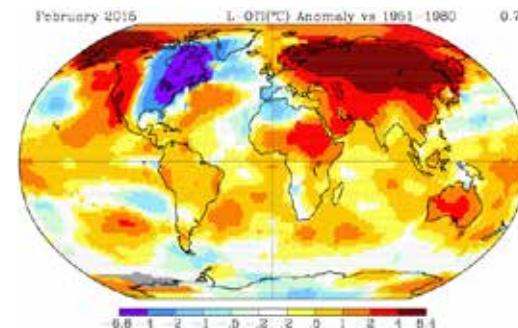
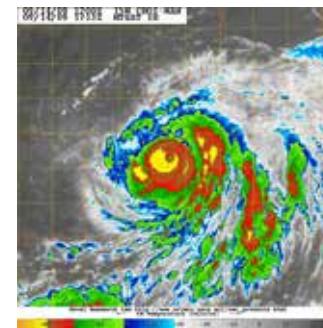


Chaire Avenir Commun Durable

Les satellites, outils indispensables pour connaître le climat



François-Marie
Bréon



1946 : [Image de la Terre](#) depuis l'espace (fusée V2 modifiée)

1957 : Satellite artificiel : Spoutnik

1960 : [Satellite d'observation](#) (militaire) : Corona

1960 : Satellite à vocation [météorologique](#) : TIROS-1

1961 : Vol d'un humain dans l'espace: Youri Gargarine

1962 : Survol d'une autre planète : Venus par Mariner-2

1963 : Observation depuis l'espace à [résolution métrique](#)

1964 : Observation [radar](#) depuis l'espace

1965 : Survol de Mars : Mariner 4

1966 : Observation de la Terre depuis [l'orbite géostationnaire](#)

1966 : Atterrissage en douceur sur un objet céleste : Luna-9 sur la Lune

1969 : Humains sur la lune

[L'intérêt d'une observation depuis l'espace a été comprise très rapidement](#)

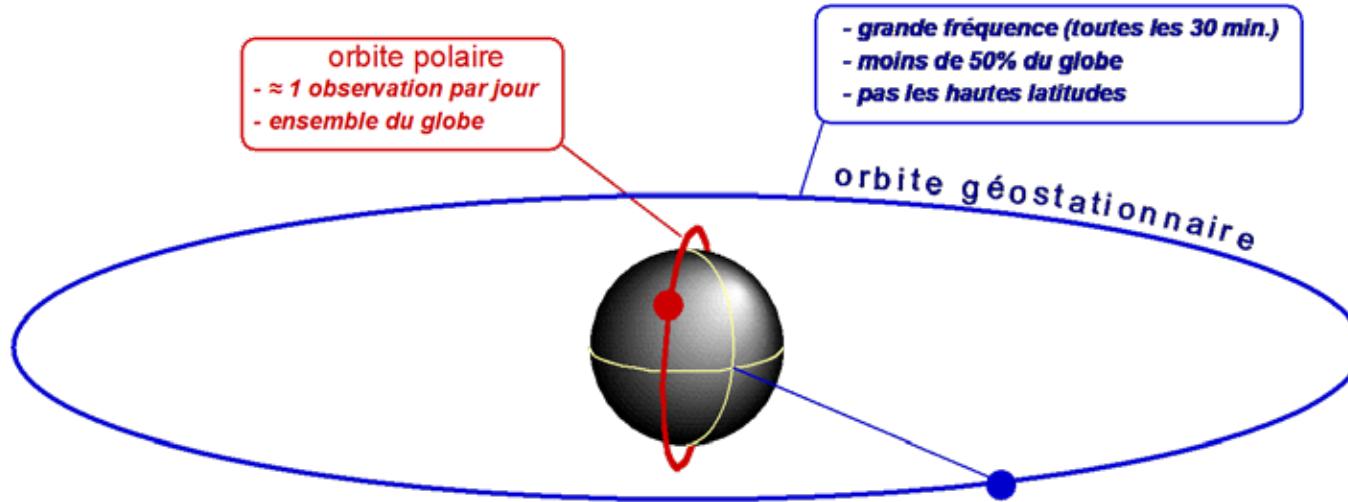
Imagerie. On « voit » un phénomène à grande échelle, ce qui permet de comprendre sa dynamique

Couverture spatiale. Le satellite permet d'observer partout, y compris dans des zones difficilement accessibles

Homogénéité des mesures. Un même instrument est utilisé. Permet de comparer les mesures faites à plusieurs endroits, sans nécessité d'inter-calibration

Mesures spécifiques. Certains paramètres ne peuvent être observés que depuis l'espace. Ex : Albédo de la Terre





Basses : 400-1000 km. Généralement polaires

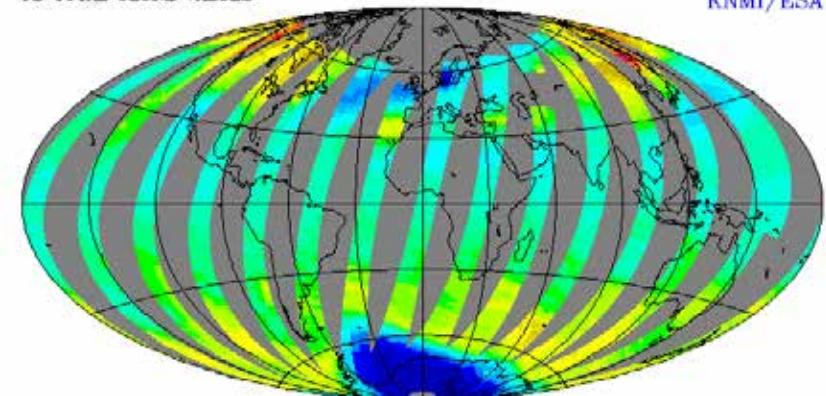
Géostationnaires : 36000 km. Au dessus de l'équateur

Point de Lagrange (rare)

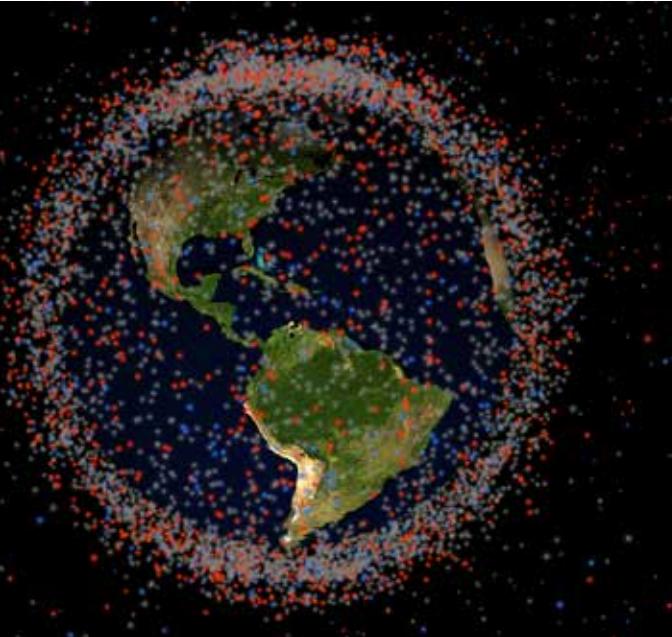
Orbite fortement elliptique (rare)



FD TOTAL OZONE VALUES



Toutes les zones de la Terre peuvent être observées par un seul satellite
2 observations par jour (nuit + jour)
L'inclinaison est adaptée pour obtenir une orbite héliosynchrone : heure d'observation
constante.



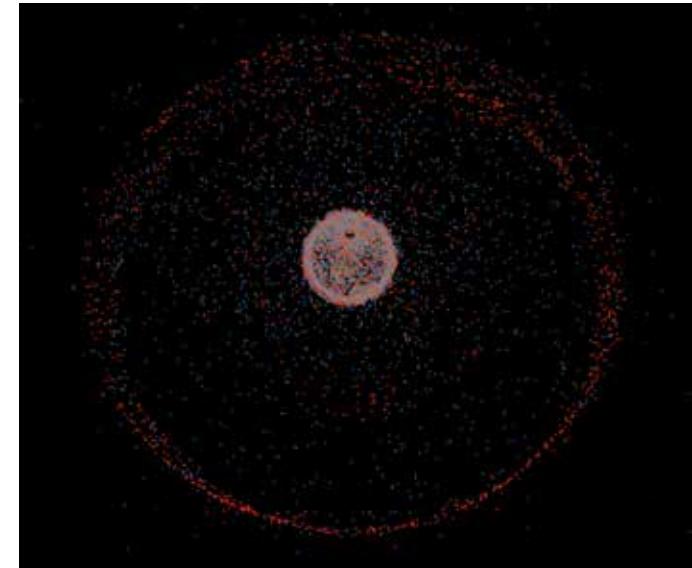
Mais, en proportion, très peu de satellites d'observation
(surtout des satellites de communication)

Satellites

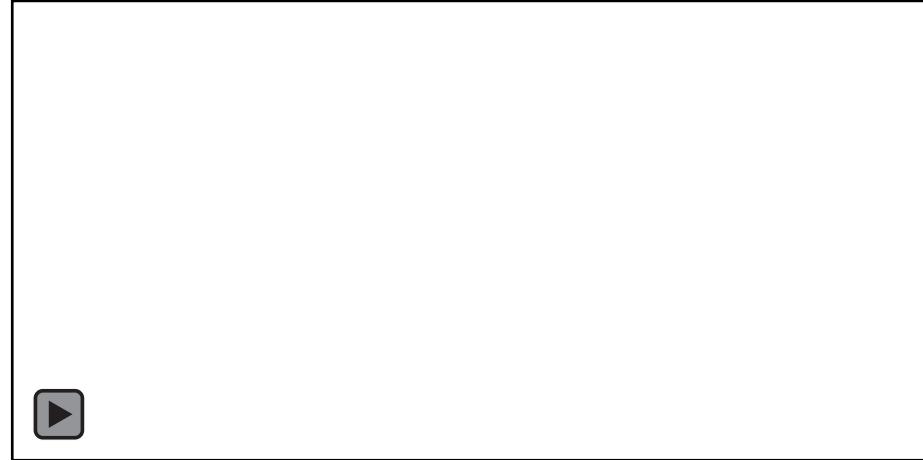
Fusées

Débris

En regardant plus loin, on voit les
satellites géostationnaires



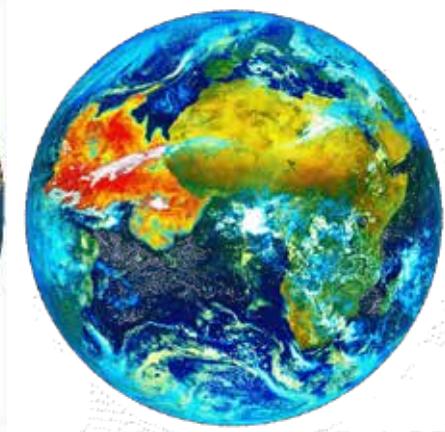
Orbite géostationnaire

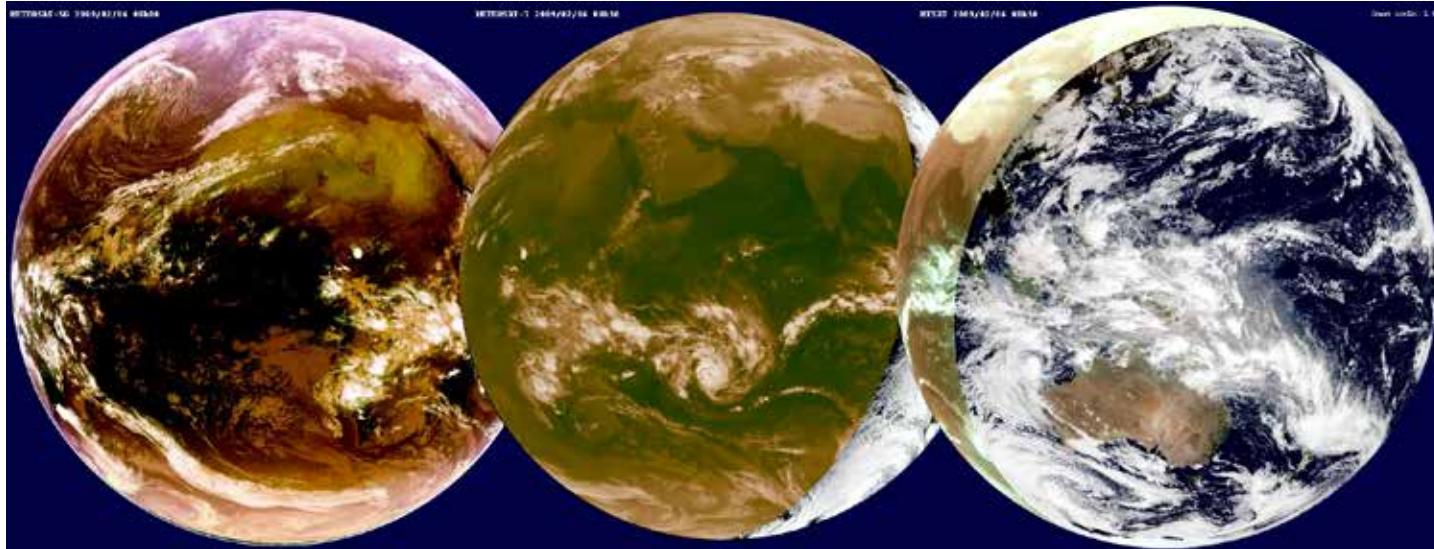


GOES WEST

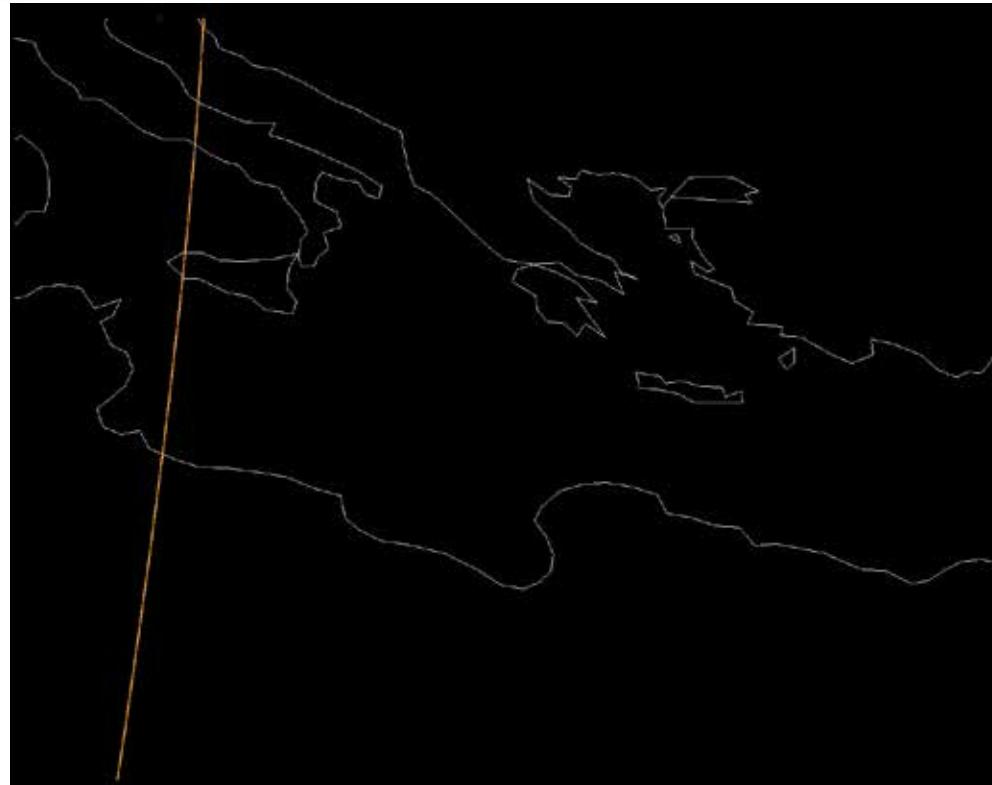


GOES EAST





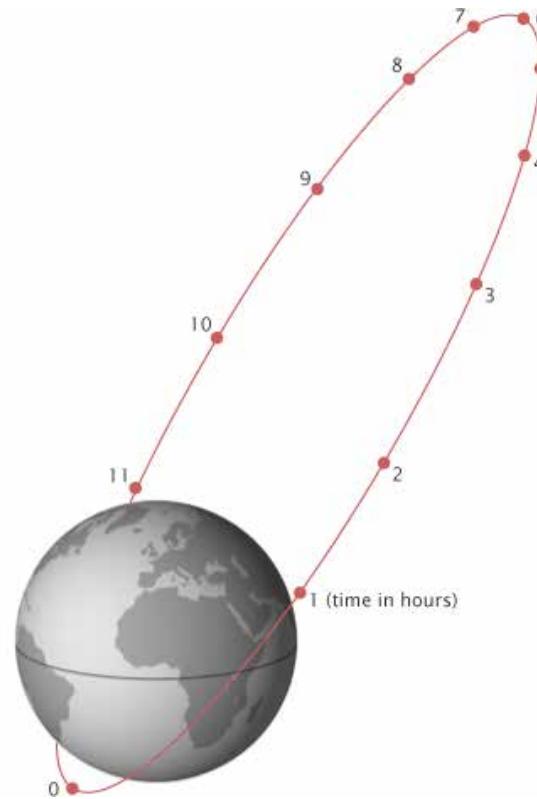
Les satellites géostationnaires permettent une observation en continu de la Terre, à l'exception des zones de haute latitude



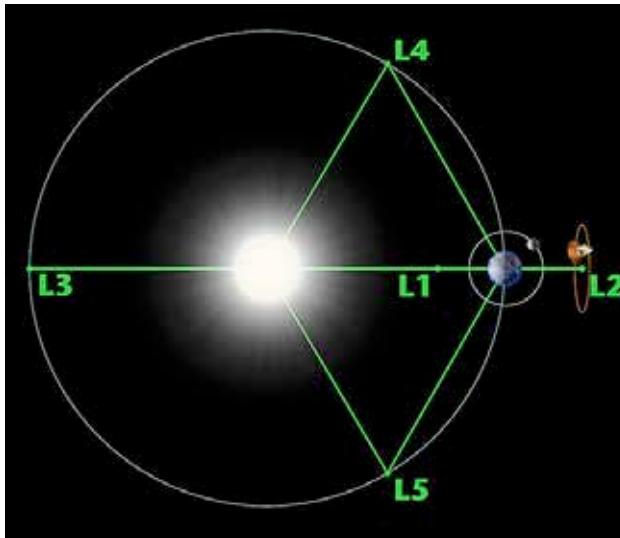
Les satellites géostationnaires permettent d'observer l'évolution des phénomènes en évolution rapide

Plus exotique, l'orbite elliptique

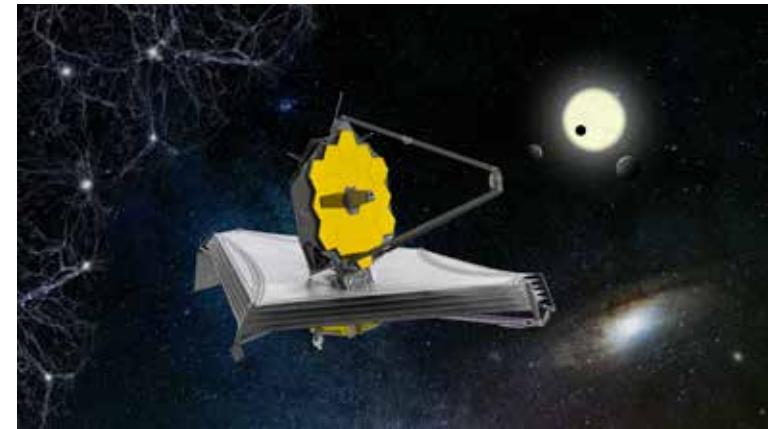
L'orbite elliptique permet de rester "longtemps" au dessus des zones polaires qui ne sont pas accessibles depuis les orbites géostationnaires (au dessus de l'équateur)



Plus exotique, depuis le point de Lagrange...



Points de Lagrange



Depuis L1 on voit en permanence la partie éclairée de la Terre



Plate-formes multi-missions

- 2 à 8 t
- Plusieurs instruments
- Durée de vie de 5 à 10 ans



Mini-satellites

- ~ 500 kg
- 1 à 3 instruments
- Durée de vie ~ 5 à 7 ans



Micro-satellites

- ~ 50 à 100 kg
- 1 instrument
- Durée de vie 2 à 5 ans

Nano-satellites

- ~ 1 à 10 kg
- 1 instrument
- Durée de vie ??

Les acteurs

Les scientifiques définissent des besoins et proposent des concepts de mission

Les agences spatiales et choisissent les missions

Les industriels construisent les satellites

Tests par les industriels

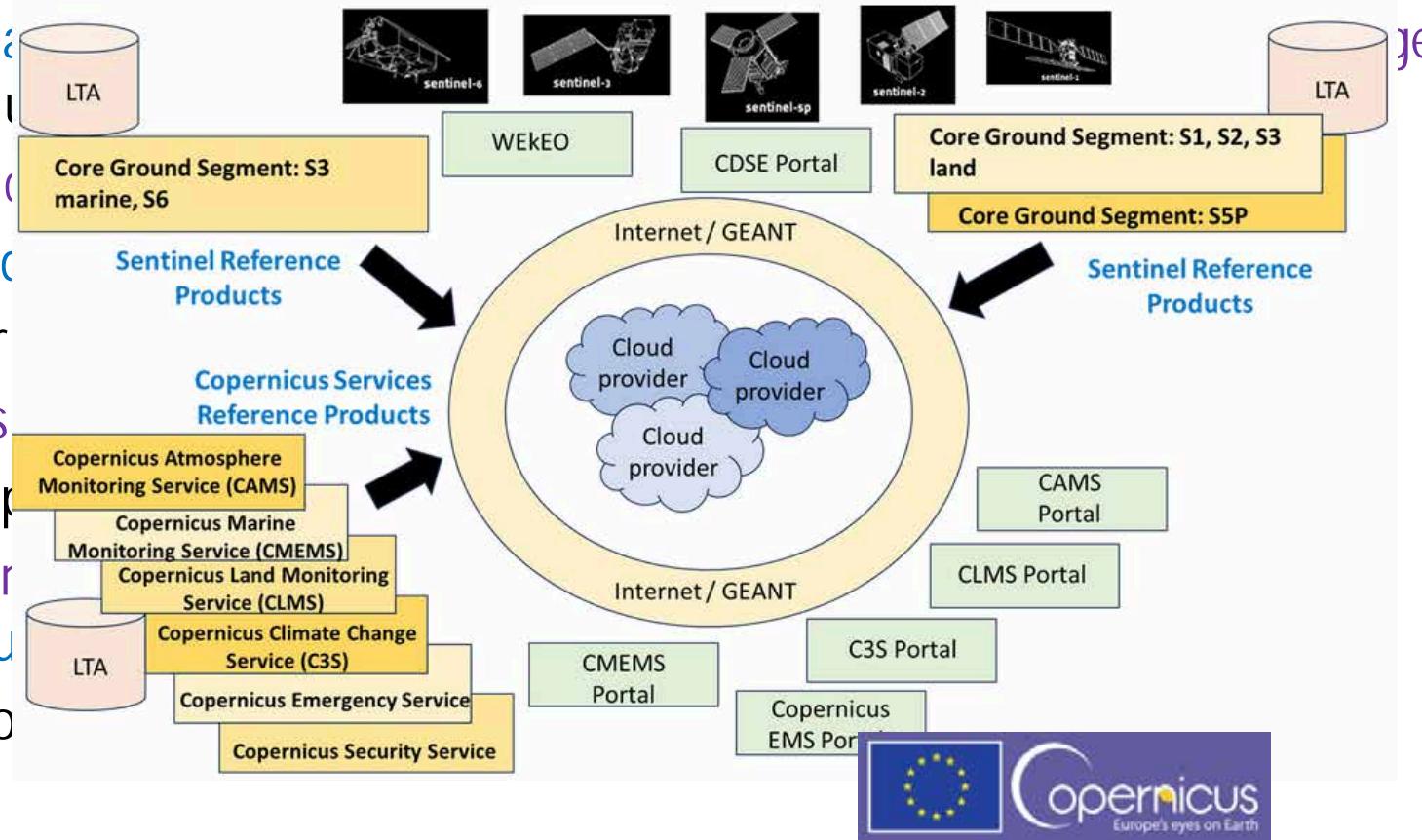
Lancement par les agences spatiales

Traitement des données par les centres de données

Validation des produits par les scientifiques

Utilisation opérationnelle par les météorologiques

En Europe : Projet Copernicus



Série « Sentinel »

Sentinel 1 : Radar (2 satellites polaires)

Sentinel 2 : Imagerie (héritage SPOT)

Sentinel 3: Observation global optique (solaire et infrarouge) à résolution réduite + altimétrie

Sentinel 5P : Composition atmosphérique

Sentinel 6 : Radar altimètre

MetOp :

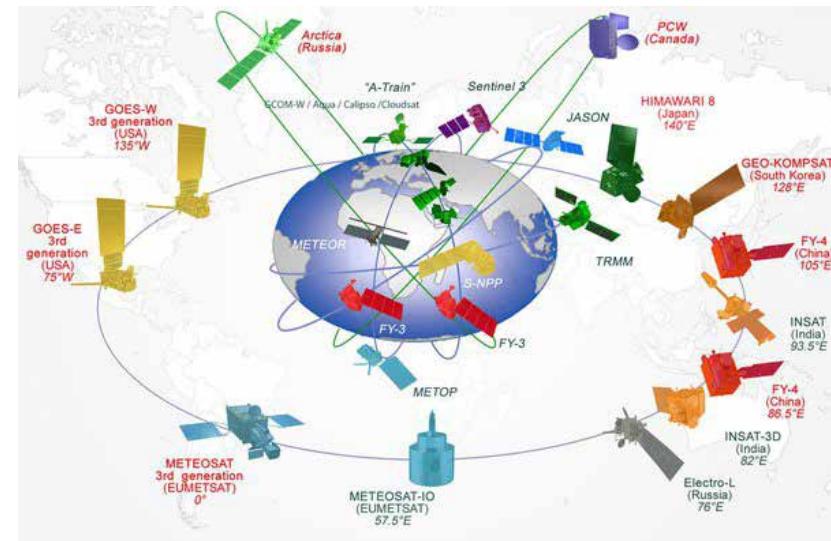
Les satellites polaires à visée météorologique

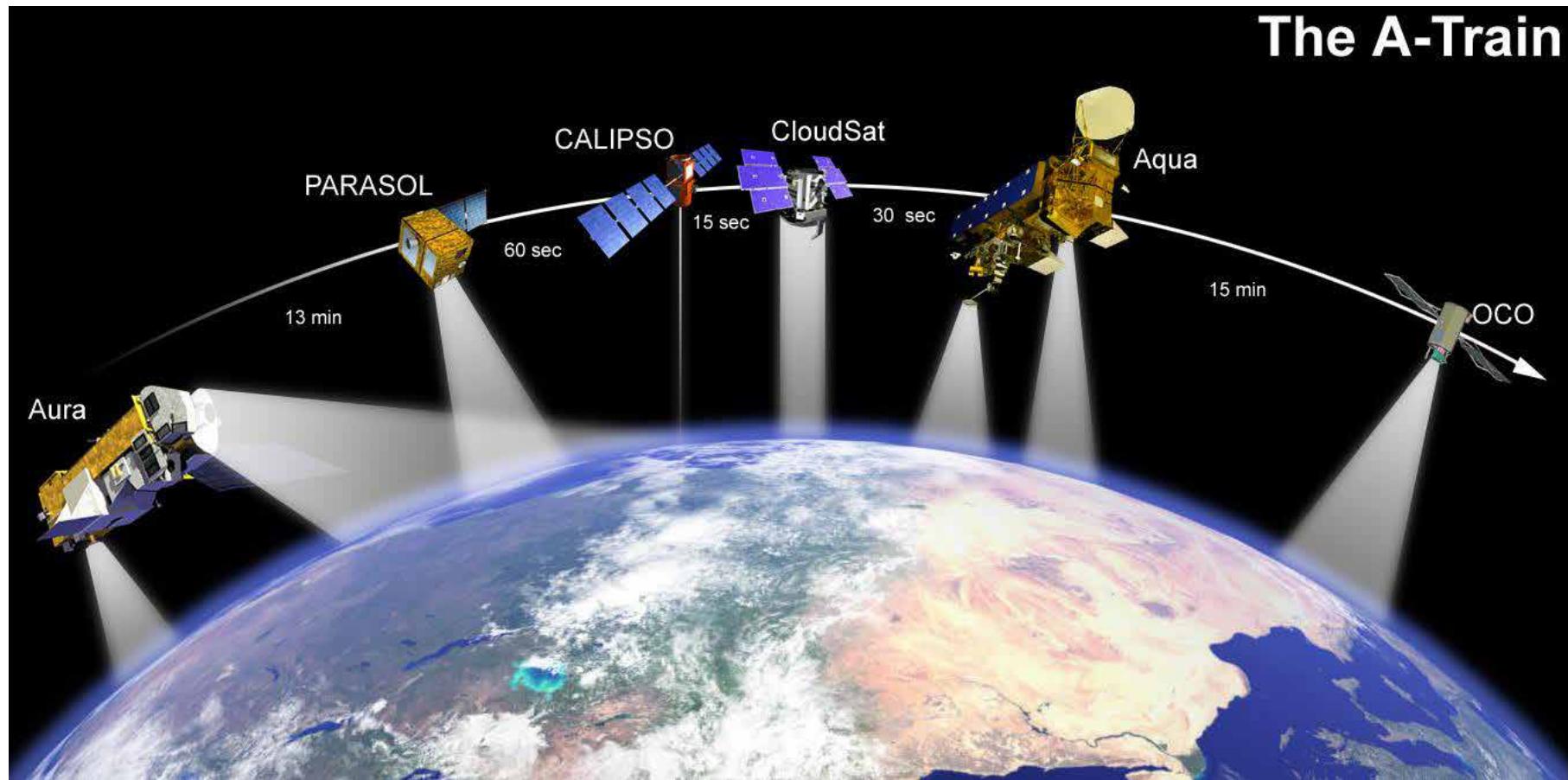
8 instruments à bord.

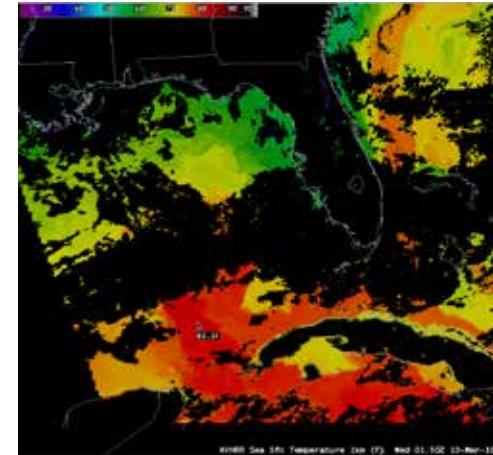
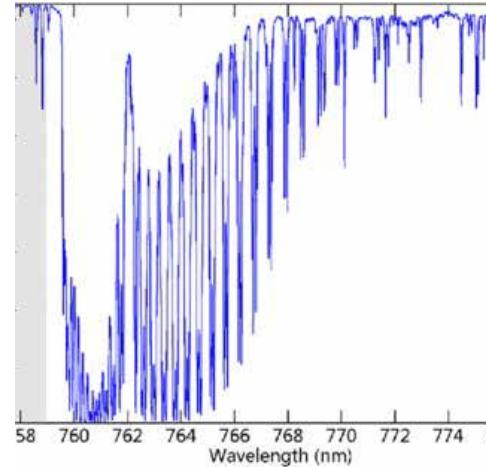
Au moins 2 opérationnels en permanence

Météosat (Seconde Génération)

Satellite à vocation météorologique en orbite géostationnaire à 0° de longitude



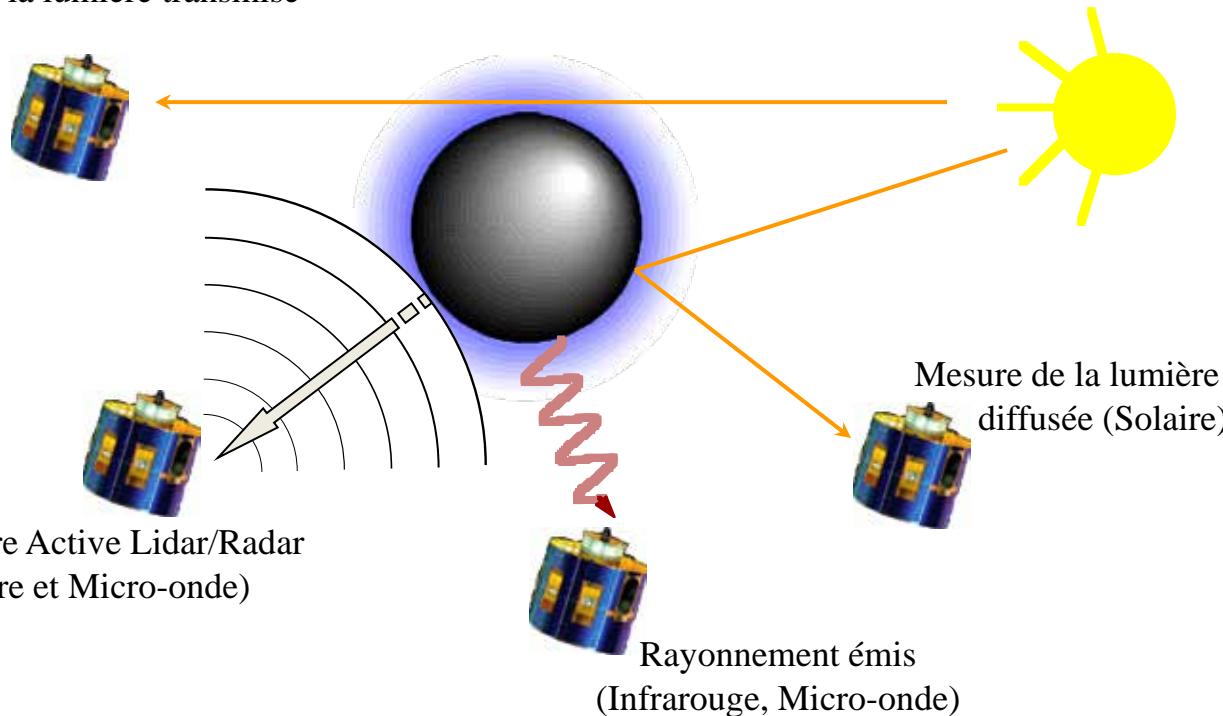




Le satellite ne mesure pas directement le paramètre recherché. Il mesure un rayonnement dont on peut déduire une observable, avec une certaine incertitude.

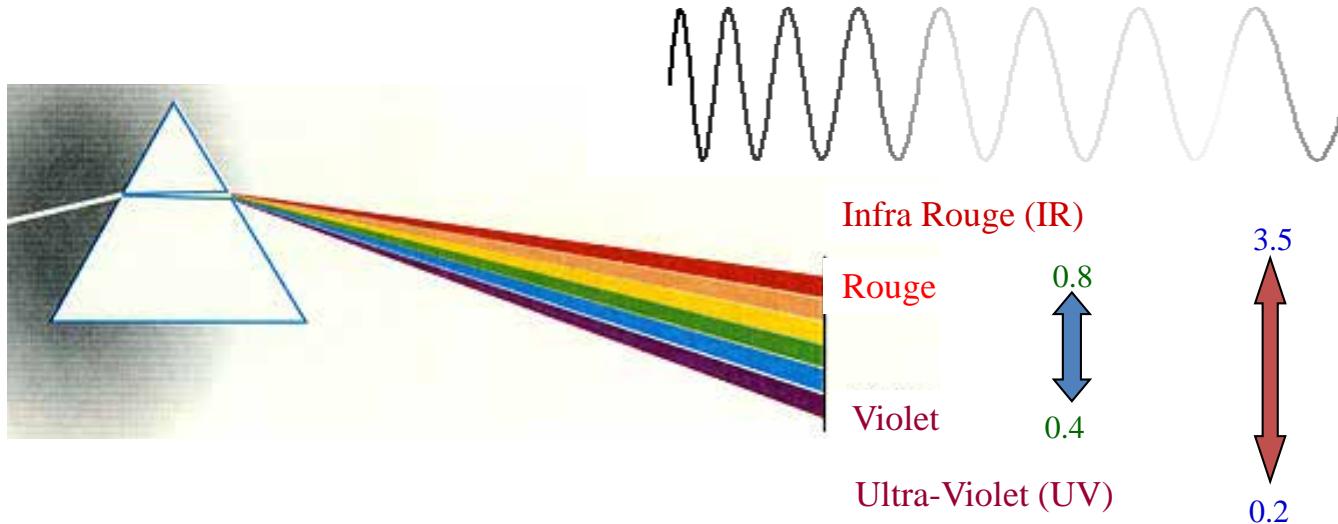
Une partie du travail consiste donc à développer des méthodes pour estimer des paramètres à partir des mesures de radiance, évaluer les incertitudes, et valider les produits

Mesure de la lumière transmise
(Solaire)





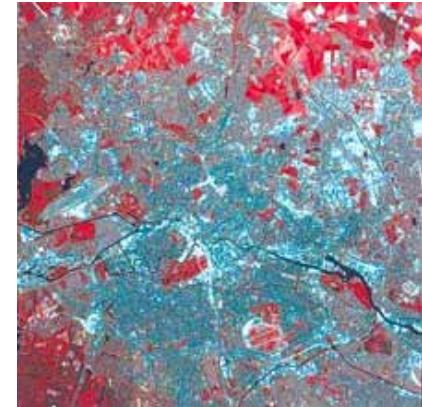
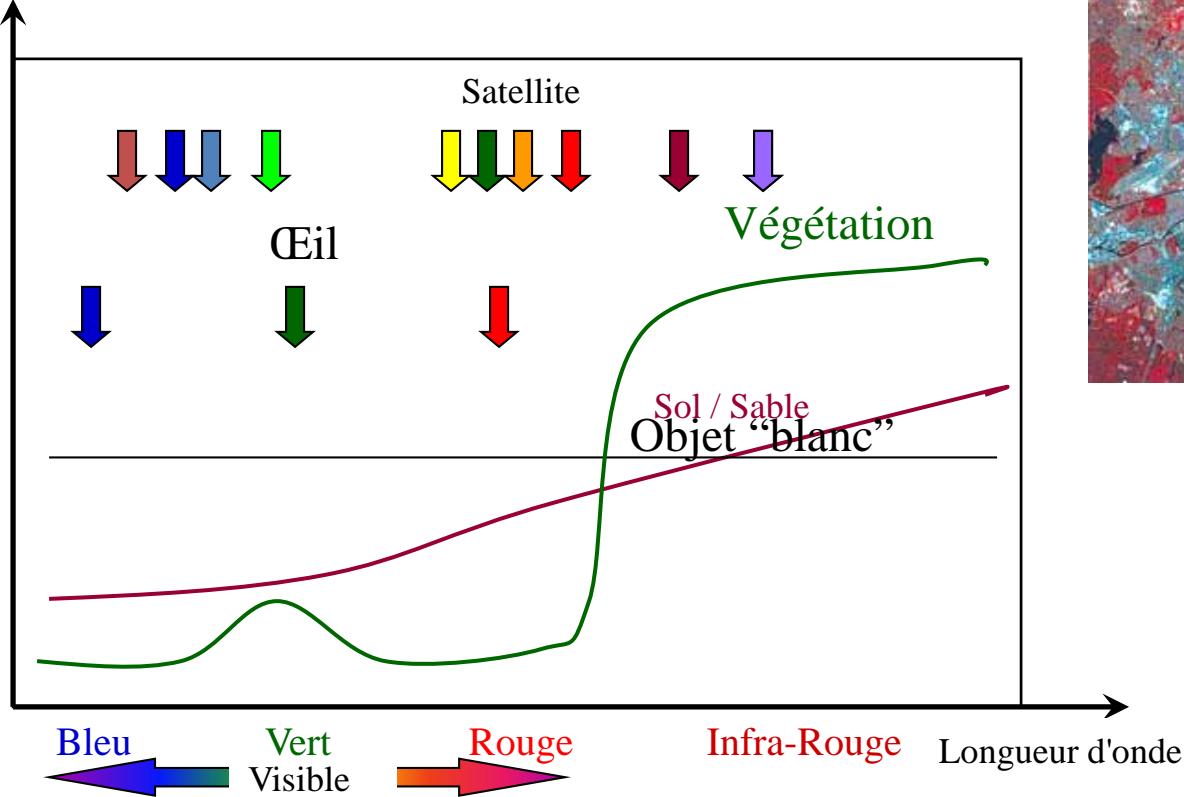
Seule image d'une portion significative de la Terre en vraie couleur (Apollo XVII)
Observation des systèmes nuageux



L'œil humain est sensible à une toute petite fraction du spectre solaire.
Les instruments peuvent détecter des photons invisibles à l'œil nu.

Observation des "Couleurs"

Réflectance



Sur les images, le ton rouge indique une végétation active



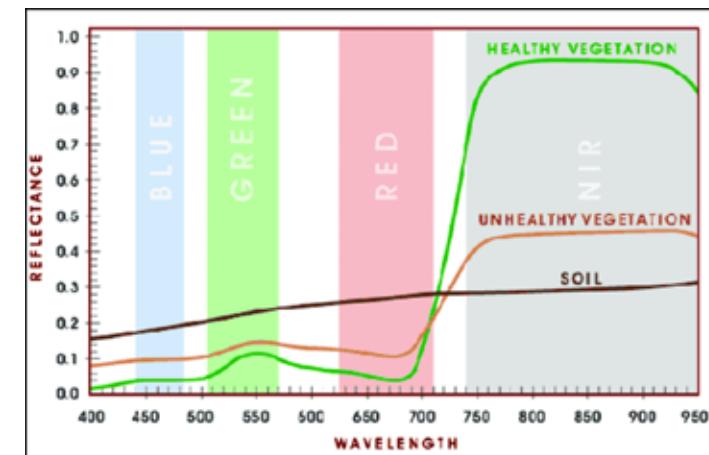
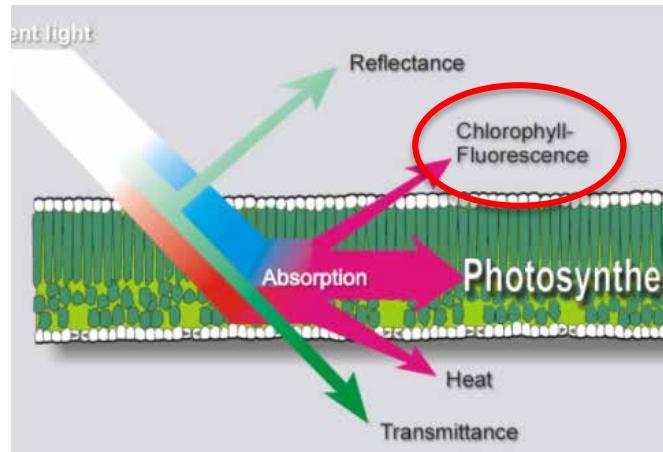
Quantifier l'activité photosynthétique

La chlorophylle absorbe la lumière visible (un peu moins le vert)

Elle n'absorbe pas/peu la lumière du proche infrarouge

La mesure de la lumière solaire réfléchie permet de détecter, et de quantifier, l'activité photosynthétique

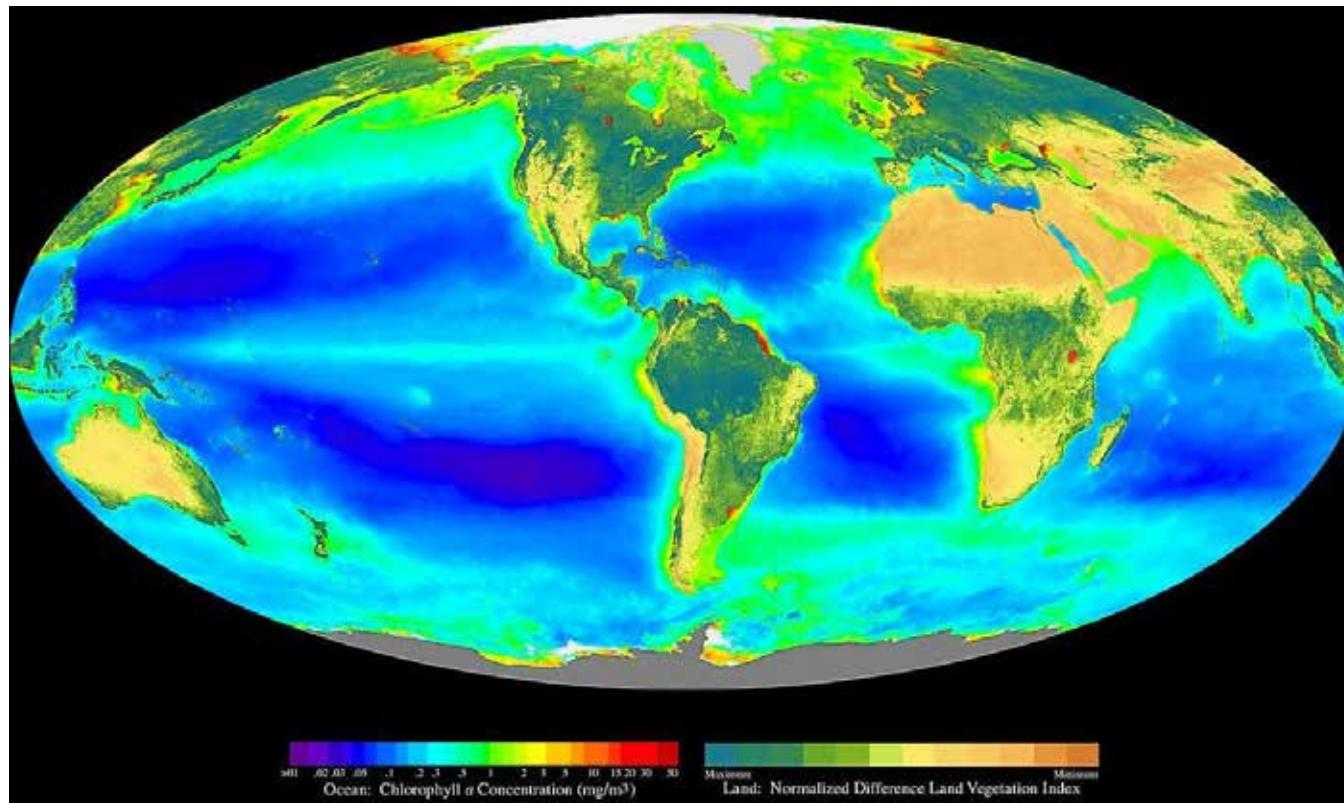
Une autre technique en développement observe la fluorescence de la végétation dans des bandes spectrales très fines



<= Visible => <=IR Proche =>

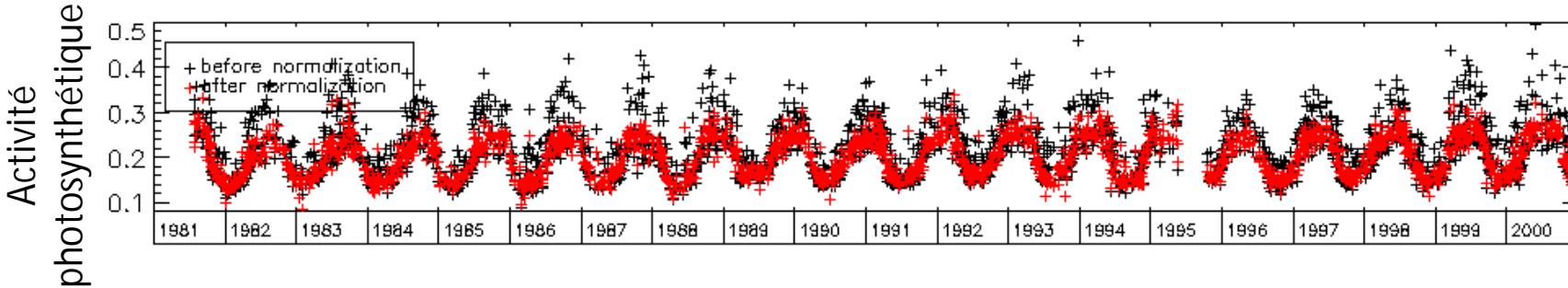
Productivité " primaire "

L'observation spatiale permet de quantifier la quantité de carbone fixée par le processus de photosynthèse. Cf leçon inaugurale



Cycle annuel de la végétation

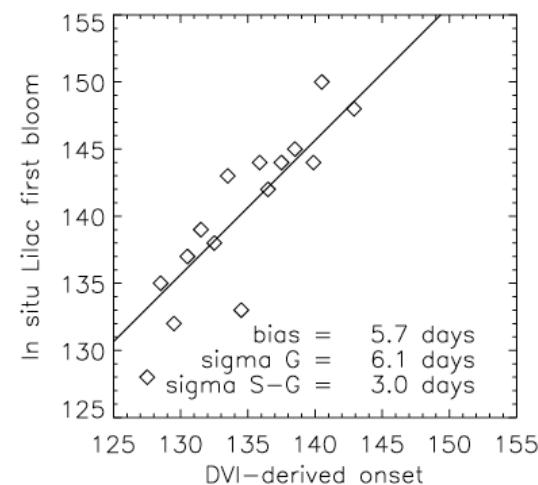
On utilise ces mêmes données spatiales pour suivre le cycle annuel de la végétation



Ces observations peuvent être utilisées pour détecter les dates de débourrage et de senescence de la végétation

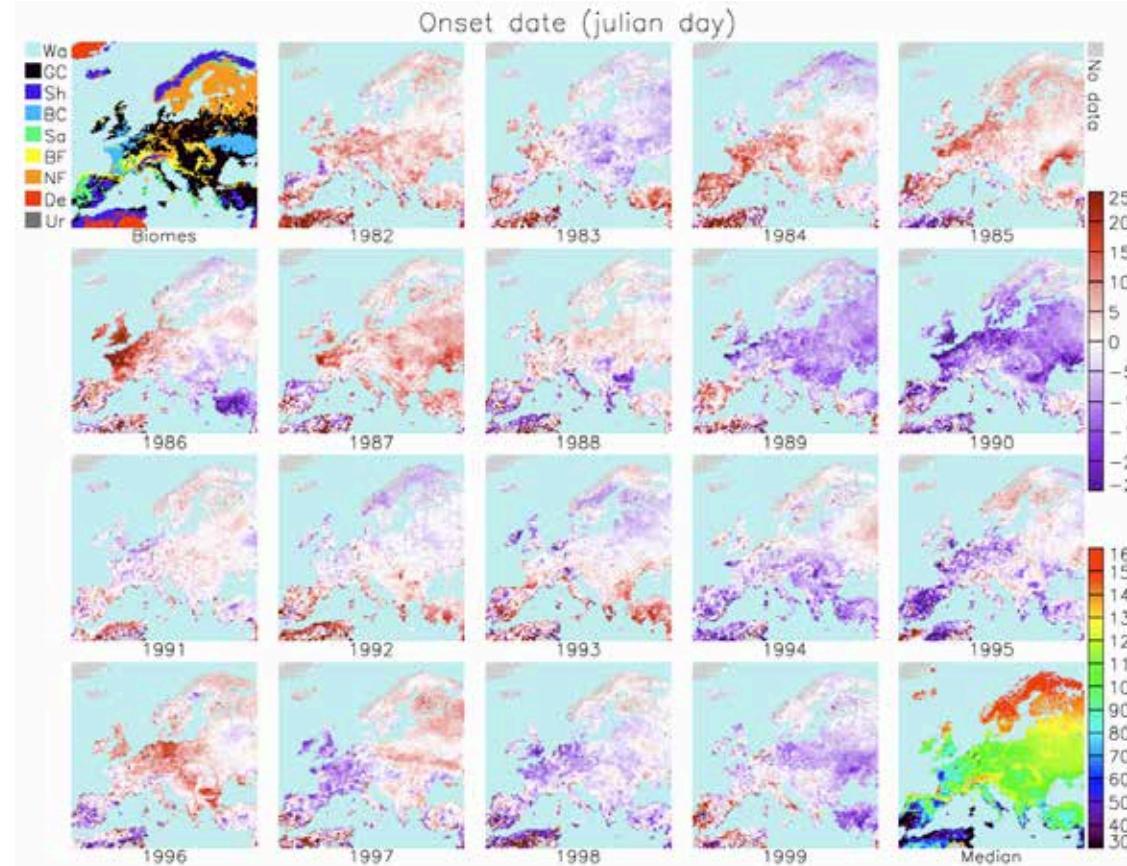
Bon accord avec les observations in-situ sur un site d'étude

Permet de calibrer les modèles qui décrivent le fonctionnement de la végétation



D'une année à l'autre, la végétation démarre plus ou moins tôt en fonction des températures de la fin d'hiver et début du printemps

Tendance en lien avec le changement climatique + variabilité inter-annuelle

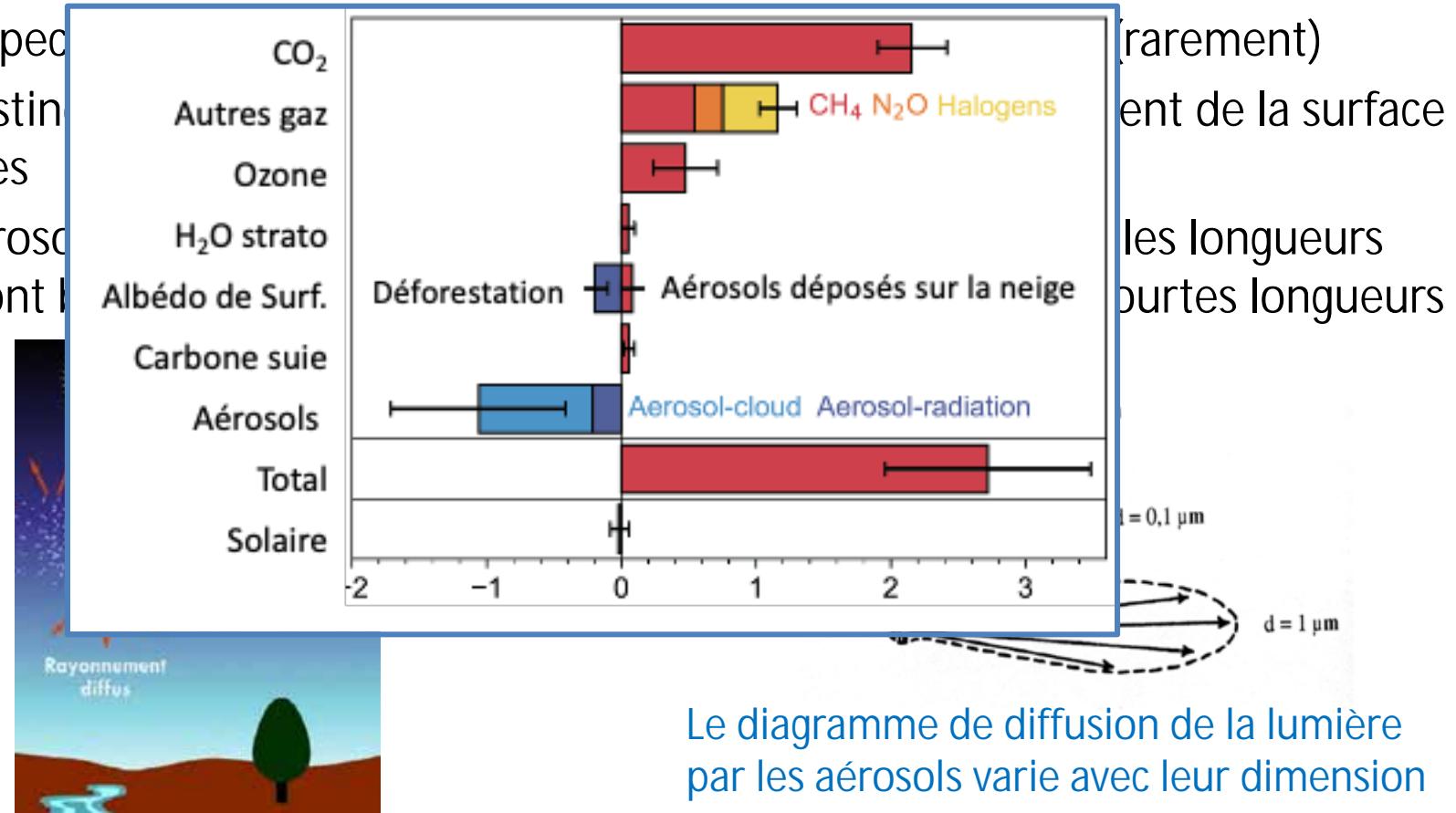


On mesure la lumière solaire diffusée par les aérosols en direction du satellite

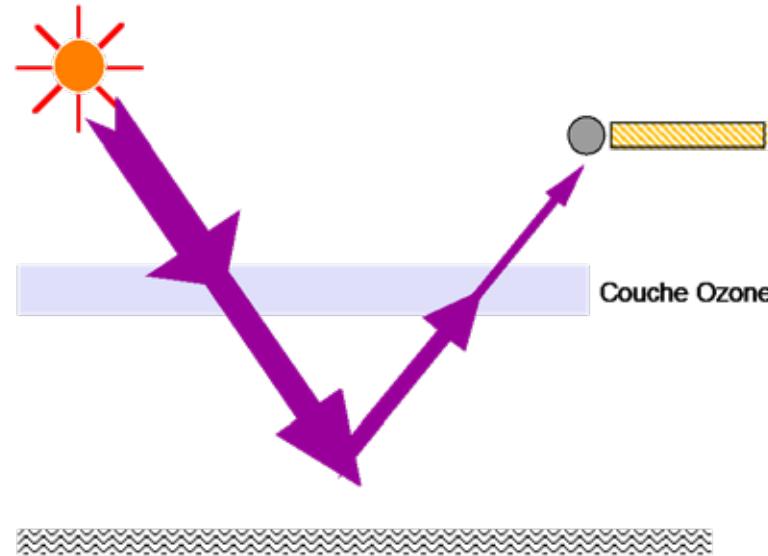
Information spec

Difficile de distin
ou des nuages

Les "gros" aérosol
d'onde (ils sont l
d'onde.

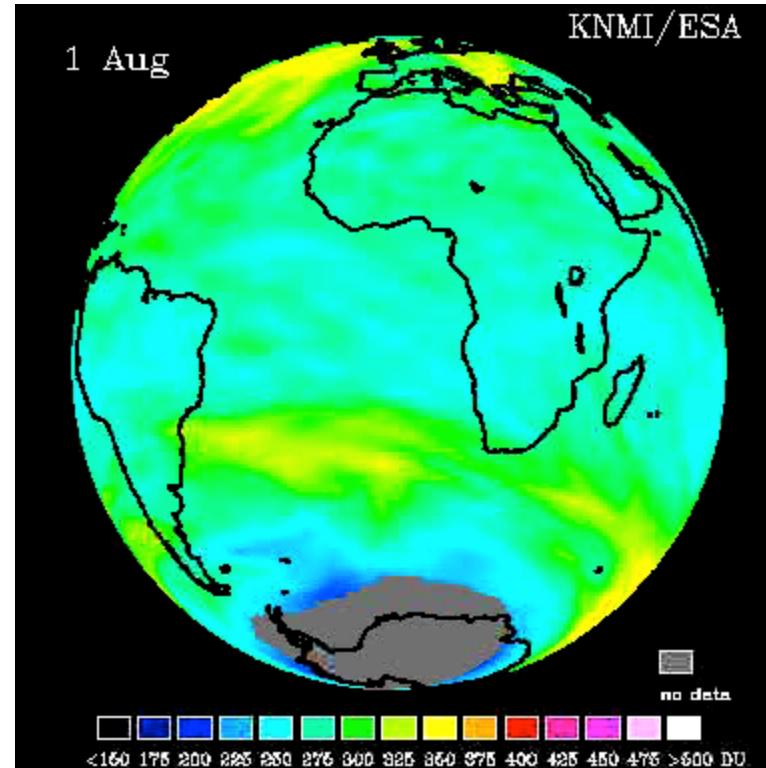


Le diagramme de diffusion de la lumière par les aérosols varie avec leur dimension



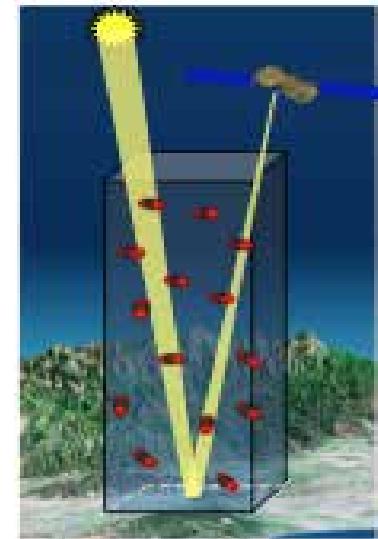
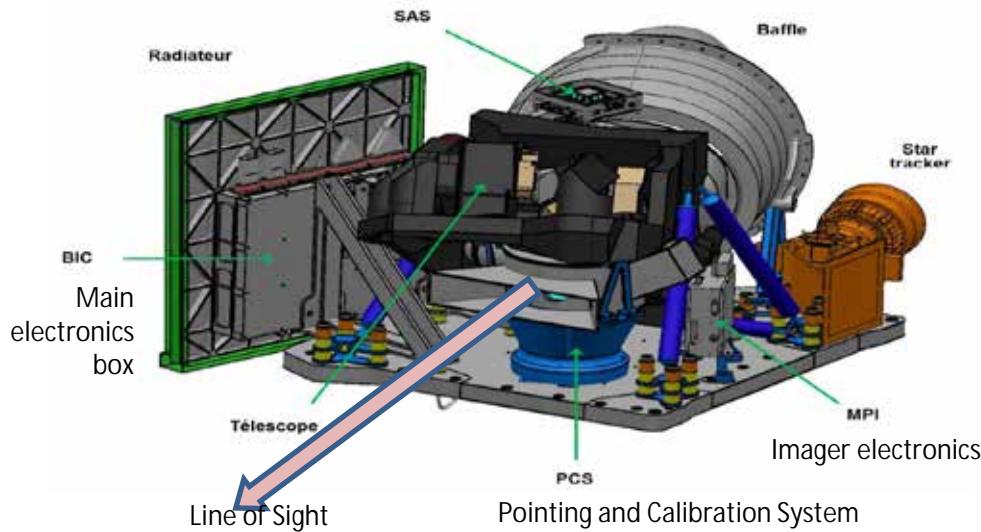
Le rayonnement solaire UV est absorbé en fonction de la quantité d'ozone dans la stratosphère
Plusieurs longueurs d'onde permettent de distinguer réflectance et absorption
Méthode similaire pour la mesure des oxydes d'azote

Août à Novembre
Printemps austral :

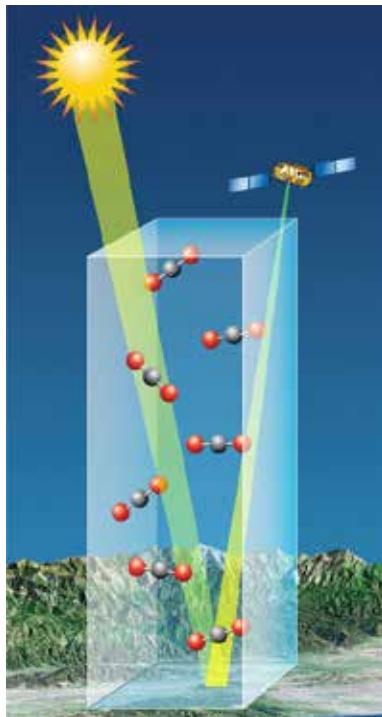


MicroCarb est une mission spatiale, développé par le CNES pour la mesure du CO₂ atmosphérique

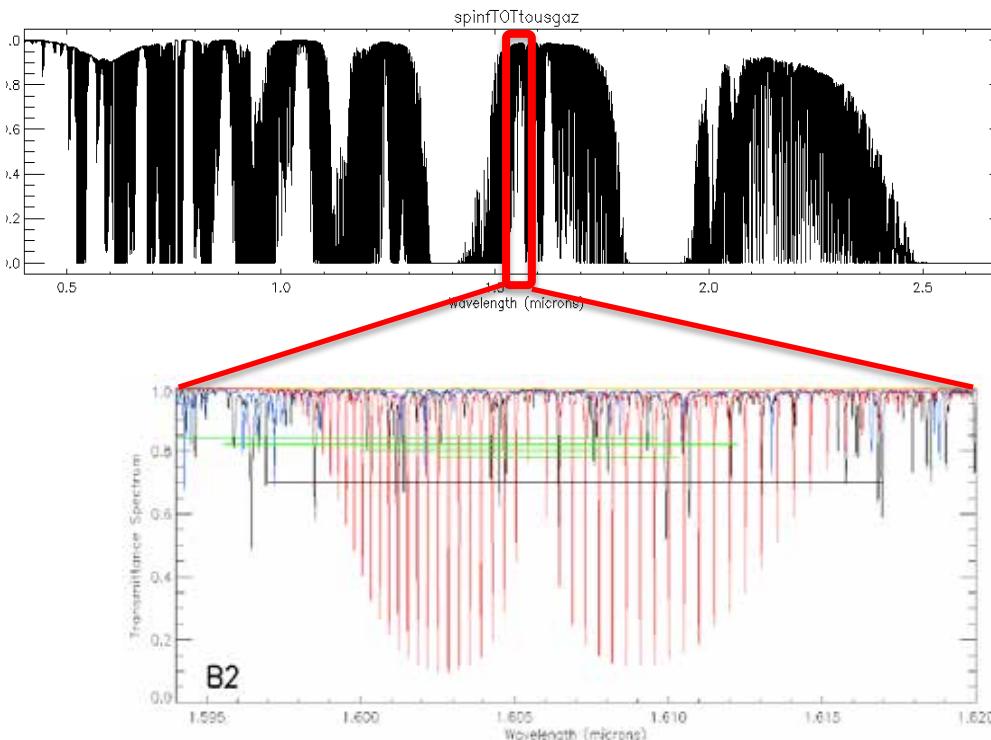
Lancement prévu à mi Juin 2025



Comment mesurer depuis l'espace ?



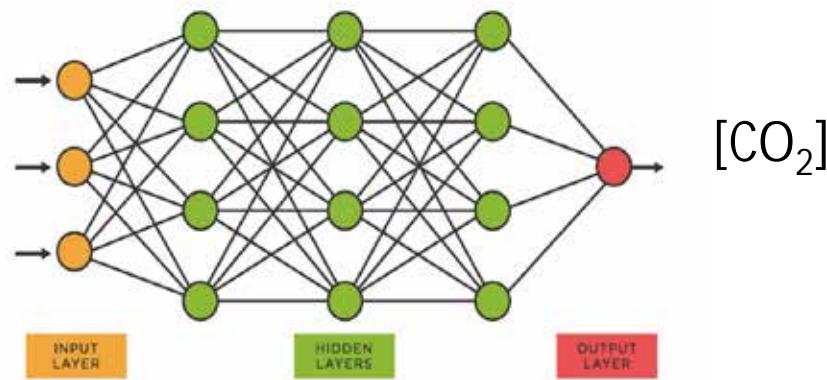
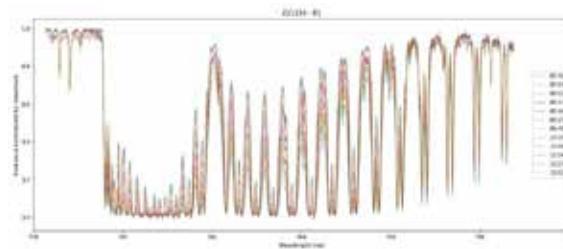
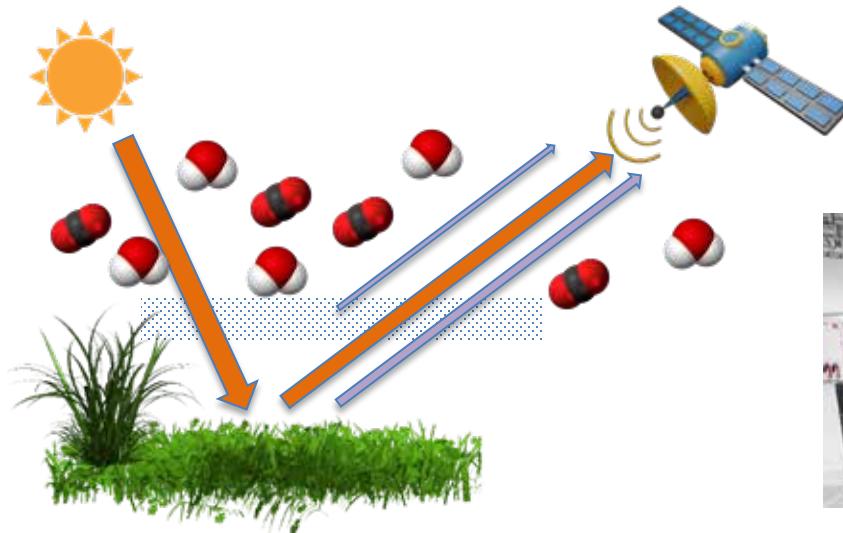
Transmission atmosphérique



A très haute résolution spectrale, on peut mesurer les raies d'absorption des différents gaz

La "profondeur" peut être reliée à la quantité de CO_2 (ou autre)

En pratique, c'est compliqué...



Le spectre électromagnétique



Rayons-gamma



Rayons-X

Infrarouge
“Solaire”

Infrarouge
“Thermique”



Micro-ondes

Microns

10^{-5}

0.1

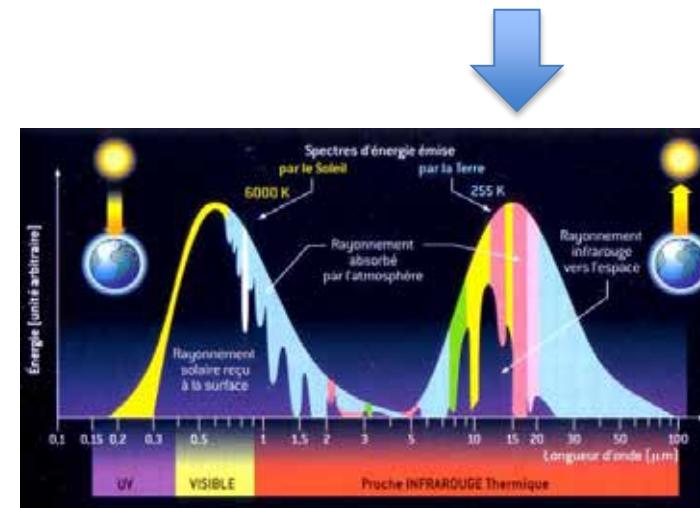
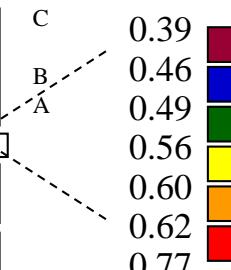
0.39

0.77

3.0

100.

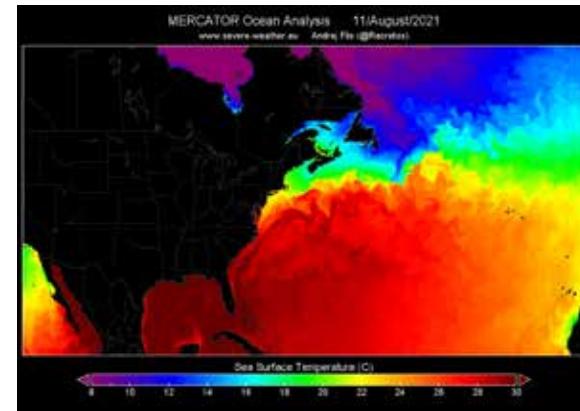
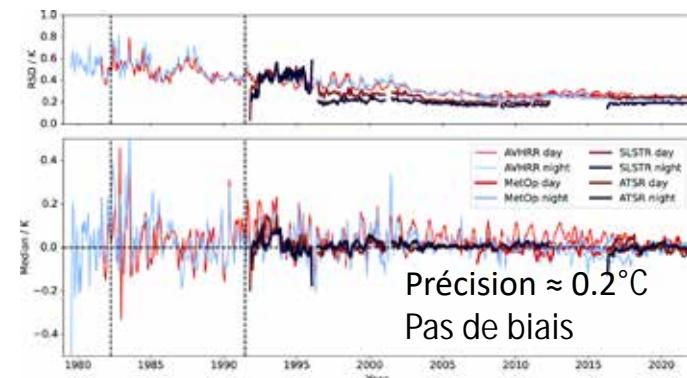
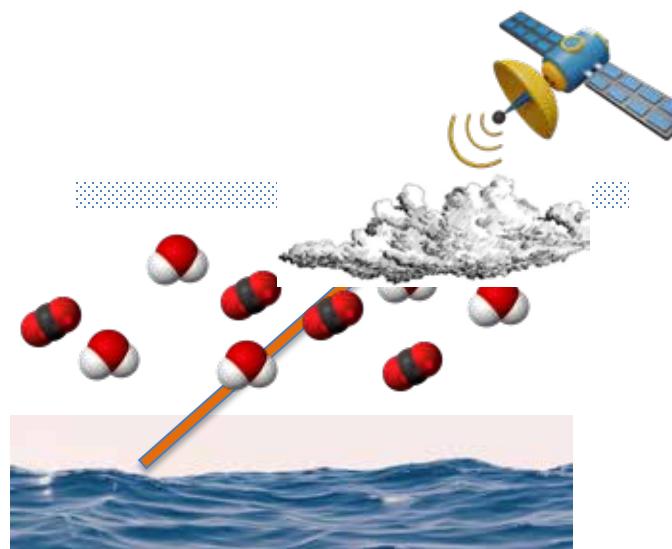
1000.

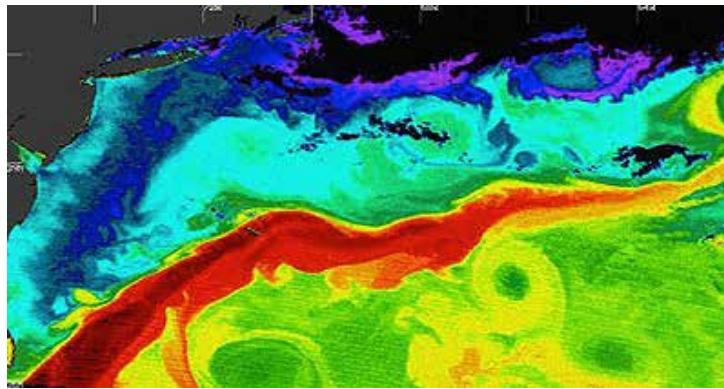


La surface de l'océan émet du rayonnement en fonction de sa température

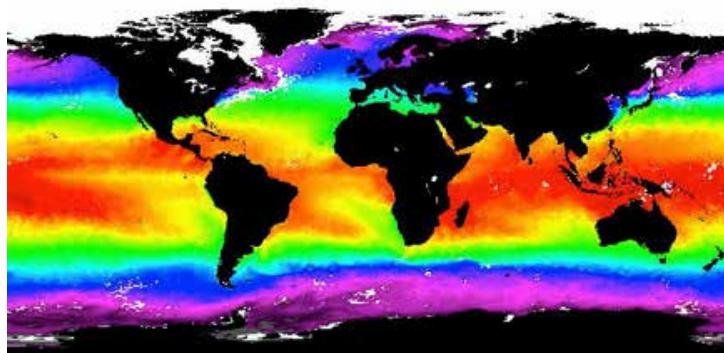
L'observation spatiale donne accès à la température de la surface

Mais...





Le Gulf Stream



Choix d'une bande spectrale dans l'infra-rouge thermique pour laquelle l'absorption est faible

La "lumière" infrarouge mesurée est convertie en température

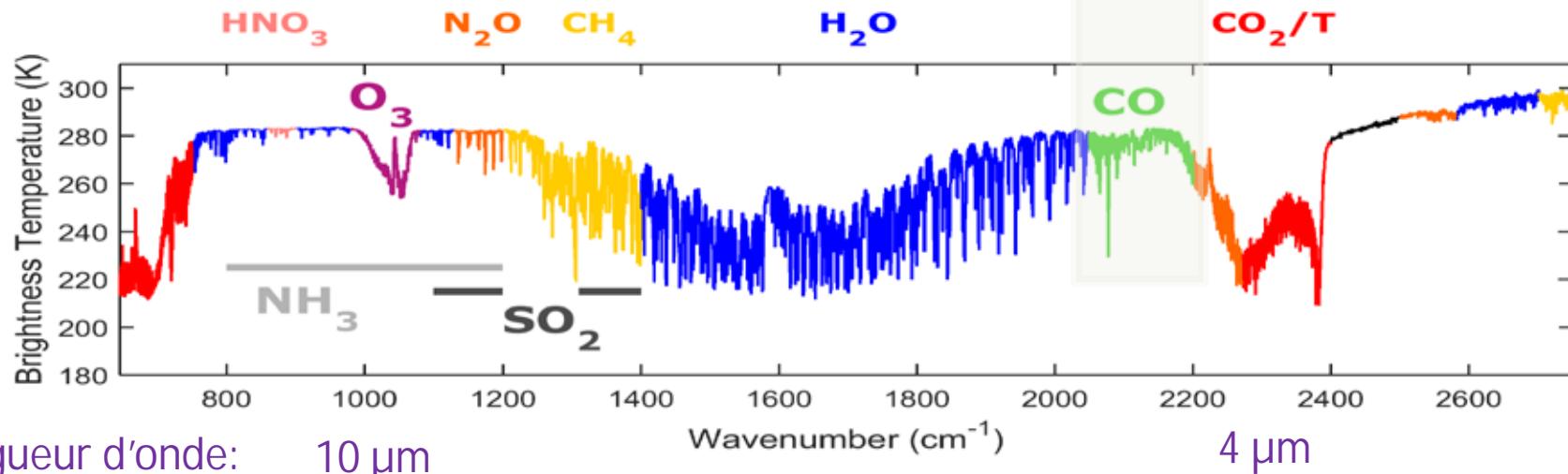
Correction des effets liés à la traversée de l'atmosphère

Pour s'affranchir du problème des nuages, on peut faire une mesure similaire en micro-ondes

Le spectre d'émission dans l'infrarouge

Il y a plein d'information sur la composition de l'atmosphère dans le spectre infrarouge émis par l'atmosphère.

Cf séminaire de Cathy Clerbaux. Suivi de la pollution atmosphérique



Longueur d'onde: 10 μm

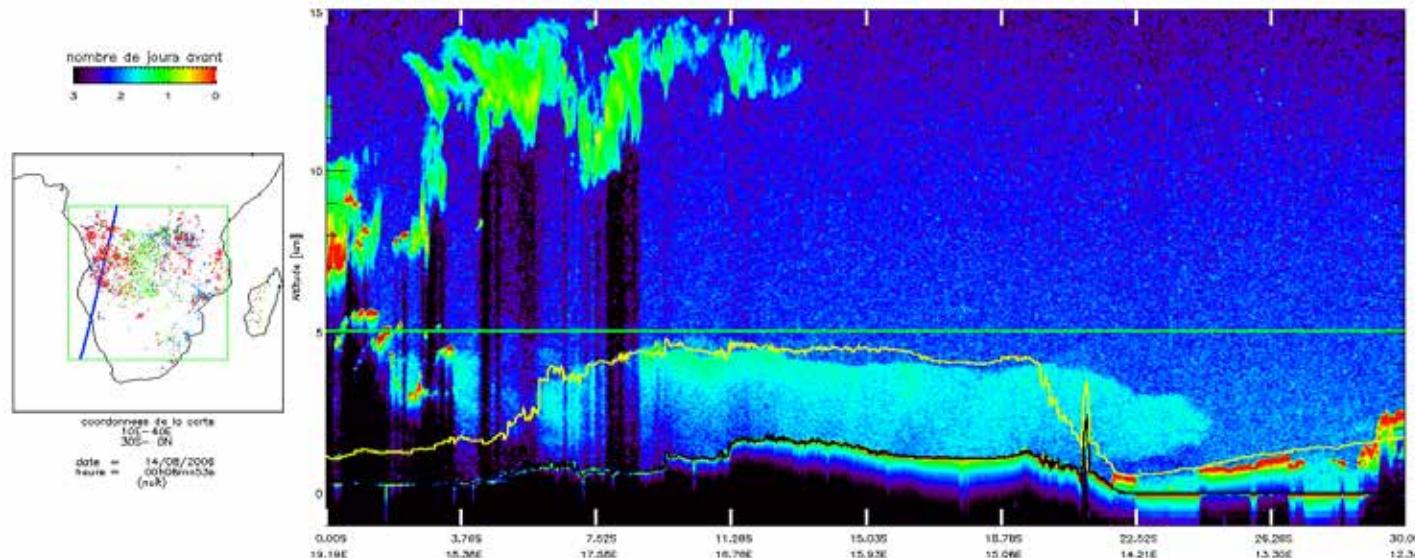
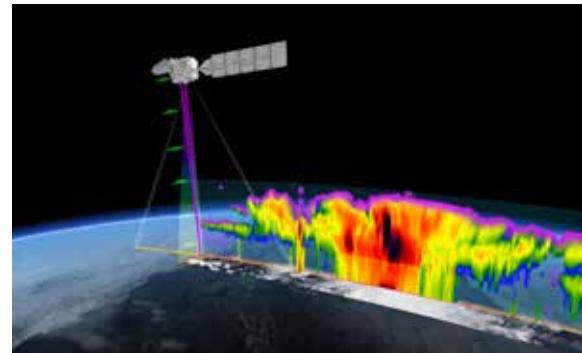
Wavenumber (cm^{-1}) 4 μm

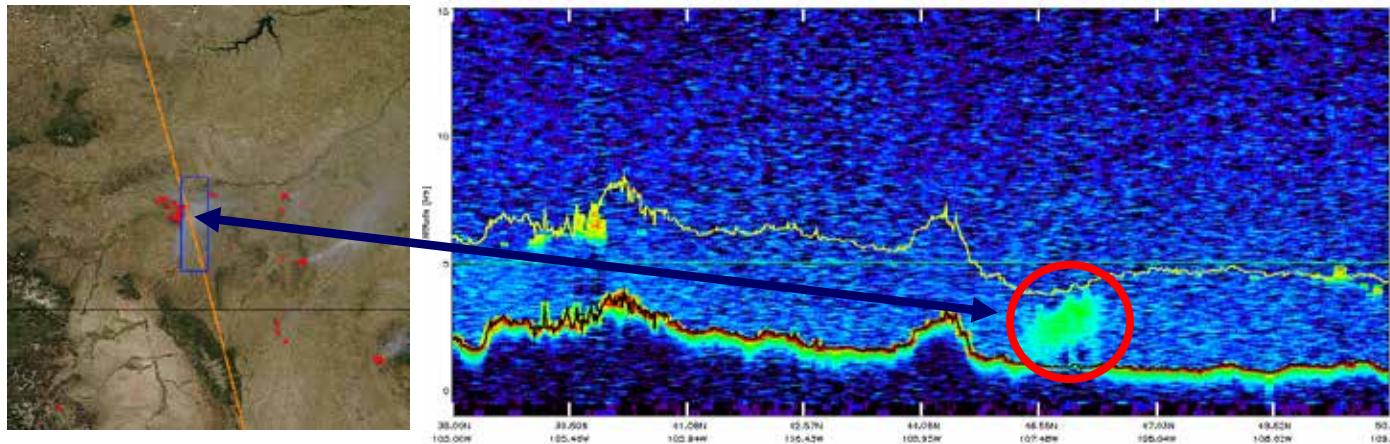
L'instrument émet un pulse de lumière dont une (petite) partie est renvoyée vers le satellite

Le décalage en temps du signal reçu permet une mesure résolue sur la verticale

Calipso (NASA/CNES) lancé en 2006

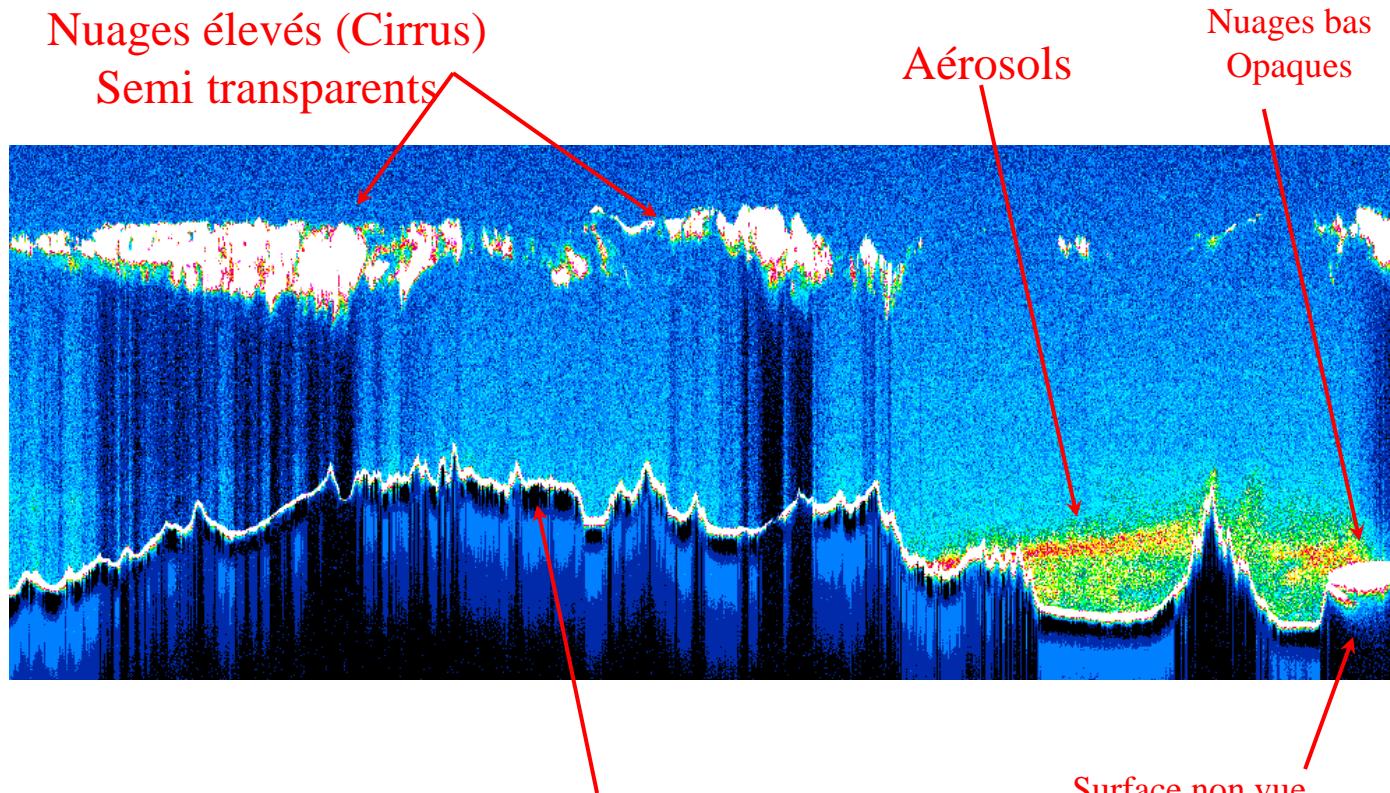
EarthCare, lancé en Mai 2024





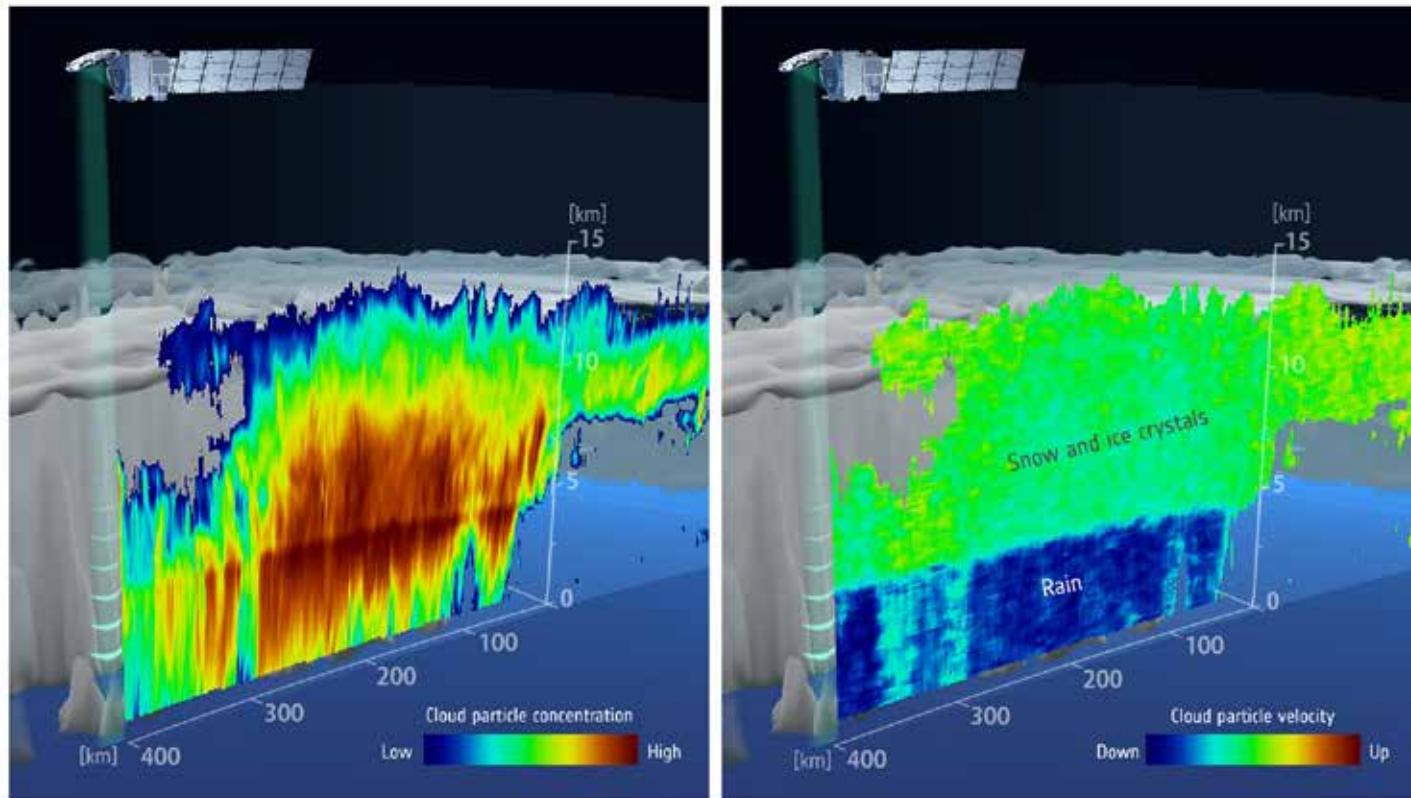
L'observation lidar permet d'observer la distribution verticale des aérosols transportés dans le panache issu du feu

Il faut un peu de chance pour que le satellite passe au bon endroit et au bon moment...



Le lidar permet de voir le sommet du nuage et de sonder les nuages optiquement fins, mais ne permet pas de voir l'intérieur des nuages épais

Le radar émet une onde « micro-onde » qui traverse les nuages. Adapté pour voir le profil du nuage sur la verticale



Depuis 1993, on mesure le niveau des mers par satellite

Emission radar. On mesure le temps nécessaire
à l'onde pour faire un aller-retour

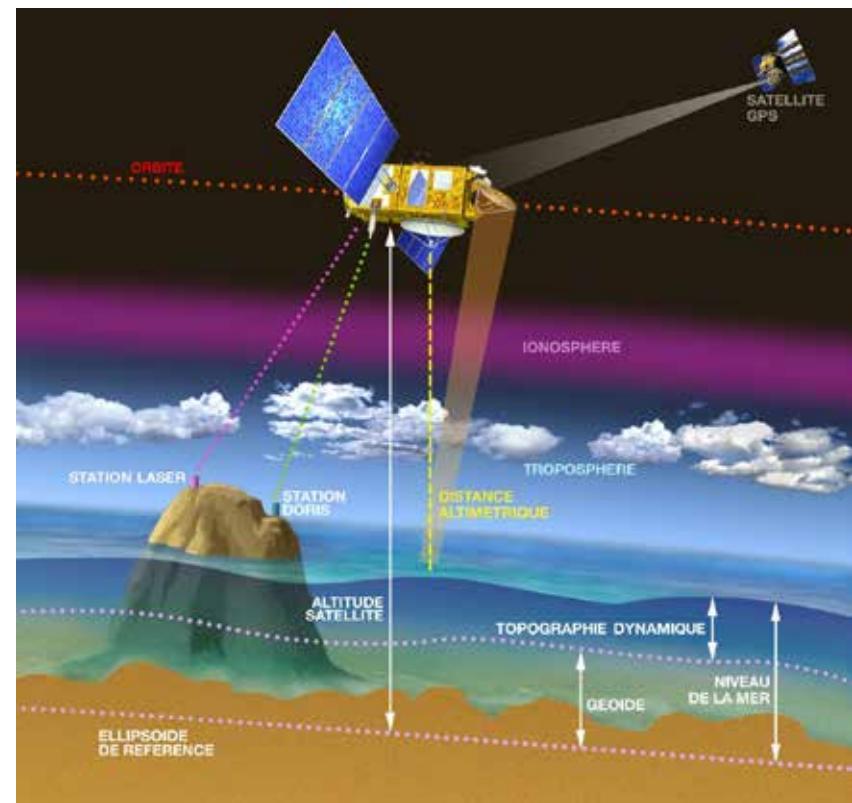
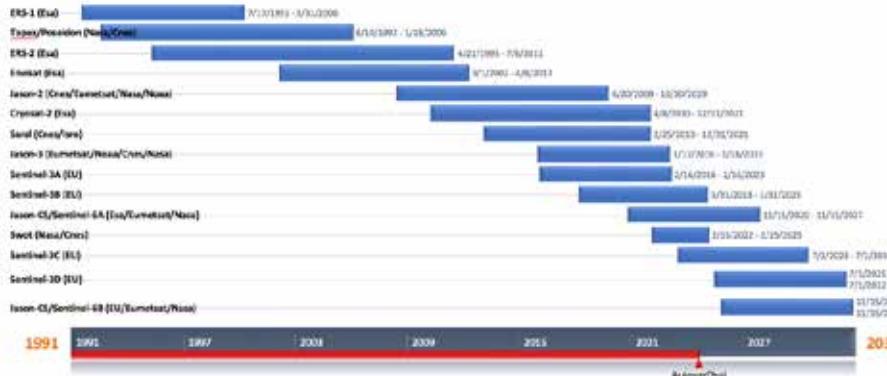
Précision individuelle de l'ordre du cm

Applications

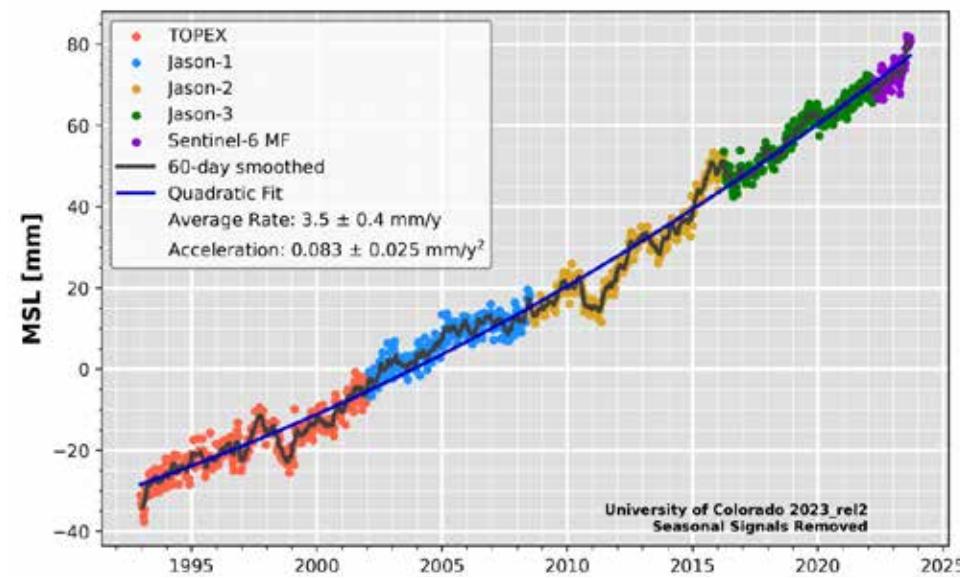
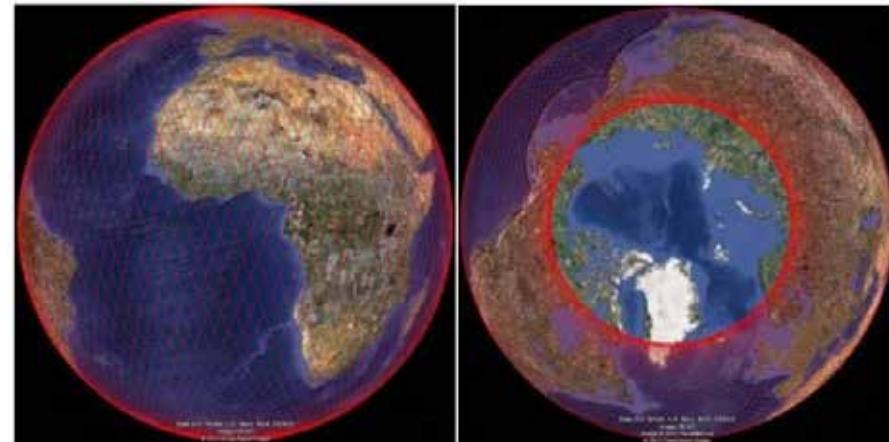
- Géodésie
- Courants
- Vagues
- Niveau des mers

Cf cours "niveau des mers"

Instruments les plus récents observent lacs et rivières



Couverture globale mais perturbée
proche des côtes



Sur 1993-2023

Vitesse moyenne : $3.5 \pm 0.4 \text{ mm/an}$

Accélération : $0.83 \pm 0.25 \text{ mm/an/décennie}$

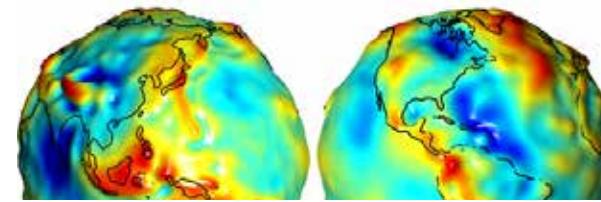
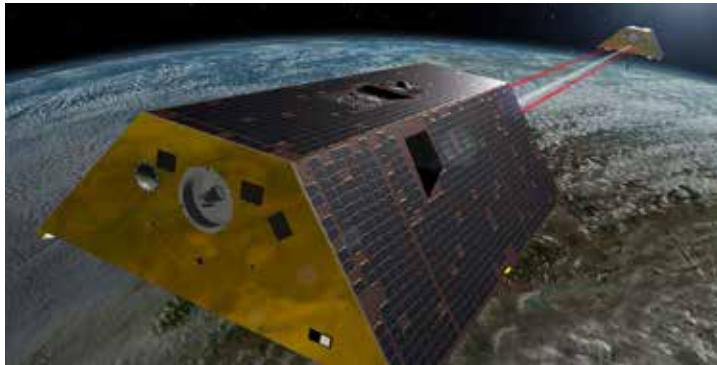
90s : 2,4 mm/an

00s : 3,2

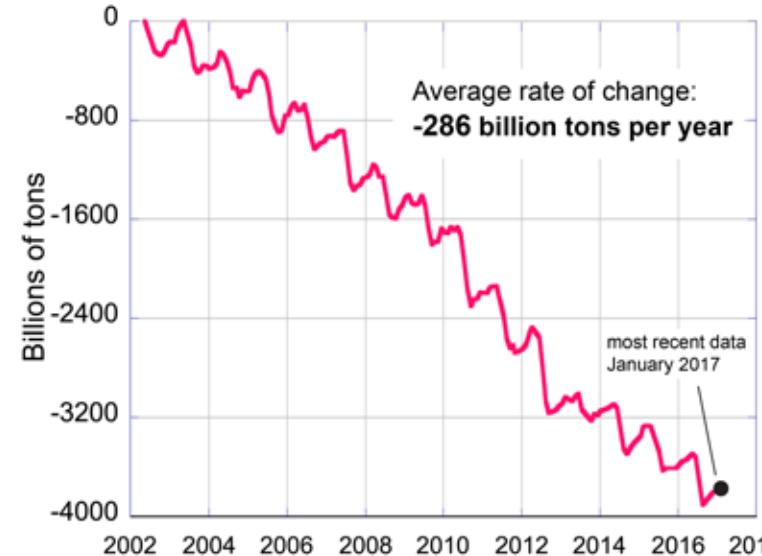
10s : 4,1

20s : 4,9

Les missions GRACE et GRACE F-O, composées de deux satellites en orbite synchronisée, distants de 220 km
Les déplacements relatifs des deux satellites permettent de mesurer le champ de gravité



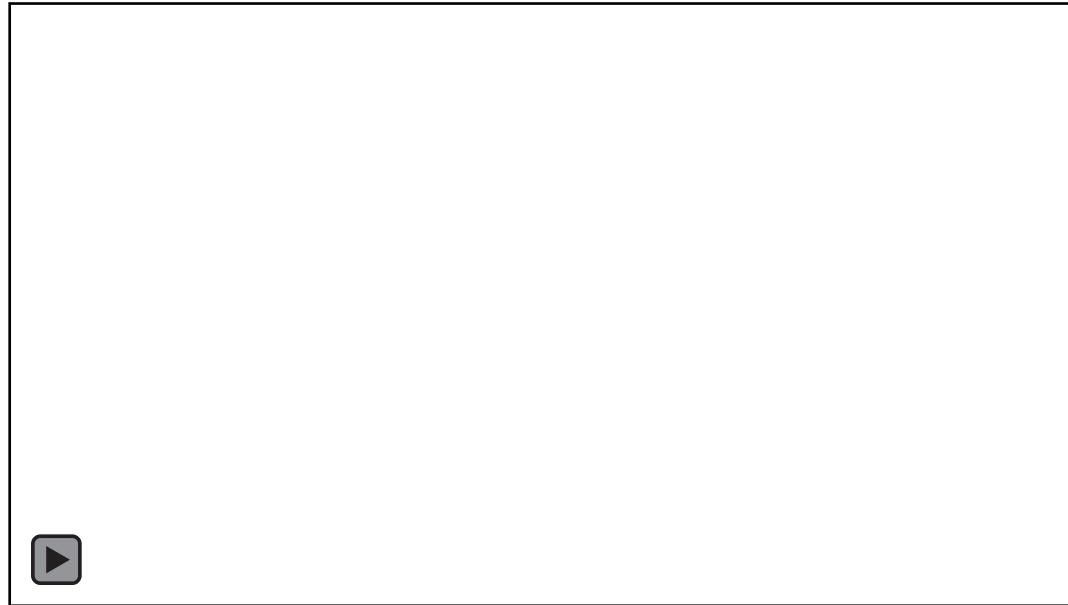
Mass Loss of Greenland's Ice Sheet since April 2002



Les variations temporelles de la gravité
renseignent sur le déplacement des masses d'eau

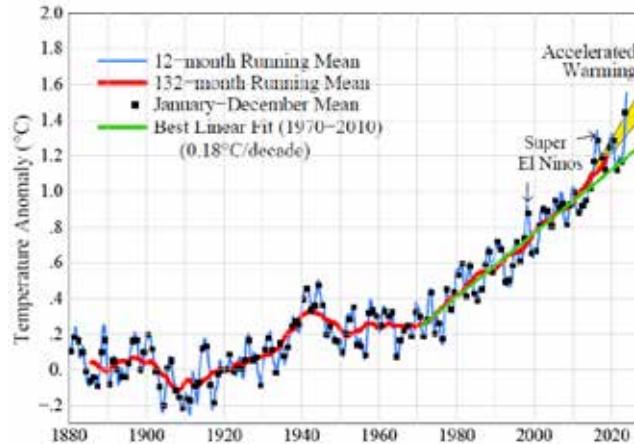
- Nappes phréatiques
- Calottes glaciaires

C'est ainsi que on mesure, par exemple,
la perte de masse du Groenland



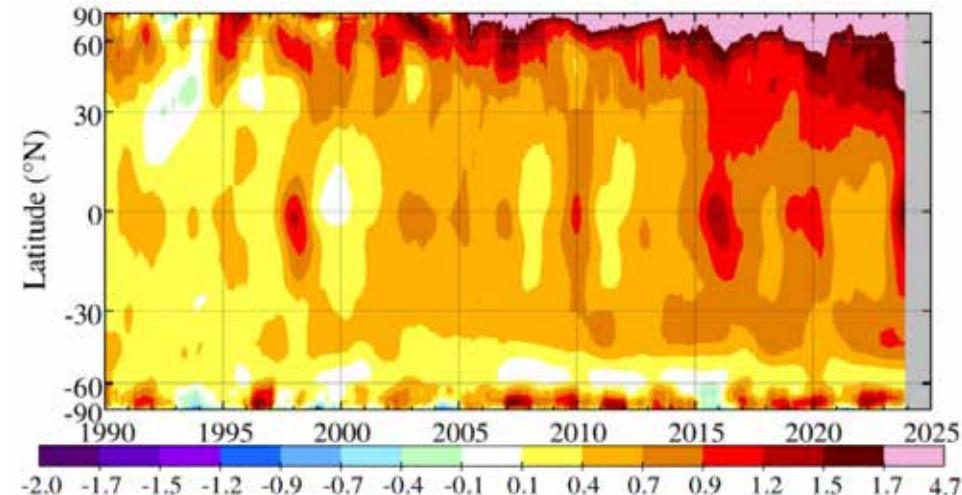
La mission CERES de la NASA mesure les flux "solaire réfléchi" et "infra-rouge émis" au sommet de l'atmosphère. On peut ainsi mesurer le déséquilibre radiatif et donc le surplus d'énergie qui rentre dans le système Terre
+ impacts des nuages

Accélération du réchauffement ?

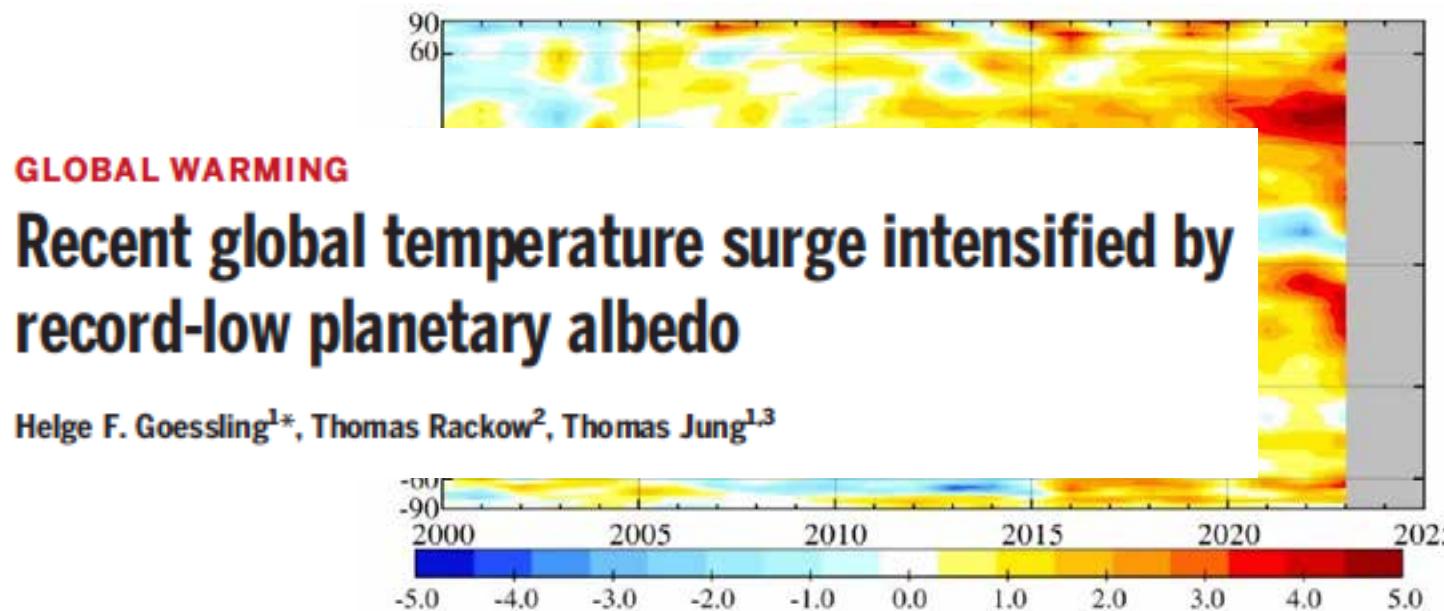


Les années récentes montrent une température moyenne du globe qui est au dessus de la tendance calculée sur 1970-2010. Pourquoi ? Doit-on en déduire qu'il une accélération du réchauffement ?

Le réchauffement récent est particulièrement marqué dans l'hémisphère Nord, et en particulier aux « moyennes latitudes » (30-60 N)



Mesures de la mission spatiale CERES indique une diminution de l'albédo de la Terre (augmentation du rayonnement solaire absorbé).



Hypothèses : Variabilité naturelle

- Diminution des aérosols (baisse des émissions pour contraintes sanitaires)
- Diminution des nuages (rétroaction du réchauffement)

Les satellites sont devenus indispensables à l'étude des climats

Très grande diversité des orbites, satellites, instruments, techniques d'observation

L'instrument ne mesure **jamais** directement le **paramètre recherché**. Il est nécessaire de développer des algorithmes qui traduisent la mesure (radiance dans certaines longueurs d'onde) pour l'interpréter

Les mesures au sol restent nécessaires car (i) ils apportent souvent une meilleure précision et (ii) ils permettent de valider les produits issus de l'observation spatiale

Collaborations entre les laboratoires de recherche, les agences spatiales (CNES, ESA, NASA, Eumetsat...) et les industriels