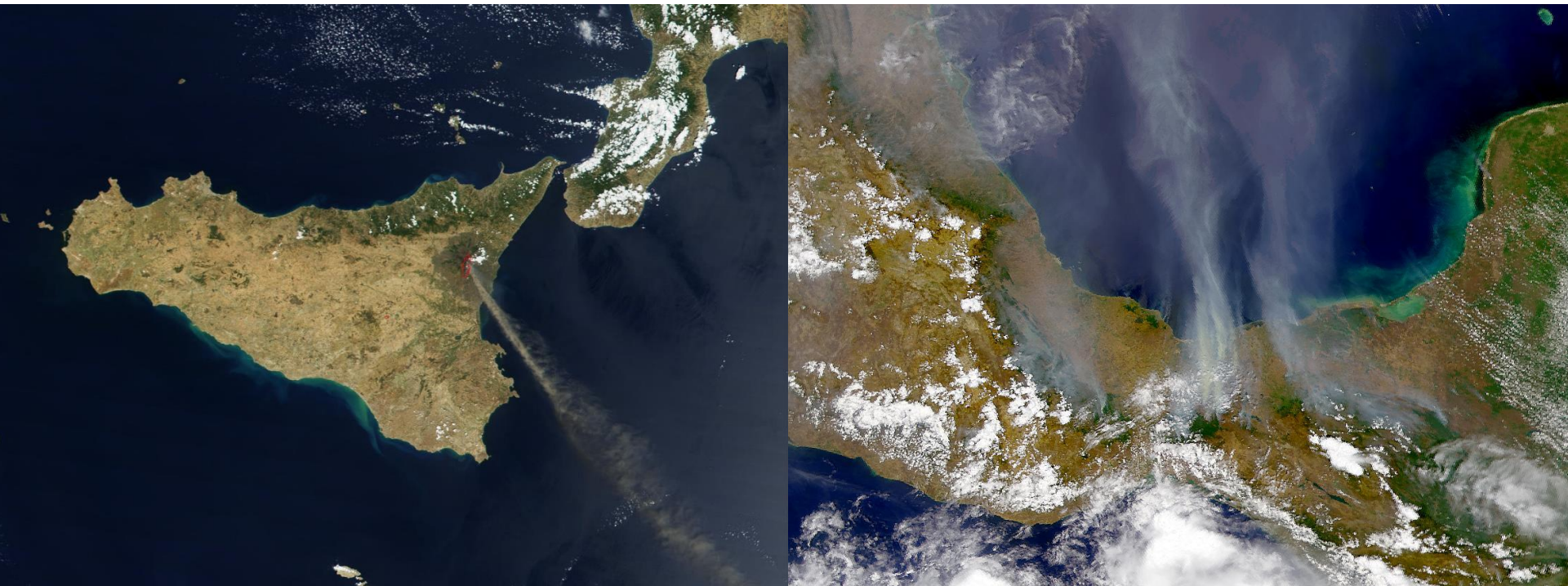


Les aerosols atmosphériques

Paola Formenti

Laboratoire Interuniversitaire
des Systemes Atmosphériques, CNRS



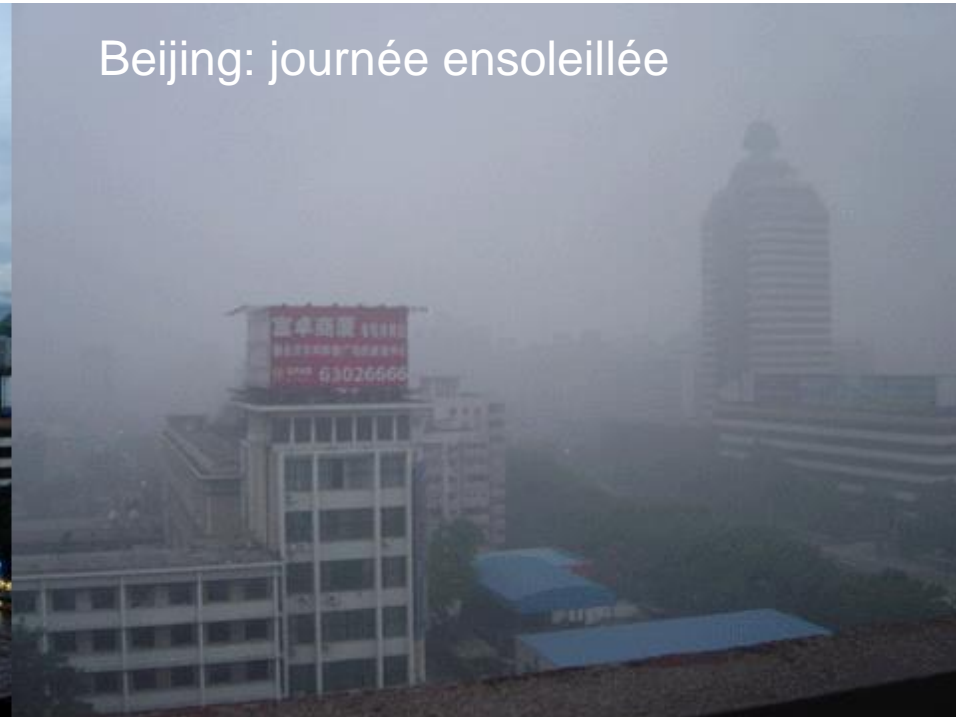
Dégradation de la qualité de l'air

- Particules fines produites par le trafic et la combustion restent près de la surface: le “smog d’hiver”
- Un autre type de smog est produit dans les régions polluées pendant les jours ensoleillés

Beijing, journée pluvieuse

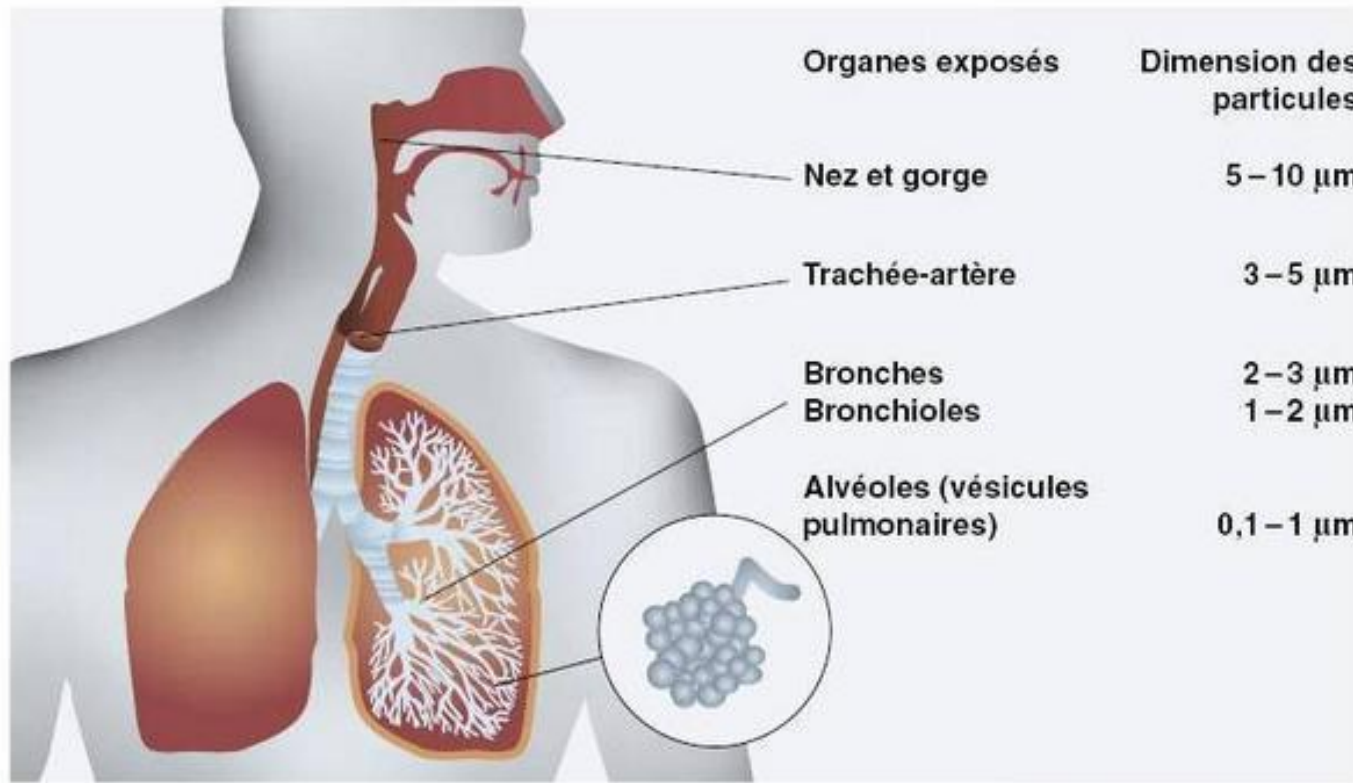


Beijing: journée ensoleillée



Dégradation de la santé

Impacts multiples sur l'organisme
(y compris l'activité cérébrale)



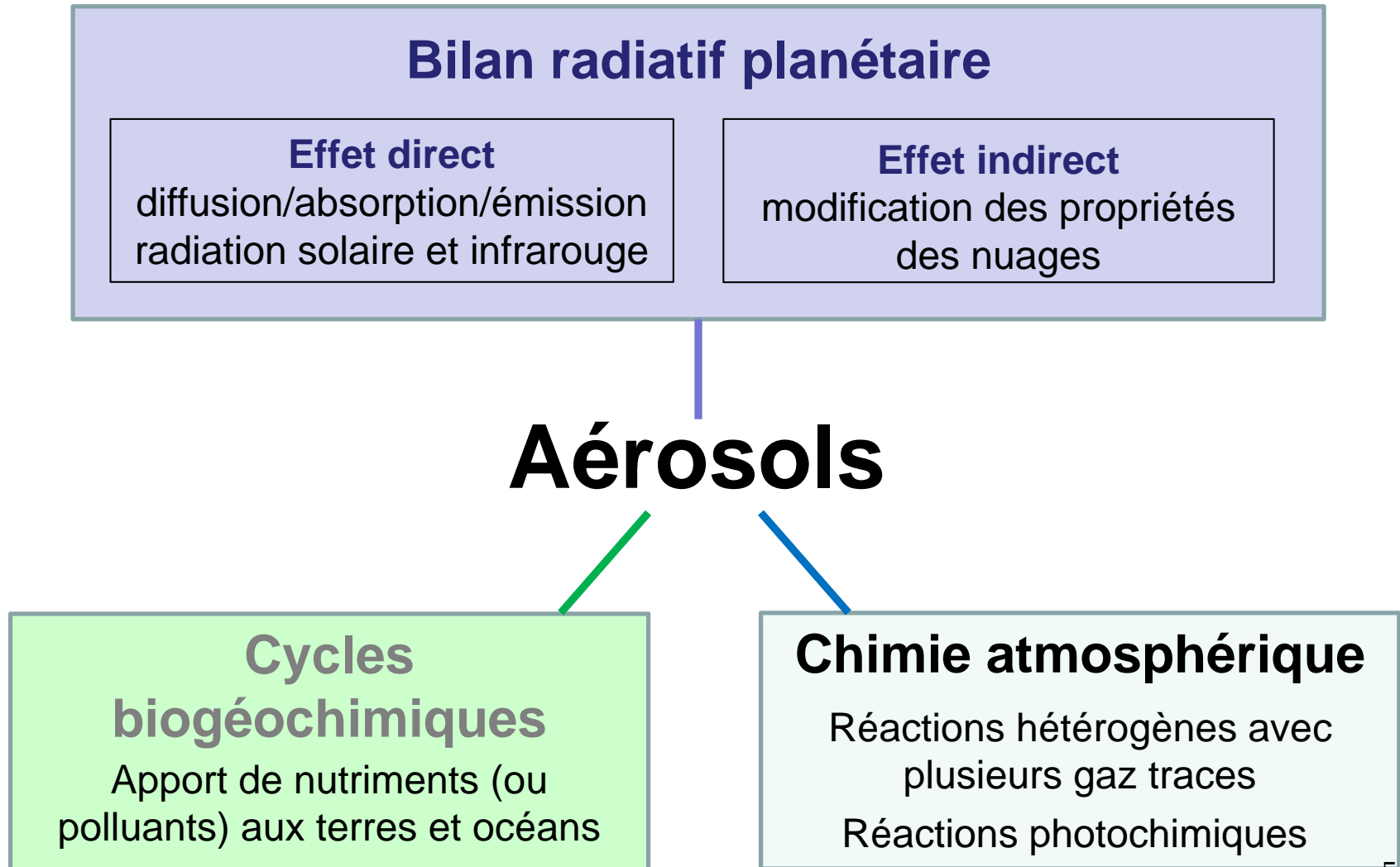


Pollution de l'air et changement climatique

Deux faces de la meme medaille

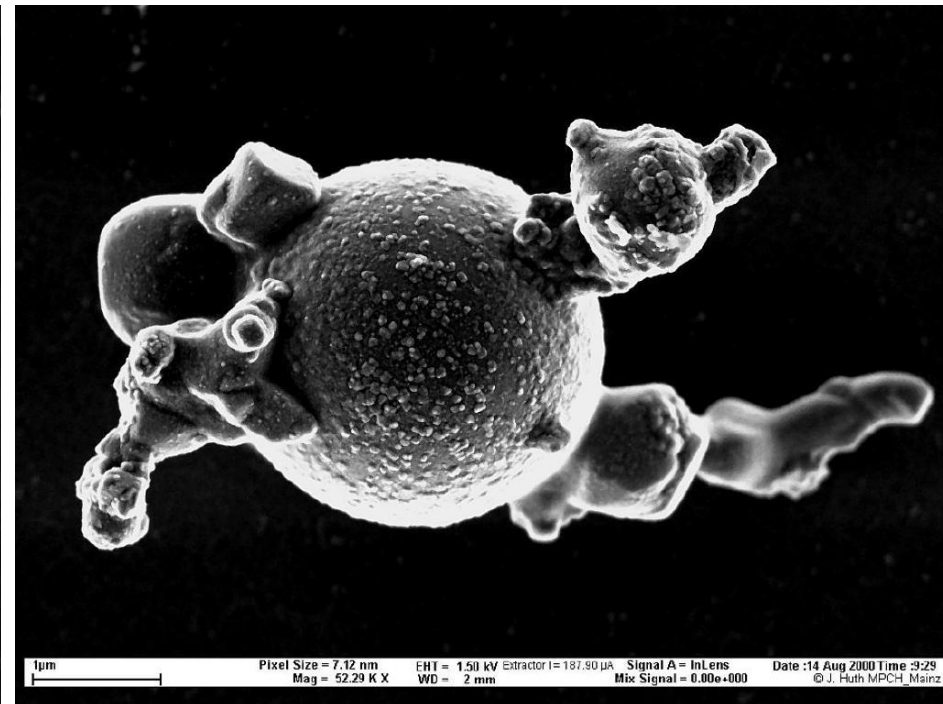
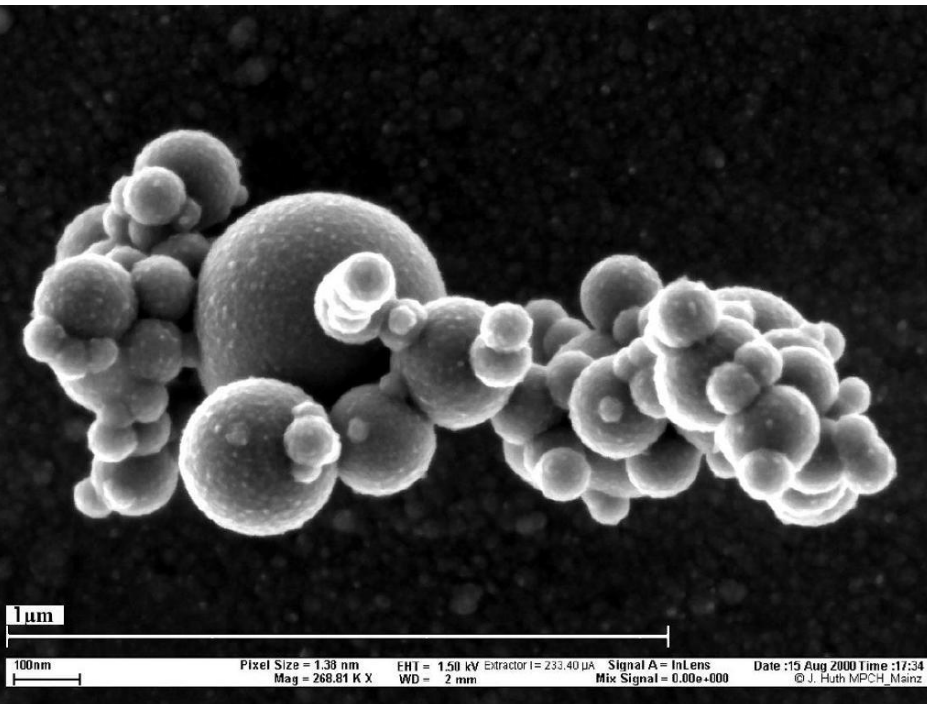


Effets multiples sur le climat



Aérosols

- Suspension de "petites" particules dans l'air
- Peuvent être solides ou liquides
- Grande variété d'origines et de propriétés

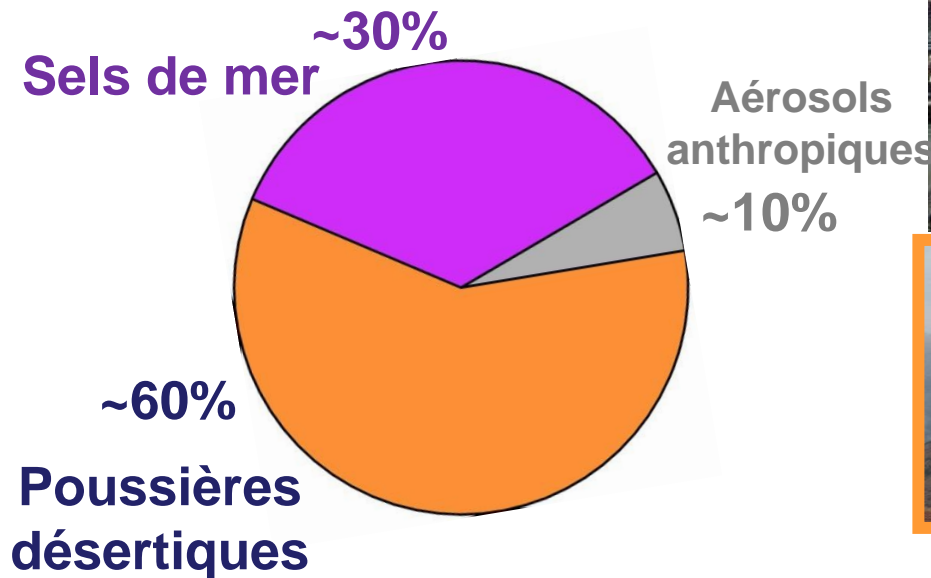


Sources d'émission

naturelle

anthropique

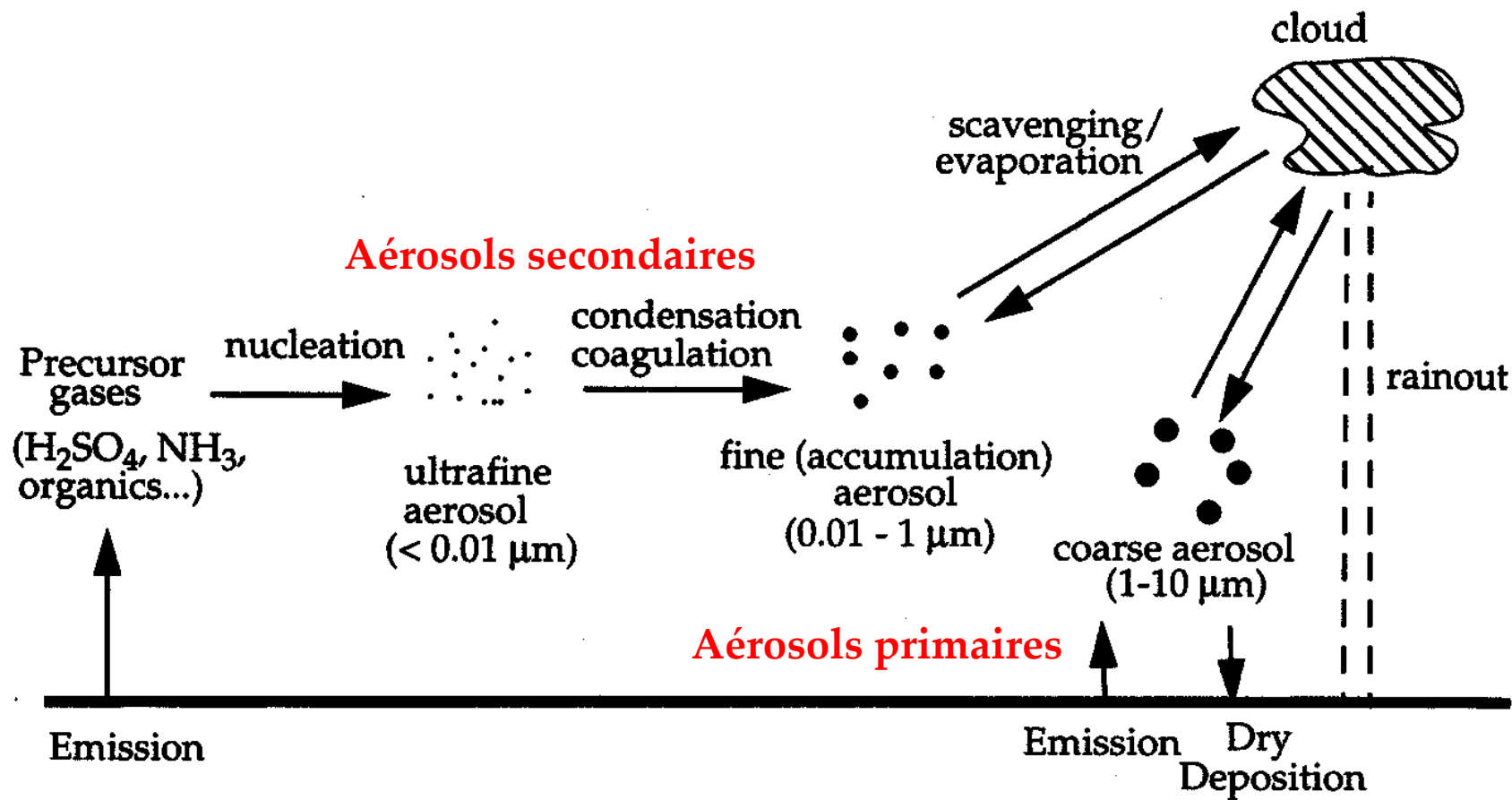
Masse totale en suspension
à l'échelle globale (~Tg an)



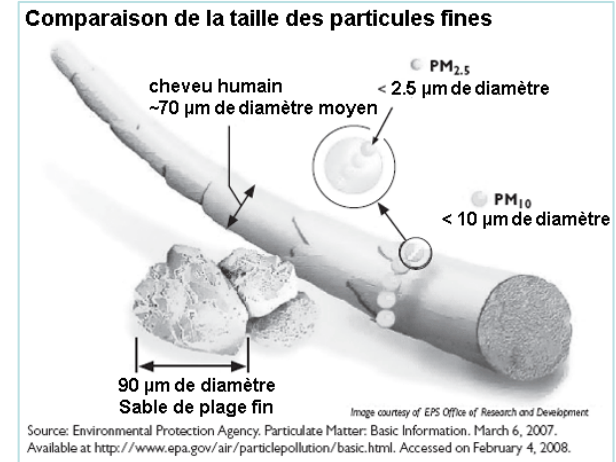
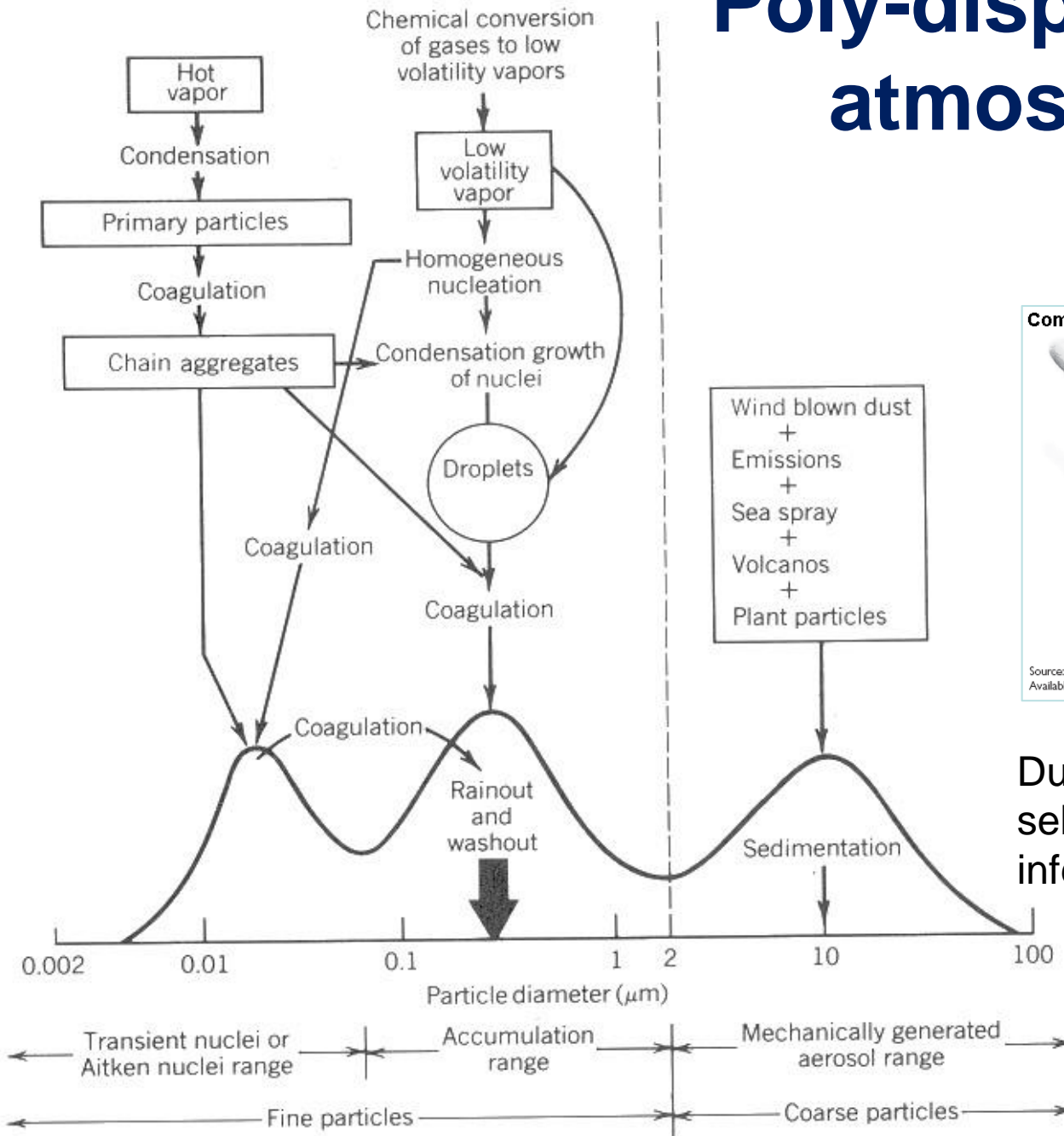
Textor et al., ACP, 2007
Huneus et al., ACP, 2012



Emission primaire (directe) ou secondaire (formation en atmosphère)



Poly-disperses en atmosphère

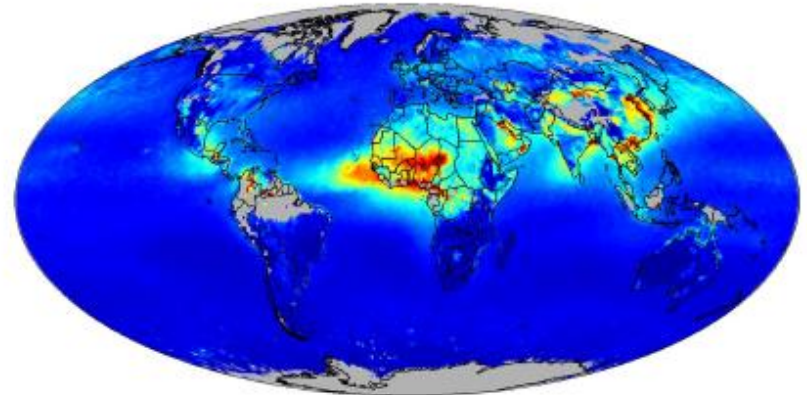
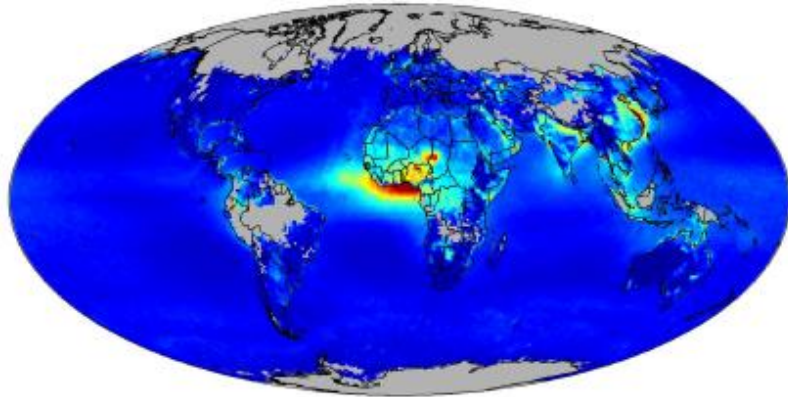


Durée de vie variable selon la taille mais inférieure à 10 jours

Variabilité spatiale et temporelle

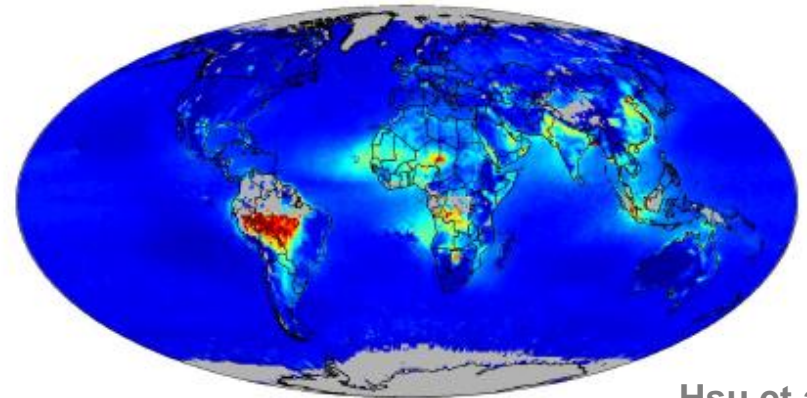
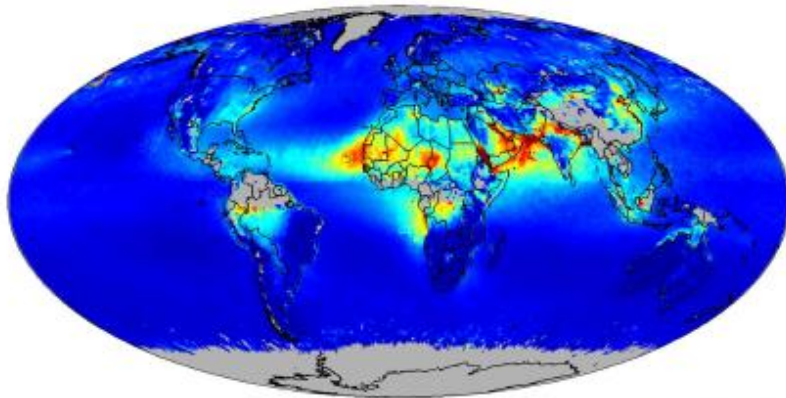
DJF

MAM



JJA

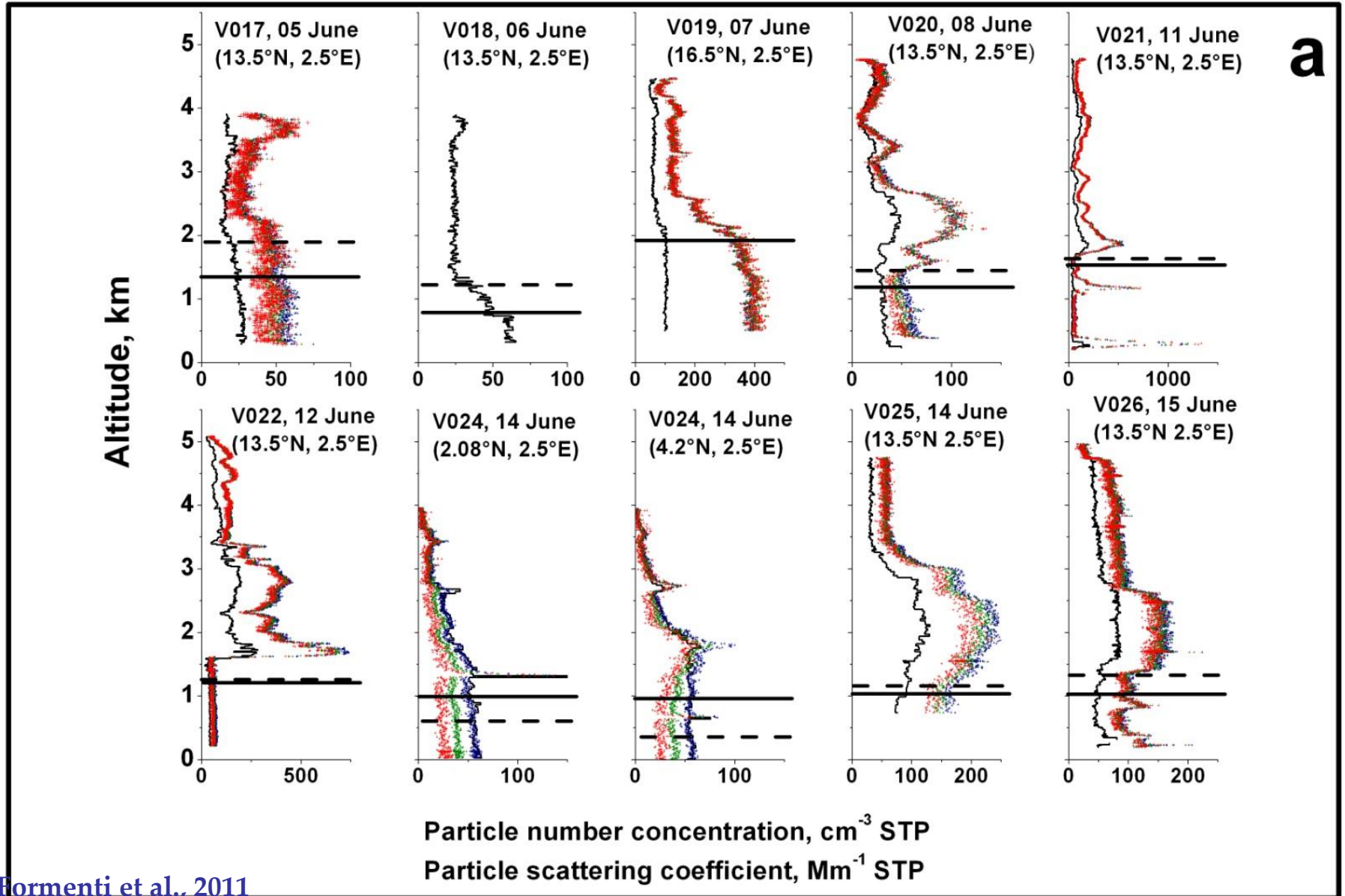
SON



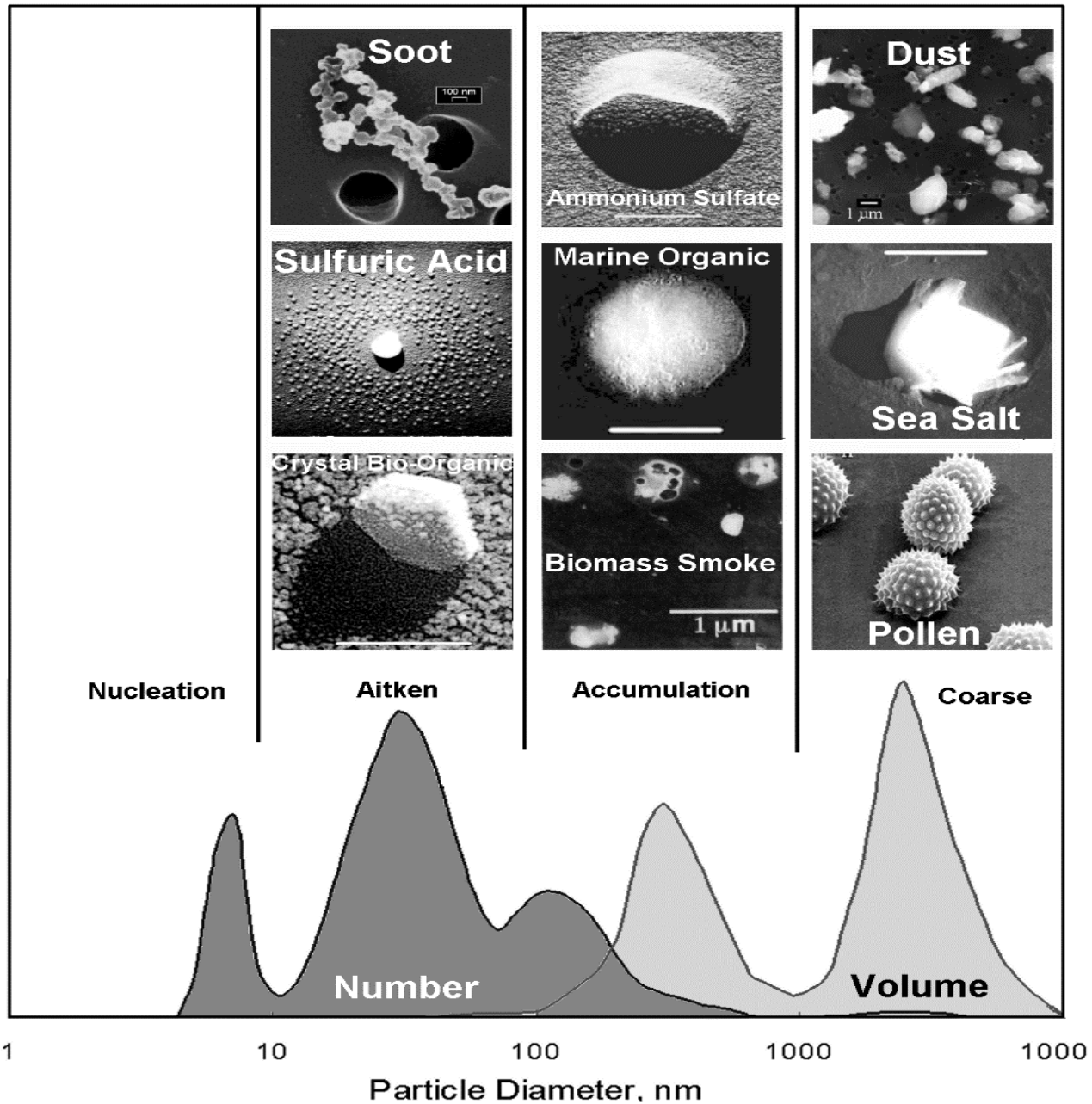
Hsu et al., 2012

SeaWiFS AOD (550 nm), 1998–2010

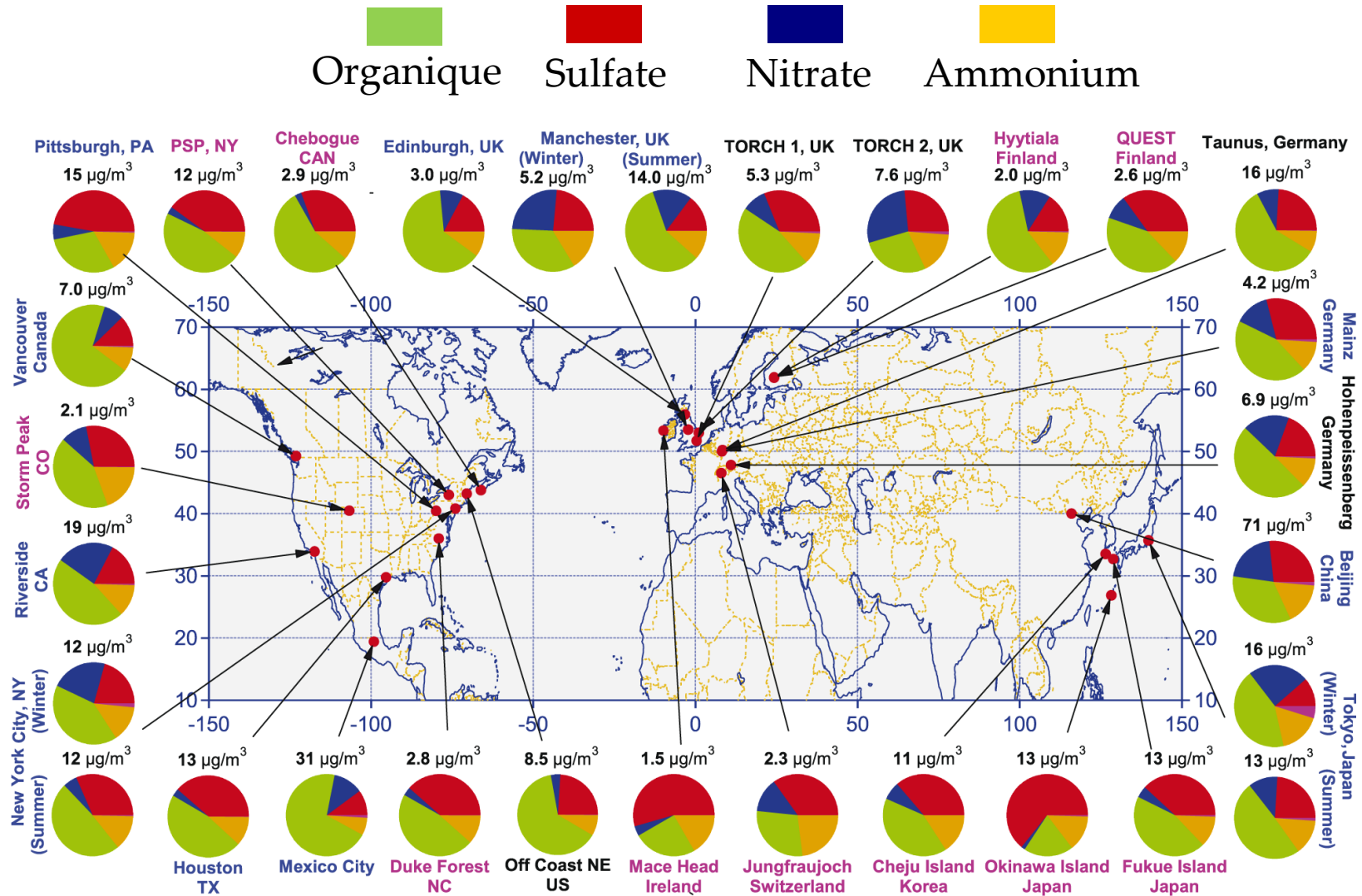
Répartition verticale



Composition et forme variées



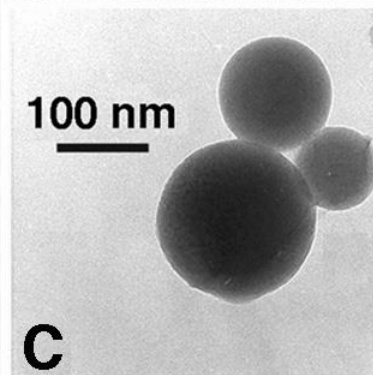
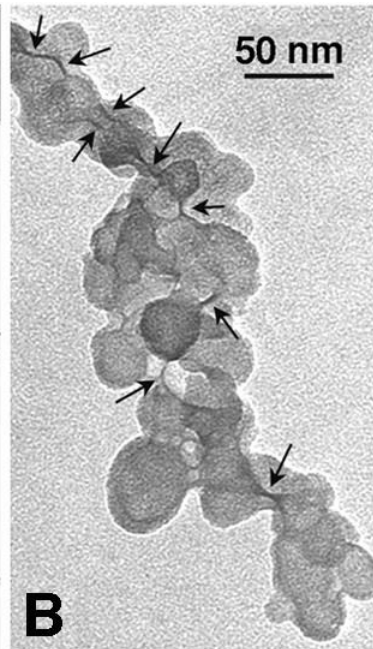
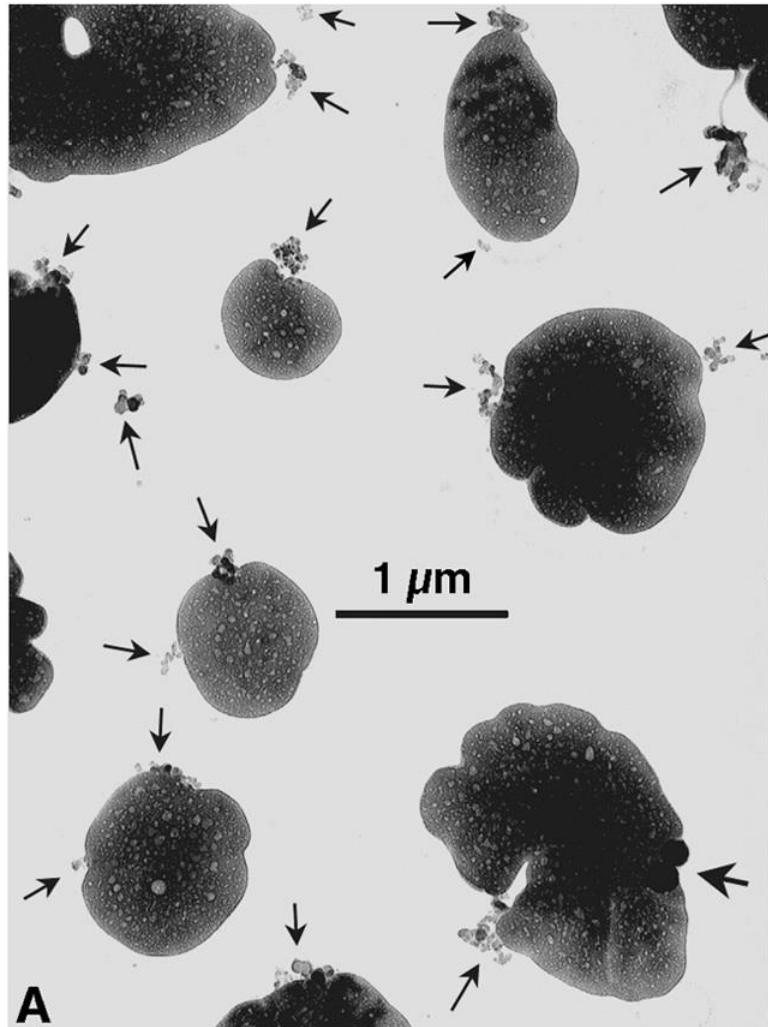
L'aérosol organique: Une part importante de la fraction fine de l'aérosol



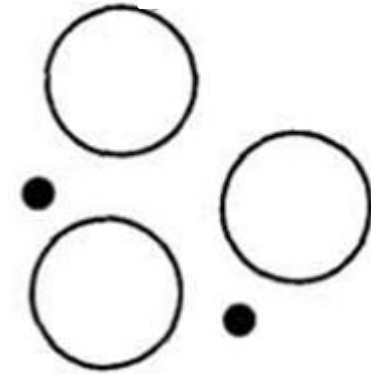
Aérosol organique: >40% de l'aérosol total

Dans cette fraction, une part importante est considérée comme secondaire
Zhang et al. (2007)

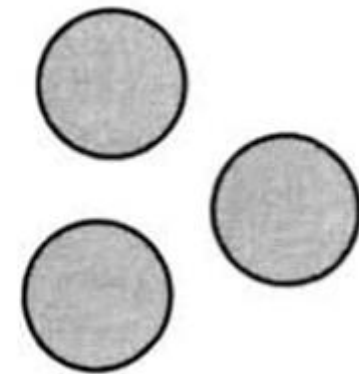
Etat de mélange



Mélange
EXTERNE



Mélange
INTERNE



Sulfates (inorganiques) et suies

L'indice complexe de réfraction

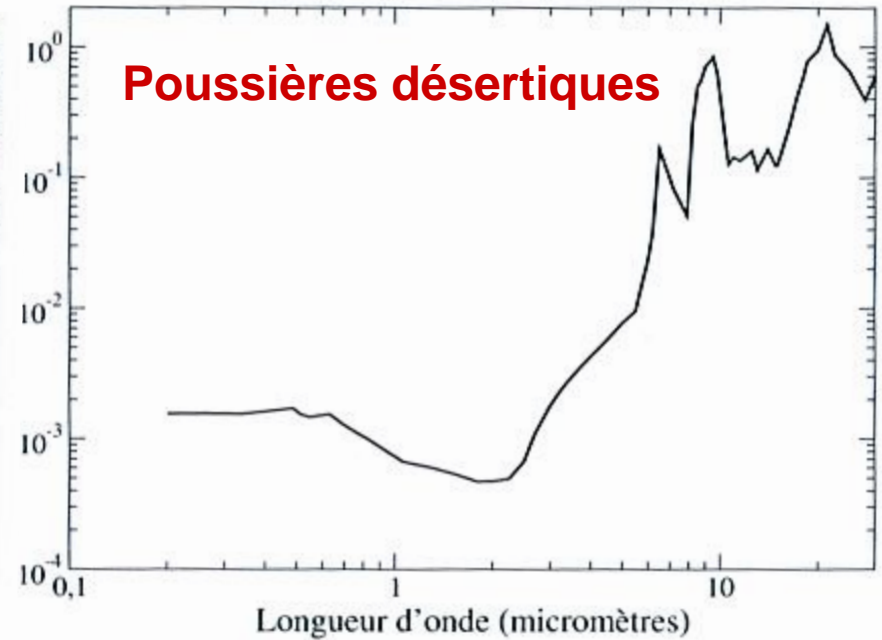
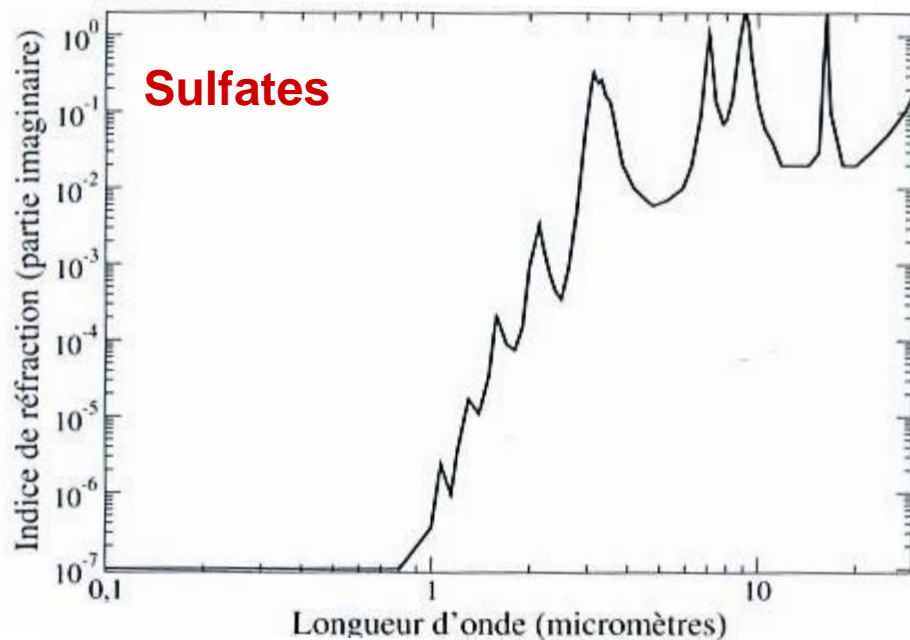
$m = n - ik$ dépend de la composition des particules

$k > 0$

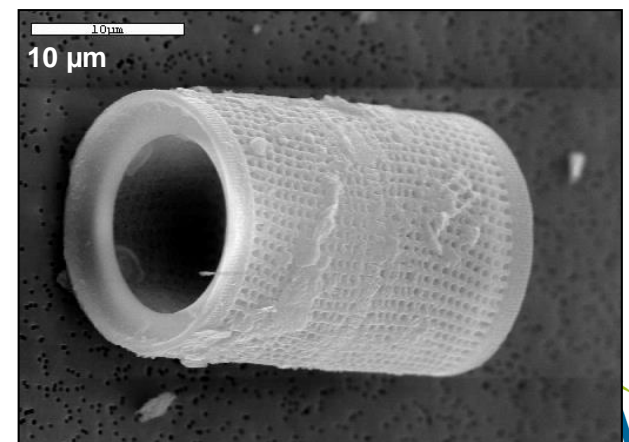
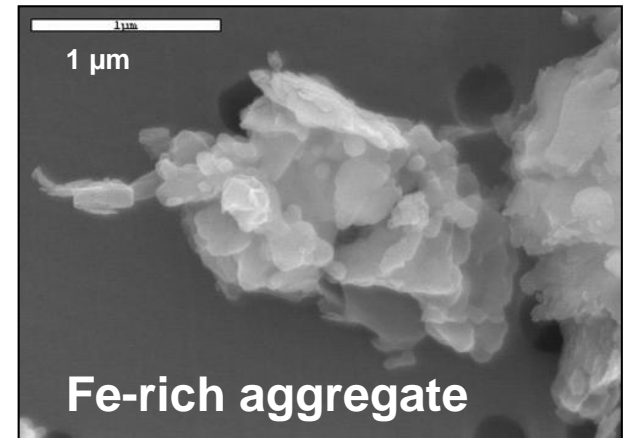
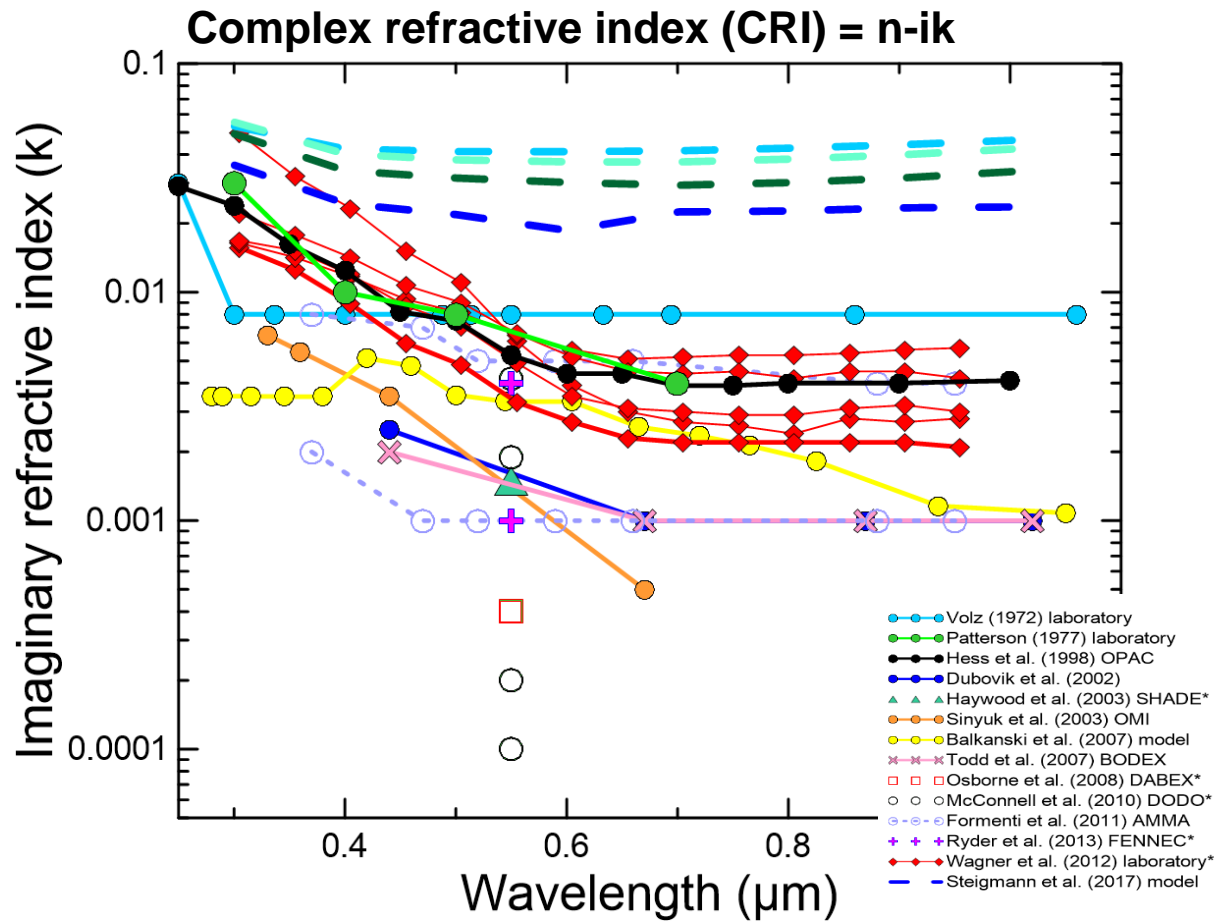
Aérosol absorbant

$k = 0$

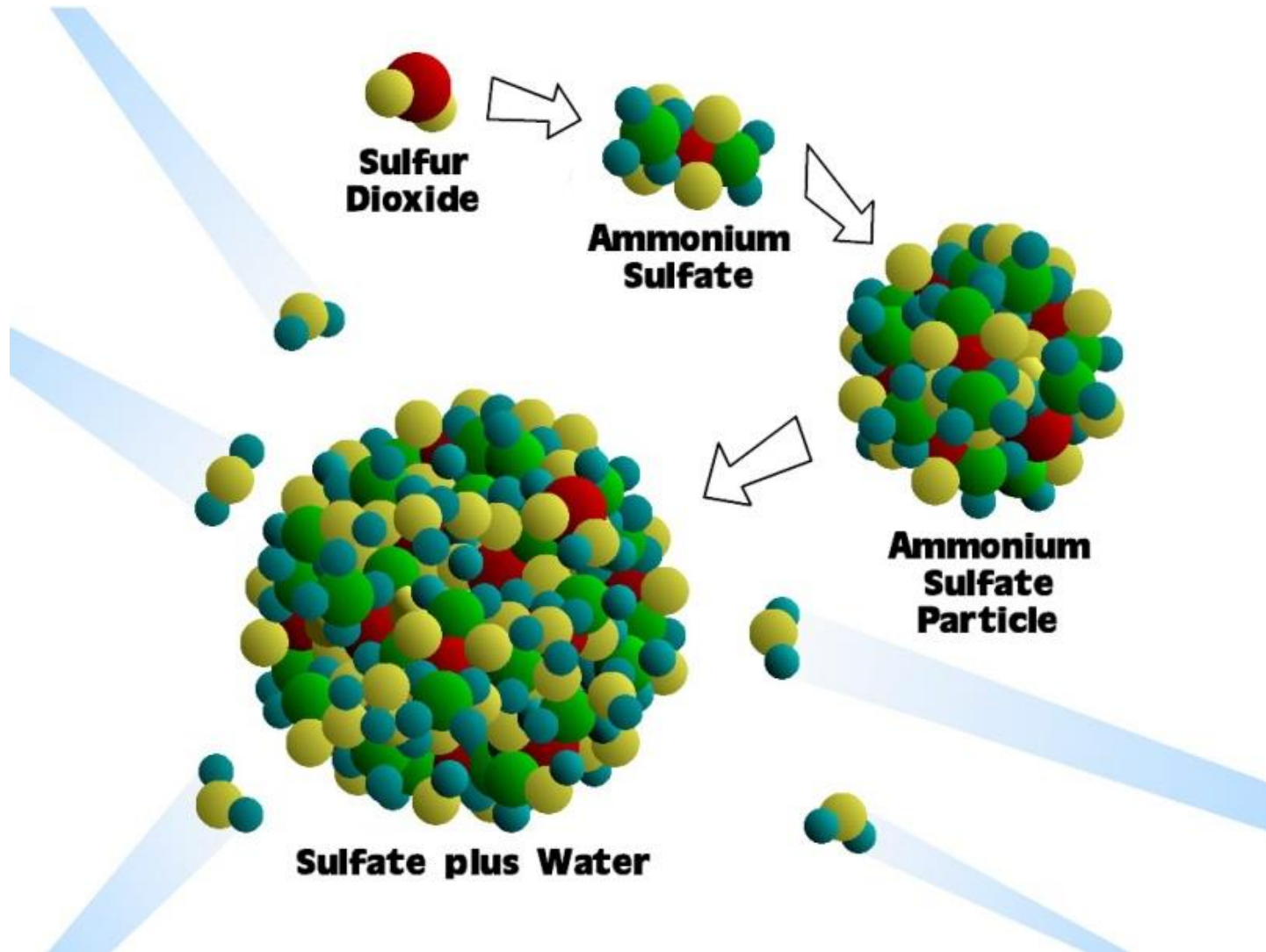
Aérosol purement diffusant



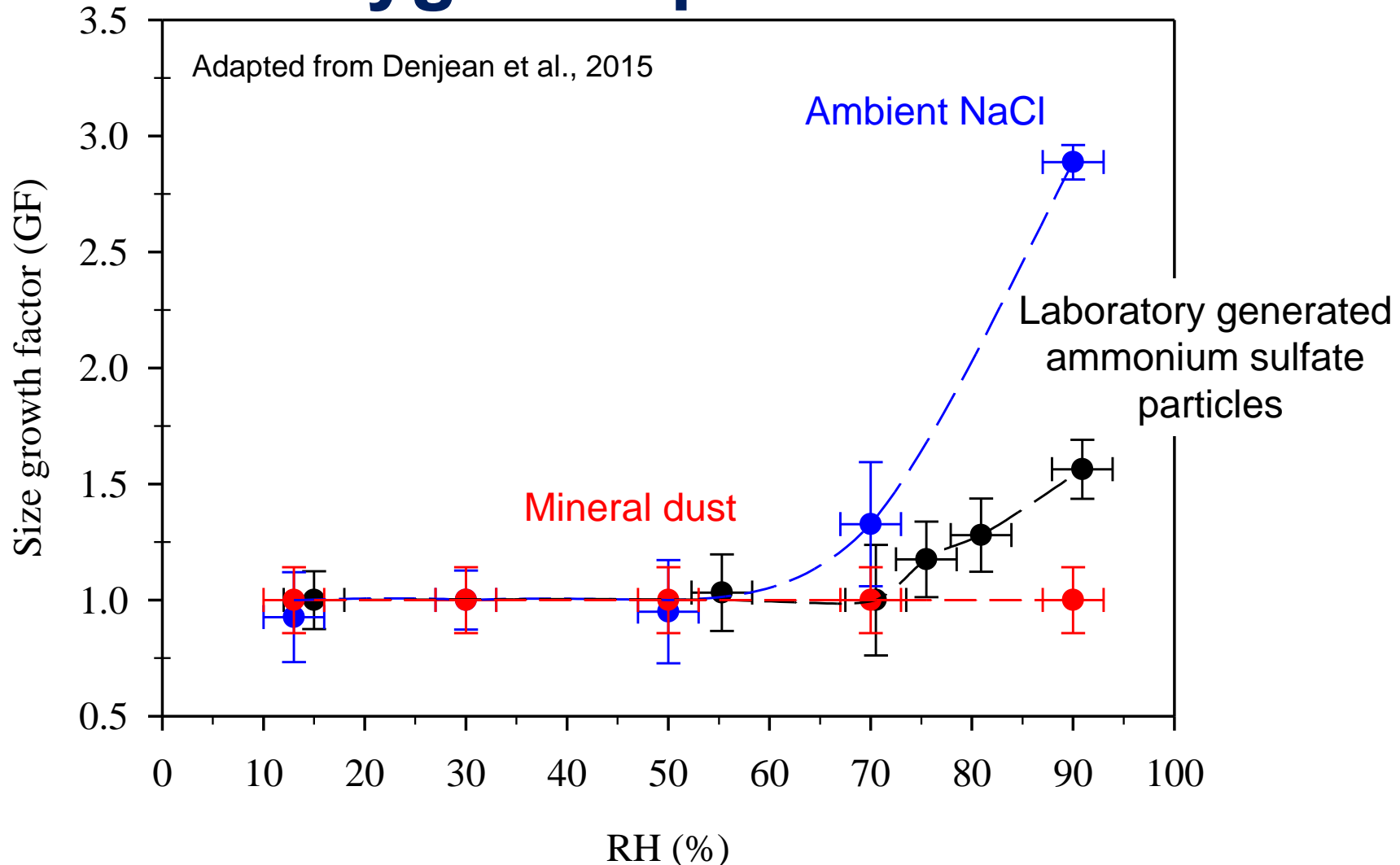
Exemple: poussières désertiques



Hygroscopicité



Effet de l'hygroscopicité sur la taille



- **Mineral dust particles remain highly hydrophobic after their long-range transport over the North Atlantic**
- **No internal mixing with hydrophilic compounds** (sea salt coagulation, HNO_3 condensation, hygrophilic organic acids condensation,...)

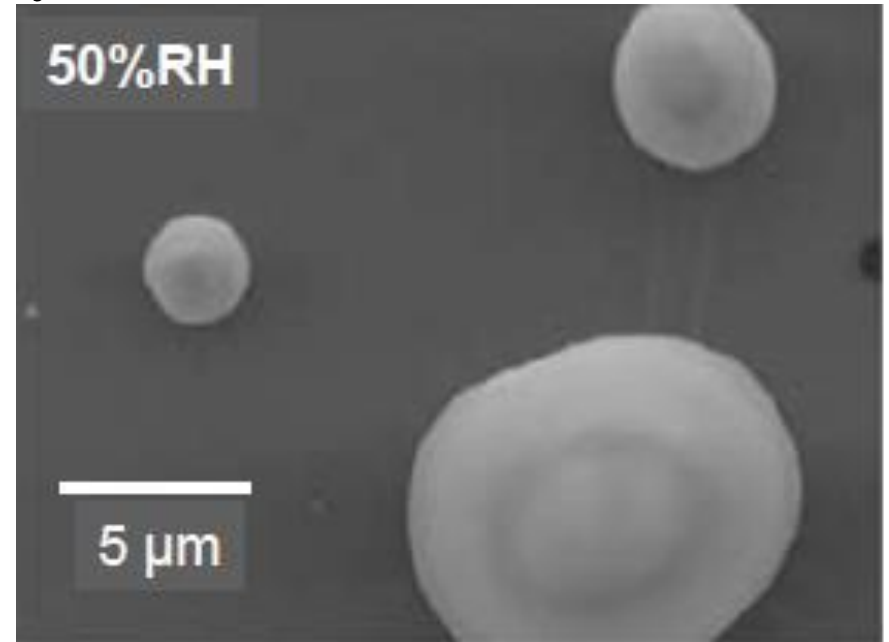
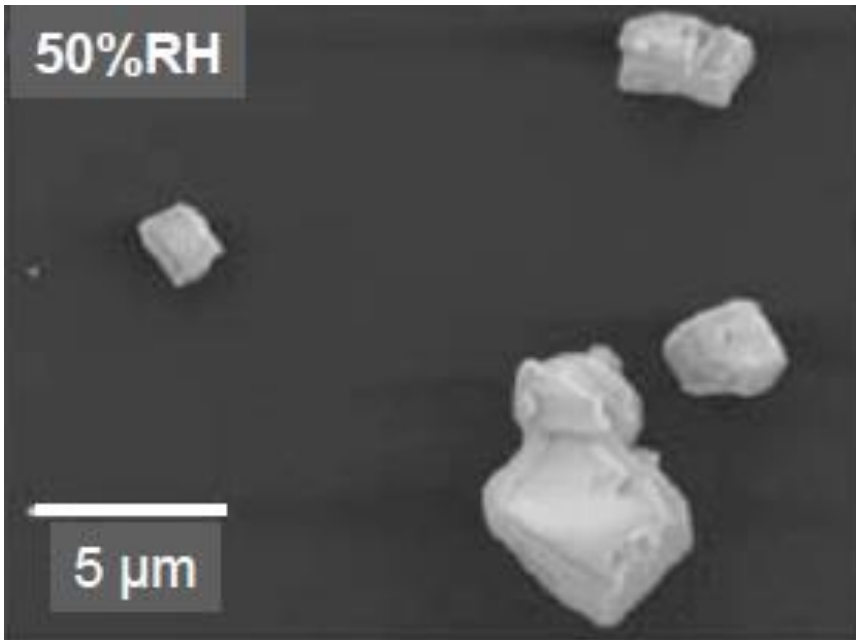
Réactivité chimique

Adapté depuis Laskin et al. (2005)

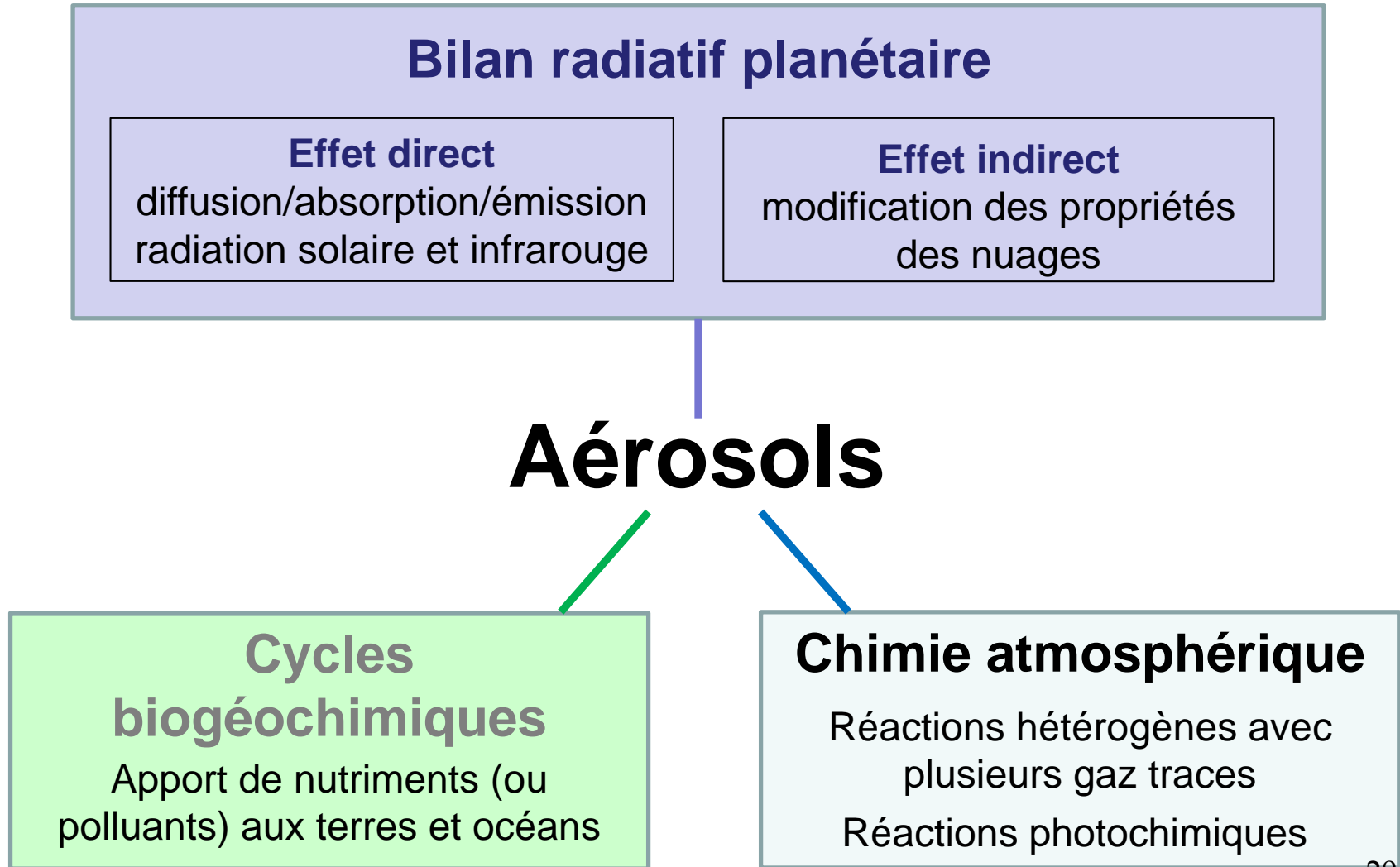
Carbonate de calcium CaCO_3

acide
nitrique
→

Nitrate de calcium $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$



Effets multiples sur le climat



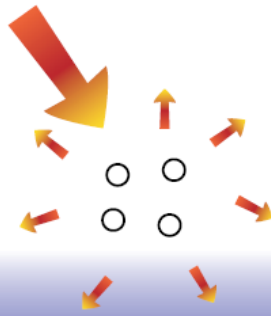
Intéractions aérosols-rayonnements

Absorption et diffusion du rayonnement dans plusieurs bandes spectrales.

Ils augmentent la réflectivité planétaire (« cooling effect ») et empêchent une partie du rayonnement de s'échapper (« warming effect »)

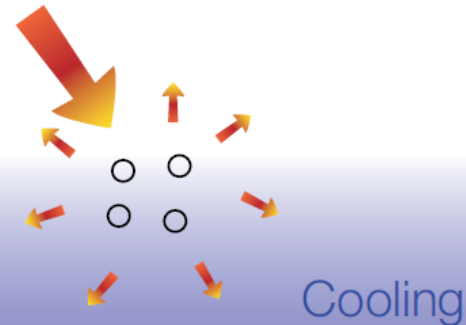
Scattering aerosols

(a)



Aerosols scatter solar radiation. Less solar radiation reaches the surface, which leads to a localised cooling.

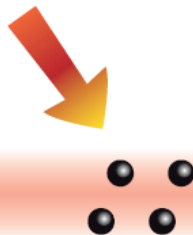
(b)



The atmospheric circulation and mixing processes spread the cooling regionally and in the vertical.

Absorbing aerosols

(c)



(d)



Effet radiatif direct

Warming

Albédo de simple diffusion "critique"

$$\omega_0 <$$

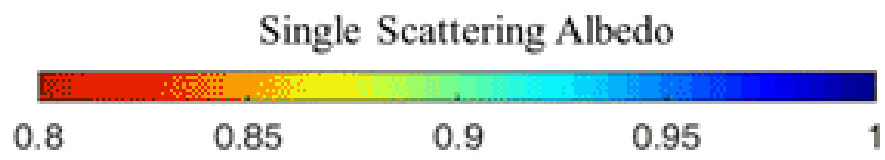
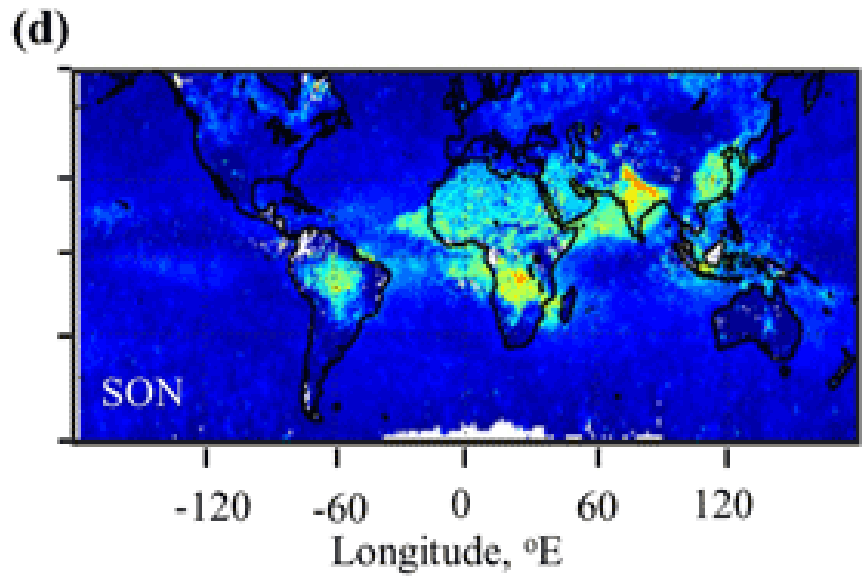
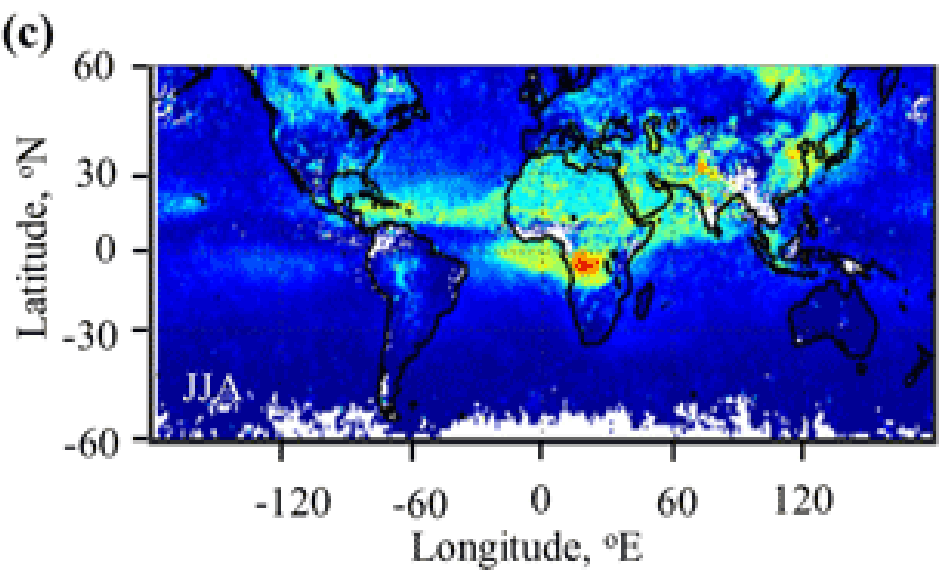
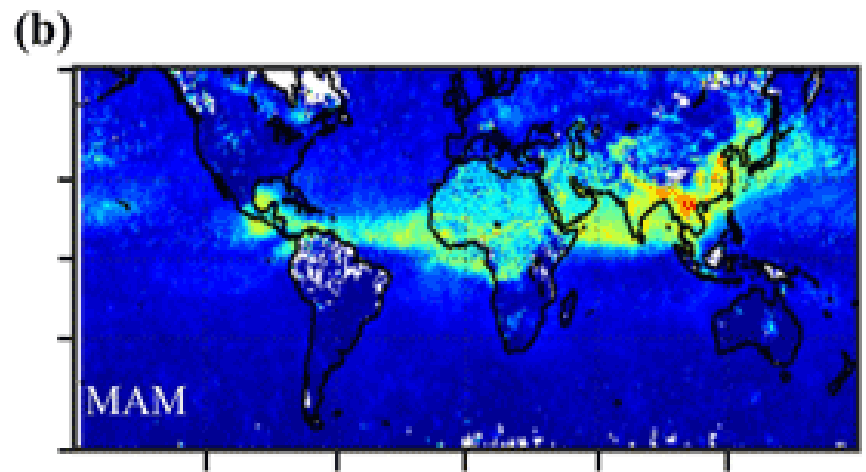
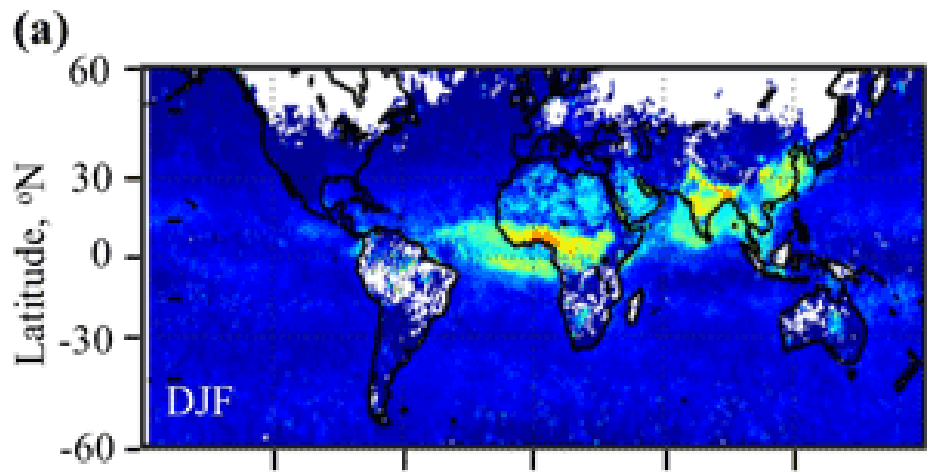
$$\omega_{\text{crit}} = \frac{2R_s}{2R_s + \beta(1 - R_s)^2}$$

réchauffement

$$\omega_0 >$$

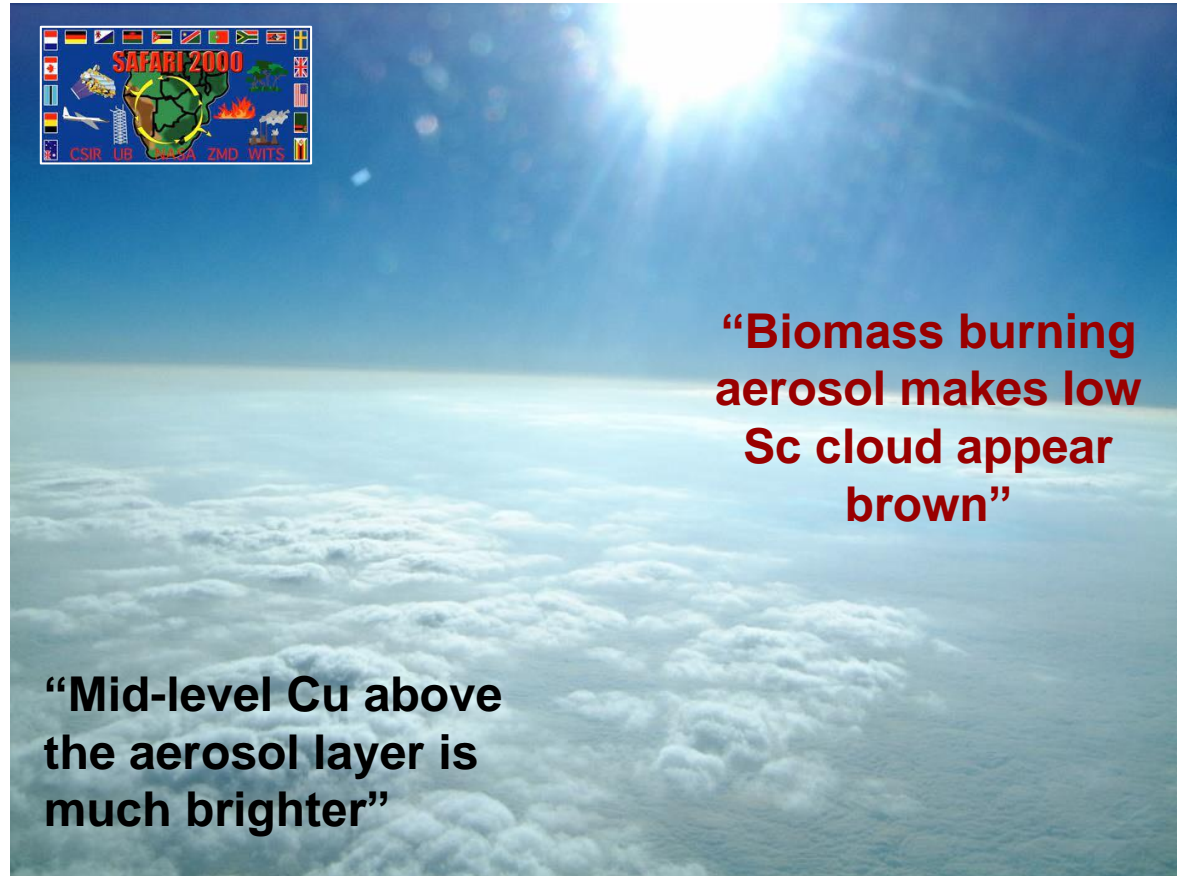
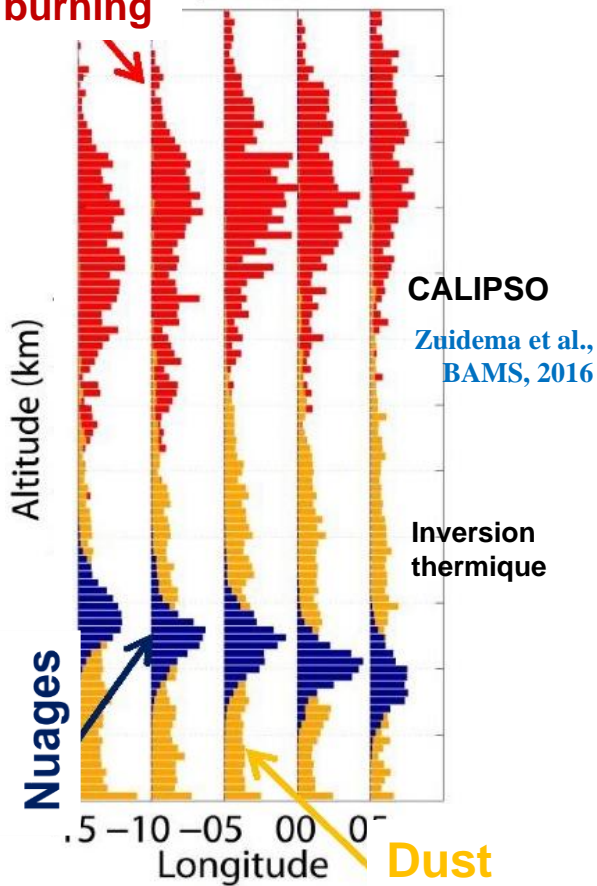
refroidissement

Depend de la reflectivité des surfaces



Effet radiatif direct aérosols absorbants au dessus des nuages

Biomass burning

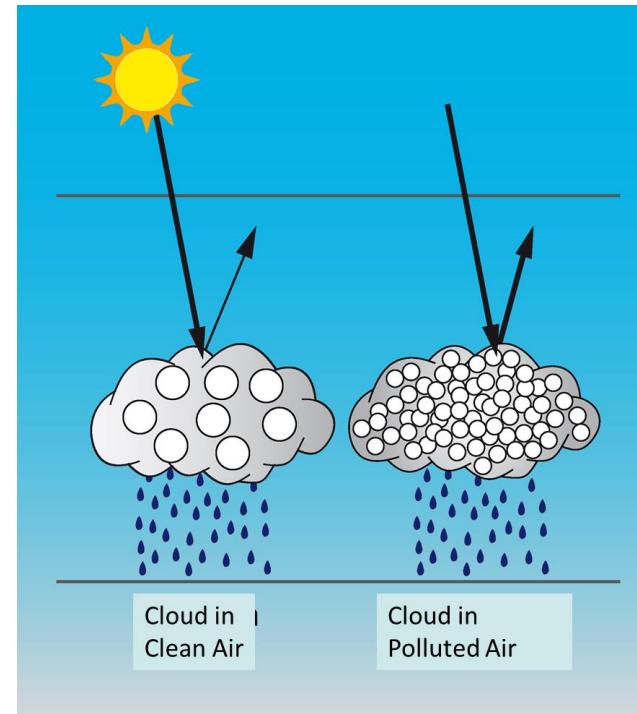
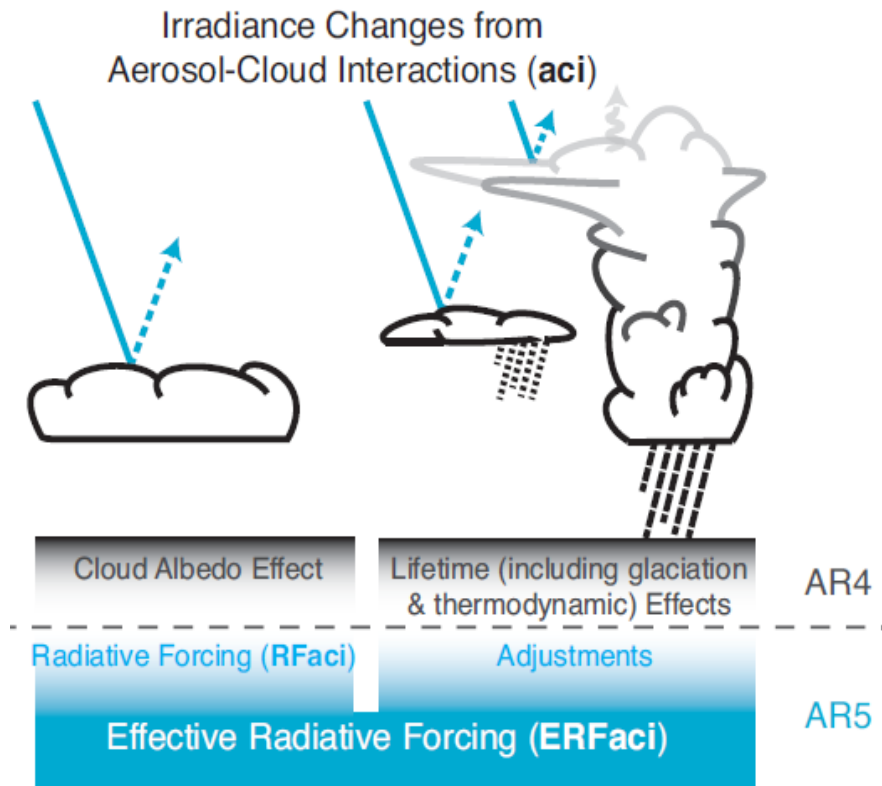


“Biomass burning aerosol makes low Sc cloud appear brown”

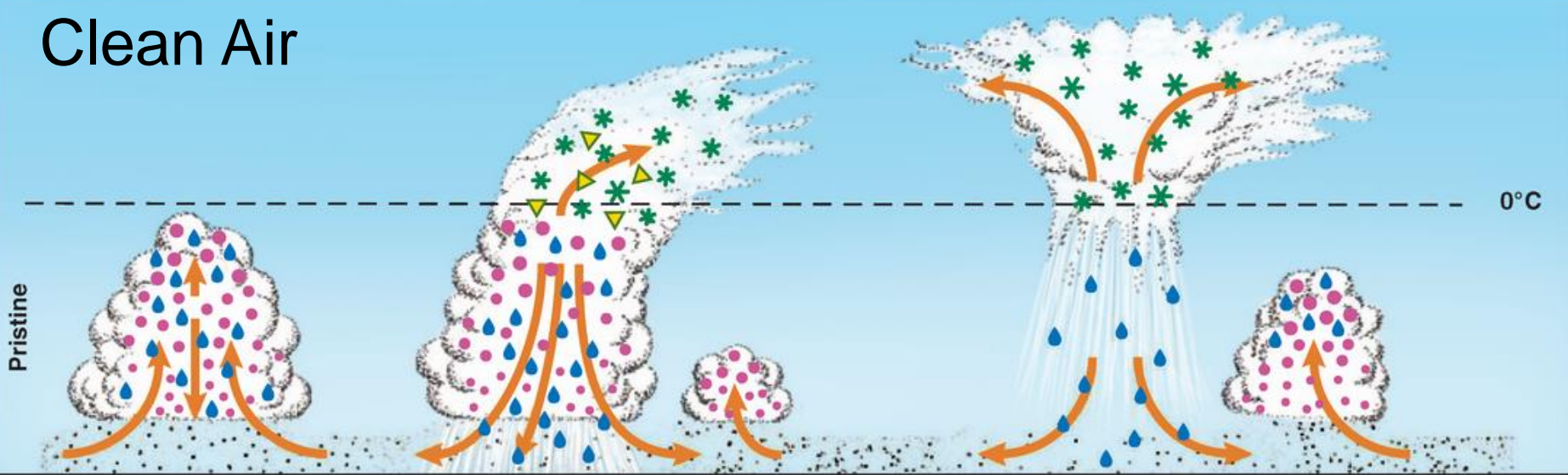
“Mid-level Cu above the aerosol layer is much brighter”

Effets radiatifs indirects

Les aérosols agissent des noyaux de condensation des nuages liquides, CCN, et nuages glacés, IN. Il modifie propriétés, distribution et temps de vie des nuages

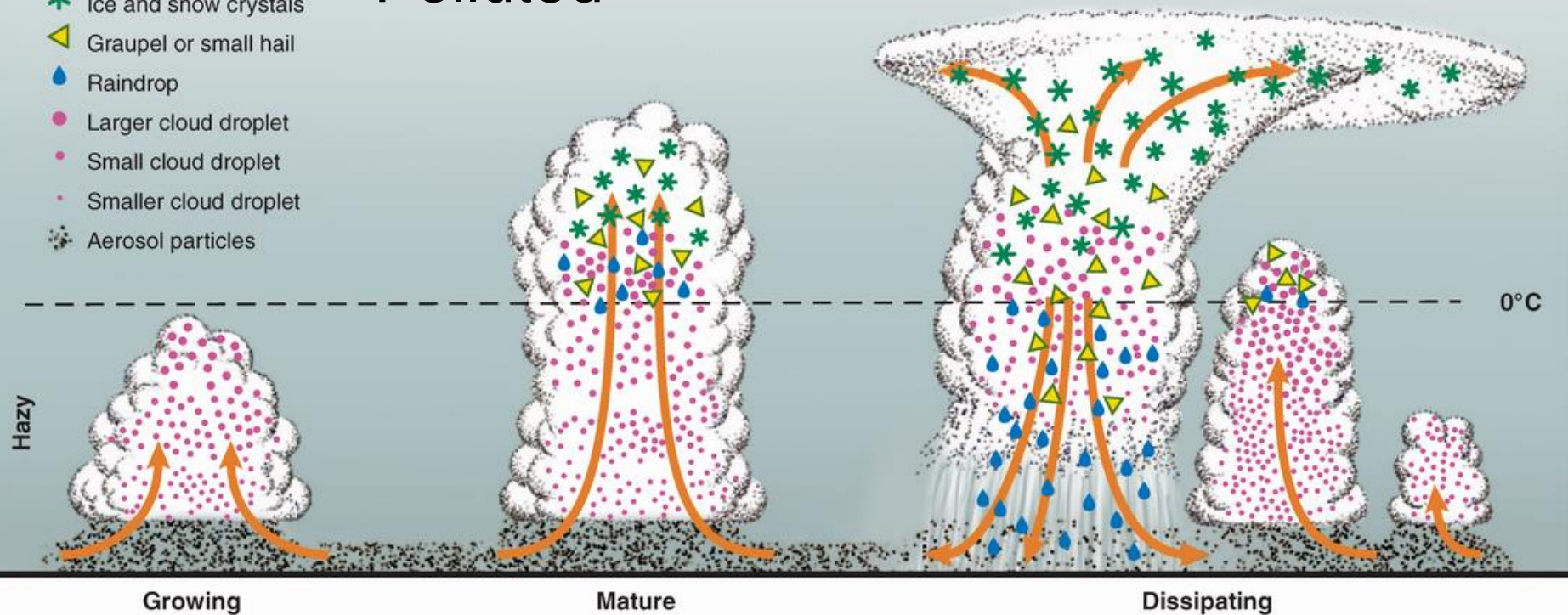


Clean Air

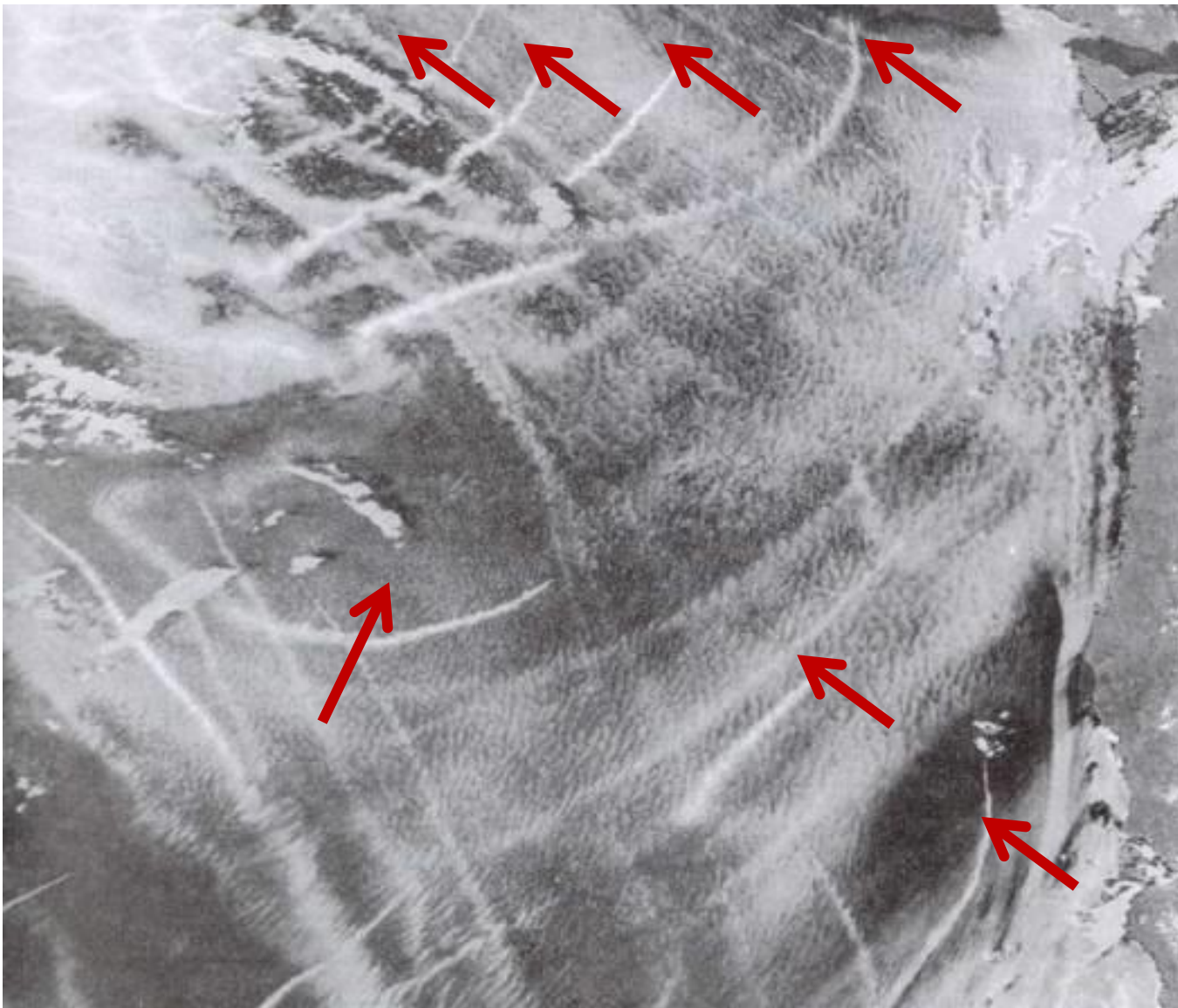


Polluted

- ➔ Direction of airflow
- ★ Ice and snow crystals
- ▲ Graupel or small hail
- Raindrop
- Larger cloud droplet
- Small cloud droplet
- Smaller cloud droplet
- Aerosol particles

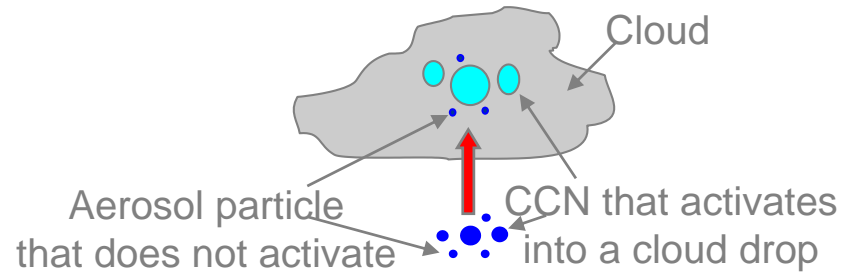


Trainées de fumée de bateaux



Spectres d'activation

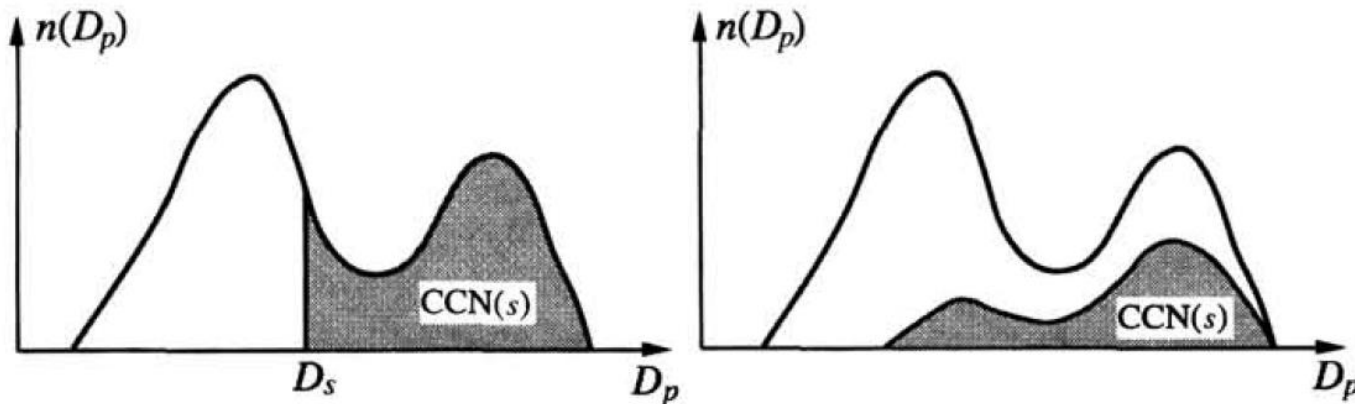
$$N_c = C (S-1)^k$$



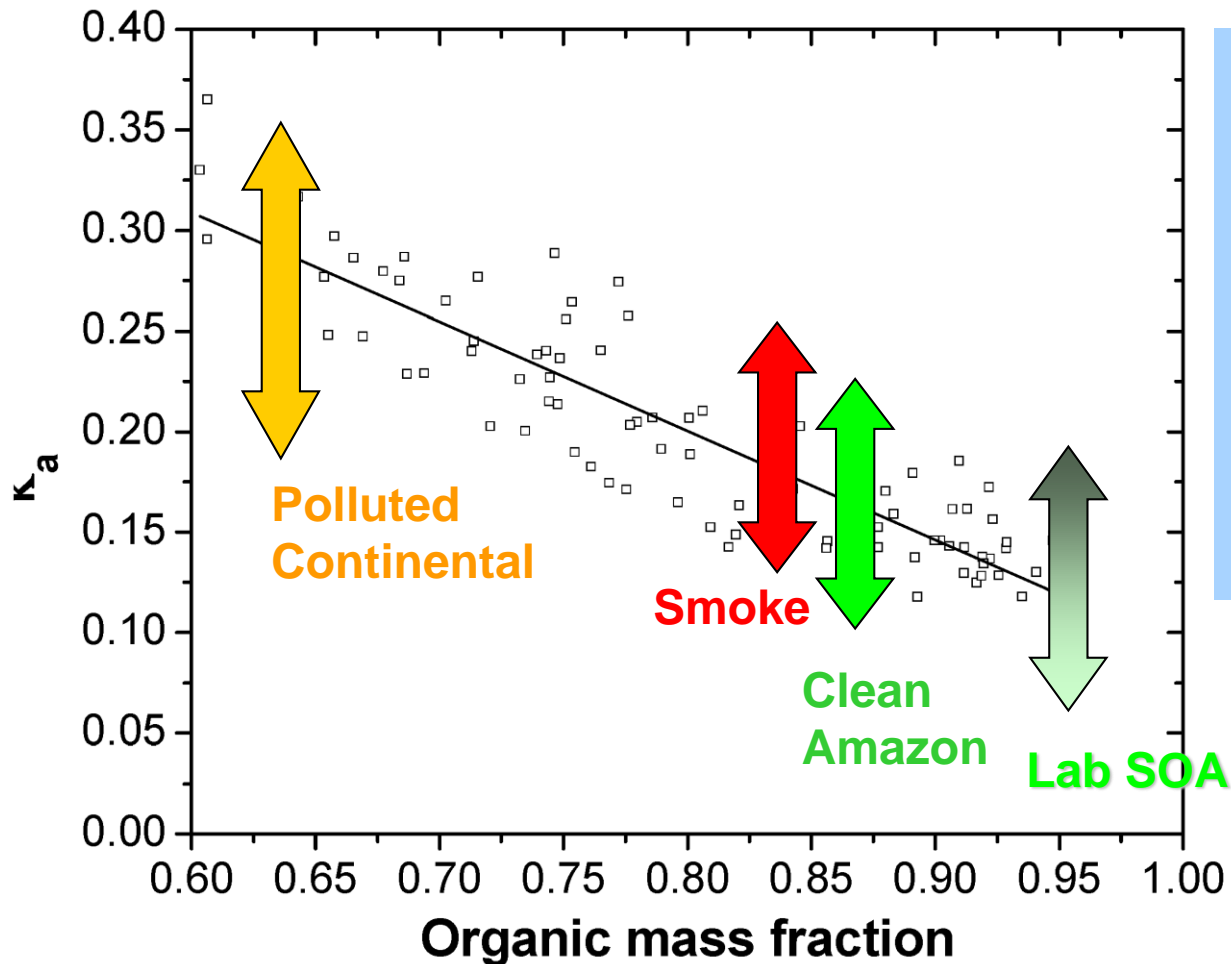
N_c est la concentration en nombre des particules qui sont activées pour devenir des noyaux de condensation

- C et k dépendent de la masse d'air
 - Masse d'air maritime: $30 < C < 300 \text{ cm}^{-3}$; $0.3 < k < 1$
 - Masse d'air continental: $300 < C < 3000 \text{ cm}^{-3}$; $0.2 < k < 2$

A parité de supersaturation, le nombre de noyaux est plus faible dans les nuages maritimes que continentales



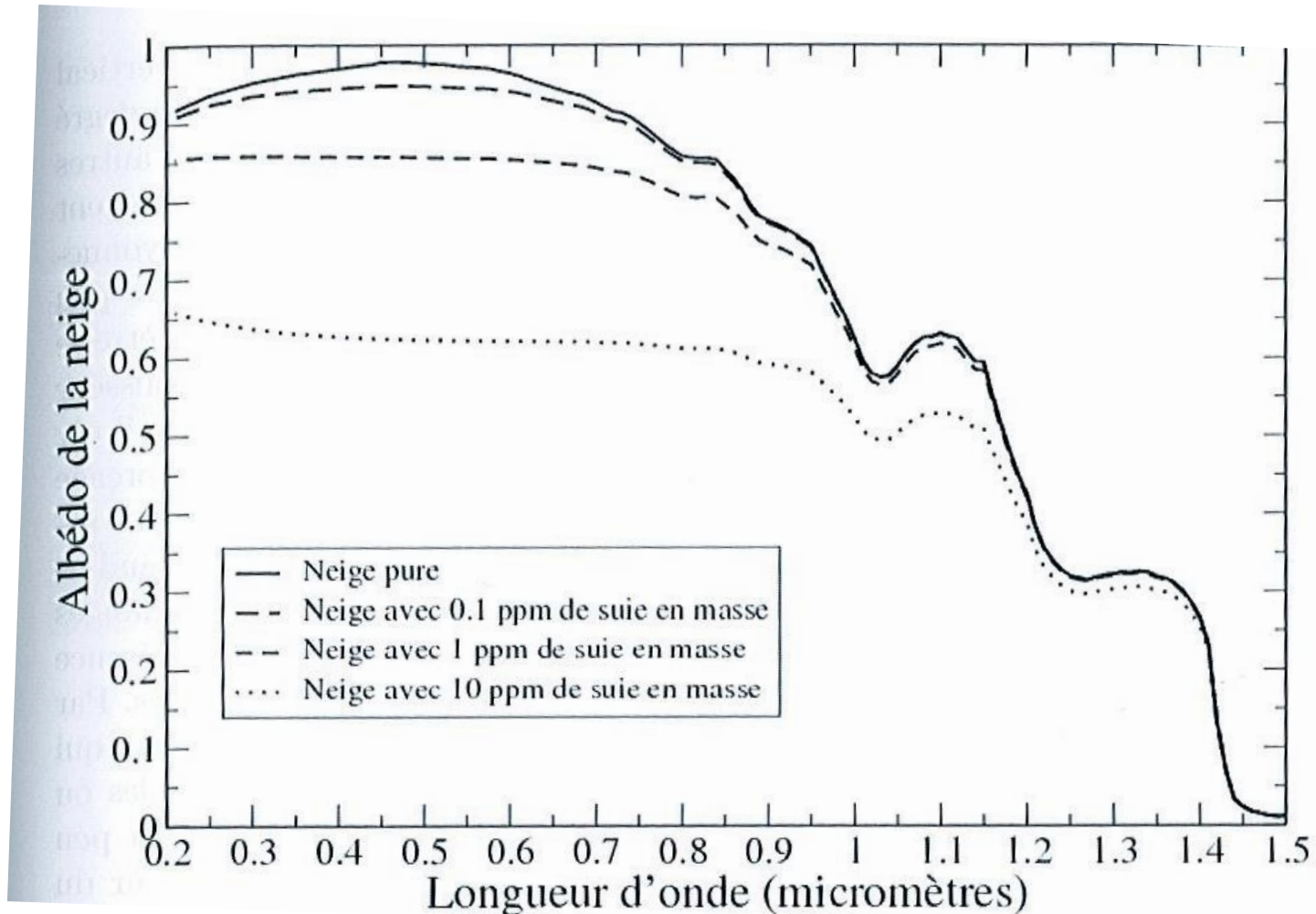
Lien entre composition et hygroscopicité



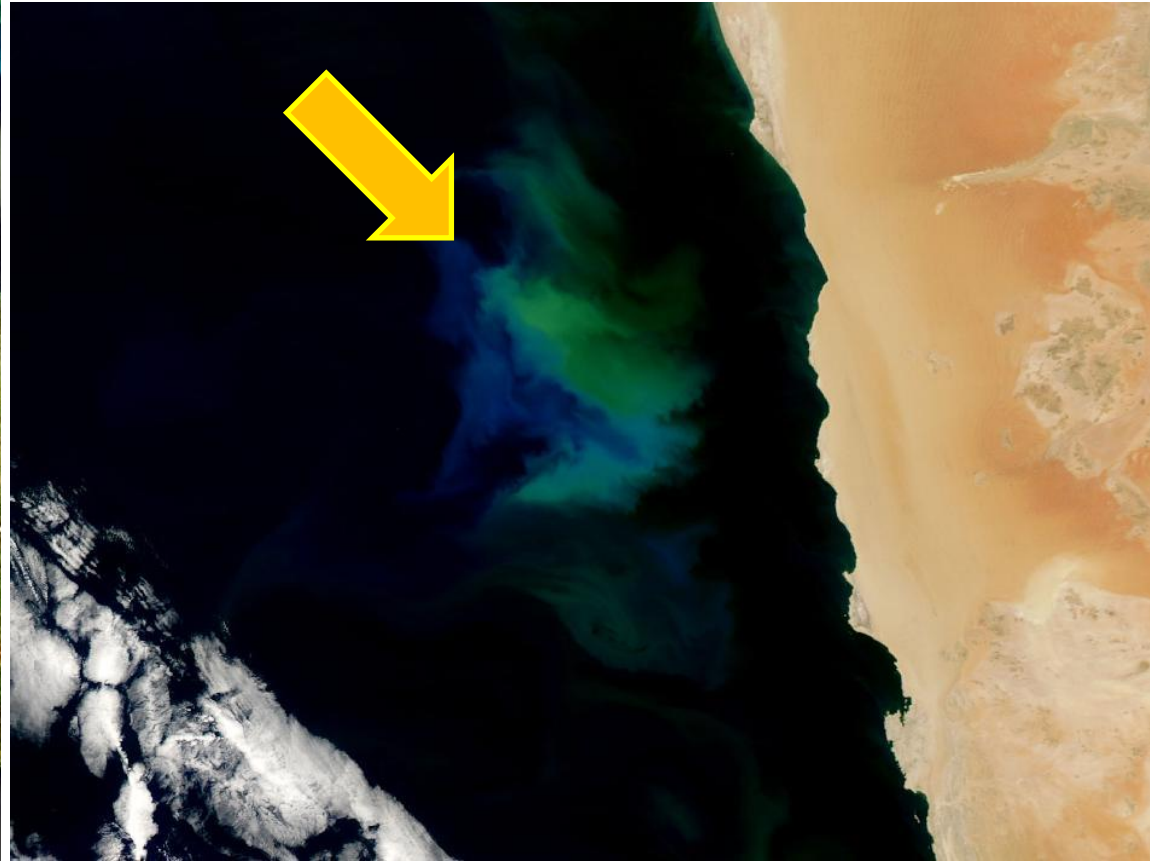
Smoke aerosol falls on mixing line between sulfate ($\kappa=0.6$) and lab Secondary Organic Aerosol ($\kappa\approx 0.1$)

Interactions liés au dépôt

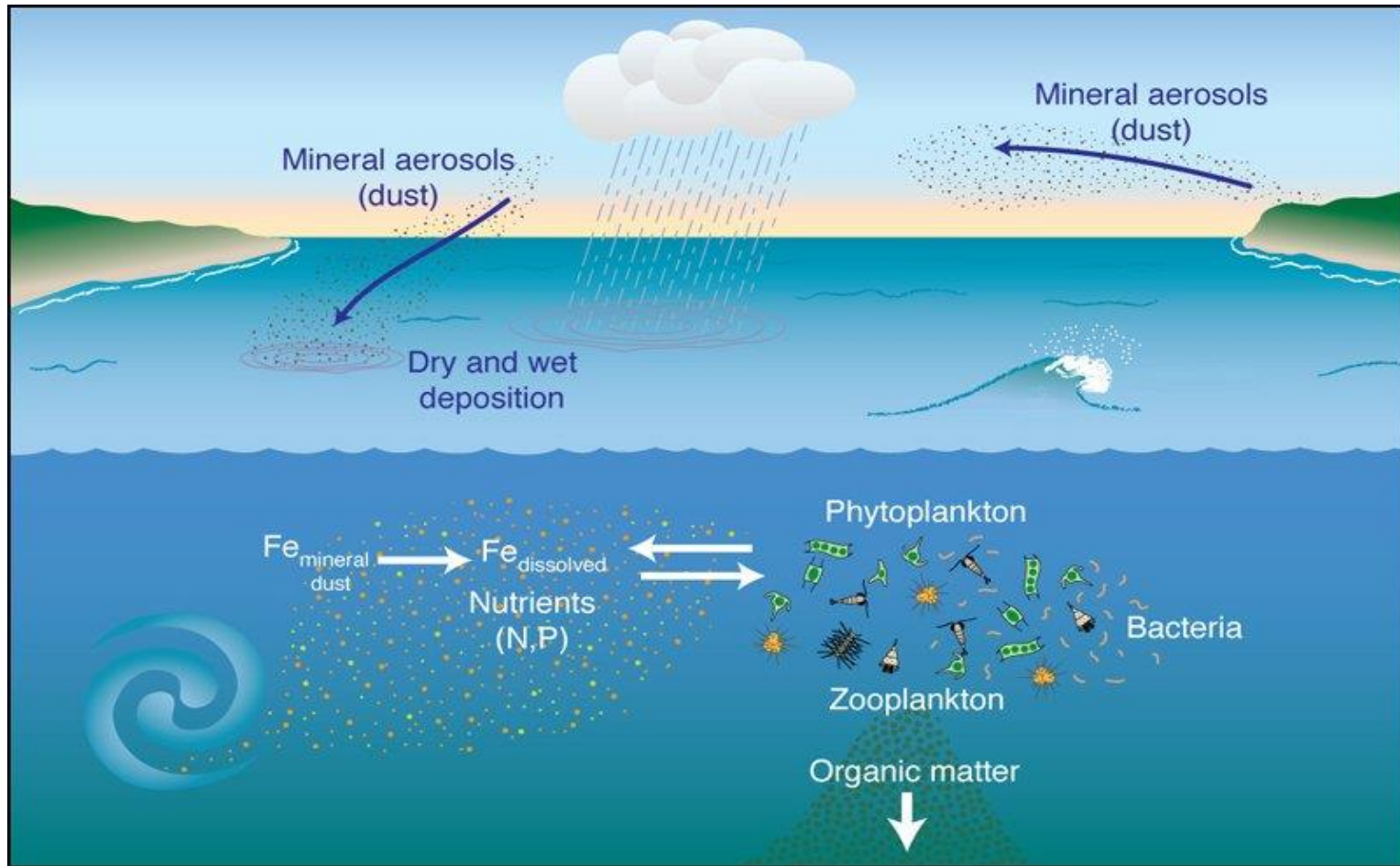
La quantité de suies déposées change l'albédo de surface de la neige



**Observations:
croissance de
phytoplancton en zone
de transport des
poussières désertiques**



Iron Fertilization Hypothesis

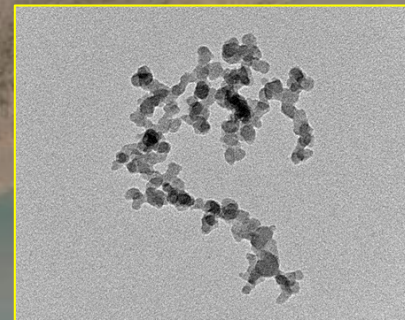


Le Fer est un micro-nutriment limitant dans certains écosystèmes océaniques éloignés (High Nutrient Low Chlorophyl regions)

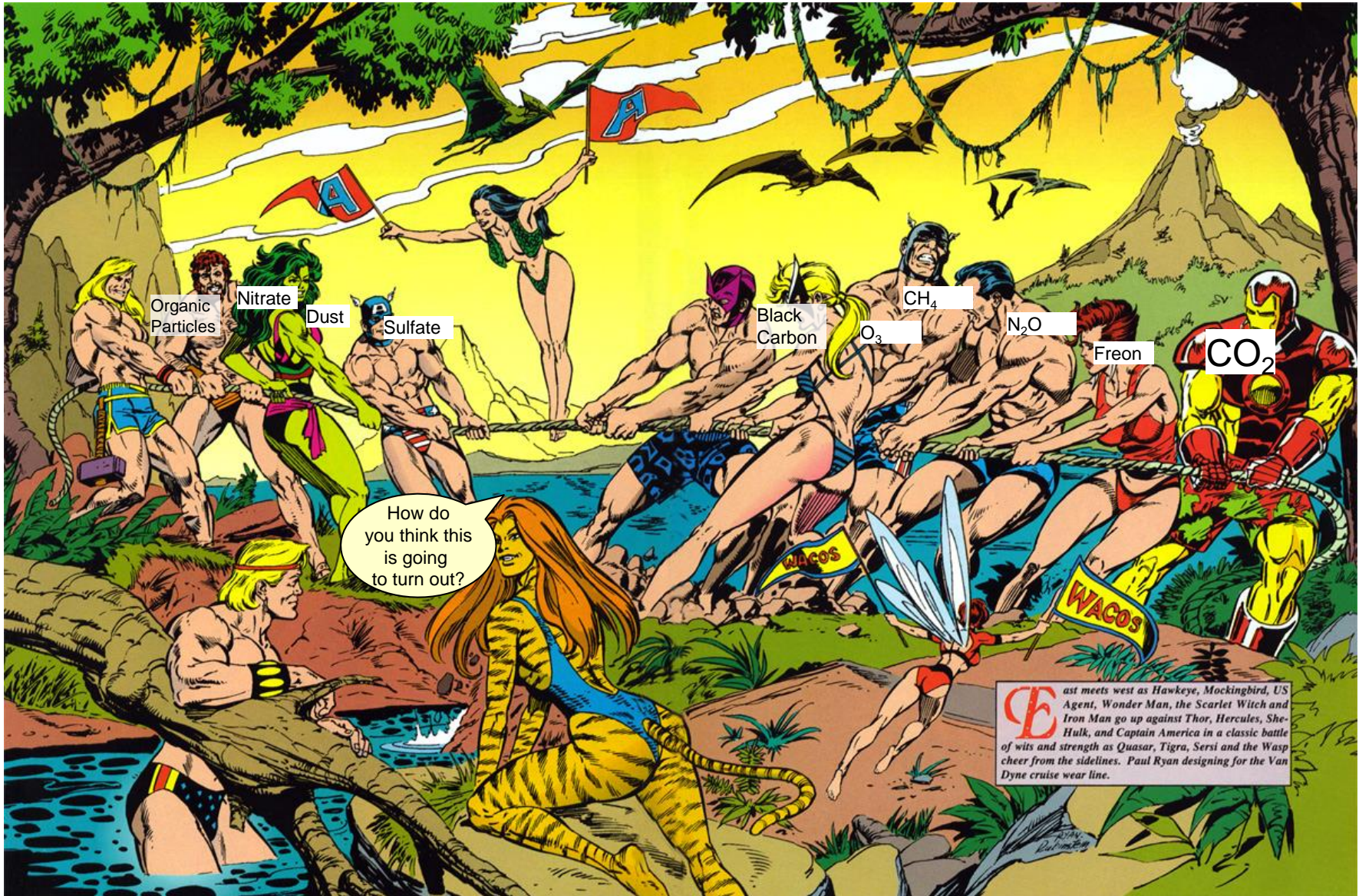
En synthèse

Des petites particules avec des grands effets

Beijing



Le bras de fer climatique

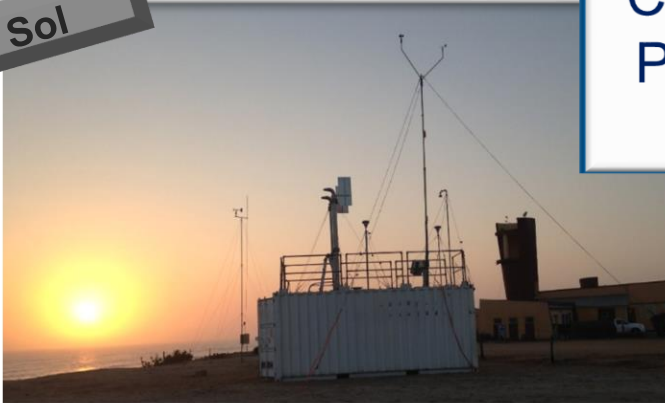


Approche multi instrumentale et synergique

Avion



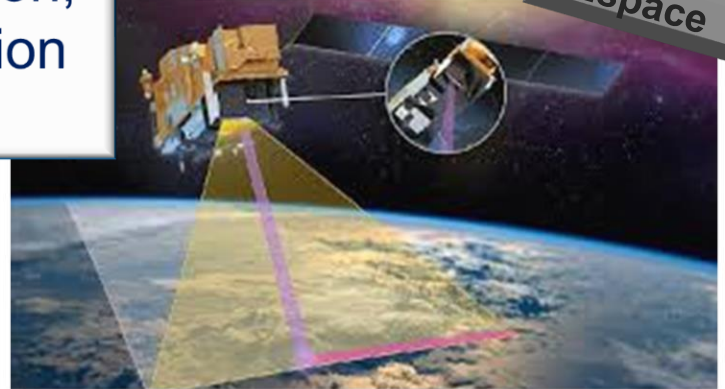
Sol



Laboratoire

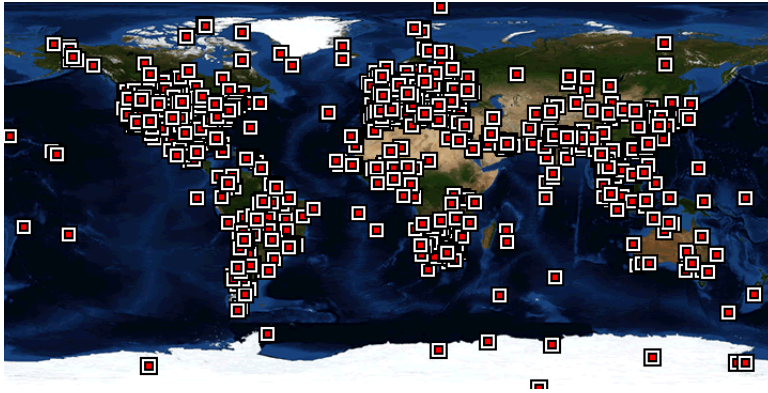


Espace

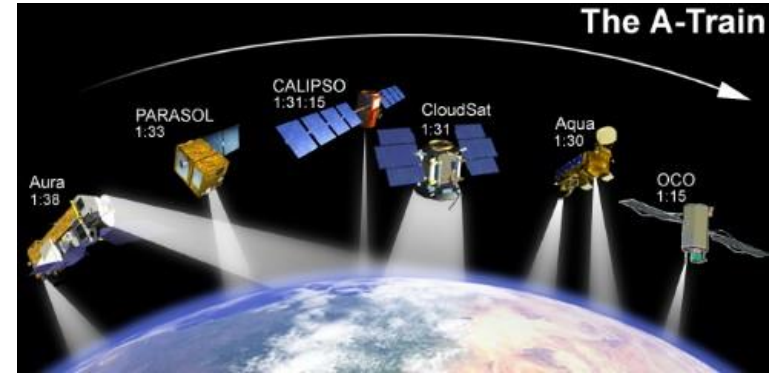


Caractérisation
Compréhension,
Paramétrisation
Validation

Représentation de la variabilité globale



AERONET, aerosol robotic network,
<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>



The Afternoon Constellation -
A-Train – NASA
<https://atrain.nasa.gov/>



Global Atmosphere Watch
Programme (GAW), WMO
(World Meteorological
Organisation)

Manque d'observations dans les zones éloignées

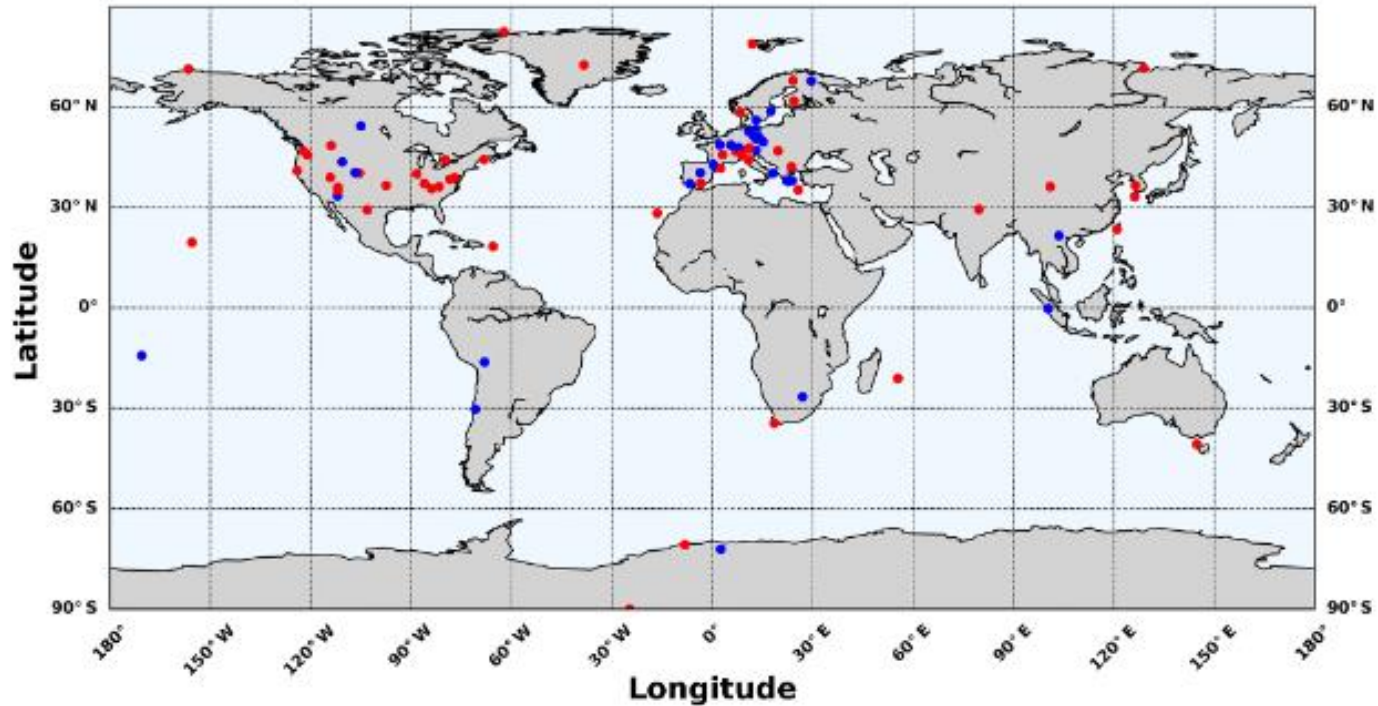
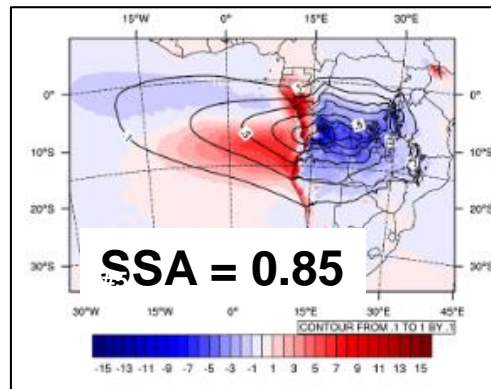
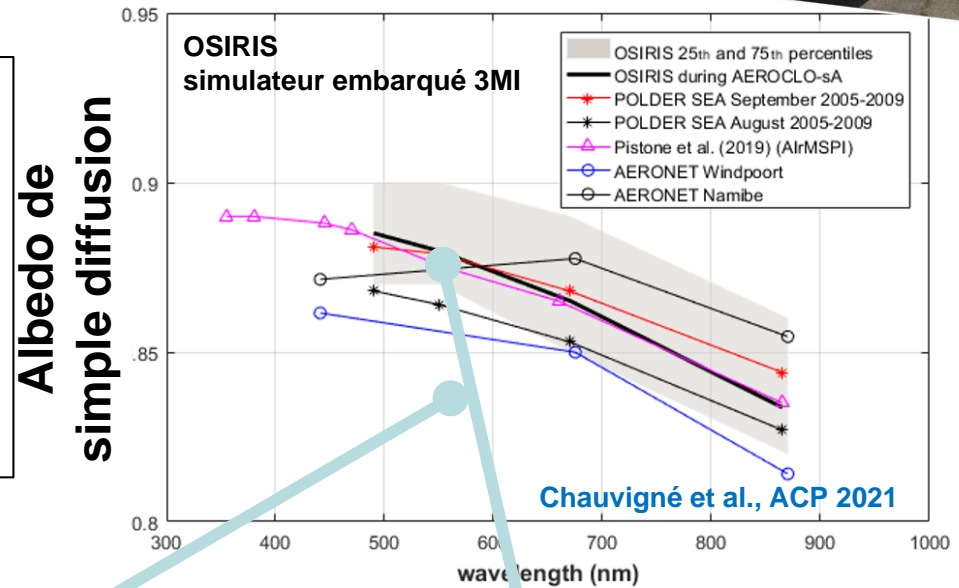
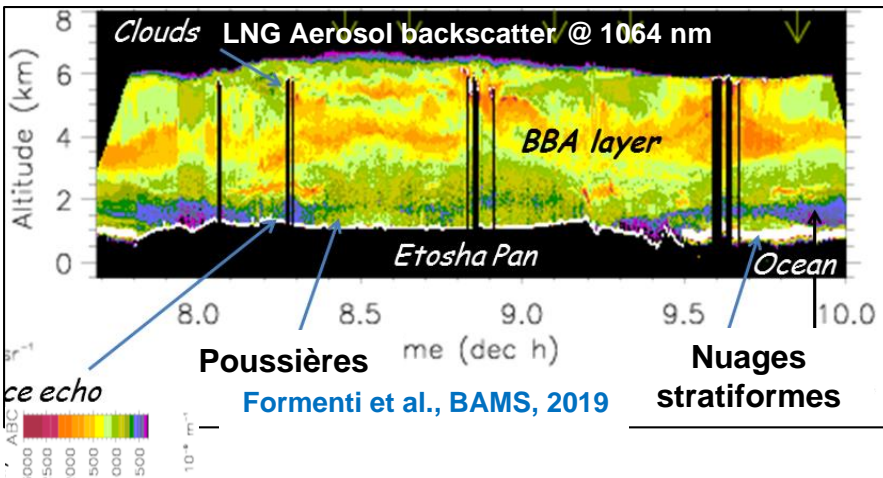


Figure 1. Location of sites contributing to the present study. In blue, sites which provided information for the reference year 2017 and in red, sites that in addition, provided > 10-year time series for optical properties used in Collaud Coen et al. (2020b).

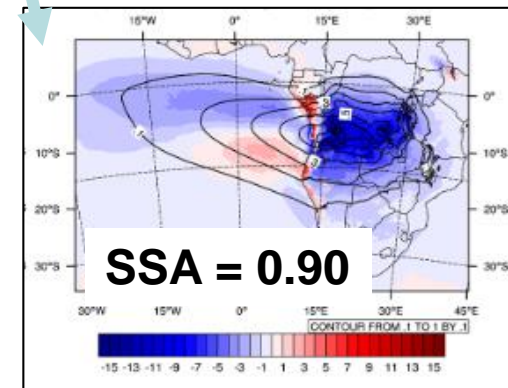
Laj, P., et al., 2020.



Campagnes de terrain dédiées



- Grande hétérogénéité spatiale
- DRE > 0 au dessus des nuages stratiformes
- DRE < 0 autrement



TOA DRE all sky ($W m^{-2}$), JAS 2000-2015

Mallet et al., ACP, 2020

Quelques conclusions

Plusieurs défis dans l'étude des aérosols atmosphériques

- ❑ Instrumentaux, expérimentaux, méthodologiques
approche multi instrumentale, multi plateformes et multi échelles

Questions ouvertes (liste pas exhaustive!)

- ❑ Limites instrumentales (étendue spectrale UV-IR, large gamme de tailles 1 nm – 100 µm, concentrations très variables 1 #/cm³ – 10⁶ #/cm³, ...)
- ❑ Proxies, modèles simplifiés vs complexité réelle
(études de laboratoire, schéma des modèles, algorithmes de restitution satellitaires)
- ❑ Ensemble des données importante, series longues (>50 yrs recherche)
Techniques d'analyses avancées (IA, machine learning, ...)
Exercices d'intégration et synthèse: <https://gassp.org.uk/database/>
- ❑ Manque d'observations dans les zones éloignées

Merci!

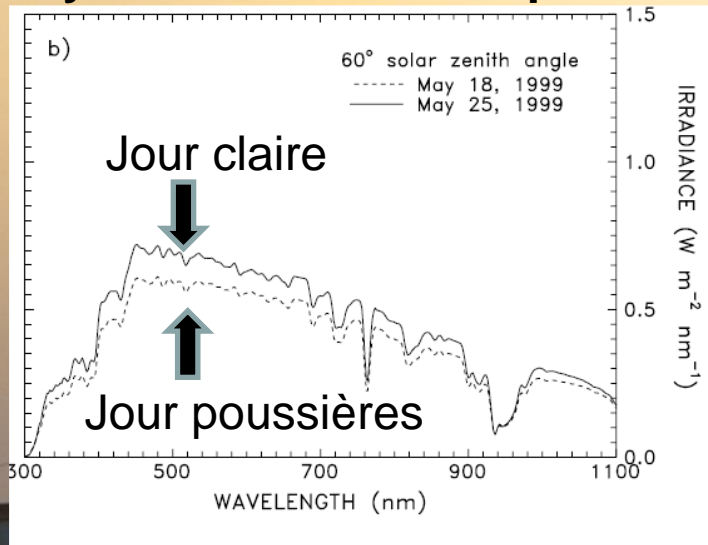
paola.formenti@lisa.ipsl.fr

Station d'observation
des aerosols en
Namibie, avril 2022

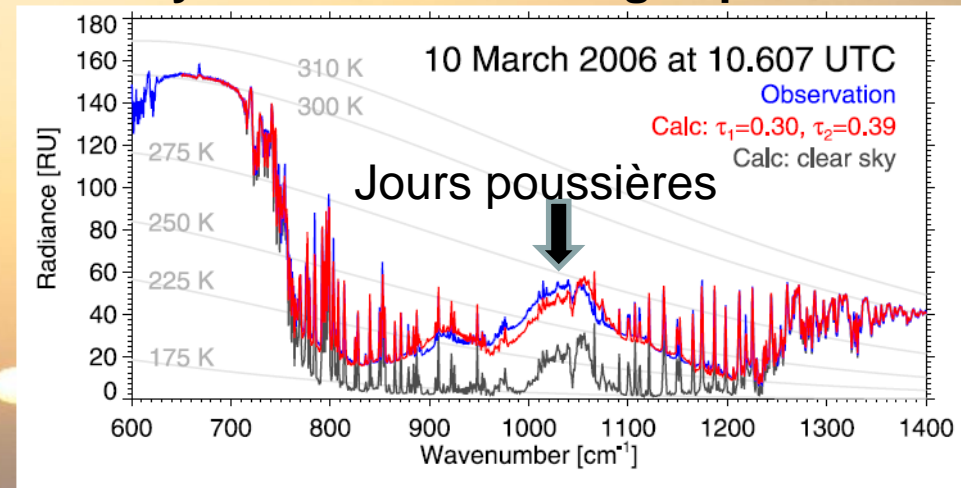


Bilan radiatif: le rôle des aérosols

Rayonnement solaire spectral au sol

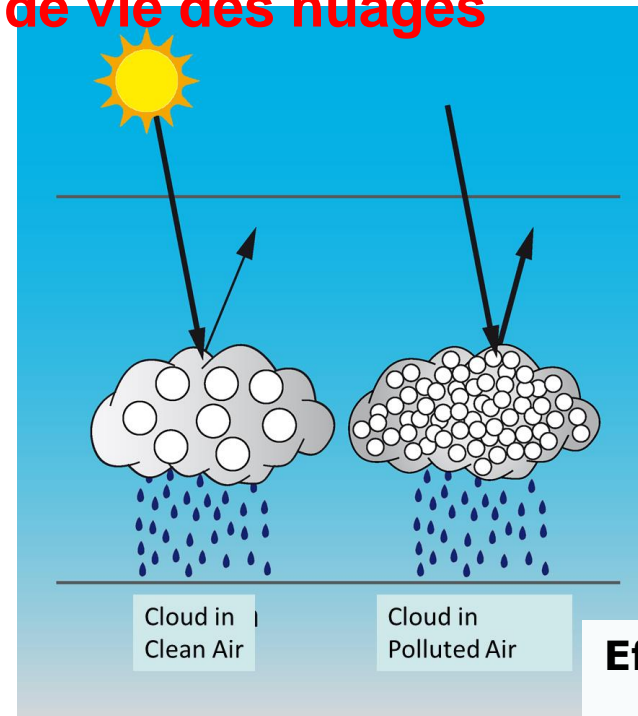
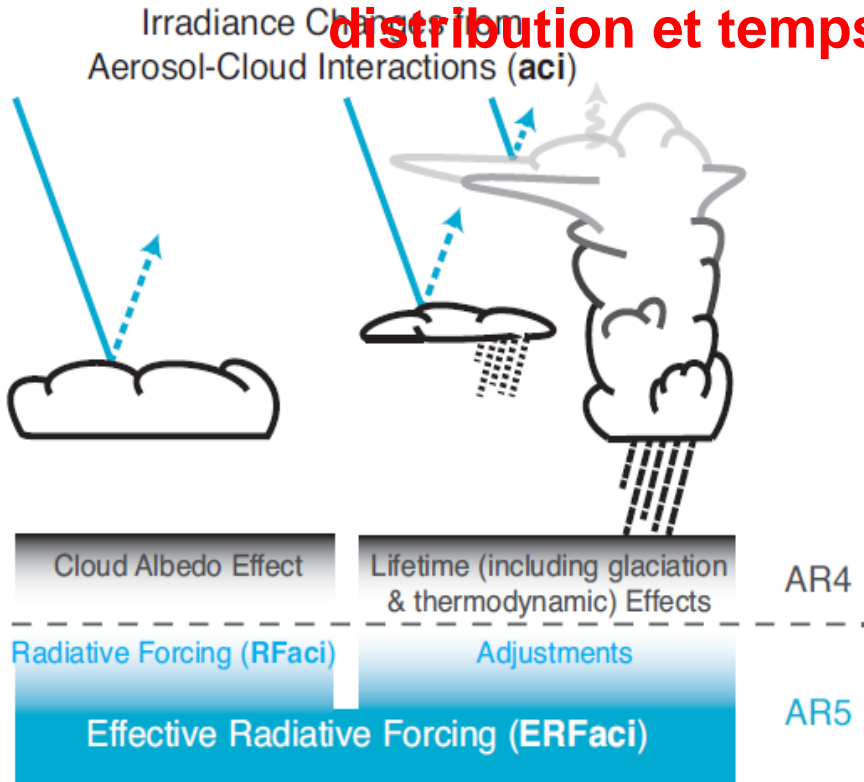


Rayonnement infrarouge spectral au sol

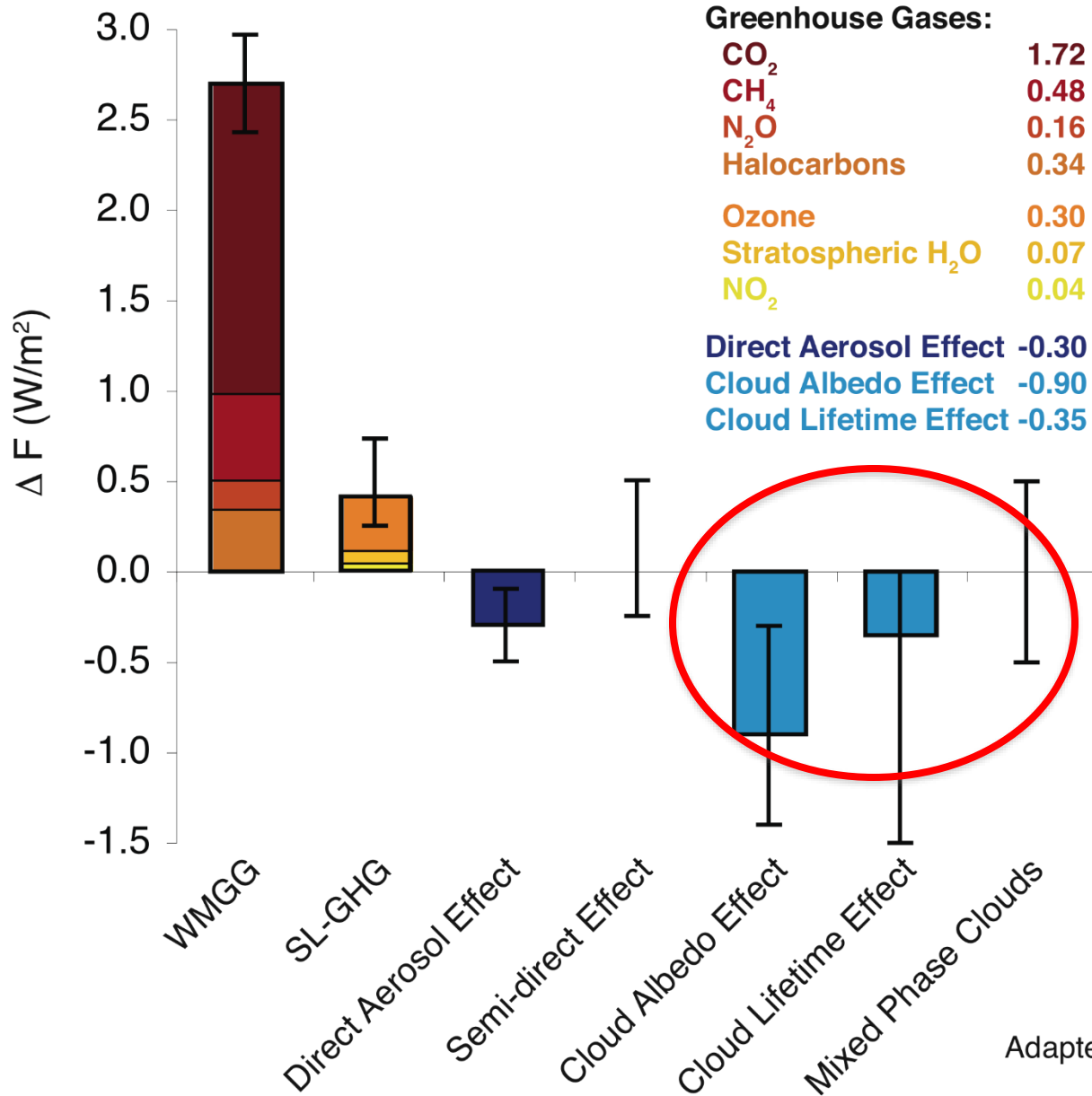


Bilan radiatif: le rôle des aérosols

Les aérosols agissent des noyaux de condensation des nuages liquides, CCN, et nuages glacés, IN. Il modifient propriétés, distribution et temps de vie des nuages

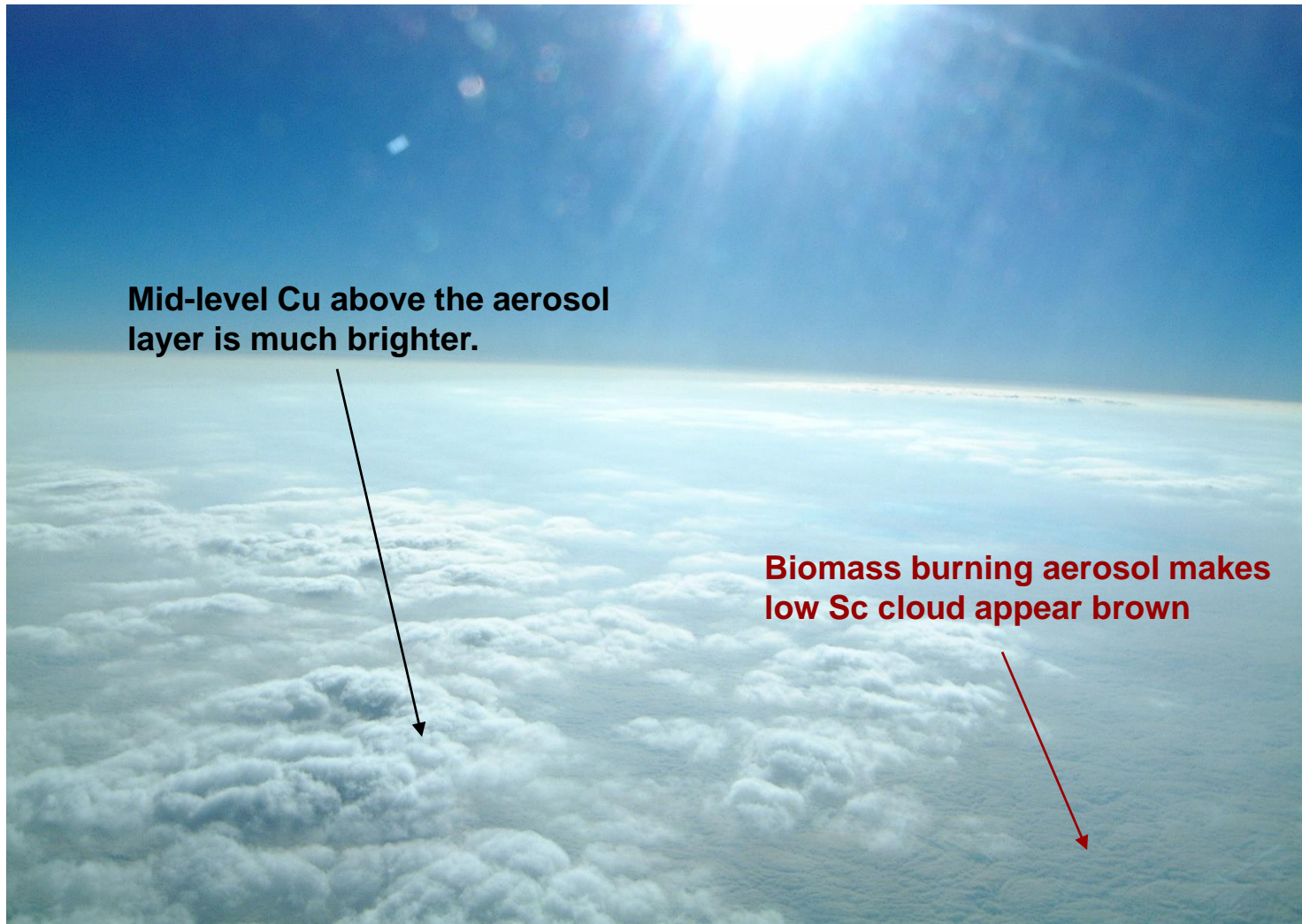


Global Radiative Forcing 1750-2007

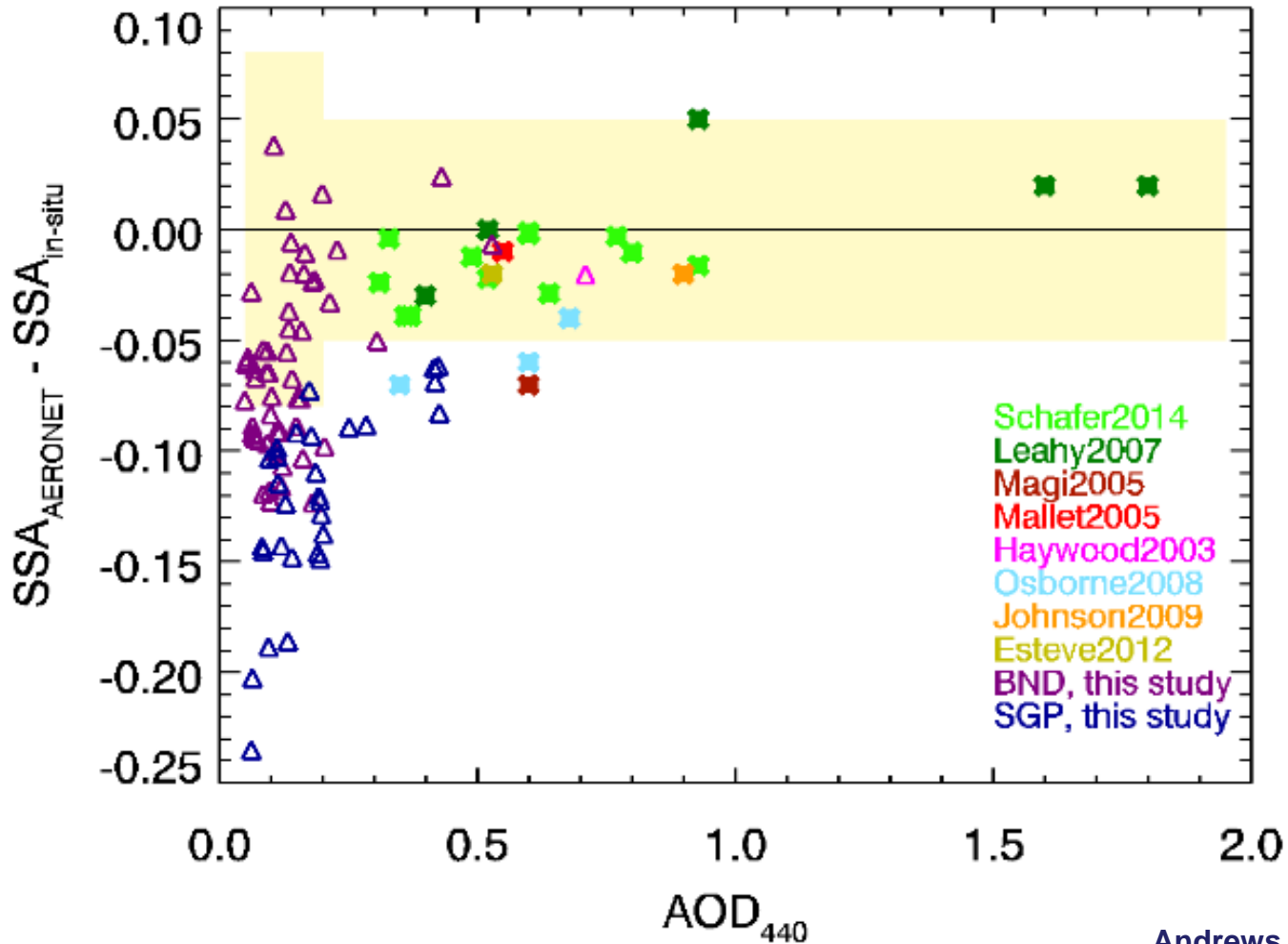


Adapted from Isaksen et al. (2009)

Observations aéroportées au large de la Namibie



Incertitude sur l'albedo simple de diffusion

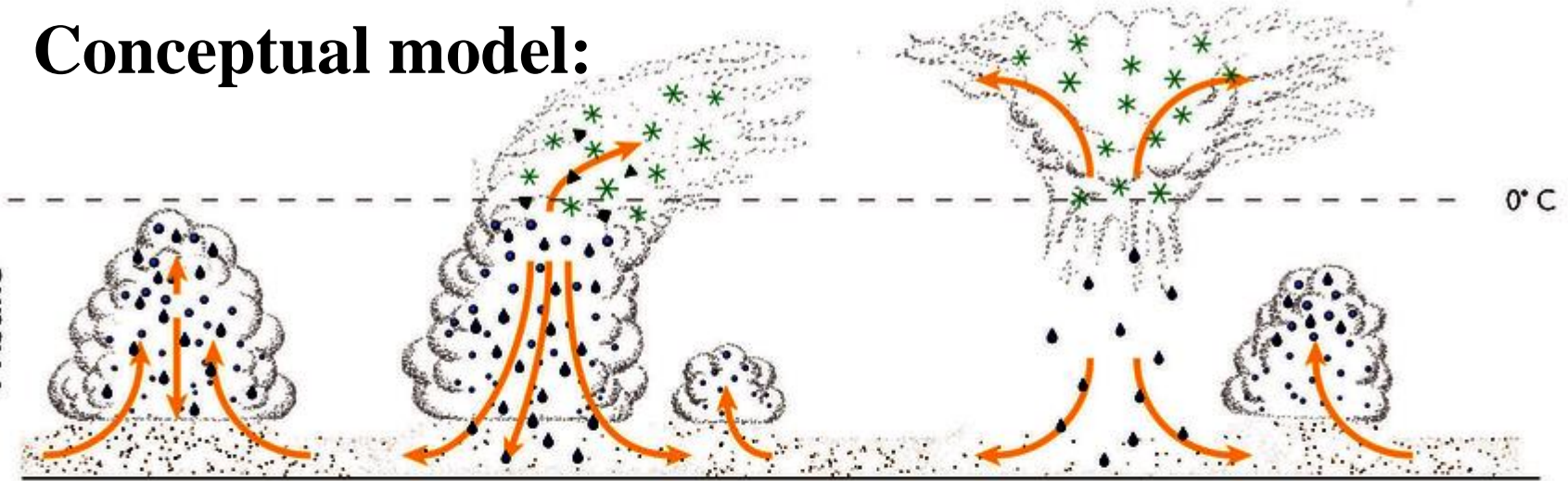


Quelques ordres de grandeurs

Epaisseur optique τ	~ 0.06 (zone marine éloignée) à 0.9 (zones sources désertiques), moyennes mensuelles (Holben et al., 2001)
Albédo de simple diffusion ω_0	~ 0.7 (aérosols carbonés issus de combustion) à 1 (sulfates) (Seinfeld and Pandis, 1997)
Coefficient de rétrodiffusion β_{up}	~ 0.1 à 0.3 selon la distribution en taille des particules (Seinfeld and Pandis, 1997)

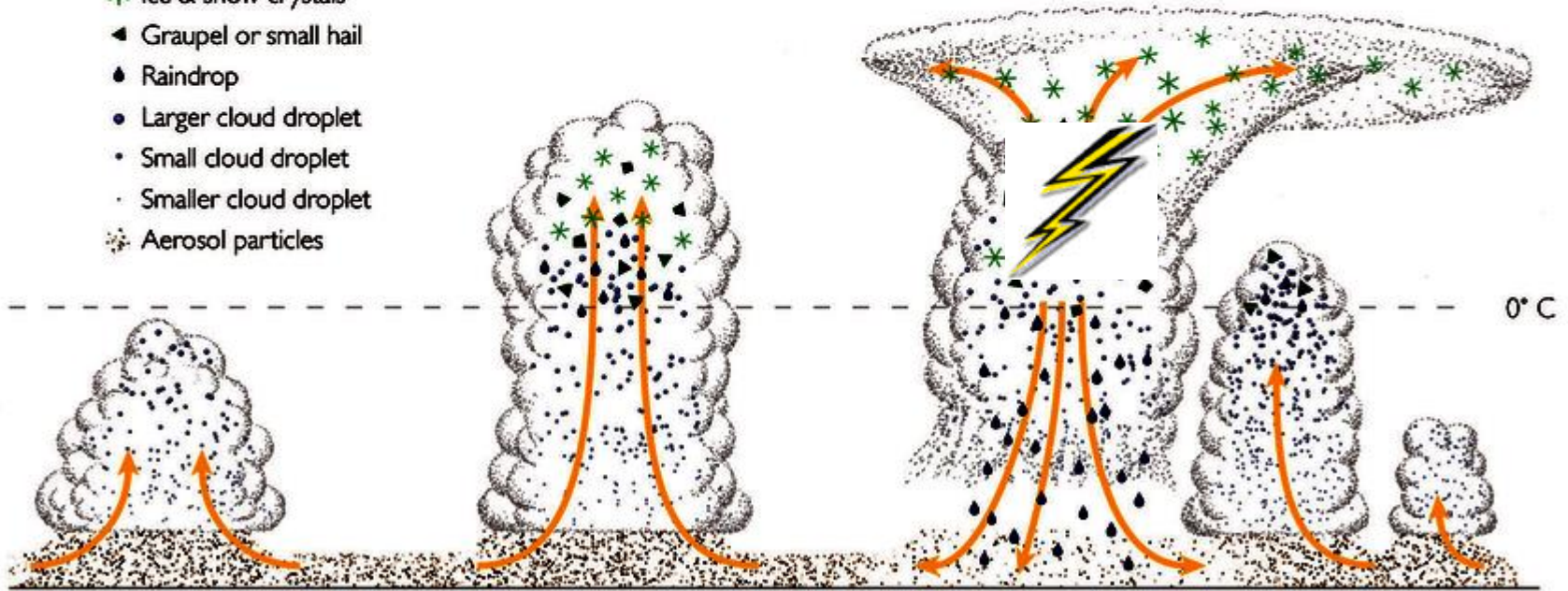
Conceptual model:

Pristine



- Direction of airflow
- * Ice & snow crystals
- ◄ Graupel or small hail
- Raindrop
- Larger cloud droplet
- Small cloud droplet
- Smaller cloud droplet
- ⊙ Aerosol particles

Hazy

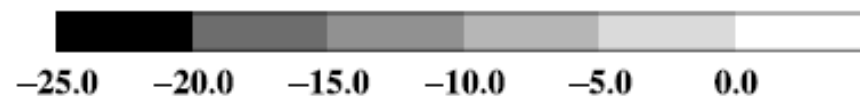
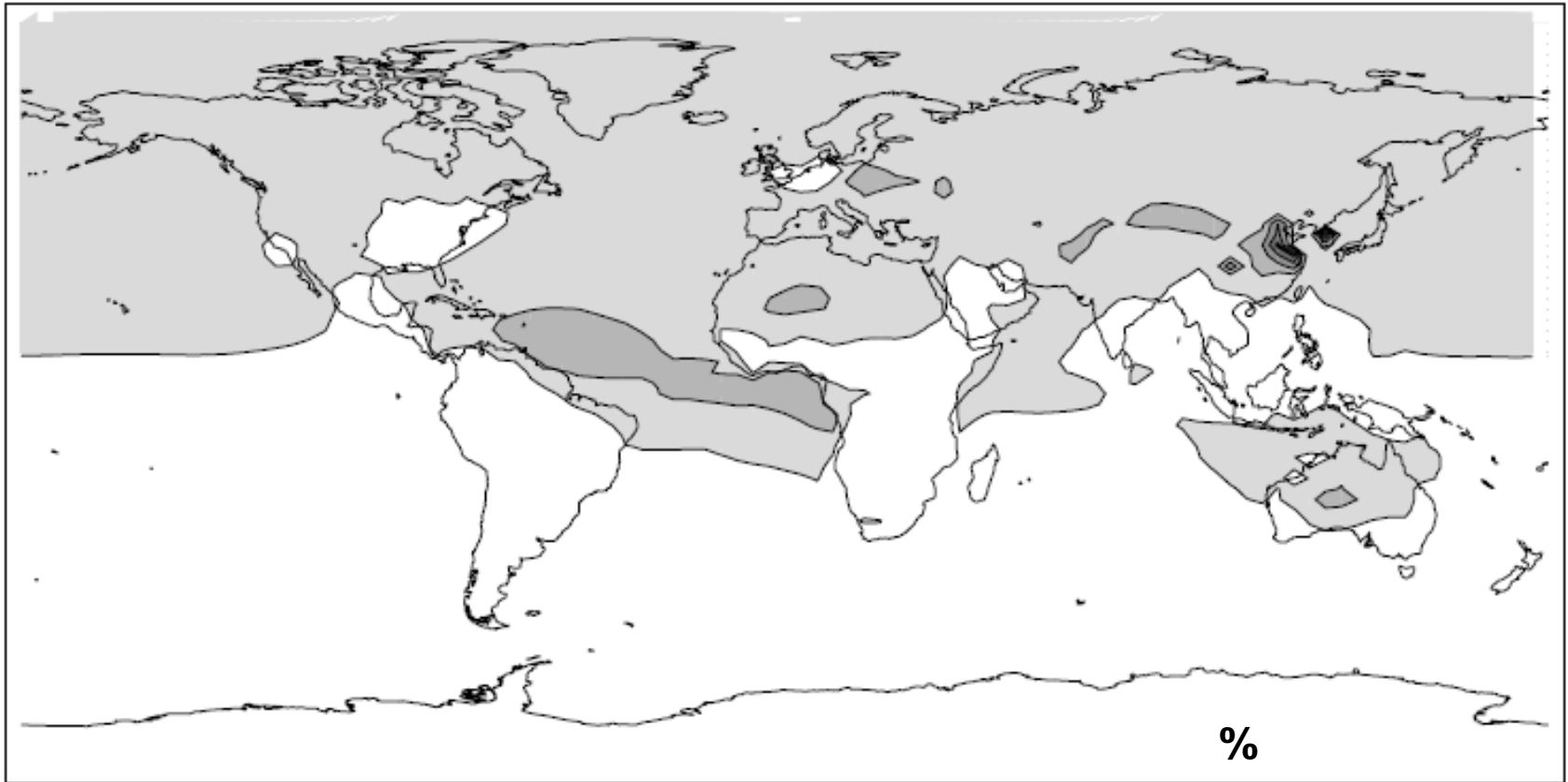


Growing

Mature

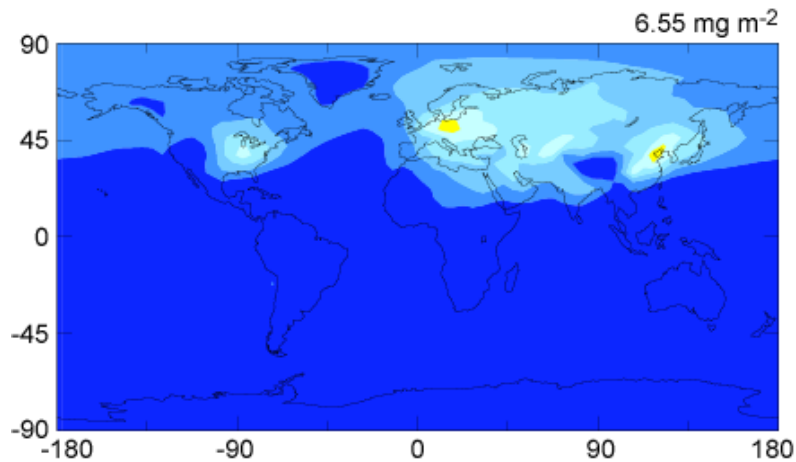
HAIL Dissipating

Les réactions hétérogènes changent le concentrations gazeuses: ex. O_3

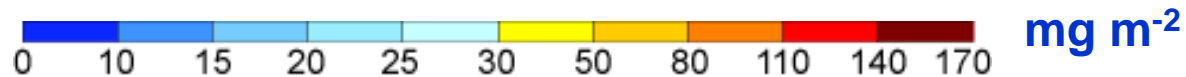
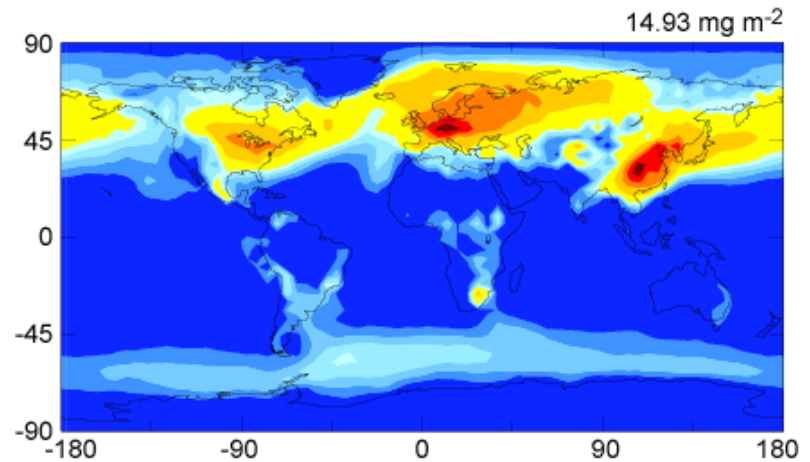


Effet de l'eau sur la masse des aerosols en atmosphère

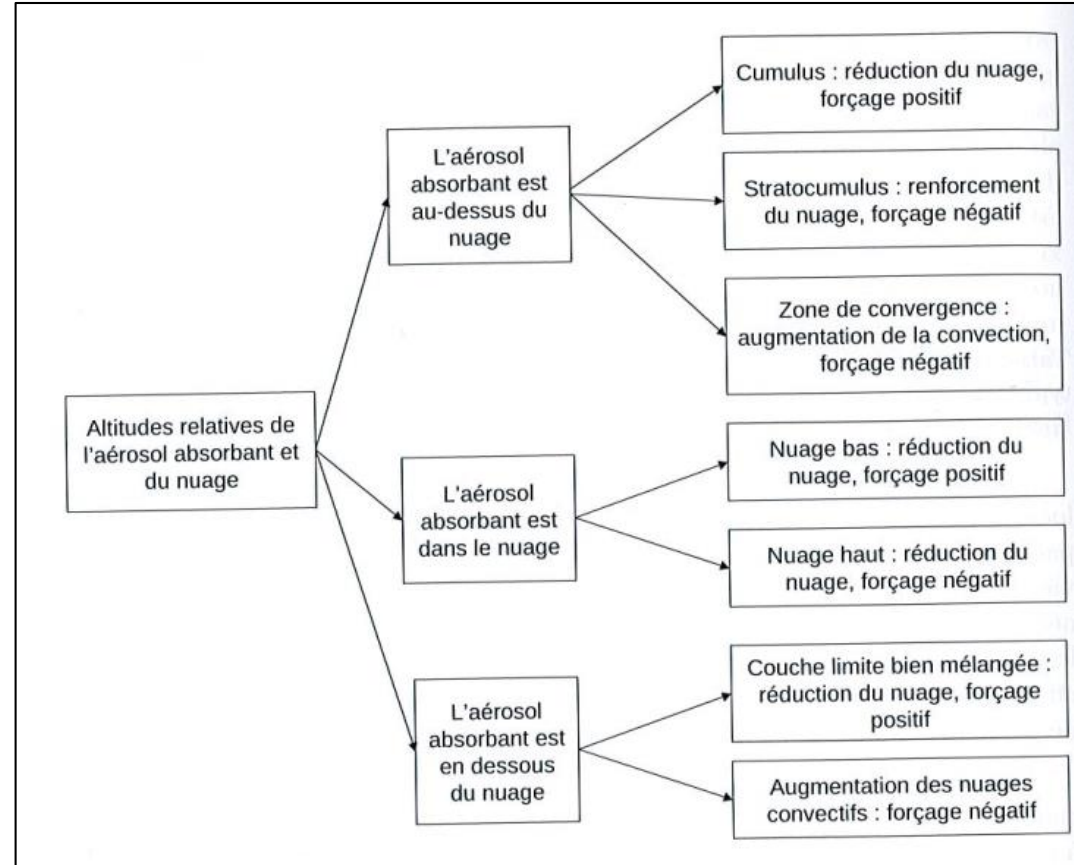
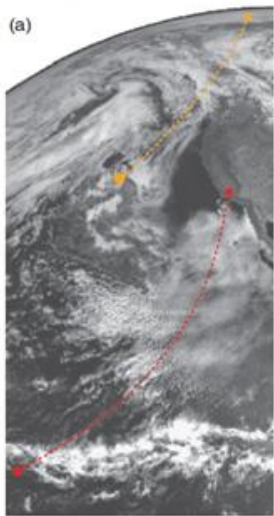
Dry
sulfate/nitrate/ammonium
aerosols



Water associated with
sulfate/nitrate/ammonium
aerosols



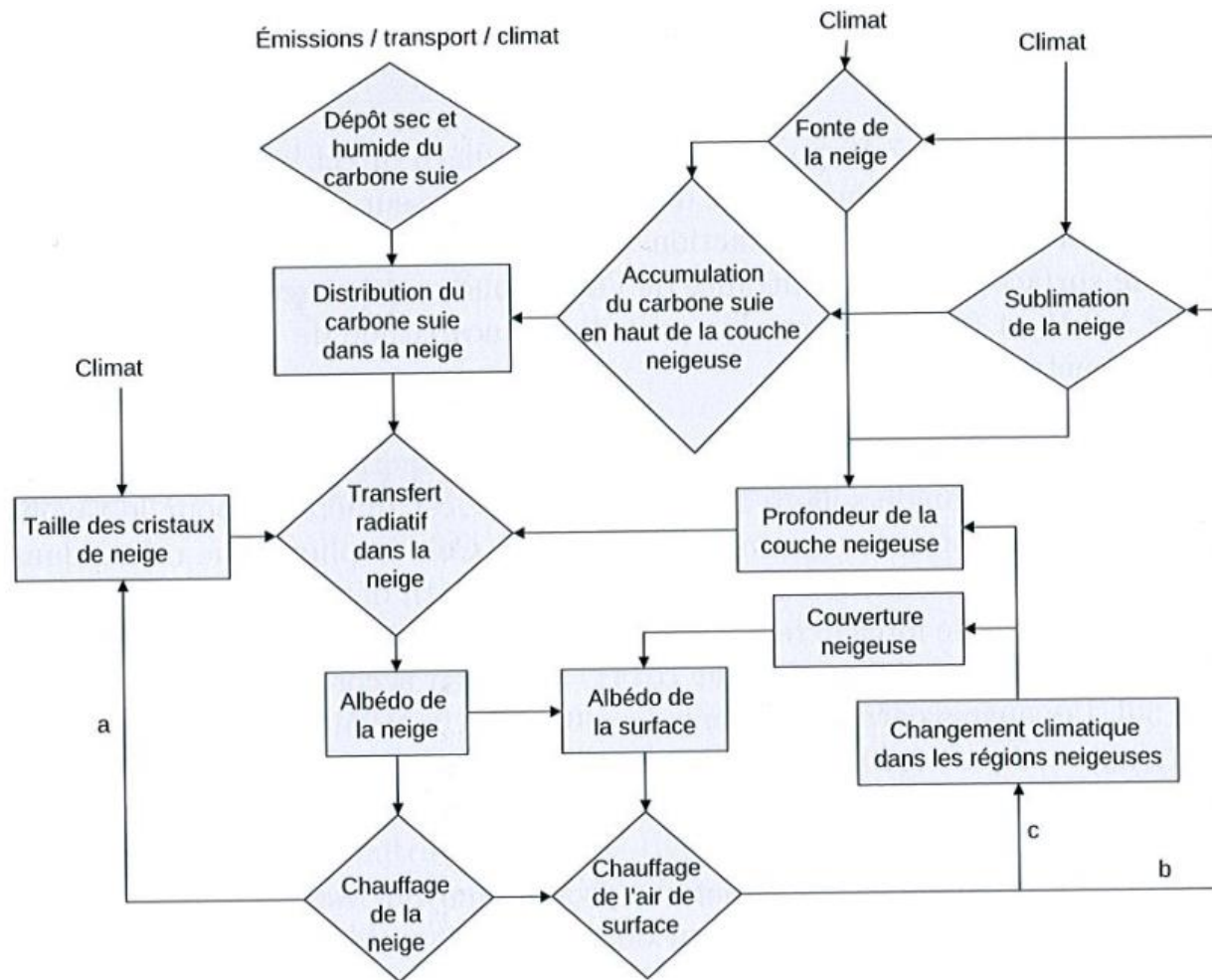
Interactions radiatives dépendent de la position relative entre aérosol et nuage et du type de nuage



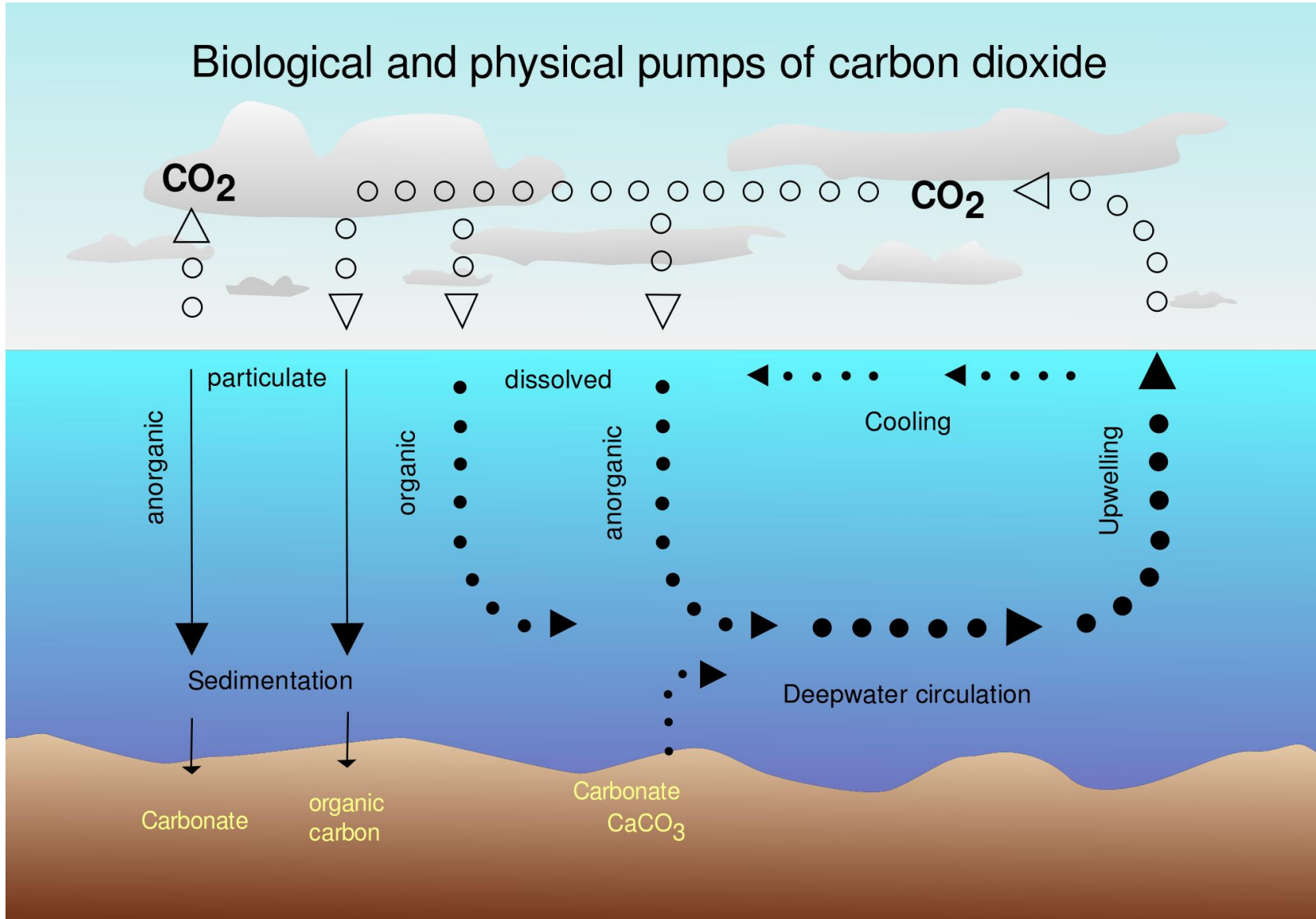
⇒ Processus mal modélisés dans les modèles à grande échelle

⇒ Modèles à petites échelles permettent de contraindre les modèles globaux sur des cas d'études

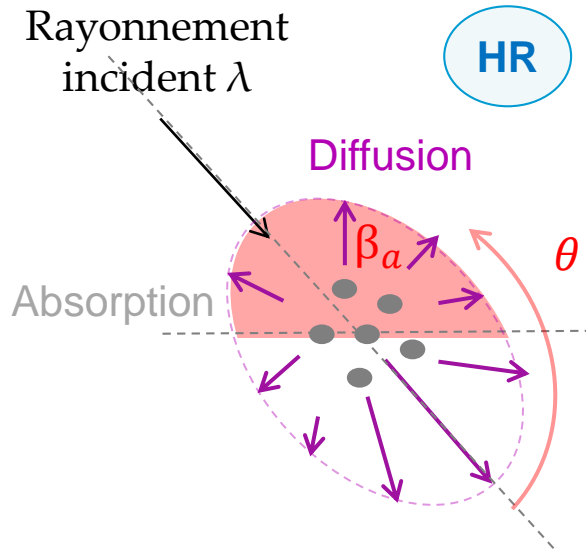
Effet sur la neige et la glace



Peut changer le flux océanique de CO₂



La paramétrisation de l'effet direct



$$\Delta F \propto f(w_0 \tau \beta_a)$$

Albédo de simple diffusion :

$$w_0 = \frac{\sigma_{diff}}{\sigma_{ext}} = \frac{\sigma_{diff}}{\sigma_{abs} + \sigma_{diff}}$$

Epaisseur optique τ :

$$\tau = \int_{z_{min}}^{z_{max}} [(\sigma_{ext}(z))] dz$$

Fraction diffusée par le haut β_a :

$$\beta_a = \frac{1}{2\pi} \int_{-1}^1 \theta P(\cos\theta) d(\cos\theta)$$

Composition chimique
Distribution en taille
Forme

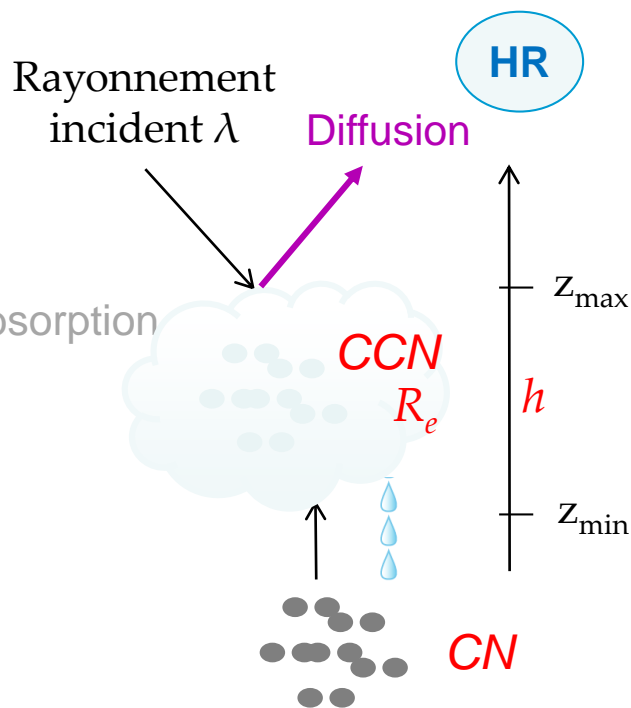
Propriétés physico-chimiques

Indice de réfraction : $m(\lambda) = n(\lambda) + ik(\lambda)$

Facteur de grossissement à la taille : $GF = \frac{D_p(\text{HR})}{D_p(\text{sec})}$

Propriétés optiques et hygroscopiques

Paramétrisation



$$\Delta F \propto f(R_e LWP \tau_{nuage})$$

Epaisseur optique du nuage:

$$\tau_{nuage} = \frac{3(Q_{ext})LWP}{4R_e}$$

Quantité d'eau dans le nuage:

$$LWP = \frac{4}{3}\pi R_e^3 \rho_{eau} CCN h$$

Rayon effectif des gouttelettes: R_e

Composition chimique
Distribution en taille
Forme

Propriétés physico-chimiques

Activité CCN:

$$\frac{CCN}{CN}$$

Facteur de grossissement à la taille:

$$GF = \frac{D_p(HR)}{D_p(sec)}$$

Indice de réfraction: $m(\lambda) = n(\lambda) + ik(\lambda)$

Propriétés optiques et hygroscopiques

Noyaux de condensation

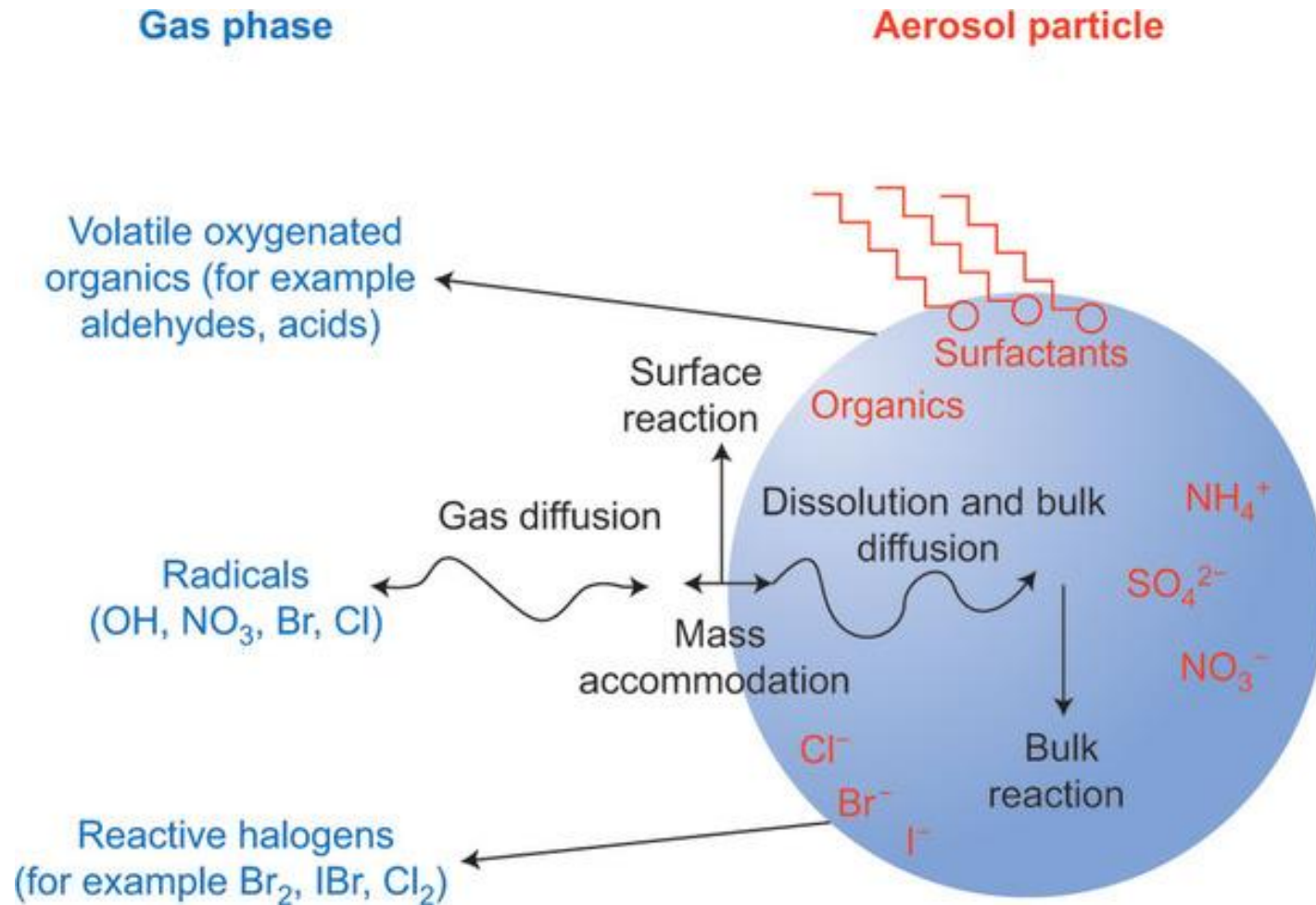
Les nuages se forment dans des régions de l'atmosphère où la vapeur d'eau est en supersaturation

Saturation ratio $S_r = P_i / P_{i, \text{sat}}$ P_i , pression de vapeur
Supersaturation $S_r > 1$

Les gouttelettes se forment sur des particules pré-existantes (*activation*)

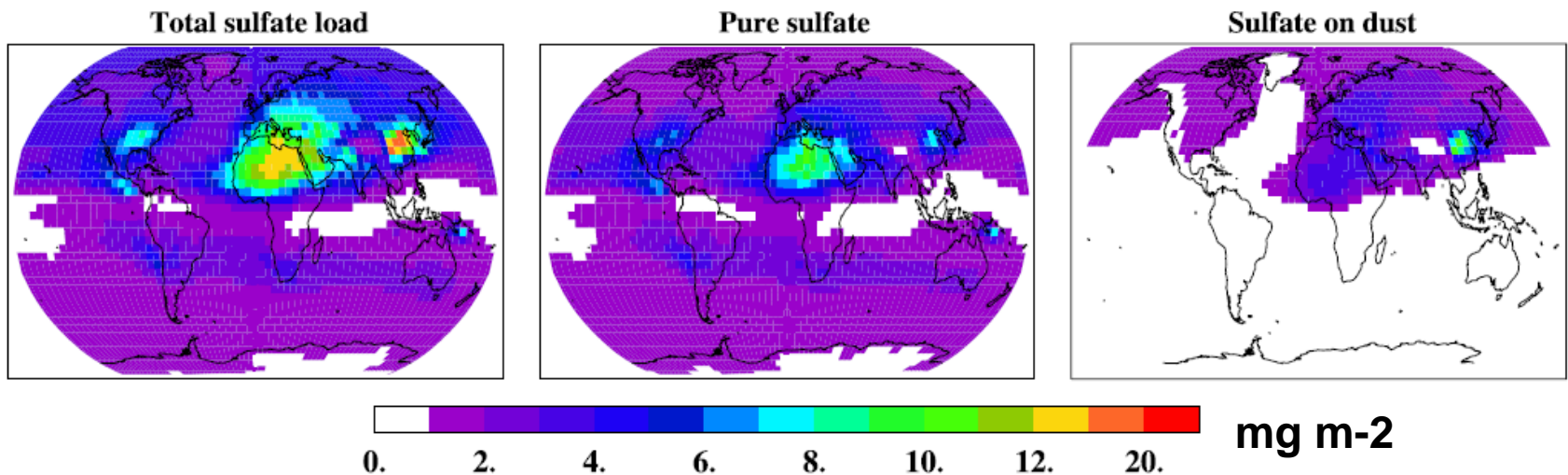
Les aérosols qui peuvent devenir gouttelettes s'appellent noyaux de condensation (cloud condensation nuclei, CCN).

Reactivité chimique



Les réactions hétérogènes changent le concentrations gazeuses: ex. SO_2

SO_2 + poussières \rightarrow condensation \rightarrow coating de sulfate sur les
poussières désertiques (distribution en taille différente que celle
des sulfates anthropiques)



Bauer et al., 2005