The background of the slide is a composite image. At the top, a satellite with a large parabolic dish and solar panels is shown in orbit over the Earth. Below the satellite, the Earth's surface is visible, showing the ocean on the left and a large landmass on the right. A white grid is overlaid on the landmass, representing a geographic coordinate system. The text is centered on a dark blue rectangular background.

# Physique de la Téledétection Optique

## Séance 2: Chaîne de Traitement Radiométrique

# Objectifs et Feuille de Route



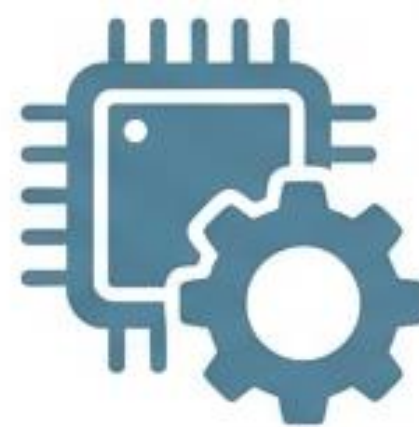
## **Théorie Physique**

Transfert Radiatif &  
Interactions



## **Instrumentation**

Capteur Sentinel-2  
MSI



## **Traitement**

Correction  
Atmosphérique  
Sen2Cor



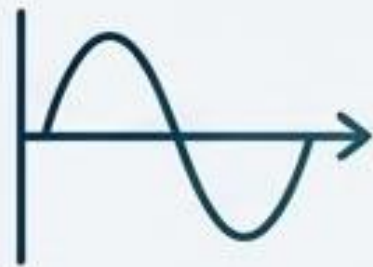
## **Produit Final**

Réflectance BOA &  
Indices

- Déconstruire le signal (L1C)
- Comprendre la résolution spatiale/spectrale
- Maîtriser le passage TOA vers BOA
- Calculer le NDVI

# De la Physique à l'Application : Notre Feuille de Route

## Part 1: Les Principes Physiques



Le Signal



Le Capteur



Le Spectre

## Part 2: La Chaîne de Traitement



### Prétraitement & Traitement

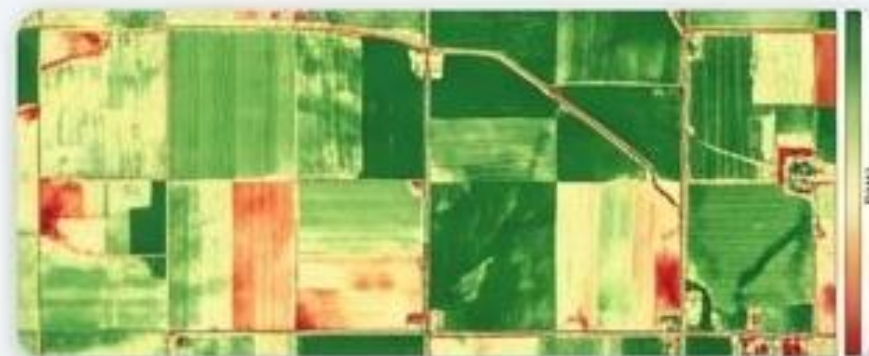
Calibration, Correction  
Atmosphérique/Ionosphérique



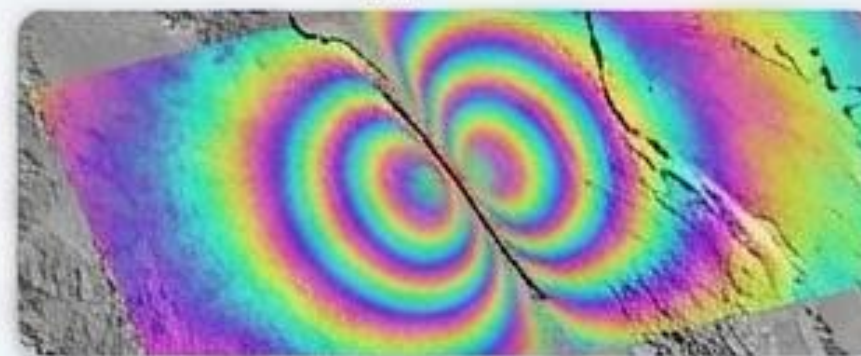
### Analyse & Classification

SVM, Random Forest

## Part 3: L'Impact Les Applications



Surveillance Agricole  
Source Sans Pro Regular



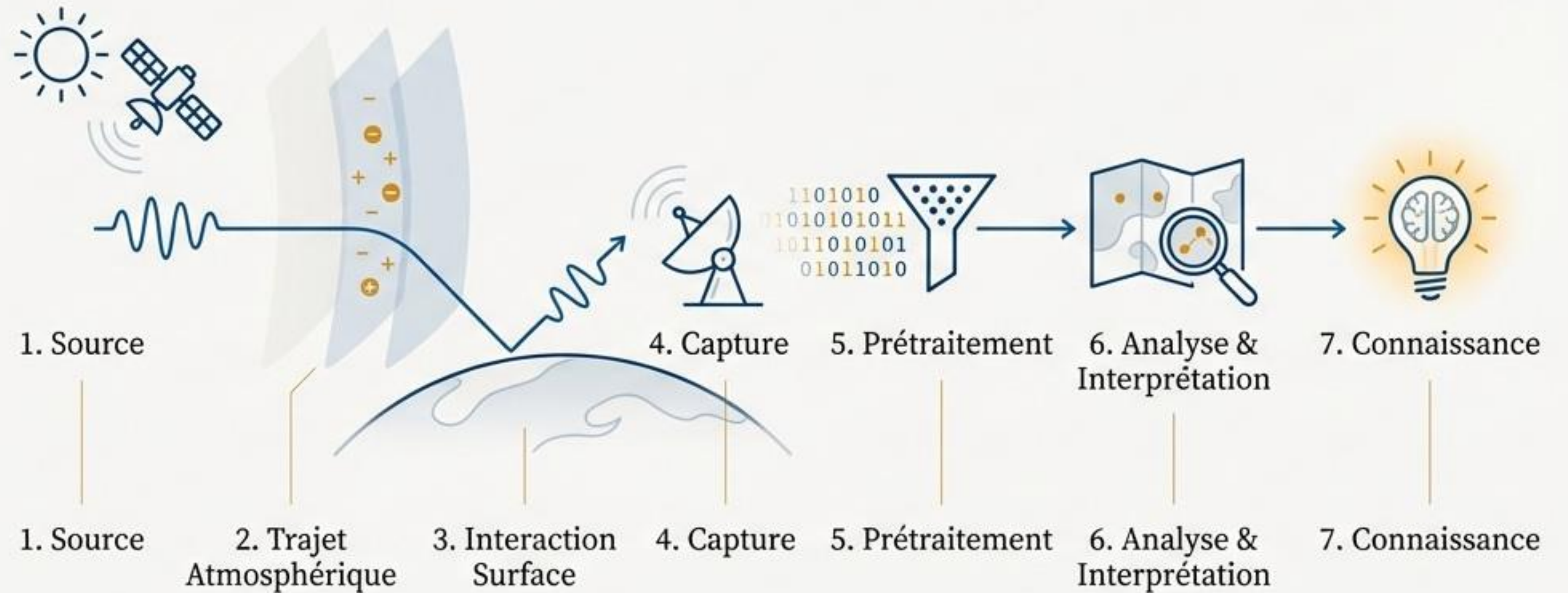
Déformation du Sol (InSAR)  
Source Sans Pro Regular



Suivi de la Déforestation  
Source Sans Pro Regular

# Le Voyage d'un Signal : De la Source à la Donnée Utile

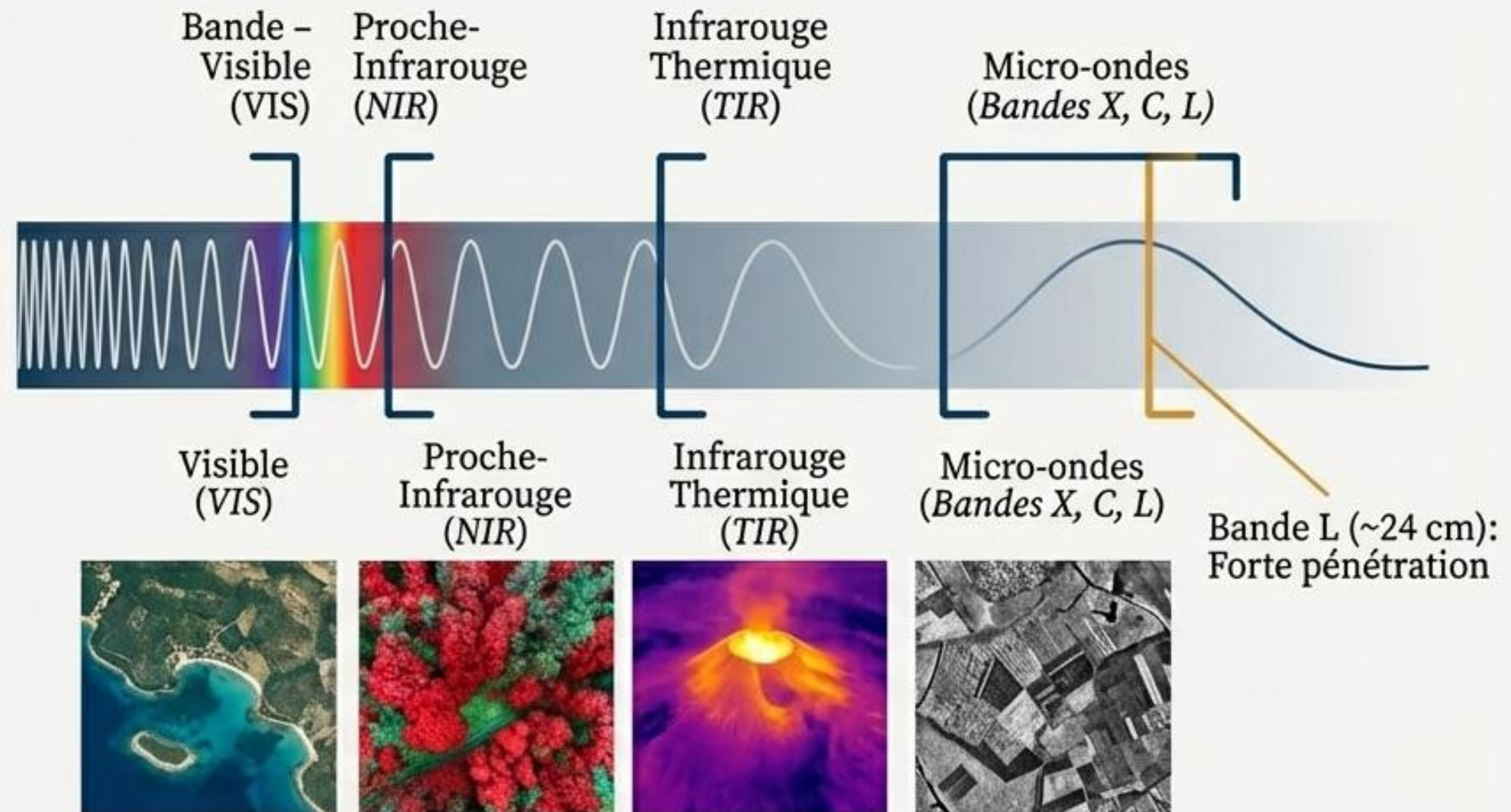
La télédétection est un processus physique complet. Nous suivrons le parcours d'une unité d'information — un photon ou une impulsion radar — pour comprendre chaque étape de sa transformation en connaissance.



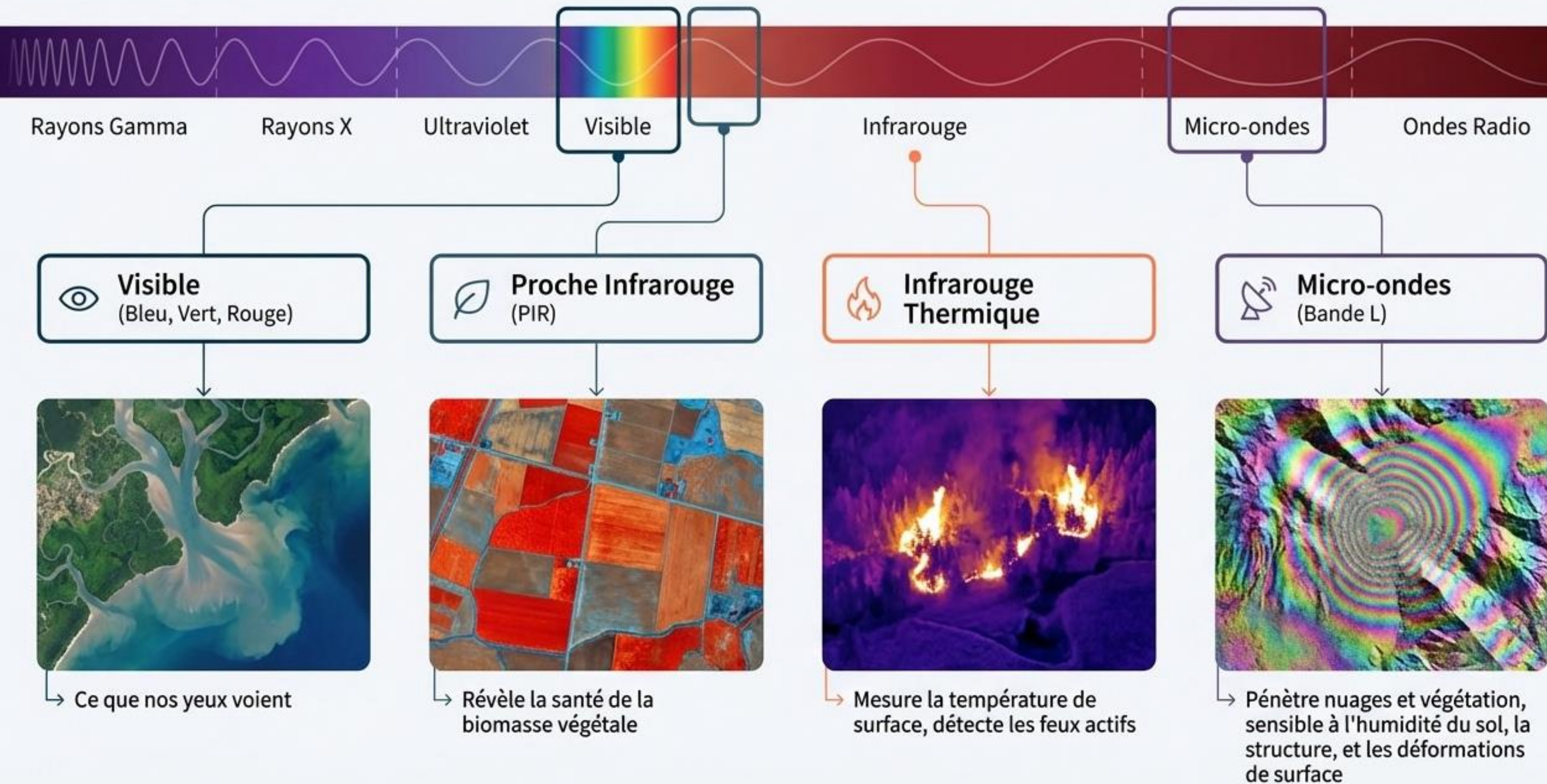
# La Nature du Signal : Le Spectre Électromagnétique Appliqué

Chaque bande du spectre électromagnétique interagit différemment avec la matière, nous offrant une 'vue' unique de la Terre. Le choix de la longueur d'onde est la première étape de toute mesure.

- **Optique (Visible, Proche-Infrarouge):** Sensible à la composition chimique et à la santé de la végétation (ex: photosynthèse).
- **Infrarouge Thermique:** Mesure l'énergie émise, directement liée à la température de surface.
- **Micro-ondes (Radar):** Pénètre les nuages et la végétation (selon la fréquence), sensible à la structure géométrique, à la rugosité et à la teneur en eau. Les bandes L (~24 cm) ont une capacité de pénétration accrue, essentielle pour l'observation des déformations du sol ou de la biomasse forestière.



# La Palette du Télédécteur

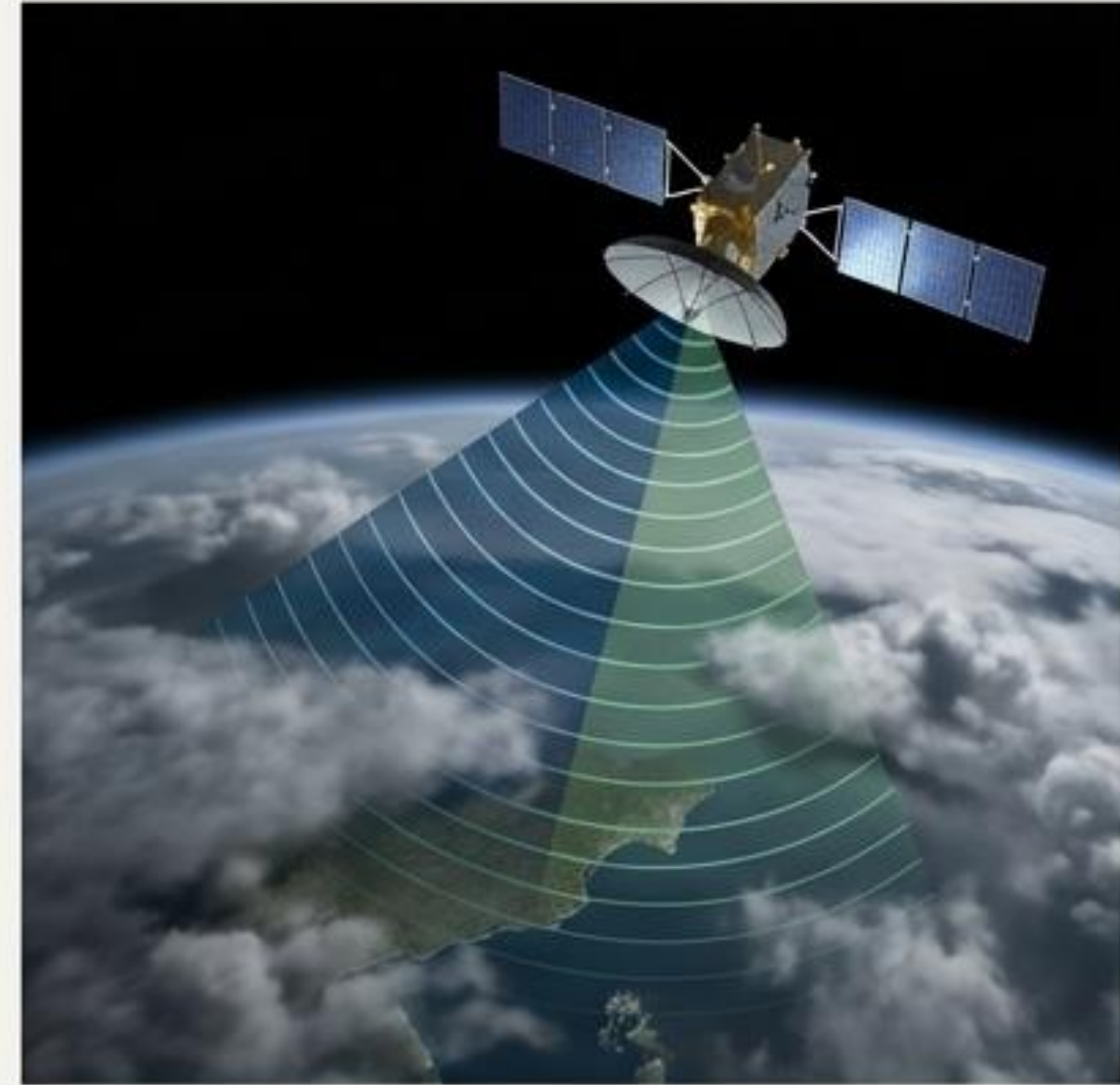


# Systemes de Télédétection : Passifs vs. Actifs



## Systemes Passifs (Optique, Thermique, Radiomètres)

- **Source d'énergie** : Externe (Soleil ou émission de la Terre).
- **Avantages** : Technologie mature, interprétation plus intuitive.
- **Inconvénients** : Dépendant de l'illumination solaire, sensible aux nuages.
- **Exemples** : Landsat, Sentinel-2 (optique), SMOS (radiomètre).



## Systemes Actifs (Radar, Lidar)

- **Source d'énergie** : Le capteur lui-même.
- **Avantages** : Indépendant de la météo (nuages) et de l'heure, sensible à la structure 3D.
- **Inconvénients** : Traitement des données plus complexe.
- **Exemples** : Sentinel-1 (SAR), Jason-3 (Altimètre), ASCAT (Diffusiomètre).

# Caractériser la Mesure : Les Quatre Résolutions Fondamentales

La qualité d'une donnée de télédétection est définie par quatre types de résolution.  
L'amélioration de l'une se fait souvent au détriment d'une autre.

## 1. Spatiale



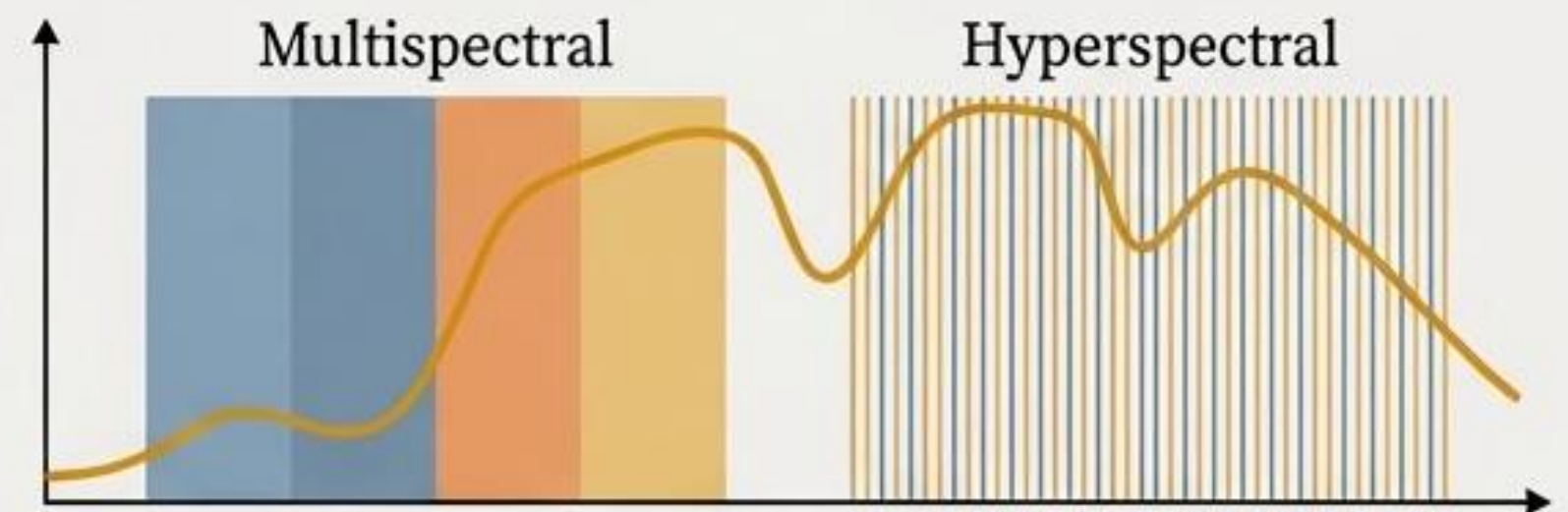
**<1 m** (Pléiades)



**30 m** (Landsat)

La taille du plus petit objet discernible.

## 2. Spectrale



Le nombre et la finesse des bandes spectrales.

## 3. Radiométrique



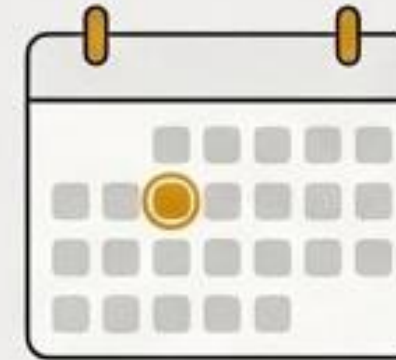
**8 bits** (256 niveaux)



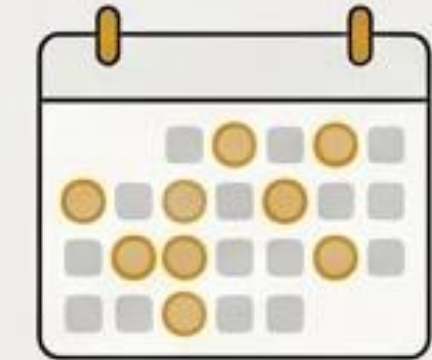
**12 bits** (4096 niveaux)

La sensibilité aux variations d'intensité.

## 4. Temporelle



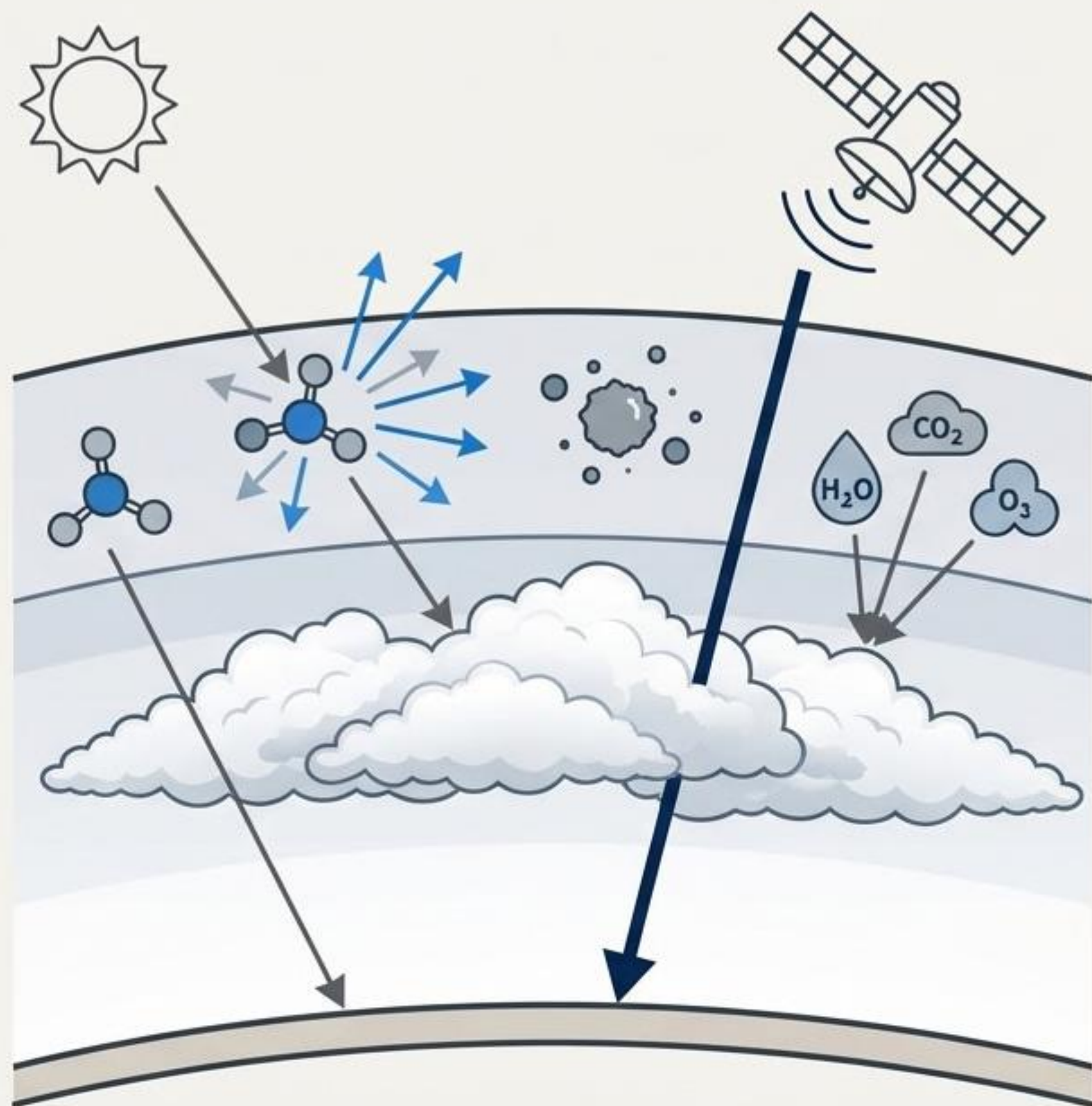
**16 jours** (Landsat)



**<1 jour** (Constellations)

La fréquence de passage au-dessus d'une même zone.

# Le Trajet du Signal : La Traversée de l'Atmosphère



Le signal est modifié lors de son double trajet (source-cible-capteur). Deux phénomènes principaux :

## 1. La Diffusion (Scattering)

Redirection du rayonnement par les molécules d'air (diffusion de Rayleigh, explique le ciel bleu) et les aérosols (diffusion de Mie). C'est le principal obstacle pour les capteurs optiques en présence de nuages ou de brume.

## 2. L'Absorption

Certains gaz (vapeur d'eau  $H_2O$ , dioxyde de carbone  $CO_2$ , ozone  $O_3$ ) absorbent l'énergie à des longueurs d'onde spécifiques, créant des "fenêtres atmosphériques" où la transmission est possible.

**\*\*L'Avantage du Radar :\*** Les micro-ondes utilisées par les satellites SAR (ex : bande C de Sentinel-1, bande L d'ALOS-2) ont des longueurs d'onde beaucoup plus grandes que les particules atmosphériques et ne sont quasiment pas affectées par les nuages, la pluie ou la brume.

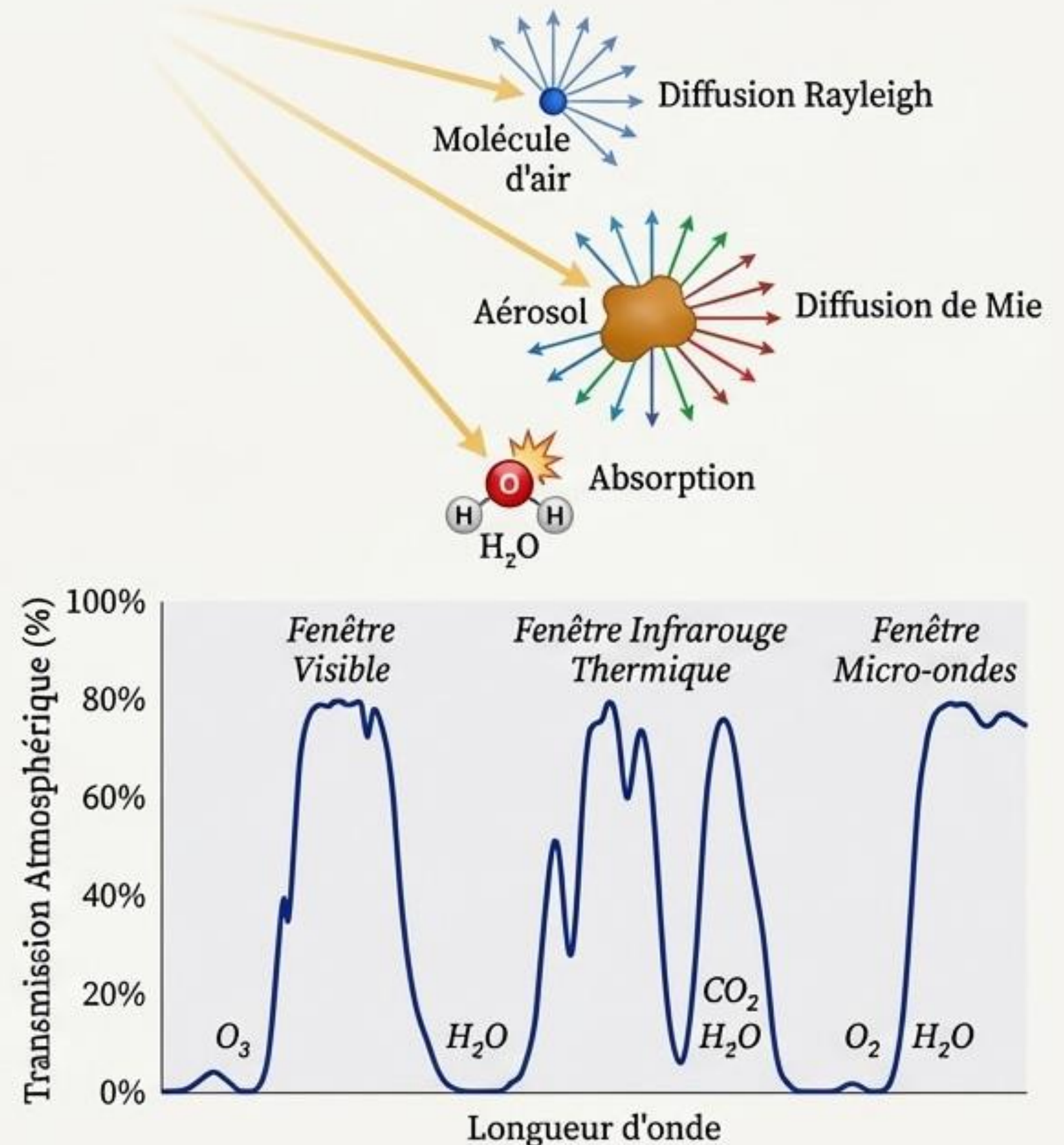
# Premier Obstacle : L'Interaction du Signal avec l'Atmosphère

L'atmosphère n'est pas transparente. Elle absorbe et diffuse le rayonnement de manière sélective, altérant le signal avant même qu'il n'atteigne le sol. Comprendre ces effets est indispensable pour une mesure quantitative.

## - Diffusion:

- **Rayleigh:** Affecte les courtes longueurs d'onde (bleu), responsable de la couleur du ciel. Dominante pour les molécules d'air.
- **Mie:** Affecte toutes les longueurs d'onde. Causée par les aérosols, la poussière, le pollen, la fumée.
- **Absorption:** Principalement par la vapeur d'eau ( $H_2O$ ), le dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) et l'ozone ( $O_3$ ), créant des 'fenêtres atmosphériques' où la transmission est possible.

**Message clé:** Ce qui est mesuré par le capteur n'est pas la réflectance de la surface, mais un signal composite. La correction atmosphérique vise à isoler la contribution de la surface.



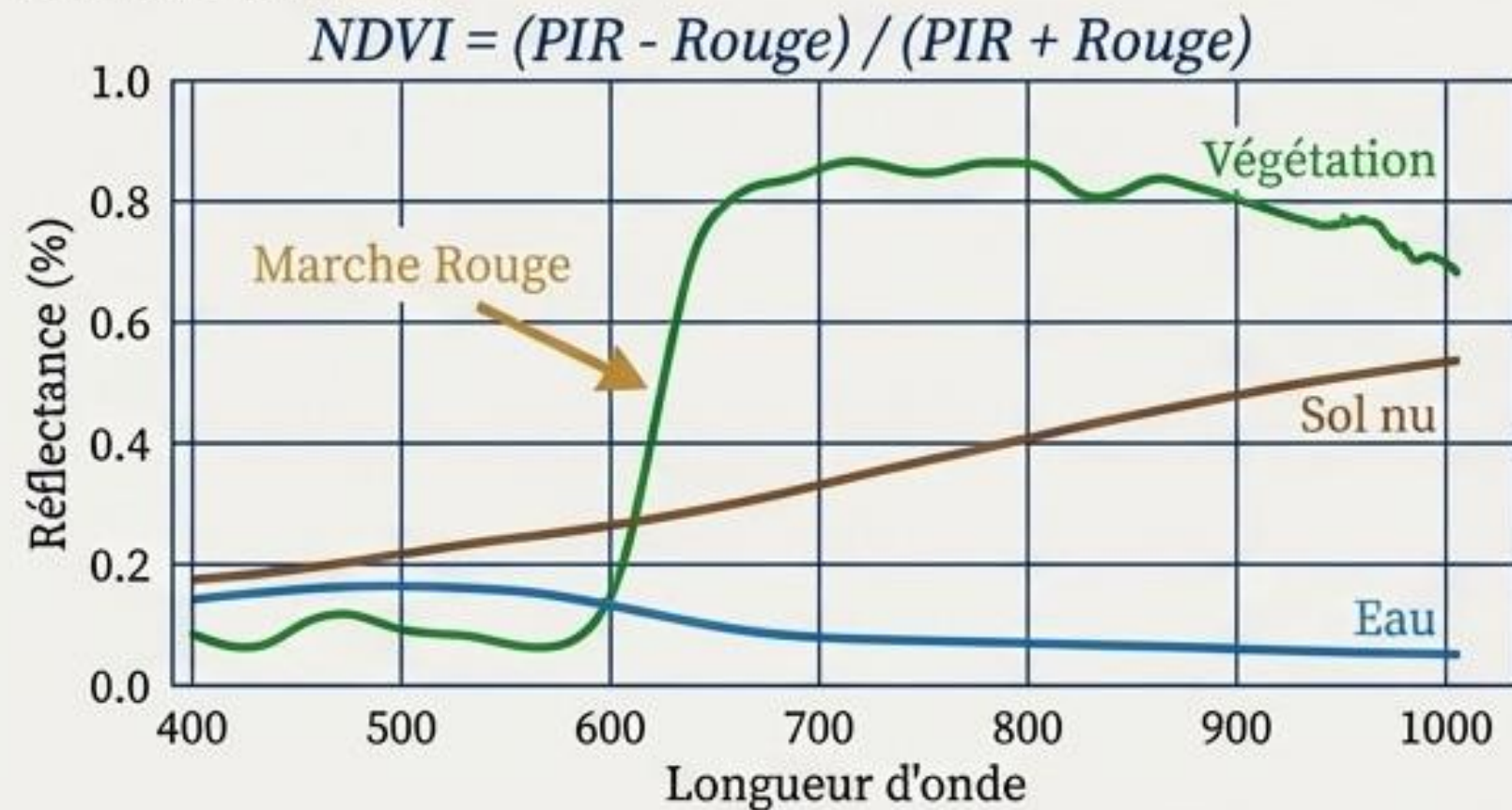
# L'Empreinte de la Surface : Comment le Signal Acquiert l'Information

L'interaction du rayonnement avec la surface terrestre est le cœur du processus de mesure. La manière dont la surface réfléchit, diffuse ou émet le signal dépend de ses propriétés physiques et chimiques.

## Domaine Optique : La Signature Spectrale

La réflectance d'un matériau varie avec la longueur d'onde.

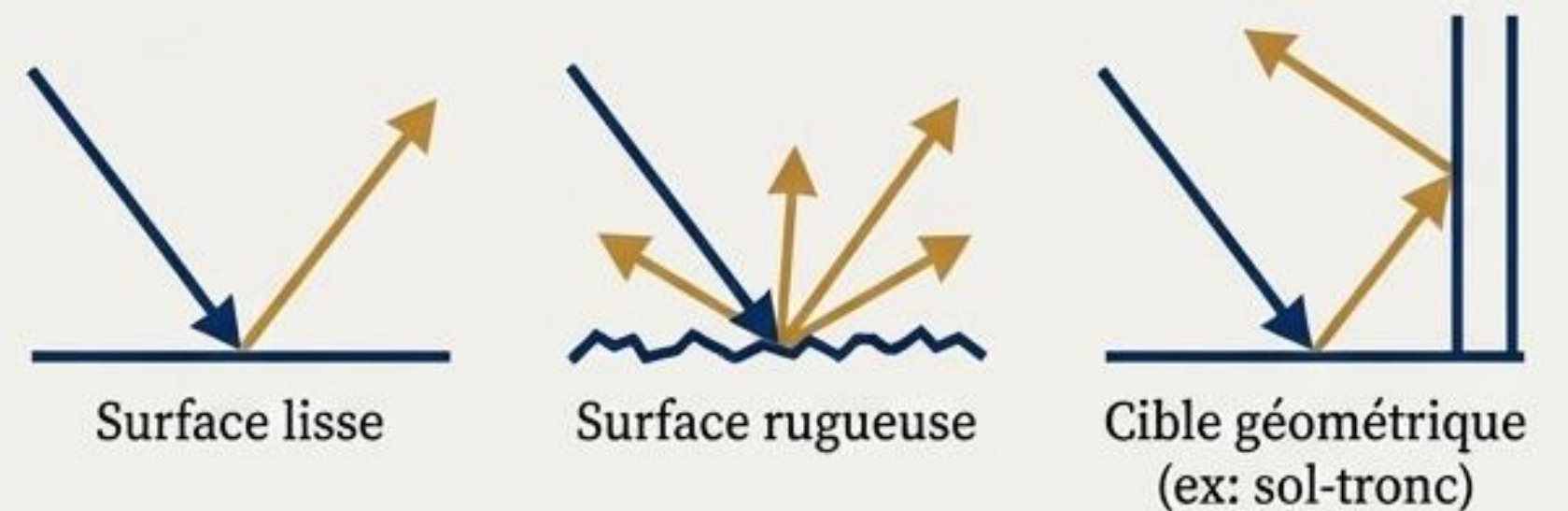
**Exemple Végétation:** Faible réflectance dans le visible (absorption par la chlorophylle), forte réflectance dans le proche infrarouge (structure cellulaire des feuilles). Cette "marche rouge" est la base des indices de végétation comme le NDVI.



## Domaine Radar : La Rétrodiffusion

Le signal retourné dépend de:

- Propriétés diélectriques:** Principalement la teneur en eau.
- Rugosité de surface:** Une surface lisse agit comme un miroir, une surface rugueuse diffuse le signal.
- Géométrie de la cible:** La double-réflexion renvoie un signal très fort.



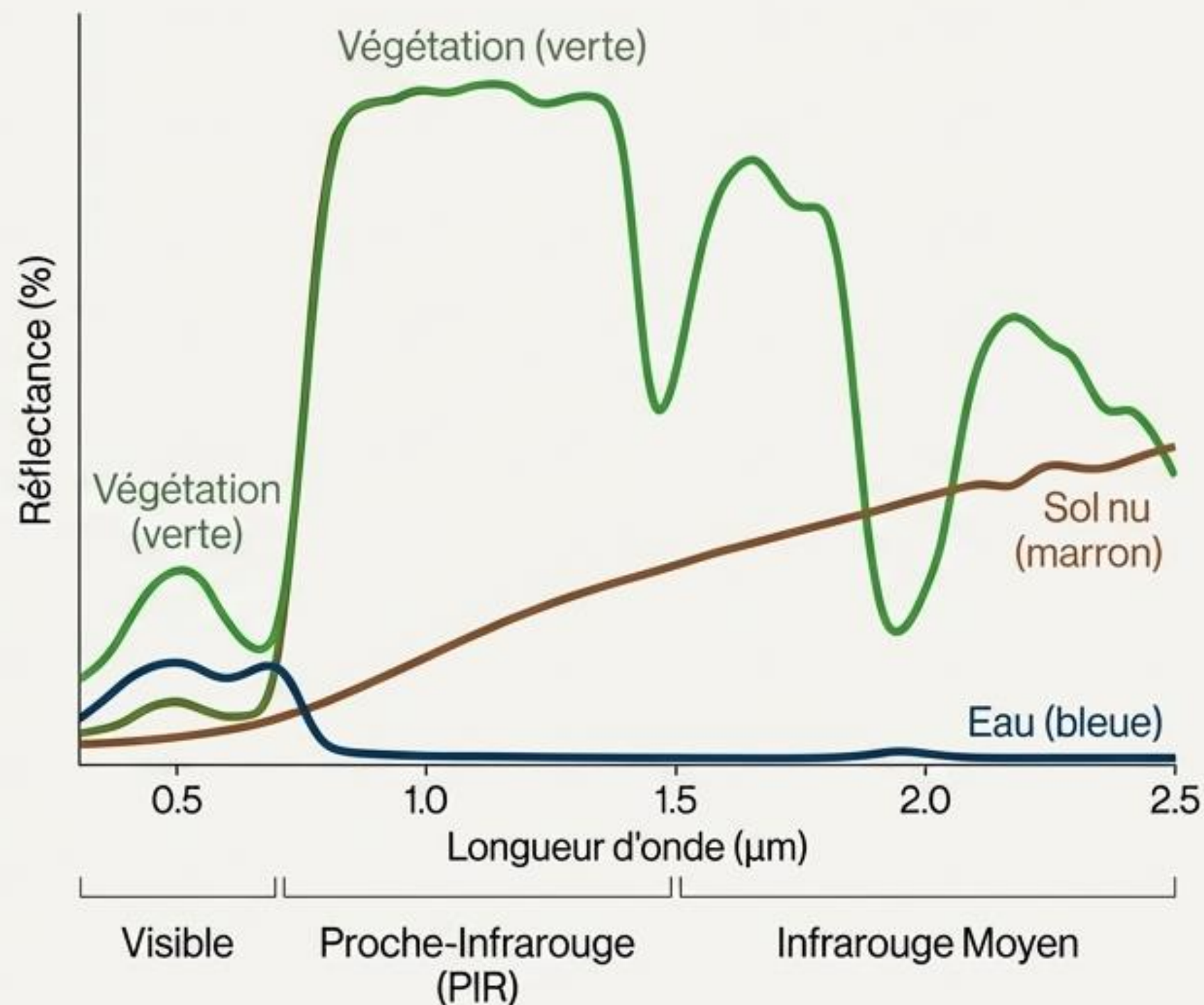
# Interaction Onde-Surface : L'Optique et le Thermique

## La Réflectance Spectrale : La signature de la matière

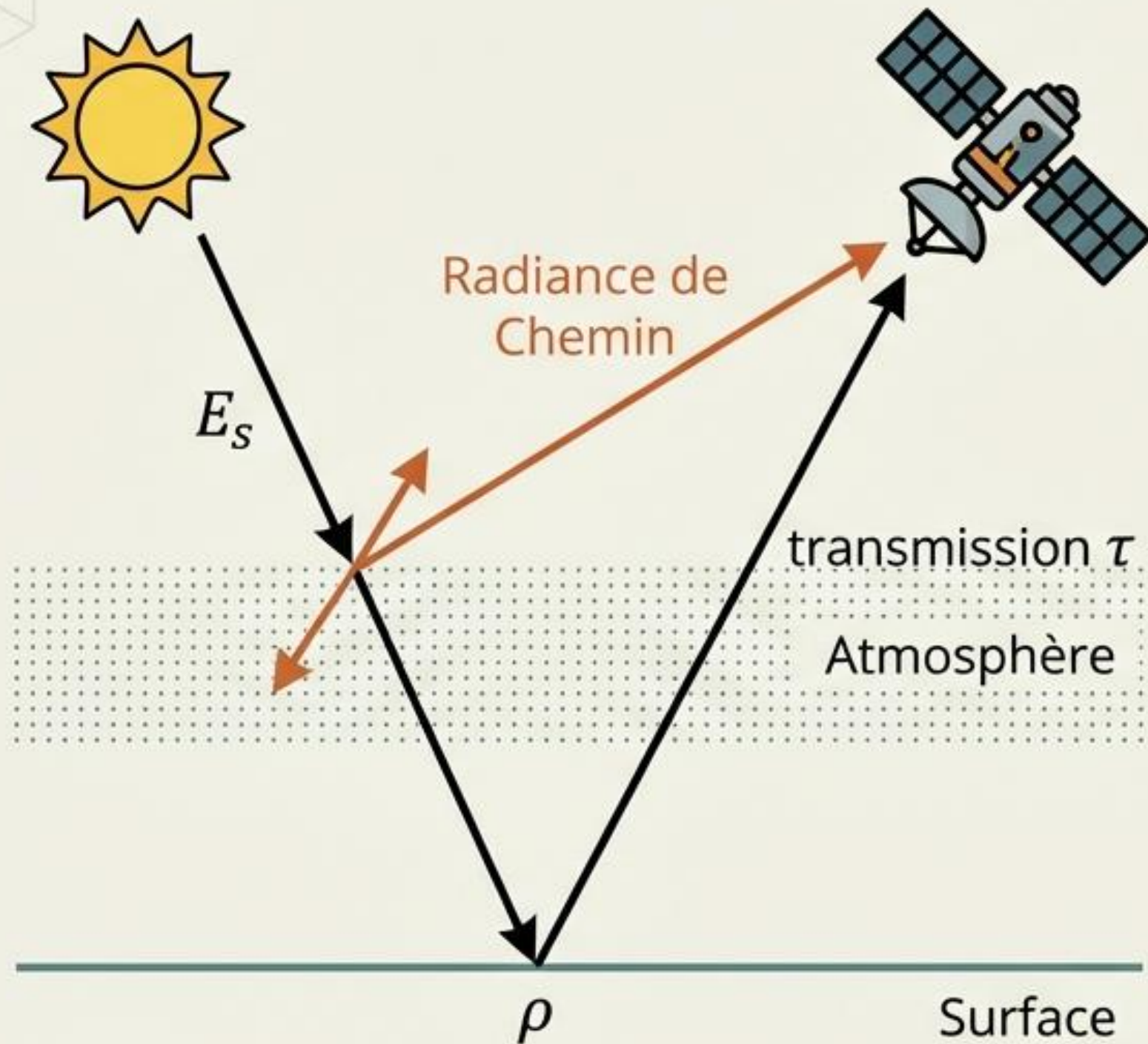
- Chaque matériau (végétation, sol, eau) possède une signature spectrale unique.
- **Végétation** : Faible réflectance dans le visible (sauf vert), forte dans le Proche-IR.
- **Sol** : Réflectance généralement croissante avec la longueur d'onde.
- **Eau** : Forte absorption dans le PIR.

## La Température de Surface : Le bilan d'énergie

- Toute surface émet un rayonnement dans l'infrarouge thermique proportionnel à sa température.
- Variable clé pour l'estimation de l'évapotranspiration et la détection du stress hydrique.



# Le Modèle de Mesure : Du Soleil au Capteur

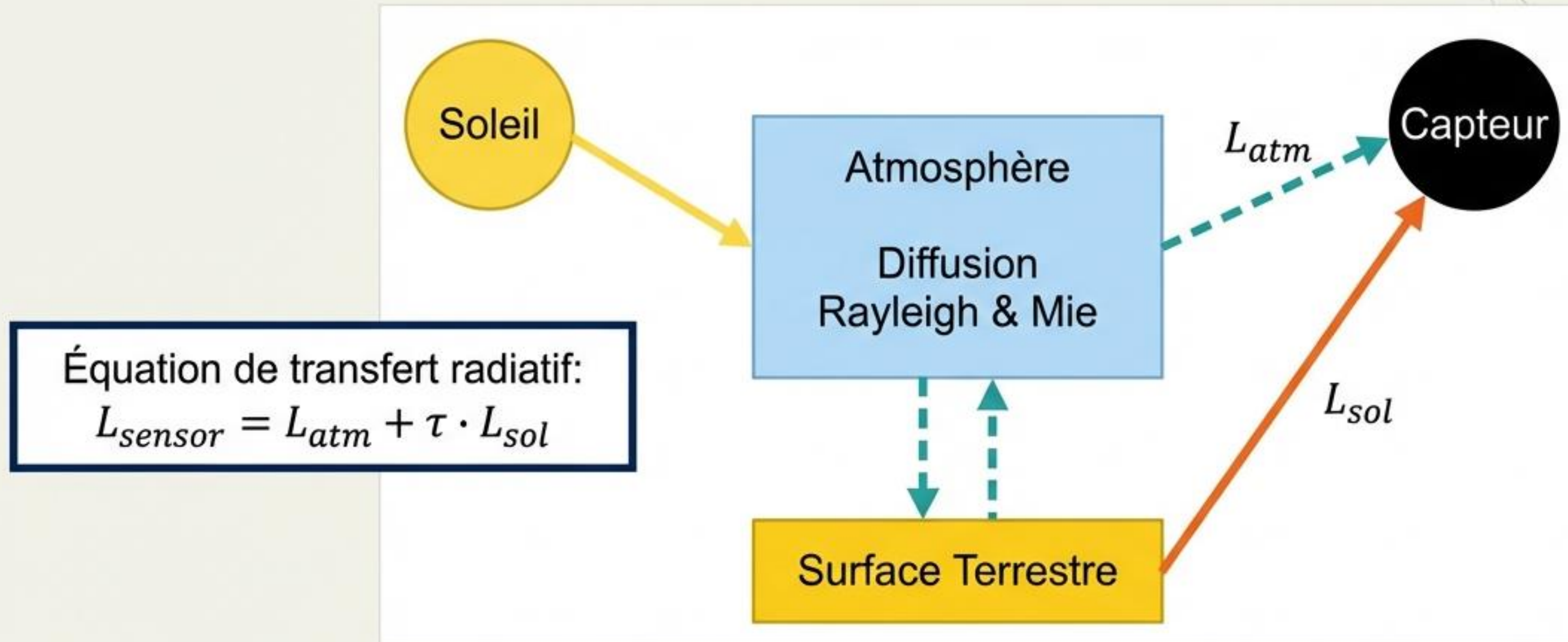


Le capteur mesure une Radiance ( $L$ ).

Unités :  $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$

$$L_{sensor} = \text{Signal Sol} + \text{Radiance de Chemin}$$

# L'Équation du Transfert Radiatif



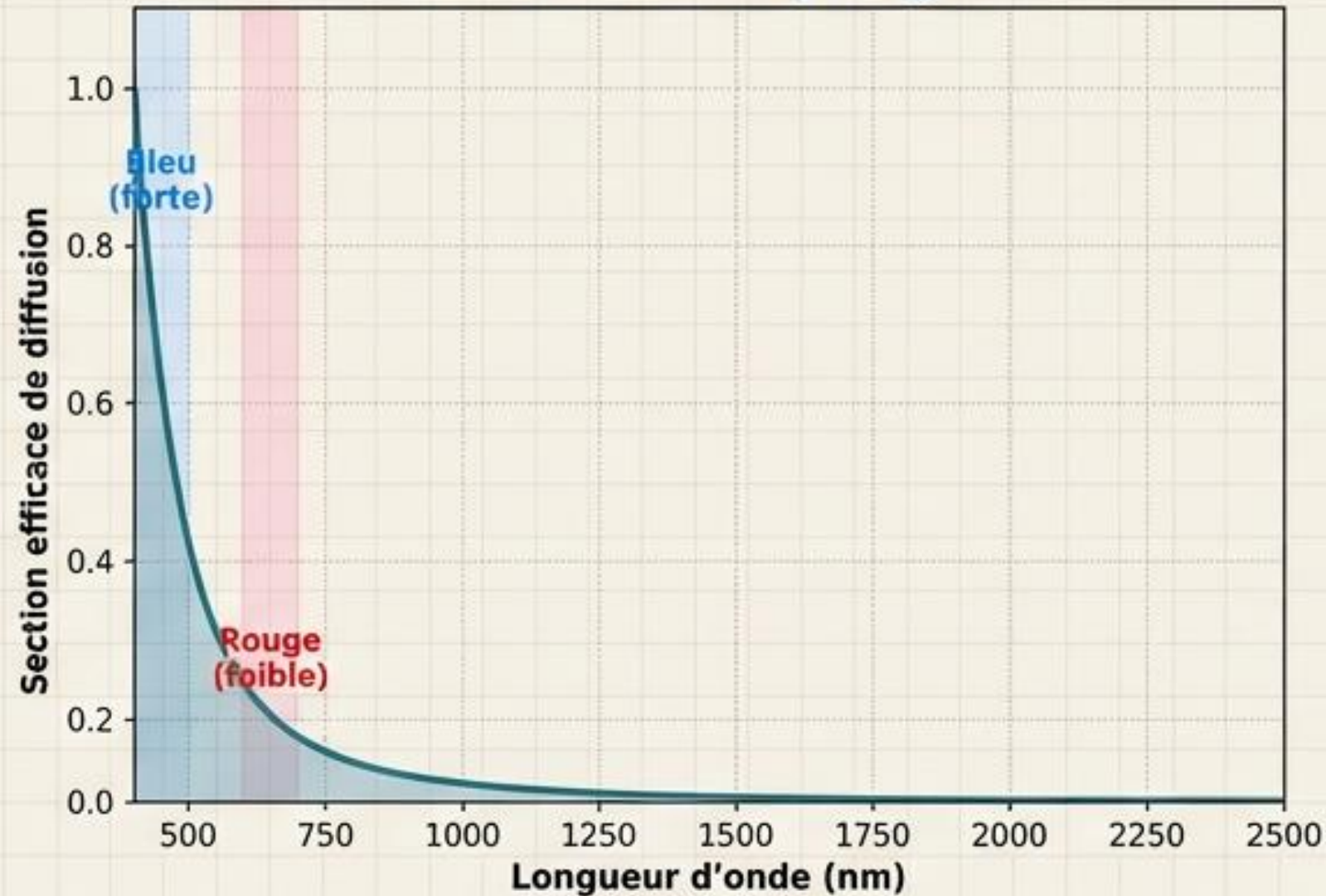
- $L_{atm}$  : Radiance atmosphérique (Path Radiance)

- $\tau$  : Transmittance atmosphérique

- $L_{sol}$  : Radiance quittant la surface (contient  $\rho$ )

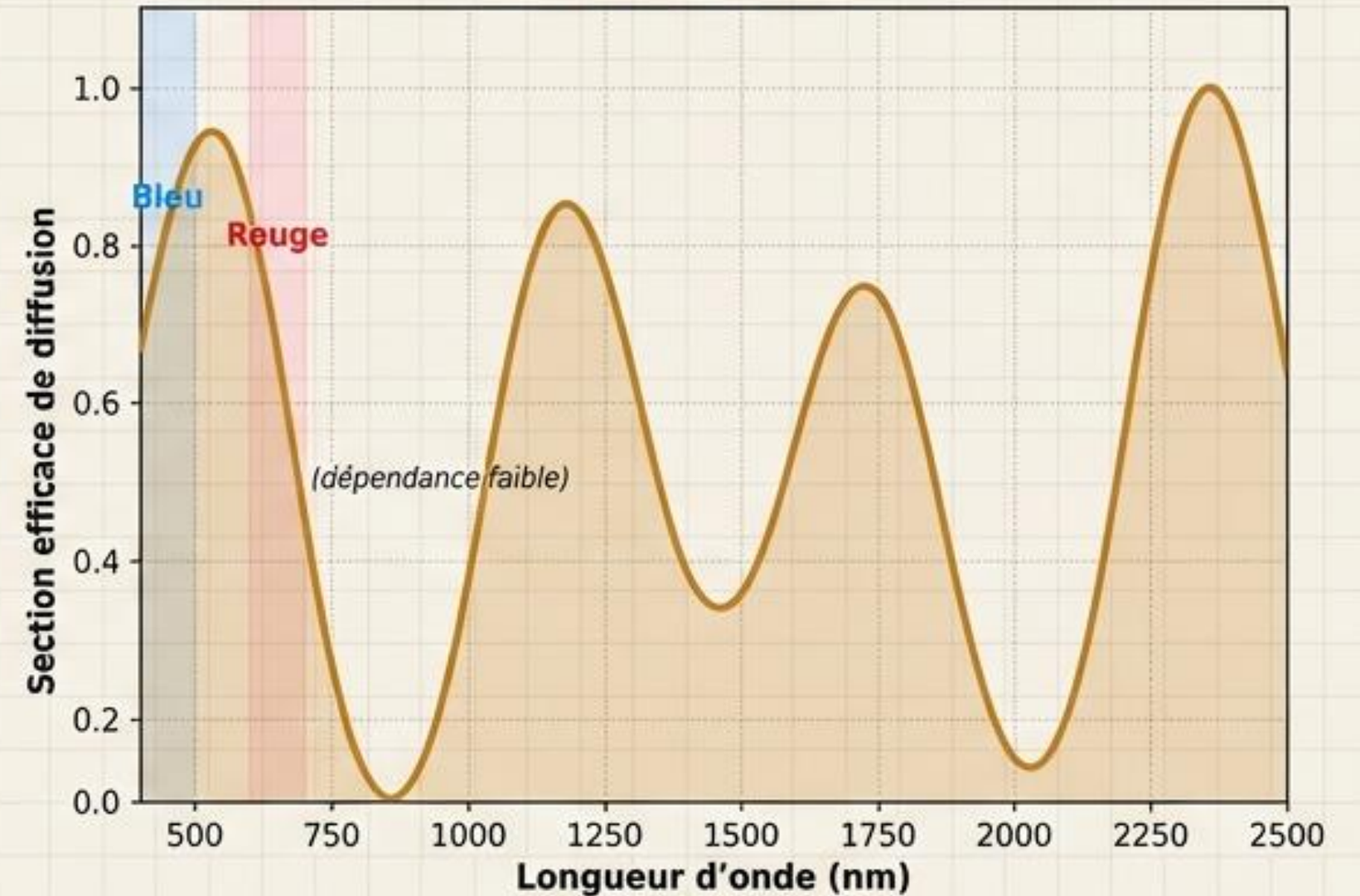
# Diffusion Atmosphérique : Rayleigh vs Mie

## Diffusion Rayleigh



- Diffusion moléculaire (Gaz  $N_2$ ,  $O_2$ )
- Proportionnelle à  $\lambda^{-4}$
- Affecte principalement le **BLEU**

## Diffusion Mie

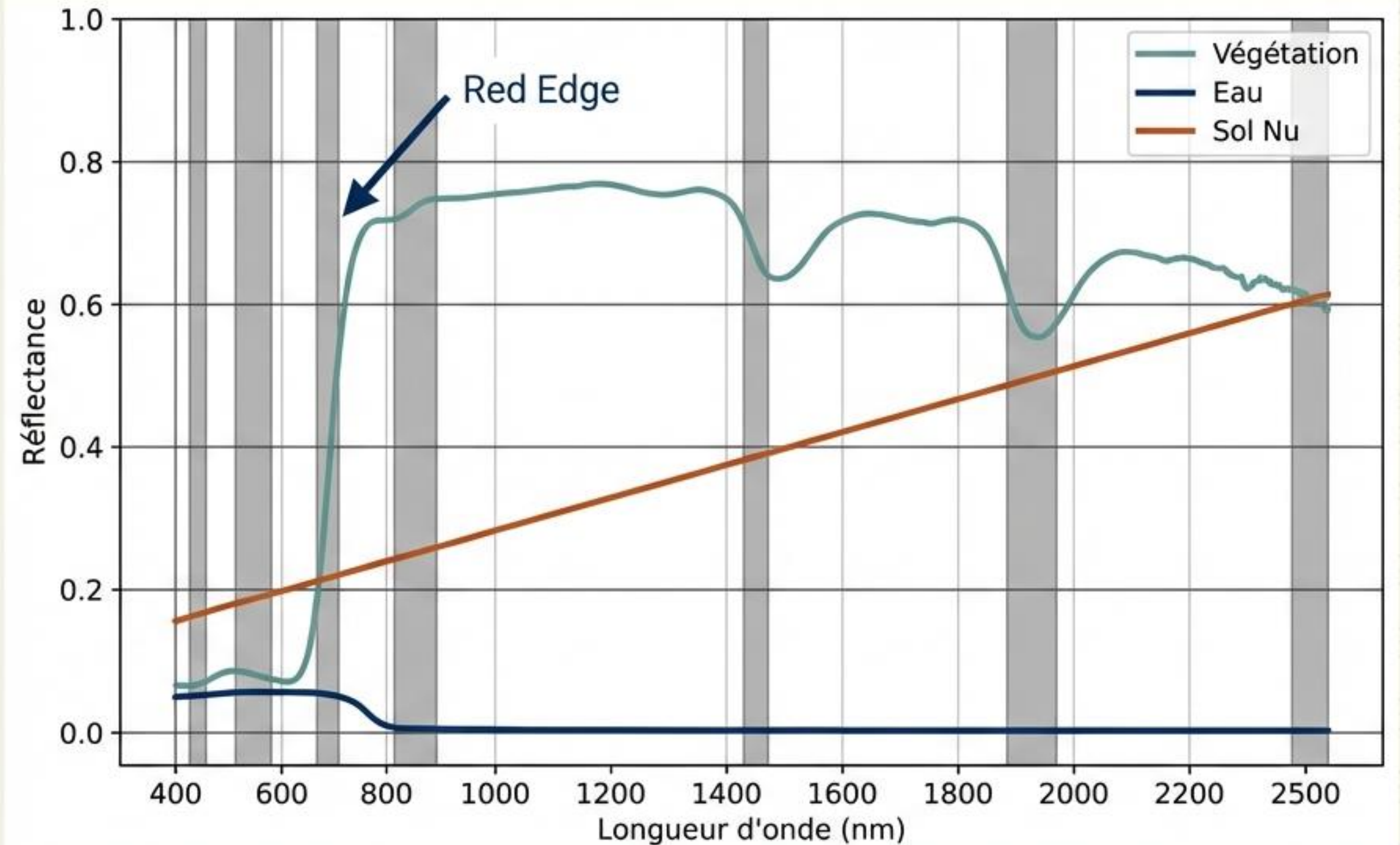


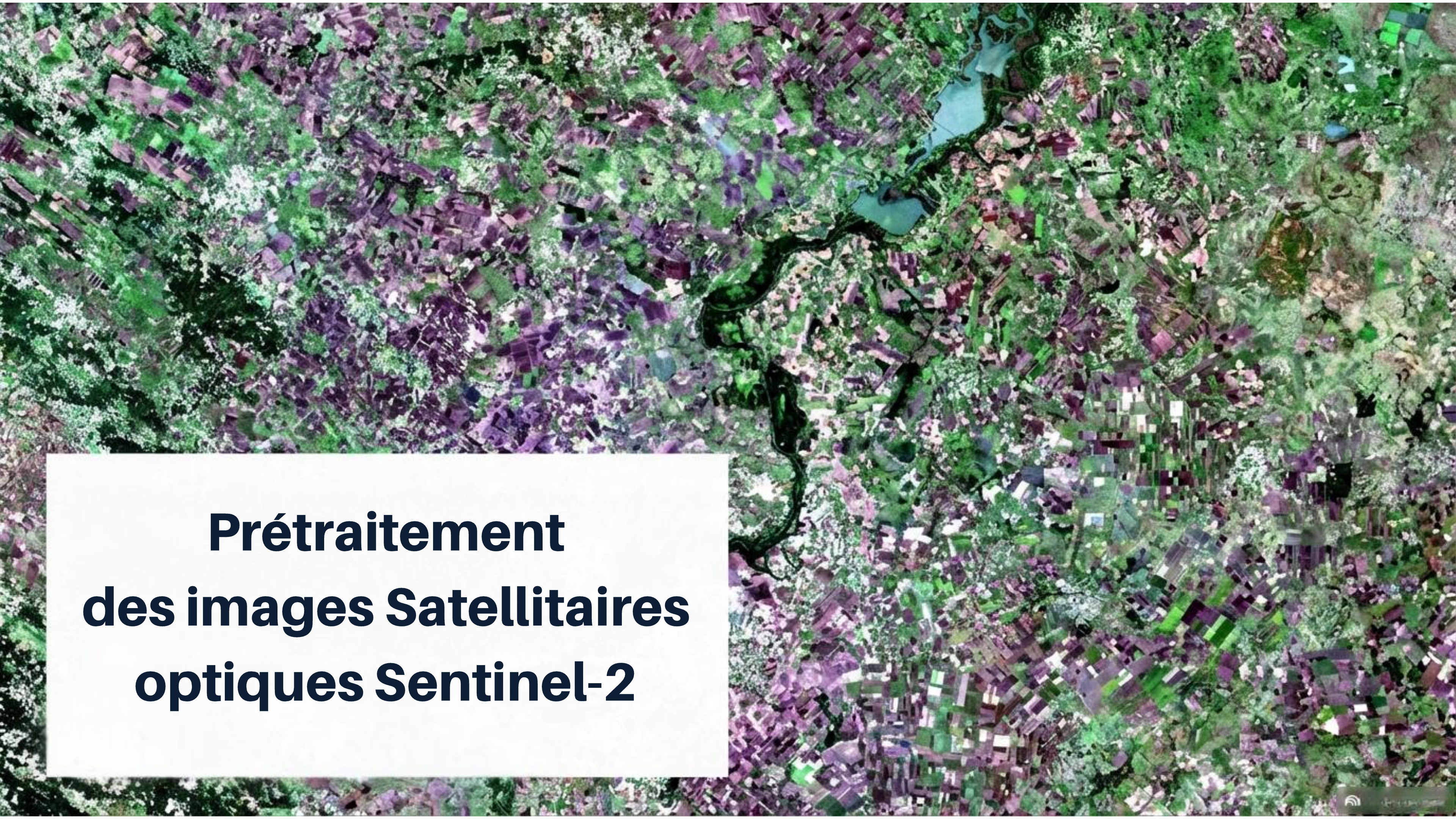
- Diffusion par Aérosols (Poussières, eau)
- Proportionnelle à  $\lambda^{-1}$
- Affecte tout le spectre visible (aspect laiteux)

# Signatures Spectrales Cibles

Empreintes spectrales échantillonnées par Sentinel-2.

Le 'Red Edge' est un marqueur critique de la chlorophylle.

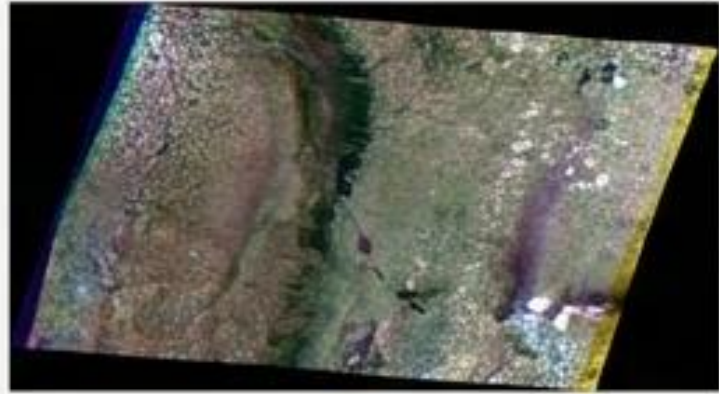




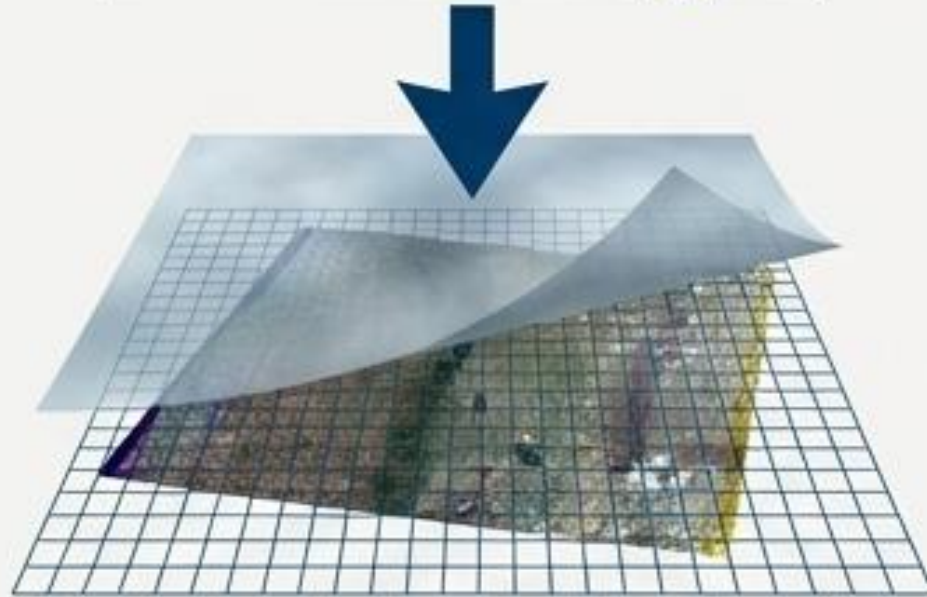
**Prétraitement  
des images Satellitaires  
optiques Sentinel-2**

# La Chaîne de Traitement : Du Signal à l'Information

**Données Brutes  
(Niveau 0-1)**

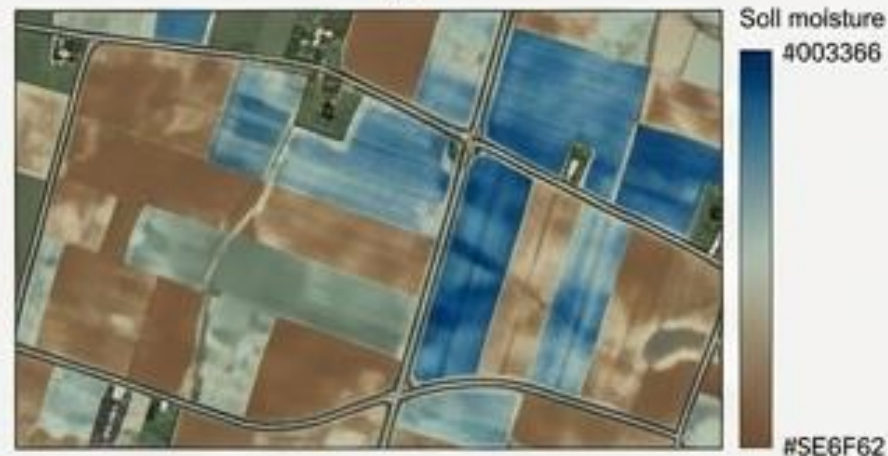


**Corrections  
(Niveau 2)**



Analysis Ready Data

**Produits Finaux  
(Niveau 3+)**



**Niveau 0-1 : Données Brutes → Signal Calibré**

- Corrections radiométriques : Conversion en unités physiques (réflectance, coefficient de rétrodiffusion).

**Niveau 2 : Corrections Géométriques & Physiques**

- **Orthorectification** : Correction des distorsions dues au relief et à la visée.
- **Correction atmosphérique (Optique)** : Suppression des effets de l'atmosphère.
- **Correction ionosphérique (SAR)** : Suppression du délai de propagation.

**Niveau 3+ : Produits Thématiques → Variables Géophysiques**

- Mosaïques, cartes d'humidité du sol, cartes de déformation.

# L'Instrument Sentinel-2 (MSI)

## Configuration Spectrale et Spatiale



**10m** : Visible + NIR (Détails géométriques)

**20m** : Red-Edge + SWIR (Végétation/Géologie)

**60m** : B1, B9, B10 (Correction Atmosphérique/Nuages)

# La Mission Sentinel-2 et l'Instrument MSI

## Instrument :

Capteur Multi-Spectral (MSI)

## Résolution Radiométrique :

12 bits (0-4095)

## Revisite :

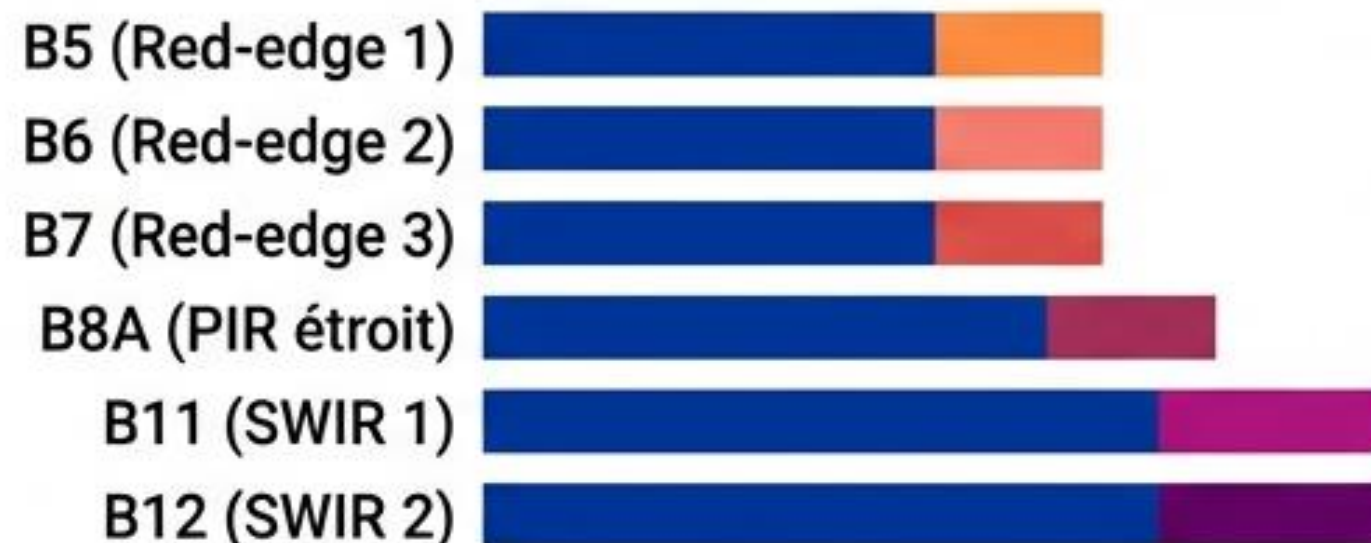
10 jours (5 jours avec constellation 2A/2B)

## Résolution Spatiale des Bandes Sentinel-2 MSI

### 10 Mètres (Visible/PIR)



### 20 Mètres (Végétation/SWIR)



### 60 Mètres (Atmosphère)



# Le Pipeline de Traitement Radiométrique



L1C (TOA)

Géométrie OK,  
Signal brut non corrigé (TOA)



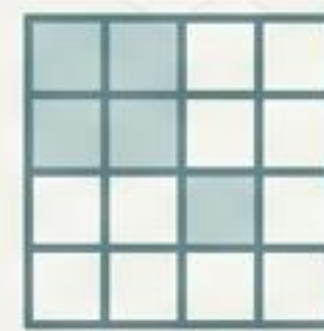
Sen2Cor

Inversion Modèle  
Radiatif



L2A (BOA)

Réflectance de  
Surface



Resampling

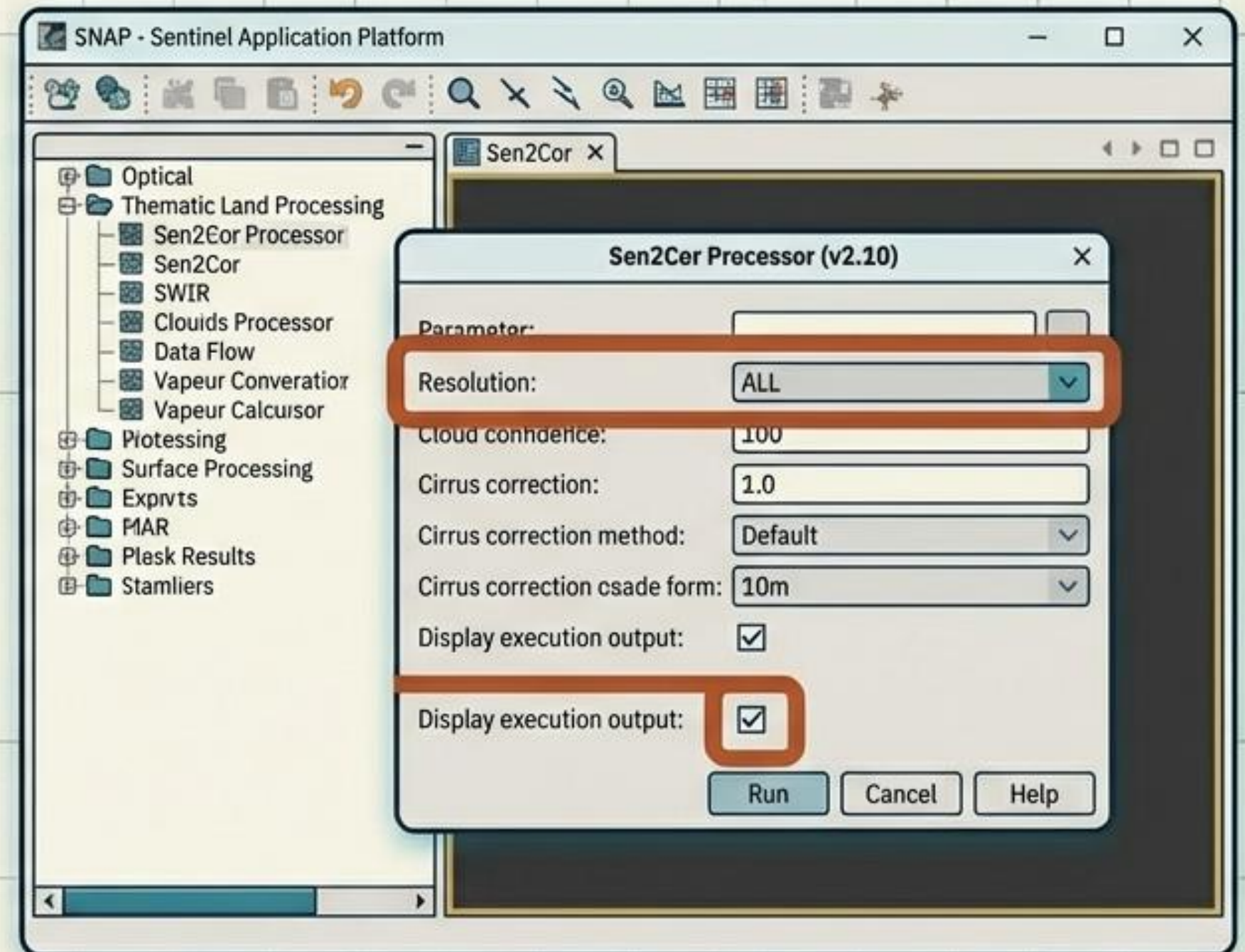
Harmonisation 10m NDVI / Biophysique



Indices

# Correction Atmosphérique : Sen2Cor

- **Entrée** : Données L1C (Top of Atmosphere)
- **Processus** :
  1. Classification de scène (Nuage, Neige, Eau)
  2. Estimation AOT (Aérosols) et Vapeur d'eau
  3. Inversion du transfert radiatif
- **Paramètre Critique** : Resolution = 'ALL'  
(Traite toutes les bandes)



# Correction Atmosphérique : Sen2Cor

- Entrée : Données L1C (Top of Atmosphere)
- Processus :
  1. Classification de scène (Nuage, Neige, Eau)
  2. Estimation AOT (Aérosols) et Vapeur d'eau
  3. Inversion du transfert radiatif

**Paramètre Critique : Resolution = "ALL"** (Traite toutes les bandes)

Sen2Cor Processor (v2.10)

Parameter:

Resolution: ALL

Cloud confidence: 1.00

Cirrus correction: 1.00

Cirrus correction method: Default

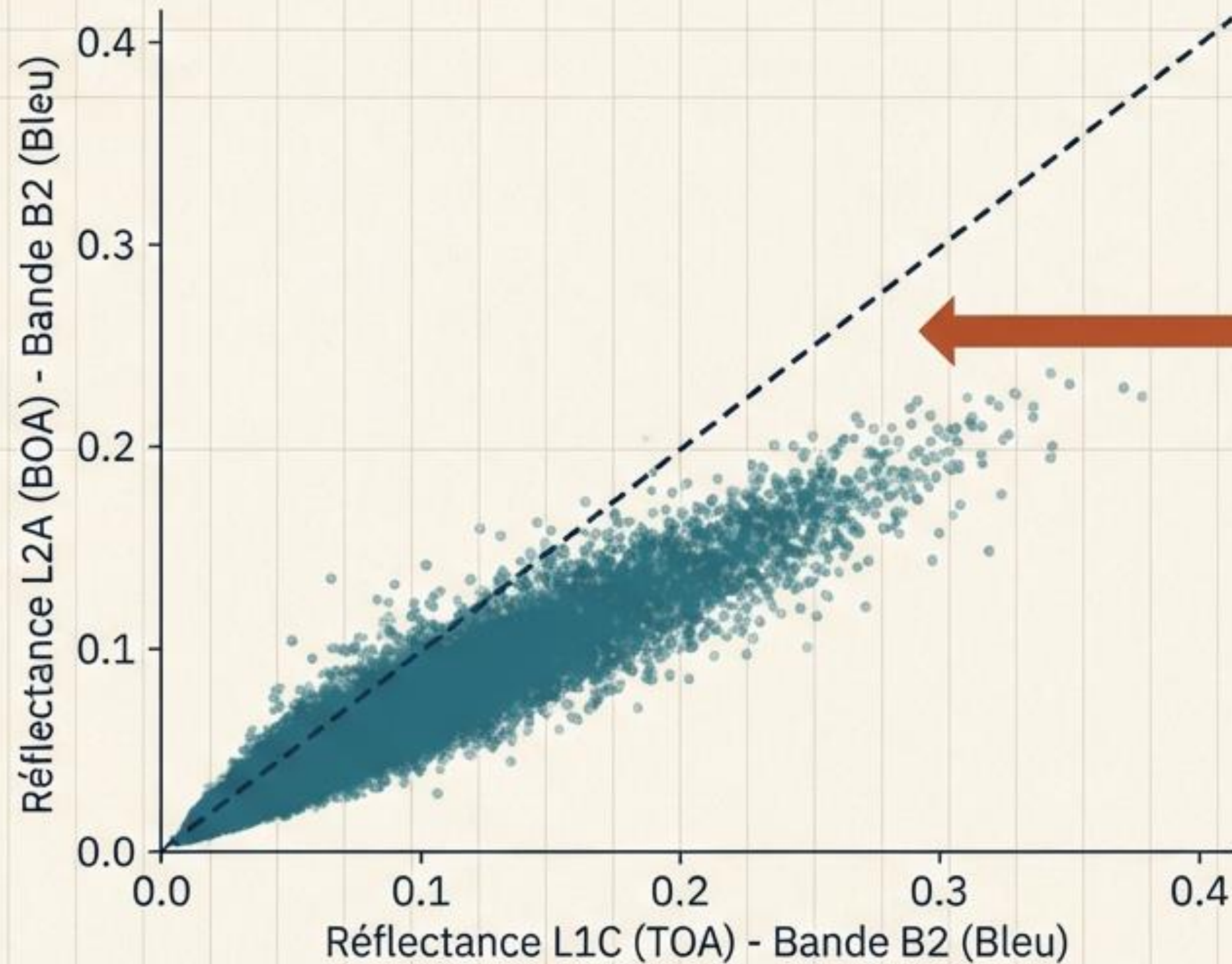
Cirrus correction cascade form: 10m

Display execution output:

Display execution output:

Run Cancel Help

# Validation Qualité : Scatter Plot L1C vs L2A



Différence due à la soustraction de la radiance de la radiance atmosphérique ( $L_{atm}$ )

Physique :  $L_{BOA} < L_{TOA}$  car l'atmosphère ajoute un signal parasite (diffusion Rayleigh).

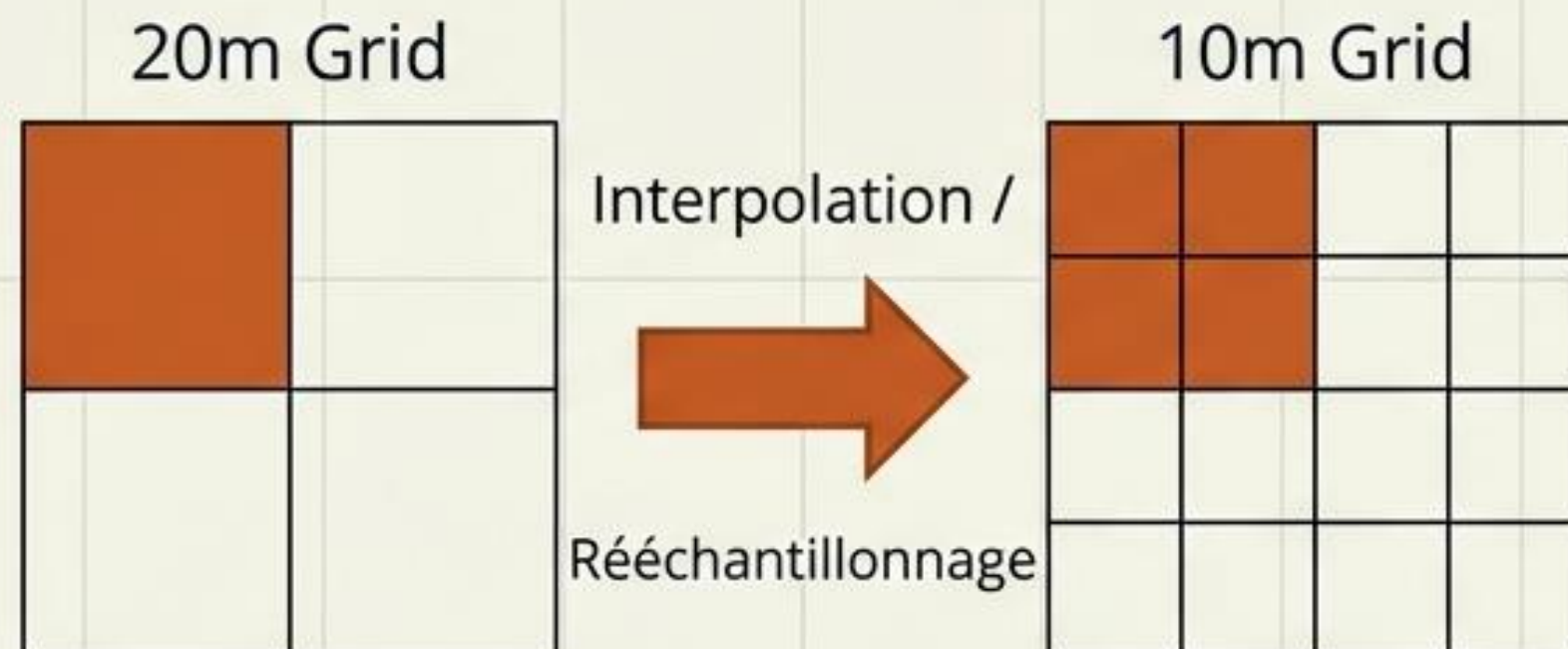
# Harmonisation Spatiale (Resampling)

## Problème :

Dimensions matricielles incompatibles.

B2 (Bleu) :  
10980 x 10980 pixels

B5 (Red-Edge) :  
5490 x 5490 pixels



## Solution :

Standardisation à 10m.

SNAP : `Raster` >  
`Geometric` >  
`Resampling`.

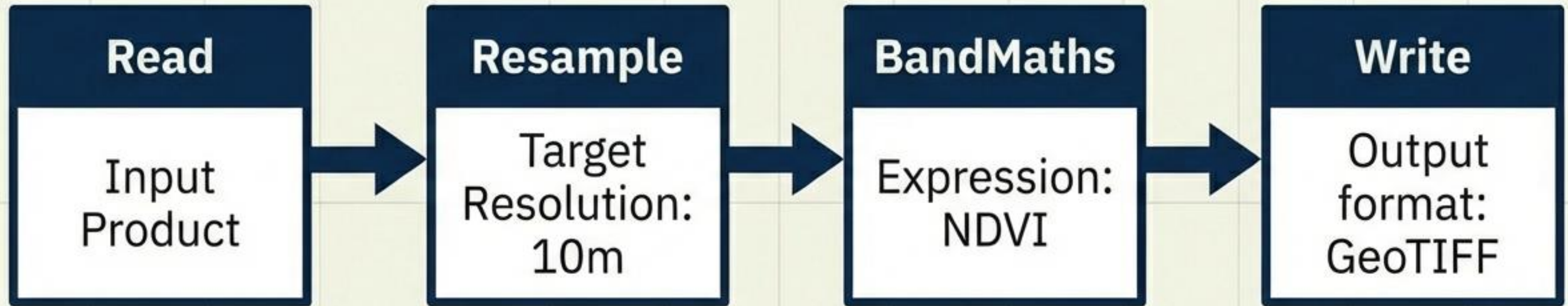
Condition préalable indispensable pour le calcul d'indices (*BandMaths*).

# Flux de Travail de Prétraitement (Workflow)



**Objectif : Transformer les données brutes (Top-of-Atmosphere) en produits prêts pour l'analyse.**

# Automatisation avec Graph Builder



## Traitement par lots (Batch Processing)

Reproductibilité scientifique garantie.

Fichier `.xml` exécutable via l'outil ligne de commande `gpt`.



# Étape 1 : Correction Atmosphérique (Sen2Cor)

## Le Concept :

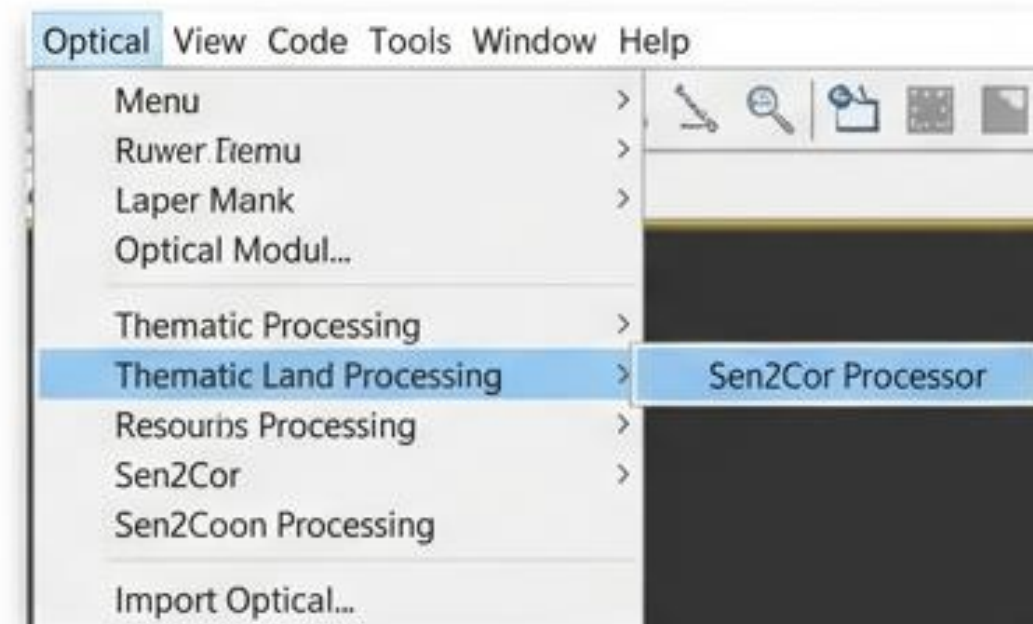
Élimination des effets de diffusion atmosphérique (aérosols, vapeur d'eau) pour obtenir les propriétés réelles de la surface.

- **Entrée** : Niveau 1C (Top-of-Atmosphere)
- **Sortie** : Niveau 2A (Bottom-of-Atmosphere)

## Dans SNAP :

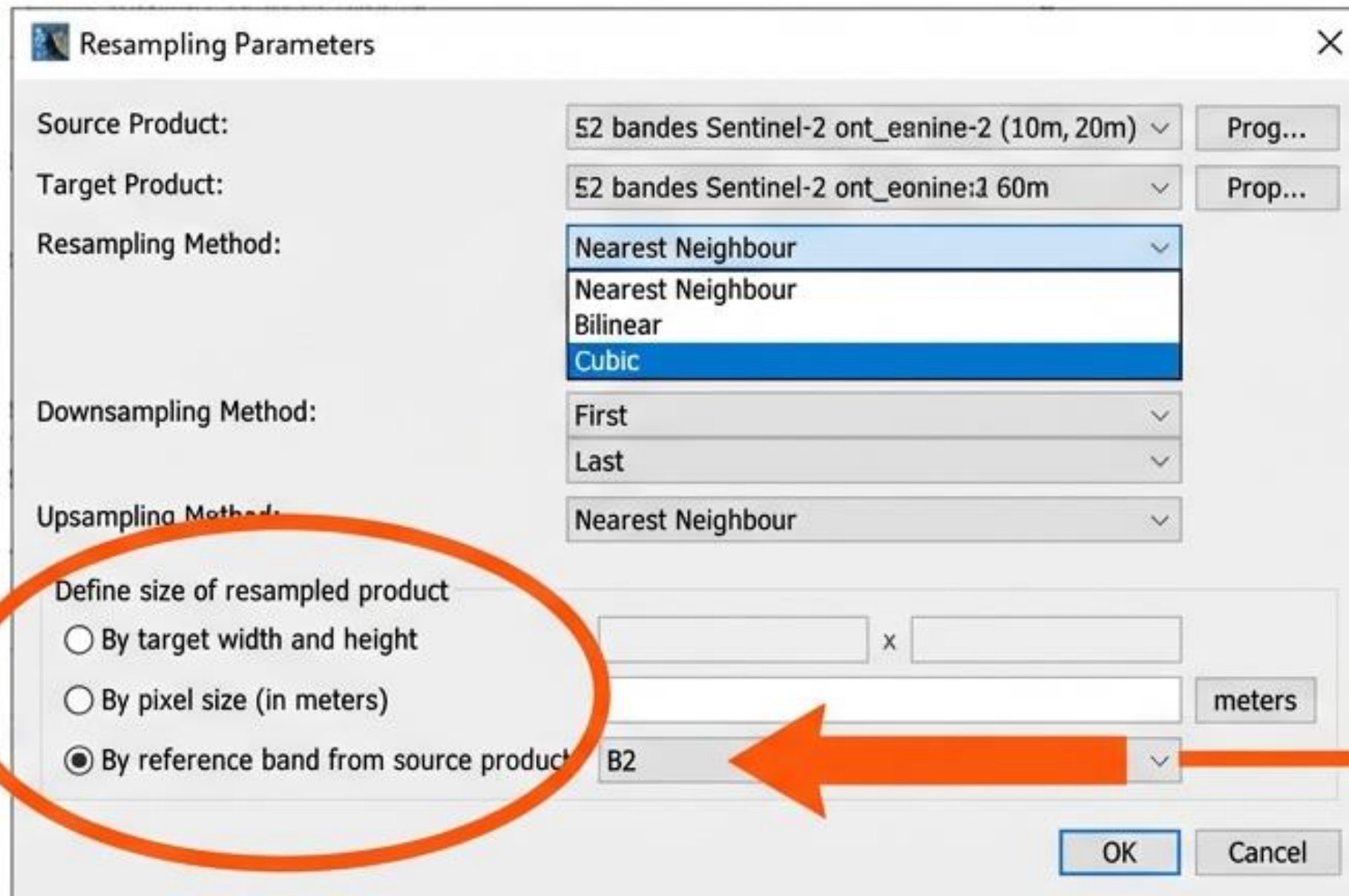
Optical > Thematic Land Processing  
> Sen2Cor Processor

**Action** : Exécuter le processus pour chaque résolution cible (60m, 20m, 10m).



## Étape 2 : Rééchantillonnage (Resampling)

- **Problème** : Les bandes Sentinel-2 ont des résolutions hétérogènes (10m, 20m, 60m).
- **Solution** : Standardiser toutes les bandes sur la résolution la plus fine (10m) avant toute combinaison.



**Chemin** : Raster > Geometric > Resampling

**IMPORTANT** : Le résultat est un 'Produit Virtuel'. Sauvegardez immédiatement via **File > Save Product**.



# Étape 3 : Découpage Spatial (Subset)

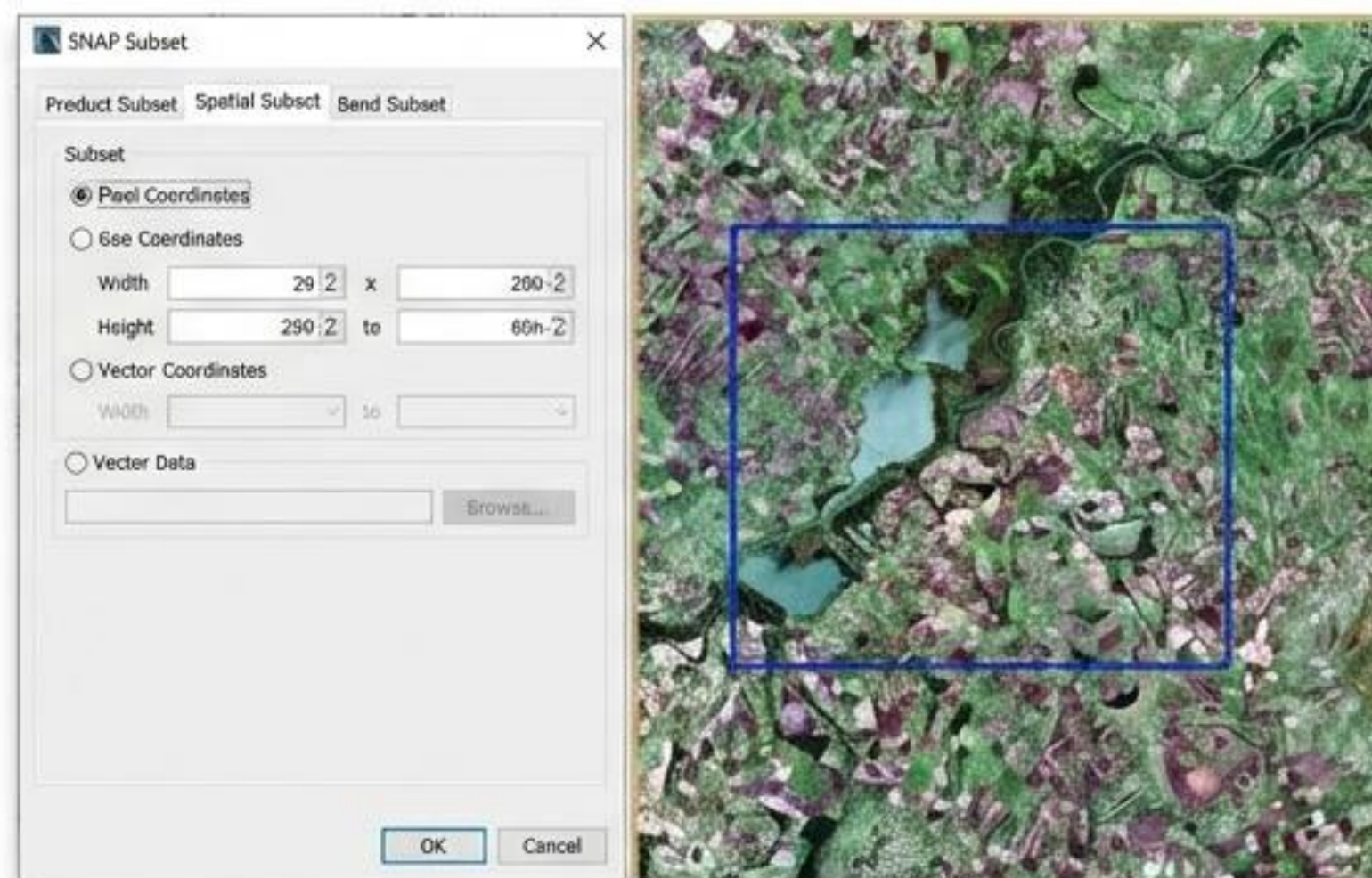
## Process

**Objectif :** Réduire la taille du fichier et le temps de calcul en isolant la Zone d'Intérêt (ROI).

## Procédure :

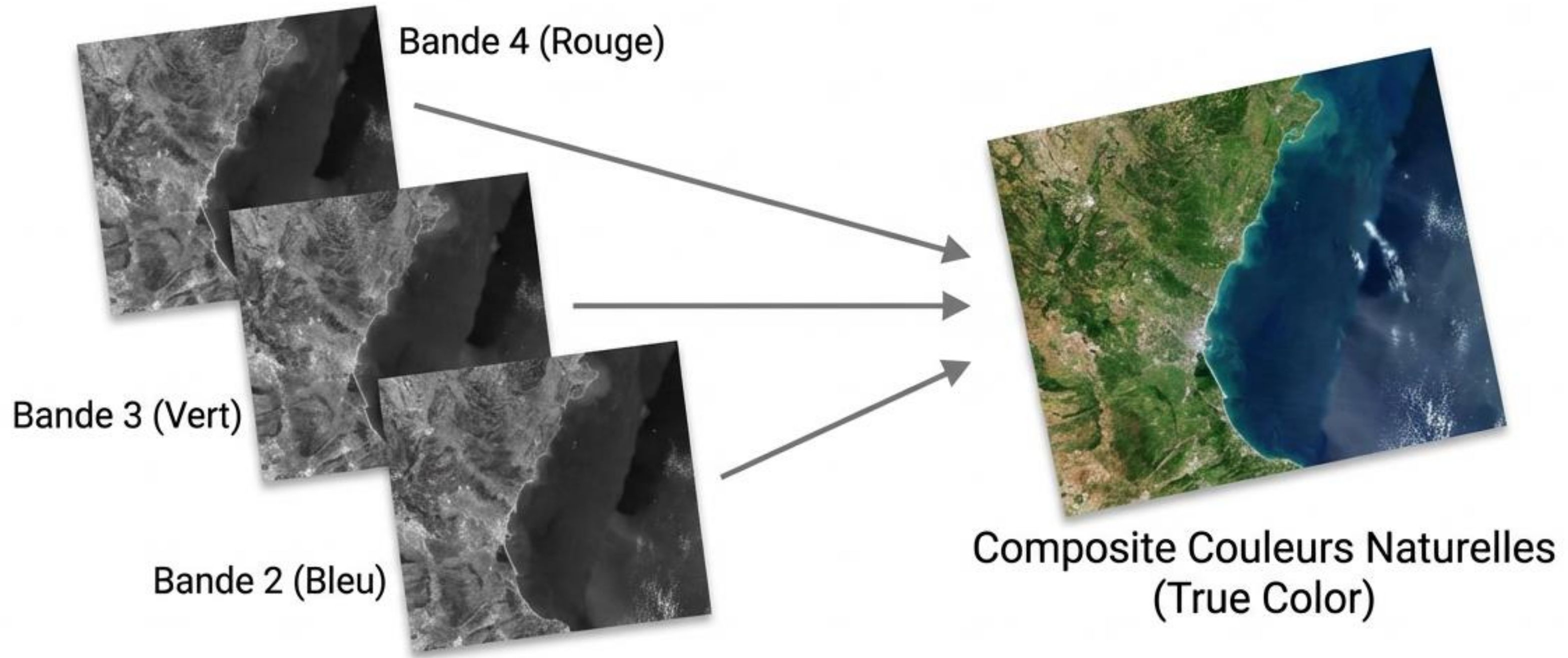
1. Zoomer sur la zone d'étude dans l'onglet Navigation.
2. Menu : **Raster > Subset**
3. Choisir 'Pixel Coordinates' pour utiliser la vue actuelle.
4. **Optionnel :** Ne conserver que les bandes de réflectance.

## Visual



N'oubliez pas de sauvegarder le produit virtuel.

# Principes de Visualisation RGB



Chaque canal de l'écran (Rouge, Vert, Bleu) reçoit une bande spectrale spécifique.

- **Couleurs Naturelles** : B4+B3+B2 (Vision humaine)
- **Fausse Couleur** : Utilise l'Infrarouge (ex: B8) pour révéler la végétation.

# Visualisation : Compositions Colorées

**Couleurs Naturelles (RGB : B4, B3, B2)**



**Fausse Couleur Infrarouge (RGB : B8, B4, B3)**



Le canal NIR (Bande 8) est mappé sur le Rouge. La végétation active apparaît en rouge vif.

# L'Analyse Optique : Quantifier la Végétation et ses Changements

## L'Indice NDVI

Le principe du *Normalized Difference Vegetation Index* et sa formule :

$$**NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)**$$

où PIR est la réflectance dans le proche infrarouge et R celle dans le rouge.

## Applications Concrètes

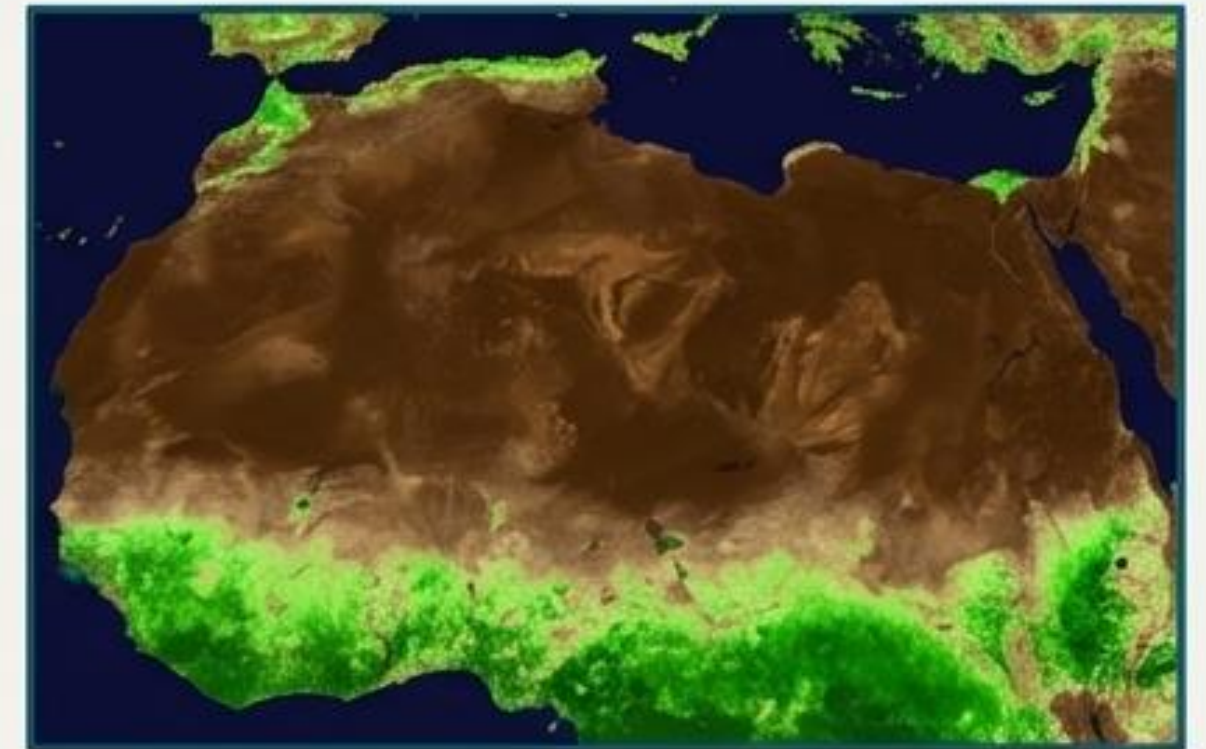
Suivi de l'état des milieux, détection de la désertification et de la déforestation (mention des programmes FAO et Global Forest Change).

## Exemple Temporel

Évolution de la couverture végétale au Sahel (1981-2011), montrant les zones d'augmentation (vert) et de diminution (rouge) de la végétation.



Composition colorée



Valeurs du NDVI





# Recettes de Compositions Colorées

## Infrarouge Couleur (Végétation)

Rouge: B8  
Vert: B4  
Bleu: B3



Végétation dense = Rouge vif

## Agriculture

Rouge: B11  
Vert: B8  
Bleu: B2



Santé des cultures = Vert foncé

## Géologie

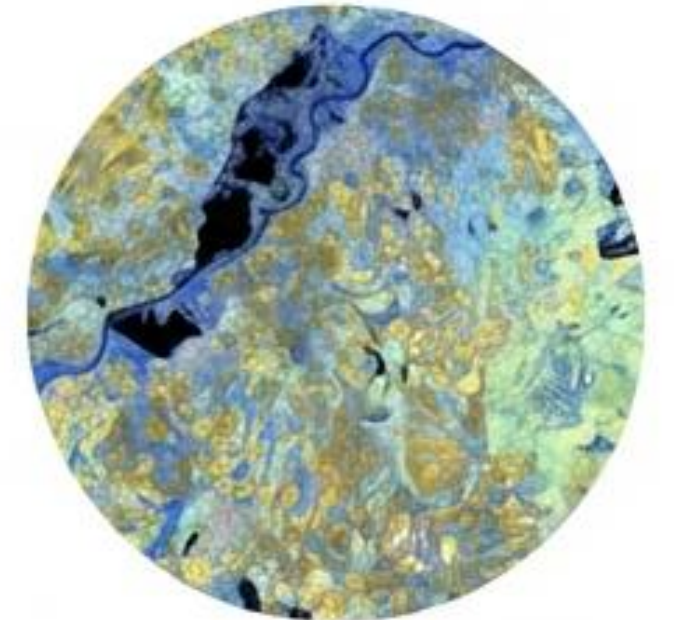
Rouge: B12  
Vert: B11  
Bleu: B2



Formations lithologiques et failles

## Bathymétrie

Rouge: B4  
Vert: B3  
Bleu: B1



Sédiments en suspension dans l'eau

# Au-delà du Visuel : Les Indices Spectraux

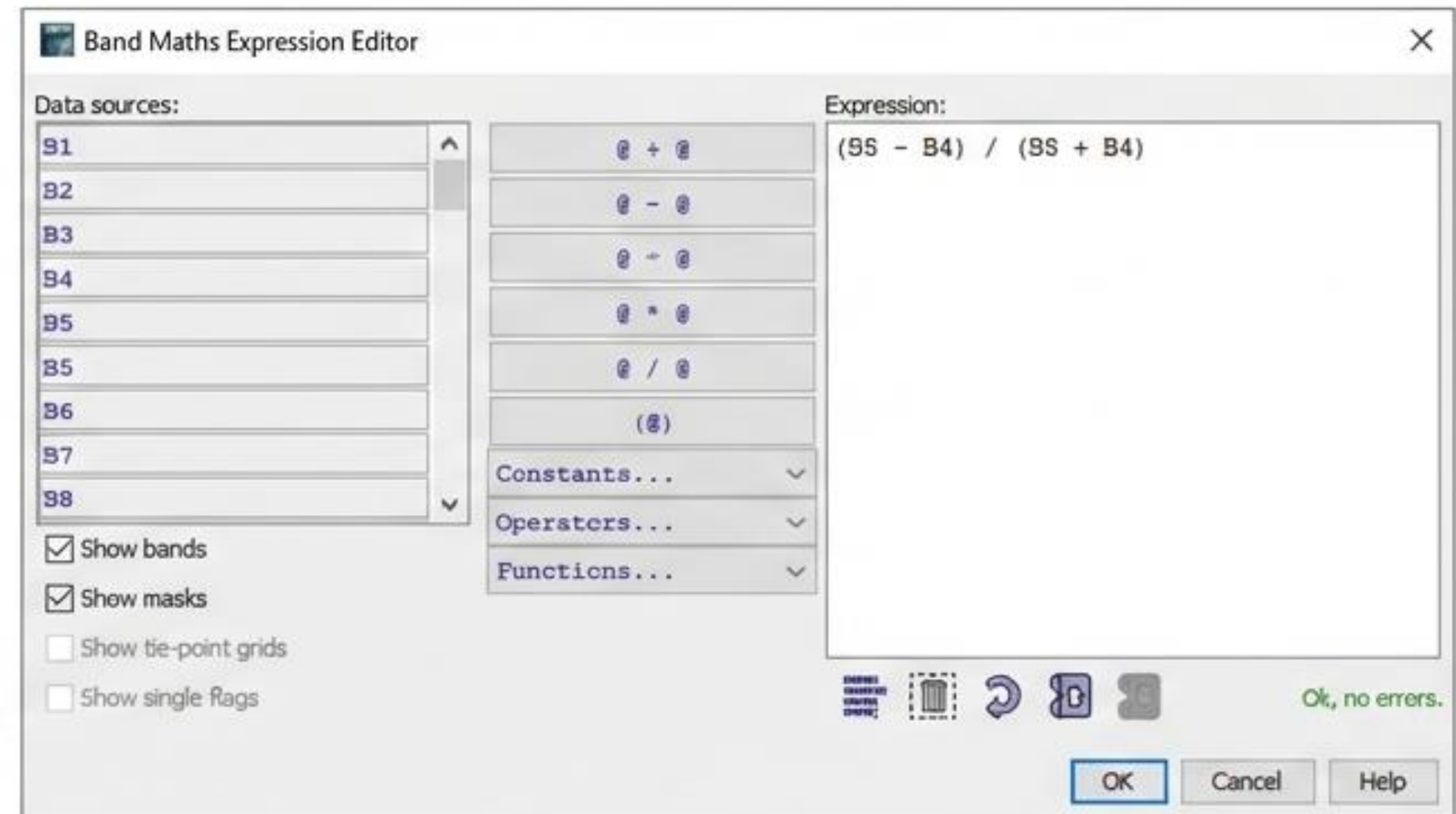
Une fois l'image prétraitée, les **propriétés spectrales** permettent le **calcul d'indices mathématiques**.

**NDVI (Indice de Végétation par Différence Normalisée)**

$$NDVI = \frac{(B8 - B4)}{(B8 + B4)}$$

Exploite la différence entre la forte réflectance du Proche Infrarouge (B8) et l'absorption du Rouge (B4) par la chlorophylle.

**Outil SNAP** : Raster > Band Maths



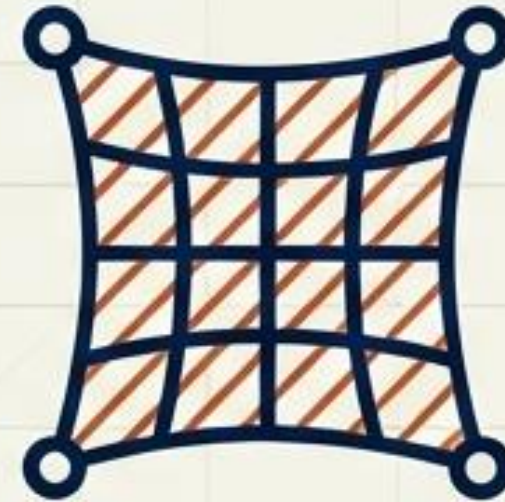
# Bilan et Prochaine Séance



Signal  
(L1C TOA)



Correction  
(Sen2Cor)



Géométrie  
(Resampling)



Information  
(NDVI)

- L'image satellitaire est une mesure physique (Radiance).
- La correction atmosphérique est indispensable pour l'analyse temporelle.
- Le rééchantillonnage conditionne l'algèbre des bandes.

---

# Récapitulatif Technique SNAP

- ❑ **Input** : Ouvrir le produit Sentinel-2 (Level 1C ou 2A).
- ❑ **Atmosphère** : Optical > Thematic Land Processing > Sen2Cor.
- ❑ **Rééchantillonnage** : Raster > Geometric > Resampling.  
Paramètre critique : 'By reference band' = **B2**
- ❑ **Sauvegarde** : Clic droit > Save Product (Convertir le virtuel en physique).
- ❑ **Découpage** : Raster > Subset (Pixel Coordinates).
- ❑ **Visualisation** : Clic droit > Open RGB Image Window.

# Votre Projet : Mettre en Pratique le Voyage du Signal

Le projet de groupe consistera à mener une analyse de télédétection de bout en bout sur une problématique concrète, en utilisant des données et des outils ouverts.

## La Démarche

1. Définir une problématique: Ex: 'Suivre l'étendue d'une inondation'.
2. Acquérir les données: Données Sentinel-1 (SAR) ou Sentinel-2 (Optique) via les portails de l'ESA.
3. Traiter les données: Utiliser des logiciels open-source pour appliquer les concepts vus en cours.
4. Analyser et interpréter: Transformer les résultats en une réponse argumentée à la problématique.

## Outils Proposés



- **QGIS**: Visualisation et cartographie.
- **ESA SNAP Toolbox**: Traitement des données Sentinel.
- **OTB (Orfeo ToolBox)**: Traitement d'image à haute performance.
- **Python (via Jupyter)**: Scripting et analyse.

