

Bases physiques de la télédétection

• « Techniques d'observation et méthodes d'analyse pour la gestion de l'eau dans les bassins versants agricoles méditerranéens »

• École d'hiver du 2 au 6 mars 2015,

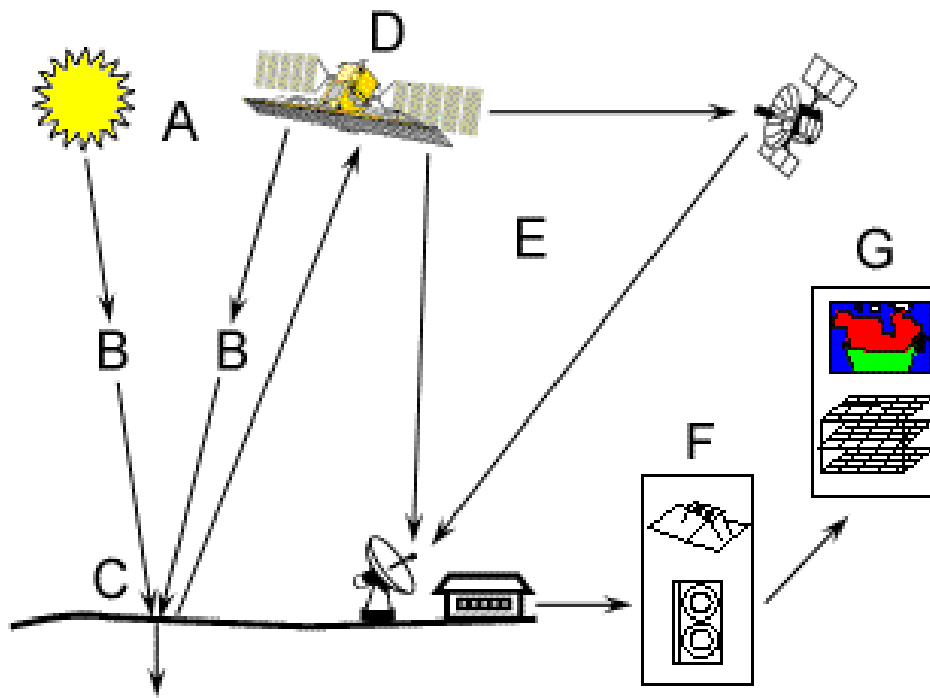
• INAT (& Univ. Carthage, IRESA), Tunis, Tunisie

• Vincent Simonneaux – CESBIO, Toulouse



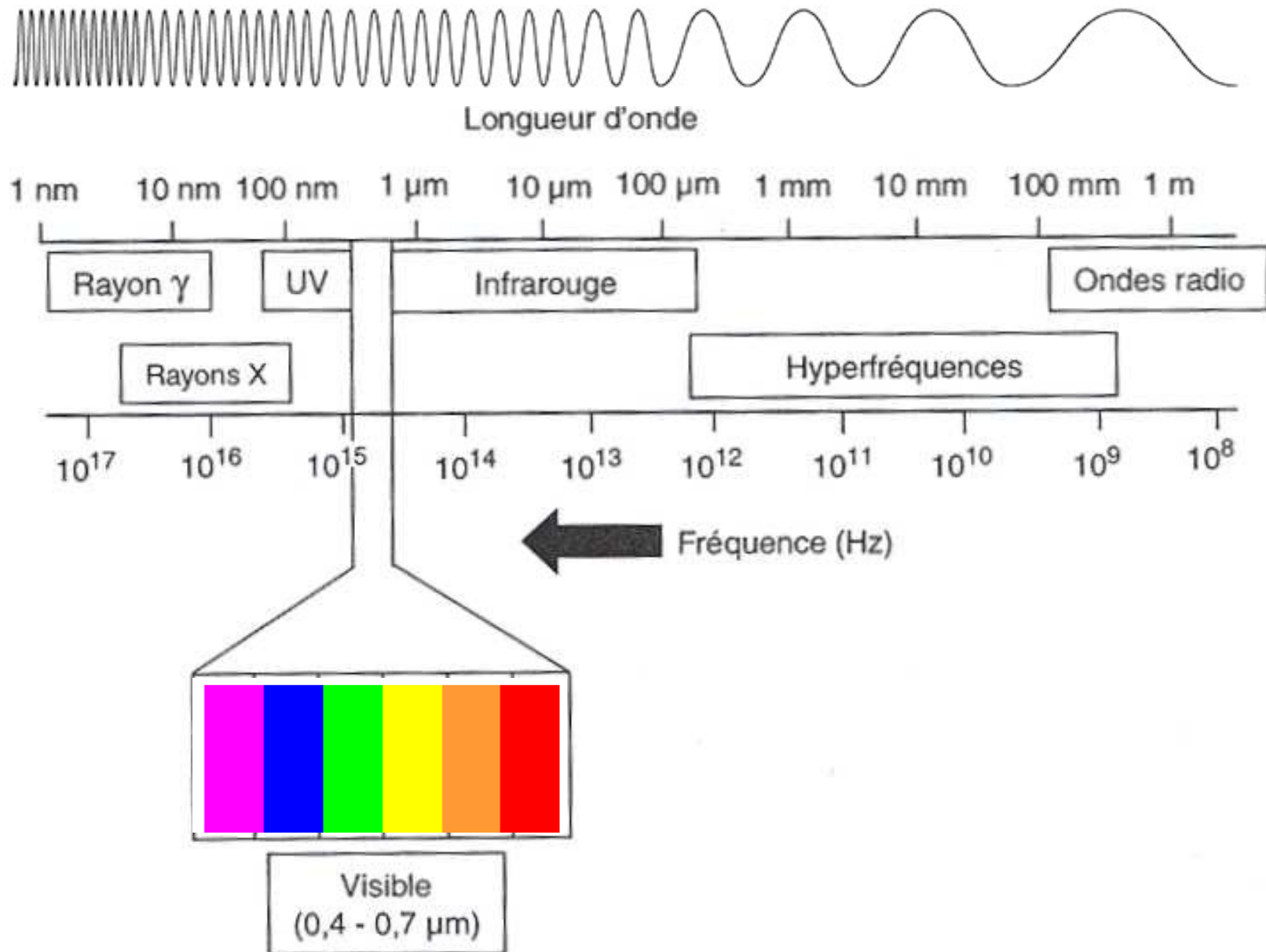
Qu'est ce que la télédétection ?

Définition du Centre Canadien de Télédétection (CCT) :

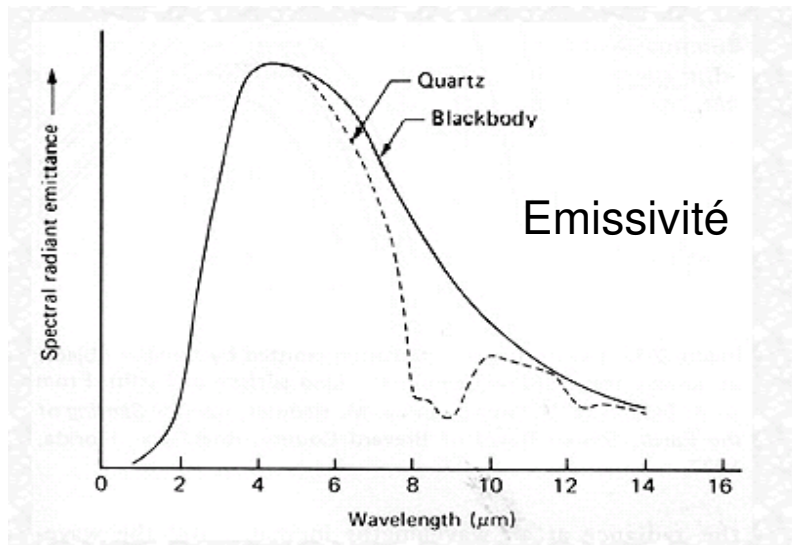
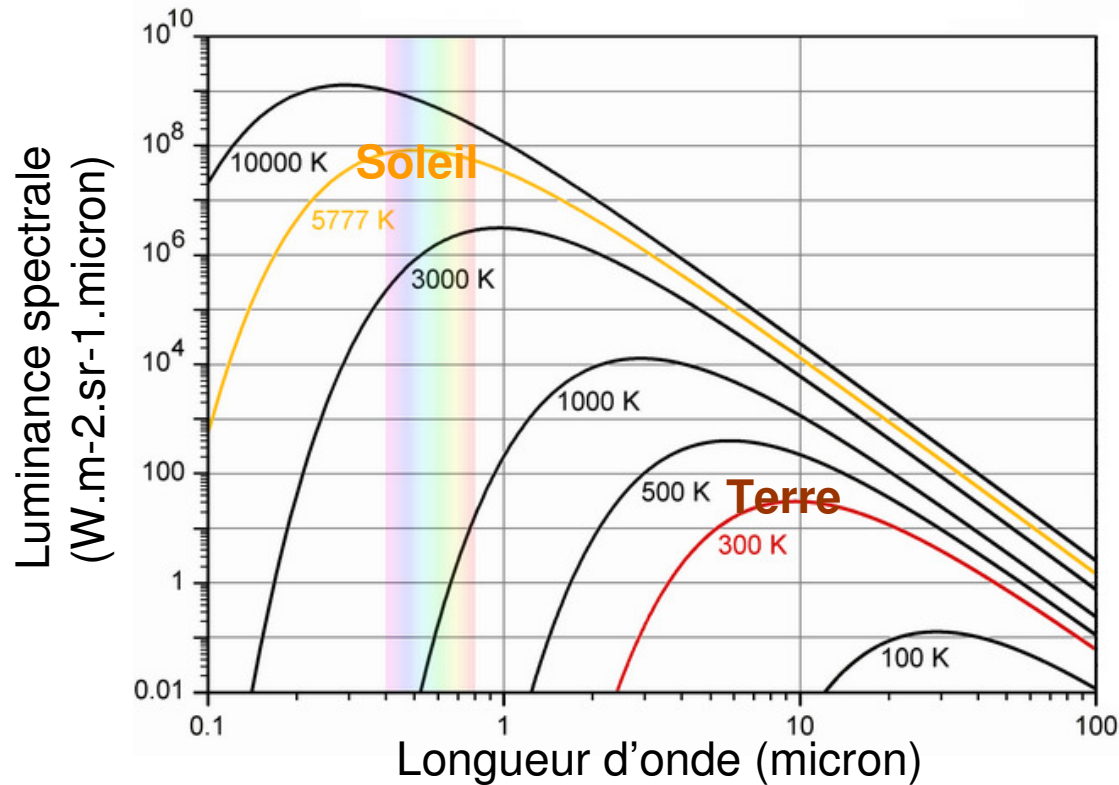


- « La télédétection est la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci »
- « La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information »

Le spectre électromagnétique



Émission du corps noir

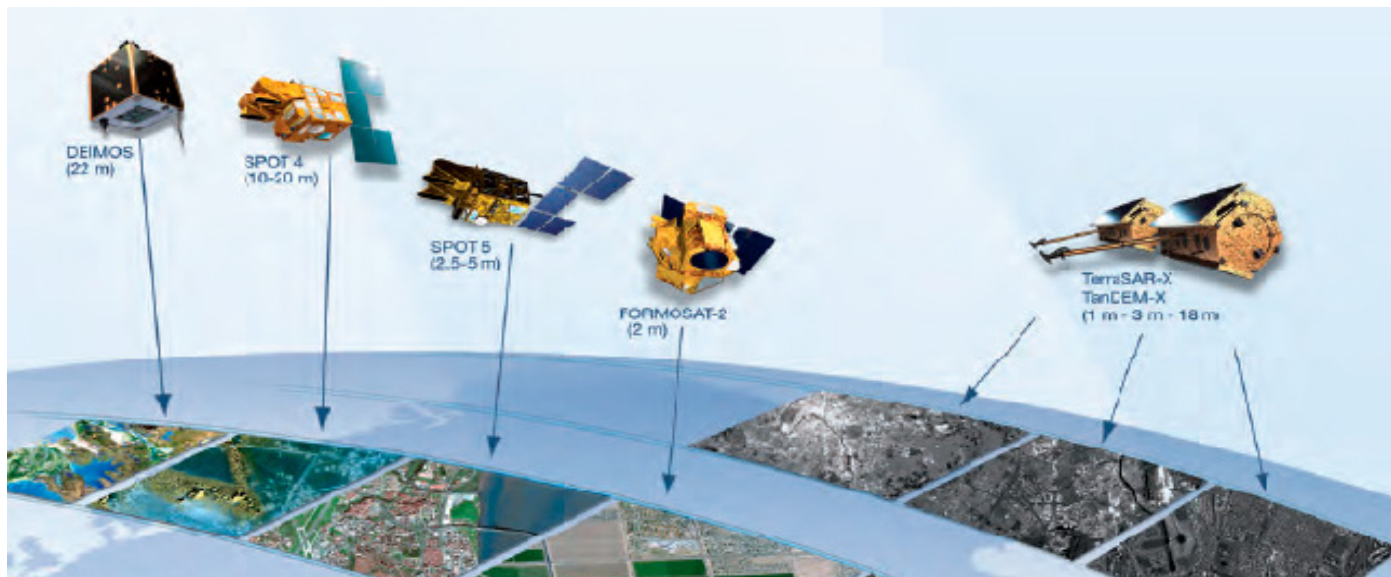


- **Emission du corps noir** en fonction de sa température (Loi de Planck)
ex. corps noir à 300K (terre) => max vers 10 microns (IR thermique).
- **Energie émise** sur l'ensemble du spectre (Loi de Stephan Boltzman)
$$E = \epsilon \sigma T^4$$

ϵ émissivité de la surface
 σ constante de Boltzman
 T température du corps
- **Emissivité** = rapport entre l'énergie émise par une surface quelconque et le corps noir.
 $1 > \epsilon > 0,94$ pour les objets naturels

Origine de la radiance mesurée par satellite

- Mesure de rayonnement électromagnétique mesuré pour des surfaces élémentaires, les **pixels**
- Sources de rayonnement :
 - Le soleil => rayonnement **réfléchi** par la surface terrestre (visible-proche infrarouge)
 - La terre => rayonnement **émis** (thermique, micro-ondes)} => Télédétection **passive**
- Un instrument => satellites radar (micro-ondes ou hyperfréquences) => Télédétection **active**



Interactions du rayonnement avec l'atmosphère

Interaction rayonnement atmosphère

Diffusion

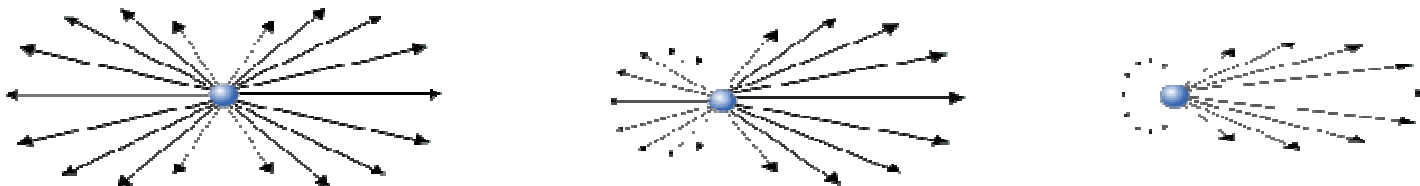
On distingue 2 processus de diffusion :

- **La diffusion de Rayleigh**

- due principalement aux molécules d'azote ou d'oxygène
- proportionnelle à λ^{-4} , elle disperse plus les courtes longueurs d'onde (bleu)
=> le ciel paraît bleu durant la journée.

- **La diffusion de Mie**

- due aux particules (gouttelettes d'eau, poussière, pollen, fumée)
- affecte +/- uniformément les longueurs d'onde
=> les nuages sont blancs
- se produit surtout dans les couches inférieures de l'atmosphère où les grosses particules sont plus abondantes



Interaction rayonnement atmosphère

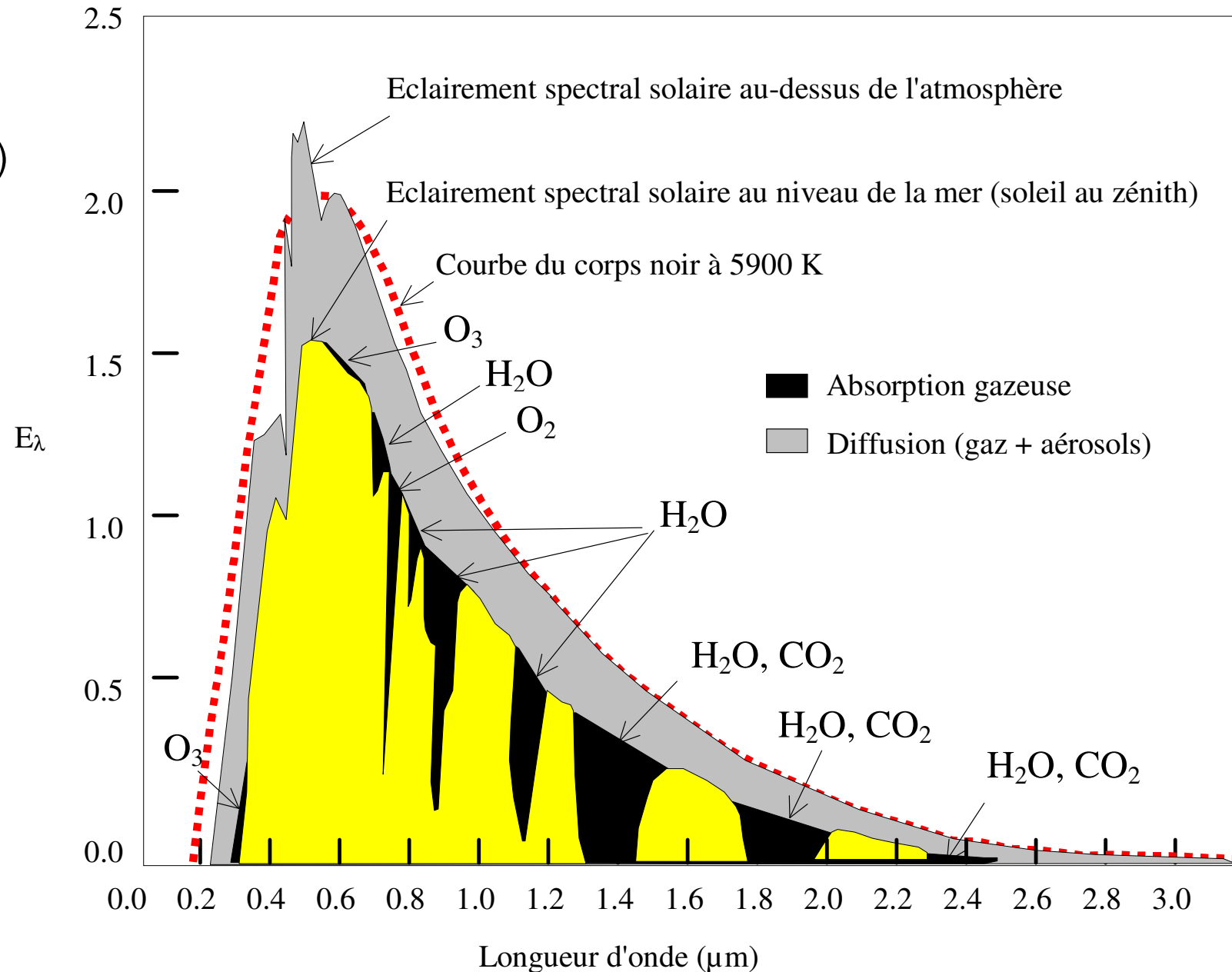
Absorption

Les **grosses molécules** de l'atmosphère (ozone O_3 , dioxyde de carbone CO_2 , vapeur d'eau, etc.) absorbent l'énergie de diverses longueurs d'onde.

L'énergie absorbée est restituée selon la loi du corps noir

=> **thermique**

(=> effet de serre !)



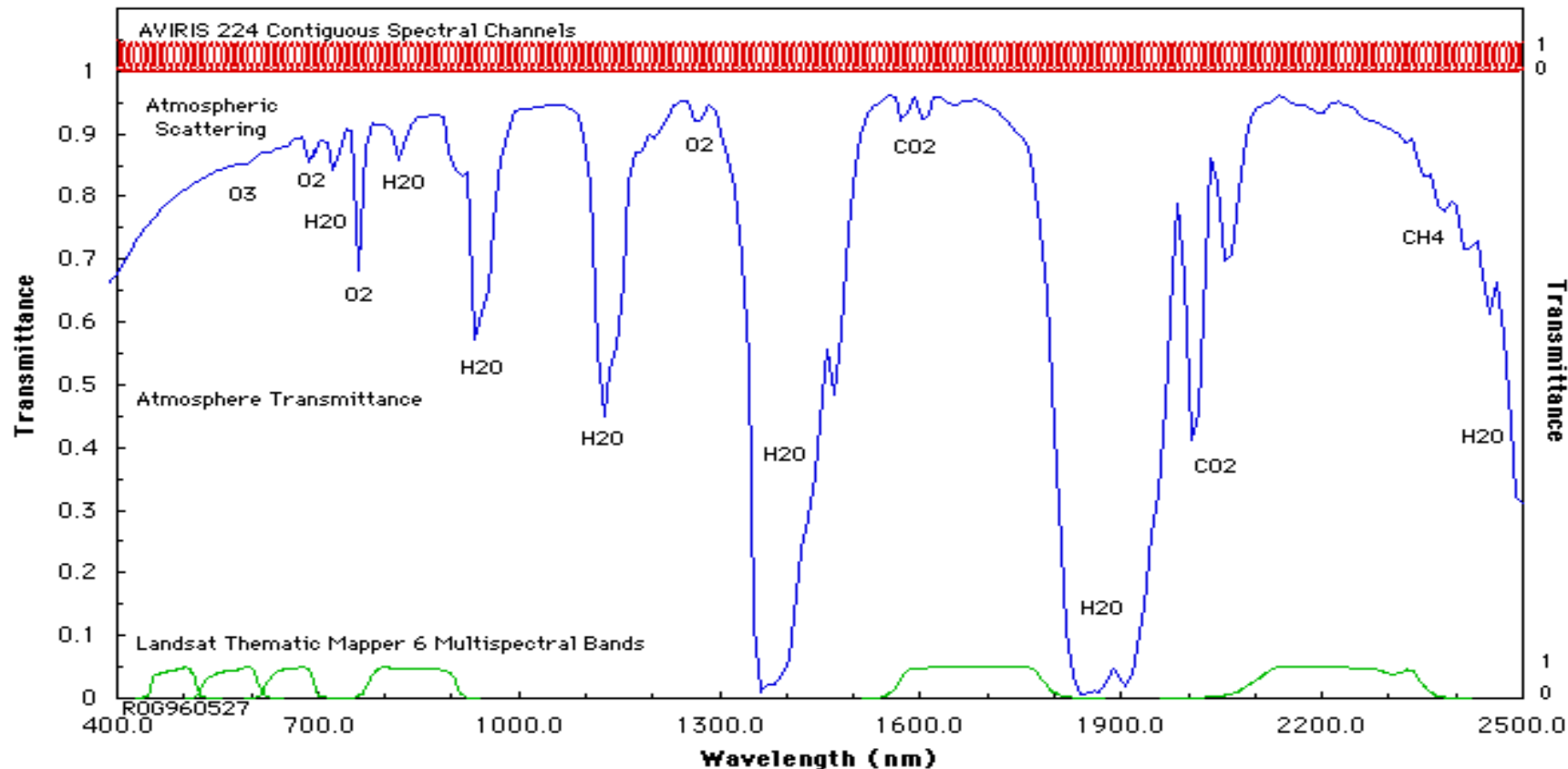
Interaction rayonnement atmosphère

Absorption

La télédétection utilise les régions du spectre qui ne sont pas influencées de façon importante par l'absorption atmosphérique, elles sont appelées **fenêtres atmosphériques**.



Exemple des bandes Landsat

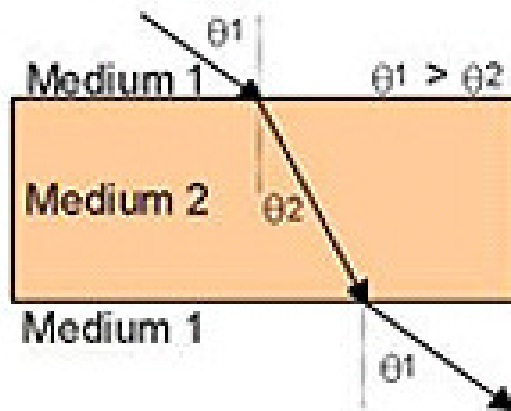


Interaction du rayonnement solaire avec la surface terrestre

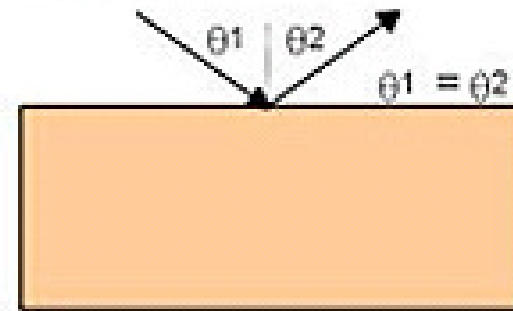
Interaction rayonnement surface

Les processus

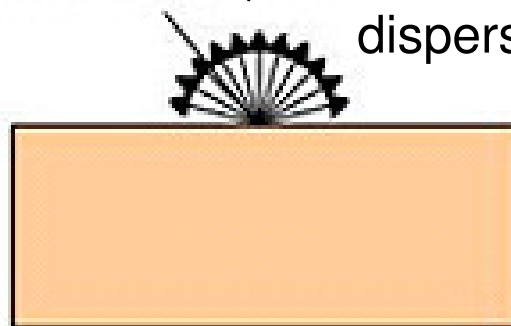
Transmission



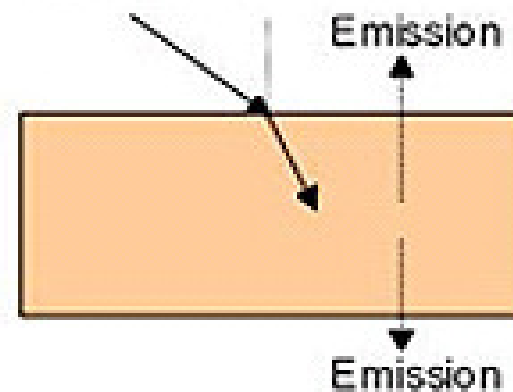
Reflection (réflexion spéculaire)



Scattering (diffusion ou dispersion)



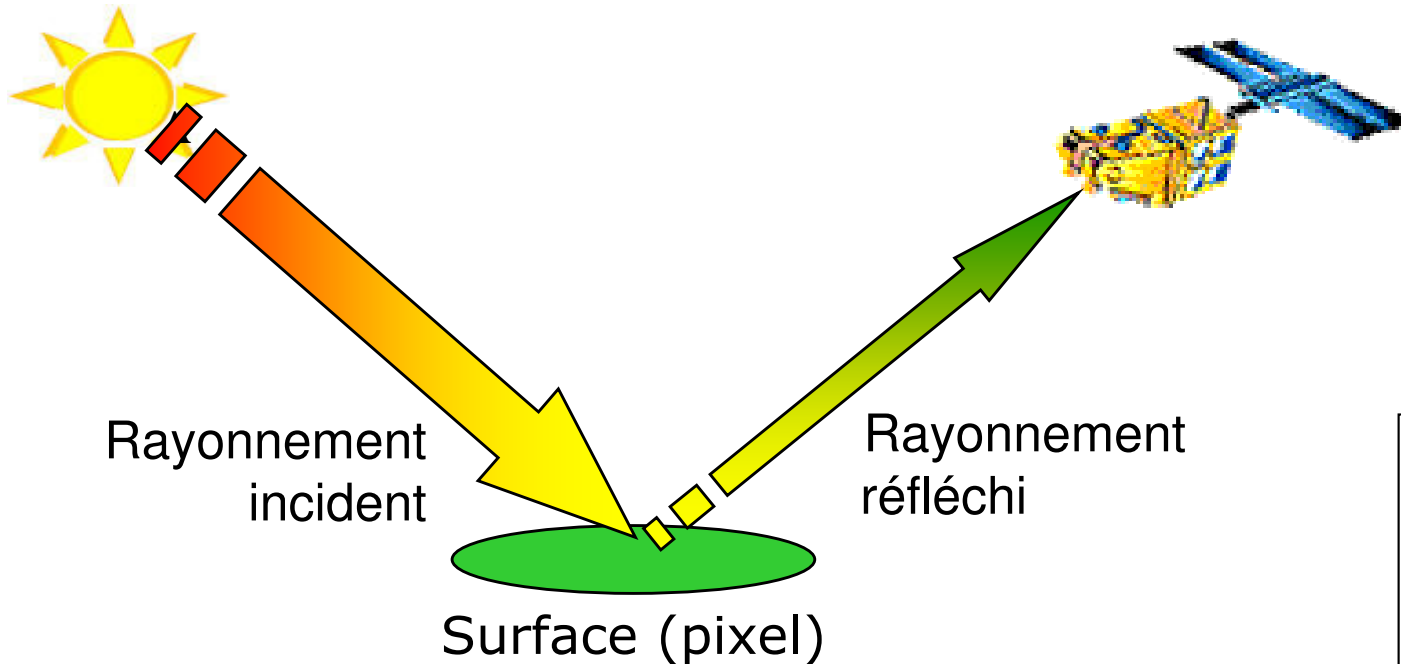
Absorption



Interaction rayonnement surface

Notion de reflectance

Concept valable pour les satellites mesurant le rayonnement solaire réfléchi



$$\text{Réflectance} = \frac{\text{Rayonnement réfléchi (W.m}^{-2}\text{)}}{\text{Rayonnement incident (W.m}^{-2}\text{)}}$$

sans unité, valeur dans [0, 1]

Albedo

C'est une réflectance intégrée pour une étendue de longueur d'onde.

L'albédo est un paramètre intéressant lorsqu'on s'intéresse au bilan énergétique d'une surface.

Interaction rayonnement surface

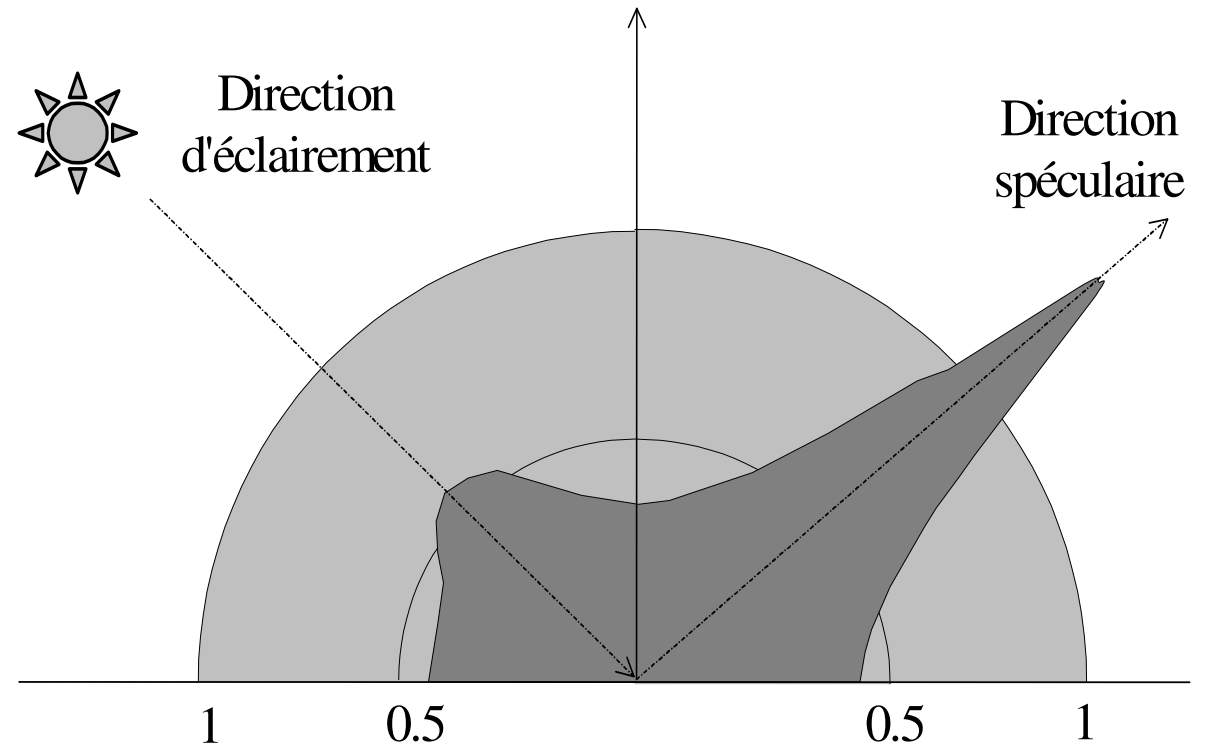
Diffusion

La diffusion (« scattering ») est variable selon la direction considérée

⇒ **réflectance bidirectionnelle**

(BRDF = fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle)

Si celle-ci est uniforme en fonction de la direction de réflexion, on a à faire à un diffuseur **Lambertien**



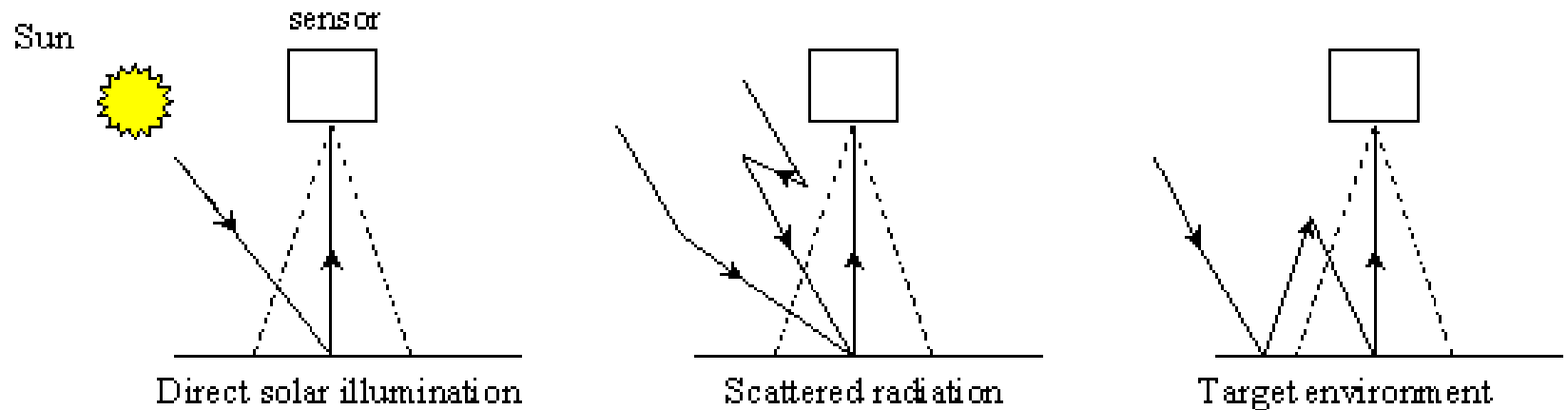
*En gris clair la luminance d'une surface lambertienne,
en gris foncé un réflecteur quelconque*

d'après J.P.Gastellu, CESBIO

Interaction rayonnement surface

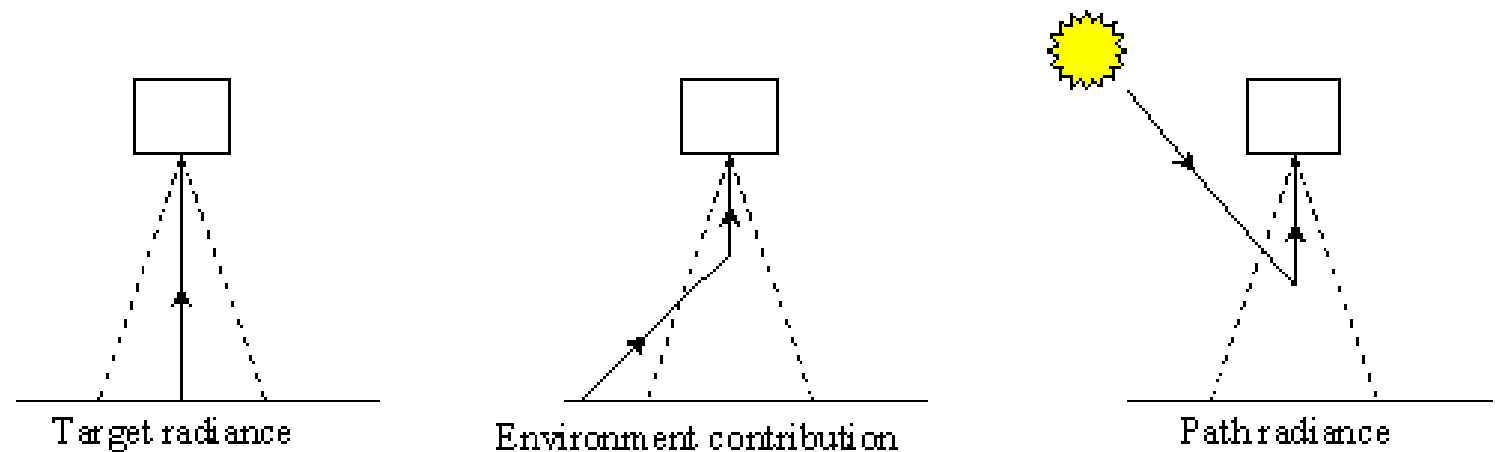
Effets atmosphériques

Contribution to target illumination



Impact de la diffusion et de l'absorption sur l'éclairement du pixel et les mesures satellitaires.

Contribution measured radiance



Interaction rayonnement surface

Modélisation du rayonnement

E éclairement solaire "hors atmosphère" (W.m^{-2})

Td transmittance descendante de l'atmosphère (-)

Ep éclairement solaire reçu par le pixel (W.m^{-2})

Eatm luminance atmosphérique vers le sol (W.m^{-2})

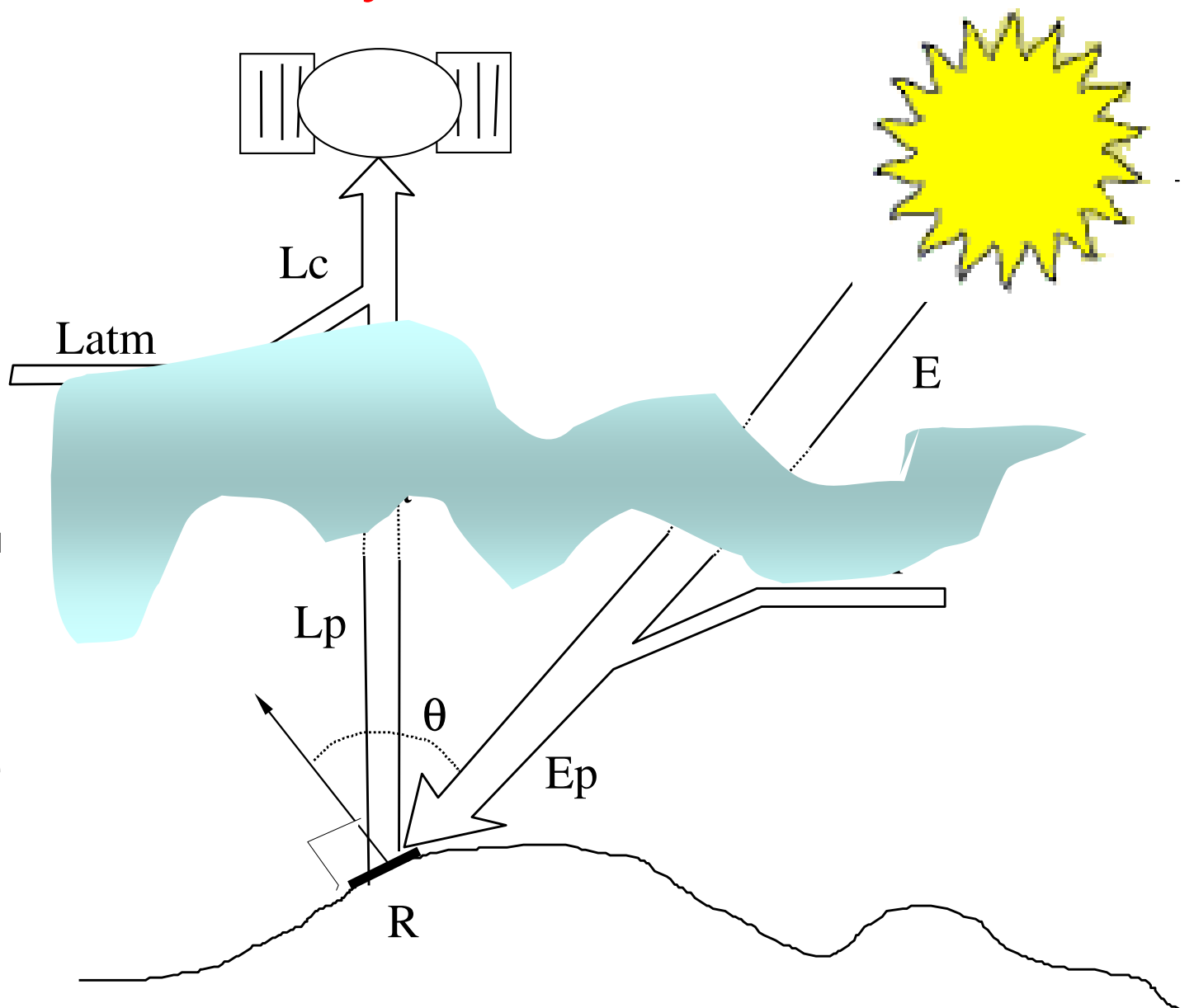
θ angle entre la direction du soleil et la normale au sol (rad)

Lp luminance du pixel au niveau du sol (W.m^{-2})

Ta transmittance ascendante de l'atmosphère (-)

Latm luminance atmosphérique vers le satellite (W.m^{-2})

Lc luminance pixel reçue au niveau du capteur ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$)



Interaction rayonnement surface

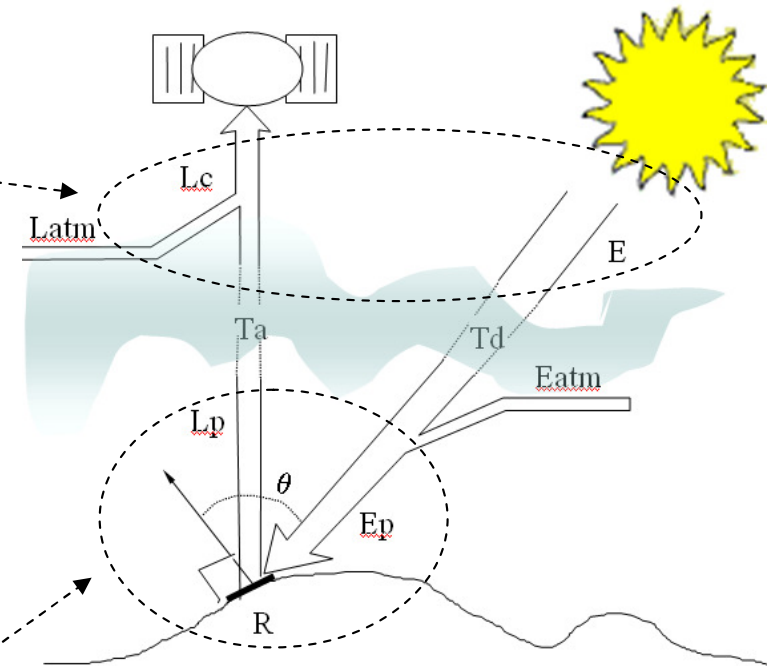
Calcul de la réflectance

- La réflectance du point de vue du satellite, ou « **Réflectance au sommet de l'atmosphère** » (TOA « Top Of Atmosphère »), abstraction faites des effets atmosphériques est :

$$R_{toa} = \frac{\pi * L_c}{E \cdot \cos(\theta_i)}$$

- Avec effet de l'atmosphère (aérosols, H₂O, O₃...)
= **Réflectance sol** (TOC « top of canopy »)

$$R_{toc} = \frac{L_p}{E_p} = \frac{\pi * (L_c - L_{atm})}{T_a * (E * T_d * \cos(\theta_i) + E_{atm})}$$



Hypothèse « ciel clair »
Rtoa = Rtoc

Comportement spectral de surfaces types

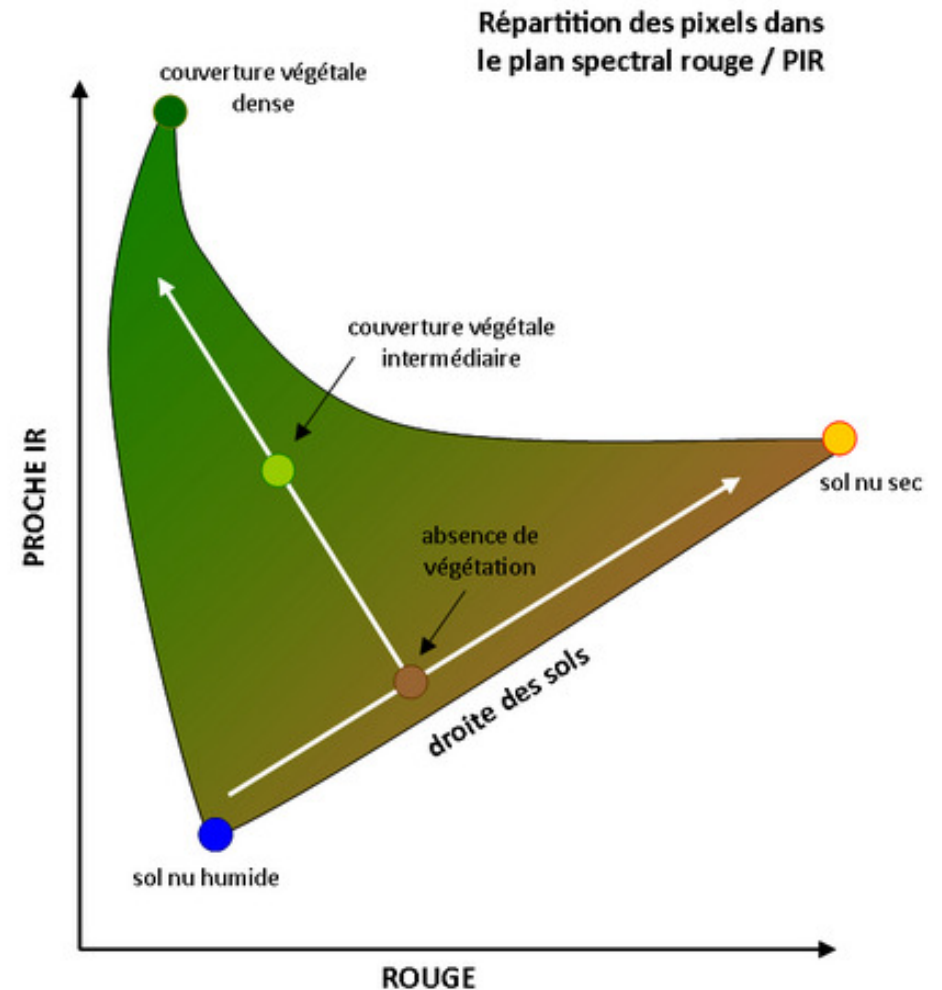
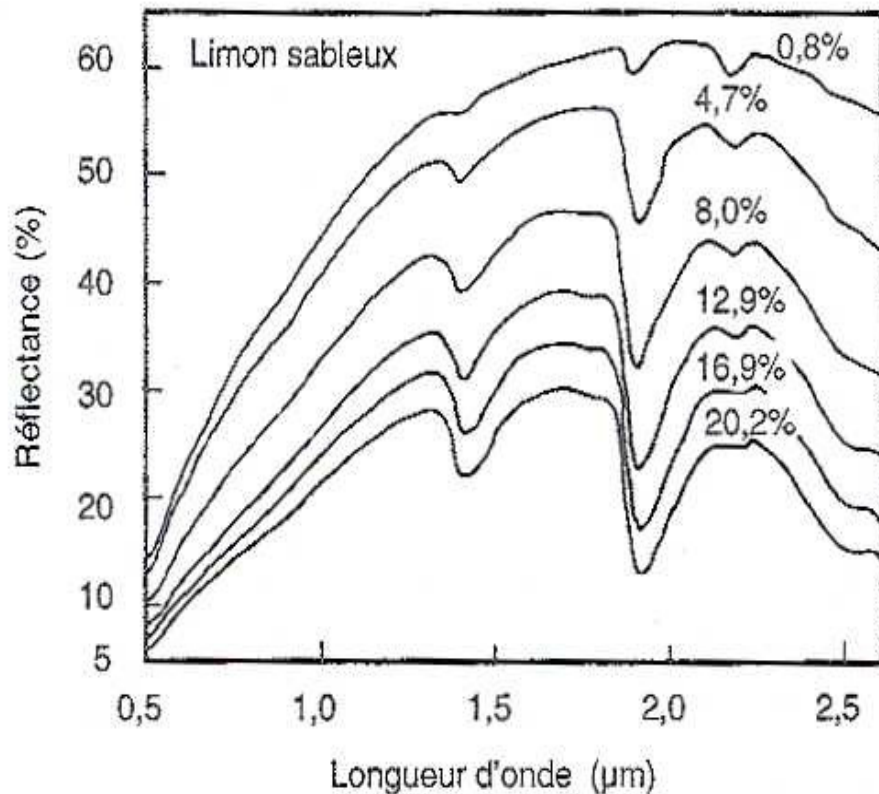
Propriétés spectrales des surfaces

Les sols

Influence de

- Teneur en matière organique
- Minéralogie (fer, calcaire)
- Rugosité
- Humidité
- etc.

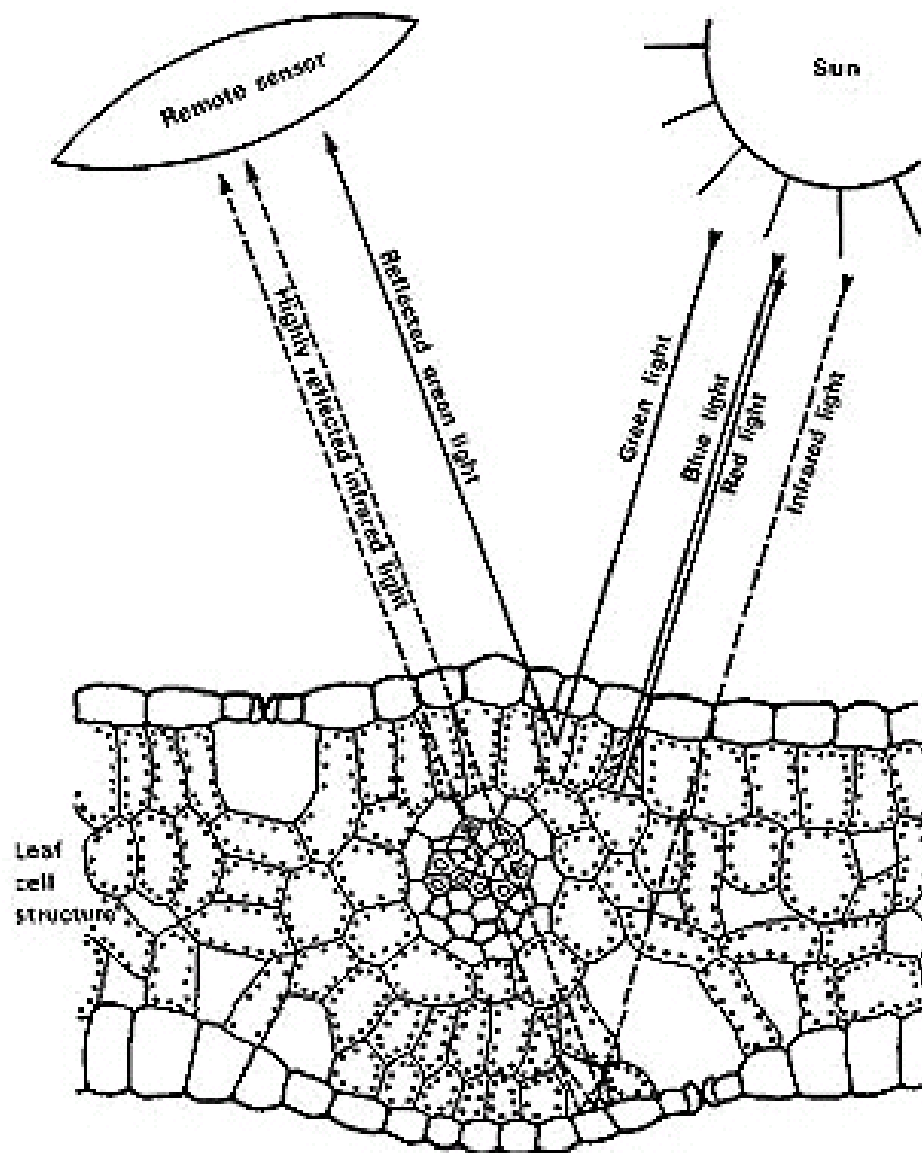
Forte variabilité de la réflectance d'un sol selon rugosité et humidité, mais réflectances restent proportionnelles
=> concept de **droite des sols**



Propriétés spectrales des surfaces

Végétation

- Caractérisée par une forte réponse dans le **proche infrarouge** (0.8 à 1.3 microns)
=> Effet des **parenchymes lacuneux**
- La **chlorophylle** a une réflectance max dans le **vert** (absorbe le bleu et rouge pour la photosynthèse)



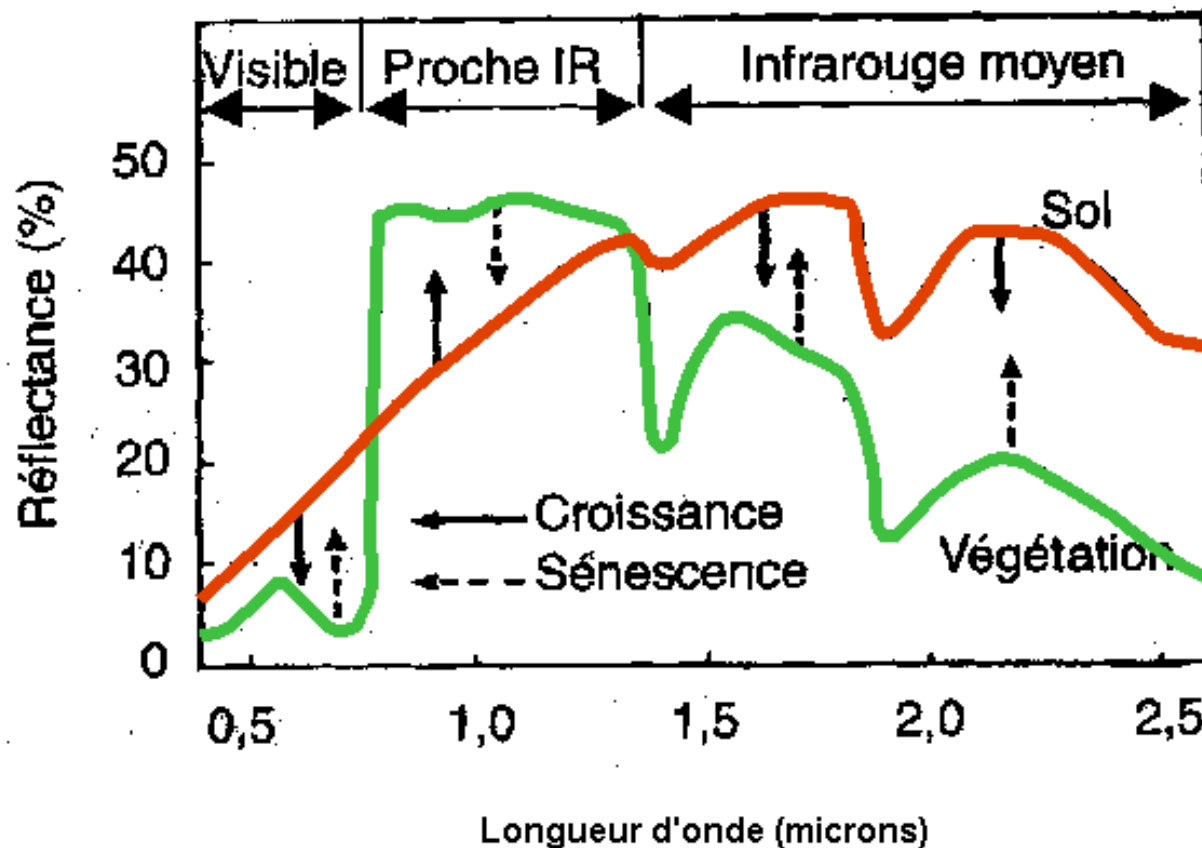
Propriétés spectrales des surfaces

Végétation

Influence de

- Surface foliaire (LAI)
- Type de feuille (espèce)
- Structure du couvert (ombres)
- Etat du feuillage (stress, phénologie)

Sur une image satellitaire, détection de la végétation aléatoire pour des **taux de recouvrement inférieurs à 20%**.



Représentation schématique du sens de l'évolution de la réflectance d'un couvert végétal au cours de la croissance et de la sénescence (d'après Guyot, 1989)

$$\text{NDVI} = \text{Normalized Difference Vegetation Index}$$
$$\frac{(\text{PIR} - \text{R})}{(\text{PIR} + \text{R})}$$

Propriétés spectrales des surfaces

Végétation

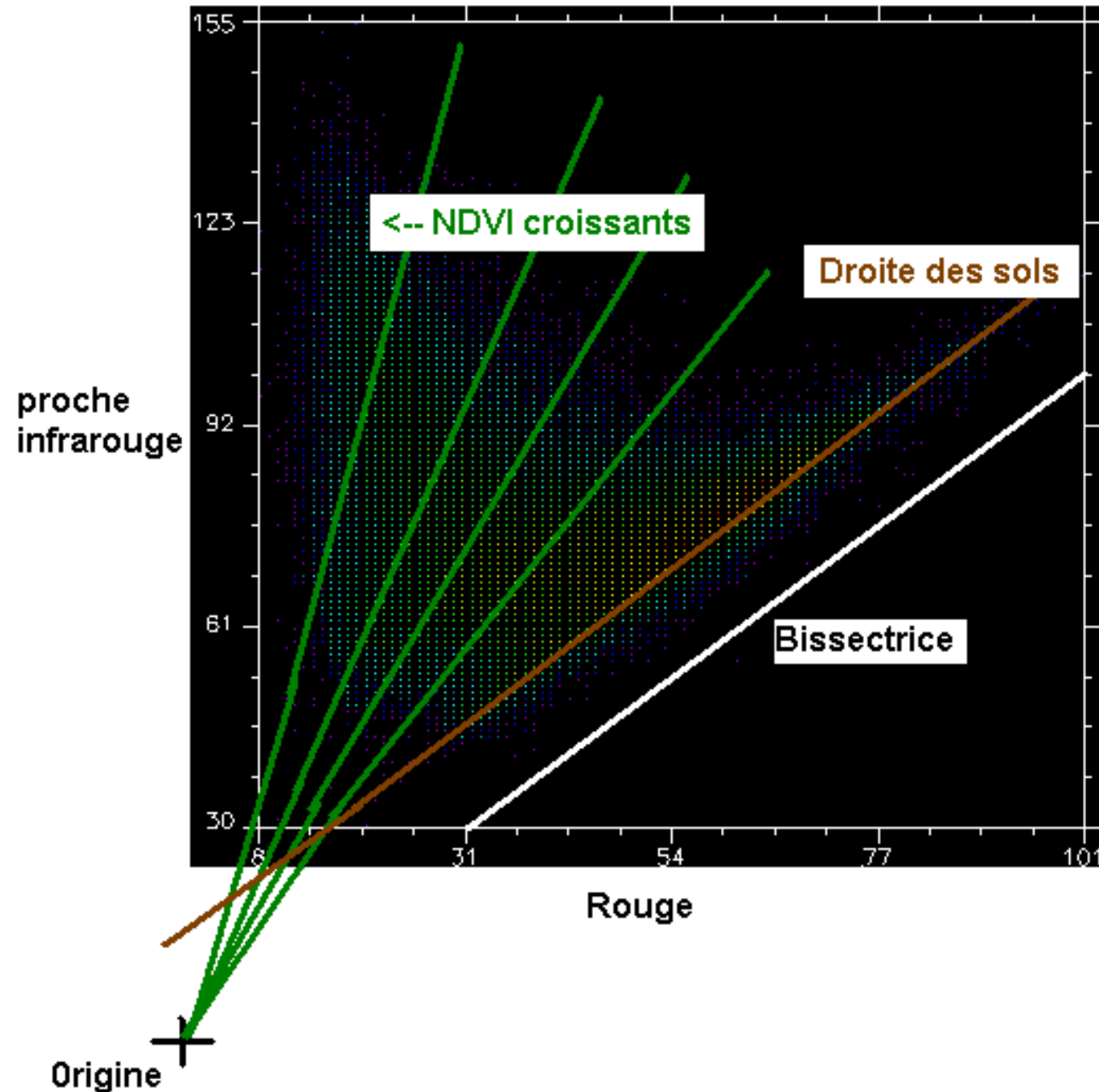
Indices de végétation

- Indice de végétation normalisé (« Normalized Difference vegetation Index »)

$$\text{NDVI} = (\text{pIR}-\text{R})/(\text{pIR}+\text{R})$$

- « Soil adjusted vegetation index »

$$\text{SAVI} = [(1+L) (\text{pIR}-\text{R})] / (\text{pIR}+\text{R}+L)$$



Propriétés spectrales des surfaces

Végétation

Indice foliaire = LAI (Leaf Area Index)

=> **surface des feuilles / surface du sol**

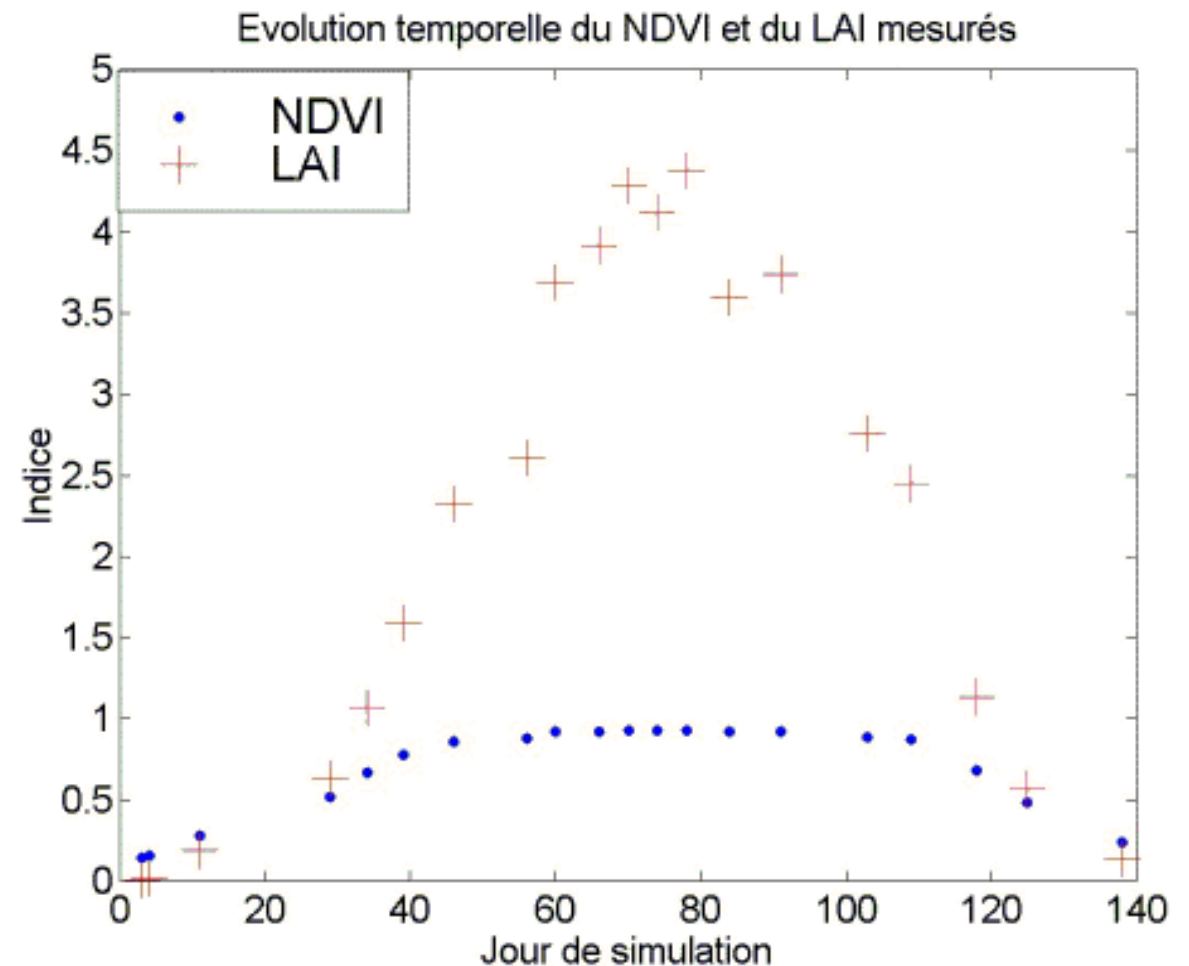
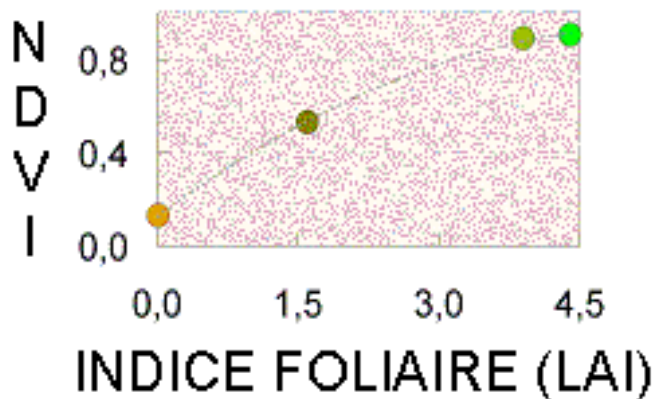
Varie dans la nature en général entre 0 (sol nu) et 5 (végétation dense)

Relation LAI / NDVI

=> très dépendante du type de couvert considéré

=> les données terrain pour calage sont indispensables

=> Saturation vers LAI= \sim 2-3

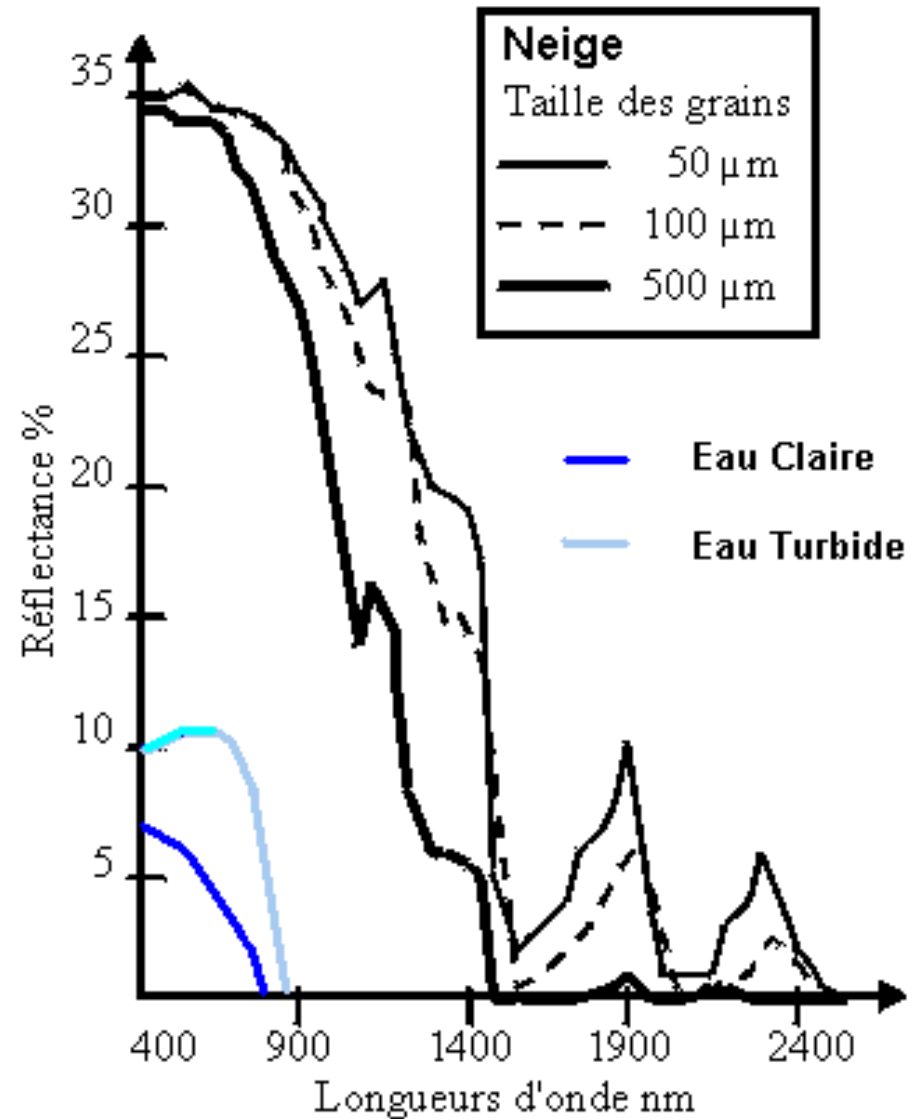


Propriétés spectrales des surfaces

L'eau

La neige se distingue des nuages par une plus faible réflectance dans le MIR.

Les nuages glacés peuvent se confondre avec la neige

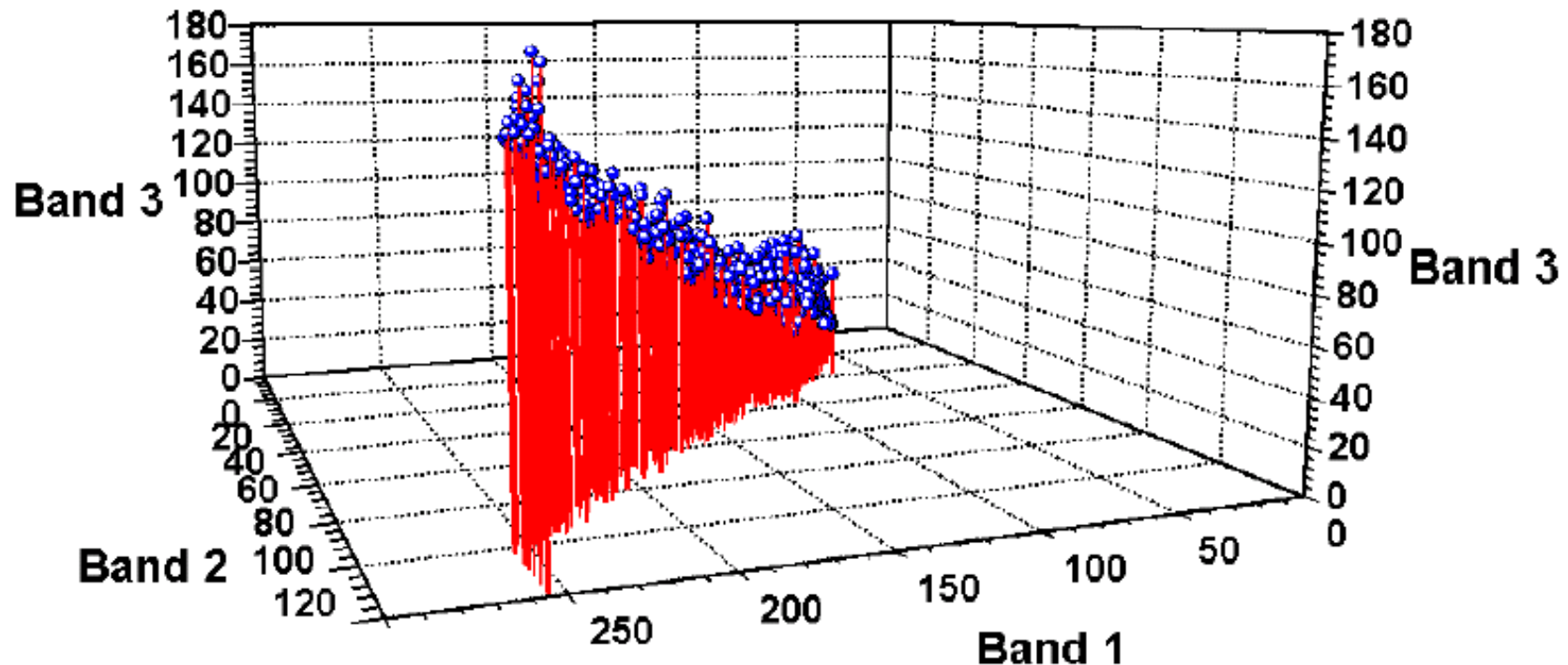


Propriétés spectrales des surfaces

Brillance

Dans une image quelconque, on observe généralement une forte corrélation entre les bandes spectrales.

=> **la Brillance** ressort toujours en première composante d'une ACP



Les capteurs

Les capteurs

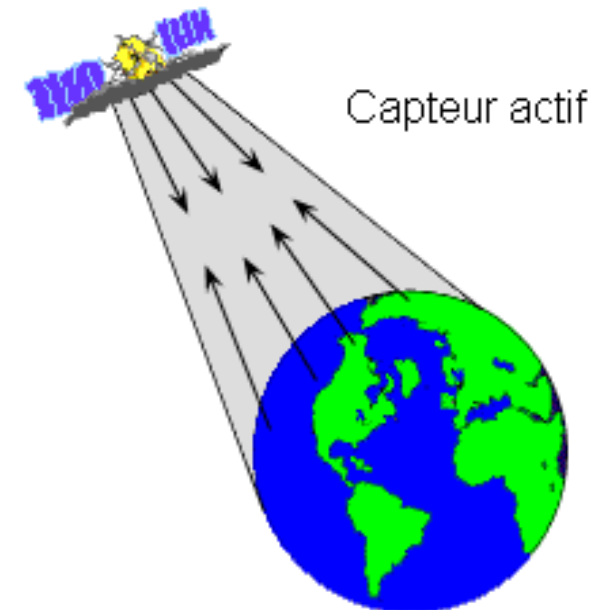
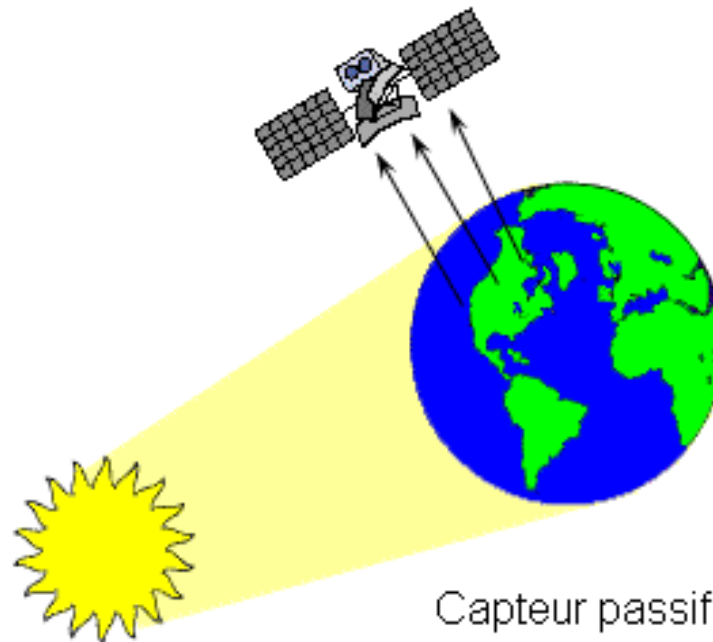
- **Sol**
(Spectrophotomètres de terrain)



- **Aéroportés** (Avions)
Choix des dates
Effet atmosphérique moindre
Coût ++



- **Satellites**
Les plus utilisés



Les capteurs

Satellites = « plateformes »

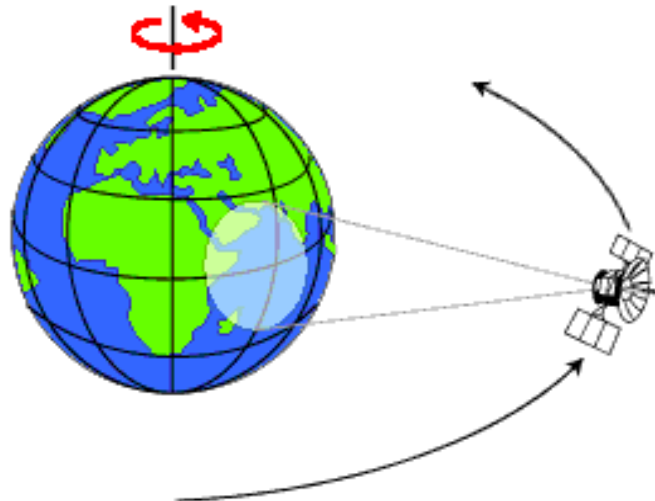
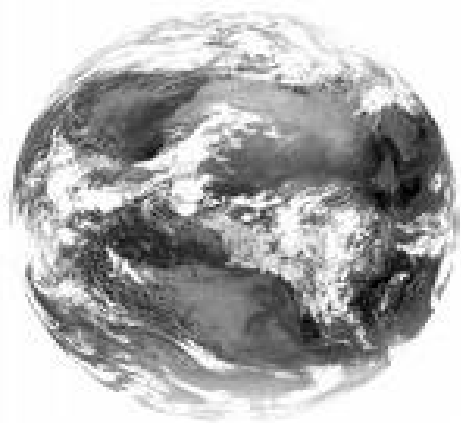
- Géostationnaires

36000 km d'altitude

images en basse résolution
(1000 à 4000 m, Météorologie)

- Satellites à défilement
(orbites semi-polaires)

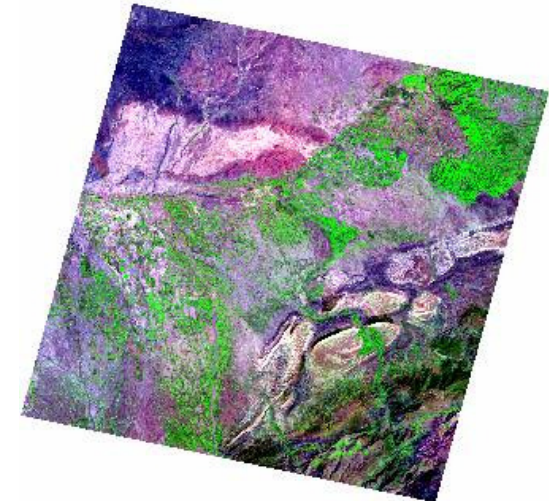
Entre 450 et 900 km d'altitude
Haute résolution : 5 à 1000 m
héliosynchrones (vers 11h00).



Géostationnaire



Semi-polaire



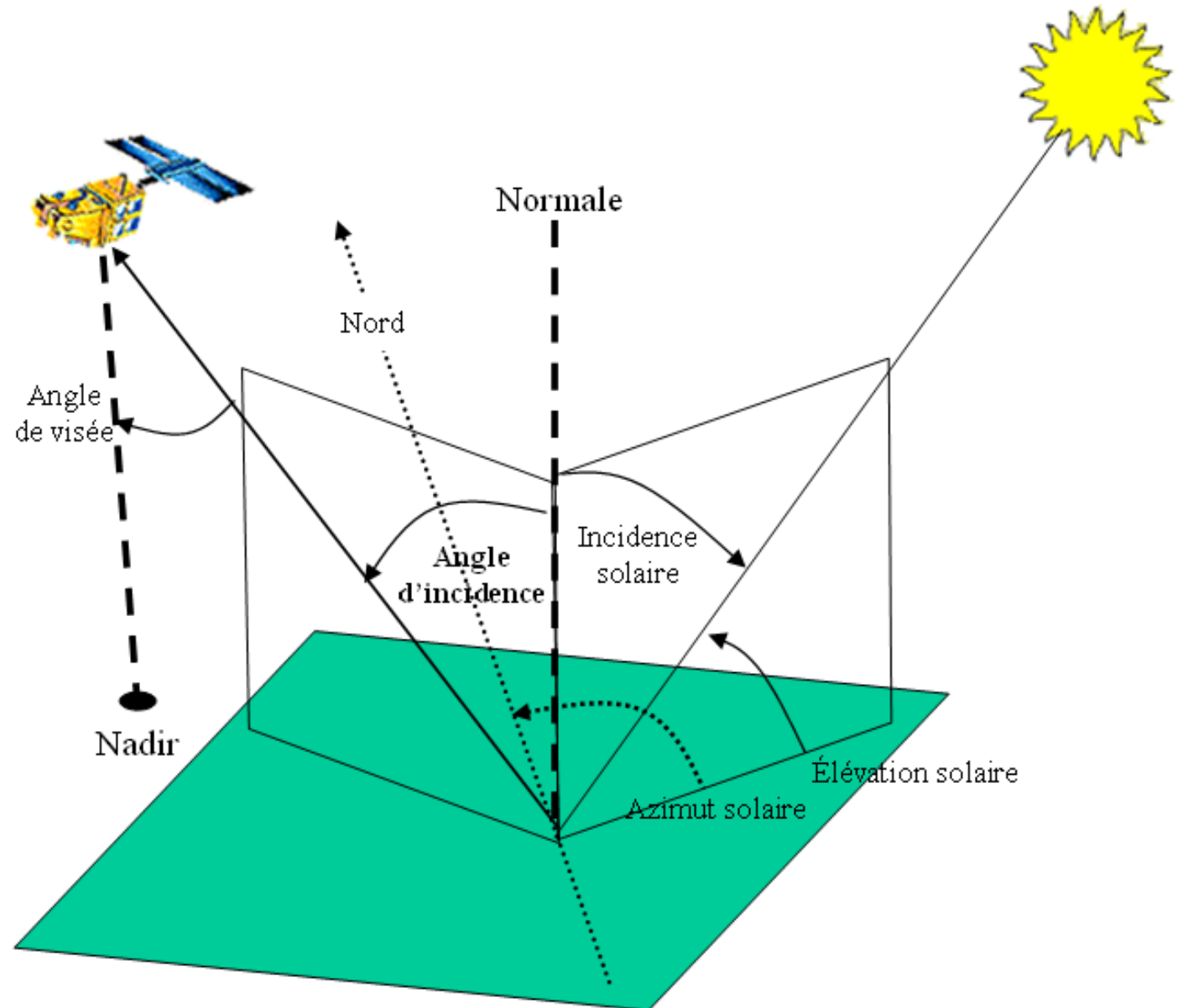
Les capteurs

Géométrie satellite

- L'angle d'incidence est lié à l'angle de visée (+/- 27 degrés sur SPOT).

Il conditionne la déformation interne de l'image (surtout si relief).

- Azimut et élévation) conditionnent la nature de l'éclairement.

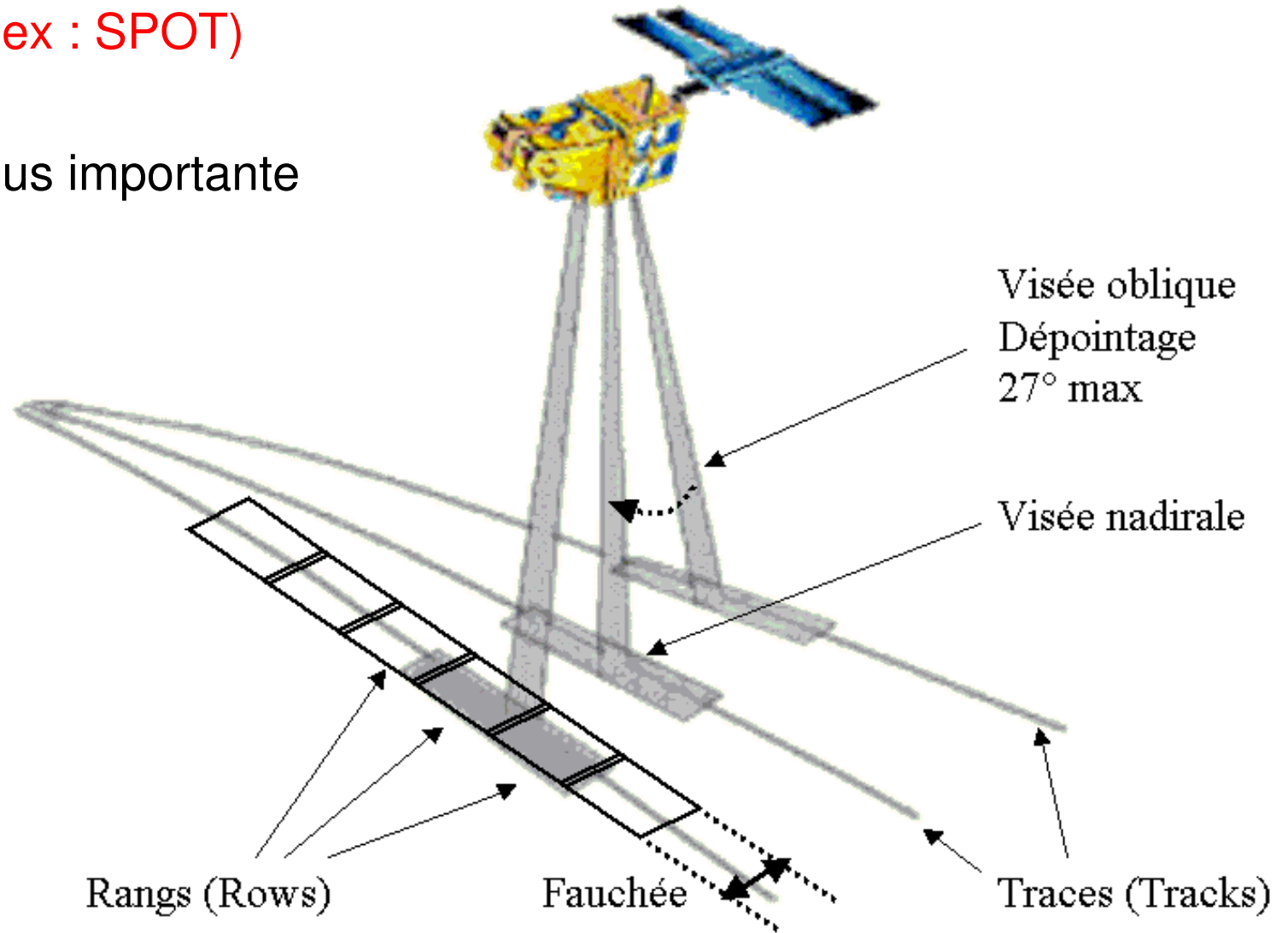


Les capteurs

Géométrie satellite

Visée oblique (ex : SPOT)

- Répétitivité plus importante
- Stéréo



Les capteurs

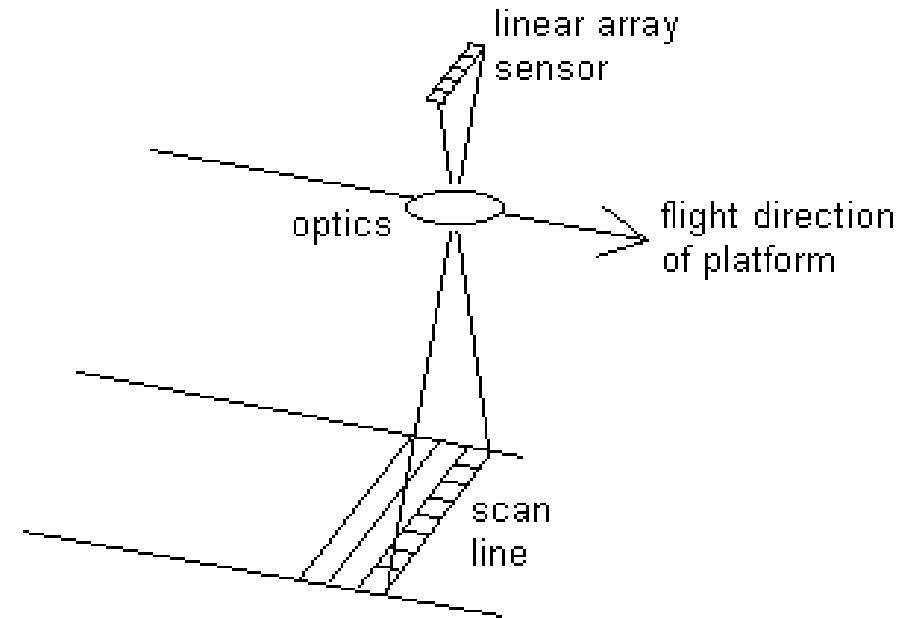
Détecteurs

Barrettes de détecteurs (« Pushbroom »).

Le balayage rotatif transversal (anciens Landsat) est remplacé par une ligne de détecteurs correspondant à une ligne de l'image

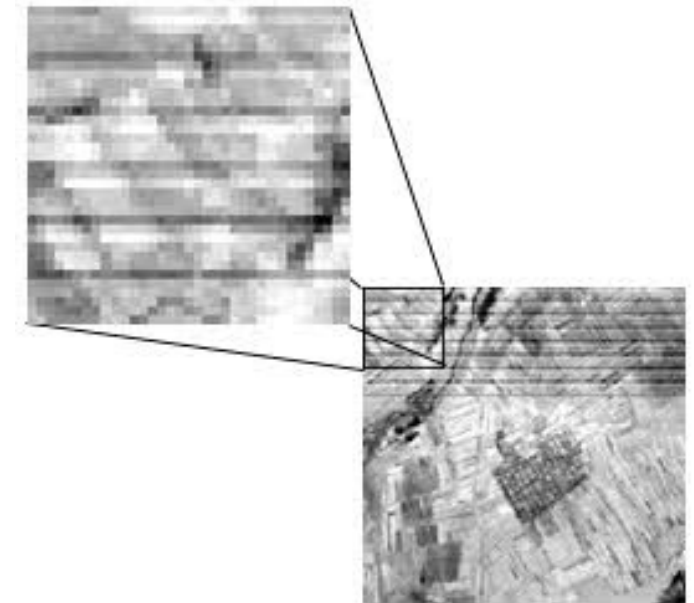
⇒ meilleure géométrie de la ligne (et moins de pannes)

⇒ L'inconvénient est une intercalibration nécessaire des détecteurs.



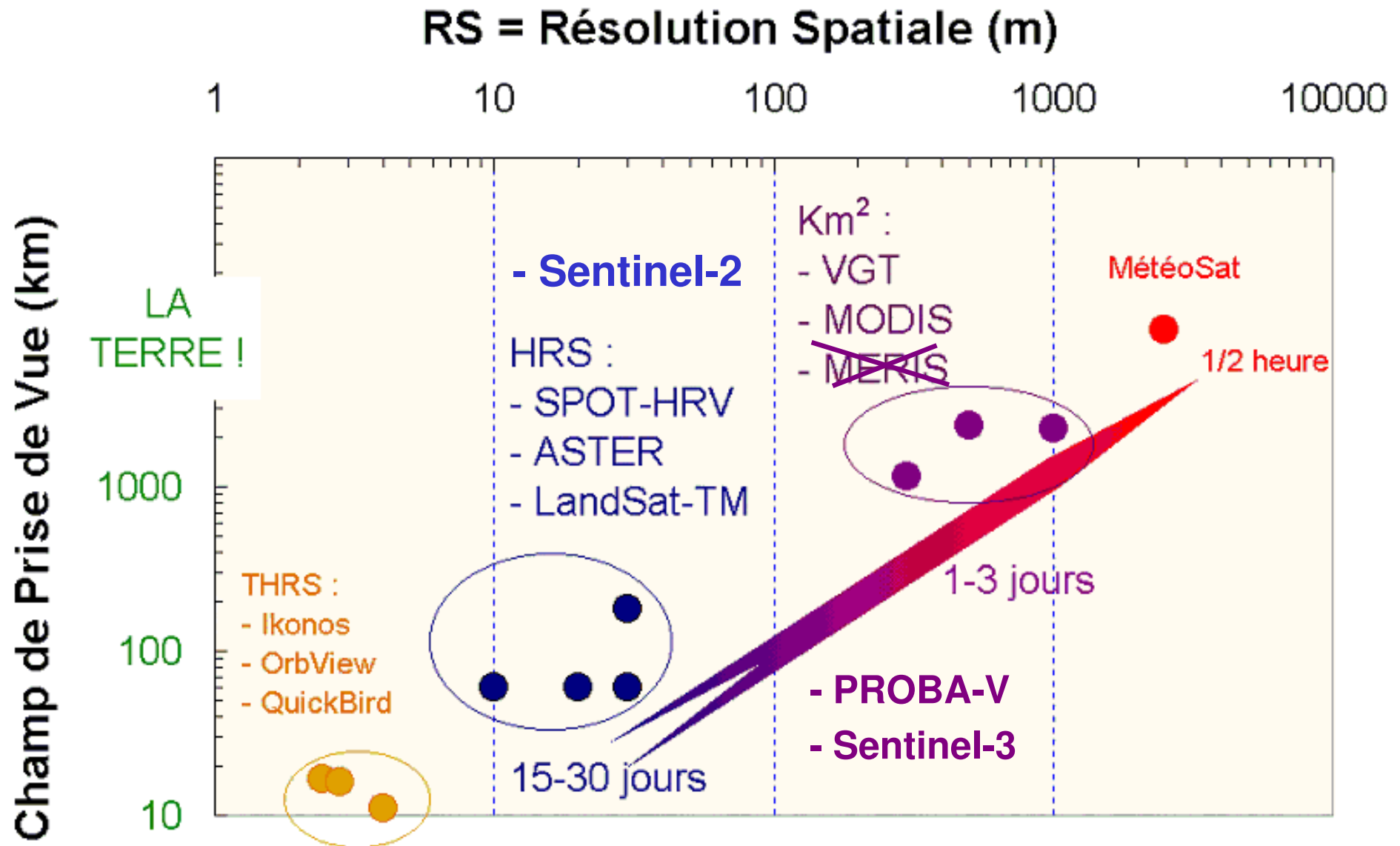
Problèmes de calibration

- Problème d'intercalibration des détecteurs, ici les 6 détecteurs de **Landsat**
- Pour **SPOT**, l'effet est vertical, en 4 bandes (car 4 barrettes de détecteurs)



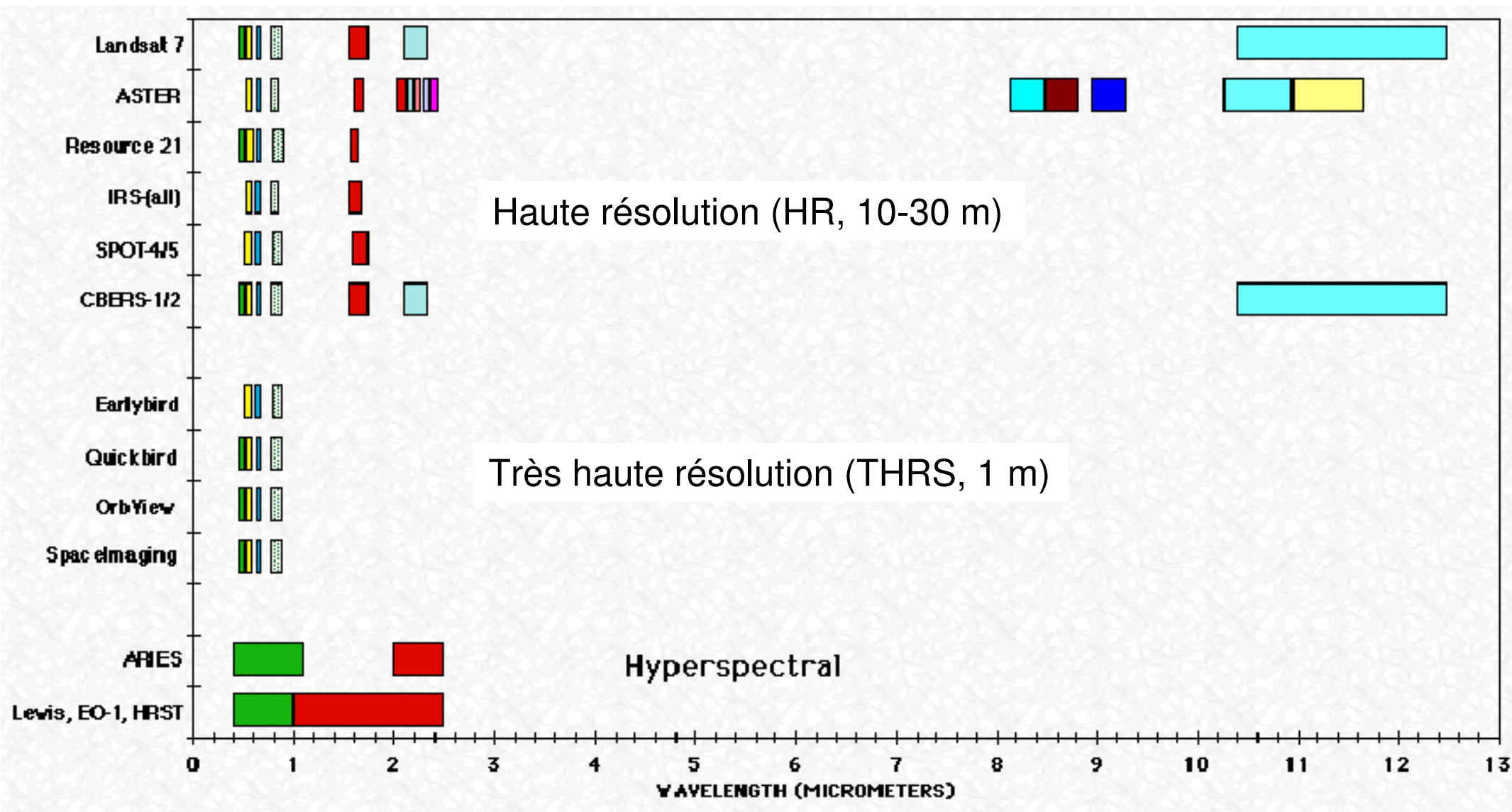
Les capteurs

Champ de prise de vue / résolution spatiale / résolution temporelle



Les capteurs

Résolution spectrale



Les capteurs

Résolution spectrale

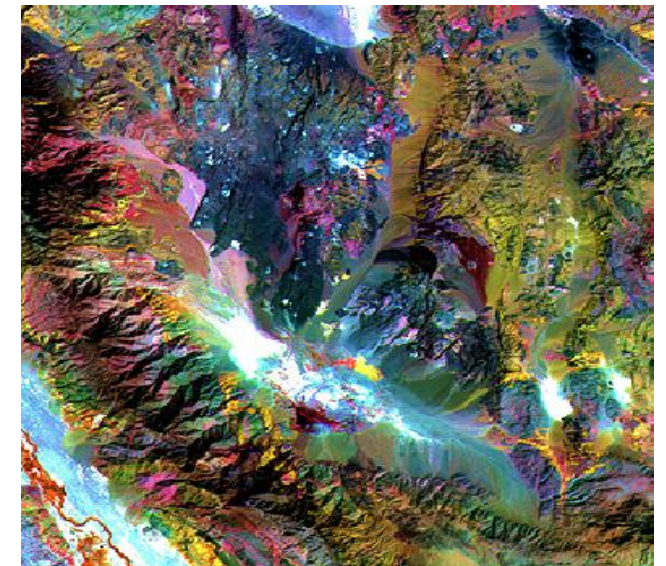
- Visible et proche infrarouge

Grandes catégories sols / végétation / eau

- MIR (moyen infrarouge)

Teneur en eau des sols et végétation

Types de sols et roches



Composition ASTER MIR

- Infrarouge thermique

température de surface (liée notamment au stress de la végétation et à l'humidité du sol), utile en modélisation agronomique.

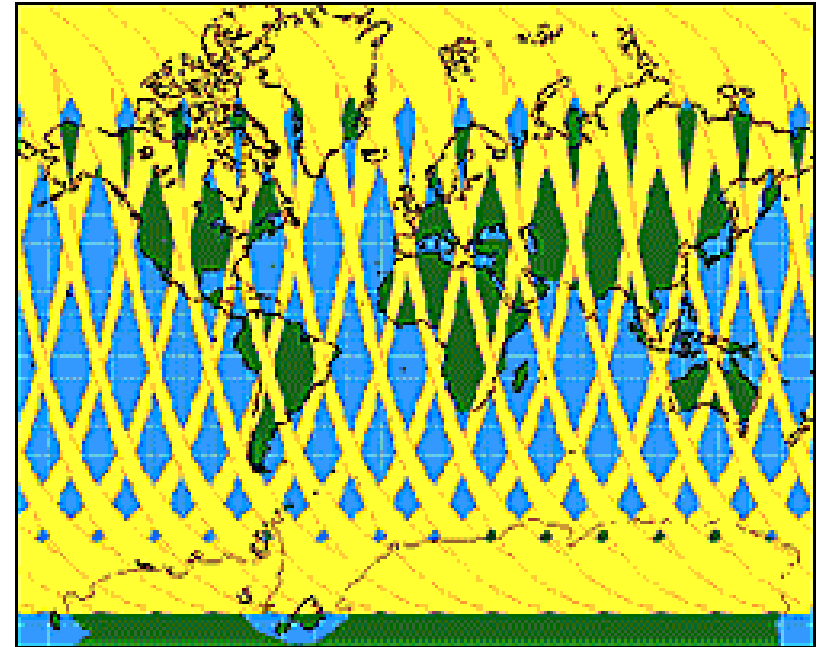
Les capteurs

Résolution temporelle

- **Cycle de passage** (cycle orbital) : temps nécessaire pour le passage sur la même orbite (SPOT 26j, TM 16j)
- **Période de revisite** : Temps nécessaire pour une observation d'un même point. La visée oblique => période de revisite plus court que le cycle orbital.

Ex : SPOT (dépointage +/- 27°), on peut observer une même zone environ tous les 4j à l'équateur, 2 jours à 50° de latitude.

=> **Sentinel-2 (2 satellites) 10 m, 5 jours !**



Les capteurs

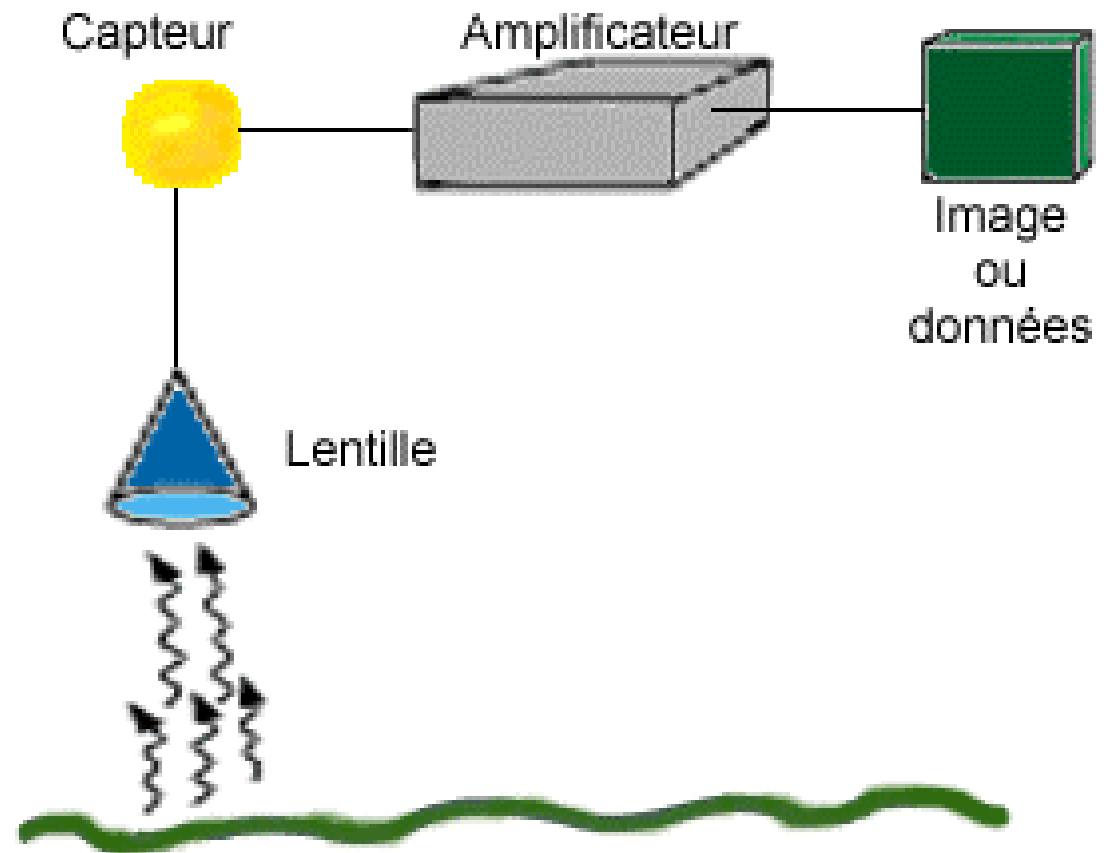
Résolution radiométrique

- Capacité à percevoir de petites variations de rayonnement des objets
- Liée au stockage informatique => mesure en bits
- Images le plus souvent sur 1 octet (0-255) de plus en plus sur 2 octets.

Les capteurs

Infra rouge thermique

- Faible énergie => champs de vision plus large nécessaire => **faible résolution spatiale** (120m en TM, 60m en ETM+).
- Calibration pour température absolue de la surface fonction de son émissivité

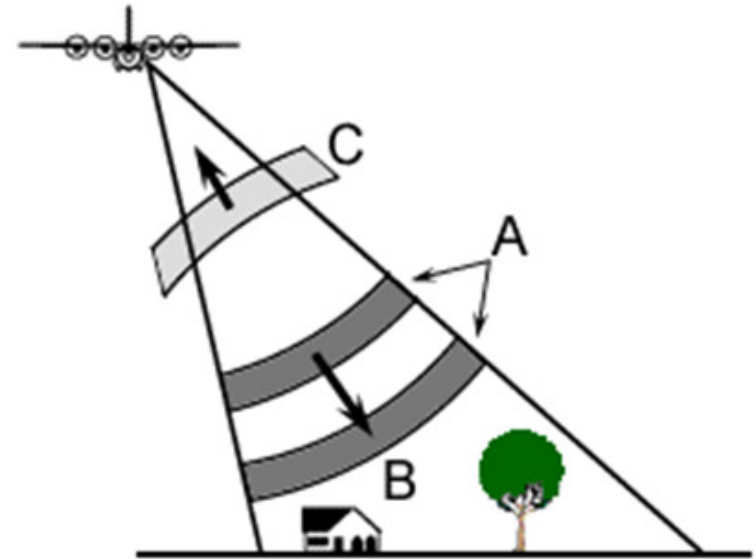


Autres techniques

Le Radar
Le Lidar
Fluorescence

Radar imageur

- **Systemes actifs** qui émet son propre rayonnement micro-onde
- Une partie de l'énergie est **rétrodiffusée par la surface** => mesure de l'intensité et du délai (distance)
- Différentes bandes, polarisations...

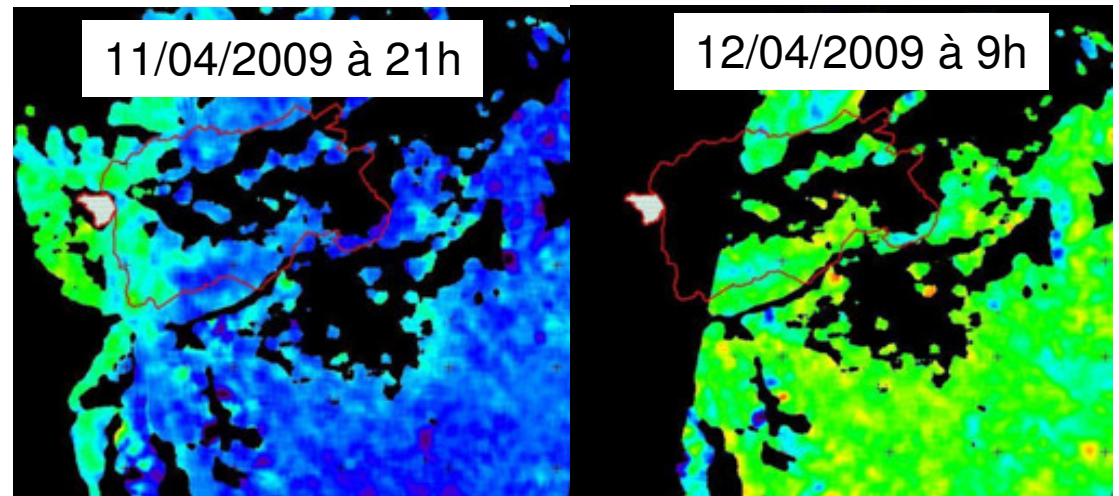


- Les micro-ondes pénètrent nuages et pluie => **insensible aux nuages !**

Ex : effet pluie sur humidité sol

Information sur

- **Rugosité**
- **Humidité du sol**

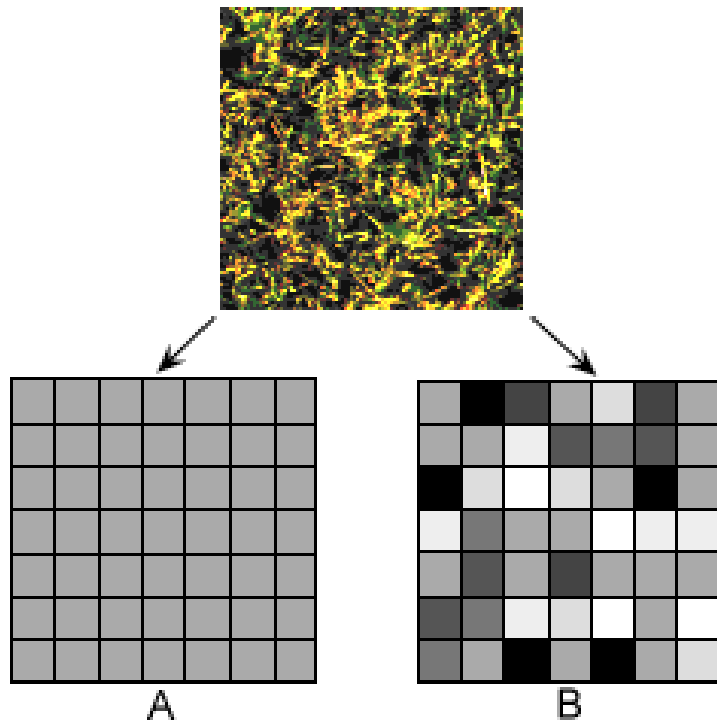


Radar imageur

Les images radar

• **Speckle** (« chatoiement »)

=> signal très variable dans l'espace, d'un pixel à l'autre



Un gazon vu par

- A = capteur optique
- B = radar



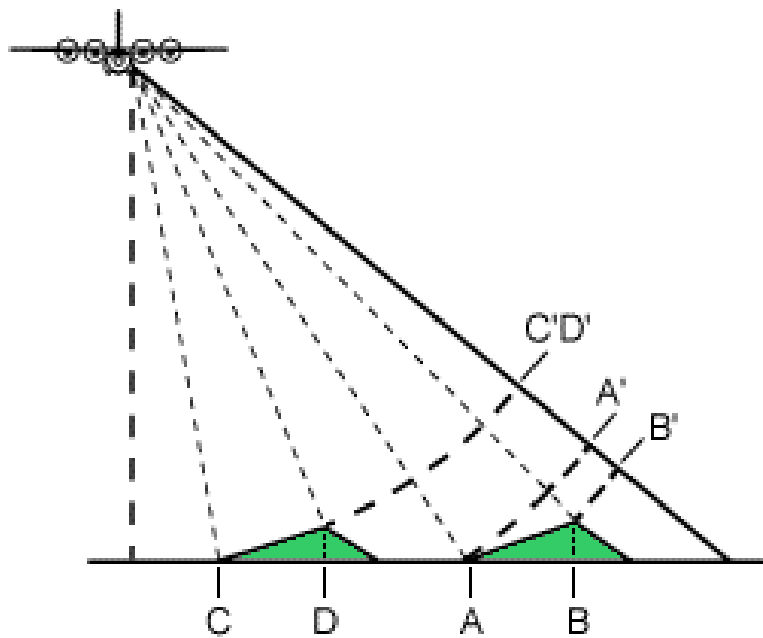
Atténué par

- Somme d'images (images « **multilook** »)
- Filtrage

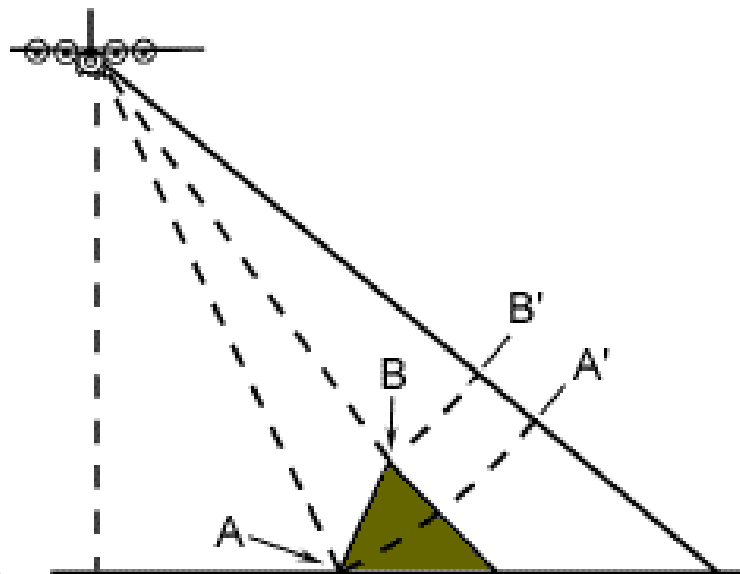
Radar imageur

Problèmes des distorsions géométriques

- Repliement



- Layover



=> Images difficilement exploitables en zone de fort relief

Micro-ondes passives

- Satellite SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity) – **Interférométrie**
- **Humidité du sol** (+ Salinité des océans)
- Global : résolution 40 km...

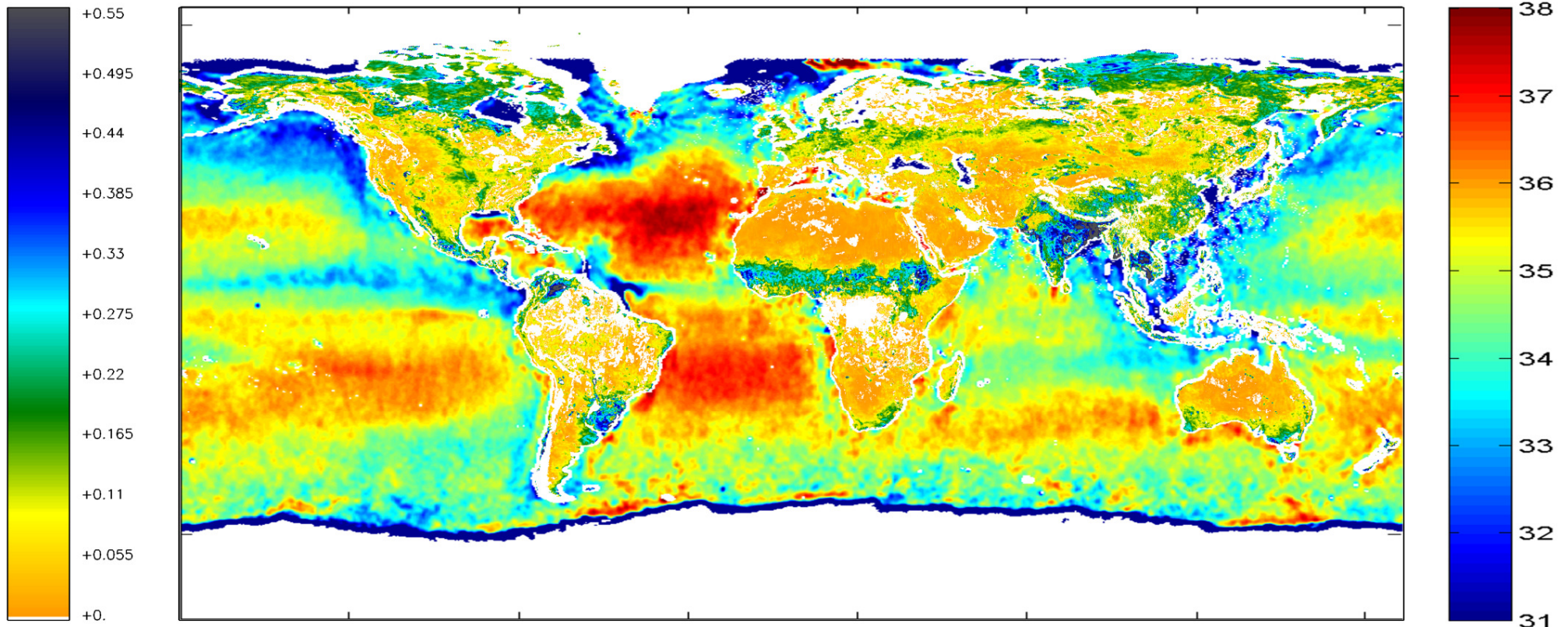


Soil Moisture
August 2011

Ocean Salinity
August 2010



Morning orbits

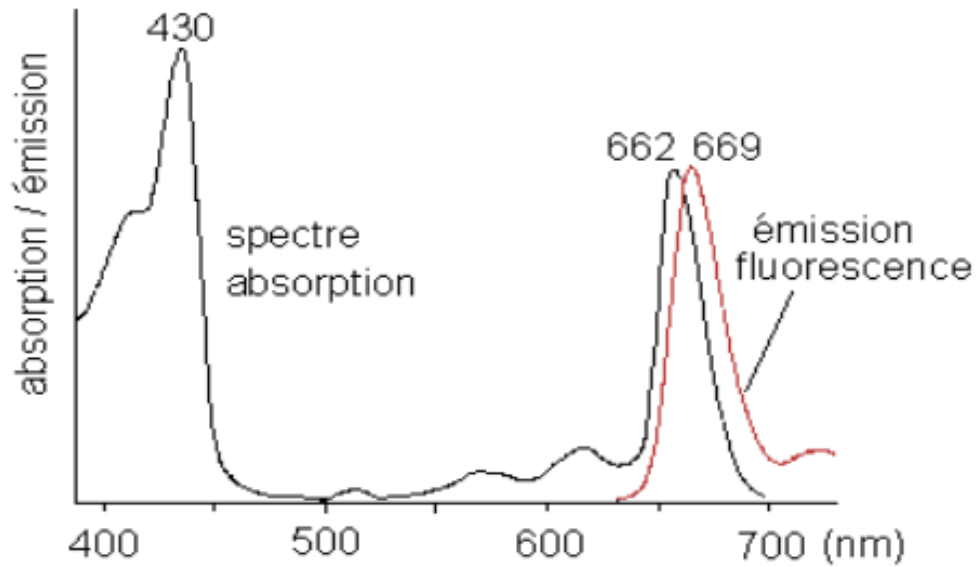


LIDAR

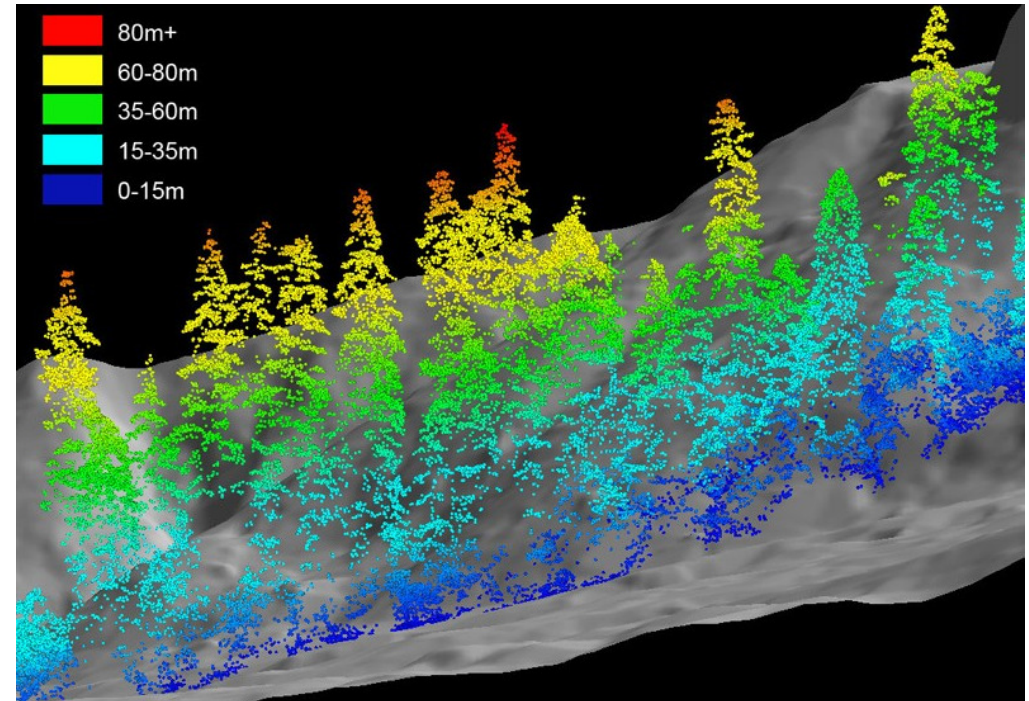
Principe du Radar appliqué au Laser

Cartographie de la chlorophylle

Propriété de fluorescence



Structure 3D des canopées !



Images et prétraitements

• « Techniques d'observation et méthodes d'analyse pour la gestion de l'eau dans les bassins versants agricoles méditerranéens »

• École d'hiver du 2 au 6 mars 2015,

• INAT (& Univ. Carthage, IRESA), Tunis, Tunisie

• Vincent Simonneaux – CESBIO, Toulouse



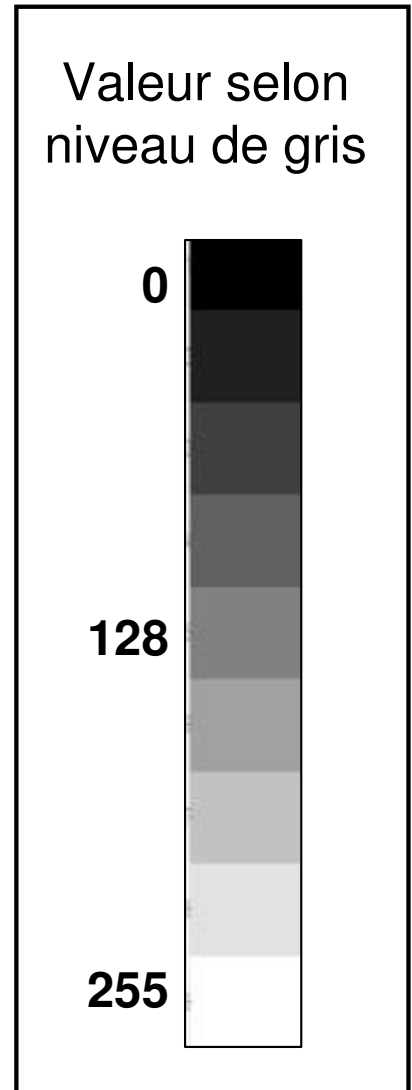
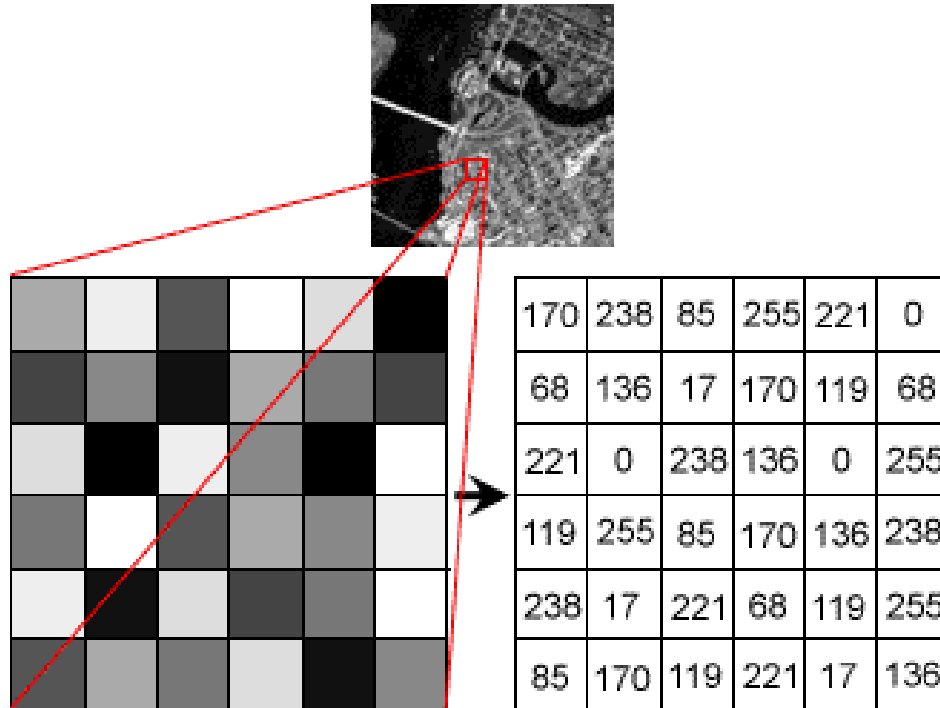
Structure des images

Structure des images

Image monocanal

- Tableaux de valeurs numériques pour chaque canal / bande
- Ces valeurs sont liées à l'énergie reçue par le capteur (W/m²)

Un seul canal
=> Représenté
en noir et blanc



Structure des images

Image multispectrale

LA MATRICE DE DONNEES

Image SPOT-HRV

Bande XS1

XS2

XS3

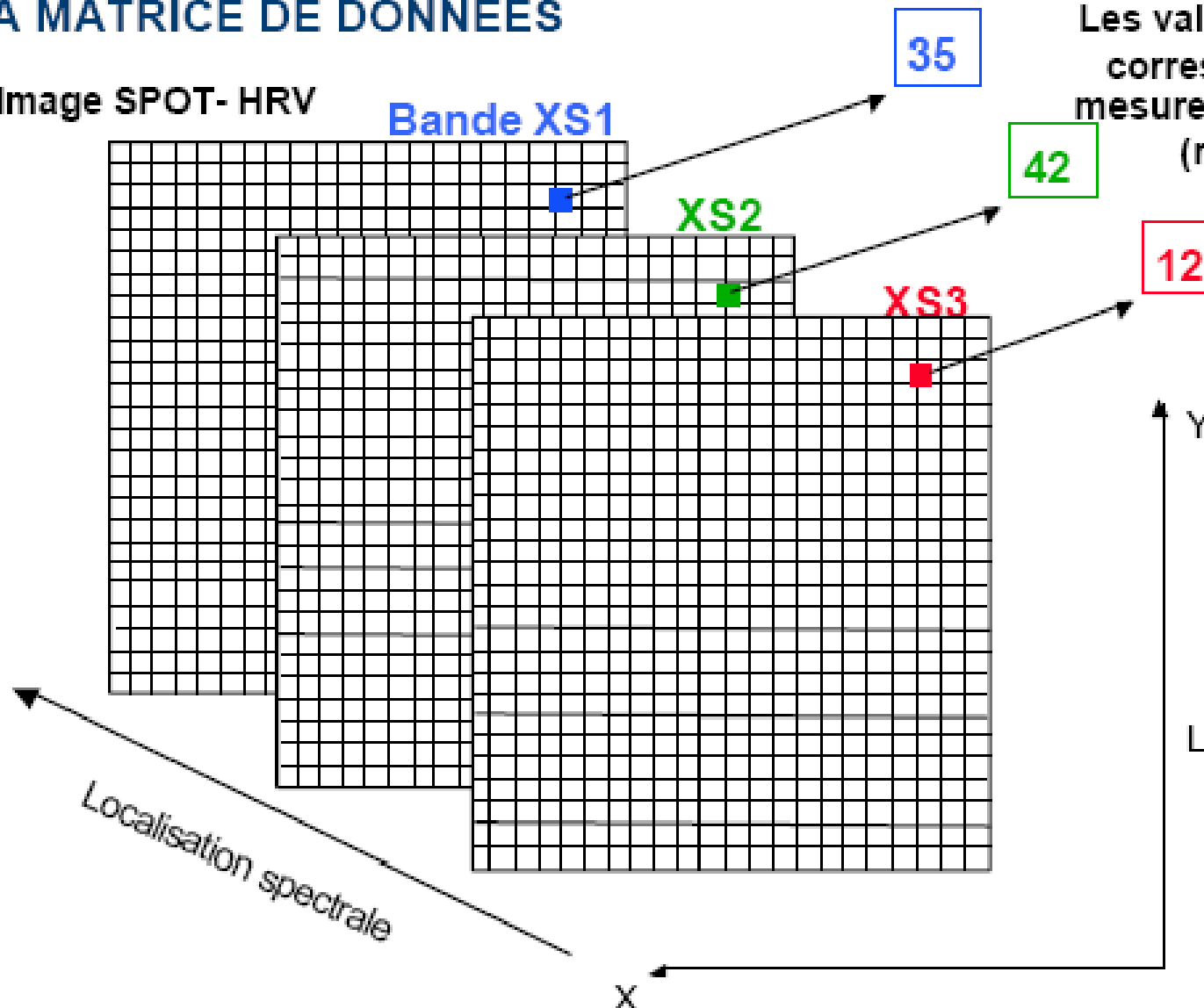
35

42

125

Les valeurs numériques correspondent à des mesures radiométriques (réflectance)

Localisation spatiale (coordonnées, ou lignes, colonnes)

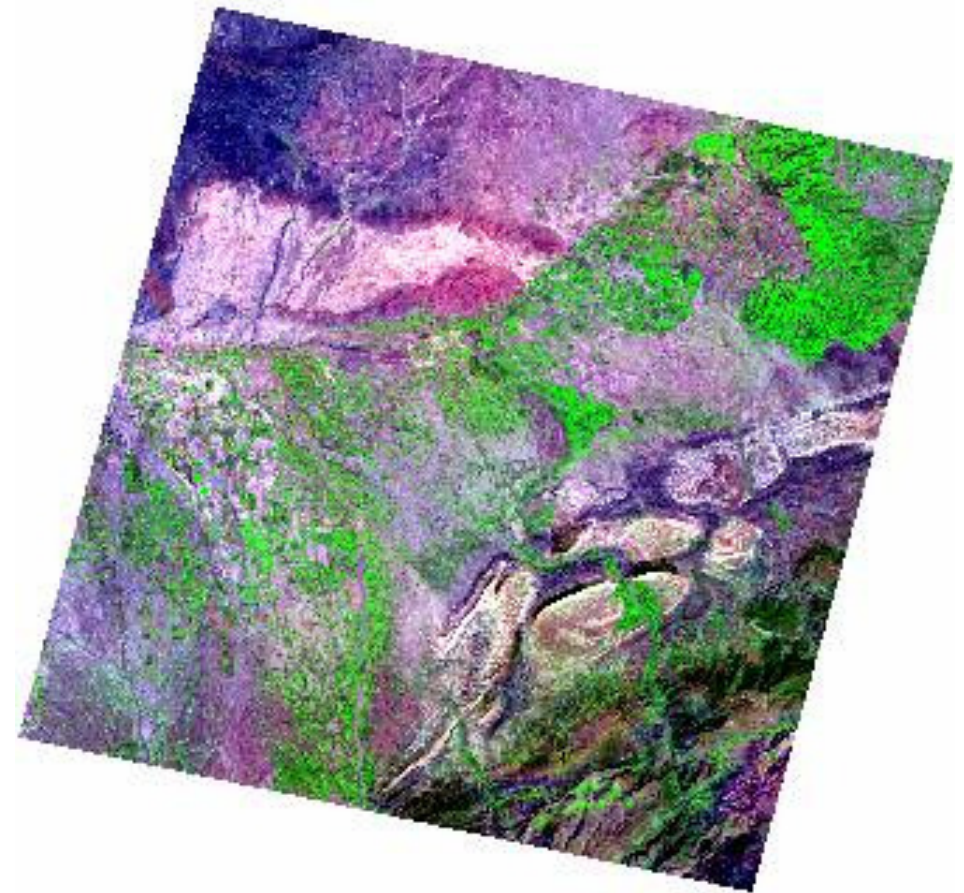
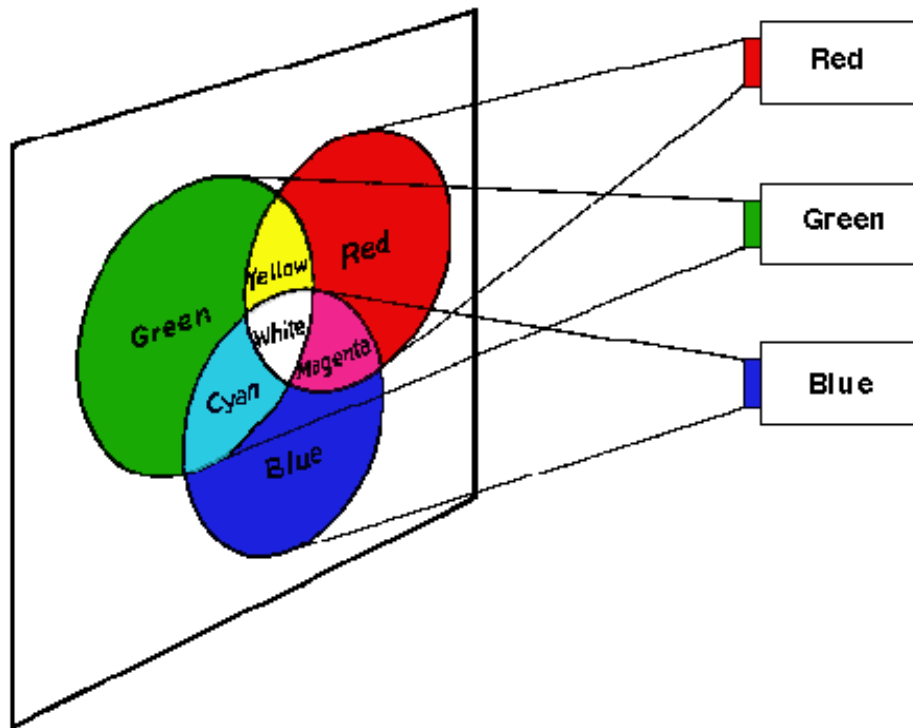


Structure des images

Composition colorée

Visualisation simultanée de 3 bandes spectrales : **compositions colorées**

=> Synthèse additive **R, V, B** sur un écran



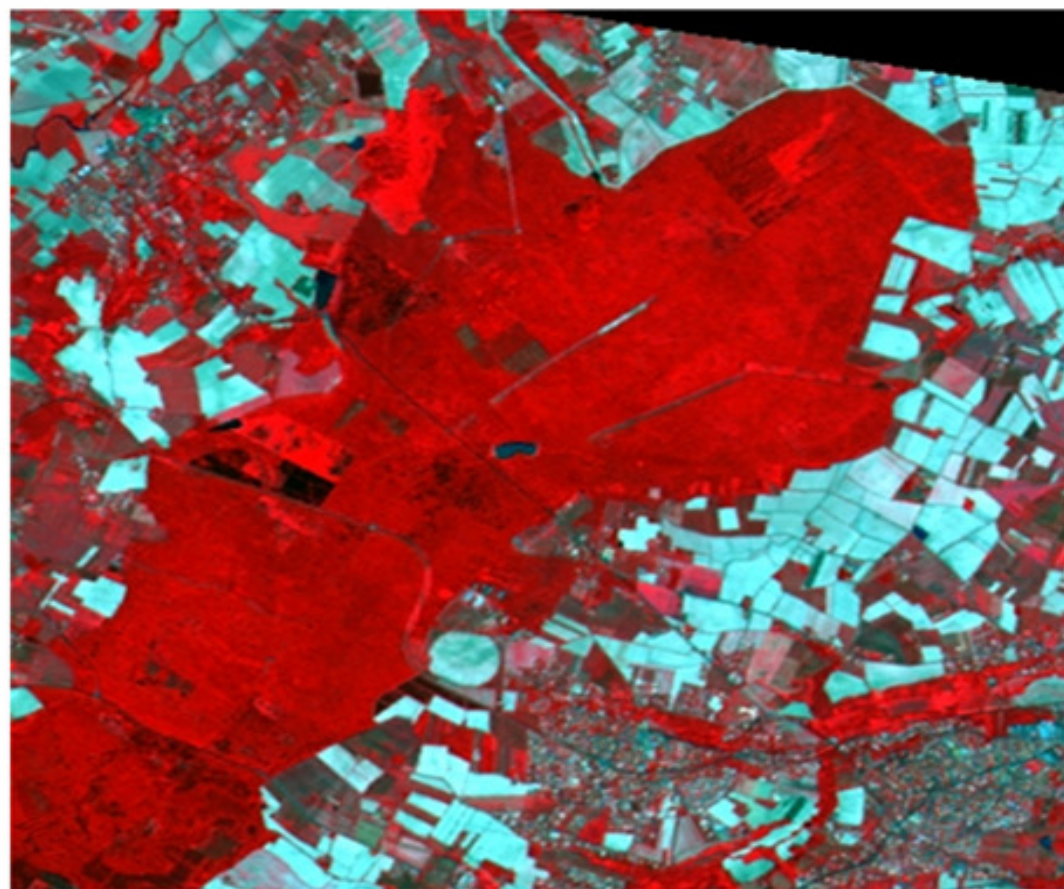
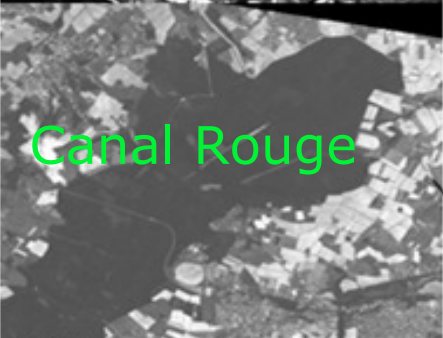
Exemple d'une composition SPOT

- **R = MIR (moyen infrarouge)**
- **V = Rouge**
- **B = Vert**

Structure des images

Composition colorée

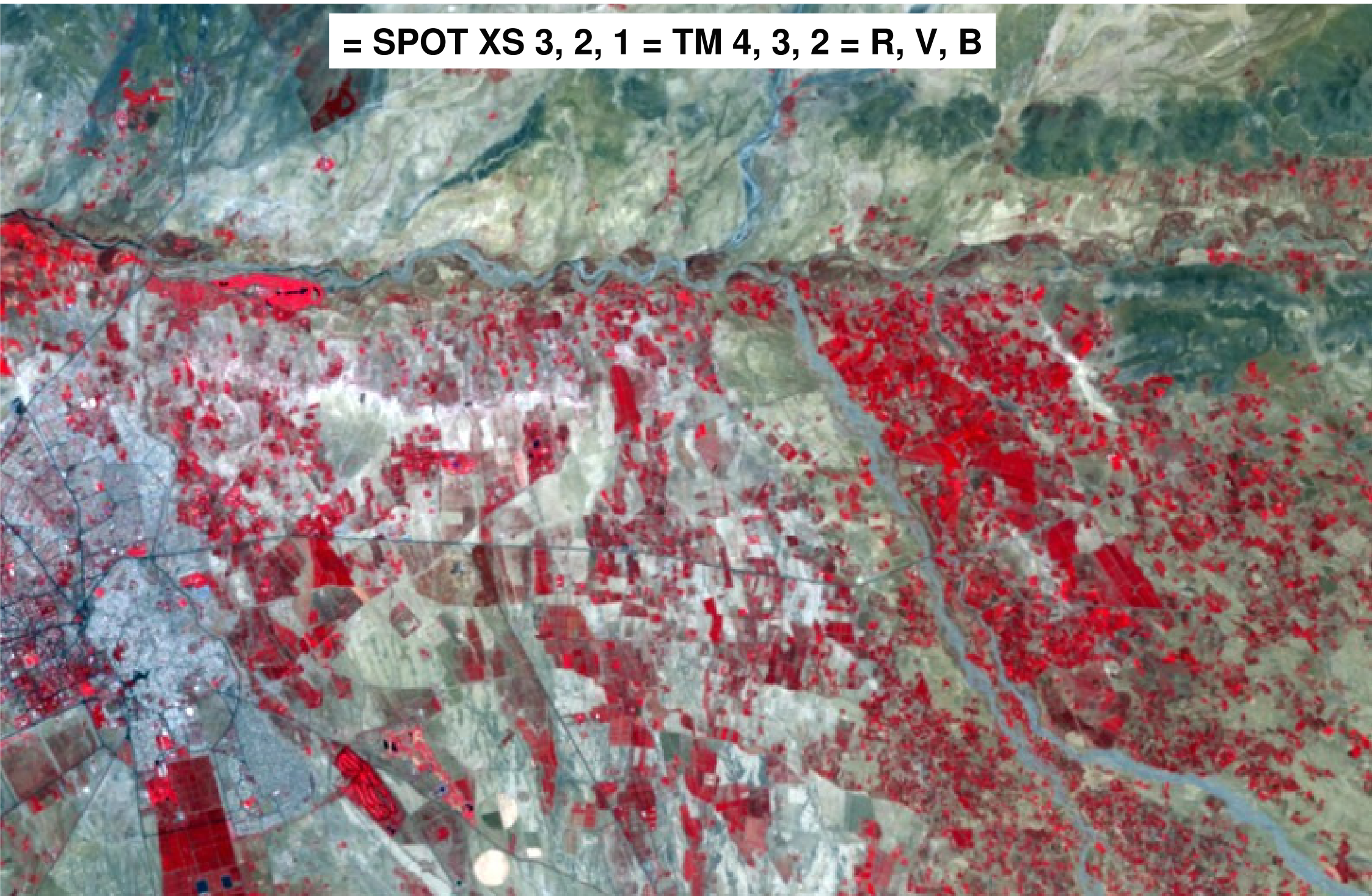
SPOT HRVIR



RGB color composite

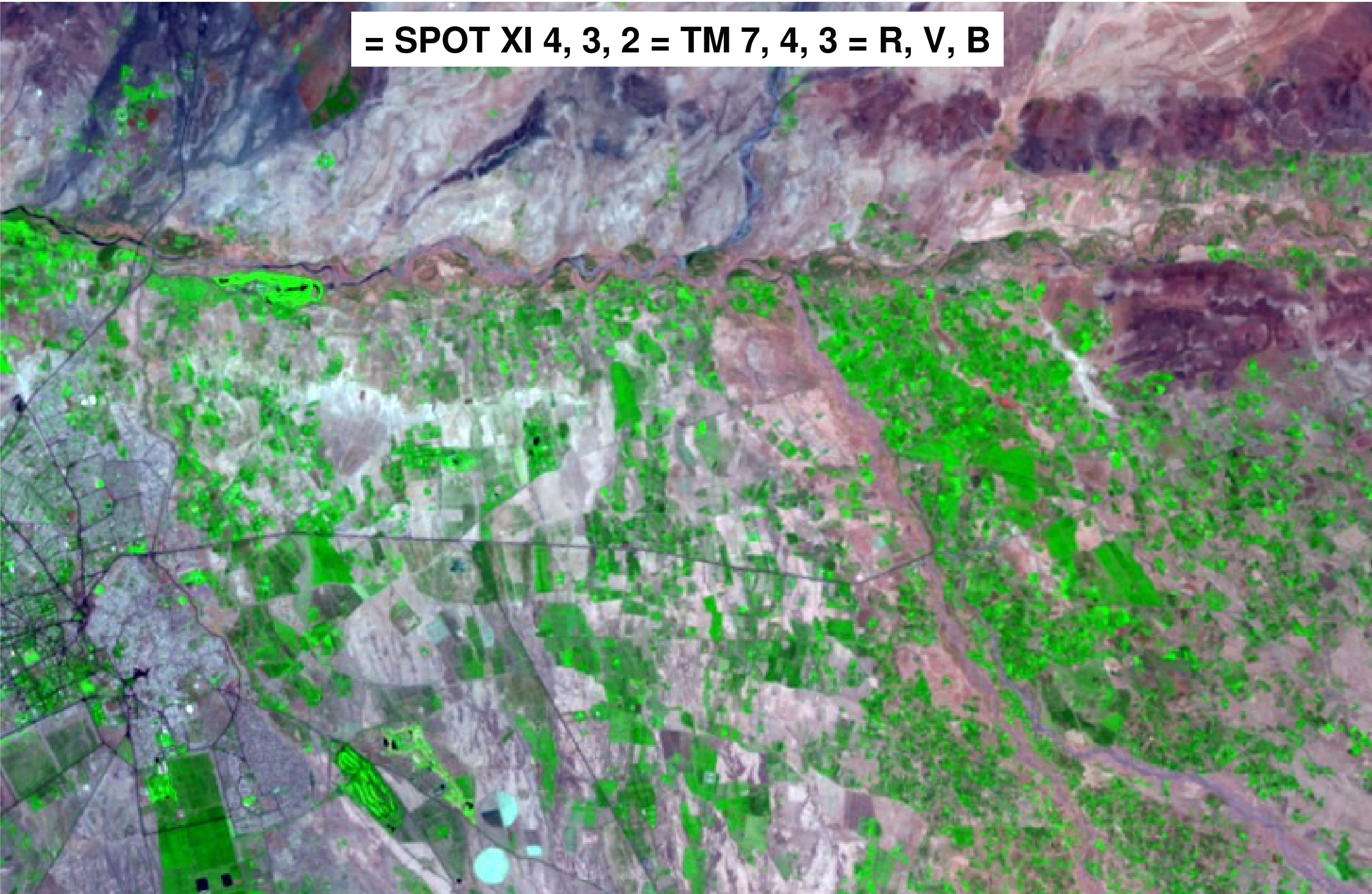
Composition « fausses couleurs » PIR, R, V = R,V,B

= SPOT XS 3, 2, 1 = TM 4, 3, 2 = R, V, B



Composition MIR, PIR, R = R,V,B

= SPOT XI 4, 3, 2 = TM 7, 4, 3 = R, V, B



Structure des images

Composition colorée

- *Les différentes végétations.*

Rouge ou vert, vif et clair pour les végétations annuelles denses, pâle pour les annuelles peu couvrantes (effet sol important). Les plantations sont plus foncées (ombres)

- *Les états de surface du sol.*

= les autres nuances de couleurs, avec deux facteurs de variabilité prépondérants : la rugosité qui diminue la brillance (champs labourés), et la minéralogie qui conditionne la « teinte »

Les zones très claires (bleu ciel TM743, blanc TM432) correspondent à des champs de céréales récoltés, c'est à dire des sols lisses + chaumes, très réfléchissants.

- *Les zones urbaines*

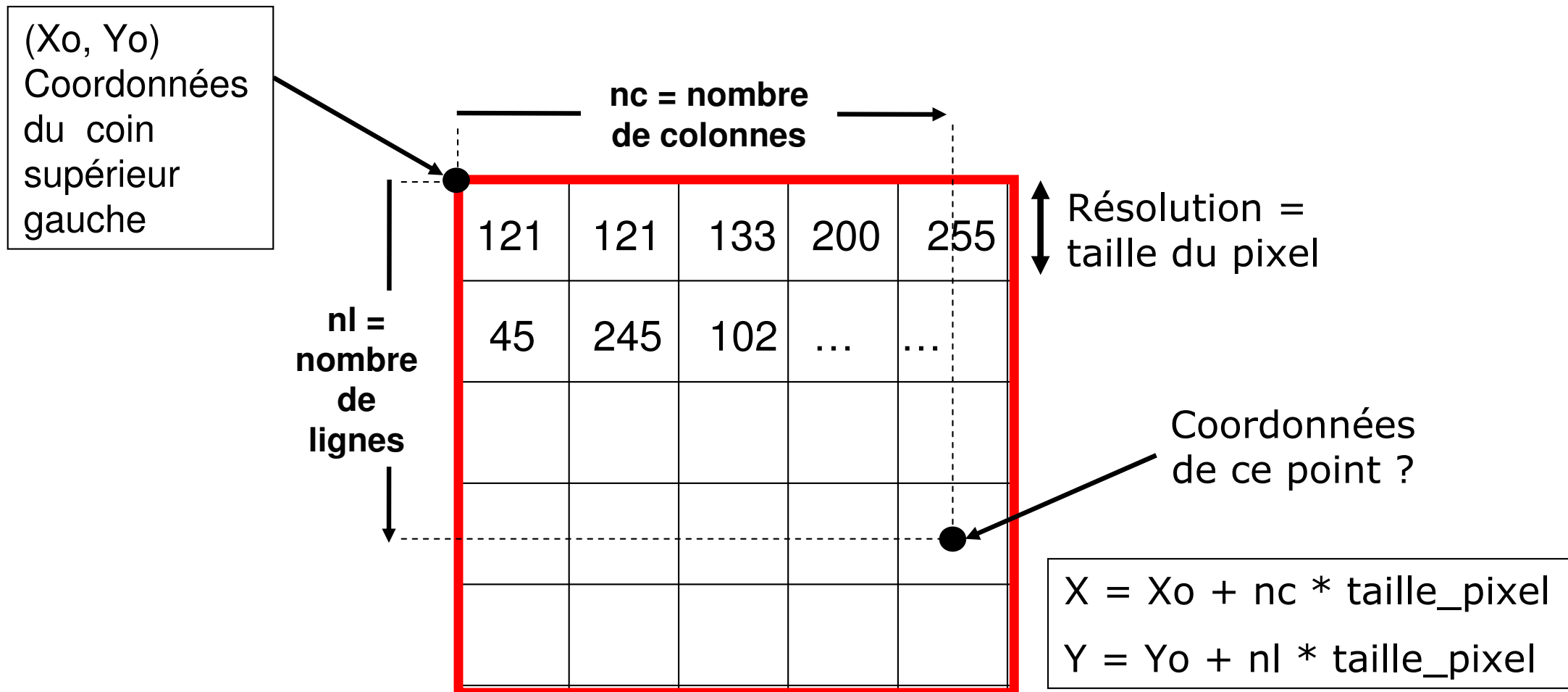
Elles sont en bleu, car les surfaces lisses sont réfléchissantes dans le visible. Confusion fréquente avec sols nus et lits d'oueds

Géoréférencement des images

Géoréférencement des images

Principe

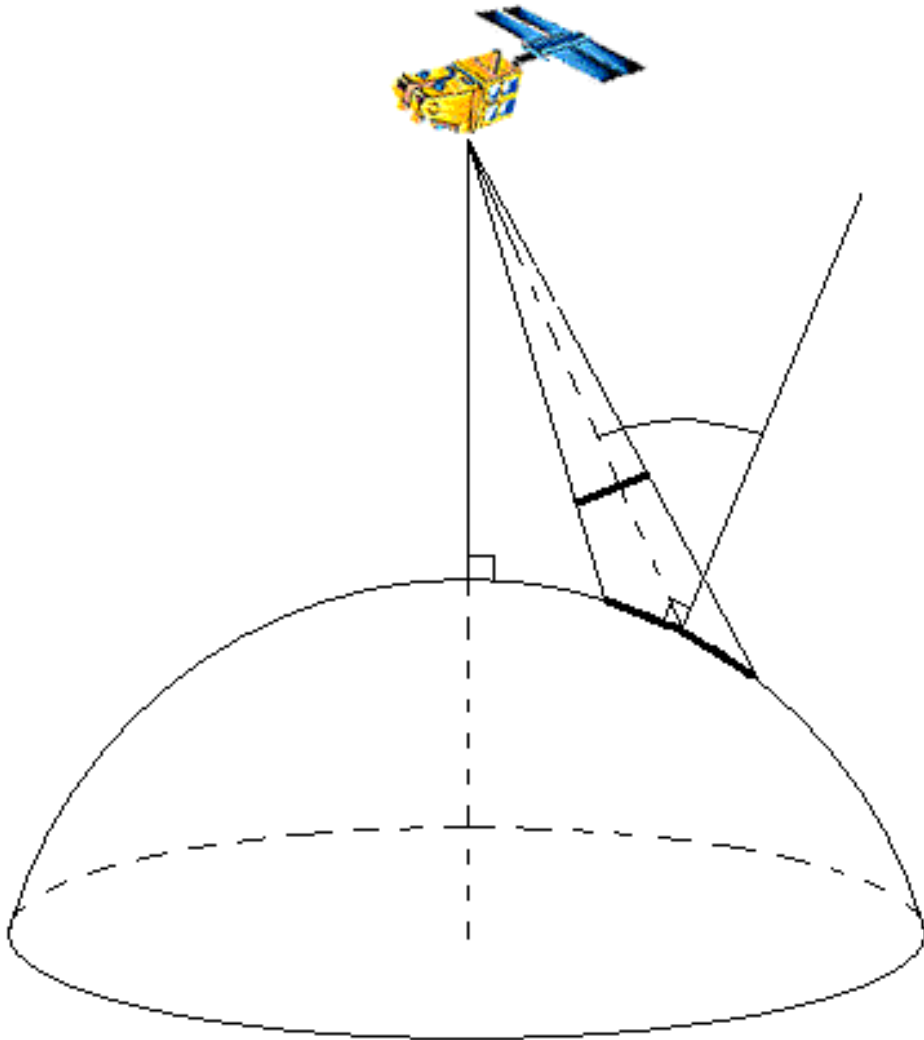
- Positionner une image dans l'espace géographique
- **Pouvoir superposer l'image à d'autres information** (images, cartes, vecteurs, GPS...)



Géoréférencement des images

Géométrie satellite

Géométrie vision satellite
(modèle complexe)



Zone vue du satellite
(image brute)

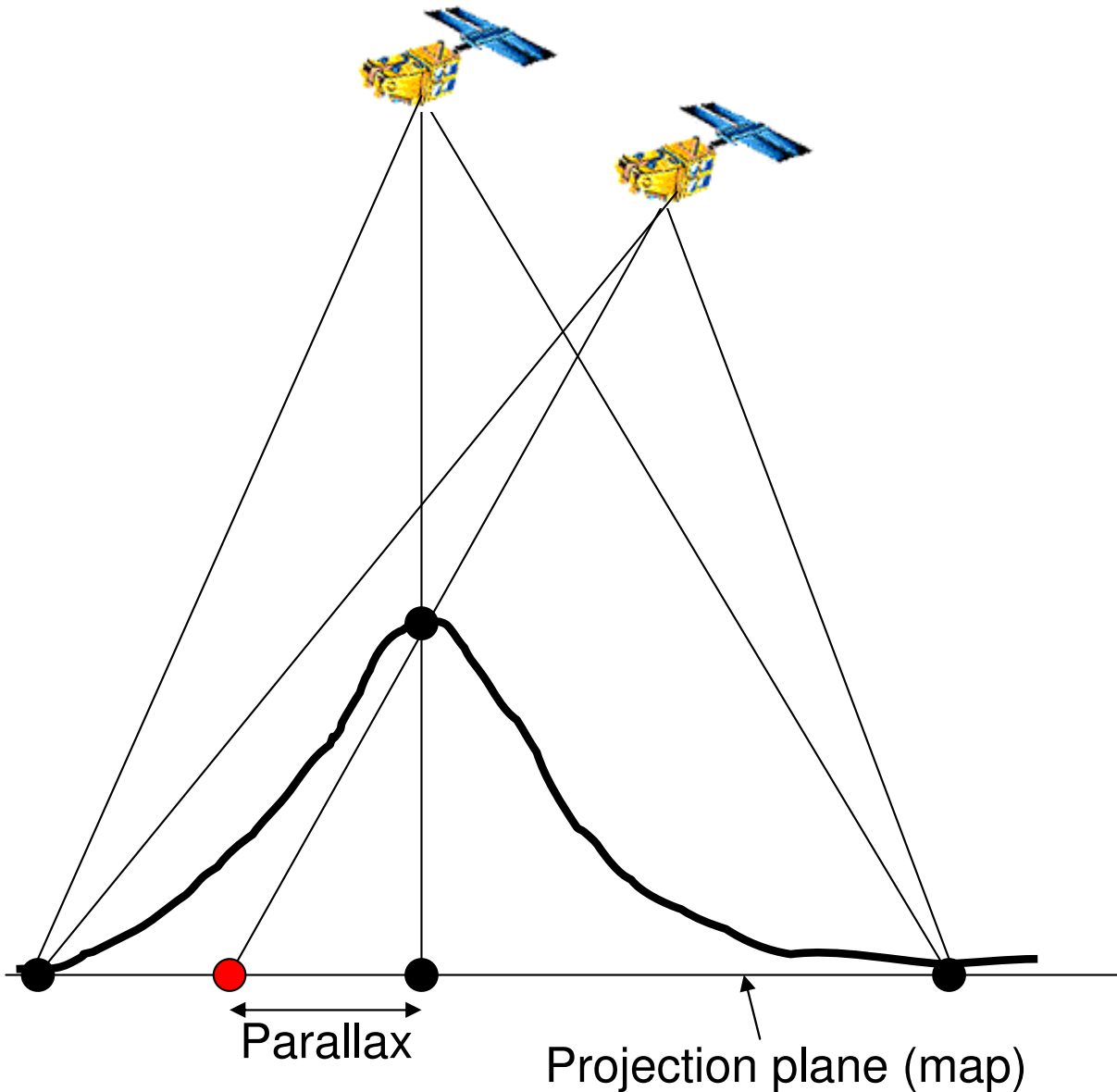
Sensor geometry model



Surface réelle
(projection cartographique)

Géoréférencement des images

Distorsions dues au relief



If big altitude differences in the image, deformations due to view point

→ Orthorectification

- Software
- MNT *

* World 90 m SRTM DTM free on the web at <ftp://edcsgs9.cr.usgs.gov/pub/data/srtm/> or <http://seamless.usgs.gov/>

Géoréférencement des images

Méthodes de correction

- **Provider correction** = standard projection (UTM, Lambert on request...)
More and more accurate ! (absolute accuracy 50 m SPOT 5, 250 m Landsat TM)
- Physical Model (=> you have to buy “raw data”...)
- Physical Model + ground control points for improvement + DTM....

- Any kind of image (geometry unknown, not correct, shift...)

=> Empirical correction

(polynomial, triangulation)

Géoréférencement des images

Modèles polynomiaux

Méthodes de géoréférencement empiriques

- **Polynomes du premier degré**

$$X_{cor} = aX + bY + c$$

$$Y_{cor} = dX + eY + f$$

⇒ 6 paramètres à estimer

⇒ une solution exacte pour 3 points, mais

le minimum correct est 10-12 points

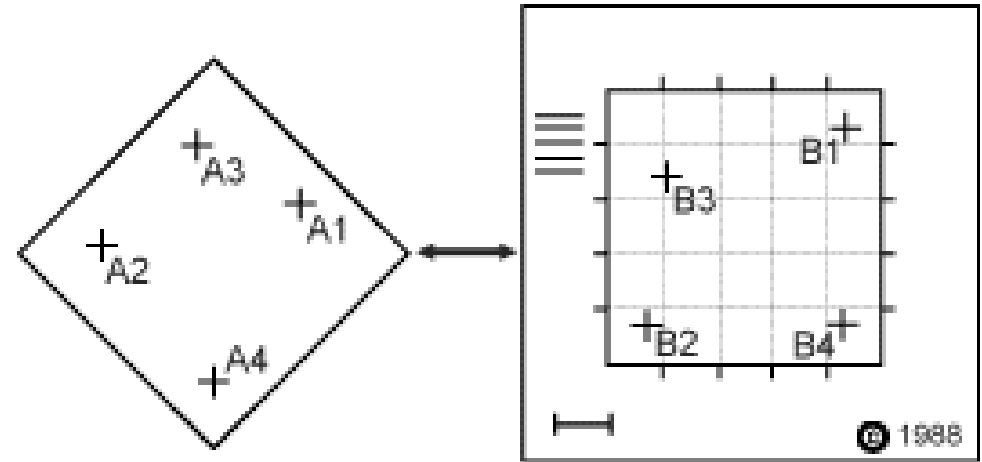
⇒ Minimisation de l'erreur = **RMS**

- **Polynomes du second degré**

$$X_{cor} = aX^2 + bY^2 + cXY + dY + eX + f$$

$$Y_{cor} = gX^2 + hY^2 + iXY + jY + kX + l$$

Ok pour des déformations non linéaires, **mais à utiliser prudemment** ...

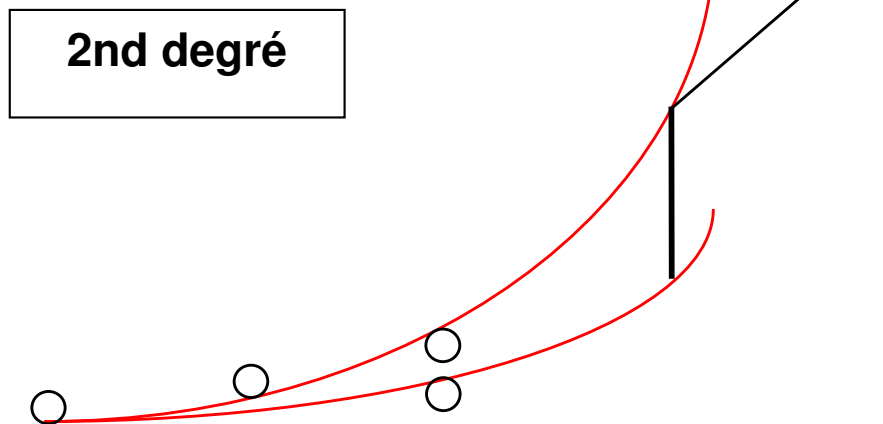
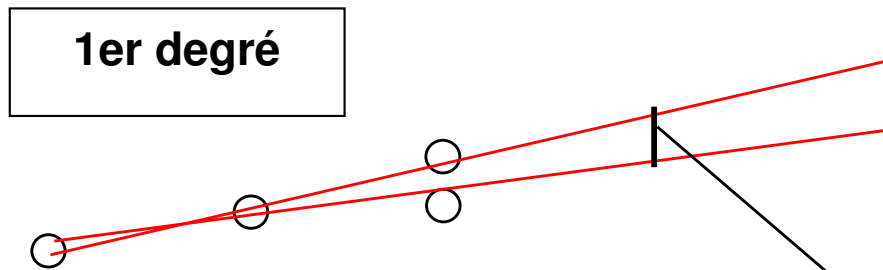


$$A_i(X_i, Y_i) \longleftrightarrow B_i(X_{cor_i}, Y_{cor_i})$$

Géoréférencement des images

Modèles polynomiaux

Le danger des polynômes d'ordre élevé (2+...)



=> Erreurs qui augmentent très vite lorsqu'on s'éloigne des points

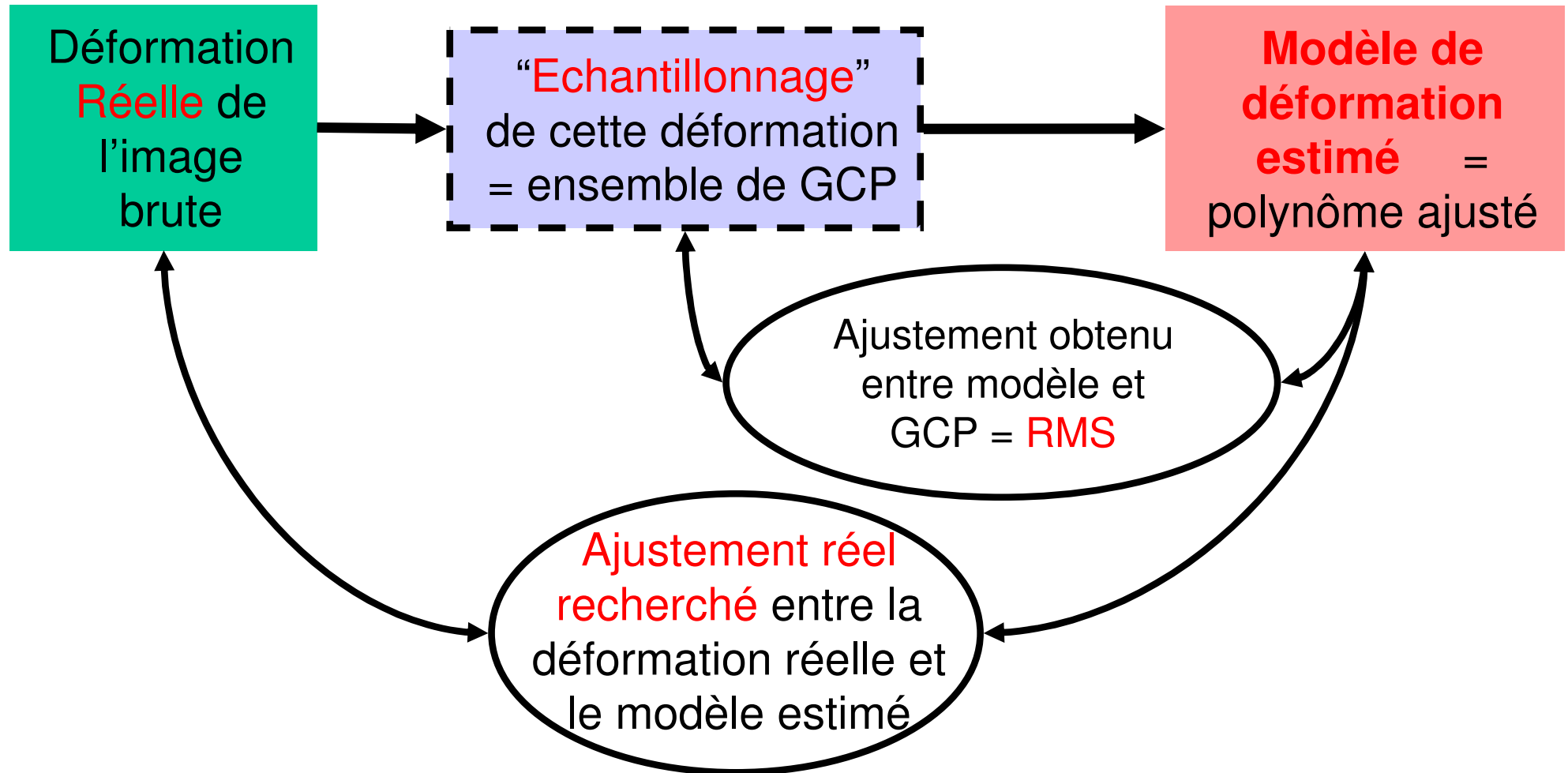
➔ Satellite images :

Les polynômes d'ordre 1 sont en général suffisants

Les polynômes d'ordre 2 donnent souvent une illusion de précision...

Géoréférencement des images

Modèles polynomiaux



- ⇒ **Ne pas observer uniquement la RMS pour évaluer un modèle !**
- ⇒ La qualité des points de calage (nombre, distribution) est essentielle

Géoréférencement des images

Saisie de points d'amers (« GCP »)

• Où les saisir ?



Oui

Intersection de lignes perpendiculaires (rivières, routes,..)

Centres de petites surfaces bien nettes (maisons, petits lacs...)



Non

Angles de parcelles, (pb de déplacement de frontière et d'épaisseur)

Intersections "pointues"



Outil de prédiction (ENVI...)

=> les propositions suivent le modèle estimé, pas d'amélioration

=> Ne pas systématiquement utiliser les points proposés

=> Les déplacer si nécessaire !

Géoréférencement des images

Saisie de points d'amers (« GCP »)

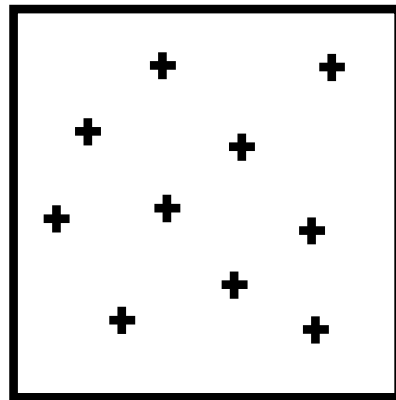
- **Combien de GCP ?**

Le plus possible !

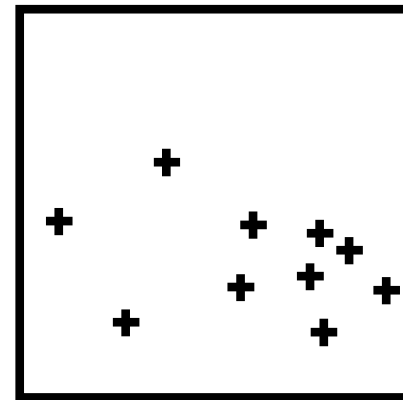
1er degré : au moins 10 points pour estimer la précision

2nd degré : éviter

.... **Bien répartis** dans la zone d'intérêt



Oui



Non

Géoréférencement des images

Rééchantillonnage

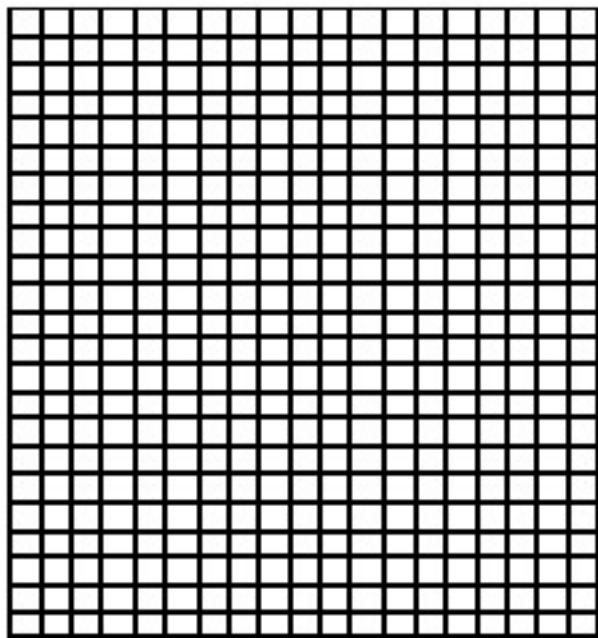
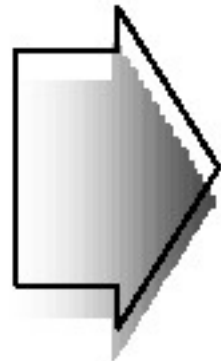


Image brute



Modèle de
Déformation

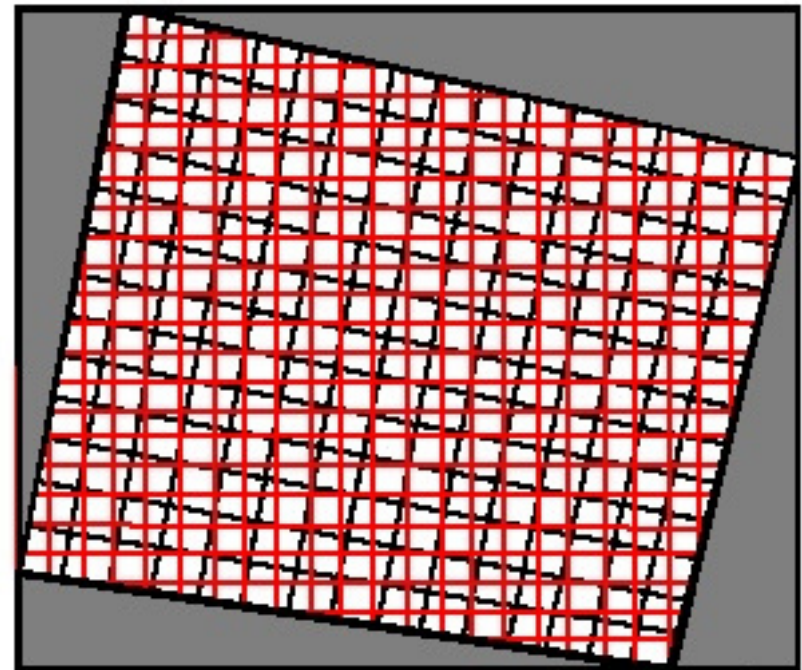
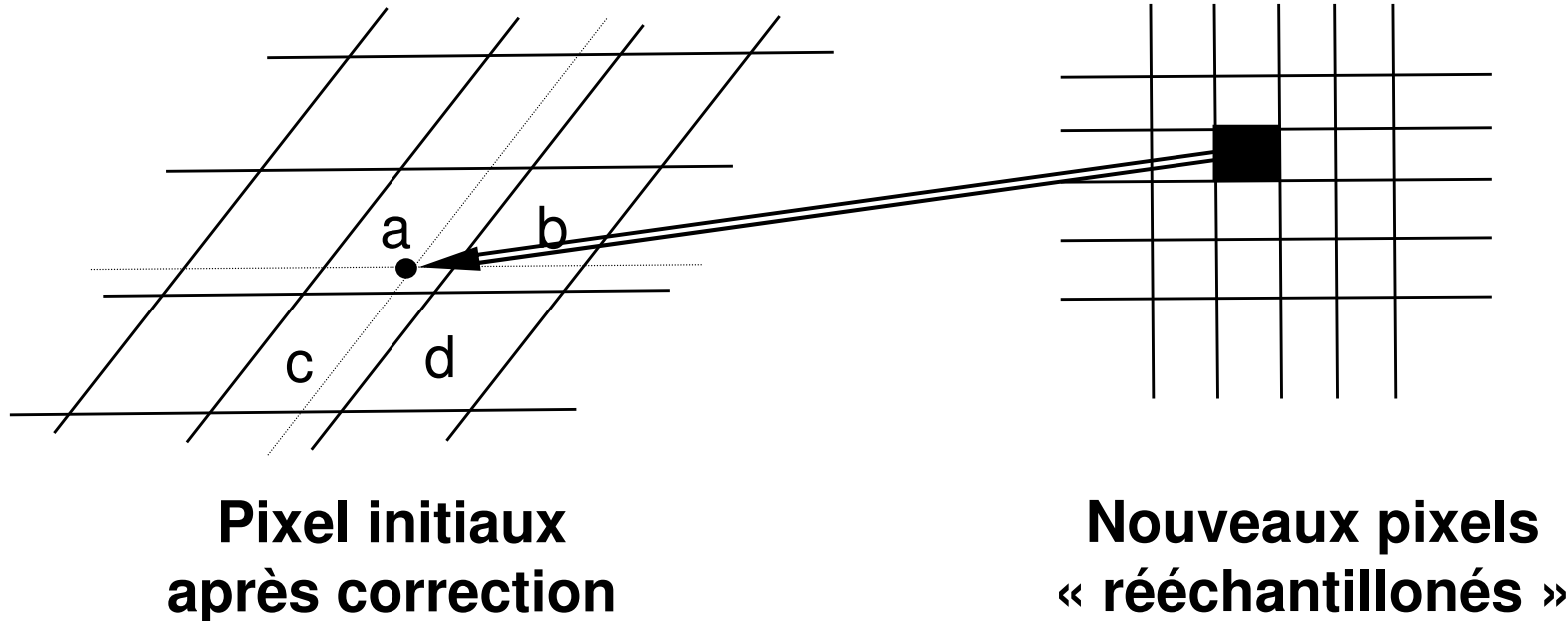


Image corrigée
Avec pixels initiaux (virtuel)

Géoréférencement des images

Rééchantillonnage



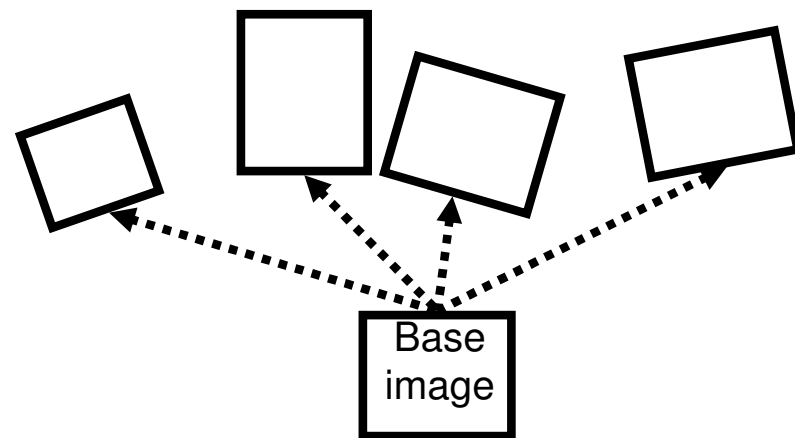
- **Plus proche voisin (Nearest neighbor, NN)** : Valeur du pixel le plus proche dans l'image brute
- **Interpolation Bilinéaire** : interpolation linéaire entre les 4 pixels les plus proches (a, b, c, d)
- **Interpolation Bicubique** : Fonctions d'ordre 3 entre les 16 pixels les plus proches (a, b, c, d + 12 adjacent pixels)

Géoréférencement des images

Référence

Création d'une base de SIG (topo, sat + GPS...)

- SIG : utiliser toujours la même base de géoréférencement **pour éviter les dérives**



Correction radiométrique des images

Corrections radiométriques

Pourquoi ?

Les images de dates différentes => CN non comparables

=> un objet identique n'aura pas les mêmes valeurs d'une image à l'autre

Deux modes de corrections

- **Correction relative** des comptes numériques **CN**

Les images restent en CN, mais sont comparables

- **Correction absolue : passage en réflectance**

Transformation CN -> Réflectance

=> comparaison des images à des données externes (ex : mesures terrain au spectroradiomètre)

Corrections radiométriques

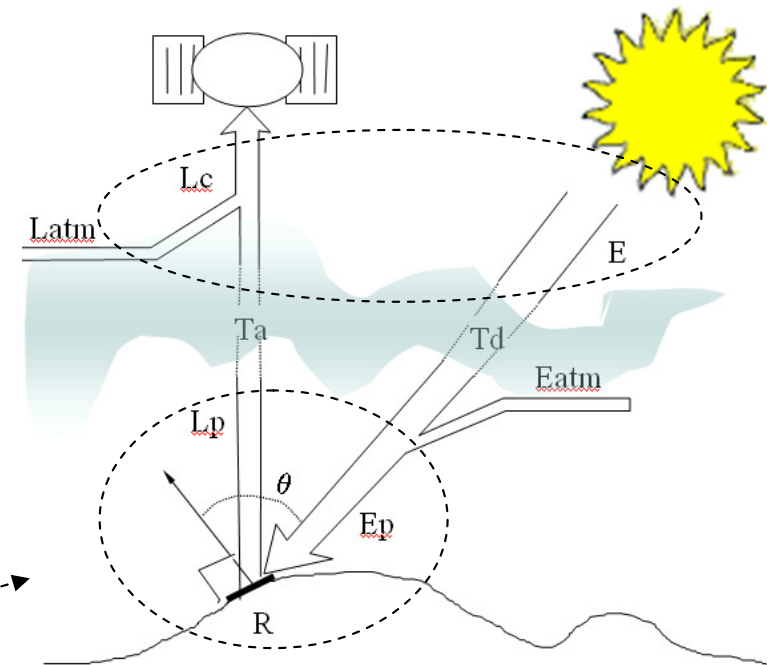
Calcul de la réflectance

- **Réflectance au sommet de l'atmosphère** = réflectance du point de vue du satellite, » (**TOA** pour « Top Of Atmosphere »), abstraction faites des effets atmosphériques est :

$$\mathbf{R_{toa}} = \frac{\pi * L_c}{E \cdot \cos(\theta_i)}$$

- **Réflectance sol** = Réflectance recherchée

$$\mathbf{R_{toc}} = \frac{\pi * L_p}{E_p}$$



Corrections radiométriques

Calcul de la réflectance

Calcul de l'éclairement E_p au niveau du pixel

- Le rayonnement incident reçu par un pixel est lié au rayonnement solaire E par la relation suivante :

$$E_p = E * \cos(\theta_i) * T_d + E_{atm}$$

Calcul de la luminance L_p émise par le pixel

- Calibration

Transformation CN bruts => luminance

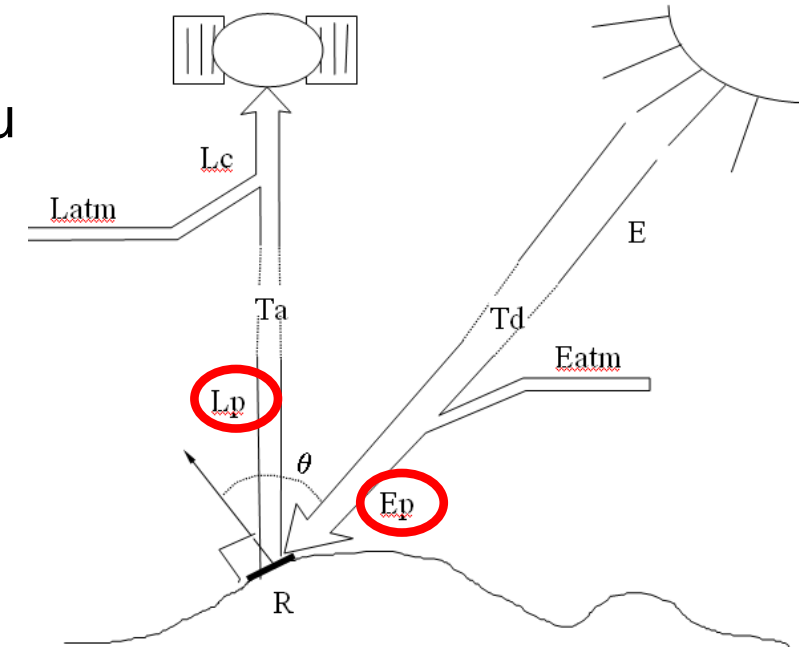
$$L_c = g * CN + c$$

-> g = "gain" et c = "offset" fournis avec les images satellitaires.

- Le rayonnement L_p au niveau pixel est lié au rayonnement L_c reçu au capteur par les caractéristiques de l'atmosphère traversée.

$$L_c = L_p * T_a + L_{atm}$$

$$\Rightarrow L_p = (L_c - L_{atm}) / T_a$$



Corrections radiométriques

Calcul de la réflectance

=> La Réflectance sol est donc

$$R = \frac{\pi * (g * CN + c - Latm)}{Ta * (E * Td * \cos(\theta_i) + Eatm)}$$

Remarques :

- On corrige les effets atmosphériques
- On corrige l'incidence d'éclairement ($\cos(\theta_i)$)
- ...mais cette réflectance reste **directionnelle** (angle d'observation du capteur). Si surfaces non Lambertiennes => réflectance affectée par les différences angles d'observation en terrain accidenté.

Corrections radiométriques

Relation CN - réflectance

Réflectance sol

$$R = \frac{\pi * (g * CN + c - L_{atm})}{T_a * (E * T_d * \cos(\theta_i) + E_{atm})}$$

Cas particulier

- Si $\cos(\theta_i)$ est constant sur l'image (relief nul)
- Si l'atmosphère est constante sur l'image

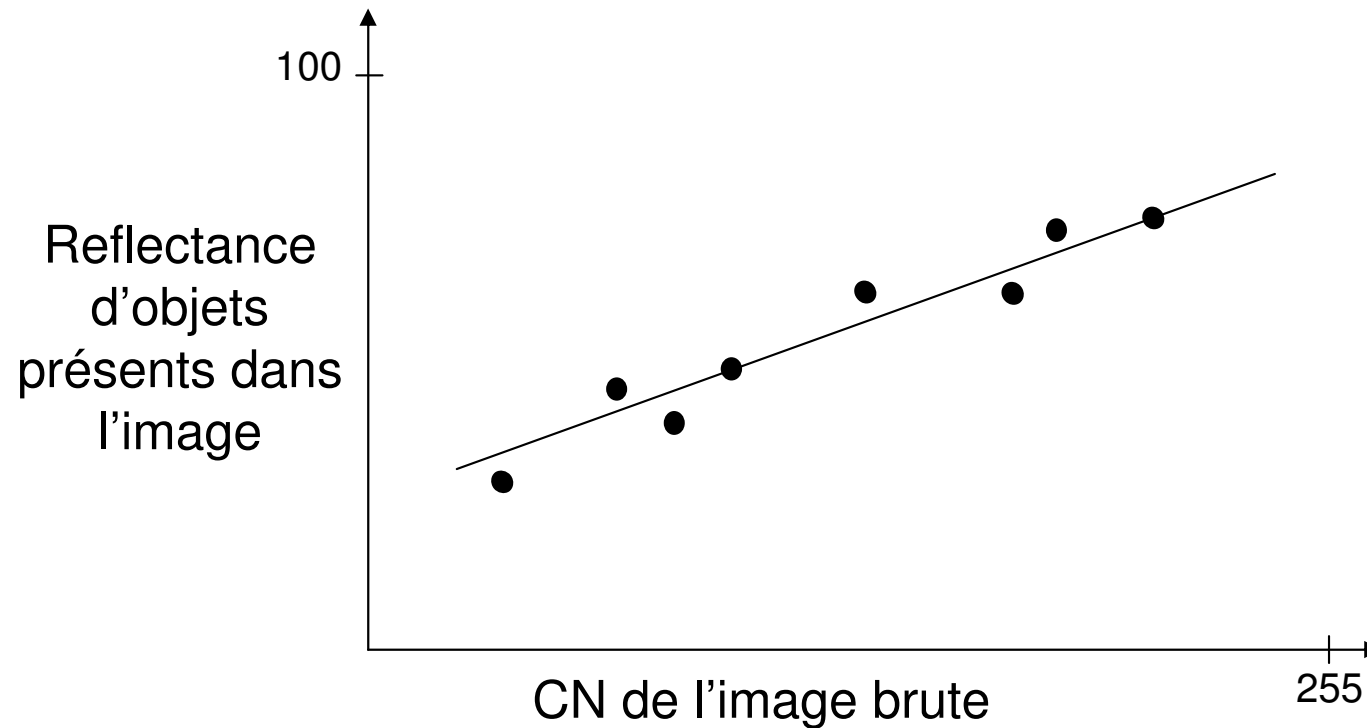
alors

$$R = a * CN + b$$

=> Aussi complexe soit l'influence de l'atmosphère, la réflectance n'est au final qu'une simple fonction linéaire des CN de l'image brute

Corrections radiométriques

Relation CN - réflectance



=> Nécessite :

- Soit des **mesures terrain synchrones** de l'acquisition image (ex CROSPCAN)

contraintes temporelles + protocole de mesure délicat...

- Soit des **invariants (« pseudo-invariants ») de réflectance connue**

Corrections radiométriques

Comparaison de deux dates

Hypothèse : La variation des CN ou Ref entre deux dates est **linéaire**

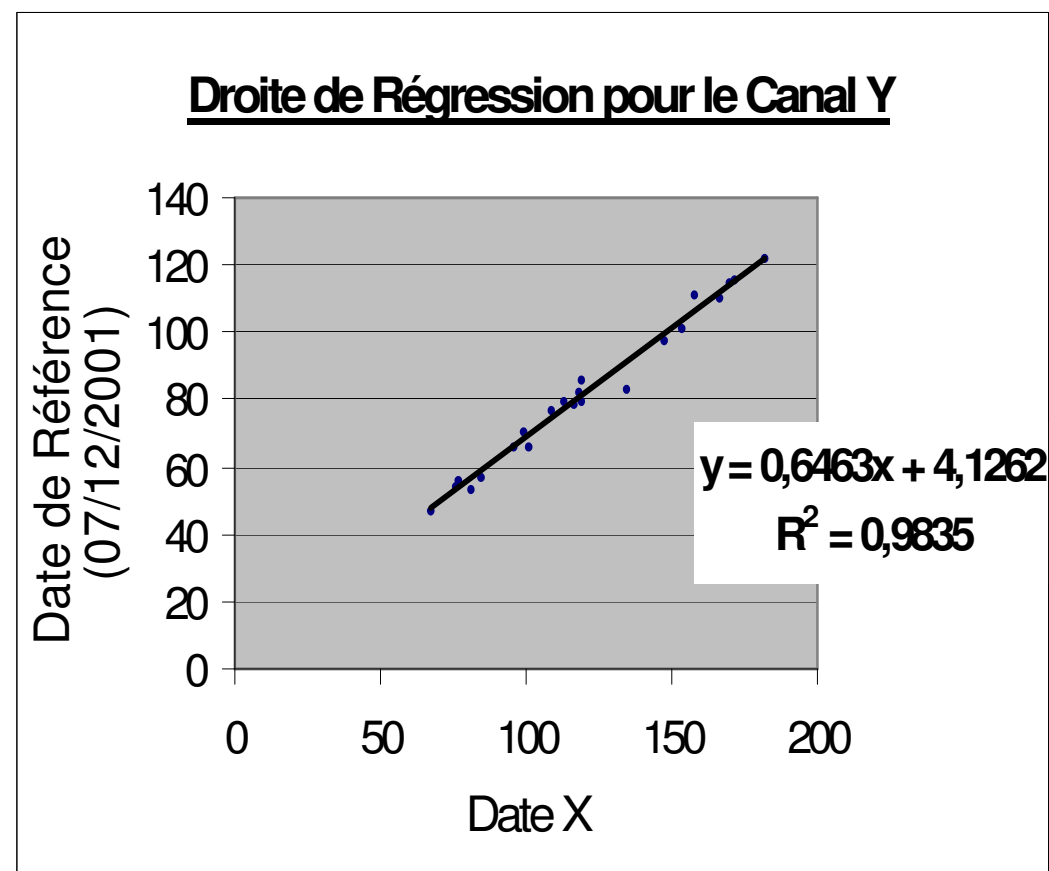
On utilise des points invariants pour caractériser cette relation

Les invariants : surfaces dont la signature spectrale ne varie pas dans le temps :

- Eau (~)
- Roches
- Surfaces artificialisées
- Surfaces en végétation sempervirente...
- Sols nus



-> choisir suffisamment de sites pour détecter les mauvais invariants



=> coefficients de la relation entre dates

$$\text{date2} = a * \text{date1} + b$$

Corrections radiométriques

Sélection d'invariants

Méthodes de recherche d'invariants

- **Connaissance terrain** (prudence...)
- **Observation des propriétés statistiques et visuelles des images.**
 - Les zones invariantes sont alignées sur un diagramme 2D de deux dates de la même bande.
 - Le clignotement de 2 dates permet de repérer des zones invariantes, malgré les légères différences de couleur. On contrôle sur le diagramme 2D que ces pixels sont bien sur l'axe apparent du nuage
- **Série d'image déjà corrigées** (recherche zones de variations minimales)

Corrections radiométriques

Résumé correction atmosphérique

Connaissance des paramètres atmosphériques (aérosols, H₂O, O₃...)

Objets sombres de signature connue dans l'image

Objets de signature connue dans l'image (image antérieure, mesures CROSPCAN, etc.)

Mesures spectrométriques de terrain **synchrones** ou **invariants**

Correction par modèle de transfert radiatif
=> 5S, Atpron, Atcorr2...

Correction linéaire

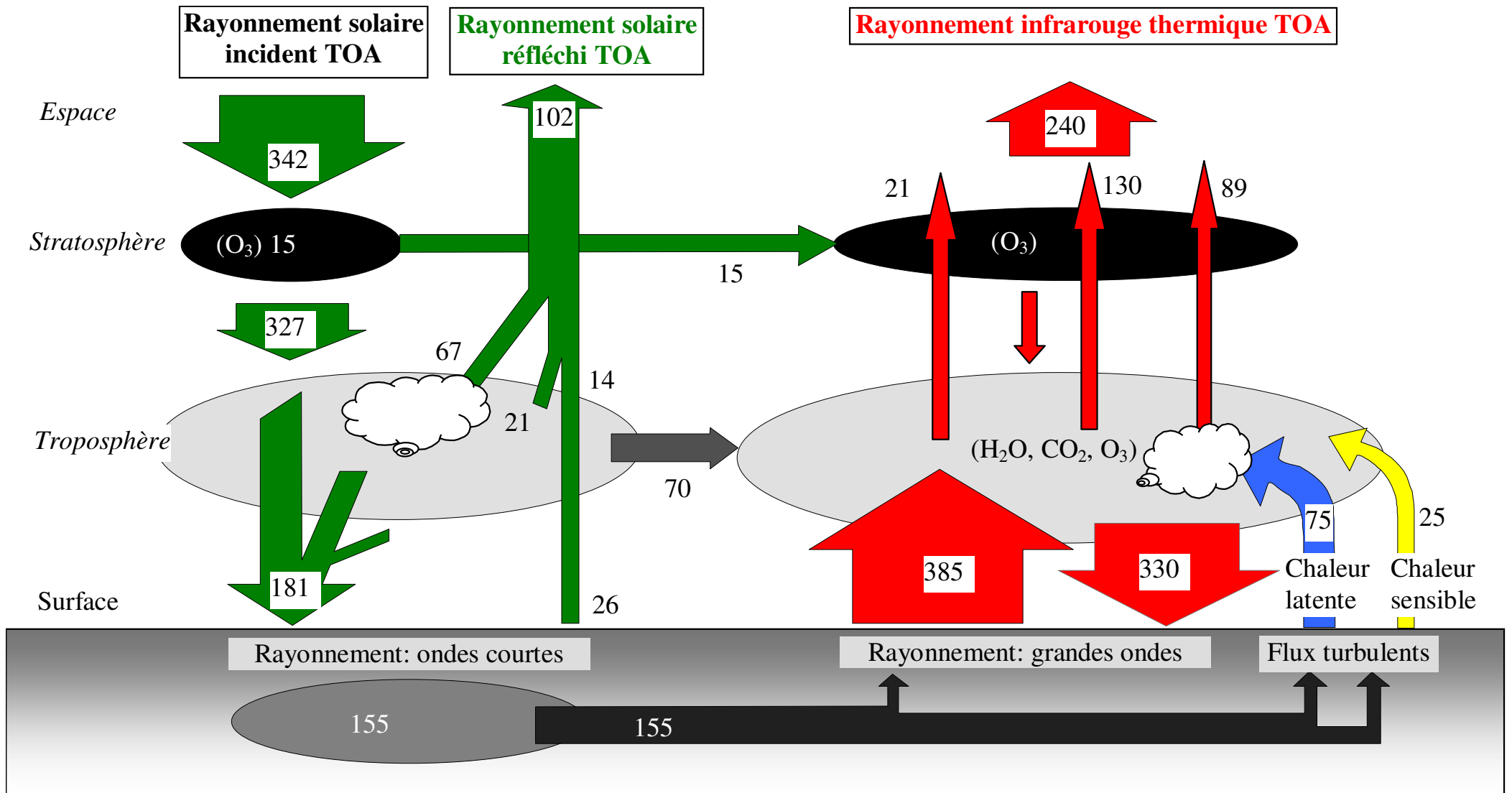
Une fois qu'une série d'image corrigée est disponible (modèle)

- ➔ 1- identification d'invariants
- ➔ 2- Comparaison des images de la série
- ➔ 3- Correction linéaire des dates biaisées

Entrée ➔

Annexes

Bilan d'Énergie Terre-Atmosphère



Bilan d'énergie Terre- Atmosphère

Rayonnement net R_n ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) des surfaces terrestres

$$R_n = R_s(1-\rho) + R_A\downarrow - R_T\uparrow$$

- R_s éclairement ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) au bas de l'atmosphère. En haut de l'atmosphère : $E_s \approx 1376\text{W}\cdot\text{m}^{-2} \pm 0,73\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.
 - ρ albédo de l'interface "surface terrestre - atmosphère". Il est compris entre 0 et 1.
 - $R_A\downarrow$ éclairement ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) thermique atmosphérique (grandes longueurs d'onde).
 - $R_T\uparrow$ émittance ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) thermique terrestre (grandes longueurs d'onde).
- La nuit : $R_n = R_A\downarrow - R_T\uparrow$ ($R_T\uparrow = \varepsilon\cdot\sigma\cdot T^4$)

Bilan d'énergie Terre- Atmosphère

$$R_n + LE + H + G + Ph = 0$$

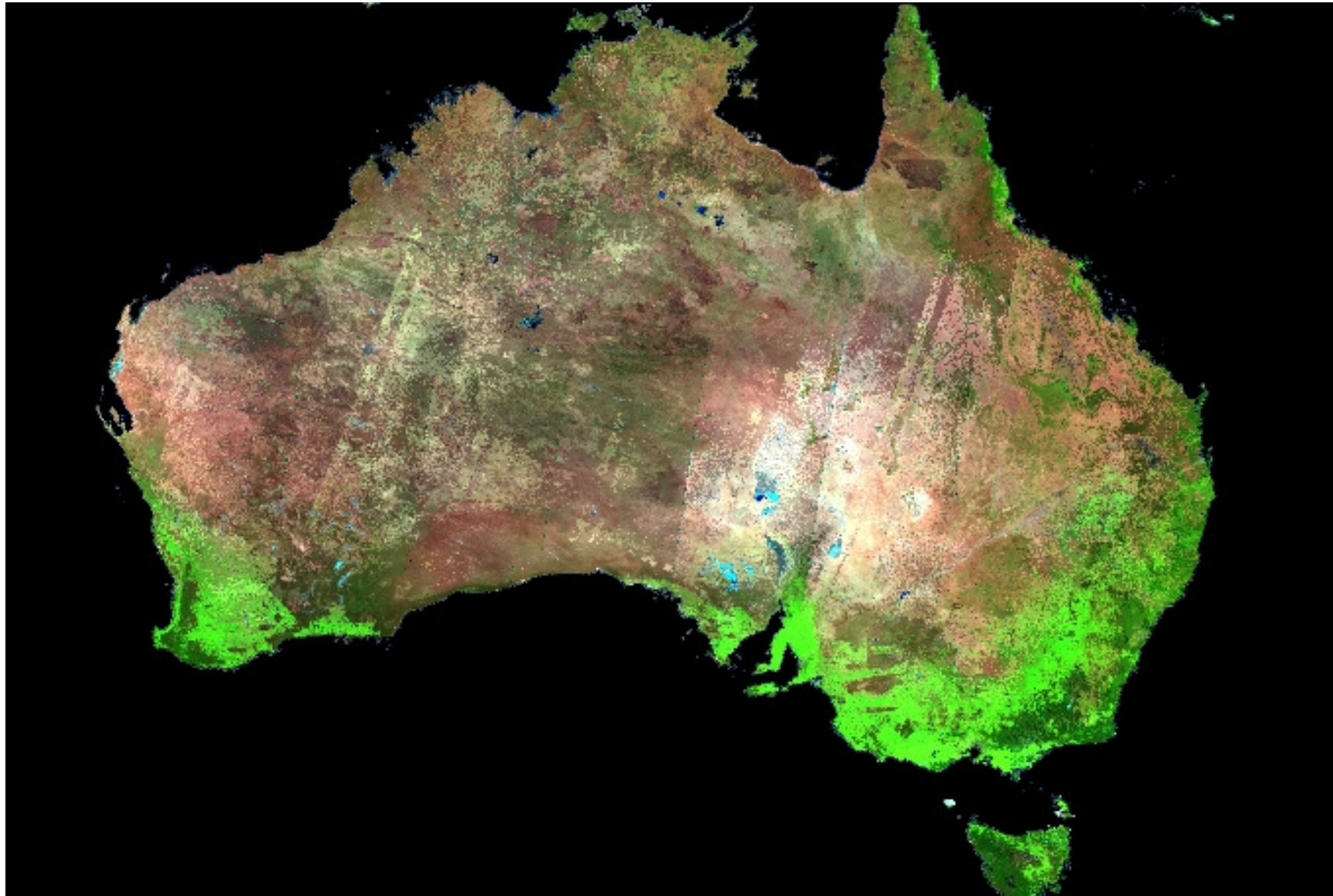
- **G** réchauffement du sol par conduction de chaleur
- **LE** évapotranspiration. L = chaleur latente de l'eau et E = quantité d'eau évaporée par unité de temps.
- **H** convection de chaleur. Souvent appelé "flux de chaleur sensible".
- **Ph** photosynthèse (stockage carbone). Terme de valeur moyenne en général inférieure à 1% du rayonnement net.

- Climats humides LE plus grand que G et H.
- Climats secs H est le terme le plus important.

Corrections radiométriques

Objectif : Même objets => mêmes signatures

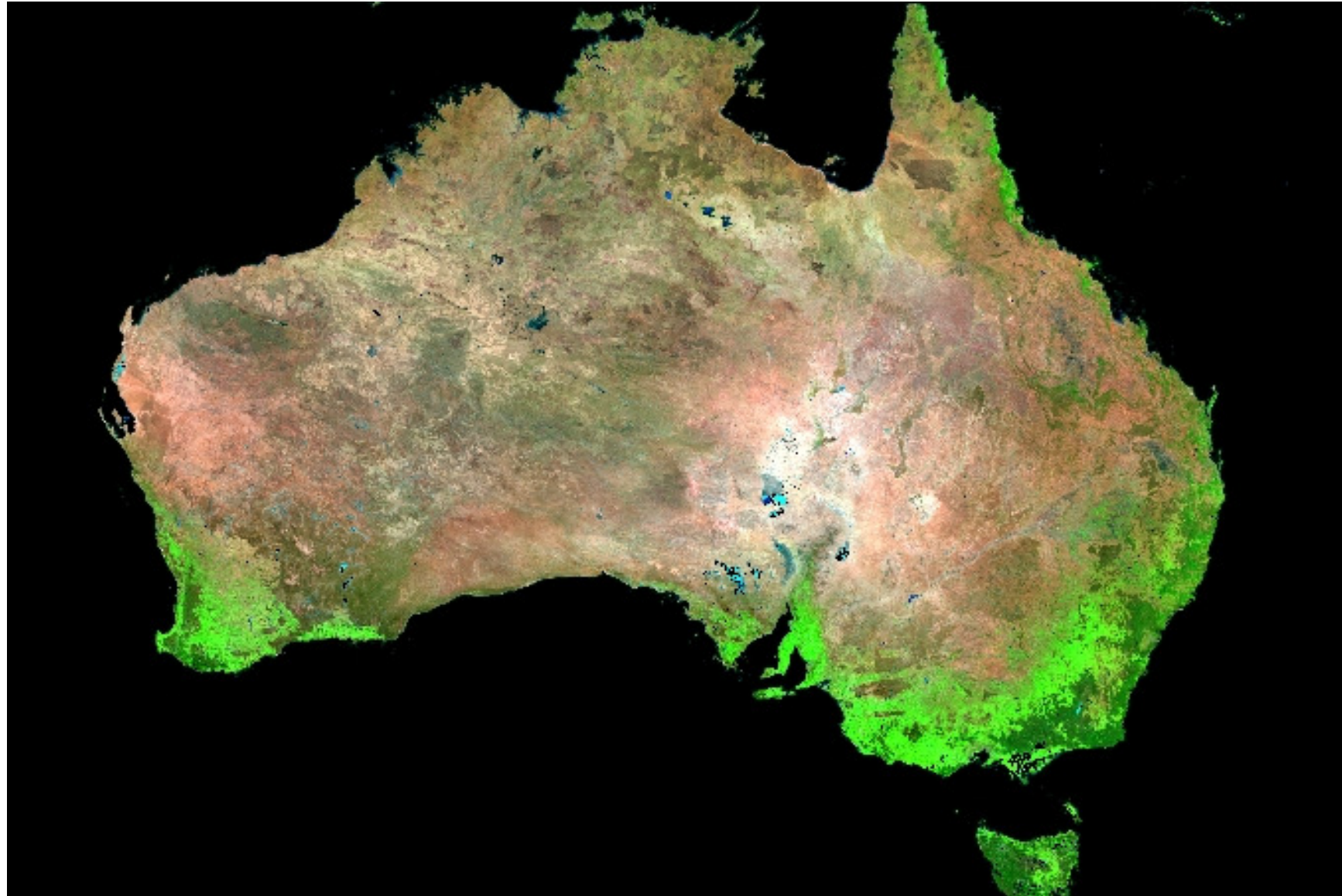
**Effets directionnels
(VEGETATION MVC) (avant traitement)**



Corrections radiométriques

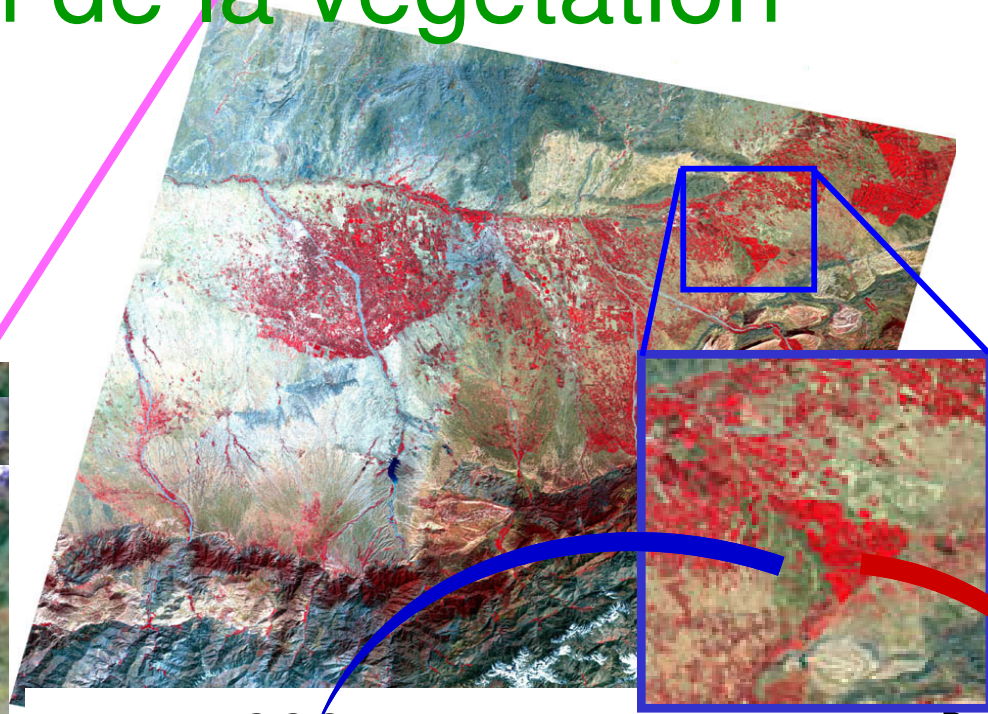
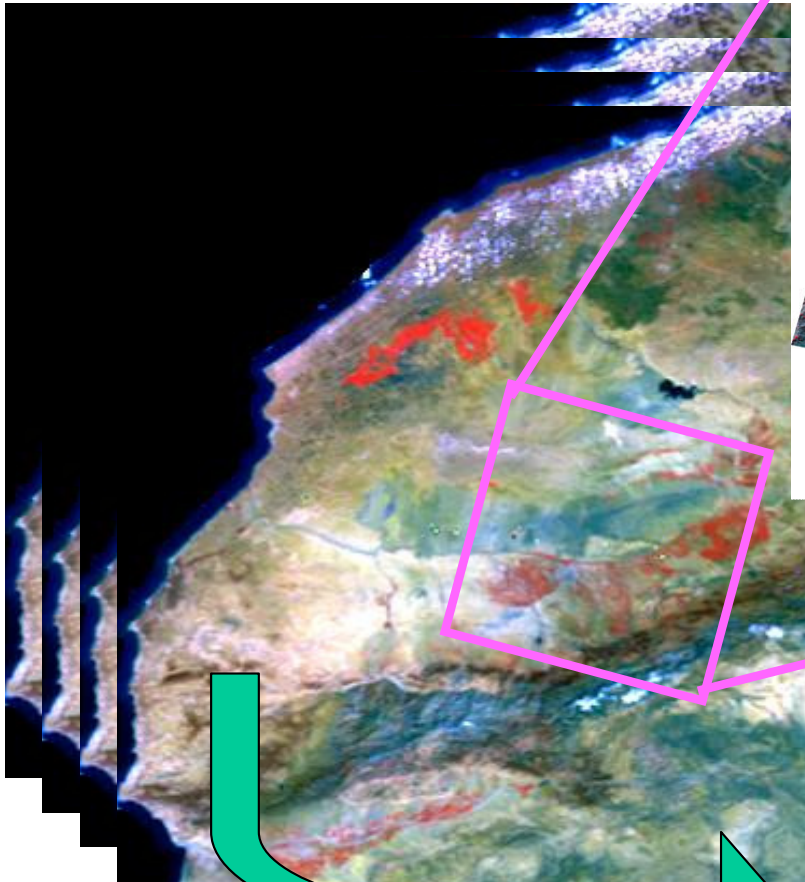
Objectif : Même objets => mêmes signatures

APRES correction
(THE NEW D10 COMPOSITE)

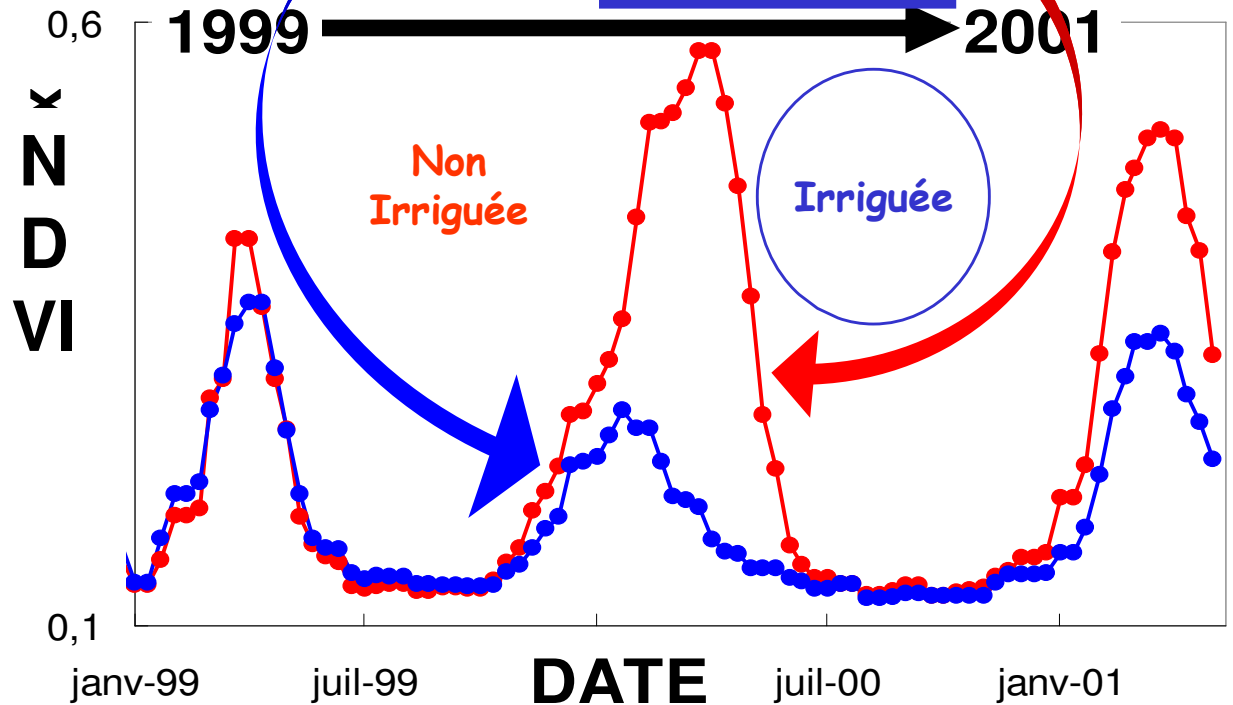


Suivi de la végétation

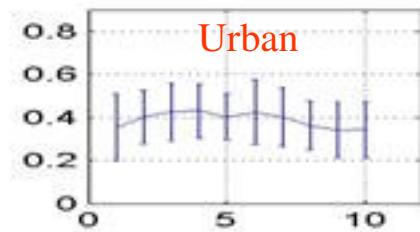
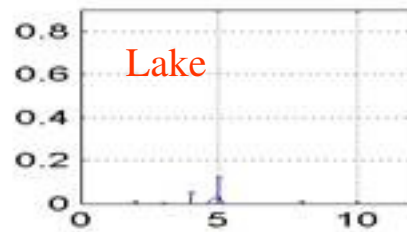
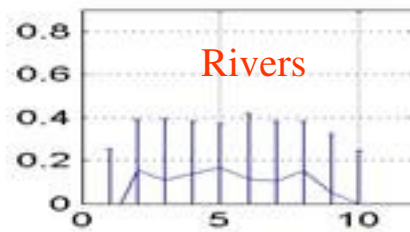
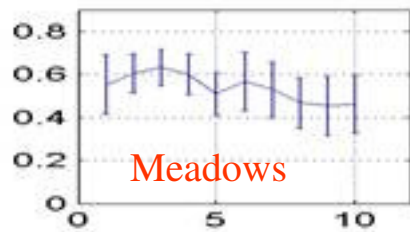
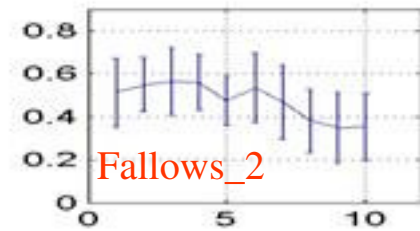
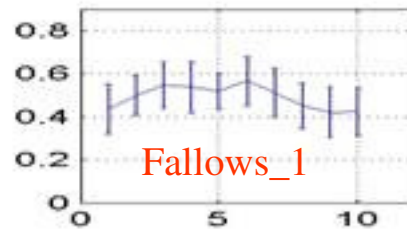
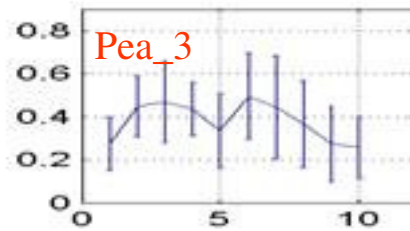
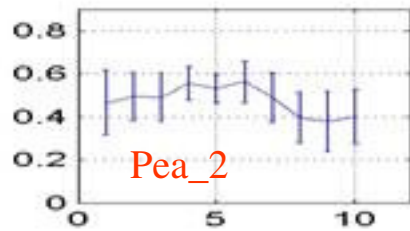
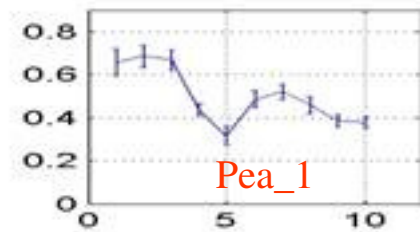
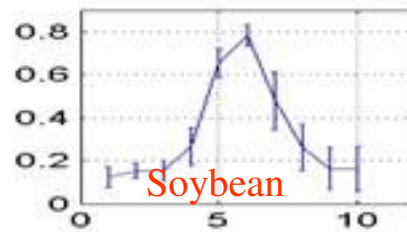
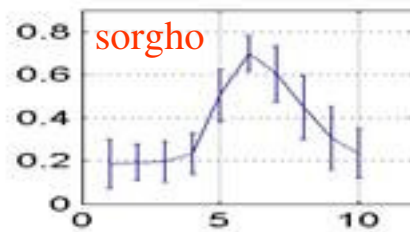
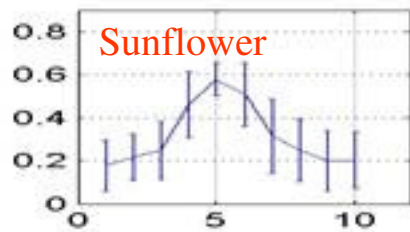
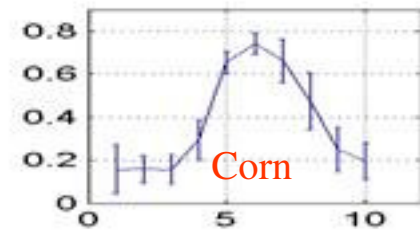
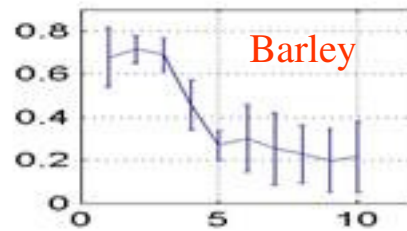
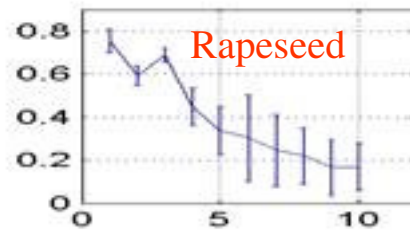
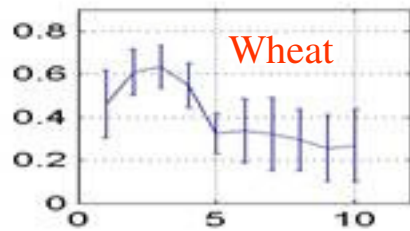
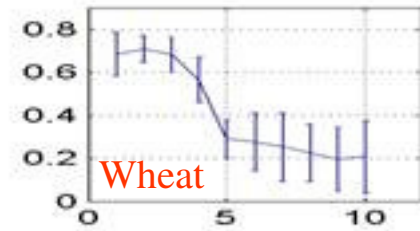
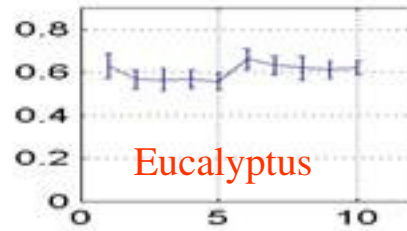
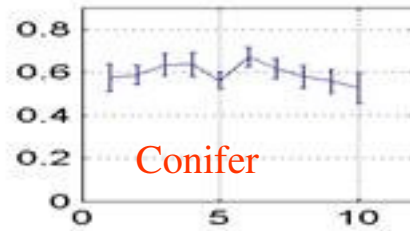
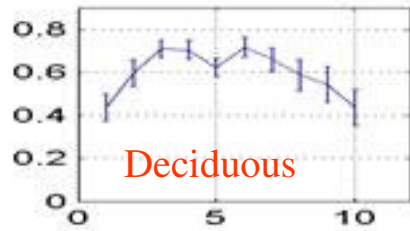
Séries D'images
VEGETATION (pixel 1 km)



SPOT-HRV
(20 m)
28/03/00



Suivi de la végétation



Suivi des états de surface

10 novembre 2005



Suivi des états de surface

12 novembre 2005



Suivi des états de surface

18 novembre 2005



Suivi des états de surface

21 novembre 2005



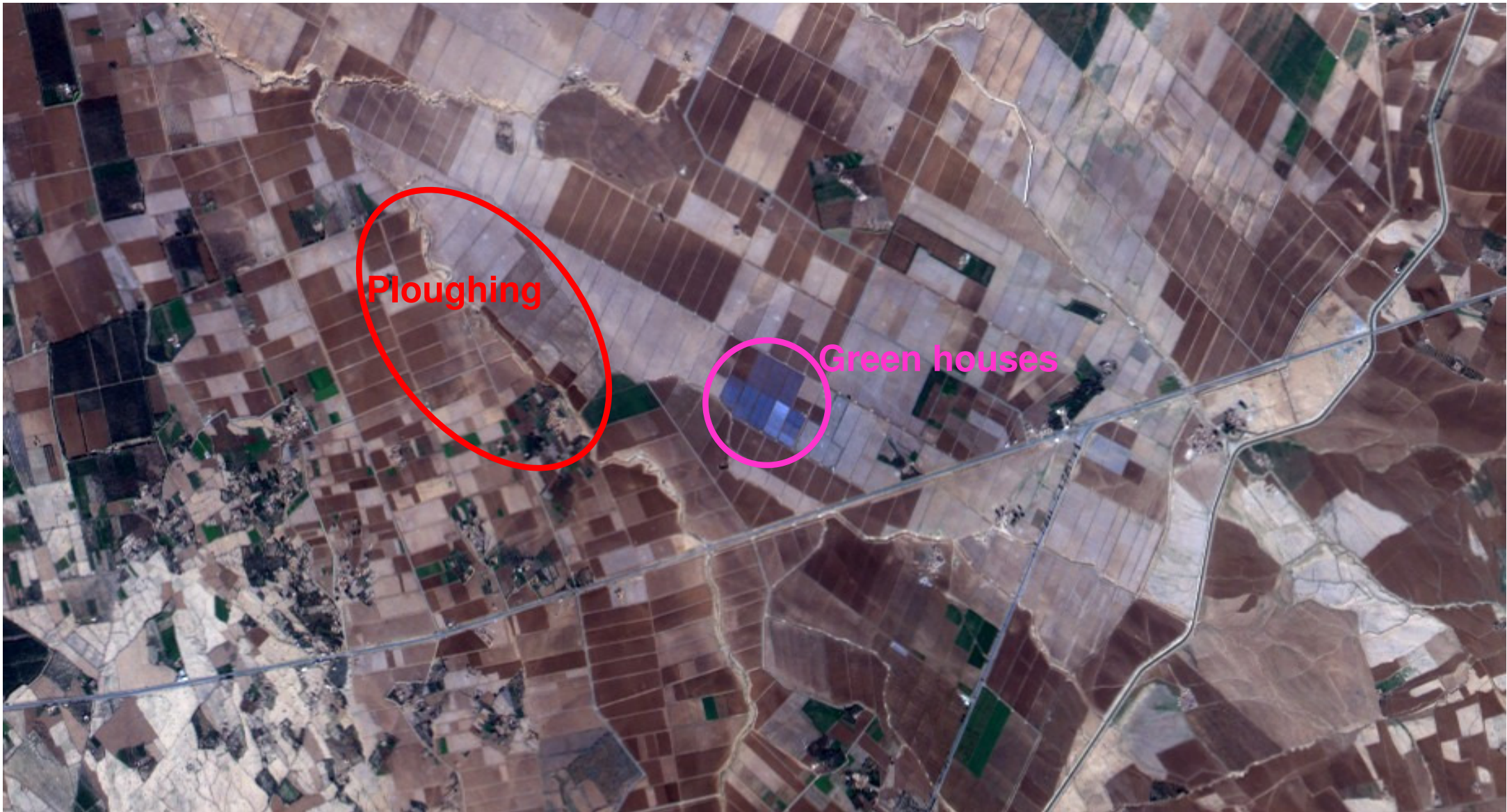
Suivi des états de surface

28 novembre 2005



Suivi des états de surface

8 décembre 2005



Suivi des états de surface

12 décembre 2005



Suivi des états de surface

16 décembre 2005



Suivi des états de surface

29 décembre 2005



Green
houses
installation

Barley
harvest

Suivi des états de surface

10 janvier 2006

