

CALIPSO – Contexte scientifique

Lidar ou radar

Si lidar et radar sont semblables sur le plan théorique, leurs capacités de détection sont bien différentes du fait de leurs longueurs d'onde très éloignées de part et d'autre de la distribution en taille des particules atmosphériques. La source laser émet un rayonnement visible à 532 nm et proche infrarouge à 1 064 nm, tandis que le radar fonctionne à 94 GHz, soit 3,2 mm.

Le **lidar** est ainsi capable de détecter avec précision le sommet des nuages et la base de ceux qu'il est capable de traverser, car au-delà d'une épaisseur optique de l'ordre de 3, le signal est trop atténué pour être mesuré. La base du nuage ne peut plus être détectée par le lidar qui manque également les couches éventuellement situées sous le nuage. Les mesures réalisées en ciel clair permettent de détecter les couches d'aérosols, la couche limite atmosphérique, et la surface dont l'écho est utile pour calibrer l'instrument.

À 94 GHz les micro-ondes pénètrent les nuages de glace quasiment sans atténuation. Le signal **radar** est sensible à la taille des particules à la puissance 6 : il ne voit donc pas les aérosols, et est plus sensible aux nuages de glace qu'aux nuages d'eau liquide. Il détecte également les précipitations. Le radar discerne donc à la fois le sommet et la base des nuages, même épais, mais quand ils ne précipitent pas.

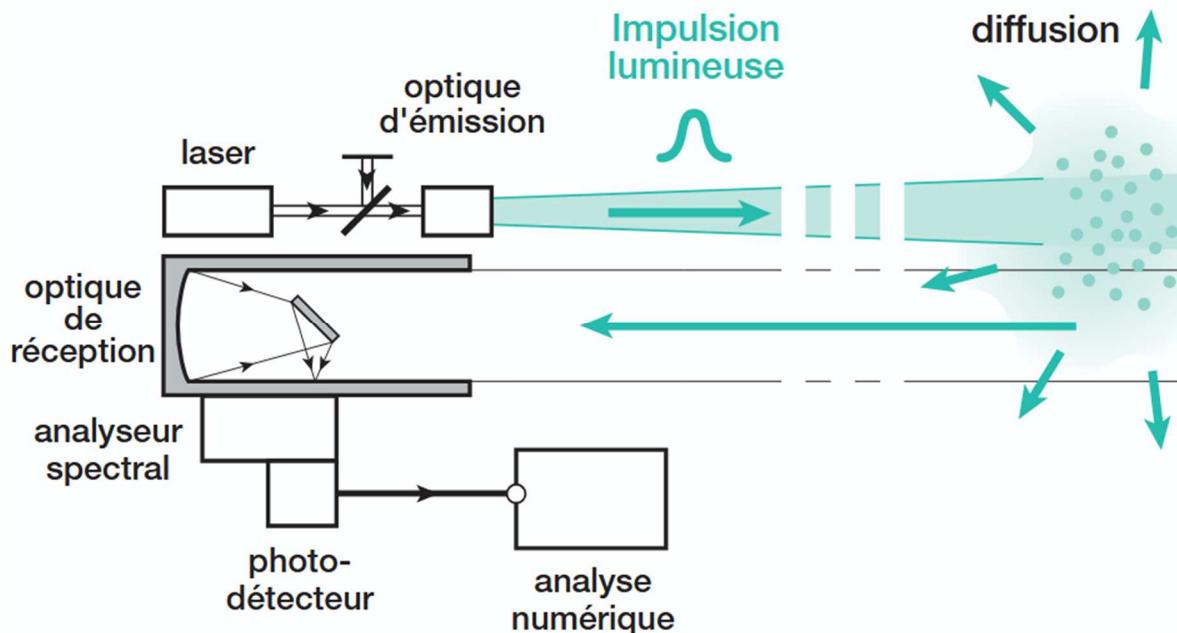
Par conséquent, **les nuages fins et les aérosols sont la préférence du lidar tandis que le radar est performant pour les nuages bas**. La complémentarité de ces deux techniques explique pourquoi Calipso et Cloudsat ont volé en tandem, Cloudsat étant asservi en position à Calipso à moins de 15 secondes.

Le rayon vert

Contrairement à la lumière du Soleil, le "rayon vert" émis par le lidar Calipso est totalement polarisé selon une direction.

La diffusion atmosphérique modifie cette polarisation incidente et la mesure de cette dépolarisatation est riche d'informations sur la nature des particules, en particulier sur leur géométrie.

Or l'analyse des mesures au sol a montré que la dépolarisatation des nuages de glace dépend fortement de la forme et de l'orientation des cristaux qui les composent. Il est ainsi possible de classer les particules en quatre types selon leurs formes : sphères, plaquettes, colonnes hexagonales ou polycristallines.



Légende : Schéma du principe de fonctionnement du lidar. © CNES, 2005

Les aérosols

Le principal apport de la mission Calipso réside dans la possibilité, à partir des profils lidar, de détecter les aérosols dans les situations où l'imagerie passive classique (exceptée la polarisation) est inefficace : aérosols au-dessus des terres et des nuages réfléchissants, aérosols au-dessous de cirrus semi-transparents.

La précision sur la restitution de l'épaisseur optique des aérosols est de l'ordre de 30% avec le lidar seul. L'association du lidar et du spectromètre oxygène permet d'améliorer ce chiffre pour les forts contenus en aérosols et de satisfaire les exigences des calculs d'effet radiatif direct.

L'association des propriétés des aérosols dérivés de Calipso et des flux radiatifs et profils d'atmosphère dérivés de EOS permet la mesure de l'impact radiatif direct des aérosols et l'analyse des paramètres qui le gouverne.

Dans ce contexte Calipso fournit :

- La distribution verticale des aérosols
- Une classification en taille basée sur la mesure de rétrodiffusion dans 2 canaux
- L'épaisseur optique aérosol
- L'albédo de simple diffusion
- L'intensité des sources pour les modèles de transport

Les nuages

Le recouvrement des structures nuageuses dans les nuages multi-couches, qui représentent la moitié des situations nuageuses, constitue l'incertitude majeure dans la détermination des flux radiatifs ondes courtes à la surface et ondes longues dans l'atmosphère. L'association de profils Lidar aux mesures de bilan radiatif (CERES sur EOS) permet d'améliorer la mesure des flux radiatifs et des taux de chauffage.

En complément de EOS, Calipso apporte une meilleure caractérisation des propriétés microphysiques, optiques et radiatives des nuages (épaisseur optique, phase, paramètre d'asymétrie des nuages de glace...) qui permet une analyse statistique de grande ampleur débouchant sur l'amélioration de la paramétrisation des nuages dans les modélisations.

Particulièrement, l'association du lidar et de l'imageur infrarouge de Calipso permet des mesures très intéressantes pour la caractérisation des cirrus. Ces nuages fins représentent pas moins de 20% de la couverture globale. Ils sont mal détectés par les méthodes classiques et sont très hétérogènes. Les modèles de simulation de l'impact radiatif des cirrus montrent une très grande sensibilité à la taille des particules et le rôle important des petites particules. La mesure de la température de brillance des cirrus dans 2 canaux infrarouge thermique (précision requise de 0.5K) couplée au profil d'altitude fourni par le Lidar permet le calcul de leur émissivité (précision de 1%) et du rayon effectif des particules de glace.

Le double-jeu des nuages

Les nuages jouent un rôle de tout premier plan dans le fonctionnement de cette machine climatique. Sans parler de leur rôle dans le déclenchement des précipitations, leur influence sur le rayonnement est considérable. Ce n'est d'ailleurs pas un hasard si on attache autant d'importance à leur présence dans la perception du temps qu'il fait !

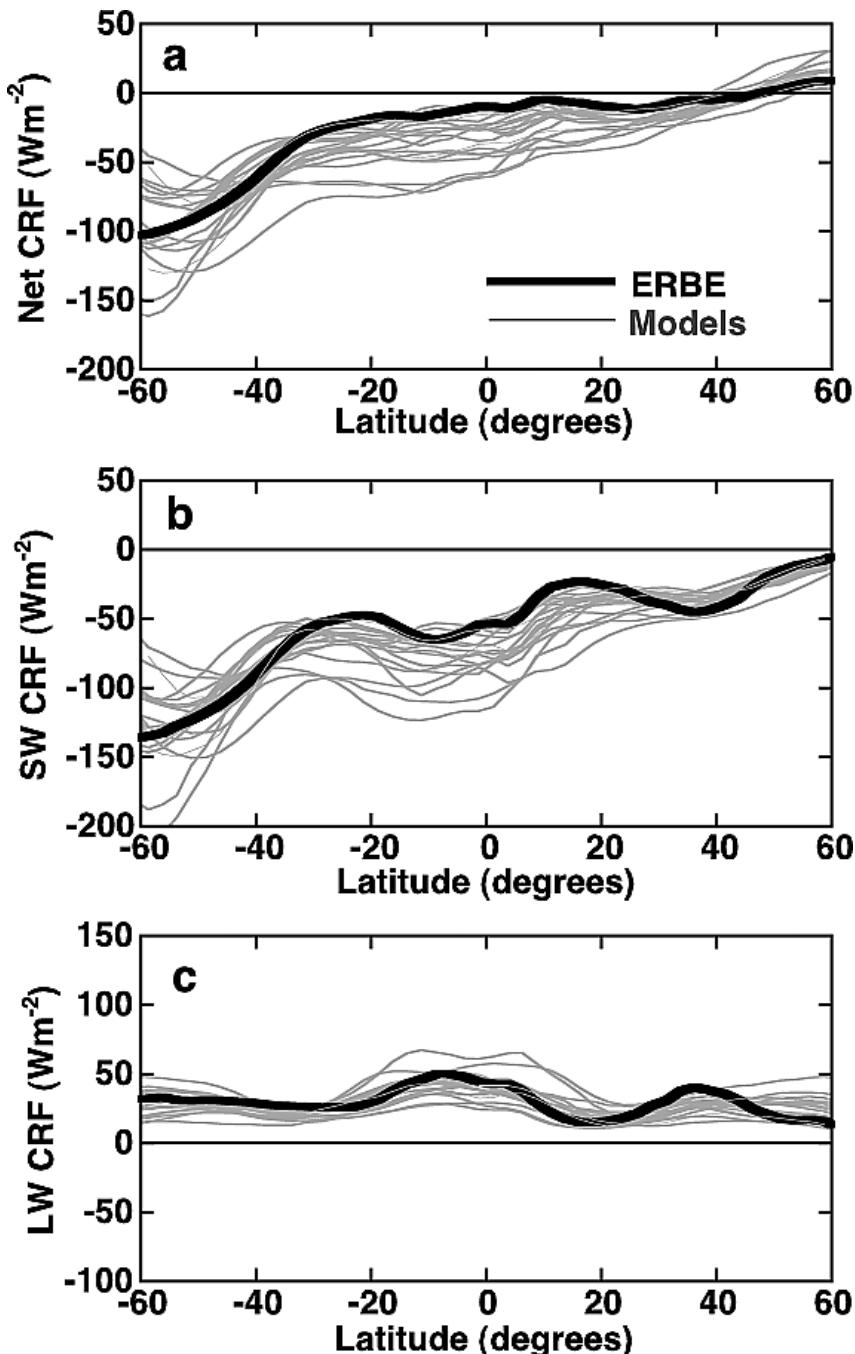
Vis-à-vis du rayonnement solaire, les nuages agissent principalement comme un parasol qui renvoie vers l'espace une grande partie des rayons du Soleil. Le pouvoir réfléchissant, ou albédo, des nuages épais est ainsi très élevé, de l'ordre de 80%.

L'effet des nuages sur le rayonnement infrarouge émis par la Terre est moins évident mais tout aussi sensible. On sait par exemple que les plus fortes gelées matinales accompagnent des nuits claires. En effet au cours de la nuit, la Terre, qui n'est plus chauffée par le Soleil, se refroidit en rayonnant dans l'infrarouge. Les nuages bloquent ce rayonnement et agissent comme un isolant vis-à-vis de la surface. On reconnaît là le mécanisme de l'effet de serre.

Les nuages jouent donc un "double jeu" : ils refroidissent la planète par leur effet parasol et la réchauffent par leur effet de serre.

Les mesures effectuées depuis l'espace ont permis d'évaluer ces deux effets. L'un et l'autre sont très importants en valeur absolue et se comptent en plusieurs dizaines de W/m². Leur modification par les processus d'interaction climatique peut ainsi représenter des variations très significatives par rapport à l'effet des gaz à effet de serre d'origine humaine, qui ne représentent que quelques W/m² (environ 1,5

W/m² pour le gaz carbonique seul). Ces deux effets sont également très variables selon les régions. Si l'on sait que globalement le forçage radiatif net des nuages va dans le sens d'un refroidissement de la planète (cf. fig. ci-dessous), en revanche des incertitudes demeurent sur les conséquences du réchauffement climatique sur la couverture nuageuse, le type et la répartition des nuages. De même on ne sait pas quels sont les effets en retour de ces modifications éventuelles sur le bilan radiatif de la Terre.



Légende : Forçage radiatif en moyenne zonale au sommet de l'atmosphère obtenu à partir des observations spatiales ERBE et des simulations de modèles de circulation générale. Cette figure montre que les forçages sont de signe opposé entre le domaine spectral visible et infrarouge et que la dispersion absolue est plus importante dans le domaine spectral visible). © G. L. Potter et R. D. Cess, *Journal of Geophysical Research*, 2004 (<https://doi.org/10.1029/2003JD004018>)

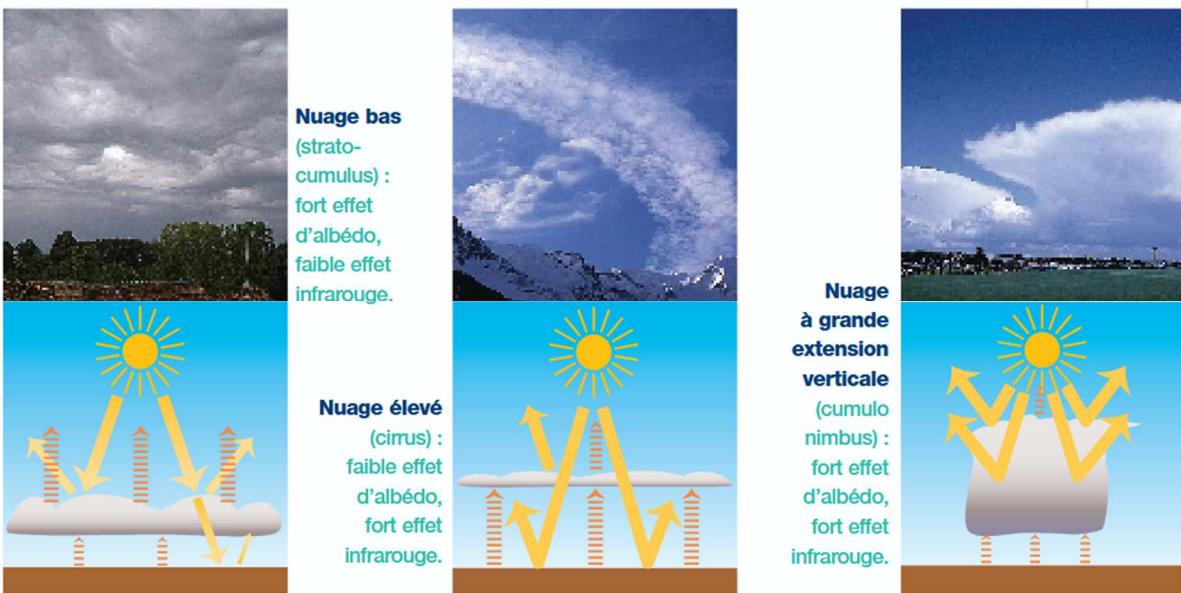
Pour y voir plus clair, il est nécessaire de mieux quantifier l'impact radiatif des nuages. Or, pour évaluer les propriétés radiatives d'un nuage il faut connaître à la fois ses caractéristiques macrophysiques (altitude et température de la base et du sommet, extension spatiale et taux de recouvrement pour les nuages multi-couches), son contenu en eau et glace, ses caractéristiques microphysiques [phase (eau, glace ou mixte), taille des gouttelettes, forme et orientation des cristaux de glace] et son environnement, c'est-à-dire la nature de la couche située sous le nuage.

Les nuages de glace sont actuellement les plus mal connus, du fait de la difficulté à les observer. En effet les cirrus, fins et non homogènes, sont peu réfléchissants et froids, donc mal détectés par les radiomètres classiques qui fonctionnent dans le visible ou l'infrarouge. De plus, la forte variabilité naturelle de la taille (1 à 1000 µm), de la forme (sphères, plaquettes ou colonnes hexagonales, polycristaux) ou de l'orientation (aléatoire ou horizontale) des cristaux qui les composent est susceptible de faire varier les propriétés radiatives du nuage dans des proportions considérables. Pour parvenir à percer les secrets de ce type de nuage, de nouvelles techniques d'observation sont nécessaires.

Tous les nuages ne se ressemblent pas

Les nuages sont classés en utilisant des mots latins (cirrus : boucle de cheveu, stratus : couche, cumulus : en tas, nimbus : pluie), qui décrivent leur aspect et leur altitude. On distingue usuellement quatre types de nuages :

- **Les nuages élevés ou cirriformes** (5 à 13 km d'altitude). Les cirrus, les cirrostratus et les cirrocumulus, qui appartiennent à cette catégorie, sont composés de millions de minuscules cristaux de glace et non pas de gouttelettes d'eau comme les nuages moins élevés. Leur température est inférieure à - 40°C.
- **Les nuages de l'étage moyen** (2 à 6 km d'altitude). Les altostratus et les altocumulus font partie de cette catégorie. Les premiers sont composés à la fois de cristaux de glace et de gouttes d'eau. Ils recouvrent de très grandes surfaces, parfois des centaines de kilomètres carrés. Même s'ils ne donnent que de faibles précipitations, les altostratus indiquent souvent que la pluie risque fort d'arriver... Les altocumulus ressemblent quant à eux à des boules de coton en longues colonnes.
- **Les nuages bas ou stratiformes** (du sol à 2 km d'altitude). Les stratus, les stratocumulus et les nimbostratus qui forment cette catégorie sont généralement composés de gouttes d'eau liquide. Les stratus se développent horizontalement, contrairement aux cumulus, et se forment à quelques mètres du sol. Les stratocumulus sont gris avec des ombres souvent très sombres et s'étalent comme une couche de coton. Enfin, les nimbostratus forment une couche nuageuse gris foncé sous laquelle il pleut ou il neige et peuvent atteindre 3 km d'épaisseur.
- **Les nuages de grande épaisseur ou cumuliformes**, qui ne peuvent être classés dans aucune des trois autres catégories du fait de leur extension verticale importante. Parmi ceux-ci on compte les cumulus, qui ressemblent à des boules de coton isolées au milieu du ciel bleu, et les cumulonimbus, composés de gouttes d'eau liquide à la base et de cristaux de glace au sommet. Surnommés "rois des nuages" et souvent en forme d'enclumes, les cumulonimbus peuvent atteindre 12 km d'altitude... bien plus que l'Everest.



Légende : Photos et schémas pour différents types de nuages. © CNES, 2005

Selon qu'ils appartiennent à l'une ou l'autre de ces catégories, **les effets des nuages sur le rayonnement sont différents**. On estime cet effet radiatif des nuages sur le bilan énergétique global en comparant une situation "avec nuages" à la même situation "sans nuages". Les effets les plus importants correspondent dès lors aux situations de plus forts contrastes entre la surface et les nuages. Par exemple des nuages épais très réfléchissants au-dessus de la mer donnent lieu à un effet parasol accru, tandis que des nuages élevés, donc très froids, au-dessus d'une surface chaude auront un effet de serre maximal.

Dès lors, deux catégories de nuages sont particulièrement importantes à observer :

- Les **stratocumulus**, qui couvrent en permanence 20% de la surface du globe (spécialement au-dessus des océans des latitudes moyennes et à l'est des océans dans les régions tropicales), parce qu'ils ont un effet de serre limité du fait de leur faible altitude mais un effet parasol important ;

Les **cirrus**, parce qu'ils ont un effet de serre considérable, du fait de leur altitude élevée et de leur faible température, mais un effet parasol très faible puisqu'ils sont transparents, voire sub-visibles.