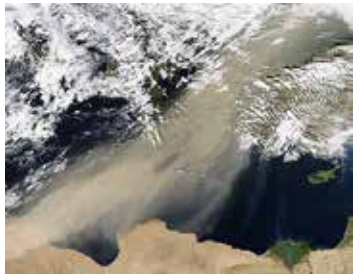
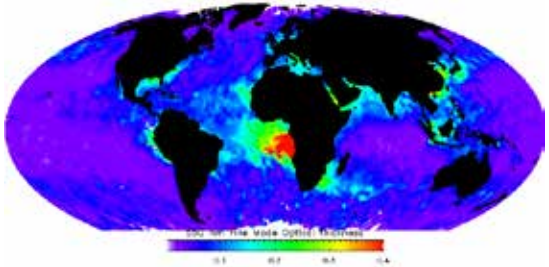
Chaire *Avenir Commun Durable*

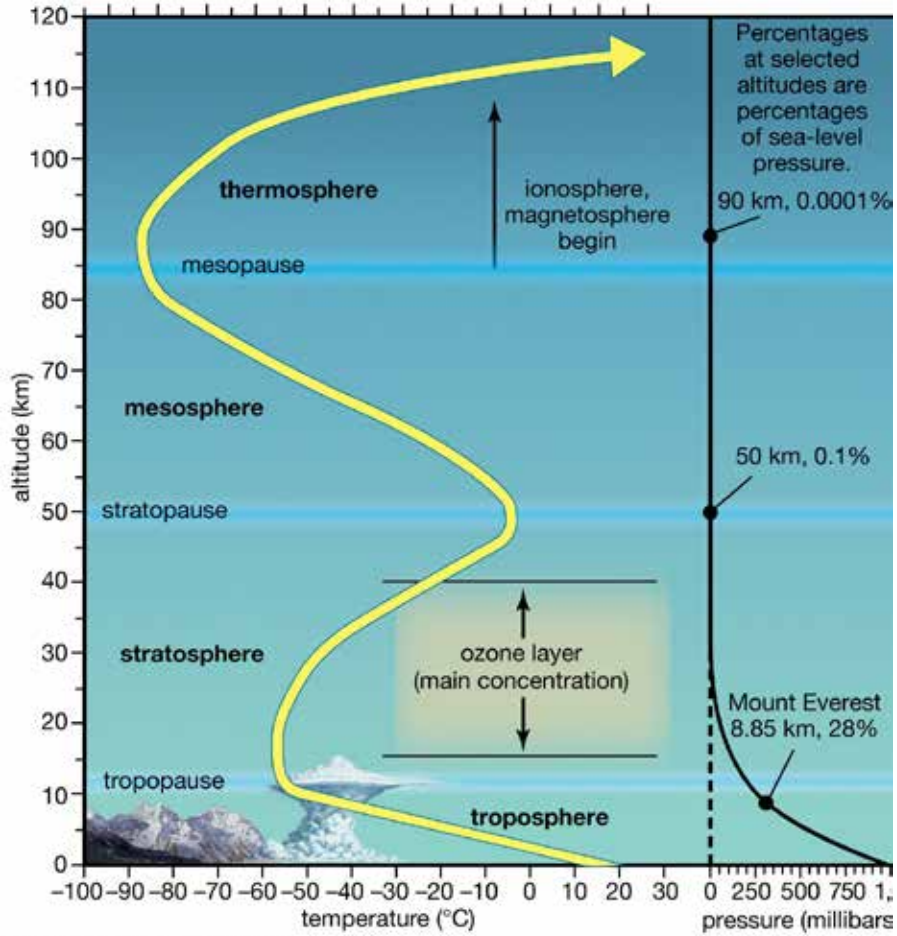
Aérosols naturels et anthropiques

François-Marie Bréon





L'atmosphère…



Dans l'atmosphère

Des gaz : Le 14 Novembre

Des aérosols : Aujourd'hui

Des nuages : Le 12 Décembre

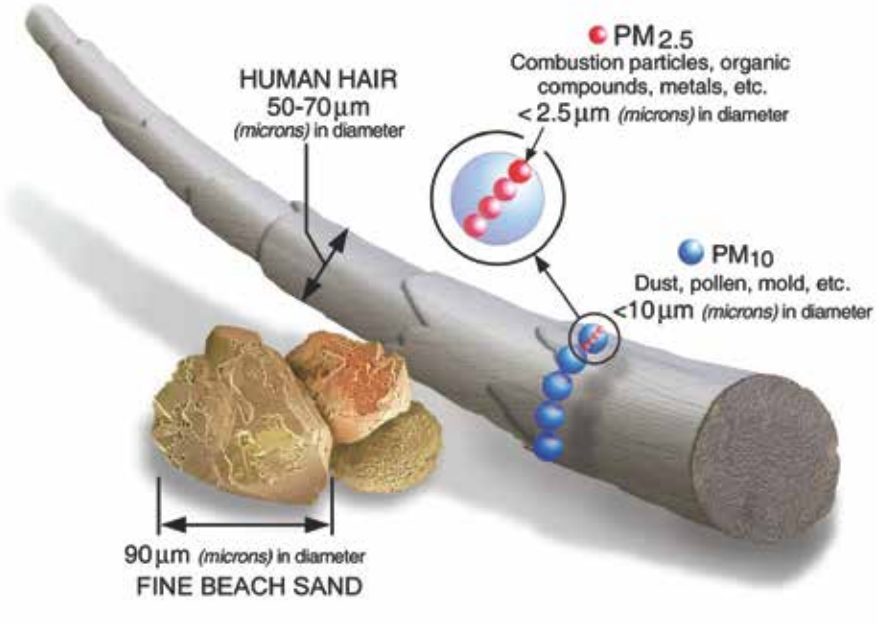
Epaisseur de l'atmosphère ≈ 100 km

Rayon de la Terre : ≈ 6400 km

Que sont les aérosols ?

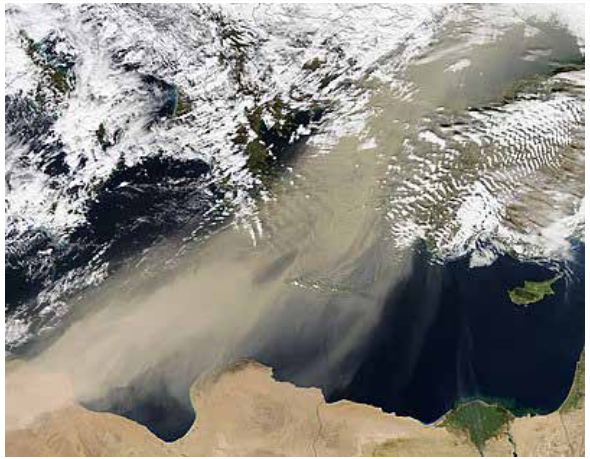
Par définition : Particules, solides ou liquides, en suspension dans l'atmosphère, à l'exception des nuages d'eau.

Dimensions ≈ 0.01 – 10 µm



Sources naturelles

Poussière désertique :



: Sels marins

Volcans :

: Feux

Sources anthropiques

:Transport

Industrie:

: Feux

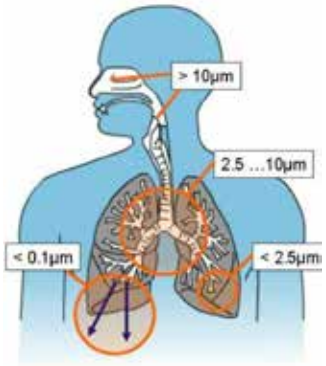
Agriculture :

: Chauffage au bois

Cuisine:

Pourquoi sont ils importants ?

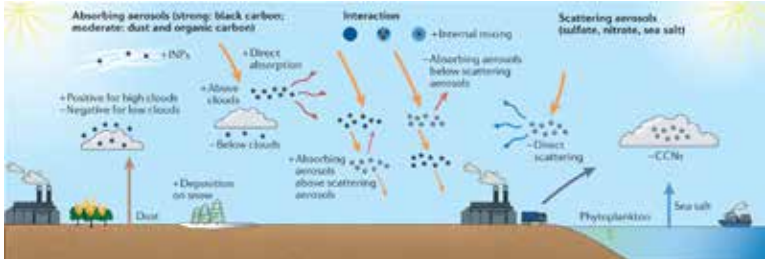
Impacts sur la santé



Impacts sur la visibilité (gêne aux transports)

Traffic aérien

Impact climatique

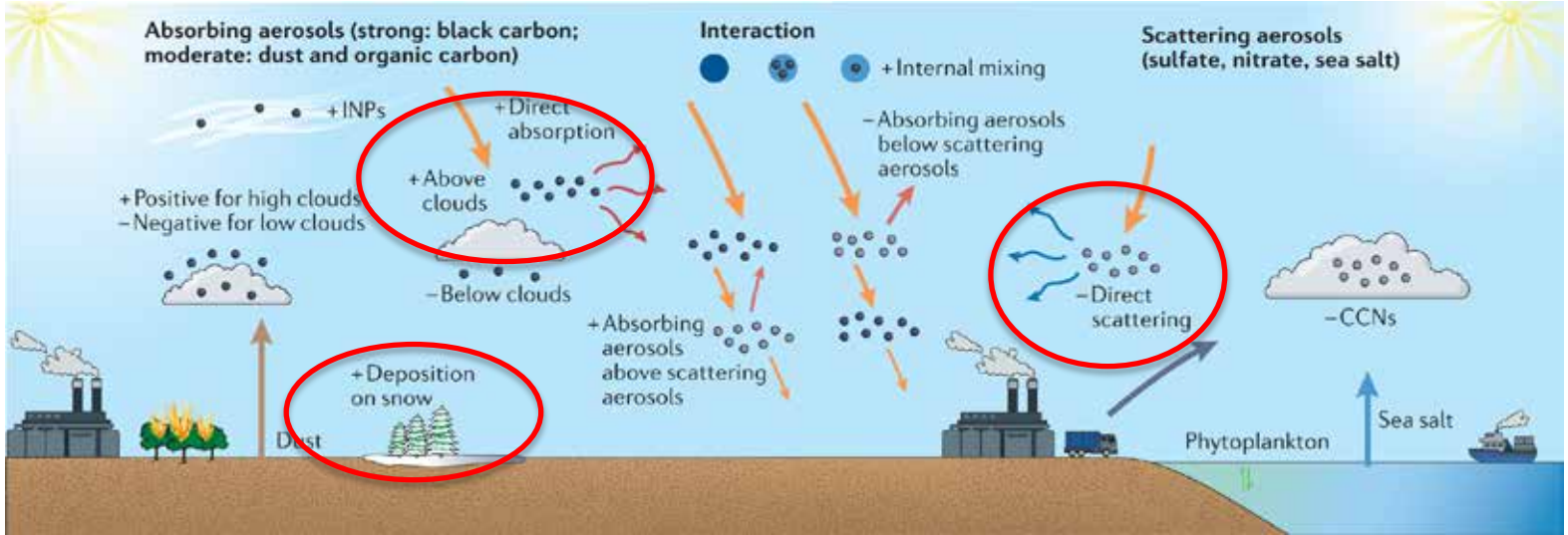


Impacts climatiques directs

Les aérosols diffusent le rayonnement solaire et, ce faisant, renvoient une partie de l'énergie solaire vers l'espace

Certains aérosols absorbent le rayonnement solaire et réchauffent l'atmosphère. Augmente la stabilité de l'atmosphère et modifie la convection

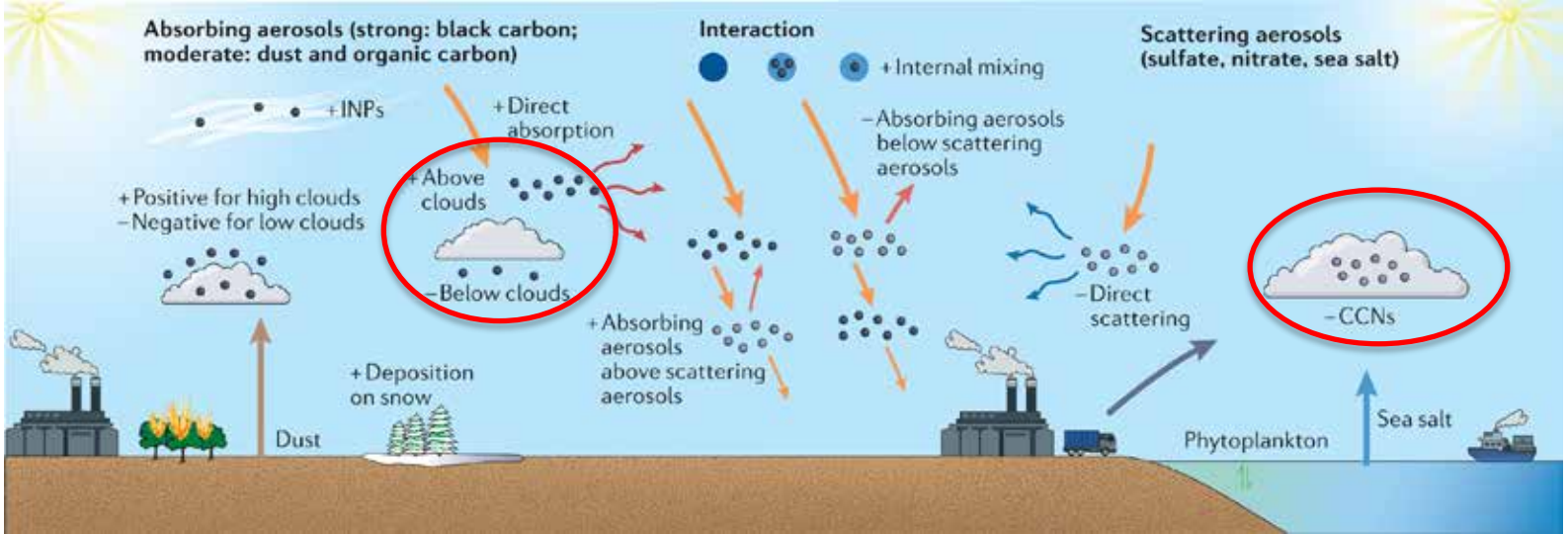
Certains aérosol, déposés sur la neige, diminuent son pouvoir de réflexion (albédo) et favorise la fonte



Impacts climatiques indirects

En réchauffant l'atmosphère, les aérosols peuvent conduire à une "évaporation" (ou la non-formation) de nuages

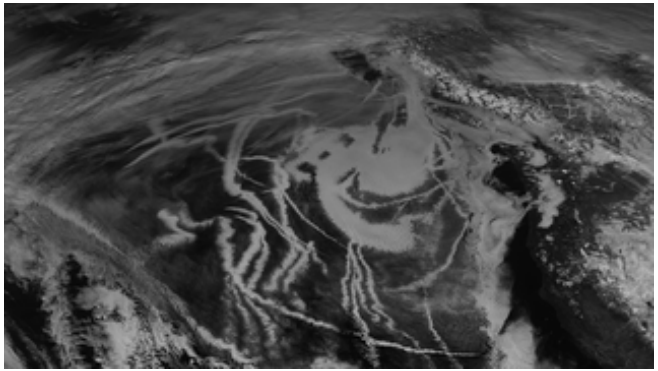
Les aérosols poussent à ce que les nuages soient formés de gouttes plus petites, et donc plus brillants. Aussi impact sur cycle de vie



Trainées de bateaux

En environnement “propre”, la fumée des bateaux est la principale source de “noyaux de condensation”

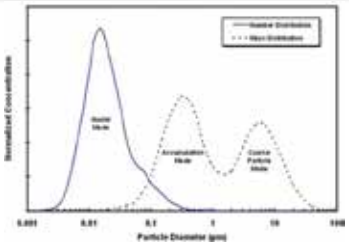
Impact très visible sur les champs de nuages de type stratocumulus



Caractéristiques

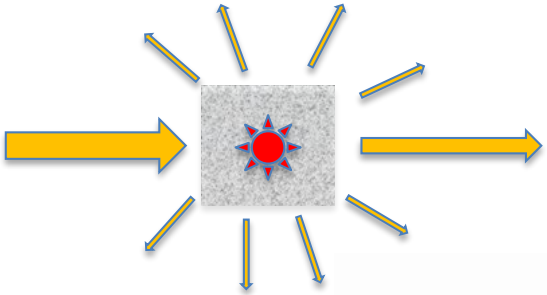
Taille

Distribution en taille très variable 0.01-10 µm



Composition chimique

Carbone, Sulfate, Nitrates, Sodium, minéraux…

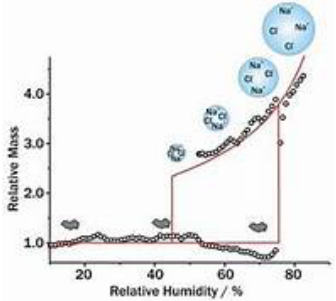


Capacité à absorber le rayonnement solaire

Caractérisée par l'albédo de simple diffusion

Hygroscopicité

Degrés de croissance en présence d'humidité



Concentration

En nombre par cm^3, ou $\mu g/m^3$

Note : Air "propre" : ≈1000 particules par cm^3

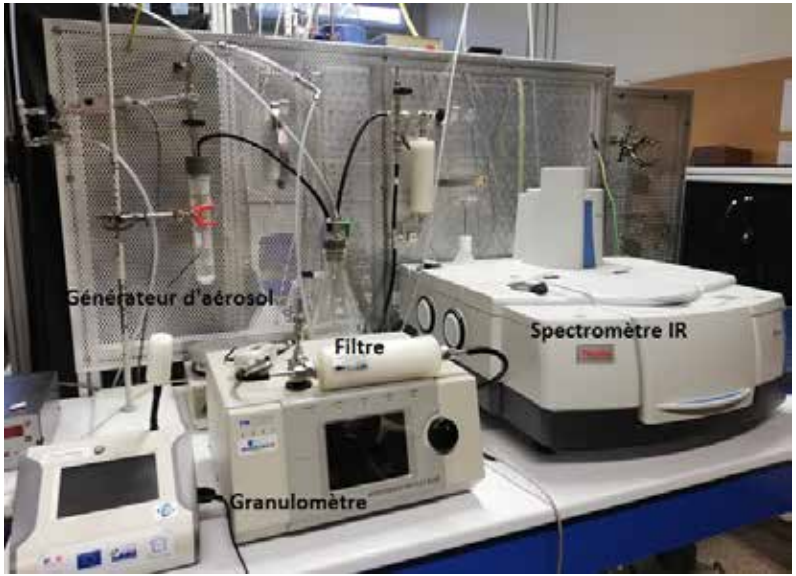
Mesures in-situ

Caractérisation complète : Nombre, taille, composition

Représentatif d'un lieu donné

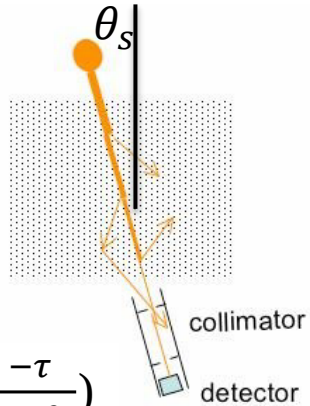
Mesure au sol ne permet pas de connaître la quantité totale dans l'atmosphère

Bien adapté à la problématique "santé"

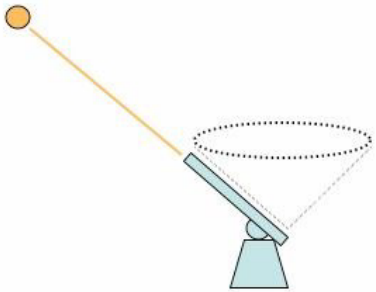


Télédétection passive depuis le sol

- Photomètre solaire qui vise le soleil ou l'atmosphère
- Mesure à plusieurs longueurs d'onde
- Mesure directe de l'épaisseur optique et de la "fonction de diffusion"
- Outils pour en déduire la charge en aérosols et ses caractéristiques
- Mesures intégrées sur la colonne (ne donne pas l'altitude)

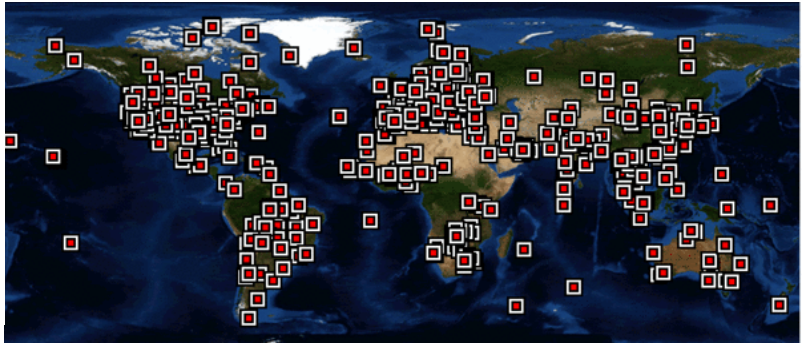


$$I = I_O \exp\left(\frac{-\tau}{cos\theta_s}\right)$$



Fonction de diffusion

Aeronet : 800 sites dans le monde



Télédétection active depuis le sol

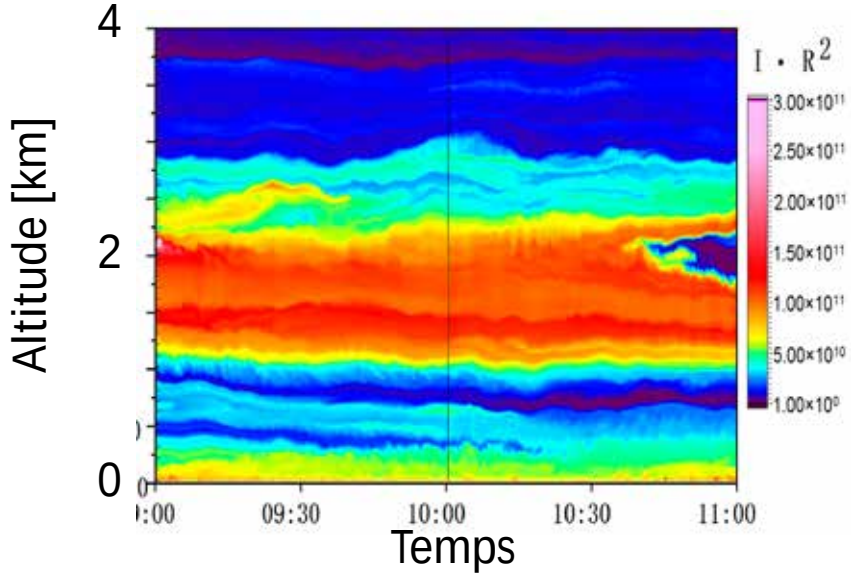
Mesure par Lidar

Envoie un pulse de lumière vers le haut

On mesure ce qui revient en fonction du temps

Donne accès à la distribution verticale des aérosols

Peu/pas de caractérisation physique



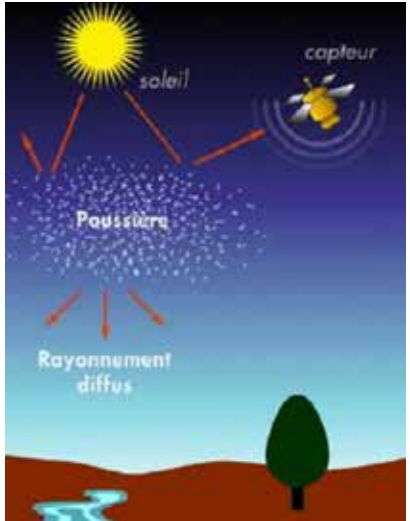
Télédétection spatiale

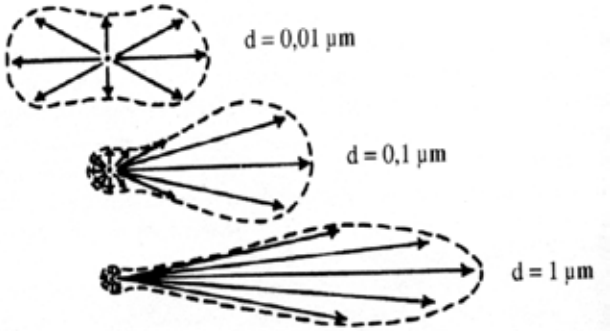
On mesure la lumière solaire diffusée par les aérosols en direction du satellite

Information spectrale (toujours), directionnelle (parfois), polarisation (rarement)

Difficile de distinguer ce qui est diffusé par les aérosols de ce qui provient de la surface ou des nuages

Les “gros” aérosols diffusent la lumière de manière identique à toutes les longueurs d’onde (ils sont blancs); les “petits” diffusent préférentiellement les courtes longueurs d’onde.



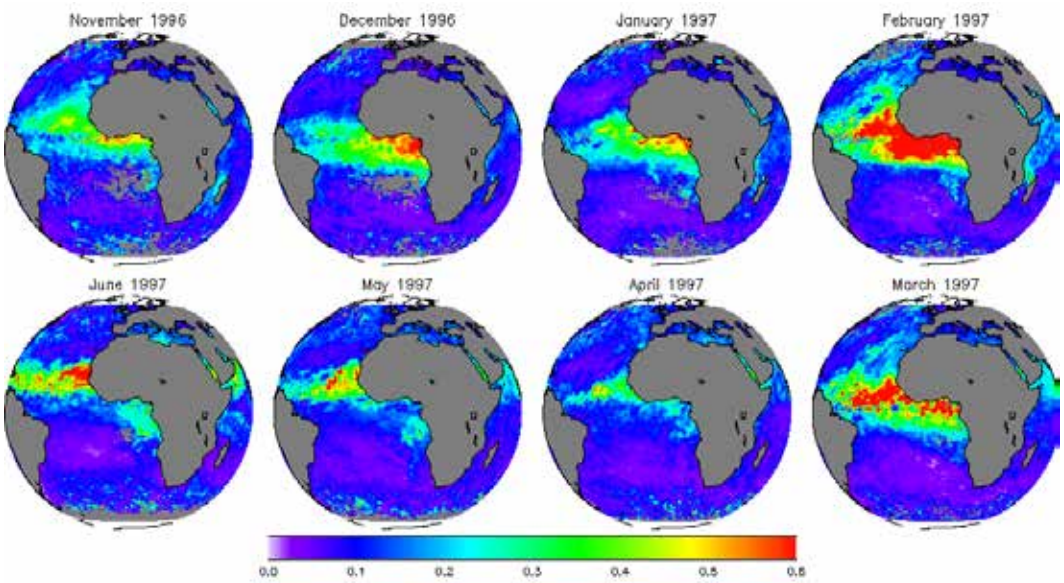


Le diagramme de diffusion de la lumière par les aérosols varie avec leur dimension

Premières mesures (90s)

Le satellite Meteosat permet d'observer une portion de la Terre.

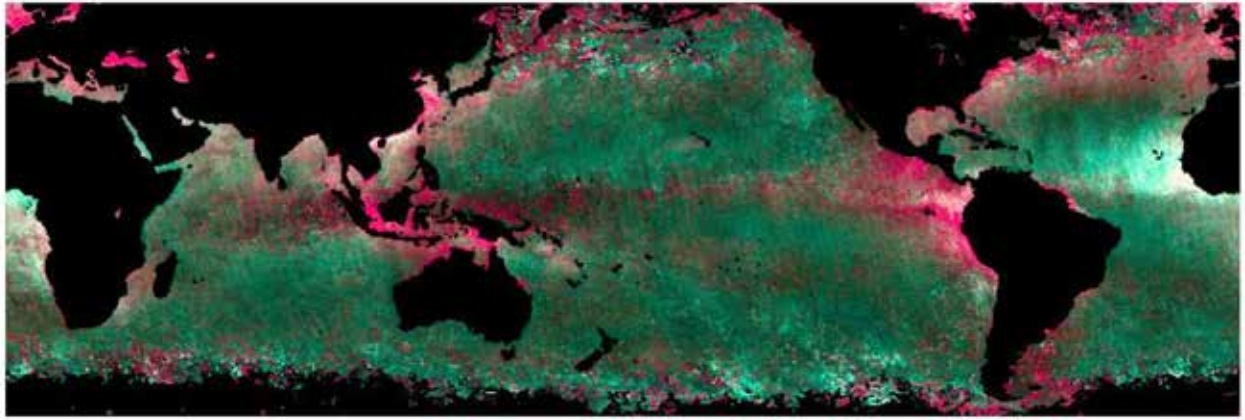
Un canal unique permet la quantification des aérosols uniquement sur les océans

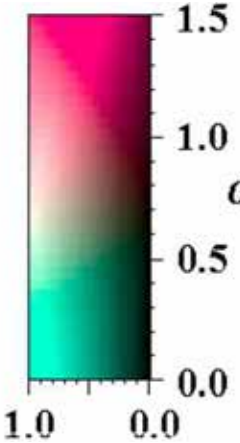


AVHRR (90s)

Avec deux canaux (“couleurs”), on peut distinguer les petites et les grosses particules

Mais ces canaux ne sont pas adaptés à l’observation sur terre





Beaucoup ← Peu

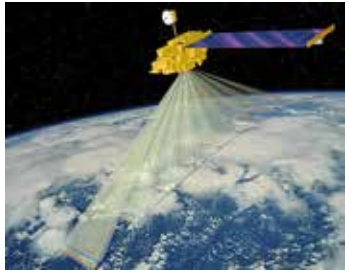
Petits ↑ aérosols

Gros

Des missions satellite dédiées

ADEOS/POLDER (lancé en 1996; 2003; 2005 [Parasol])

- Multi-direc, 8 canaux (Vis=> near IR), polarisation



Terra/MODIS (lancé en 1999)

- Nombreux canaux Vis->IR

Missions couleur de l'eau (Plusieurs canaux Vis=> proche IR)

- SeaWifs (launched 1997)
- OCTS (launched 1996)

Missions actives (lidar)

- Calipso (2006)
- Earthcare (2024)

Petit focus sur POLDER/Parasol

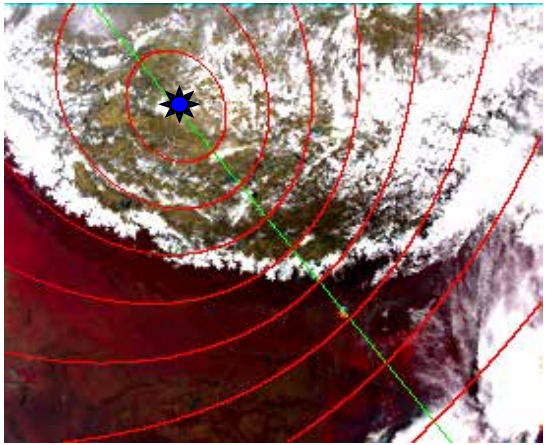
Instrument imaginé au Laboratoire d'Optique Atmosphérique; version spatiale construite au CNES. Lancé sur satellites Adeos-1, ADEOS-2, puis micro-satellite Parasol.

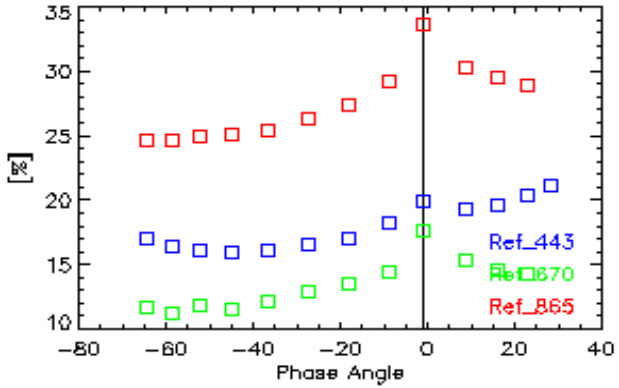
8 bandes spectrales

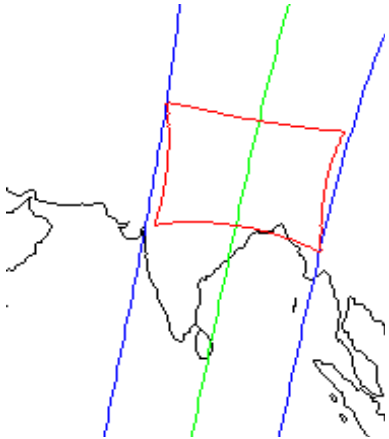
Mesures multi-directionnelles

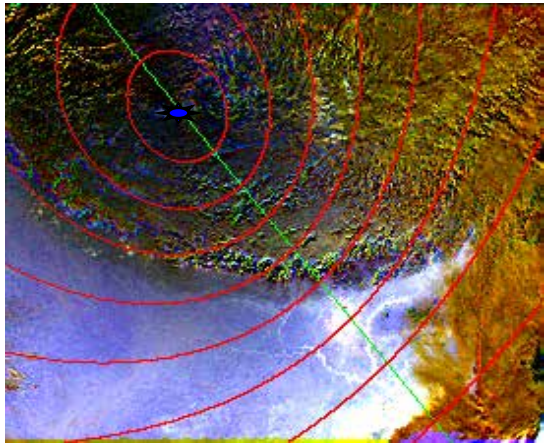
Polarisation

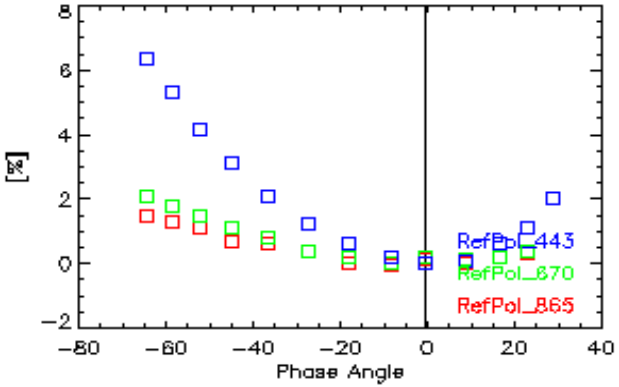
Aerosols (pollution) sur la vallée du Gange

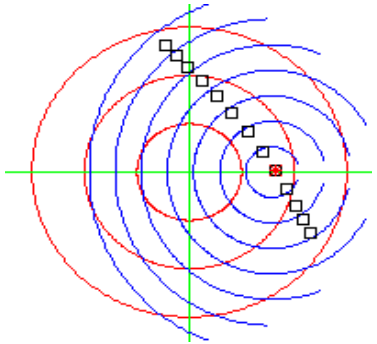




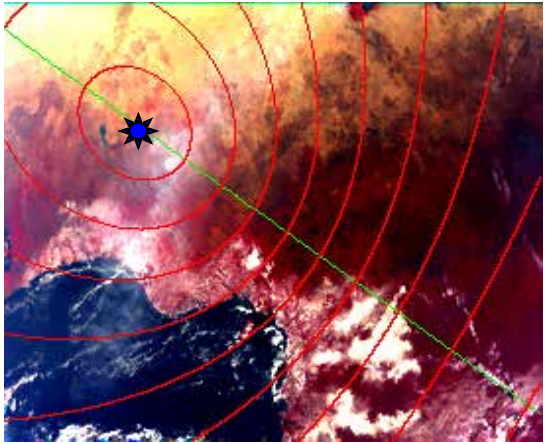


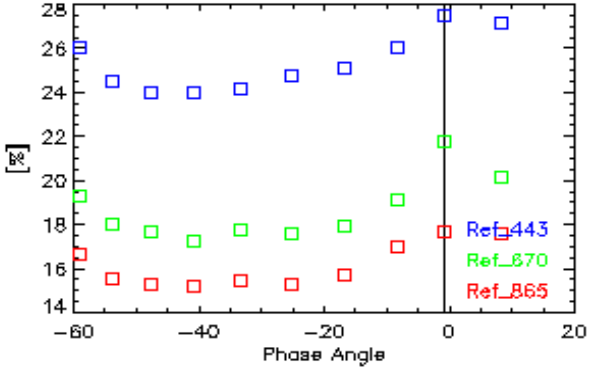


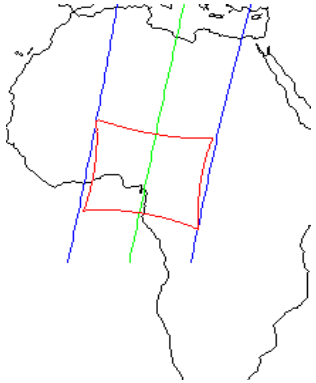


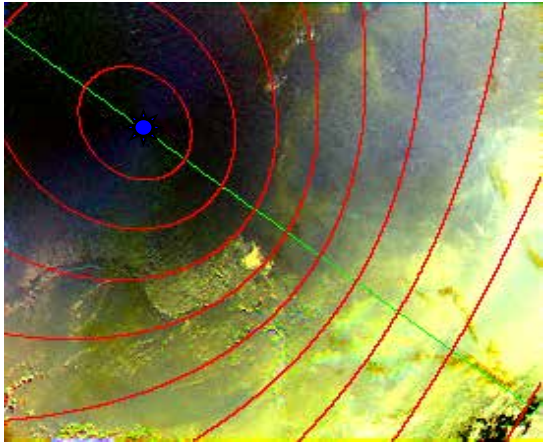


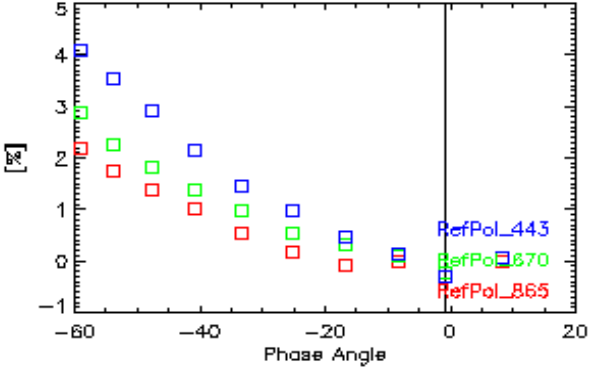
Aérosols générés par feux de biomasse

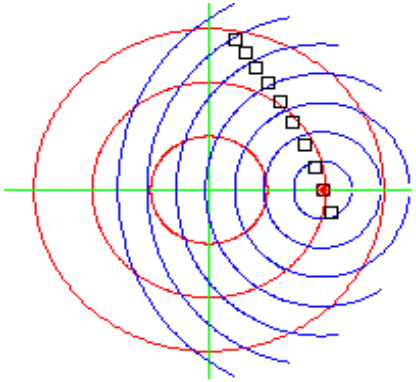




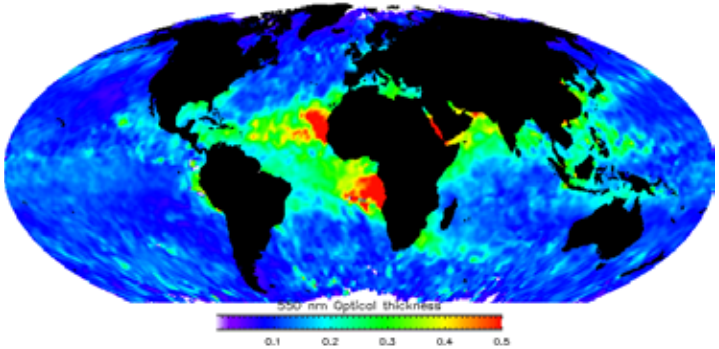




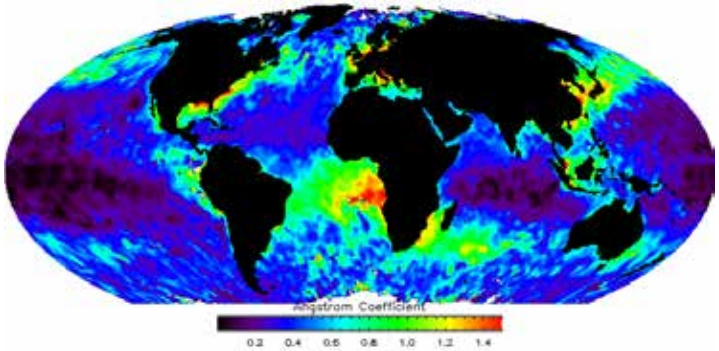




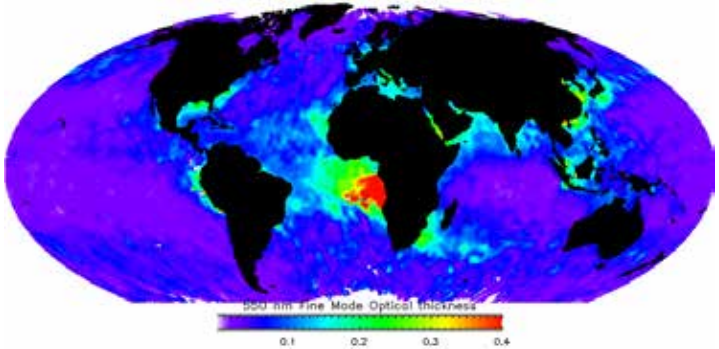
Caractérisation des aerosols sur les océans



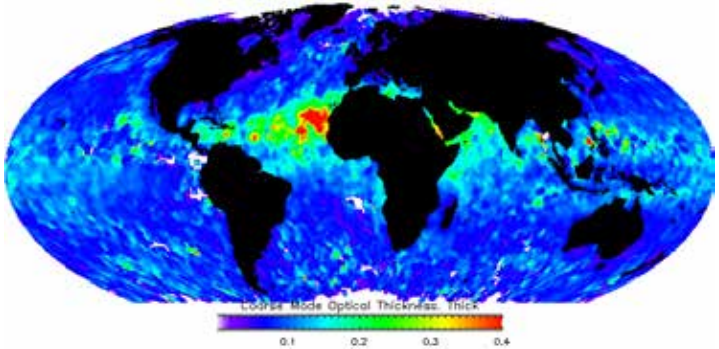
Epaisseur Optique (Charge totale)



Coefficient d'Angström (Taille)



Charge du mode "fin"



Charge du mode "gros"

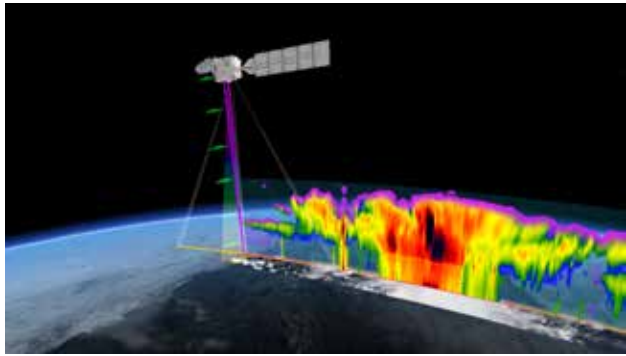
Produits issus des observations de la mission POLDER. Moyennes mensuelles

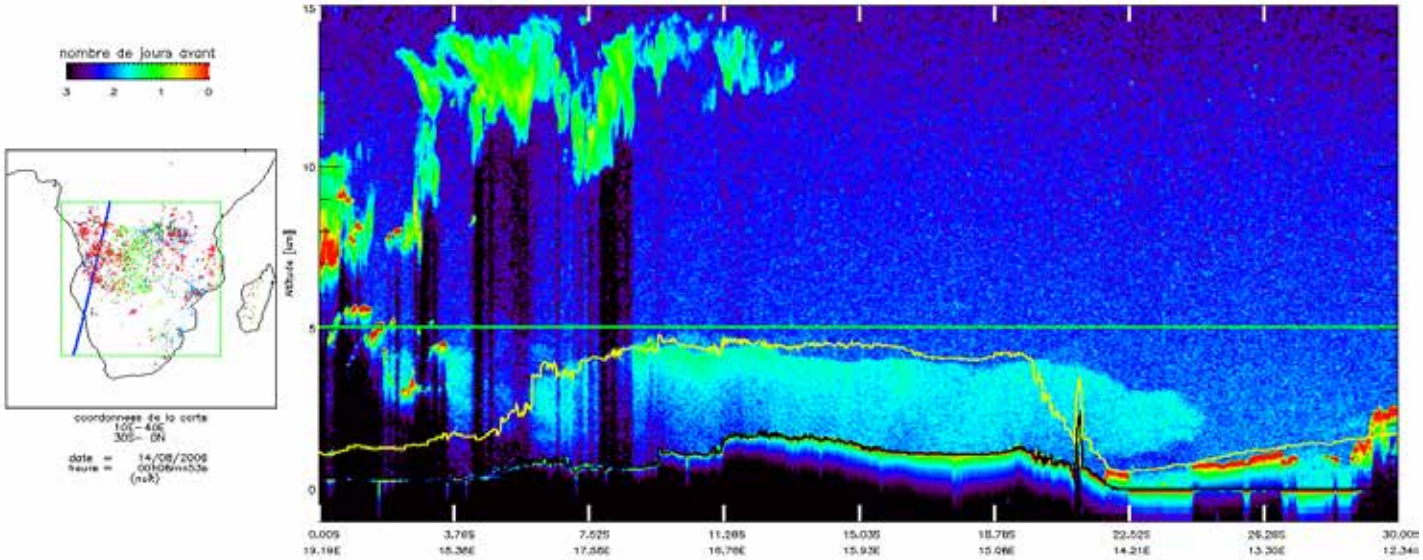
Télédétection Active

Comme depuis le sol, la télédétection active (Lidar) permet d'obtenir une distribution verticale

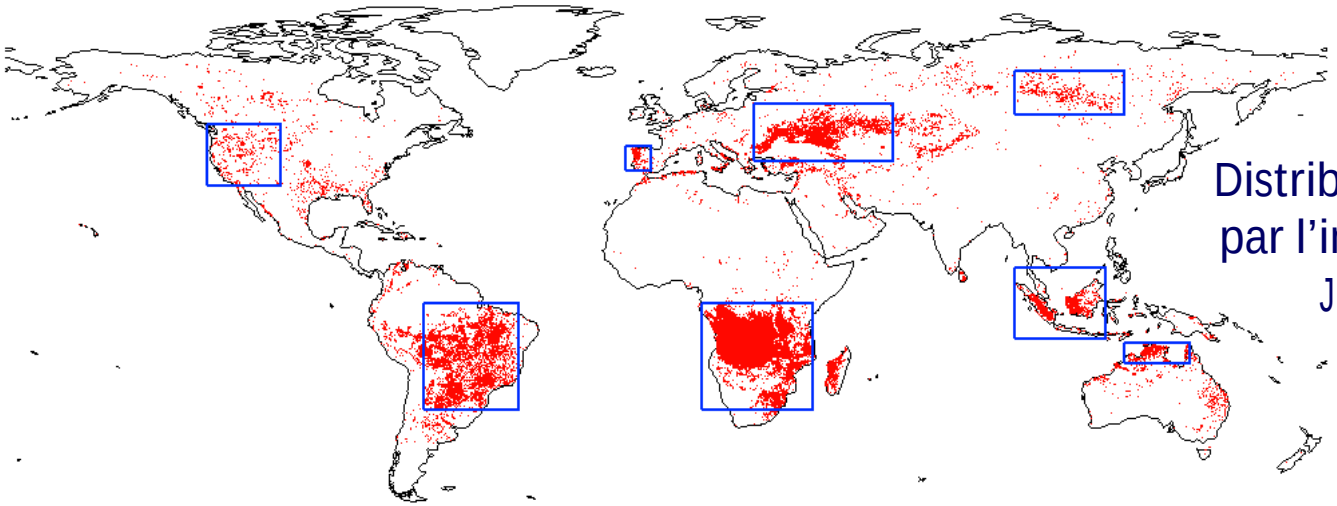
Calipso (NASA/CNES) lancé en 2006

EarthCare, lancé en Mai 2024





Les feux de biomasse; source d'aérosols

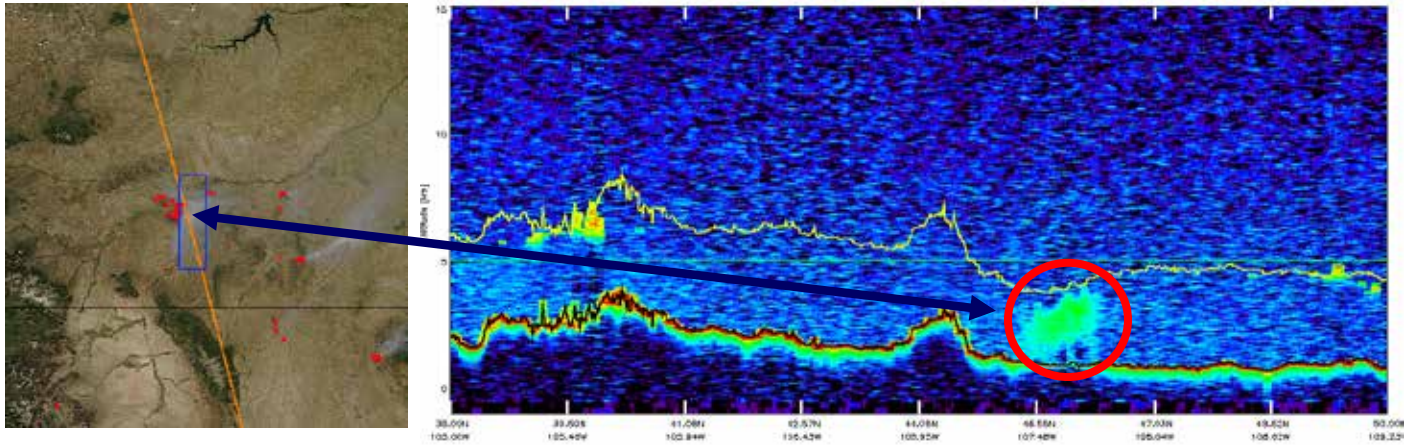


Distribution des feux observes par l'instrument MODIS entre Juillet et Aout 2006

A quelle hauteur les panaches de ces feux injectent ils les aérosols dans l'atmosphère ?

L'énergie (la température) est-elle suffisante pour que l'aérosol soit injecté dans la stratosphere ?

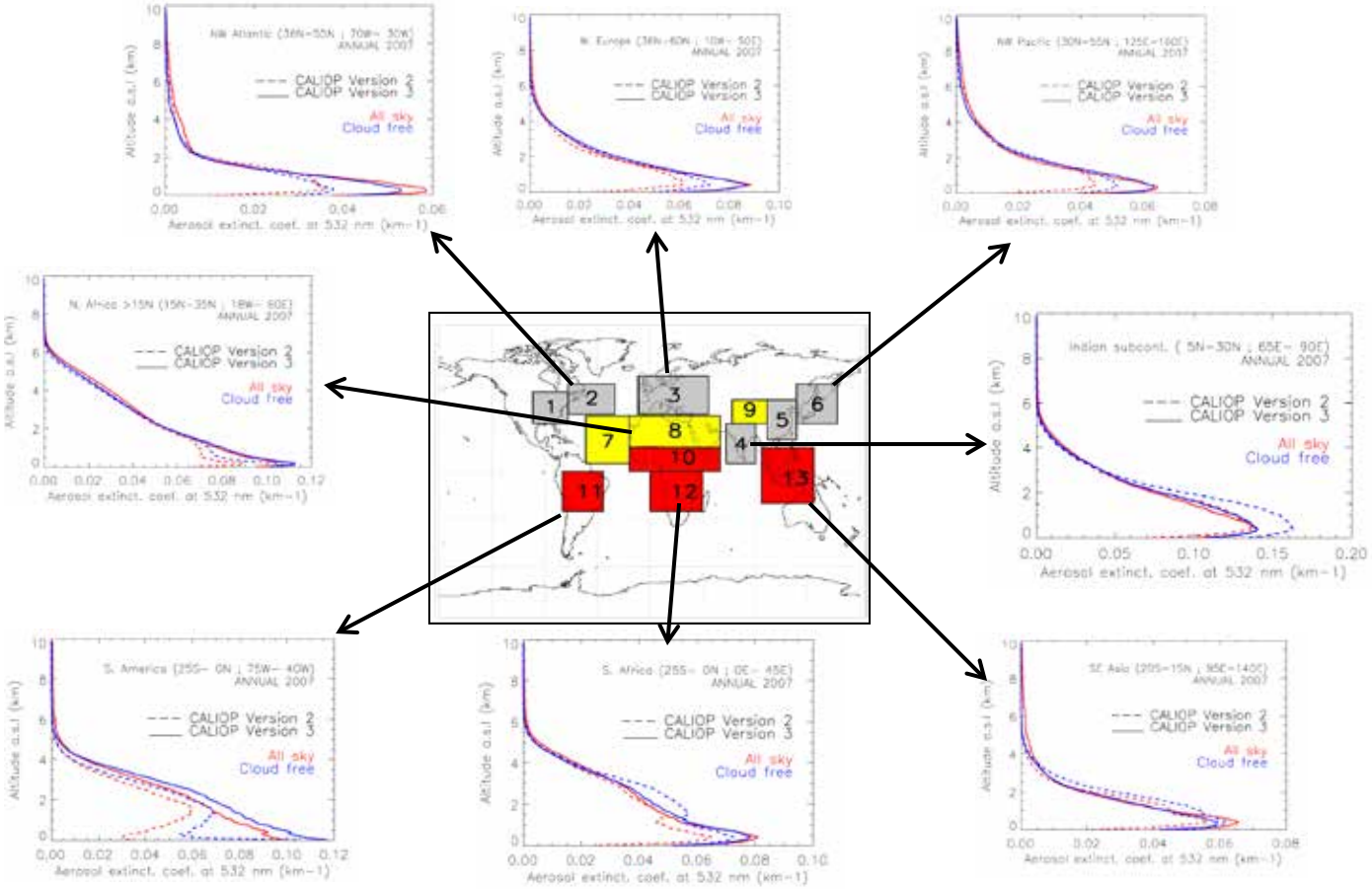
Observation des panaches par lidar



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…

Distributions verticales

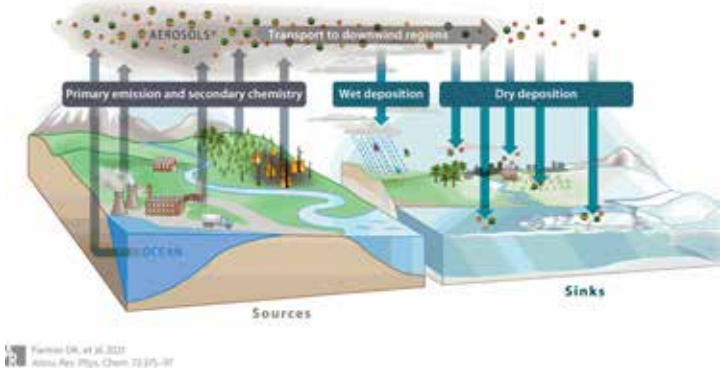


Koffi et al. 2010

Temps de résidence

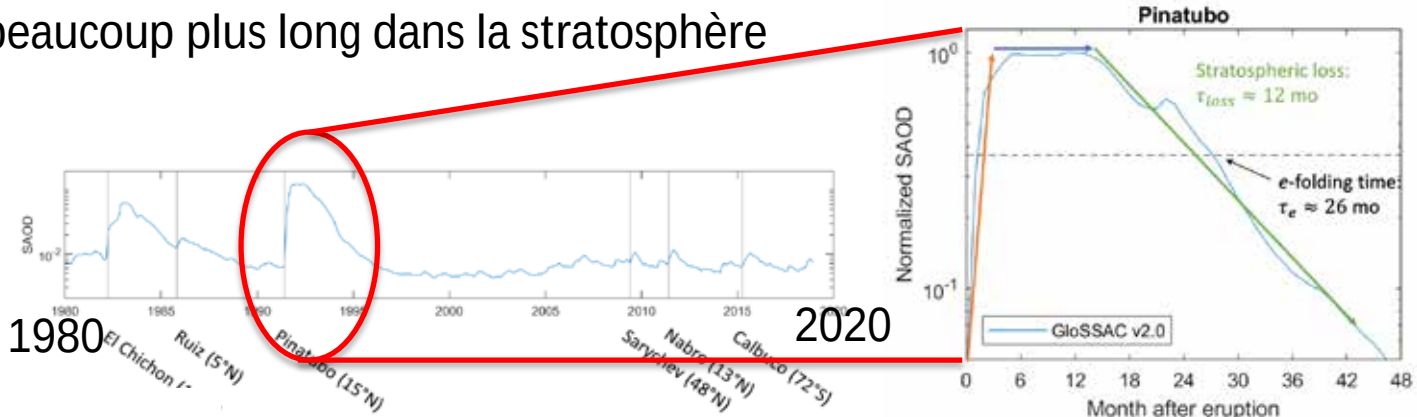
Les aérosols sont éliminés de l'atmosphère par

- Sédimentation sèche
  Significatif pour les "grosses" particules
- Sédimentation humide (nuage et pluie)
  Le plus efficace sauf dans la stratosphère



Le temps de résidence moyen est de 7 à 10 jours dans la troposphère. Très dépendant de l'altitude d'injection

Beaucoup, beaucoup plus long dans la stratosphère

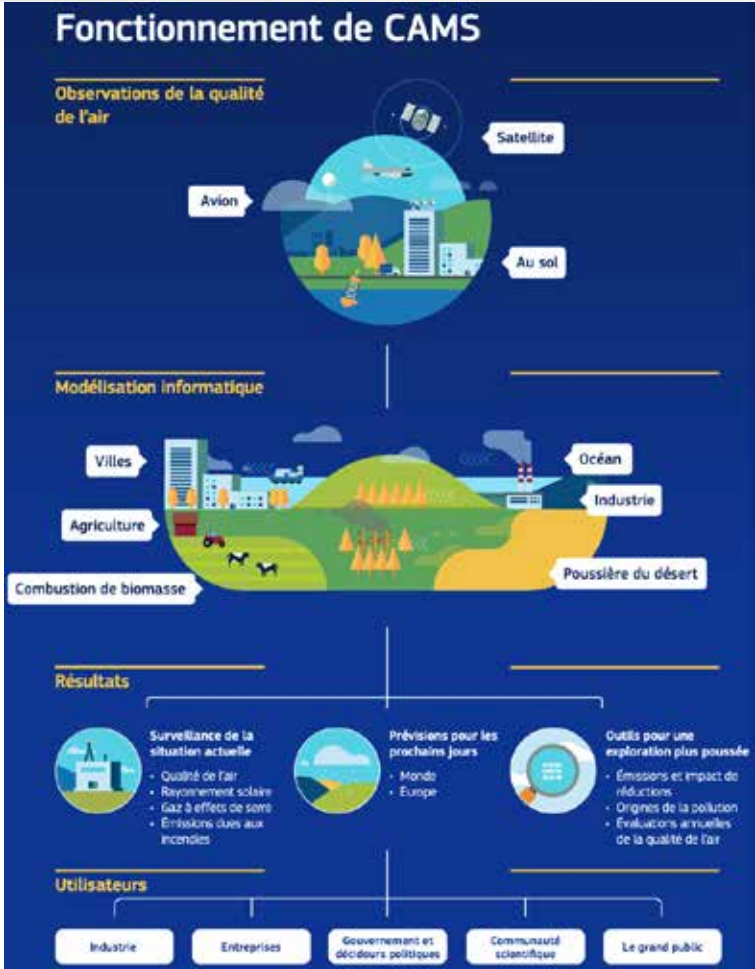


Thomason et al., 2018, Kovilakam et al., 2020

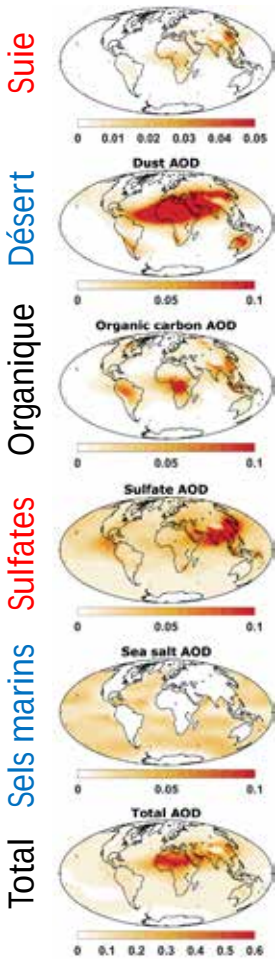
Assimilation des observations

Les différentes observations aérosols sont assimilées dans des modèles de transport, comme c'est fait en prévision météorologique

On en déduit les distributions – y compris dans des régions non couvertes par les observations - et il est possible de faire des prévisions à quelques jours



Distribution sur Terre



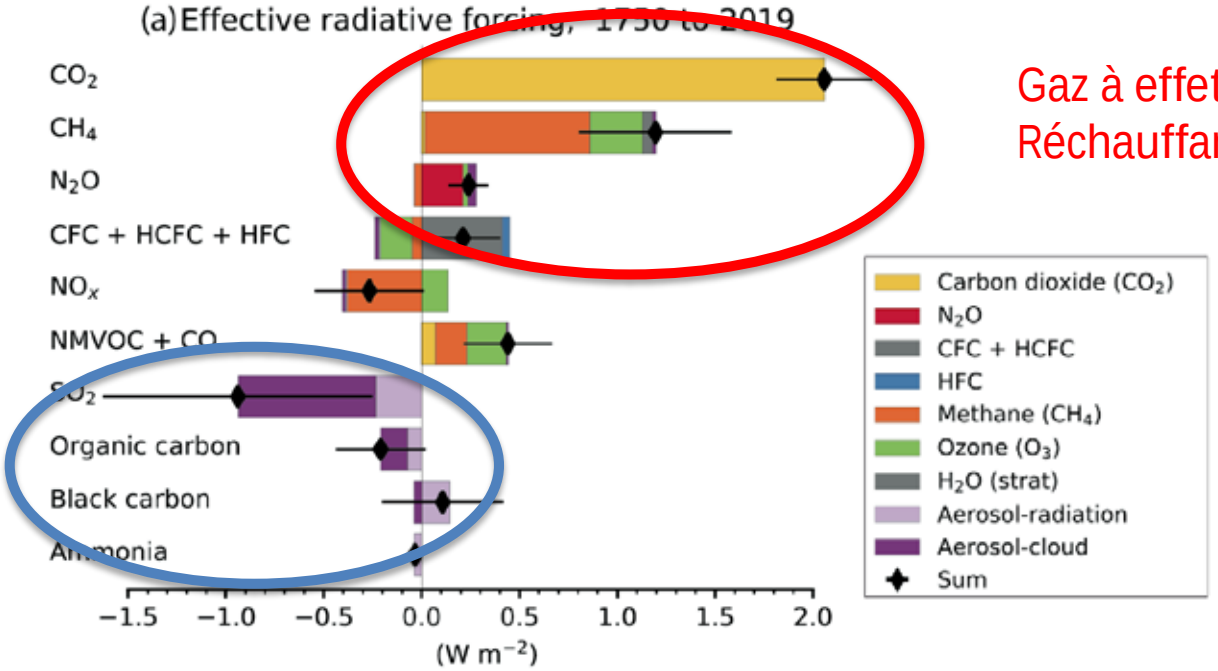
Du fait de leur durée de vie dans l'atmosphère, les aérosols sont concentrés à proximité relative des sources

Distribution très différente suivant les types d'aérosols

Les cartes montrent des moyennes annuelles qui masquent la grande variabilité temporelle

Combinaison d'observation spatiale, de télédétection au sol, et de modélisation du transport atmosphérique

Impact climatique



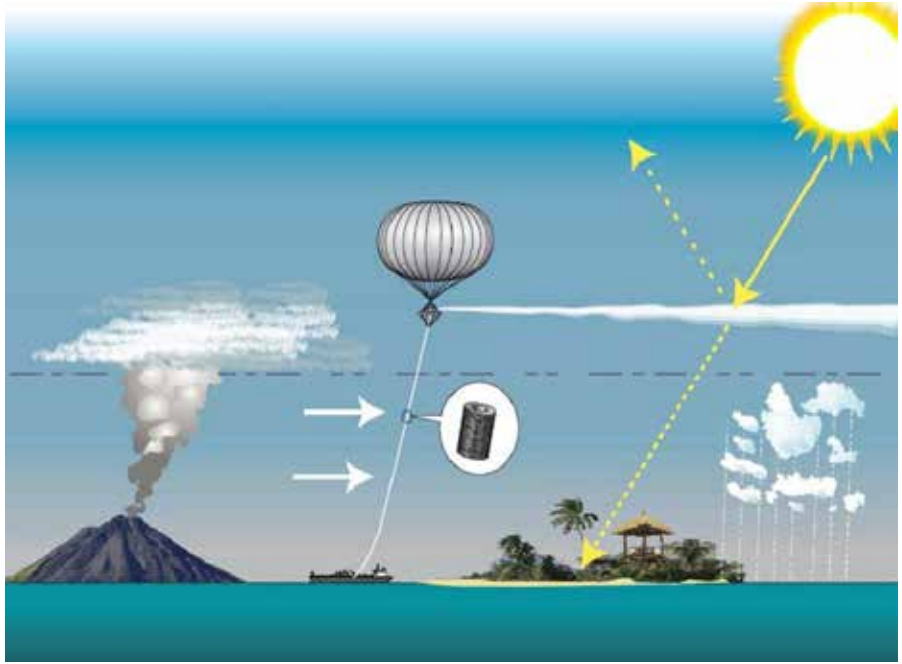
Gaz à effet de serre
Réchauffant

Aérosols
Refroidissant

Les politiques visant à limiter la pollution réduisent l'effet refroidissant des aérosols, et vont donc aggraver le réchauffement climatique

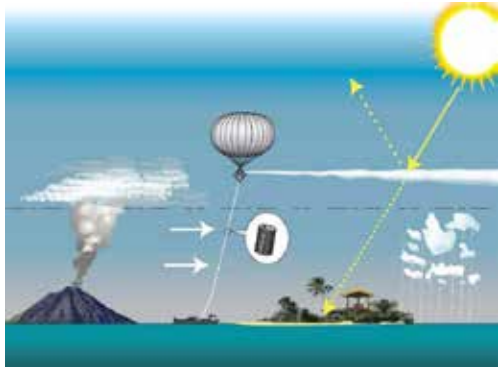
Géo-ingénierie solaire : principe

La géo-ingénierie vise à réduire le réchauffement climatique
Une des méthodes “crédibles” propose d’injecter des aérosols dans la stratosphère
Fonctionnement similaire à celui des grosses éruptions volcaniques
La recherche sur aérosols et climat permet d’anticiper les impacts



Géo-ingénierie solaire : Les risques

- Modification de la circulation atmosphérique (donc changement climatique même si le réchauffement climatique est atténué)
- Les aérosols retombent. Obligation de renouveler les injections chaque année sans quoi réchauffement important et rapide
- Ne résout pas le pb de l'acidification des océans
- Impact des aérosols sur la couche d'ozone (cf séminaire Sophie Godin-Beekmann)
- Encouragement à l'inaction



Quelques points à retenir…

Les aérosols sont des particules, solides ou liquides, en suspension dans l'atmosphère.

Les sources d'aérosols sont très variables; naturelles comme anthropiques

Les aérosols ont une durée de résidence de ≈10 jours dans la troposphère, ≈2 ans dans la stratosphère

Bien que très visibles sur les observations spatiales, ces mesures ne donnent pas accès à toutes les caractéristiques

En particulier, les propriétés d'absorption, et les interactions avec les nuages -très importantes pour quantifier l'impact climatique- sont mal quantifiées

Les aérosols refroidissent le climat, et compensent donc, en partie, l'impact réchauffant des gaz à effet de serre

Les impacts sanitaires des aérosols poussent à la mise en place de réglementations pour réduire les émissions, mais qui contribuent à réchauffer le climat