

CALIBRATION ET VALIDATION EN VOL DES IMAGEURS OPTIQUES : POURQUOI EST-CE ESSENTIEL ?

DR. CAMILLE DESJARDINS

AVEC LA PARTICIPATION DES MEMBRES DU SERVICE PHYSIQUE DE LA MESURE OPTIQUE DU CNES (CNES - DTN/TPI/MO)

JOURNÉES DES JEUNES CHERCHEURS 2024, CITÉ DE L'ESPACE, TOULOUSE

16/10/2024

SOMMAIRE

- 1 Introduction :
 - L'observation de la Terre
 - Qu'est-ce que la télédétection spatiale ?
- 2 Les imageurs optiques
 - Qu'est-ce qu'un imageur optique ?
 - Quelques exemples d'applications
 - Leurs caractéristiques
- 3 La qualité image
- 4 L'étalonnage absolu & la cal/val
- 5 Conclusion

INTRODUCTION : L'OBSERVATION DE LA TERRE

L'observation de la Terre permet de suivre en temps réel l'évolution de **nombreux phénomènes environnementaux** comme la déforestation, la fonte des glaciers, la qualité des eaux, et les changements dans l'occupation des sols.

Les données collectées permettent **d'analyser les tendances sur le long terme**, ce qui est crucial pour comprendre l'impact des activités humaines et des changements climatiques sur les écosystèmes. Par exemple, on peut observer la croissance des déserts ou des zones touchées par des incendies forestiers.

Les informations obtenues grâce à l'observation de la Terre fournissent aux décideurs politiques, aux scientifiques, et aux organismes de gestion des ressources des bases factuelles pour agir de manière éclairée. Par exemple, dans la gestion de l'eau, l'agriculture de précision, ou la planification urbaine.

L'observation de la Terre repose sur **divers moyens de collecte d'informations**, tels que les avions, les drones, et les stations au sol et les satellites.



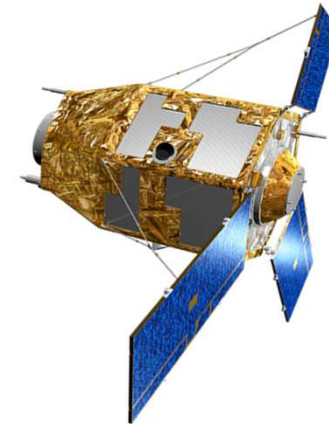
QU'EST-CE QUE LA TÉLÉDÉTECTION SPATIALE ?

La télédétection spatiale utilise des **satellites pour observer la Terre depuis l'espace**.

Les satellites collectent des données à grande échelle grâce à des capteurs variés (optiques, radar, etc.), permettant une couverture globale et répétée des surfaces terrestres pour le suivi des changements environnementaux.

Certaines **variables climatiques** (température de la surface des océans, concentration des gaz à effet de serre, niveau de la mer, rayonnement solaire incident et sortant, etc.) **ne peuvent être observées de manière exhaustive que depuis l'espace** en raison de leur étendue et/ou de leur variabilité.

Les imageurs optiques sont un des types de capteurs utilisés en télédétection spatiale.



2

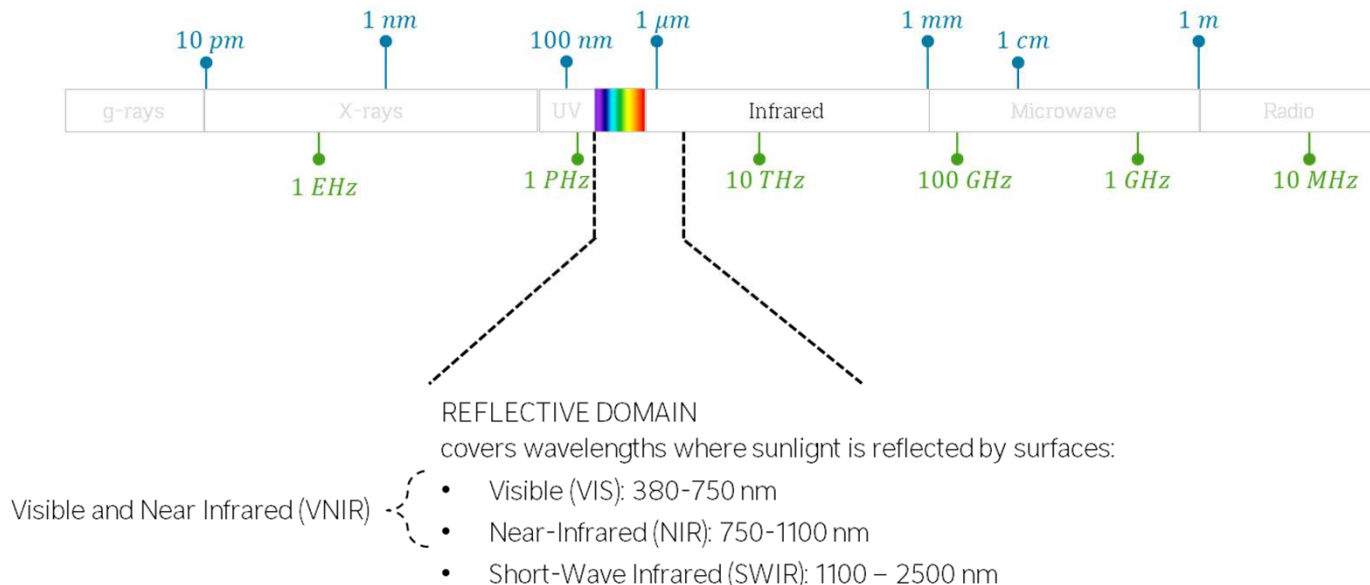
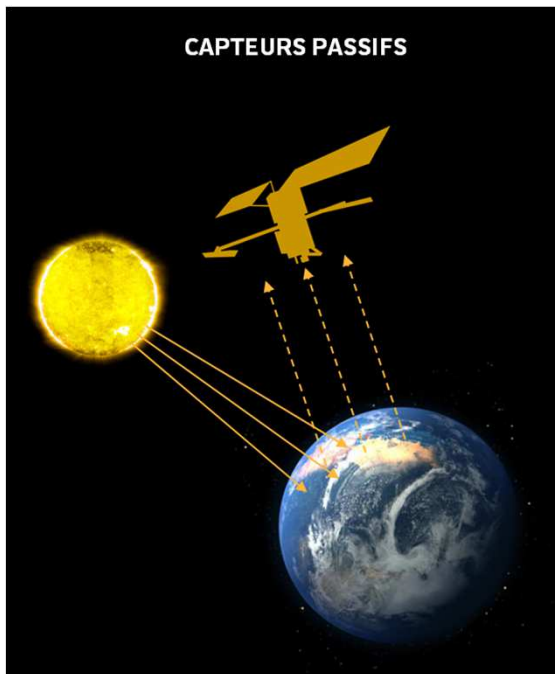
LES IMAGEURS OPTIQUES

QU'EST-CE QUE UN IMAGEUR OPTIQUE ?

Un imageur optique est un **capteur qui capte la lumière visible et infrarouge émise par le Soleil et réfléchi par la Terre.**

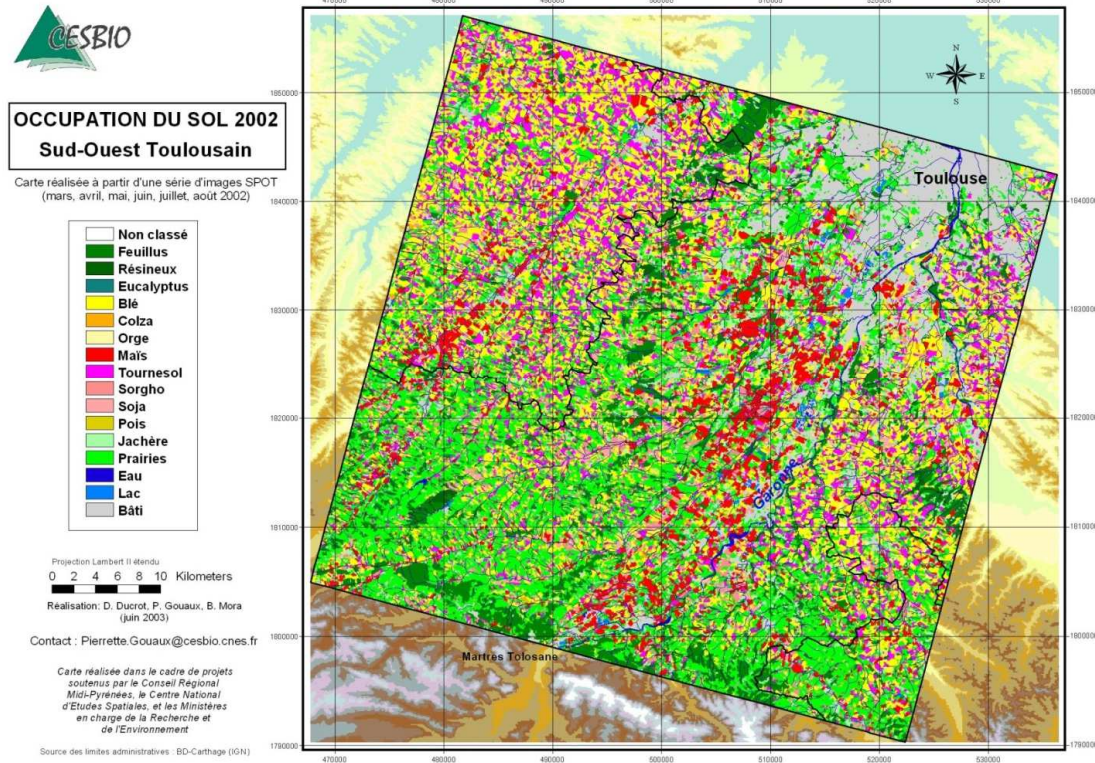
Ces capteurs transforment la lumière en signaux électriques pour créer des images numériques de la Terre.

Ils collectent des informations spectrales et spatiales, permettant d'analyser des caractéristiques spécifiques des objets ou des surfaces observées.



QUELQUES EXEMPLES D'UTILISATIONS

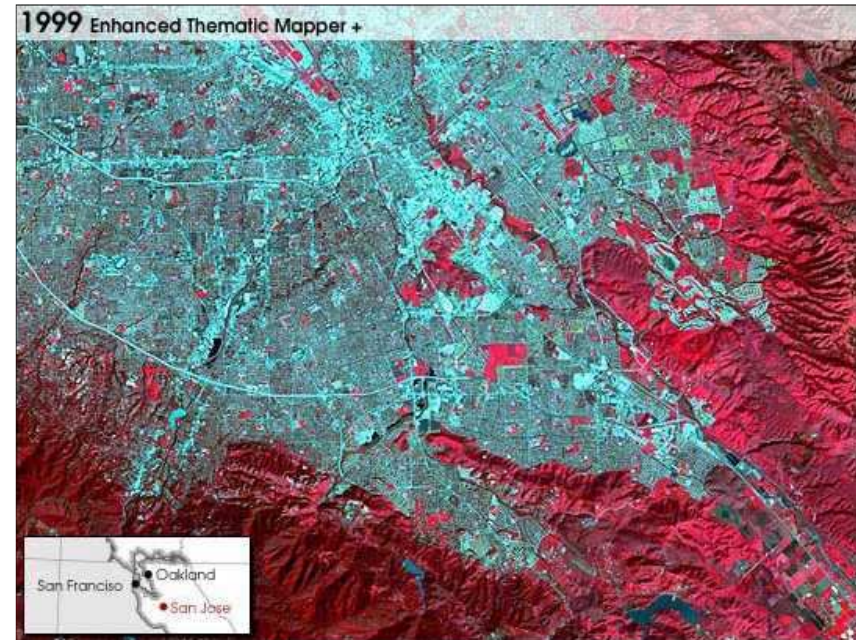
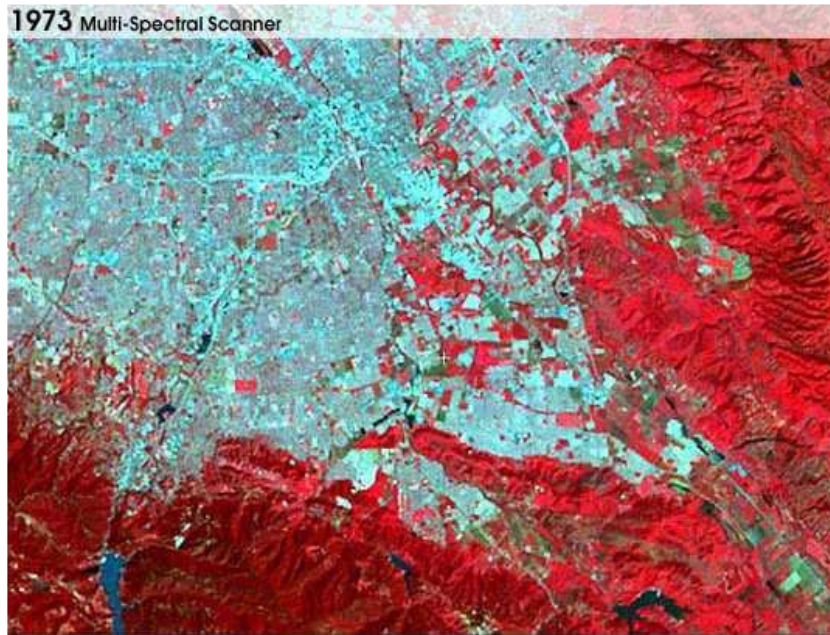
Occupation des sols : Les imageurs capturent des images multispectrales permettant de distinguer différents types d'occupation des sols, tels que les zones agricoles, forestières, urbaines, et aquatiques.



QUELQUES EXEMPLES D'UTILISATIONS

Urbanisation :

Les imageurs optiques sont utilisés pour surveiller l'expansion urbaine, la densification des infrastructures et l'évolution des zones bâties. Ils permettent de suivre les changements dans les structures et les paysages urbains au fil du temps.



Compositions colorées, Landsat 1 MSS (1973) et Landsat 7 TM (1999)

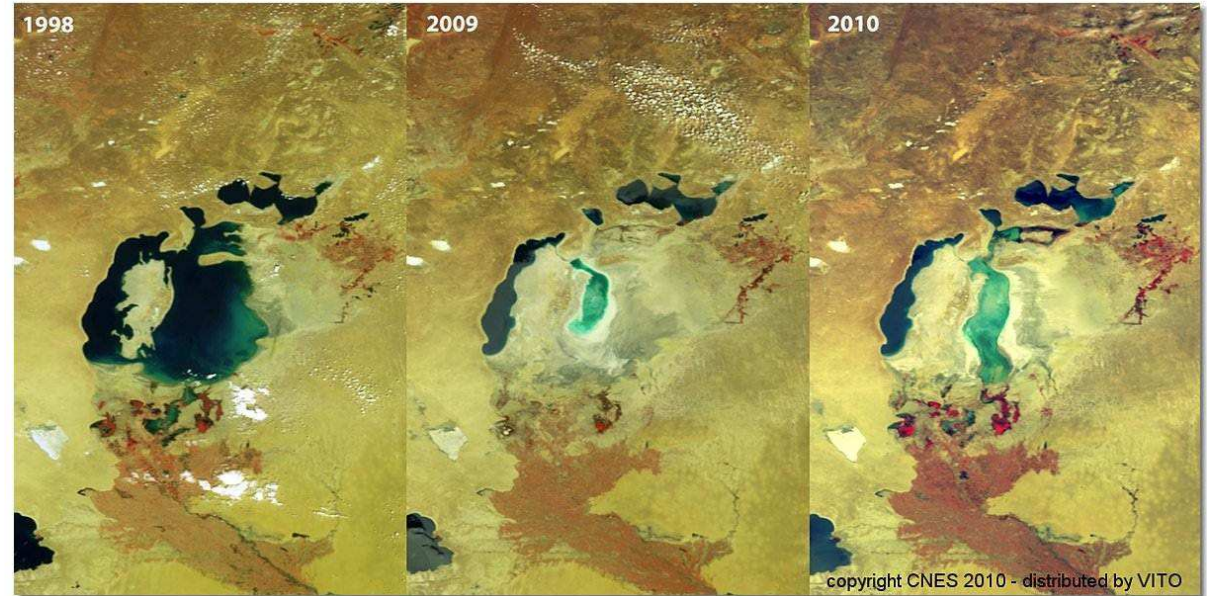
QUELQUES EXEMPLES D'UTILISATIONS

Suivi des ressources en eau :

Les imageurs permettent de surveiller l'étendue et la qualité des masses d'eau (lacs, rivières, réservoirs), ainsi que les niveaux d'humidité des sols.



HUMIDITÉ DU SOL À TRÈS HAUTE RÉOLUTION SPATIALE

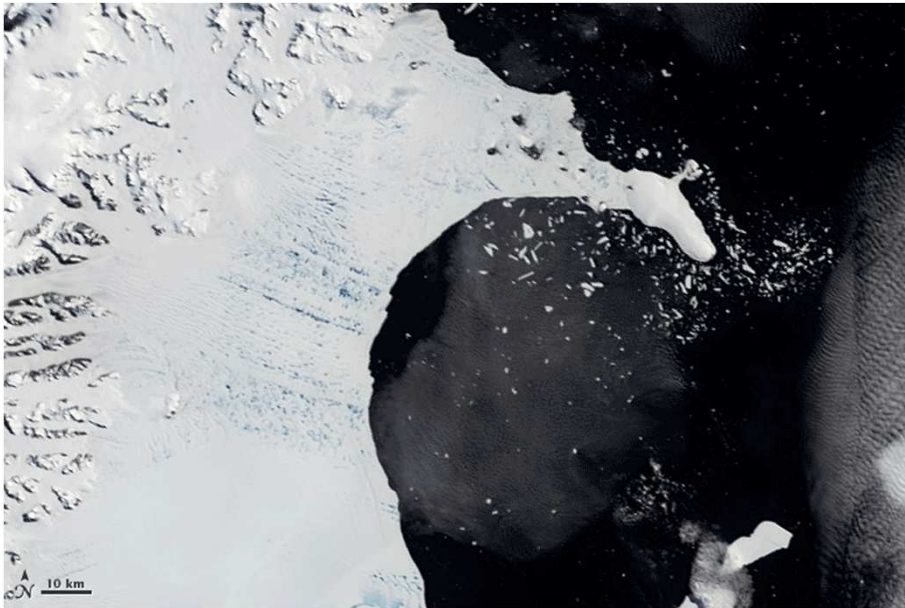


Mer d'Aral

QUELQUES EXEMPLES D'UTILISATIONS

Suivi de la fonte des glaciers :

Les imageurs optiques capturent des images des glaciers et des calottes glaciaires, permettant de mesurer et d'analyser les changements dans l'étendue, l'épaisseur, et la surface des glaciers au fil du temps.



Fonte de la banquise en Antarctique
AQUA/MODIS



Evolution annuelle de la calotte polaire
AQUA/AMSR6E

QUELQUES EXEMPLES D'UTILISATIONS

Les imageurs optiques jouent un rôle essentiel dans la gestion des **catastrophes naturelles** en permettant une surveillance continue et en fournissant des données précises pour la **prévention et le suivi des événements**.



QUELQUES EXEMPLES D'UTILISATIONS

Les imageurs optiques jouent un rôle essentiel dans la gestion des **catastrophes naturelles** en permettant une surveillance continue et en fournissant des données précises pour la **prévention et le suivi des événements**.



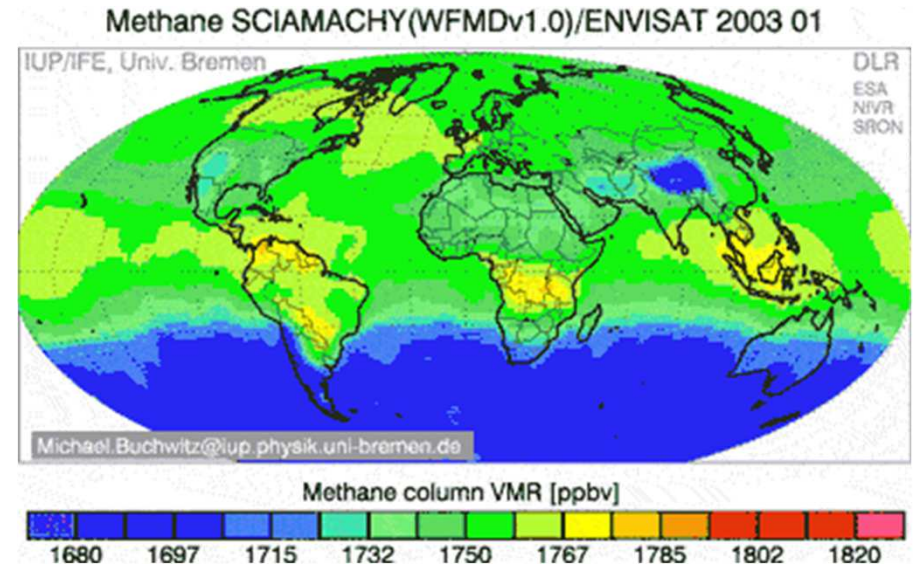
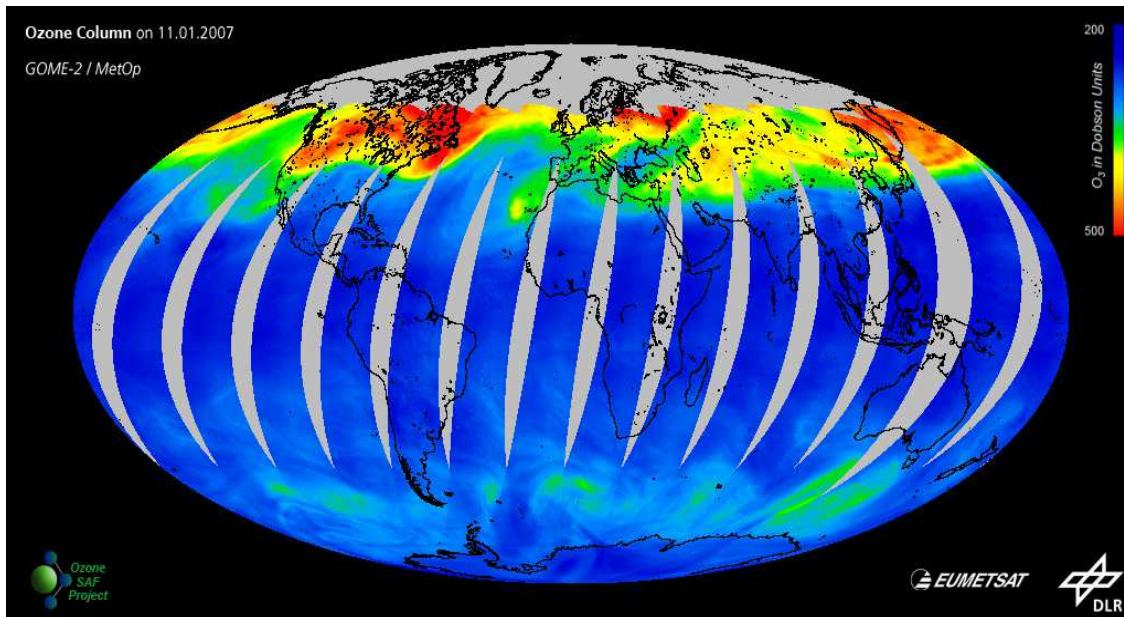
QUELQUES EXEMPLES D'UTILISATIONS

Les imageurs optiques jouent un rôle essentiel dans la gestion des **catastrophes naturelles** en permettant une surveillance continue et en fournissant des données précises pour la **prévention et le suivi des événements**.



QUELQUES EXEMPLES D'UTILISATIONS

Données atmosphériques : Les imageurs optiques capturent des données sur la composition, les propriétés et les conditions atmosphériques en analysant différentes bandes spectrales. Ces données incluent des informations sur les nuages, les aérosols, et les gaz atmosphériques, permettant une surveillance continue de l'atmosphère. Elles sont essentielles pour les prévisions météorologiques, le suivi de la qualité de l'air, et l'étude des changements climatiques.



LES CARACTERISTIQUES DES IMAGEURS OPTIQUES

Résolution spatiale :

Capacité à distinguer les détails

Applications :

- Imagerie haute résolution
- Urbanisation, suivi des catastrophes naturelles

SPOT 4 : 10 m



Pléiades : 70 cm



LES CARACTERISTIQUES DES IMAGEURS OPTIQUES

Résolution spatiale :

Capacité à distinguer les détails

Applications :

- Imagerie haute résolution
- Urbanisation, suivi des catastrophes naturelles



SPOT 4 : 10 m



Pléiades : 70 cm

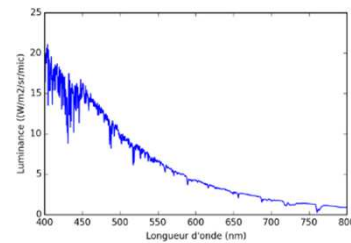
Résolution spectrale :

Capacité à distinguer les longueurs d'onde

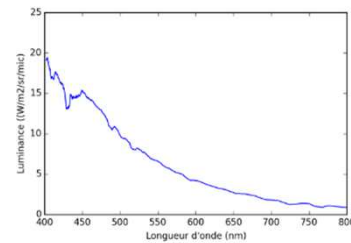
Applications :

- Applications scientifiques
- Météorologie

Bonne information spectrale



Information spectrale limitée



LES CARACTERISTIQUES DES IMAGEURS OPTIQUES

Résolution spatiale :

Capacité à distinguer les détails

Applications :

- Imagerie haute résolution
- Urbanisation, suivi des catastrophes naturelles



SPOT 4 : 10 m



Pléiades : 70 cm

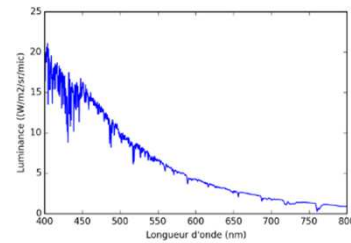
Résolution spectrale :

Capacité à distinguer les longueurs d'onde

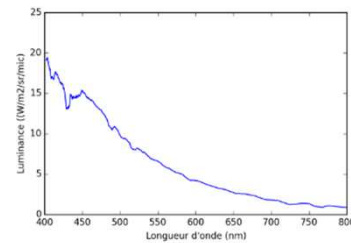
Applications :

- Applications scientifiques
- Météorologie

Bonne information spectrale



Information spectrale limitée



Résolution radiométrique :

Capacité à distinguer des niveaux de quantités physiques proches

Applications :

- Applications scientifiques et climatiques
- Environnement

Mauvaise qualité radiométrique



Bonne qualité radiométrique



LES CARACTERISTIQUES DES IMAGEURS OPTIQUES

Le champ de vue détermine combien de surface terrestre peut être observée à un instant donné.

Un **champ de vue plus large** permet de couvrir une plus grande zone, mais avec **une résolution potentiellement plus faible**, tandis qu'un champ de vue plus restreint permet de capturer des détails plus fins sur une zone réduite.

- Pixel de 1 à 100 km
Bilan radiatif terrestre, météo, atmosphère
- Pixel de 100 m à 1 km
Environnement, agriculture, océan, forêt
- Pixel de 10 à 100 m
Agriculture, cartographie, géologie, risque
- Pixel de 1 à 10 m
Cartographie précise, urbanisation, forêt
- Pixel de 10 cm à 1 m
Informations stratégiques, renseignements



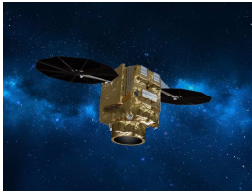
Taille du pixel



Champ de vue

- Echelle globale ou continentale
- Echelle continentale ou régionale
- Echelle régionale ou locale
- Echelle locale
- Cible particulière

QUELQUES EXEMPLES D'IMAGEURS OPTIQUES



Pleiades-Neo

Résolution spectrale : 4 bandes d'~ 50 nm

Résolution spatiale : 1,2 m – 30 cm (panchromatique)

Champ de vue : 10 km

SPATIAL / ANGULAR
RESOLUTION



MSI sur Sentinel-2

Résolution spectrale : 13 bandes de 13 nm à 185 nm

Résolution spatiale : 10 m à 60 m

Champ de vue : 290 km

Résolution radiométrique : 3 %



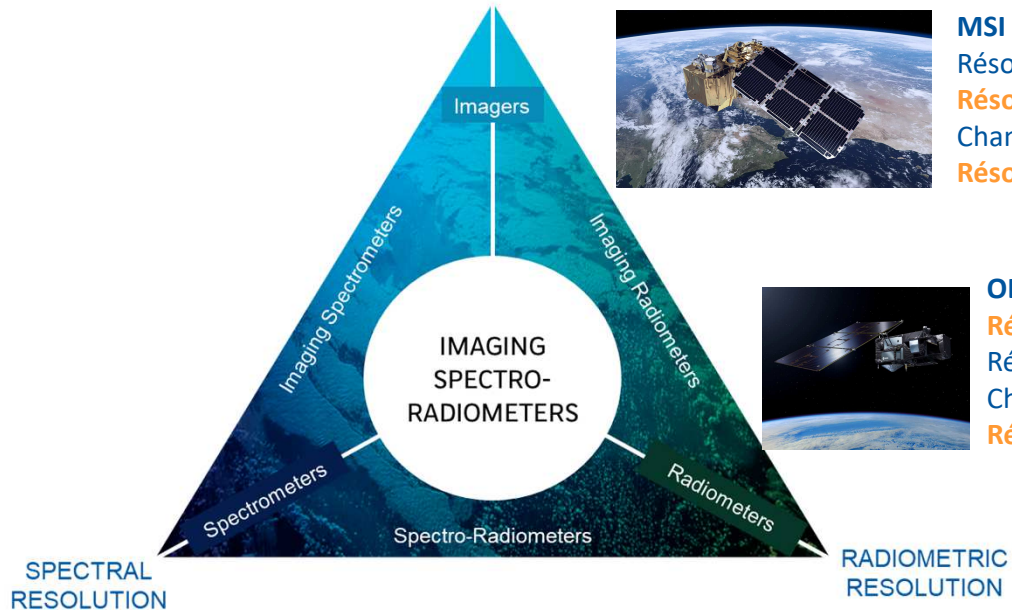
OLCI sur Sentinel-3

Résolution spectrale : 21 bandes 2,5 nm à 10 nm

Résolution spatiale : 300 m au nadir

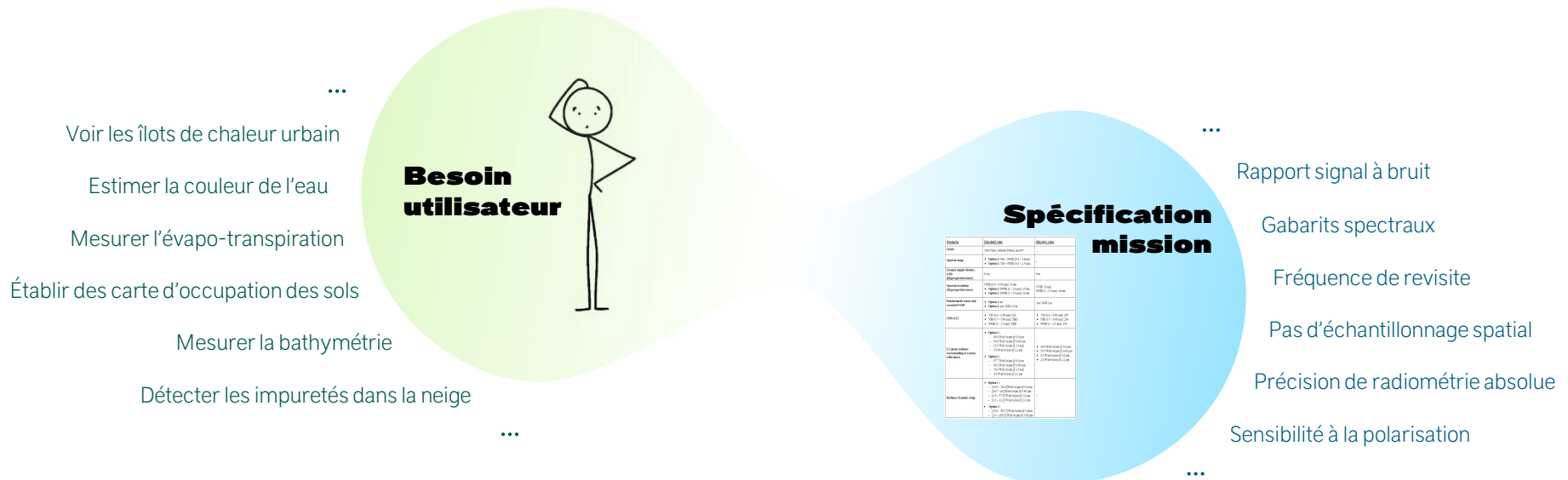
Champ de vue : 1270 km

Résolution radiométrique : 2%



COMMENT SONT DÉCIDÉES LES CARACTÉRISTIQUES D'UN IMAGEUR OPTIQUE ?

Un imageur optique répond aux **besoins d'une communauté d'utilisateurs**, ses caractéristiques sont issues des spécifications de la mission qui traduisent les besoins en contrainte sur le capteur pour répondre à un ou plusieurs besoins utilisateurs.





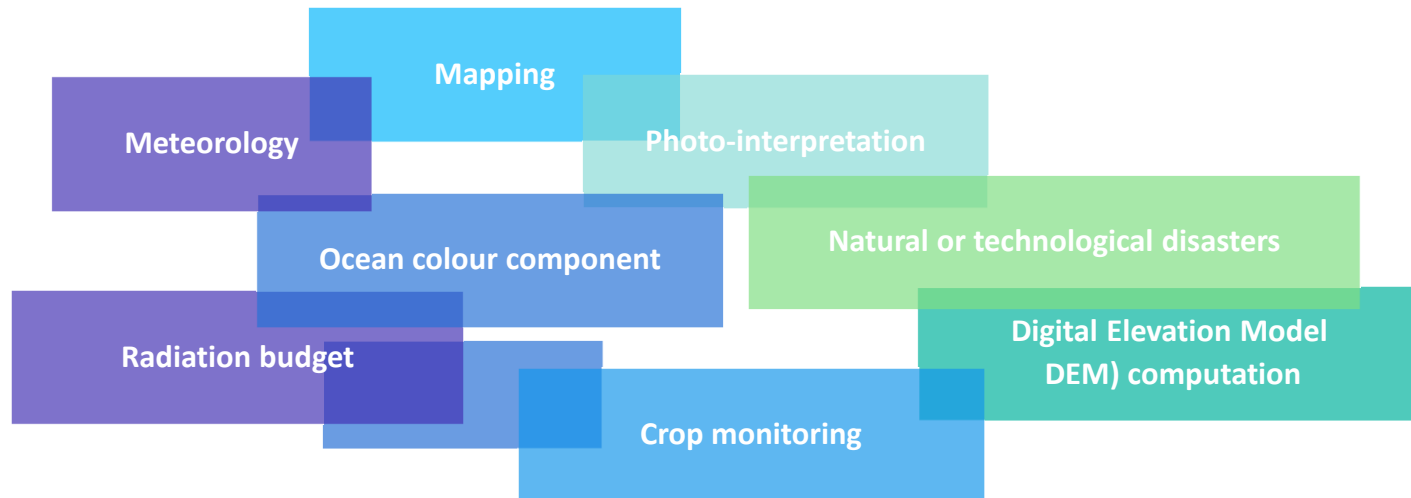
LA QUALITÉ IMAGE

QU'EST CE QUE LA QUALITÉ IMAGE AU CNES ?

S'assurer que le "produit image" répond aux besoins de l'utilisateur final tout au long du projet

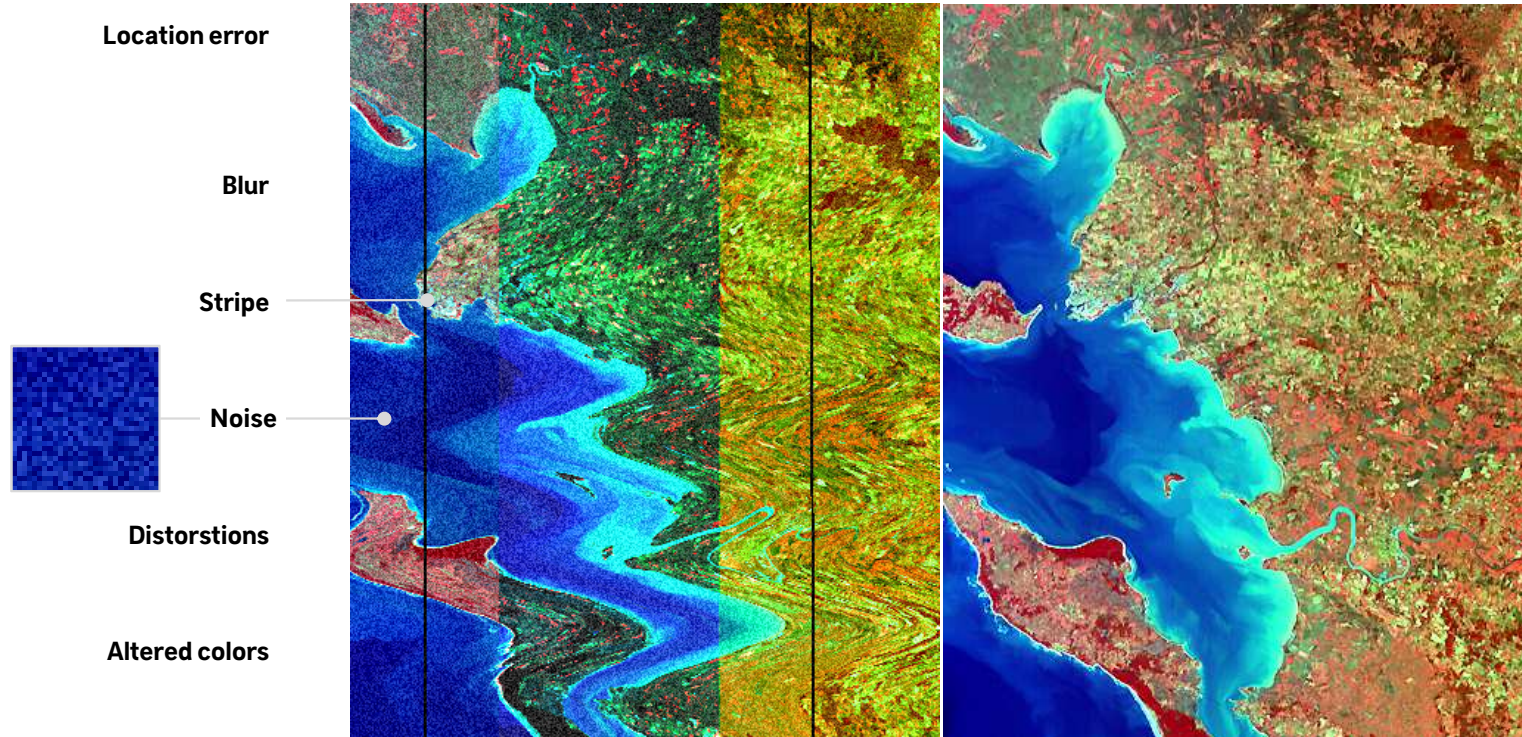
- Aligner la conception de l'imager et les traitements image au sol avec les besoins des utilisateurs
- Analyser et améliorer la performance des produits après le lancement et pendant sa durée de vie en orbite

Les besoins des utilisateurs varient en fonction de l'application ciblée :



QU'EST CE QUE LA QUALITÉ IMAGE AU CNES ?

Principe de la qualité d'image :
comprendre et mesurer les défauts dans le processus d'aquisition de image afin de pouvoir les corriger



LES 3 QUESTIONS DE LA QUALITÉ IMAGE

Où se trouve le pixel ?



Quels détails sont visibles ?

Que signifie la valeur du pixel ?

LES 3 QUESTIONS DE LA QUALITÉ IMAGE

Où se trouve le pixel ?

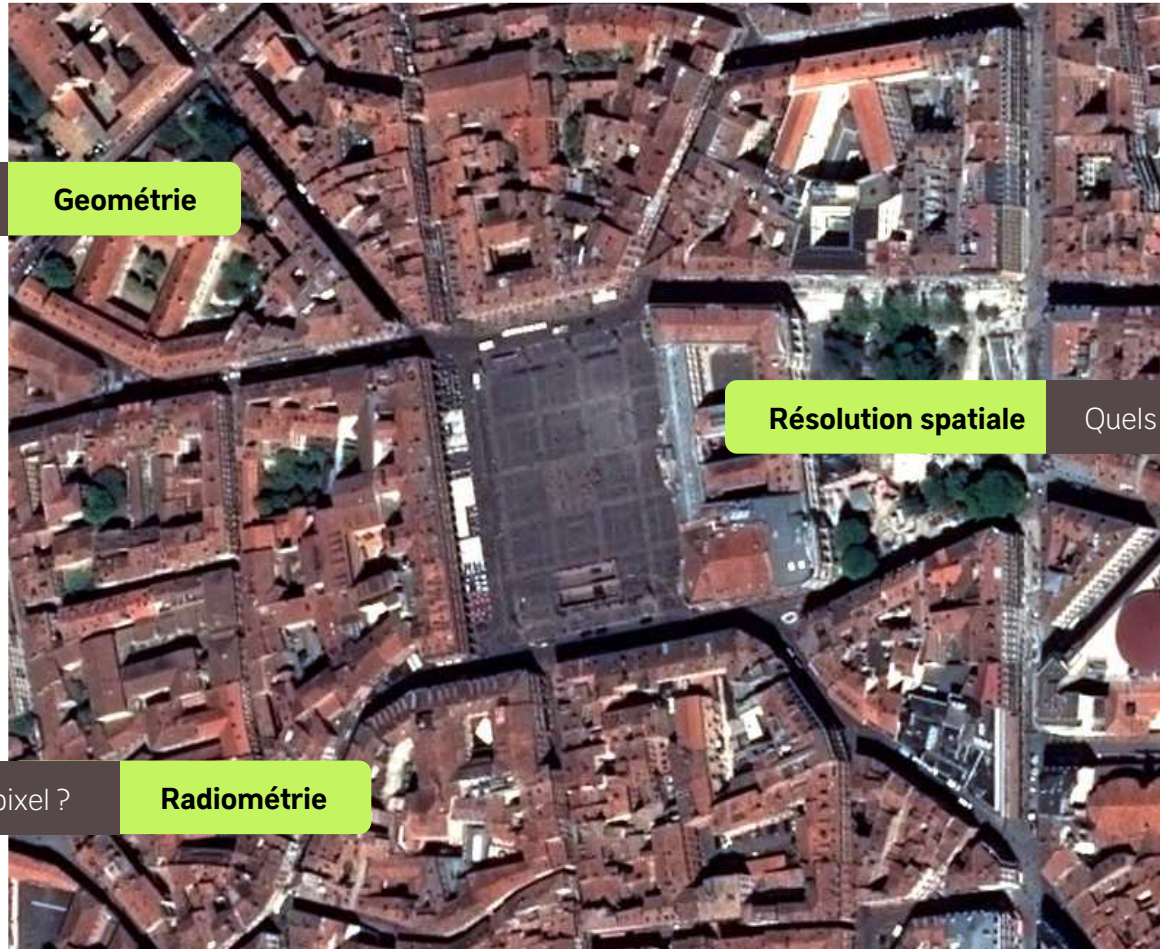
Geométrie

Résolution spatiale

Quels détails sont visibles ?

Que signifie la valeur du pixel ?

Radiométrie



QUALITÉ IMAGE : RADIOMÉTRIE

Objectifs :

- Assurer des mesures fiables et précises des grandeurs physiques.

Critères :

- **Bruit radiométrique :**
Capacité à obtenir des images uniformes d'un paysage uniforme.
- **Résolution radiométrique :**
Capacité à distinguer des cibles de luminosité très proche.
- **Etalonnage absolu**

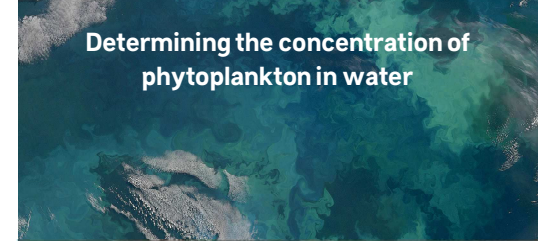
Les utilisateurs intéressés à la qualité radiométrique des images :

USERS INTERESTED IN

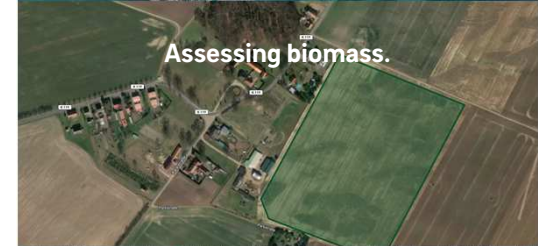
Analyzing atmospheric components



Determining the concentration of phytoplankton in water



Assessing biomass.



Meteorology





L'ÉTALONNAGE ABSOLU & LA CAL/VAL

QU'EST CE QUE L'ÉTALONNAGE RADIOMÉTRIQUE ABSOLU ?

L'étalonnage radiométrique absolu fait référence à la **transformation des comptes numériques d'une image en données physiques**.

Un étalonnage radiométrique de qualité est essentiel pour avoir des **mesures fiables et précises**.

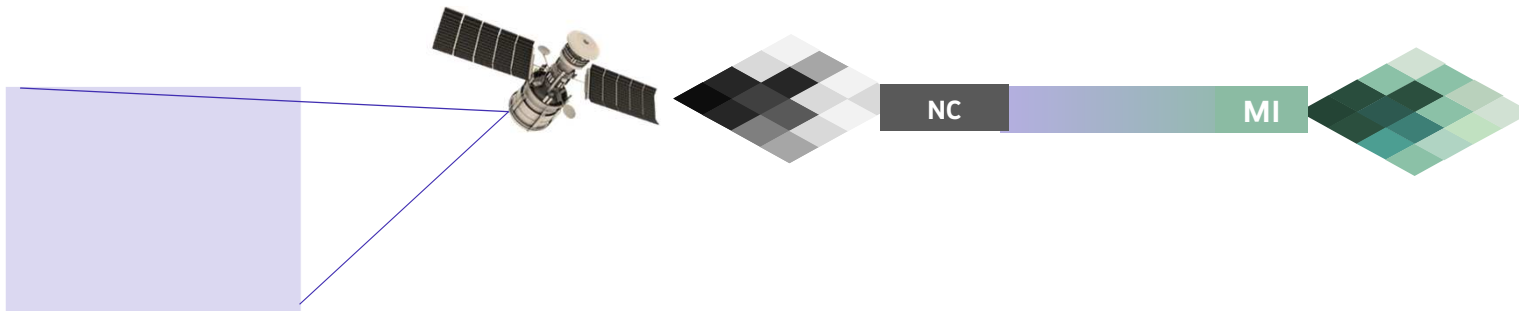
$$NC = A \cdot MI$$

$$\Delta A = \frac{MI}{CI}$$

NC = Numerical Count (digits)

MI = Measured radiance

CI = Estimated radiance (reference)



ÉTALONNAGE OU VALIDATION ?

L'étalonnage et la validation sont deux processus liés à la qualité image mais ils ont des objectifs **distincts** :

Étalonnage :

- Ajuster et calibrer les capteurs pour qu'ils mesurent avec précision les quantités physiques
- L'étalonnage peut être effectué avant le lancement (au sol) et tout au long de la mission (en vol) pour compenser les changements de sensibilité des capteurs.

Validation :

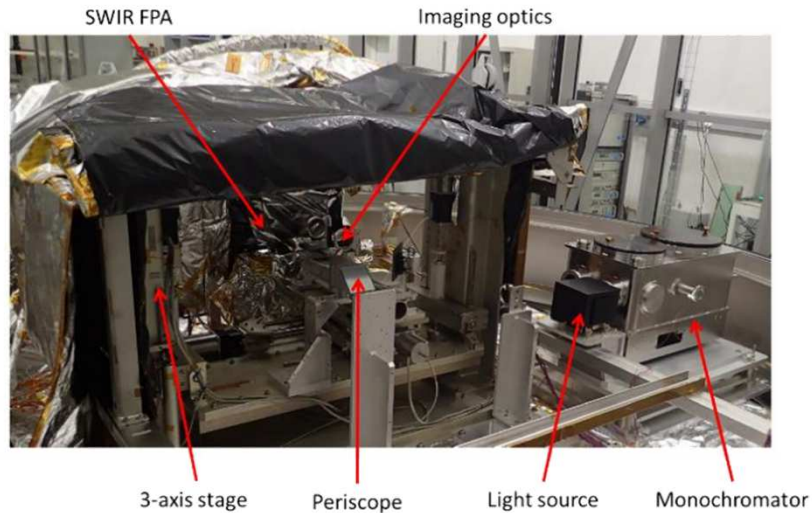
- Vérifier la précision des données obtenues en les comparant à des mesures de référence indépendantes.
- La validation est généralement réalisée en vol, après l'acquisition des données, pour s'assurer de leur exactitude et de leur fiabilité.

L'étalonnage radiométrique absolu consiste à déterminer le coefficient de proportionnalité entre les mesures du capteur et les quantités physiques correspondantes, afin de fournir des données en unités physiques précises.

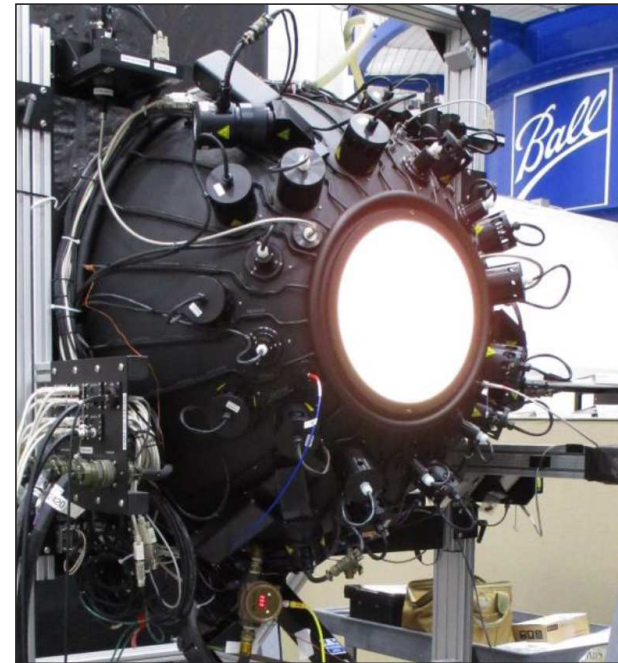
La validation, quant à elle, s'assure que les données collectées respectent les standards de qualité attendus et répondent aux besoins des utilisateurs.

L'ÉTALONNAGE AU SOL

- La sensibilité des capteurs sont caractérisés au sol, avant le lancement.
- Utilisation de sphères intégrantes et de radiomètres de référence au sol (standards de référence primaire) pour étalonner les capteurs avant le lancement.



Dispositif de caractérisation spectrale de Sentinel-2 C/D (ESA)



Sphère intégrante utilisée pour la caractérisation de Landsat-9 (NASA)

ET APRÈS LE TIR ?

Idéalement, les performances du capteur ne devraient pas varier tout au long de la durée de vie du satellite en orbite.

En pratique, ce n'est pas le cas. **La sensibilité des capteurs peut varier significativement** au cours de la vie orbitale, affectée par des facteurs thermiques, mécaniques, la dégradation électronique, et l'exposition aux UV.

Il est essentiel **d'évaluer continuellement les performances du capteur** pour maintenir la précision des données pendant toute la durée de la mission.

C'est un des rôles de l'équipe qualité image : surveiller, évaluer et comprendre les baisses de sensibilité pour pouvoir au mieux les corriger dans les traitements image au sol afin que **l'utilisateur final ait une performance stable** dans le temps et cohérente avec ses besoins.

➤ **Enjeu majeur pour les missions scientifiques et le climat**

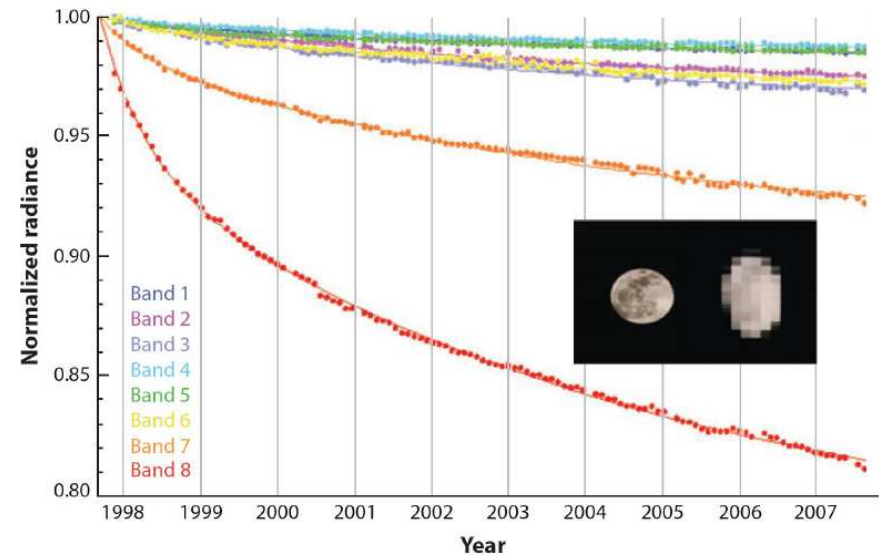


Figure 1

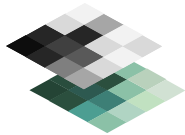
The temporal loss in Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) spectral radiometric sensitivity relative to the first lunar calibration. Vertical gray lines denote January 1st of each year. The insert depicts a SeaWiFS image of the moon.

McClain, C. R. (2009) A Decade of Satellite Ocean Color Observations. Annual Review of Marine Science. Vol. 1: 19-42

QU'EST CE QUE L'ÉTALONNAGE ABSOLU EN VOL ?

L'étalonnage absolu en vol est le processus d'ajustement et de vérification des capteurs d'un satellite après son lancement, afin d'assurer que les **mesures obtenues sont précises et cohérentes** par rapport à des standards connus.

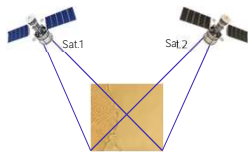
Cet étalonnage permet de :



- **Convertir les données brutes (nombres numériques) en valeurs physiques précises**, telles que la luminance ou la réflectance.



- **Maintenir la qualité des données au fil du temps**, en compensant les effets de la dégradation des capteurs.



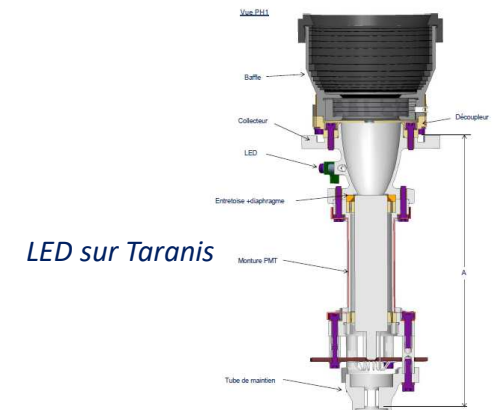
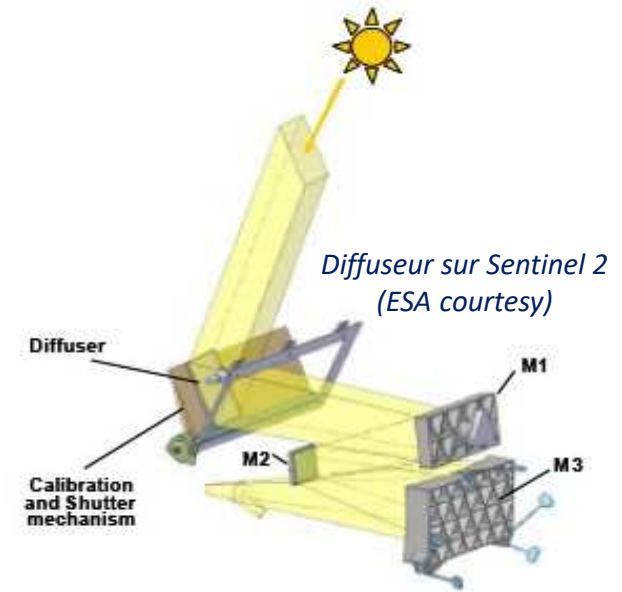
- **Assurer la cohérence des données entre différents satellites**, ce qui est essentiel pour des analyses multisources et des comparaisons temporelles.

SYSTÈME D'ÉTALONNAGE EMBARQUÉ

L'étalonnage absolu du capteur en vol peut être réalisé grâce à des instruments spécifiques embarqués à bord du satellite, conçus spécialement pour cet usage : ce sont les **dispositifs d'étalonnage embarqués à bord**.

Lampes, corps noirs, et réflecteurs solaires (diffuseurs) servent à étalonner les capteurs, mais ils ont leurs propres limites :

- Difficulté d'une bonne caractérisation au sol
- Dérive temporelle du système bord lui-même
- Besoins d'inter-comparaison entre capteurs spatiaux sur différentes plateformes, anciens et actuels
- Contraintes liées à la taille, au poids, aux coûts et à la consommation d'énergie
- Absence sur les petits satellites ou « low-cost »



L'ÉTALONNAGE ABSOLU SUR SITES NATURELS

Les évolutions de performances des capteurs peuvent être caractérisées avec des méthodes d'étalonnages sur cibles naturelles, ou *vicarious calibration*

Pseudo-Invariant Calibration Sites (PICS) :

- Des sites comme l'Antarctique et le **Sahara, stables temporellement** et homogènes spatialement, permettent de caractériser la perte de sensibilité due à la dégradation des optiques.
- En supposant la stabilité des sites, sur une zone donnée, après correction des variations atmosphériques, le capteur devrait capter exactement la même quantité de lumière tout au long de sa vie orbitale.



L'ÉTALONNAGE ABSOLU SUR SITES NATURELS

Différentes méthodes utilisant des cibles naturelles diverses :

- **Observation de scènes à luminance théoriquement connue** : réflexion du soleil sur mer, le bleu du ciel au dessus des océans sombres (diffusion Rayleigh), nuages convectifs profonds, Lune.
- **Calibration croisée et suivi temporel** à l'aide de sites naturels stables (PICS), comme les déserts et les surfaces enneigées.
- **Observation de scènes caractérisées simultanément au sol**, où des mesures de réflectance et de conditions atmosphériques sont prises, par exemple sur la plaine alluviale de La Crau en France et Gobabeb en Namibie, qui font partie du réseau RadCalNet.

En combinant ces différentes méthodes et un grand nombre de mesures, on parvient à réduire les biais et à améliorer la précision des données.

Actuellement, le niveau de précision atteint se situe à quelques pourcents.



L'ÉTALONNAGE ABSOLU SUR SITES NATURELS

Les méthodes sur cibles naturelles dites *vicarious calibration* sont essentielles pour garantir la précision de mesure des capteurs.

Elles utilisent des cibles naturelles pour :

- La validation des mesures des capteurs ayant des moyens d'étalonnage embarqués
- L'étalonnage des capteurs dépourvus de dispositifs d'étalonnage à bord
- Inter-étalonner les capteurs de différents satellites



L'ÉTALONNAGE ABSOLU SUR SITES NATURELS

Depuis une quarantaine d'années, le CNES développe ces méthodes et est maintenant **reconnu internationalement** pour leur utilisation, leur amélioration continue, **pour son expertise en étalonnage absolu sur cibles naturelles.**

Nous sommes sollicités par diverses agences spatiales et entreprises privées pour évaluer la dégradation de la sensibilité de leurs capteurs optiques et/ou fournir une évaluation indépendante de leur performance radiométrique.

Par exemple :

- Les imageurs PleiadesNeo pour Airbus Defense & Space
- Les radiomètres imageurs sur Sentinel-2 et Sentinel-3 de l'agence spatiale européenne (ESA)
- Le satellite hyperspectral PRISMA de l'agence spatiale italienne (ASI)

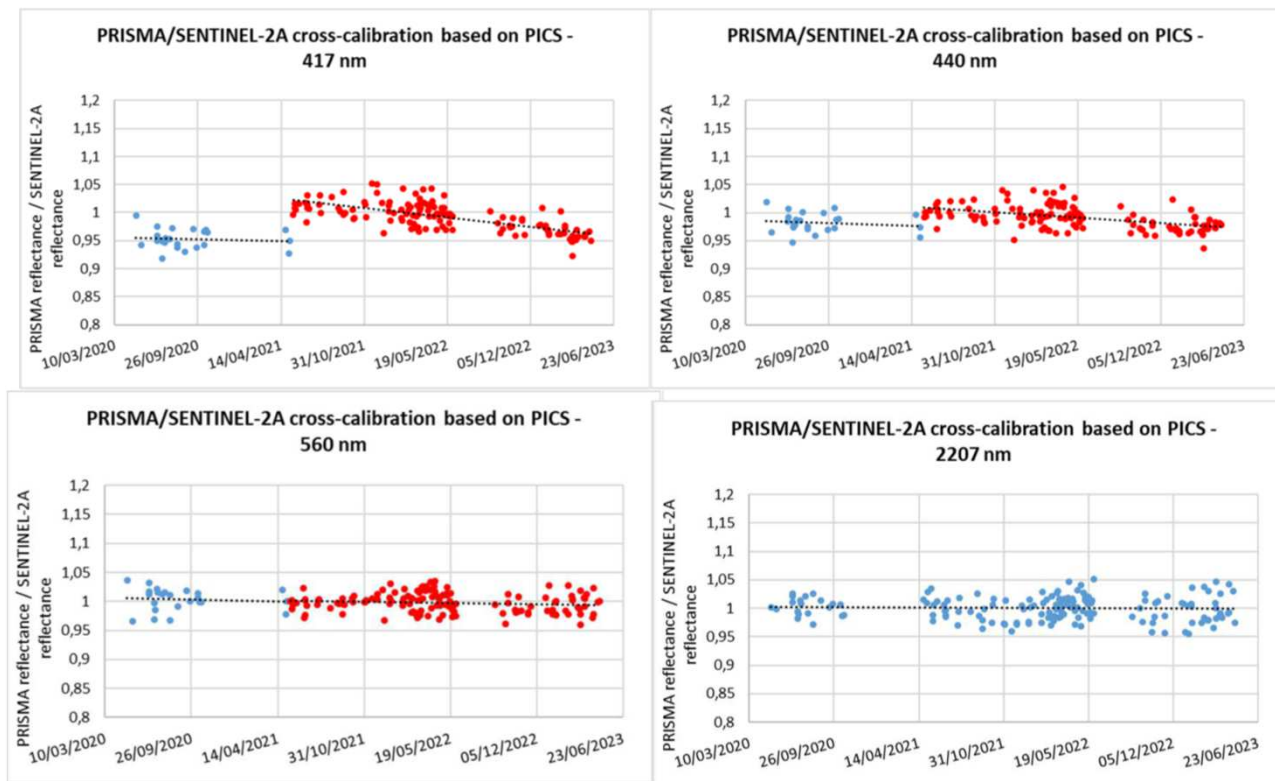


LA MISSION PRISMA

L'agence spatiale italienne (ASI) a sollicité le CNES pour évaluer la perte de sensibilité du capteur hyperspectral PRISMA sur les sites désertiques.



Italie
Tir : 2019
400-2500 nm
Résolution spectrale : 10 nm
Taille de pixel : 30 m
Champ de vue : 30 km



MAIS ALORS L'ÉTALONNAGE SOL EST IL UTILE ?

Certaines données critiques ne sont **accessibles que par une mesure au sol** (les caractéristiques des étalons embarqués à bord, les réponses spectrales, ...)

Etalonnage **sol**

- équipements complexes accessibles (pas de contrainte de poids);
- analyses complémentaires possibles;
- éventuellement, changement du matériel de vol.

Etalonnage **vol**

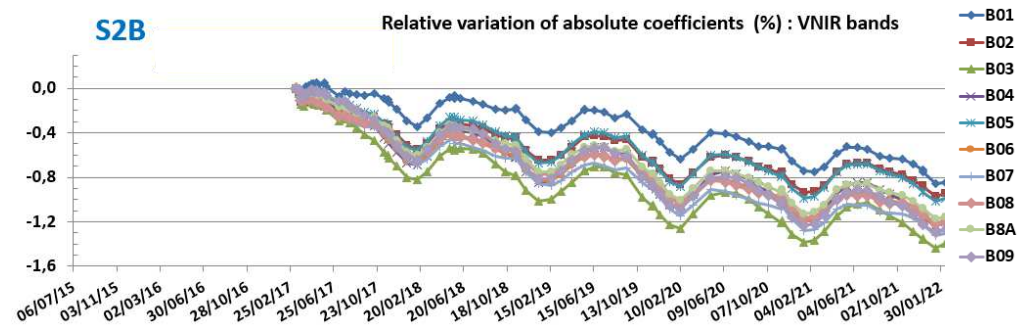
- représentatif de l'état réel de l'instrument (passage au vide, perturbation du lancement, etc.);
- représentatif de la mission de l'instrument (cibles observées, distances, etc.)

La combinaison des deux est souvent nécessaire.

UN CAS TYPIQUE DE COMBINAISON ENTRE SOL ET VOL

Les étalons embarqués à bord peuvent servir de référence pour **caractériser en vol**

Mais **un étalon doit impérativement être bien caractérisé au sol** pour être exploité en vol.



Oscillations saisonnières du coefficient d'étalonnage de Sentinel-2 B vraisemblablement dues à une imprécision sur les caractéristiques de réflexion du moyen d'étalonnage.

5

CONCLUSION

CONCLUSION

L'étalonnage et la validation sont essentiels pour des données satellitaires de qualité en télédétection. La calibration ajuste les instruments ; la validation évalue les données produites.

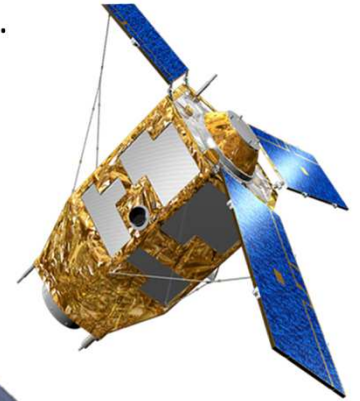
Pourquoi étalonner et valider radiométriquement ?

- Garantir l'exactitude et la précision des données.
- Assurer la fiabilité des données sur le long terme, permettant des comparaisons temporelles et spatiales fiables.

Les capteurs évoluant en vol, il est nécessaire de les effectuer pendant toute la durée de vie de la mission.

En résumé :

L'étalonnage et la validation radiométriques en vol sont des étapes indispensables pour exploiter pleinement le potentiel des images optiques, en garantissant que les **quantités physiques** qui y sont contenues **sont précises, cohérentes, temporellement stables, et utilisables pour les applications scientifiques et l'étude du climat.**





QUESTIONS