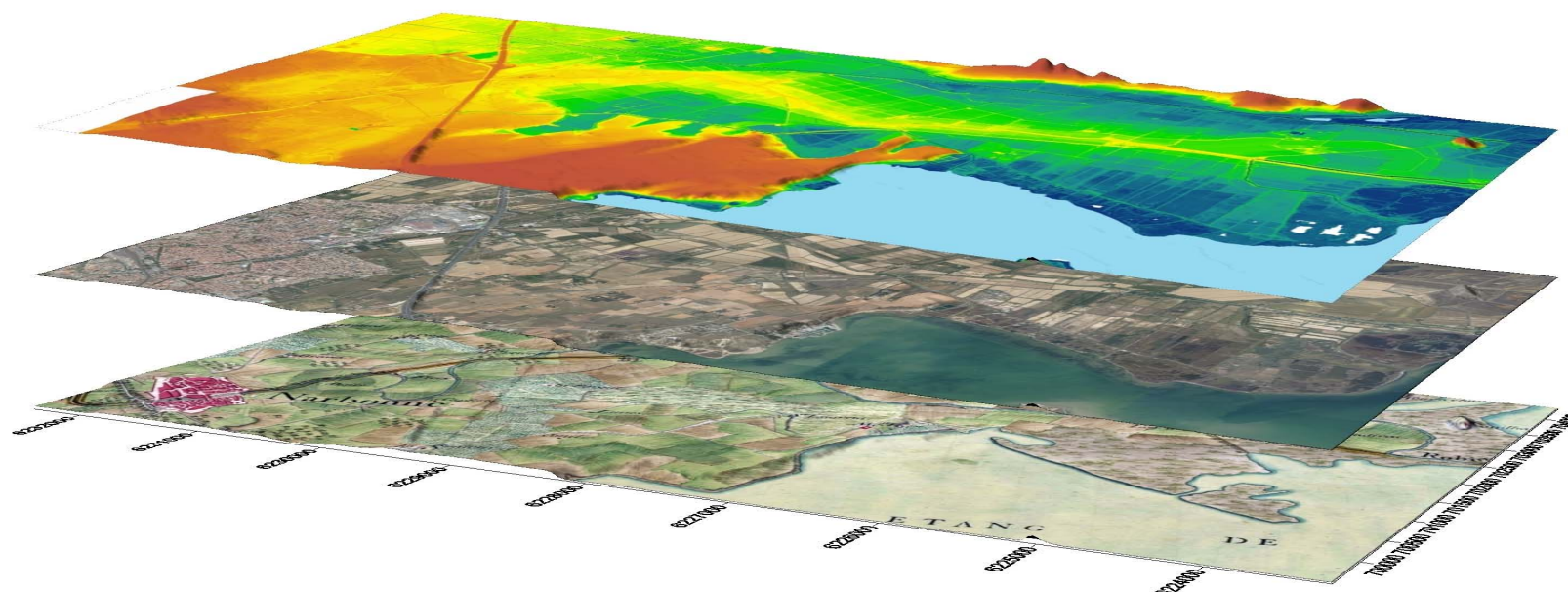
# Depuis Les années 70

- depuis les années 70, on assiste à un développement continu de la télédétection, marqué
- notamment par :
- l'augmentation de la résolution spatiale des capteurs
- la diversification des capteurs qui utilisent des domaines de plus en plus variés et spécialisés du spectre électromagnétique.
- Dans les années 90, on assiste ainsi à la
- multiplication des satellites équipés de capteurs actifs, radars en particulier.
- Dans le domaine du rayonnement visible et infrarouge, les capteurs à très haute résolution spectrale sont aujourd'hui d'utilisation courante dans leur version aéroportée et font leur apparition à bord de satellites.



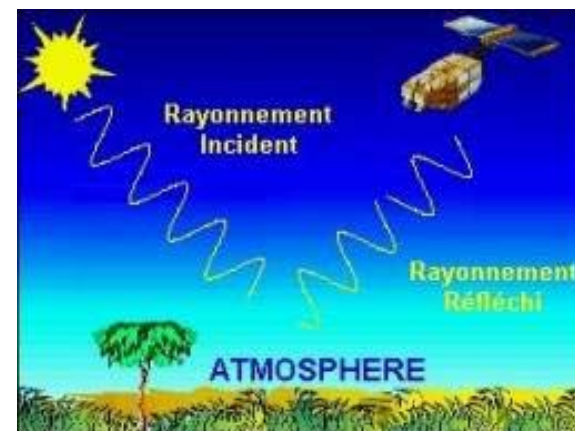
# La démocratisation de la télédétection

- la diffusion des données sur **une base commerciale**, envisagée dès le lancement du programme **SPOT en 1986**,
- aujourd'hui le lancement de **satellites de télédétection** par des **sociétés privées**.
- **Les données de télédétection** deviennent l'objet d'un marché concurrentiel.
- La diffusion accélérée et **l'augmentation de la puissance des ordinateurs** contribue de façon continue à promouvoir de **nouvelles méthodes d'utilisation des données**
- **les données des satellites météorologiques et océanographique** sont aujourd'hui un auxiliaire indispensable de **la prévision numérique du temps et du climat**.
- **Les images de télédétection destinées à l'observation fine** de la surface terrestre, y compris les photographies aériennes traditionnelles, sont, **sous forme numérique, intégrées aux Systèmes d'Information Géographique**.



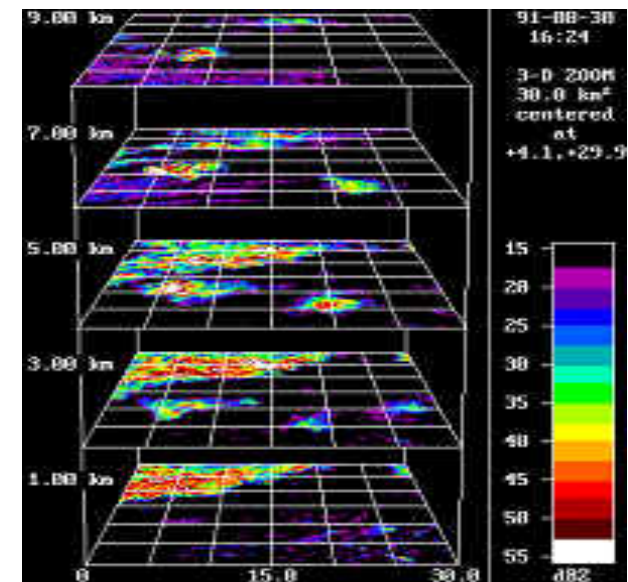
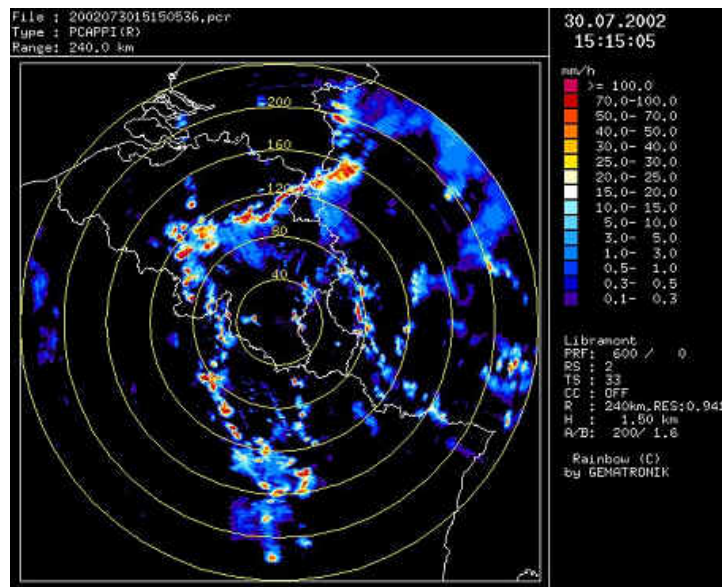
# LES DOMAINES D'APPLICATION DE LA TELEDETECTION.

- Le premier grand domaine d'application de la télédétection a été **l'étude de l'atmosphère** (météorologie et climatologie).
- L'intérêt de la télédétection dans ce domaine est d'assurer une *couverture globale et très fréquemment répétée de la planète entière*
- **Les satellites en orbite géostationnaire, à 36000 km de la Terre,** permettent d'obtenir une image couvrant près d'un cinquième de la surface terrestre toutes les demi-heures ;
- **cinq satellites de ce type assurent une couverture globale de l'atmosphère terrestre, à l'exception des pôles.**
- Ce système est complété par **des satellites en orbite polaire, à 900 km d'altitude,** qui offrent plus de précision.



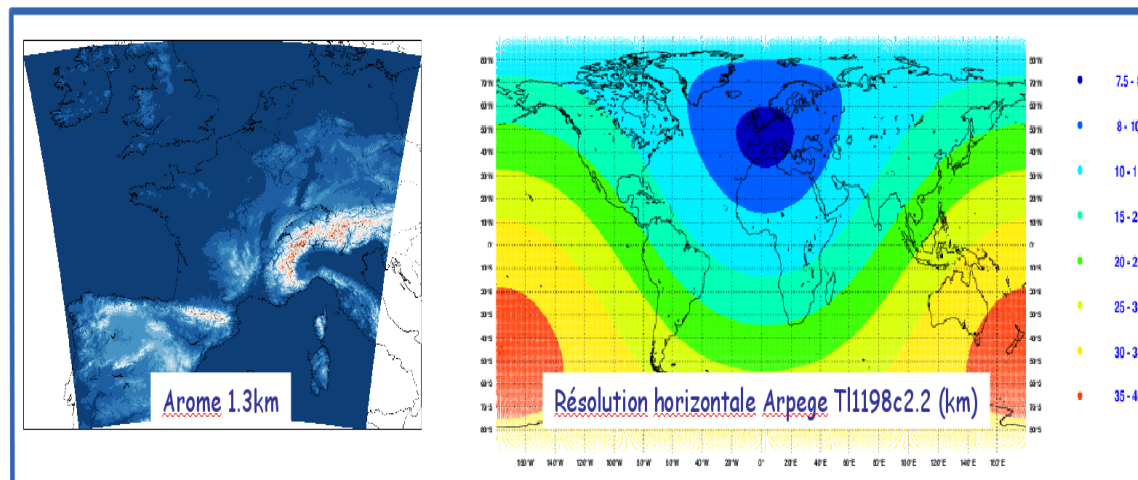
# La météorologie et étude de l'atmosphère

- Les capteurs utilisés permettent d'observer :
- les nuages et leur déplacement
- de mesurer les températures
- le contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère.
- D'analyser la stratosphère (ozone)



# Océanographie,

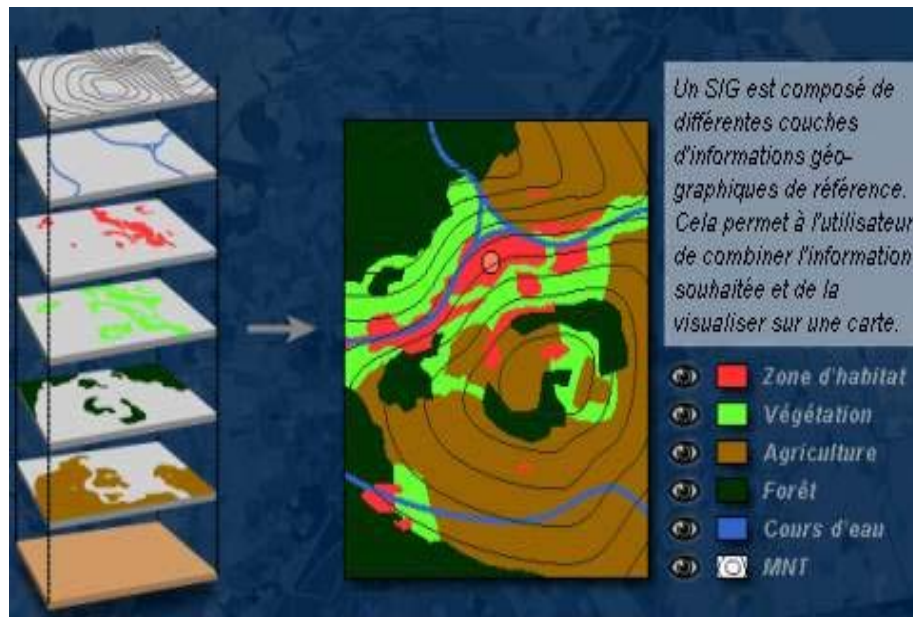
- Dans ce domaine la télédétection aide à déterminer
- **la températures de la surface de l'océan et leurs répartition**
- **pour l'étude des côtes**
- **L'analyse de la couleur de l'océan**
- **La détermination de la production biologique (plancton)**
- **la turbidité les courants océaniques**





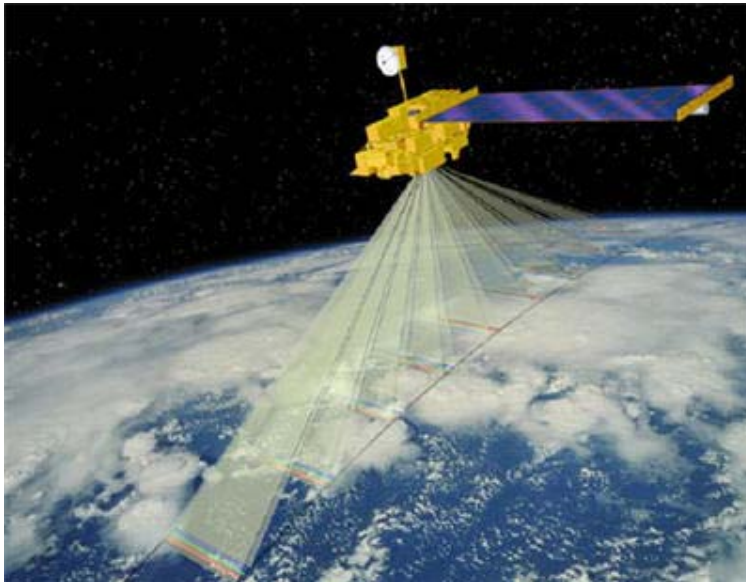
# Les applications terrestres

- *photographie aérienne*, sous toutes ses formes, le moyen le plus usuel de télédétection
- de plus en plus utilisées sous **forme numérique** de façon à permettre leur **correction géométrique**
- **(orthophotos)** et leur intégration dans les Systèmes d'Information Géographique.



# Téledétection Spatiale

- Ce sont les **radiomètres optiques à haute ou très haute résolution** qui sont utiles pour les applications terrestres. Depuis 1972, les progrès dans ce domaine sont remarquables : on est passé d'une résolution de **80 m** (MSS de Landsat), à **30 m** (Thematic Mapper) et à **20 et 10 m** (HRV de SPOT).
- **En géologie** ou pour l'étude **de la végétation**, les **radars imageurs, surtout aéroportés, sont aussi très utilisés**. Le champ des utilisations de la télédétection ne cesse de s'élargir : **cartographie, géologie et prospection minière,**

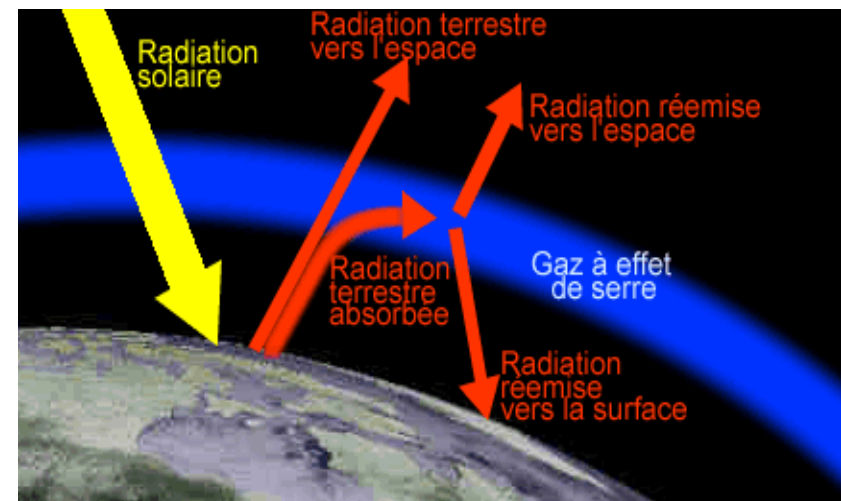
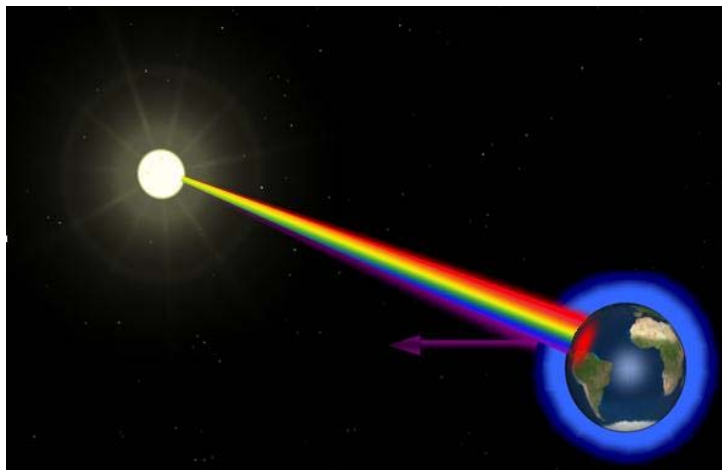


# **Chapitre 2**

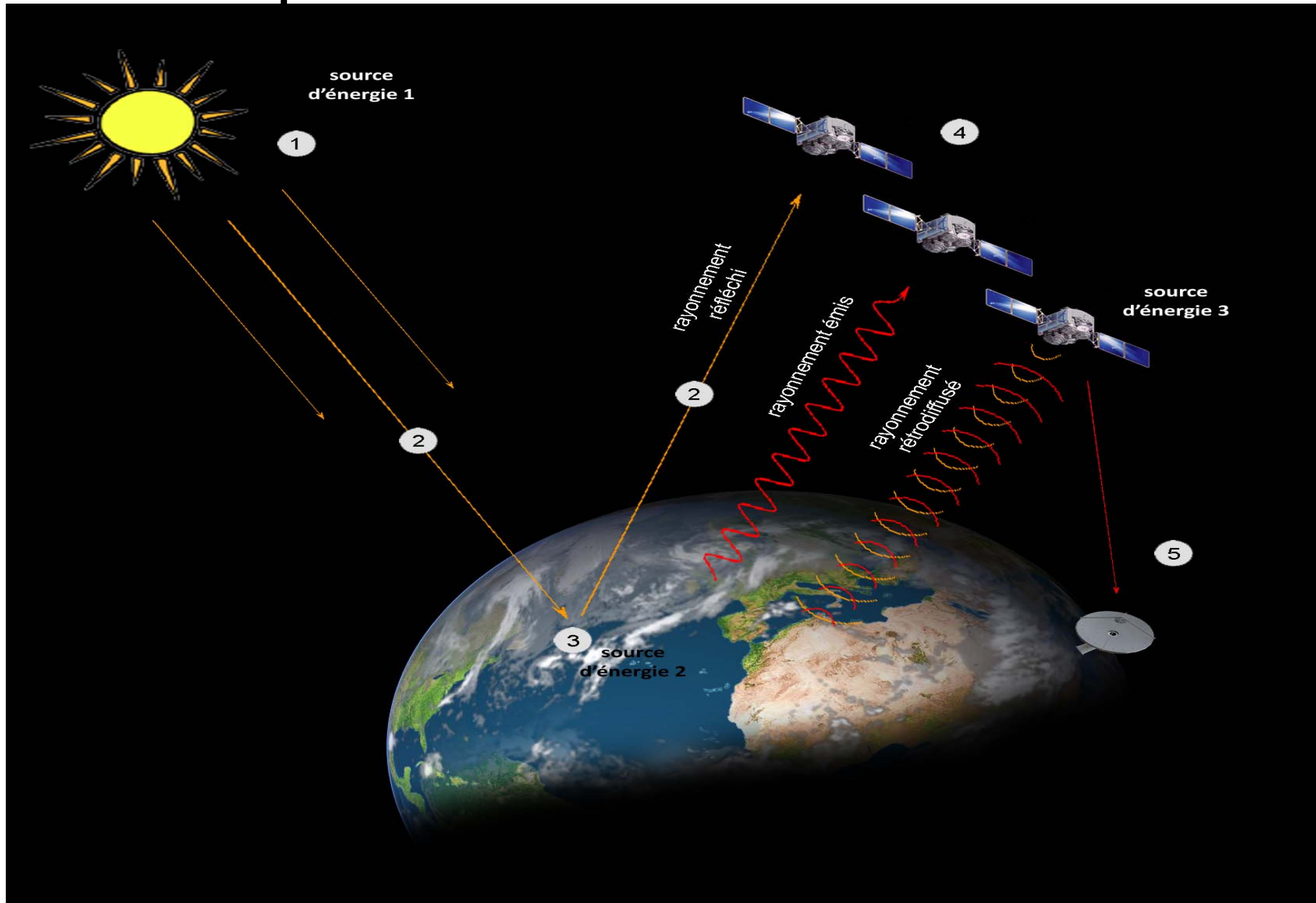
## **Les principes physiques de la Téledétection**

# Éléments de physique du rayonnement

- La télédétection spatiale permet d'observer le système
- Terre
- Océans
- Atmosphère
- en s'appuyant sur des méthodes d'acquisition de l'information à distance
- basées sur les propriétés du rayonnement électromagnétique.
- Les capteurs satellitaires permettent de mesurer l'énergie réfléchie et/ou émise par la surface de la Terre, les océans ou par l'atmosphère
- et donc d'analyser et de suivre l'évolution de ces milieux au cours du temps.



# Etapes d'observation de la Terre

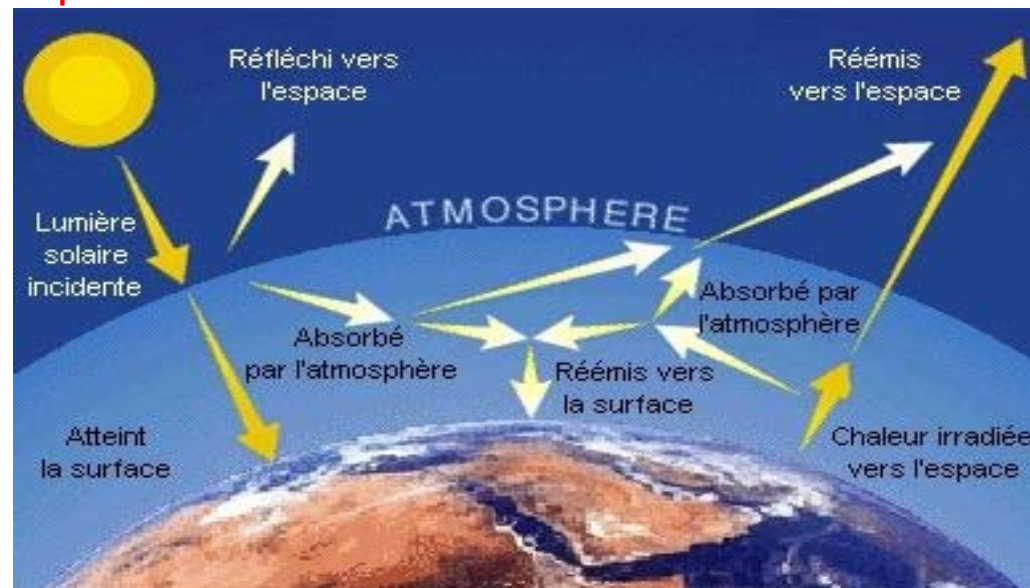


# L'observation de la Terre par les satellites 1

- peut être décomposée en cinq étapes
- **Etape 1 La source d'énergie**
- L'observation de la Terre par les satellites implique nécessairement une **source d'énergie**.
- Trois sources d'énergie sont utilisées en télédétection.
- 1.1 la plus commune et la plus utilisée est **le soleil** qui illumine la surface terrestre. Ce processus illustre la **télédétection optique**, dans les **domaines du visible** et du **proche infrarouge**.
- 1.2 La surface terrestre se comporte également comme **source d'énergie** en émettant un **rayonnement qui peut être capté et enregistré par les capteurs satellitaires**. **correspond à la télédétection dans le thermique ou dans le domaine des micro-ondes passives**.
- 3. **le capteur satellite** peut lui-même être source d'énergie en émettant grâce à un rayonnement vers la surface terrestre, puis en enregistrant la partie du rayonnement rétrodiffusée. **Ce processus est celui de la télédétection active dans le domaine des hyperfréquences**.

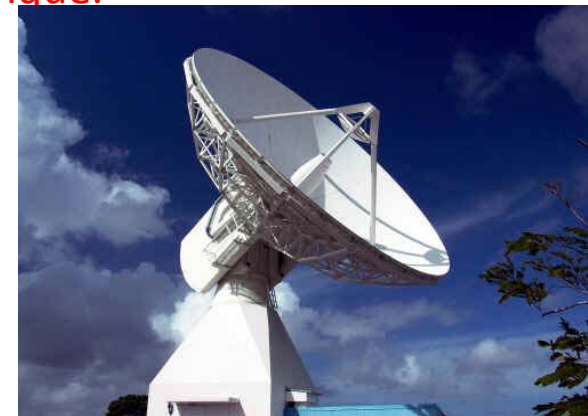
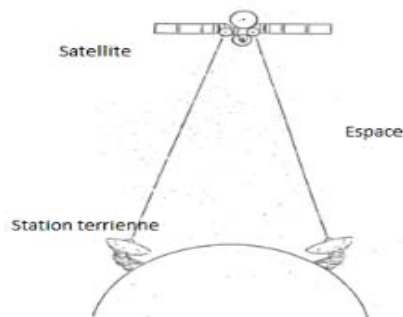
## Etape de l'observation de la terre par le satellite 2

- **Etape 2 Les interactions du rayonnement avec l'atmosphère**
- Lors de son trajet
- de la source d'énergie vers la surface terrestre,
- puis de la surface vers le capteur satellitaire, **le rayonnement interagit avec l'atmosphère**
  
- **Etape 3 Les interactions du rayonnement avec la surface terrestre**
- Lorsque le rayonnement parvient à la surface de la Terre, il va interagir avec celle-ci. La nature des interactions est fonction à la fois du
- **rayonnement**
- **et des propriétés spectrales des surfaces**



# Etape de l'observation de la terre par le satellite 3

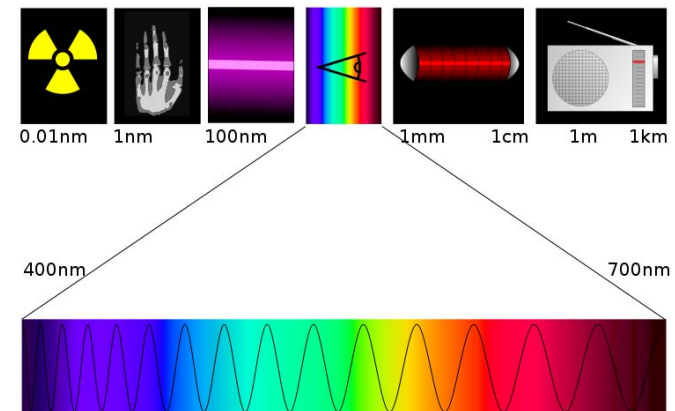
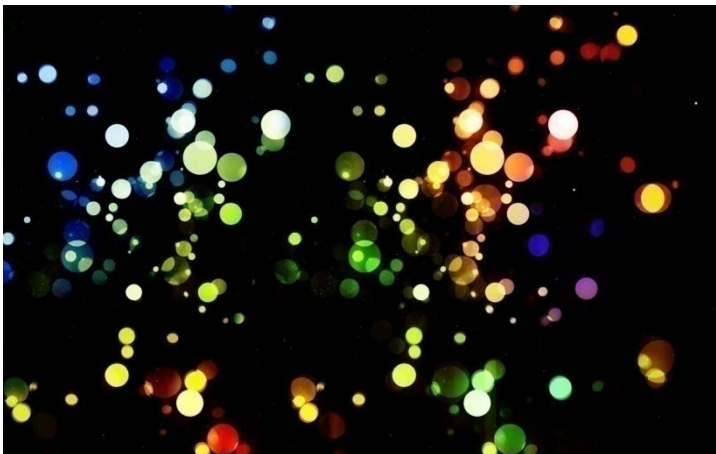
- **Etape 4 L'enregistrement du signal par le capteur satellitaire**
- L'énergie réfléchi, émise ou rétrodiffusée par la surface de la Terre est captée puis **enregistrée et discrétisée** au niveau du capteur satellitaire.
- On distingue deux types de capteurs en **fonction de la source d'énergie**.
  - 1 **les capteurs passifs** qui utilisent les propriétés de réflexion du rayonnement solaire dans le **domaine optique (visible et proche infrarouge)** et celles de l'émission dans **l'infrarouge thermique** et dans le **domaine des micro-ondes**.
  - 2 **les capteurs actifs** utilisés dans le domaine des **hyperfréquences**
- **Etape 5 La transmission et la réception des données**
- Lorsqu'il **est en vue d'une station satellite au sol**, le satellite transmet les données acquises.
- Elles subissent alors les premiers traitements qui consistent à appliquer aux images brutes des **corrections de type radiométrique et géométrique**.





## Le rayonnement électromagnétique : nature et propagation

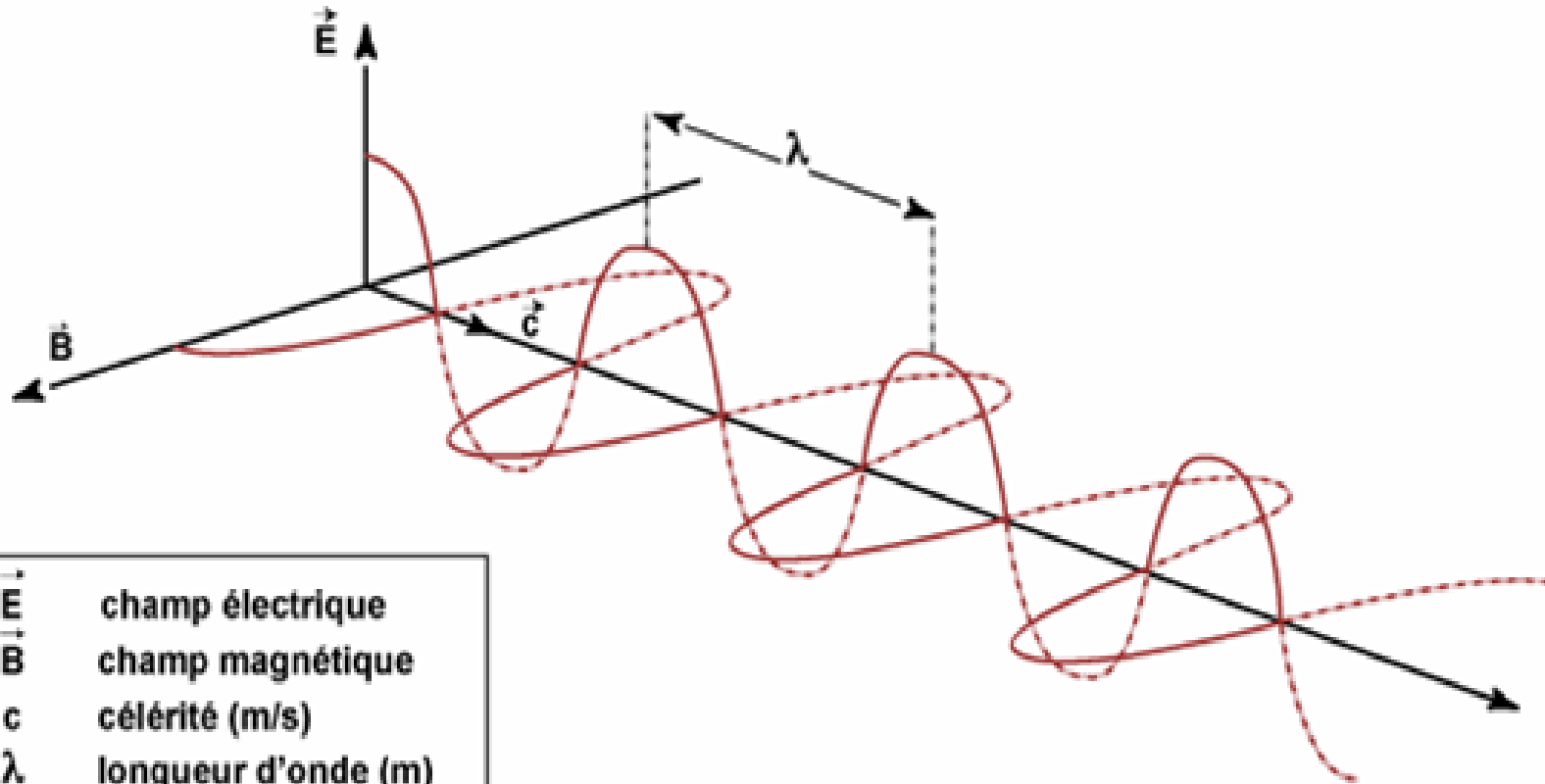
- Le rayonnement électromagnétique correspond à **l'ensemble des radiations émises par une source** qui peut être soit
  - **le soleil,**
  - soit la **surface terrestre ou océanique ou l'atmosphère,**
  - ou bien encore le **capteur satellitaire lui-même,**
  - sous forme **d'ondes électromagnétiques** ou **de particules.**



# Les ondes électromagnétiques

- Une onde électromagnétique comporte à la fois
- un **champ électrique**
- et un **champ magnétique**
- **oscillant à la même fréquence.**
- Ces deux champs, **perpendiculaires l'un par rapport à l'autre** se propagent dans un milieu selon une **direction orthogonale.**
- La propagation de ces ondes s'effectue à une **vitesse qui dépend du milieu considéré.**
- Dans le **vide**, la vitesse de propagation est égale à  **$3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ .**

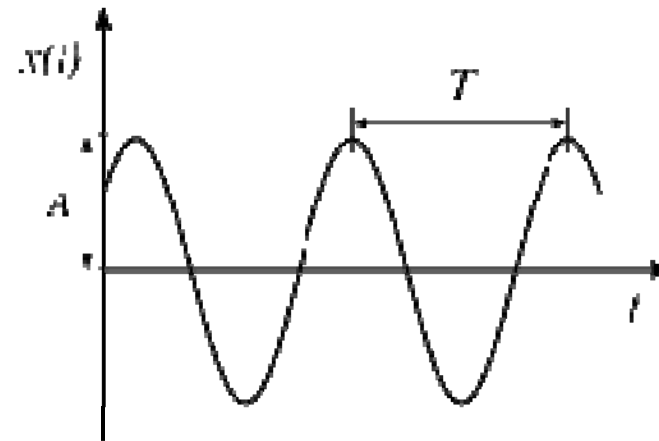
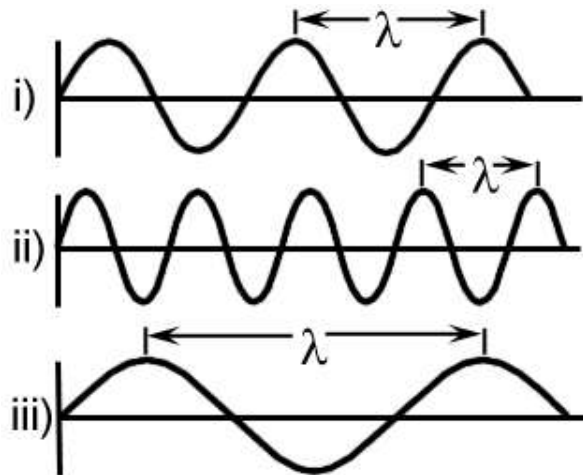
# NATURE ET PROPAGATION D'UNE ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE



$\vec{E}$	champ électrique
$\vec{B}$	champ magnétique
$c$	célérité (m/s)
$\lambda$	longueur d'onde (m)
$T$	période = $\lambda / c$ (s)
$f$	fréquence = $1 / T$ (Hz)

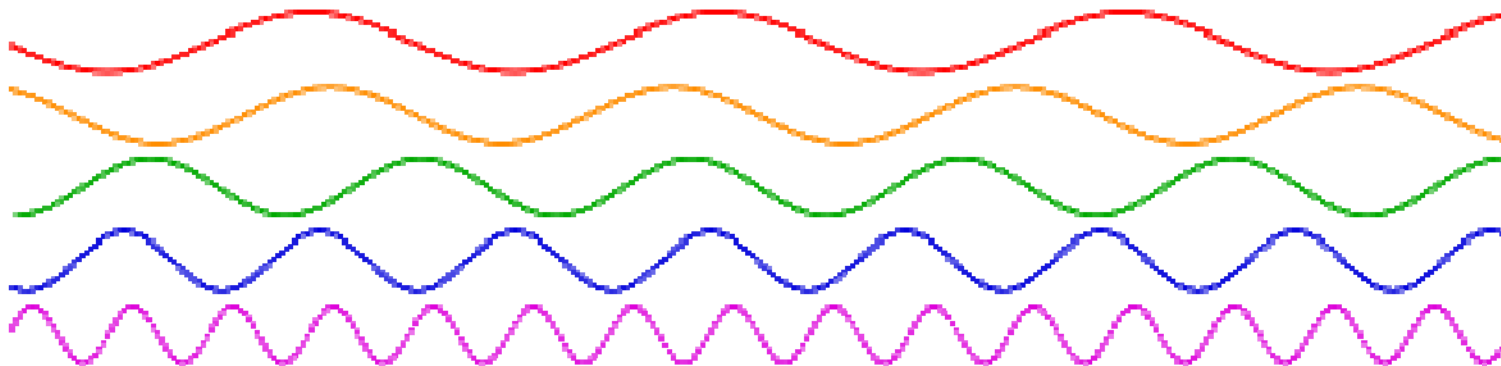
# Les caractéristiques physiques d'une onde Electromagnétique

- **La longueur d'onde ( $\lambda$ )** : elle exprime le caractère oscillatoire périodique de l'onde dans l'espace. C'est la longueur d'un cycle d'une onde, la distance séparant deux crêtes successives. Elle est mesurée en mètre ou en l'un de ses sous-multiples, les ondes électromagnétiques utilisées en télédétection spatiale ayant des longueurs d'onde relativement courtes :
  - le nanomètre  $1 \text{ nm} = 10^{-9}$  mètre
  - le micromètre  $1 \mu\text{m} = 10^{-6}$  mètre
  - le centimètre  $1 \text{ cm} = 10^{-2}$  mètre.
- **La période (T)** : elle représente le temps nécessaire pour que l'onde effectue un cycle. L'unité est la seconde.



# Les caractéristiques physiques d'une onde Electromagnétique

- **La fréquence (  $\nu$  )** : **inverse de la période**, elle traduit le **nombre de cycles par unité de temps**.  
Elle s'exprime en Hertz (Hz) - **un Hz équivaut à une oscillation par seconde** - ou en multiples du Hertz,
- les ondes électromagnétiques utilisées en **téledétection spatiale ayant des fréquences très élevées** :  
le kilohertz  $1 \text{ kHz} = 10^3 \text{ Hz}$   
le mégahertz  $1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$   
le gigahertz  $1 \text{ GHz} = 10^9 \text{ Hz}$



# Longueur d'onde et fréquence

- Longueur d'onde et fréquence sont **inversement proportionnelles** et unies par la relation suivante :

où

- $\lambda$  : longueur d'onde de l'onde électromagnétique
- $c$  : vitesse de la lumière ( $3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ )
- $\nu$  : la fréquence de l'onde

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

Par conséquent, plus la **longueur d'onde est petite**, plus la **fréquence est élevée**, et réciproquement.

# Rayonnement et énergie

- Les **échanges d'énergie** portée par le **rayonnement électromagnétique** qui ont lieu entre le soleil et le système terre-océan-atmosphère ne se font pas de **manière continue**, mais de **façon discrète**, sous forme de **paquets d'énergie**, véhiculés par des **corpuscules élémentaires immatériels**, les **photons**.
- Chaque photon transporte ainsi un **quantum d'énergie** proportionnel à la **fréquence de l'onde électromagnétique considérée** ; cette énergie est **d'autant plus grande que la fréquence est élevée**.

La relation suivante exprime la **quantité d'énergie associée à un photon** en **fonction de la fréquence de l'onde** :

$$E = h \nu$$

où :

- E : l'énergie de l'onde électromagnétique

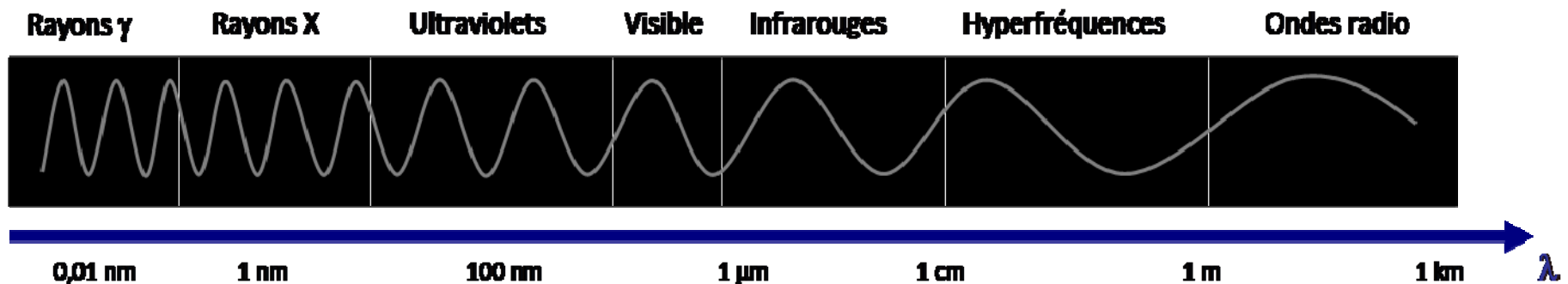
-  $\nu$  : la fréquence de l'onde

- h : la constante de Planck ( $6,625 \cdot 10^{-34}$  J.s) joules-secondes

- Ainsi, les rayonnements électromagnétiques de **courte longueur d'onde** ou de **fréquence élevée** véhiculent **davantage d'énergie** que les rayonnements de grande longueur d'onde (basse fréquence).

# Le spectre électromagnétique

- Le spectre électromagnétique représente la répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde, de leur fréquence ou bien encore de leur énergie
- En partant des ondes les plus énergétiques, on distingue successivement :
- **1 Les rayons gamma (  $\gamma$  )** : ils sont dus aux radiations émises par les éléments radioactifs. Très énergétiques, ils traversent facilement la matière et sont très dangereux pour les cellules vivantes. Leurs longueurs d'onde s'étendent d'un centième de milliardième ( $10^{-14}$  m) à un milliardième ( $10^{-12}$  m) de millimètre.





## 2 Les rayons X

- **2 Les rayons X** : rayonnements très énergétiques traversant plus ou moins facilement les corps matériels et un peu moins nocifs que les rayons gamma, ils sont utilisés notamment en médecine pour les radiographies, dans l'industrie (contrôle des bagages dans le transport aérien), Les rayons X ont des longueurs d'onde comprises entre un milliardième ( $10^{-12}$  m) et un cent millième ( $10^{-8}$  m) de millimètre.

# 3 Les ultraviolets

- **Les ultraviolets** : rayonnements qui restent assez énergétiques, ils sont nocifs pour la peau. Heureusement pour nous, une grande part des ultraviolets est stoppée par l'ozone atmosphérique

Leurs longueurs d'onde s'échelonnent d'un cent millième ( $10^{-8}$  m) à quatre dixièmes de millième ( $4 \cdot 10^{-7}$  m) de millimètre.

# 4 Le domaine visible

- **4 Le domaine visible** : correspond à la **partie très étroite du spectre électromagnétique perceptible par notre œil**. C'est dans le domaine visible que le **rayonnement solaire atteint son maximum** ( **$0,5 \mu\text{m}$** ) et c'est également dans cette portion du spectre que l'on peut distinguer l'ensemble des couleurs de l'arc en ciel, du bleu au rouge. Il s'étend de quatre dixièmes de millièmètre ( **$4 \cdot 10^{-7} \text{ m}$** ) - *lumière bleue* - à huit dixièmes de millièmètre ( **$8 \cdot 10^{-7} \text{ m}$** ) de millièmètre - *lumière rouge*.

# 5 L'infrarouge

- **L'infrarouge** : rayonnement **émis par tous les corps dont la température est supérieure au zéro absolu (-273°C)**.

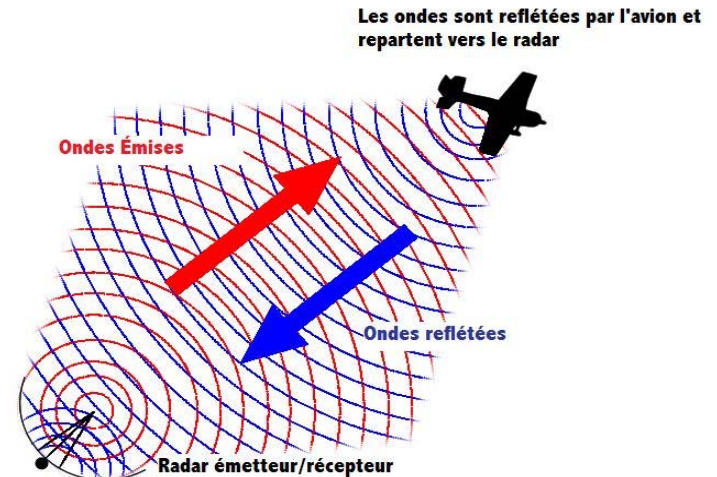
En télédétection, on utilise certaines bandes spectrales de l'infrarouge pour mesurer la température des

- surfaces terrestres
- et océaniques,
- ainsi que celle des nuages.

La gamme des infrarouges couvre les longueurs d'onde allant de huit dixièmes de millièème de millimètre ( **$8 \cdot 10^{-7}$  m**) à un millimètre ( **$10^{-3}$  m**).

# 6 Les ondes radar ou hyperfréquences

- **Les ondes radar ou hyperfréquences** : Cette région du spectre est utilisée pour mesurer **le rayonnement émis par la surface terrestre** et s'apparente dans ce cas à la **téledétection dans l'infrarouge thermique**, mais également par **les capteurs actifs comme les systèmes radar**.  
**Un capteur radar émet son propre rayonnement électromagnétique et en analysant le signal rétrodiffusé**, il permet de localiser et d'identifier les objets, et de calculer leur vitesse de déplacement s'ils sont en mouvement. Et ceci, quelque soit la **couverture nuageuse, de jour comme de nuit**.  
Le domaine des hyperfréquences s'étend des longueurs d'onde **de l'ordre du centimètre jusqu'au mètre**.



# 7 Les ondes radio

- **Les ondes radio** : Ce domaine de longueurs d'onde est le **plus vaste du spectre électromagnétique** et concerne les ondes qui ont **les plus basses fréquences**.
- Il s'étend des longueurs d'onde de **quelques cm à plusieurs km**.
- Relativement **faciles à émettre et à recevoir**, les ondes radio sont
- utilisées pour la transmission de l'information (**radio, télévision et téléphone**).
- La bande FM des postes de radio correspond à des longueurs d'onde de l'ordre du mètre.
- **Celles utilisées pour les téléphones cellulaires sont de l'ordre de 10 cm environ**.

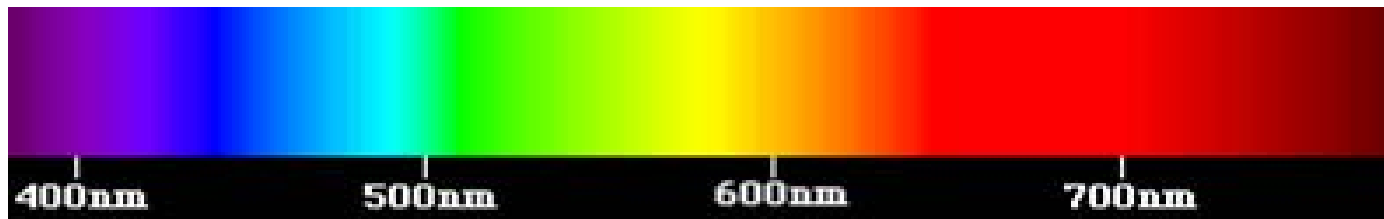


# Le spectre électromagnétique et capteurs satellite

- Contrairement à l'**œil humain** qui n'est capable de capter le rayonnement que dans une fenêtre très étroite du spectre électromagnétique, celle correspondant au domaine du visible (**longueurs d'onde comprises entre 0,4µm et 0,7µm**), les capteurs satellitaires utilisent une fraction beaucoup plus étendue du spectre.
- **Trois fenêtres spectrales sont principalement utilisées en télédétection spatiale :**
  - **Le domaine du visible**
  - **Le domaine des infrarouges (proche IR, IR moyen et IR thermique)**
  - **Le domaine des micro ondes ou hyperfréquences** (ont une importance considérable en télédétection RADAR notamment)
- Certains capteurs, peu nombreux, permettent de mesurer **l'énergie du rayonnement ultraviolet**. Ils sont utilisés principalement en astronomie pour l'étude **des atmosphères planétaires ou pour mesurer la quantité d'UV atteignant la surface terrestre**.
- En télédétection aérienne, le rayonnement proche UV 250 - 350 nm est utilisé pour des applications en océanographie, notamment pour l'identification et la cartographie des nappes d'hydrocarbures.

# Le domaine du visible

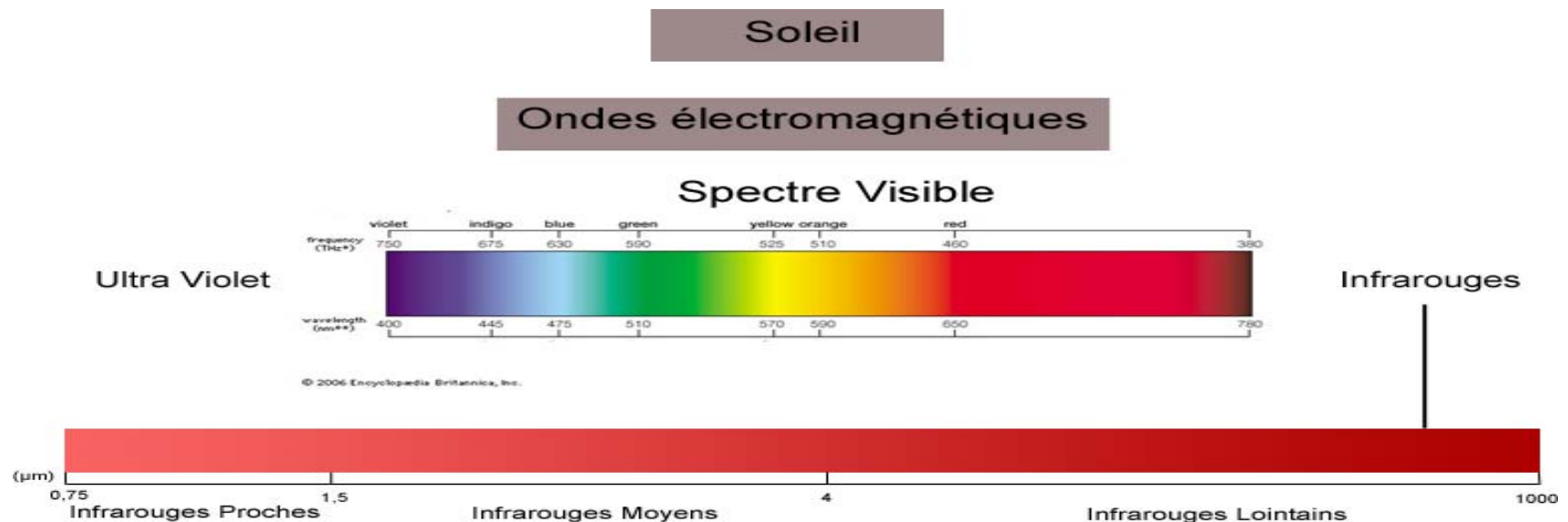
- La **fenêtre du visible** qui s'étend entre **0,4 $\mu$ m et 0,7 $\mu$ m** est la seule fenêtre du spectre électromagnétique qui est **perceptible par l'œil humain**.
- C'est la portion du spectre qui permet de visualiser les couleurs (**lumière visible et couleurs**).  
Les capteurs utilisés en télédétection peuvent **capter l'énergie provenant de différentes fenêtres spectrales à l'intérieur même du visible** (le **satellite SPOT** par exemple, est sensible au **rouge et au vert**,
- le satellite **américain IKONOS** lui, dispose de trois bandes spectrales dans le visible, **sensibles au rouge, au vert et au bleu**).





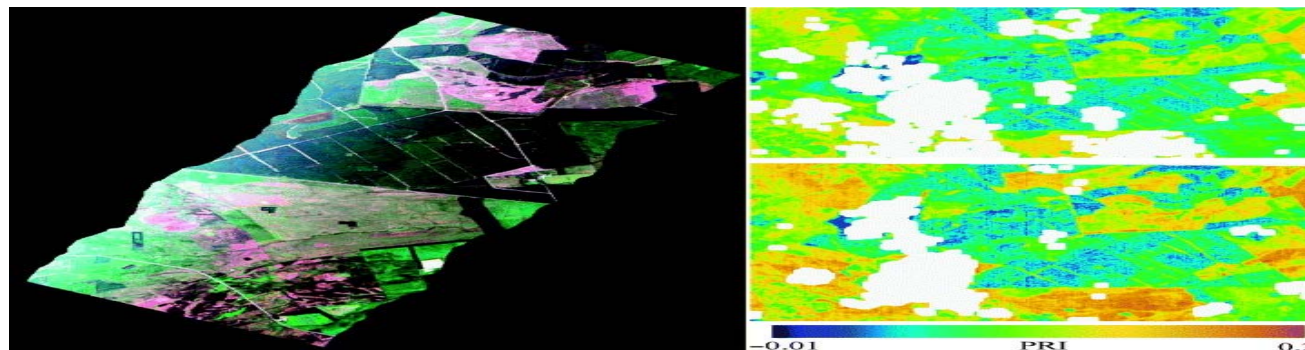
# L'infrarouge

- Le domaine de l'infrarouge est relativement étendu puisqu'il couvre les longueurs d'onde de **0,7 $\mu\text{m}$  à 100 $\mu\text{m}$** .
- Dans cette fourchette de longueurs d'onde, on distingue généralement **quatre types d'infrarouges** qui vont du
- **proche infrarouge à l'infrarouge lointain**, en passant par **l'infrarouge moyen et le thermique**.



# Le proche infrarouge

- Le proche infrarouge ( $0.7\mu\text{m}$  à  $1,6\mu\text{m}$ ) est la partie du spectre électromagnétique qui vient juste après le visible (couleur rouge).
- Comme pour le visible, ce que le radiomètre mesure dans le proche infrarouge, c'est une luminance correspondant au rayonnement solaire réfléchi par la surface terrestre.
- Ce domaine du spectre électromagnétique est très utilisé en télédétection pour **différencier les surfaces naturelles qui se caractérisent par de très importantes variations de la réflectance à cette longueur d'onde.**
- Il permet également l'étude des surfaces continentales, et notamment de **distinguer les surfaces végétalisées des surfaces minérales**
- car les surfaces couvertes par la végétation se distinguent par une **forte réflectance** dans les longueurs d'onde du **proche infrarouge**, alors qu'elles réfléchissent peu le rayonnement dans le visible.

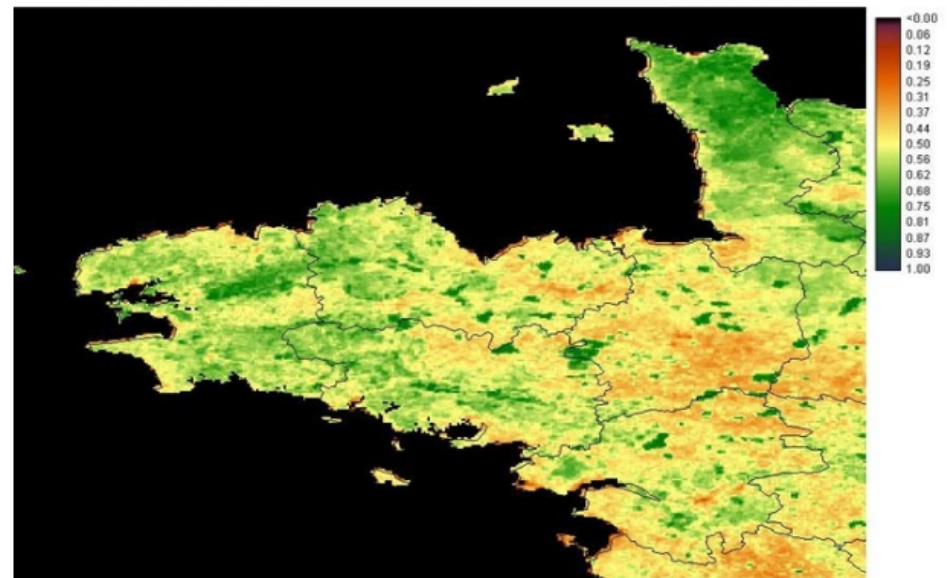


# L'infrarouge moyen

L'infrarouge moyen ( $1,6\mu\text{m}$  à  $4\mu\text{m}$ ) permet de façon générale d'étudier les teneurs en eau des surfaces.

- Il est très utilisé en foresterie et en agriculture, notamment pour cartographier les couverts végétaux en état de stress hydrique.
- L'atmosphère est en grande partie opaque aux rayonnements du moyen infrarouge qui sont absorbés par la vapeur d'eau.
- Seules quelques fenêtrages atmosphériques permettent la transmission du rayonnement. Elles sont centrées sur les longueurs d'onde  $2,5\mu\text{m}$ ,  $3,5\mu\text{m}$  et  $5\mu\text{m}$ .

Carte de stress hydrique en 2003 en Bretagne



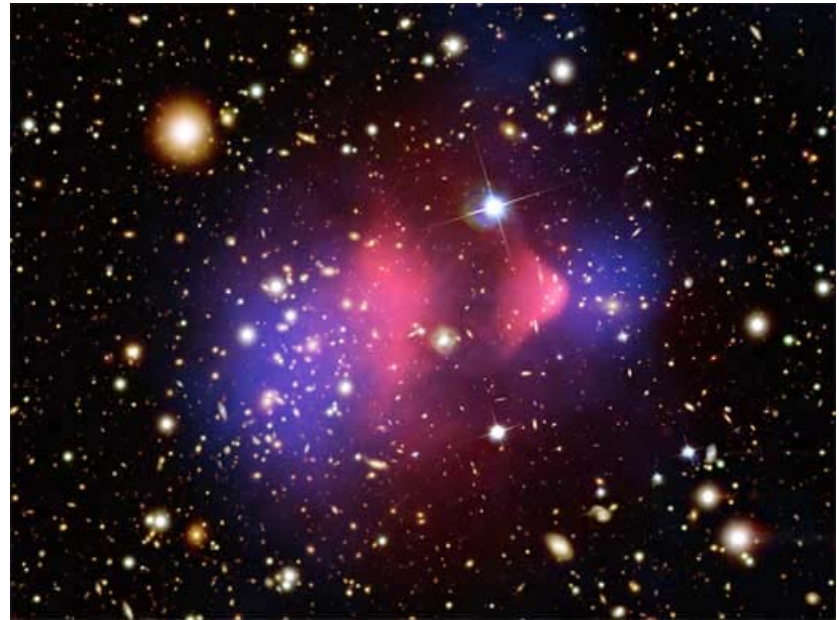
# L'infrarouge thermique

- Dans ce domaine spectral ( $4\mu\text{m}$  à  $15\mu\text{m}$ ), le rayonnement dépend des propriétés d'émissivité des surfaces
- les capteurs satellitaires mesurent la température apparente des objets.
- En effet une partie du rayonnement visible et proche infrarouge parvenant à la surface de la terre est absorbée par les objets, puis réémise sous forme de chaleur à une plus grande longueur d'onde.



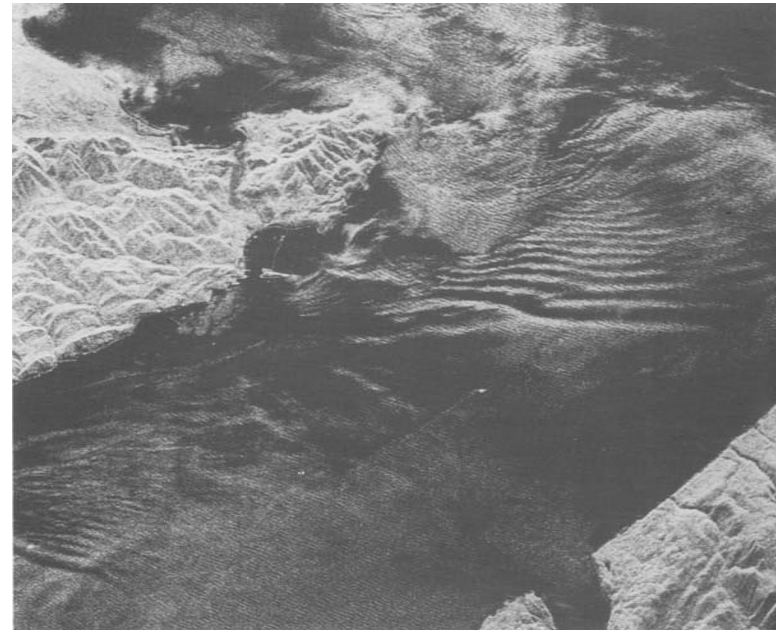
# L'infrarouge lointain

- L'infrarouge lointain ( $15\mu\text{m}$  à  $100\mu\text{m}$ ) n'est utilisé ni pour l'observation de la terre, ni pour l'étude de l'atmosphère, mais pour étudier la formation des galaxies et des étoiles.
- Les détecteurs, appelés bolomètres utilisent cette gamme de longueurs d'onde pour mesurer l'intensité du rayonnement infrarouge émis par les corps célestes.



# Les hyperfréquences

- Dans ce domaine spectral (1cm à 1m), **les longueurs d'onde centimétriques sont grandes par rapport aux ondes visibles et infrarouges.**
- **Cela confère aux hyperfréquences des propriétés particulières et notamment la possibilité** d'observer la surface de la Terre par tous les temps, de jour comme de nuit.
- L'atmosphère est en effet quasiment transparente à ces longueurs d'onde qui traversent donc sans problème **les couches nuageuses.** Ce domaine est celui des **capteurs radars et des radiomètres à micro-ondes passives,**
- **utilisés notamment en océanographie pour l'étude des glaces de mer et la détection des nappes d'hydrocarbures.**



# **Chapitre 3**

## **le Rayonnement de la matière**

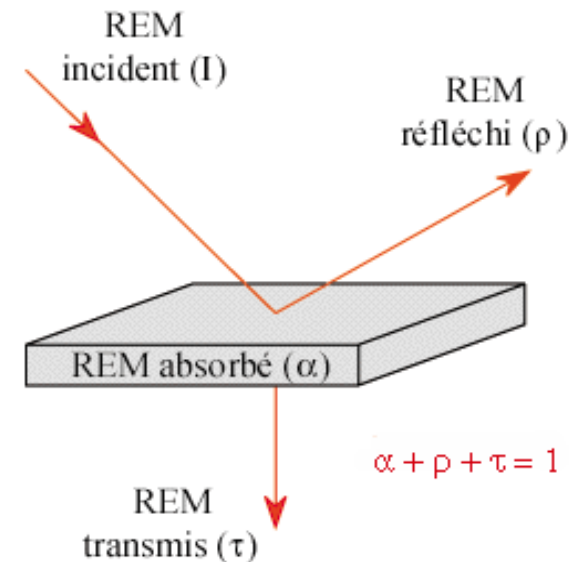
# Introduction

- le soleil (ou d'autres sources d'énergies) éclaire la surface terrestre,
- des **interactions se produisent** entre le rayonnement et la cible illuminée.
- **En fonction des propriétés et des caractéristiques** de la cible:
  - une **partie du rayonnement est réfléchi**e vers le capteur satellitaire.
- Chaque objet ou chaque surface possède ainsi **une réponse spectrale bien précise à une longueur d'onde donnée**.
- **L'ensemble des réponses spectrales à différentes longueurs d'onde constitue ce que l'on appelle la signature spectrale d'une surface**. Chaque type de surface peut ainsi être caractérisé et identifié sur une image.



# Les interactions rayonnement et matière 1

- Lorsqu'un rayonnement électromagnétique atteint un objet:
- certaines longueurs d'onde sont **absorbées**
- d'autres sont **réfléchies** par l'objet
- Une partie du rayonnement peut être **transmise** à travers l'objet
- Une autre partie **réfracté** avec un changement de direction de la propagation
- La partie du rayonnement qui **est absorbée modifie l'énergie interne de l'objet**
- **produit de la chaleur qui sera réémise sous forme d'un rayonnement à une plus grande longueur d'onde.**



# Les interactions rayonnement et matière 2

- Tous les objets sont ainsi caractérisés par
- un **coefficient d'absorption**, la part d'énergie absorbée
- un **coefficient de réflexion**, la part d'énergie réfléchie
- et un **coefficient de transmission**, la part d'énergie transmise

Ces trois coefficients ont des valeurs qui varient entre 0 et 1 et leur somme est toujours égale à 1, **selon le principe de la conservation de l'énergie.**

$$\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1$$

avec :

$\alpha_{\lambda}$  : coefficient d'absorption à la longueur d'onde  $\lambda$

$\rho_{\lambda}$  : coefficient de réflexion à la longueur d'onde  $\lambda$

$\tau_{\lambda}$  : coefficient de transmission à la longueur d'onde  $\lambda$

# Les interactions rayonnement et matière 3

- On observe tout de même certains cas particuliers :
- Un **corps totalement opaque** ne transmet pas le rayonnement, qui est **en partie absorbé et en partie réfléchi**.

$$\tau = 0 \Rightarrow \alpha + \rho = 1$$

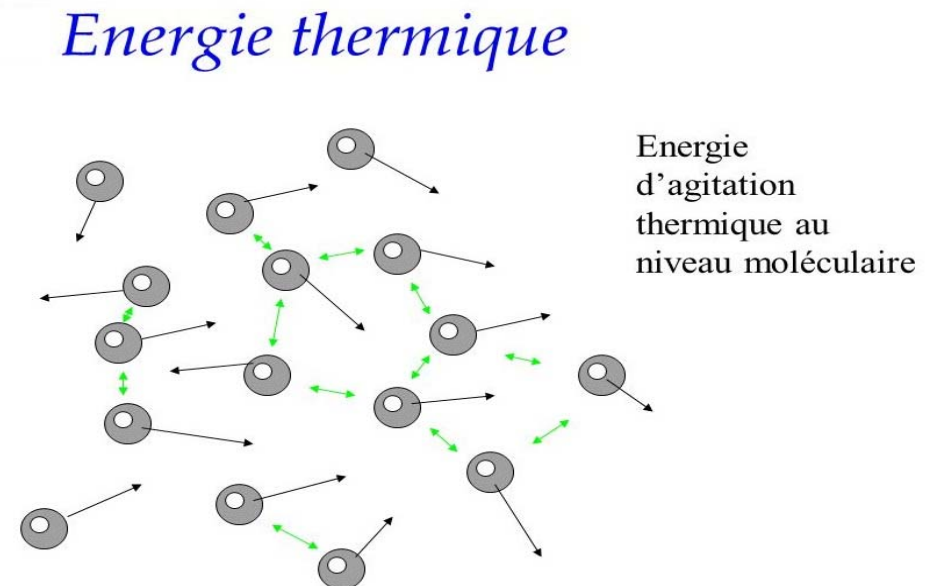
- Un corps **parfaitement transparent** ne réfléchit pas le rayonnement, mais **en absorbe et en transmet une partie**.

$$\rho = 0 \Rightarrow \alpha + \tau = 1$$

- La télédétection **s'appuyant sur les interactions entre rayonnement et objets**,
- il est impératif de bien comprendre les propriétés du rayonnement électromagnétique.

# Emission

- Tout corps dont la température est supérieure **au zéro absolu** ( $0^{\circ}$  Kelvin équivaut à  $-273^{\circ}\text{C}$ ) émet un rayonnement électromagnétique
- issu de **l'agitation thermique des molécules, dont la longueur d'onde est fonction de la température.**
- **Emission et absorption** étant liées, le physicien Max Planck en 1900 a imaginé ce qui se produirait dans le cas idéal du **corps noir.**



# Emission, loi de Planck, le corps noir

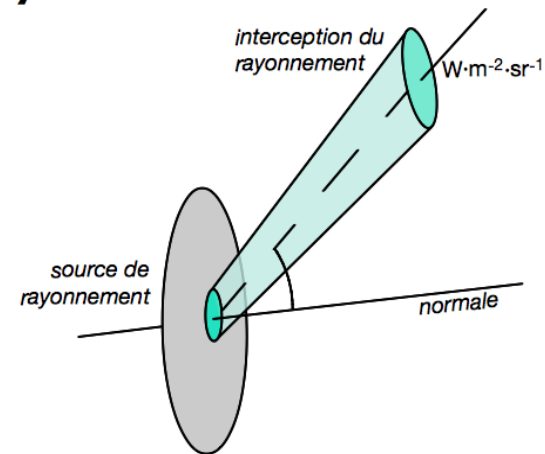
- **loi de Planck :**  
Un **corps noir** est un **corps hypothétique capable d'absorber puis de réémettre tout le rayonnement qui lui parvient, quelque soit la longueur d'onde. Il ne réfléchit, ni ne transmet aucun rayonnement.**
- Planck a montré que **l'énergie émise (luminance spectrale) par un corps noir dépendait uniquement de sa température.**

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

- avec :  
c : vitesse de la lumière ( $3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ )  
h : constante de Planck ( $6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ )  
k : constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ )  
T : température du corps noir en Kelvins

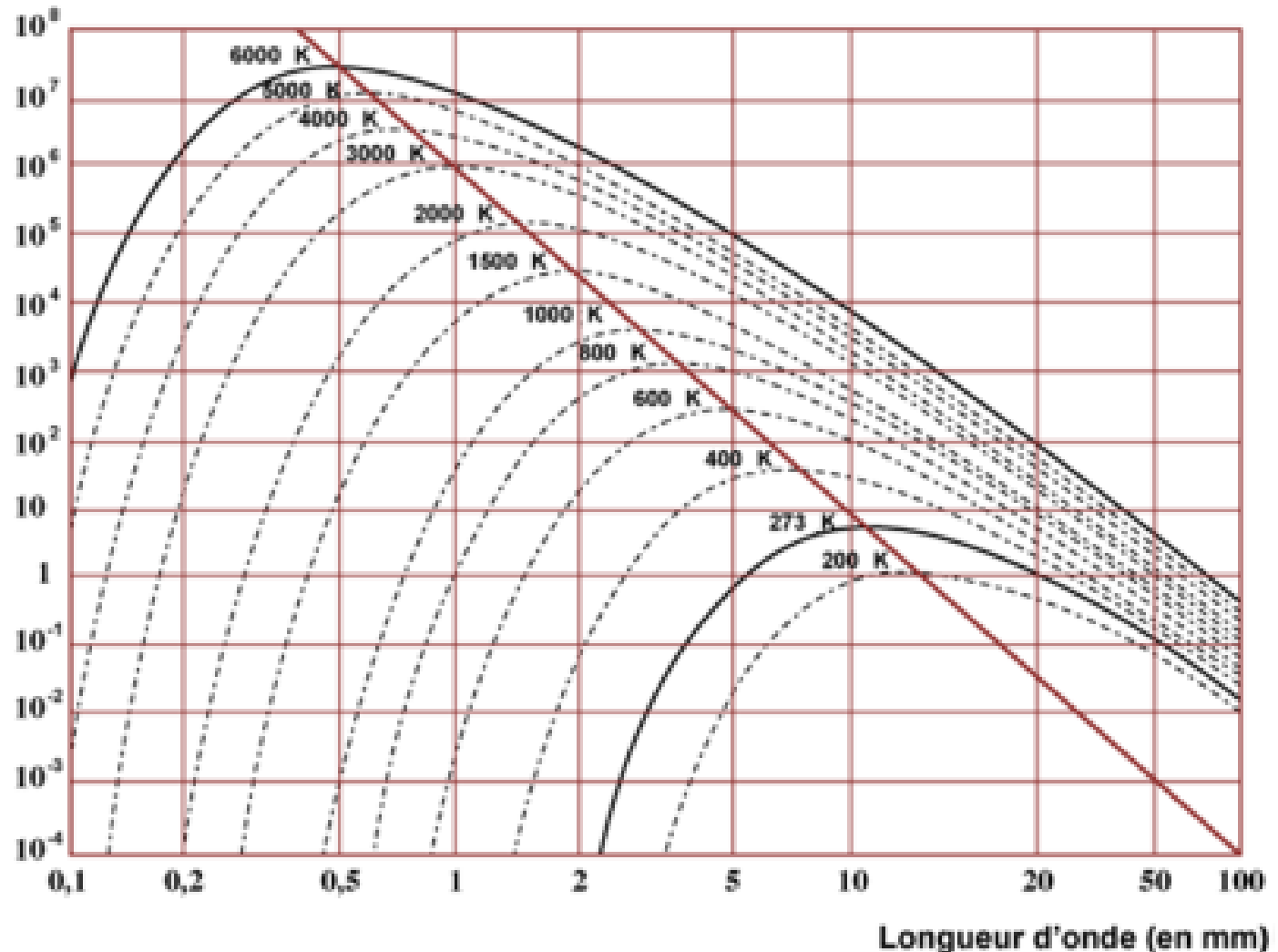
- La **luminance** est la **puissance du rayonnement** passant ou étant émise en un point d'une surface et dans une direction donnée, par unité de surface et par unité d'angle solide. La luminance énergétique a pour unité le **watt par mètre carré par stéradian ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ )**

**Luminance énergétique / Rayonnement**  $L_e$



# La Loi De Planck Décrit La Répartition Spectrale De L'énergie Émise Par Un Corps Noir En Fonction De Sa Température

Luminance spectrale (en  $W \cdot m^{-1} \cdot sr^{-2} / mm$ )



# Emission, loi de Stefan - Boltzmann

- L'énergie émise par un corps noir est d'autant plus importante que la température de ce dernier est élevée.
- Ce phénomène est décrit par la loi de Stefan - Boltzmann qui stipule que l'énergie émise par un corps noir augmente proportionnellement à la puissance quatrième de sa température :

$$M_T = \sigma T^4$$

avec :

**$M_T$  : l'exittance totale (énergie émise par unité de surface, en  $W.m^{-2}$ ) du corps noir**

$\sigma$  : la constante de Stefan - Boltzmann ( $5,67.10^{-8} J.K^{-4}.m^{-2}.s^{-1}$ )

T : la température du corps en Kelvins

# Emission, loi de Wien

- Selon la loi de Planck, **à une température donnée, l'énergie émise par un corps noir passe par un maximum d'émission.**
- **La loi de Wien** décrit la relation **entre la longueur d'onde du maximum d'émission ( $\lambda_{\max}$ ) et la température du corps noir.**
- Elle stipule que la longueur d'onde du maximum d'émission est inversement proportionnelle à sa température.
- **Plus la température du corps noir augmente, plus le maximum d'émission se déplace vers les courtes longueurs d'onde.**

- $$\lambda_{\max} = \frac{hc}{4.9651 \cdot k \cdot T} = \frac{2.898 \cdot 10^{-3}}{T}$$

avec :

$\lambda_{\max}$  : longueur d'onde du maximum d'émission, exprimée en mètre

c : vitesse de la lumière ( $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

h : constante de Planck ( $6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ )

k : constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ )

T : température du corps noir en Kelvins

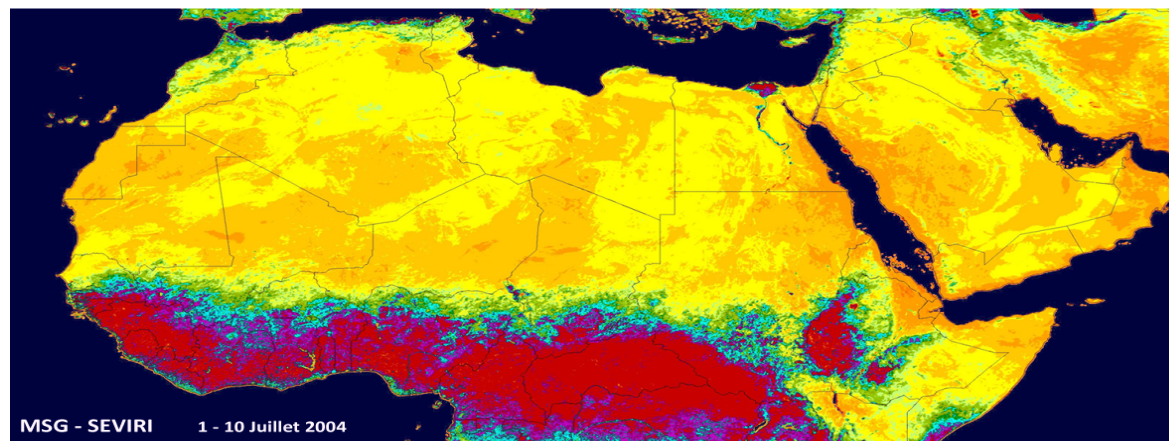


# Emission et Soleil

- Le soleil peut être assimilé à un corps noir dont la température de surface est de l'ordre de  $5780^{\circ}\text{K}$ .
- En appliquant la loi de Wien, on constate que le maximum d'émission du soleil correspond à une longueur d'onde de  $0,5\mu\text{m}$
- ce qui correspond au visible et au maximum de sensibilité de nos yeux.
- Le soleil étant la source la plus importante de rayonnements électromagnétiques sur Terre,
- adaptation de la sensibilité de notre œil au domaine spectral qui reçoit le maximum de rayonnement solaire.

Le même exercice appliqué à la surface terrestre dont la température moyenne est d'environ  $15^{\circ}\text{C}$  ( $288^{\circ}\text{K}$ ),

- donne un maximum d'émission pour notre environnement aux alentours de  $10\mu\text{m}$ .
- Ce rayonnement situé dans l'infrarouge thermique donne une bonne indication des températures de surface des objets.



# Emission Corps Gris

- Mais la Terre et de manière générale la plupart des surfaces naturelles ne sont pas des corps noirs.
- Ils n'absorbent pas totalement le rayonnement qu'ils reçoivent, mais en réfléchissent ou en transmettent une partie.
- On parle alors de « **corps gris** ».
- **Pour une même température, un corps gris n'émet jamais autant qu'un corps noir.**
- **Le rapport entre les exitances (ou les luminances spectrales) du corps gris et du corps noir définit l'émissivité spectrale.**
- **Le coefficient d'émissivité** d'une surface naturelle, noté  $\epsilon_\lambda$  a toujours une valeur inférieure à 1.

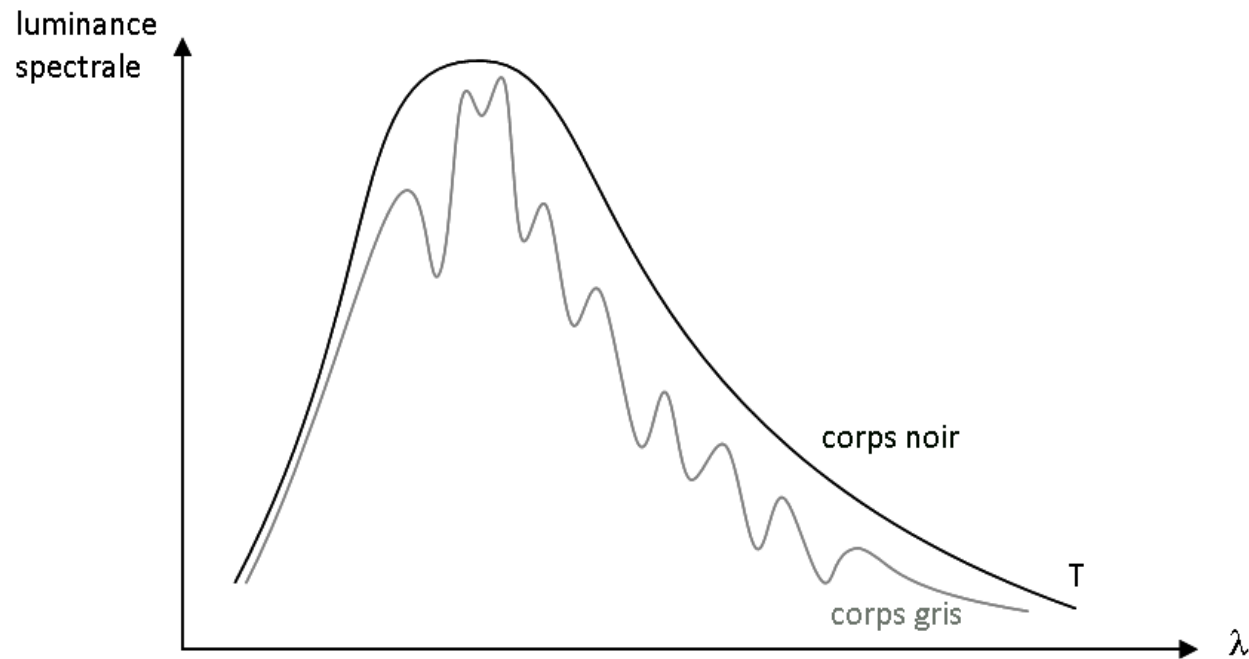
# Corps Gris

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{L_{\lambda}(T)}{L_{\lambda}^0(T)}$$

- avec :

$L_{\lambda}(T)$ : luminance spectrale de la surface naturelle à la température T

$L_{\lambda}^0(T)$ : luminance spectrale du corps noir à la même température T



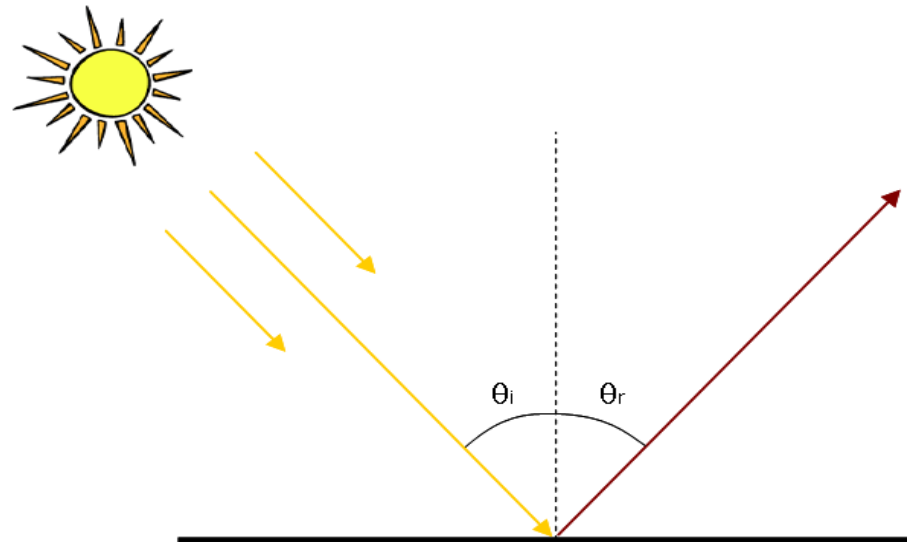
# Réflexion

- La réflexion se définit comme un **changement de direction du rayonnement électromagnétique** quand celui-ci atteint une surface.
- En télédétection, **le phénomène de réflexion est primordial**, car l'identification de la nature des objets par les capteurs satellitaires repose en grande partie **sur la manière dont ils renvoient le rayonnement.**
- La direction du **rayonnement réfléchi** peut varier, elle **dépend de la rugosité des surfaces naturelles.**
- On distingue ainsi trois types de réflexion :
  - **réflexion spéculaire,**
  - **réflexion diffuse**
  - **réflexion de volume.**

# Réflexion spéculaire 1

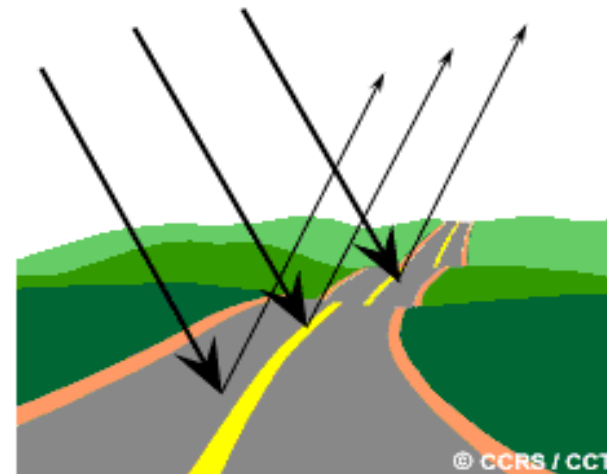
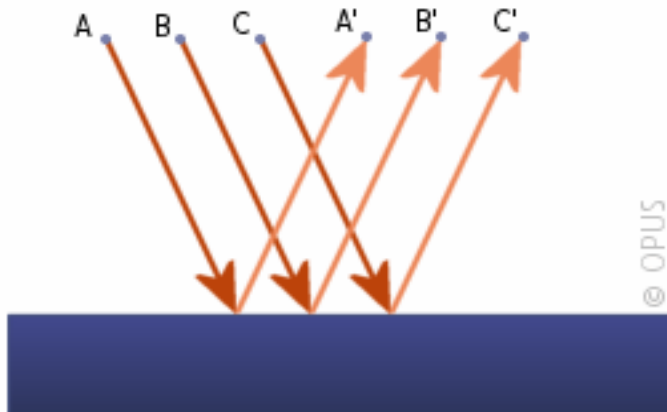
La réflexion est dite spéculaire lorsque le rayonnement réfléchi par la surface **l'est dans une seule et même direction**.

- Ce type de réflexion est régi par les lois de Descartes, l'angle du rayonnement réfléchi est donc le symétrique de celui du rayonnement incident par rapport à la normale.
- La réflexion spéculaire se produit uniquement sur des surfaces lisses, dont les aspérités ont une taille inférieure à la longueur d'onde du rayonnement incident.



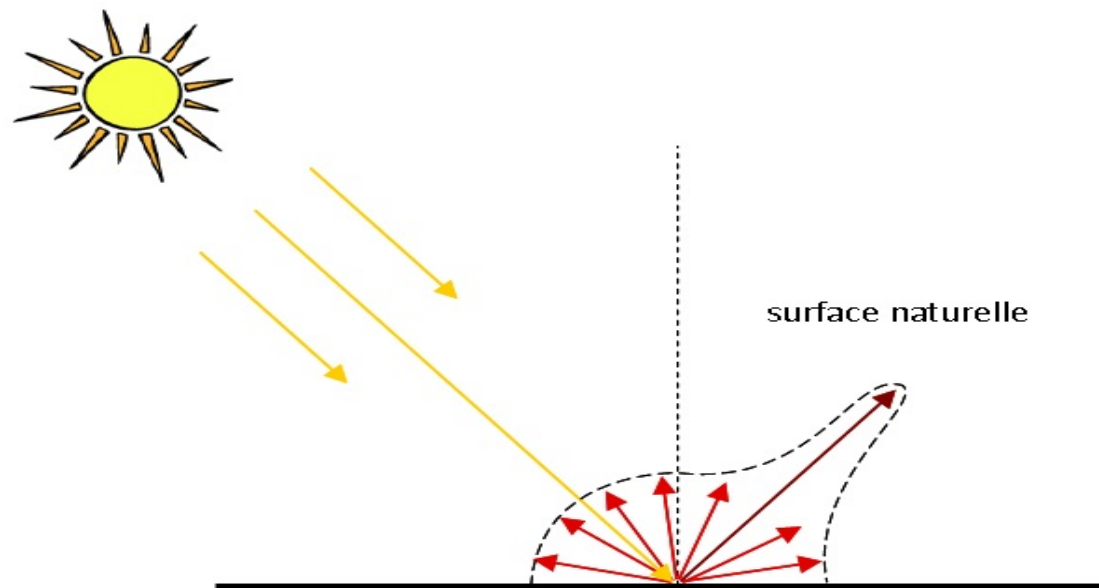
# Réflexion spéculaire 2

- En télédétection, on peut observer une réflexion spéculaire sur des **surfaces d'eau calme**.
- Sur les images, la réflexion spéculaire se traduit par une **tâche éblouissante si le capteur se situe exactement dans la direction du rayonnement réfléchi, ou bien sombre dans le cas contraire.**
- Remarque : une réflexion spéculaire ne signifie pas forcément une surface parfaitement plane. En effet, **une surface comportant des rugosités de quelques centimètres apparaîtra lisse dans le domaine des hyperfréquences, mais rugueuse dans le visible.**



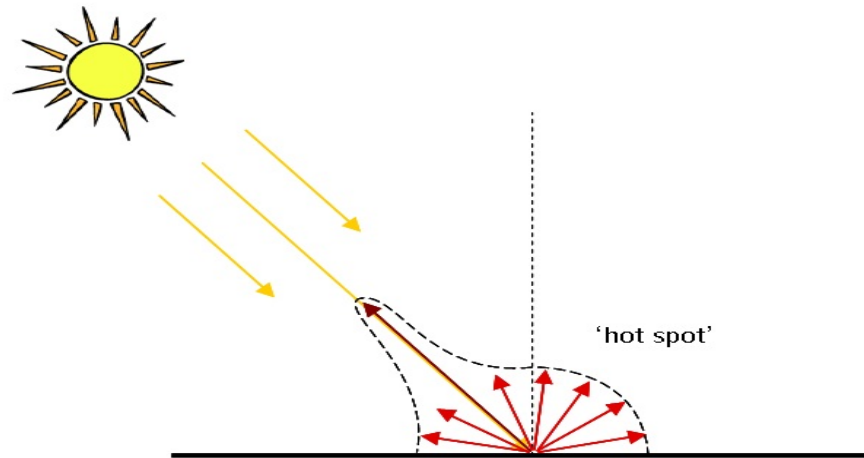
# Réflexion diffuse

- Lorsque les surfaces sont rugueuses, qu'elles présentent des aspérités dont la taille est supérieure à la longueur d'onde du rayonnement incident, la réflexion est diffuse.
- Le rayonnement est réfléchi dans **toutes les directions** à cause des hétérogénéités du milieu, avec généralement **une direction privilégiée pour laquelle la réflexion est plus importante**.



# Réflexion Diffuse Hot spot

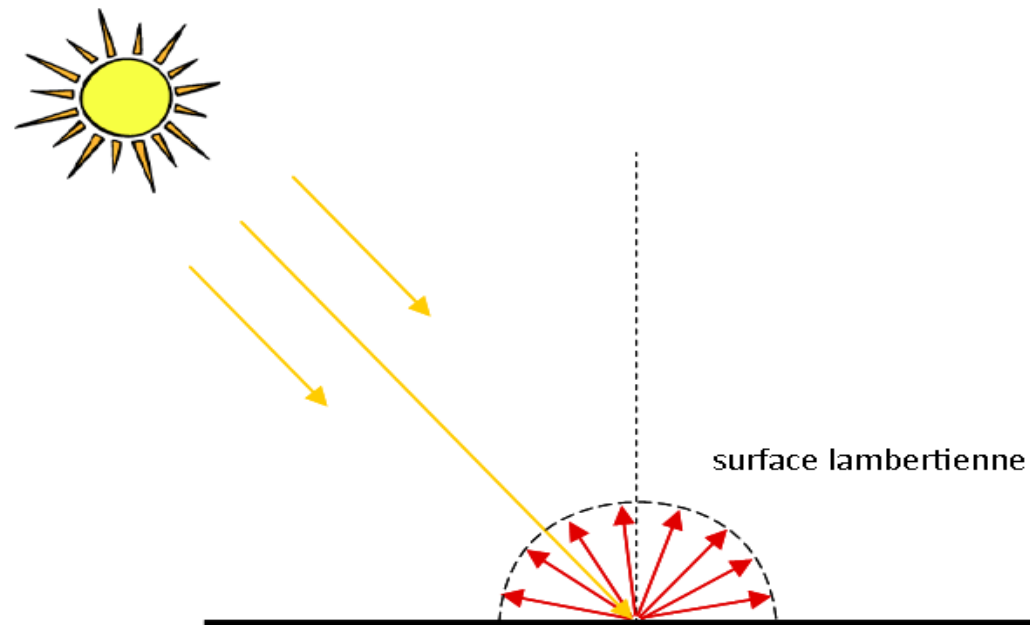
- On peut ainsi définir pour chaque surface une **indicatrice de luminance** (en pointillés). Si on trace à partir de la surface réfléchissante les vecteurs proportionnels à l'intensité du rayonnement réfléchi dans toutes les directions, **l'indicatrice de luminance est la surface obtenue en reliant entre elles toutes les extrémités des vecteurs.**
- **Lorsque les directions d'observation (capteur satellite) et d'éclairement (soleil) coïncident, la quantité de lumière réfléchie par une surface rugueuse présente un maximum.**
- Ce phénomène, connu sous le nom de '**hot spot**' est lié au fait que dans cette configuration, **l'instrument ne voit que des éléments de surface éclairés, ce qui explique le pic de réflectance.**





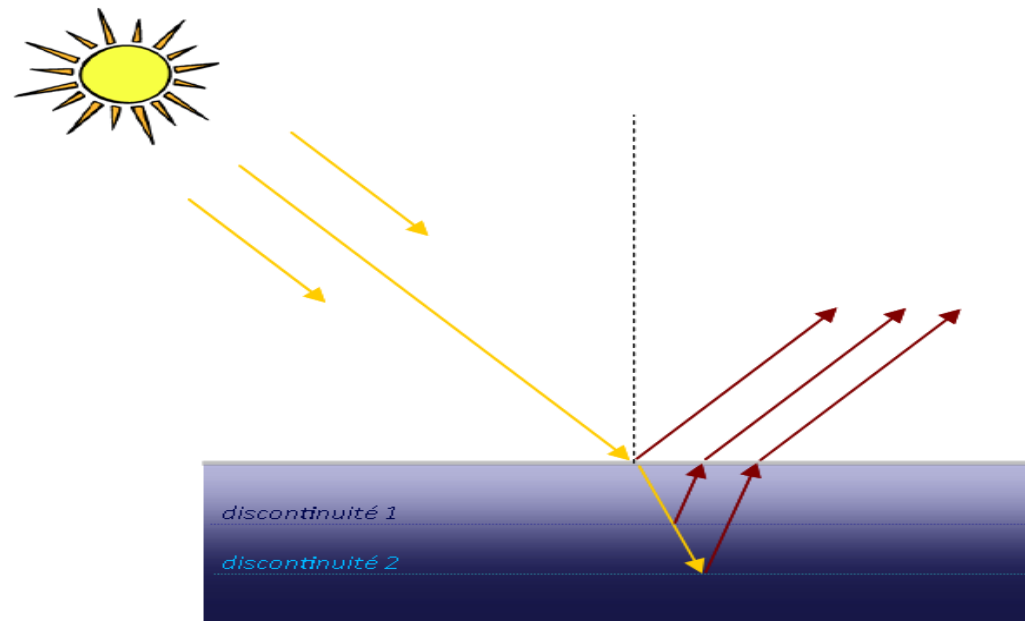
# Réflexion lambertienne

- Dans le cas où **l'intensité du rayonnement réfléchi est la même dans toutes les directions**, on parle de réflexion lambertienne



# Réflexion de volume

- La réflexion de volume peut être considérée comme **la somme de plusieurs réflexions de surface**.
- Elle se produit lorsque **une partie du rayonnement incident est transmis dans un milieu**. Le rayonnement est alors réfléchi par les **différentes discontinuités de la couche traversée**.
- **Dans la réalité, le rayonnement total réfléchi par les surfaces naturelles est la somme de la réflexion spéculaire, de la réflexion diffuse et de la réflexion de volume.**



# Absorption

- Tous les corps naturels absorbent une partie du rayonnement qui leur parvient.
- La partie du rayonnement absorbé modifie l'énergie interne du corps. Il y a production de chaleur et réémission de l'énergie à une plus grande longueur d'onde.

En télédétection spatiale, la notion d'absorption est fondamentale car le signal parvenant au capteur satellitaire est modifié au cours de la traversée atmosphérique où **le rayonnement est fortement absorbé par les constituants gazeux et les particules en suspension.**

- Il est intéressant de noter que contrairement à ce qui se passe dans **l'atmosphère, transparente aux rayonnements visible et proche infrarouge, les surfaces naturelles elles, absorbent une partie de ces rayonnements.**

# Transmission

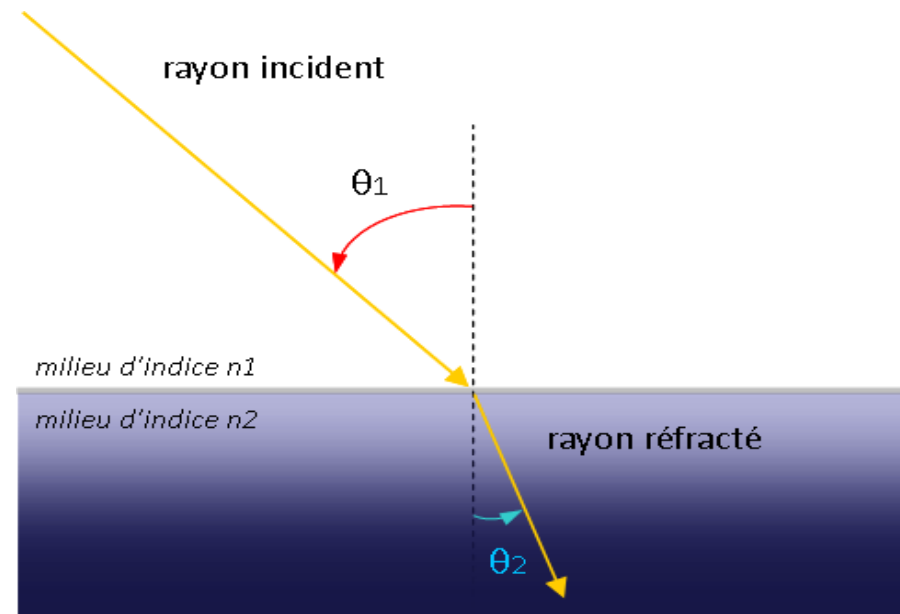
- Lorsqu'une partie du rayonnement **incident passe à travers un milieu, on dit que le rayonnement est transmis.**
- Le phénomène de transmission concerne les milieux plus ou moins transparents comme l'eau, les nuages ou l'atmosphère, mais pas uniquement.
- **Le feuillage des arbres par exemple se comporte comme un milieu transparent vis-à-vis du rayonnement proche infrarouge.**

Cette notion de transmission est très importante en télédétection, puisque les capteurs dédiés à l'observation des surfaces terrestres et océaniques **utilisent les bandes spectrales pour lesquelles l'absorption du rayonnement solaire par l'atmosphère est négligeable.**

- Ces bandes spectrales correspondent **aux fenêtres atmosphériques discutées dans le chapitre précédent.**

# Réfraction

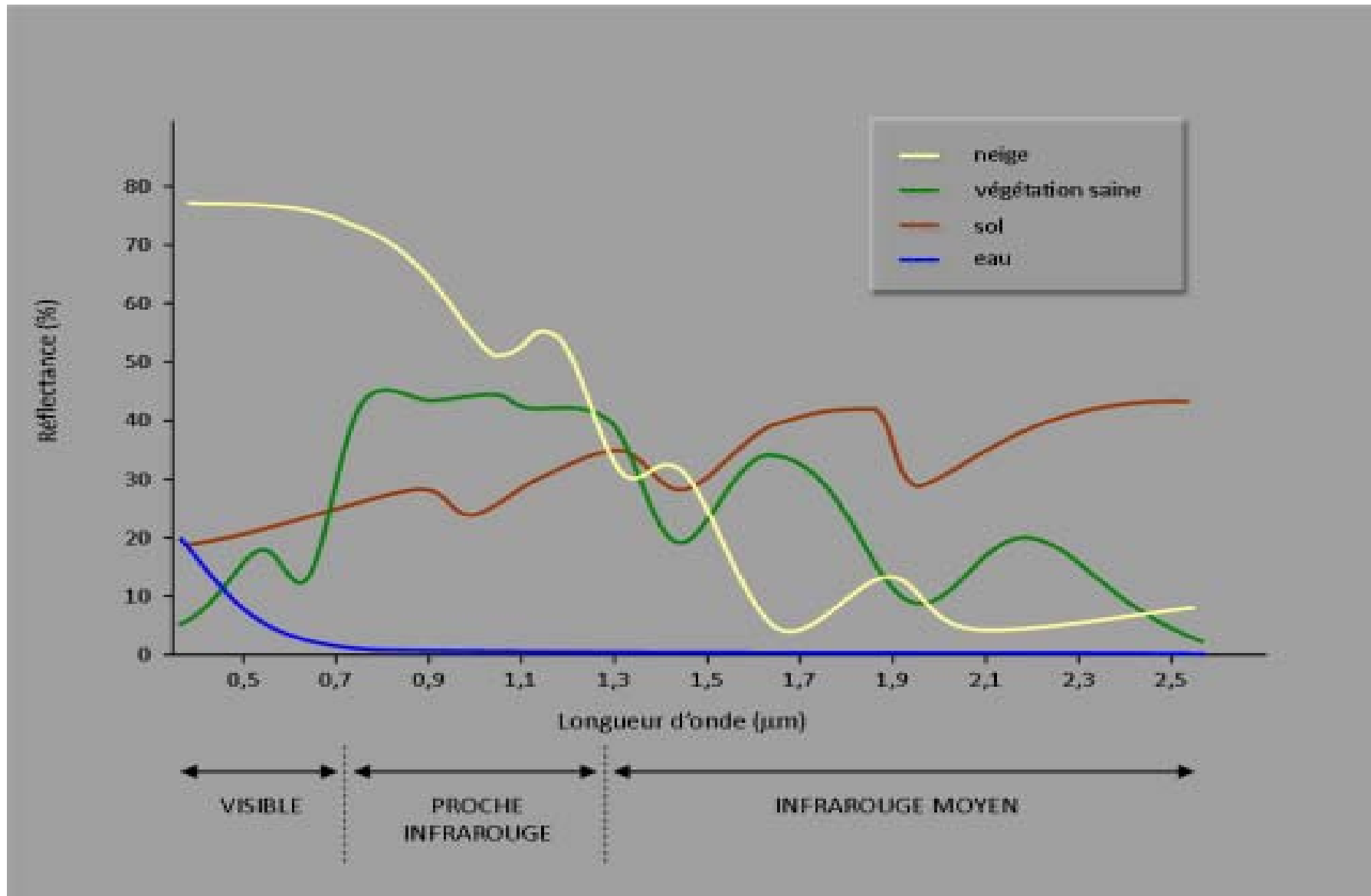
- Le phénomène de réfraction correspond à une **dévi**ation de la trajectoire du rayonnement lorsqu'il passe d'un milieu à un autre n'ayant pas le même indice de réfraction (**r**apport entre vitesse de la lumière dans le vide et vitesse de la lumière dans le milieu considéré).
- La réfraction se produit à l'interface entre les deux milieux.
- Selon les lois de Descartes, le rayon réfracté est dans le plan d'incidence et la relation liant les indices de réfraction  $n_1$  et  $n_2$  de chacun des milieux et les angles incident  $\theta_1$  et réfracté  $\theta_2$
- est la suivante :  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$



# Signatures spectrales des principales surfaces naturelles

- En fonction de la nature et des caractéristiques intrinsèques des objets et des surfaces, **le rayonnement incident interagira avec la cible**
- **selon l'une ou l'autre des propriétés citées précédemment, ou de manière générale selon une combinaison de ces propriétés.**
- **Chaque surface possède ainsi une signature spectrale - quantité d'énergie émise ou réfléchié en fonction de la longueur d'onde – qui lui est propre**
- qui permettra son identification sur les images satellitaires. La figure suivante présente la signature spectrale des principales surfaces naturelles.

## SIGNATURES SPECTRALES DES SURFACES NATURELLES DANS LE DOMAINE DU VISIBLE, DU PROCHE INFRAROUGE ET DE L'INFRAROUGE MOYEN



# Bibliographie

- [1] BAKIS H. & BONIN M. (2000), « La photographie aérienne et spatiale », Paris, PUF, Que sais-je n°1700
- [2] CHEVALLIER R. (1965), « Photographie aérienne - panorama Intertechnique », Gauthier-Villars, Paris, 237p.
- [3] GAGNON H. (1974), « La photo aérienne - son interprétation dans les études d'environnement et de l'aménagement du territoire », Montréal, les éditions HRW, 278p.
- [4] Le site web officiel du gouvernement du canada : <https://www.canada.ca/fr.html> section interprétation des photographies aériennes
- [5] GARRY G. & CAMOU (1984), « Photo-interprétation ... de la photographie aérienne à l'urbanisme », Plaquette réalisée au Service Technique de l'Urbanisme, Ministère de l'Urbanisme, du Logement et des Transports, Direction de l'Urbanisme et des Paysages, 53p.
- [6] LILLESAND T.M. & KIEFER R.W. (2000), «Remote sensing and image interpretation », 4th ed., USA, John Wiley & Sons, Inc., 724p. (Chap.2 à 4).
- [7] PHILIPSON W.R. (2000), «Manual of photographic interpretation », 2nd éd., Science and engineering series, American society for photogrammetric and remote sensing, USA.
- [8] Claude Kergomard, support de cours : « La télédétection Aéro-spatiale : une introduction », Ecole Normale Supérieure, Paris, France.
- [9] GIRARD Michel-Claude, GIRARD Colette. (1999) Traitement de données de télédétection. Dunod, Paris.
- [10] Cours de télédétection. Cours N° 4645(2001). Université de Genève. Département de géographie, Centre canadien de télédétection, Ressources naturelles Canada Technologies Ltd.
- [11] R.BARIOU.(1978) : manuel de télédétection ; photographie aérienne, image radar, thermographies, satellites. Edition SODIPE S.A. paris.
- [12] J.Y. SCANVIC ; (1983) : utilisation de télédétection dans les sciences de la terre. Bureau de recherches géologiques et minières.