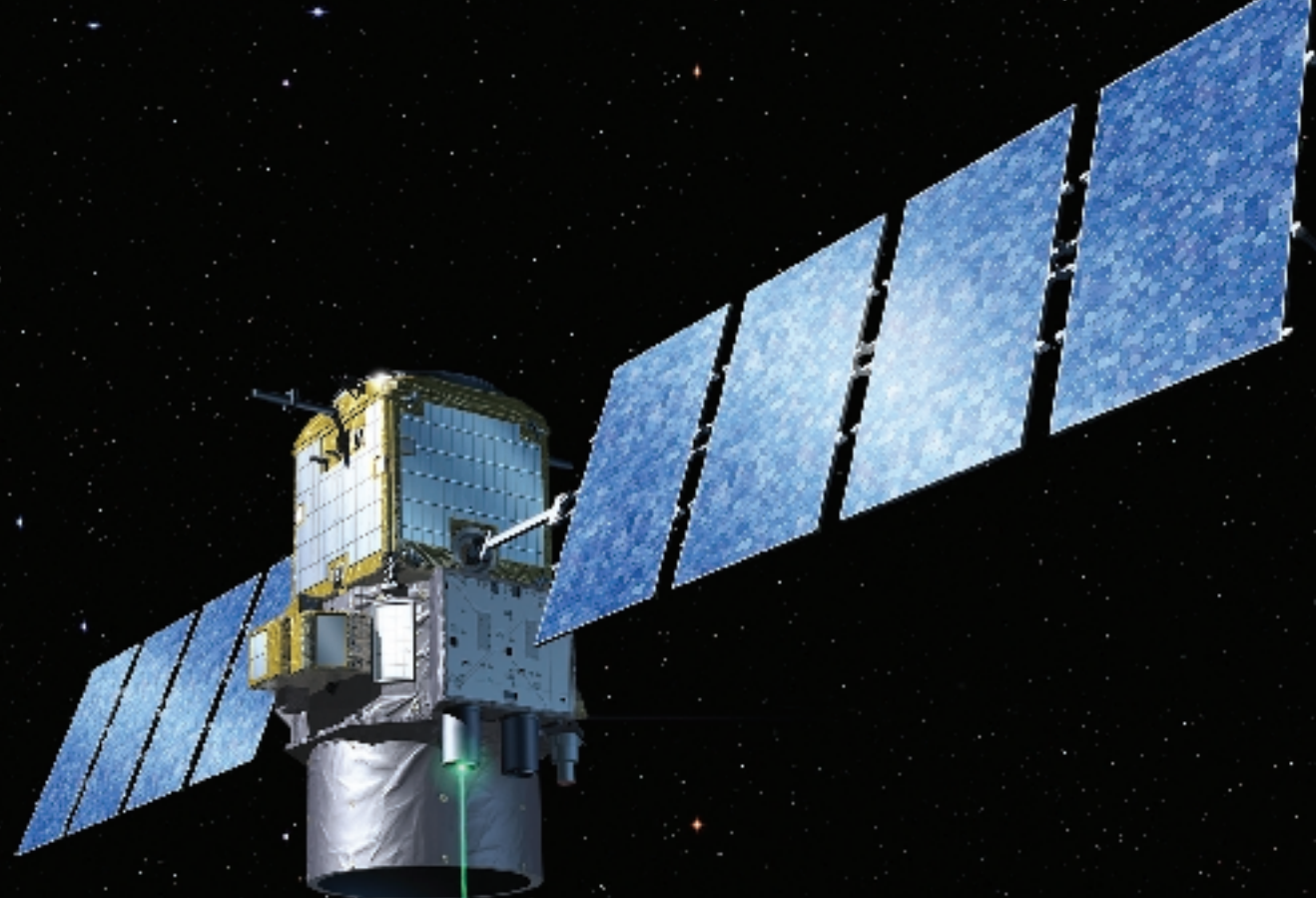
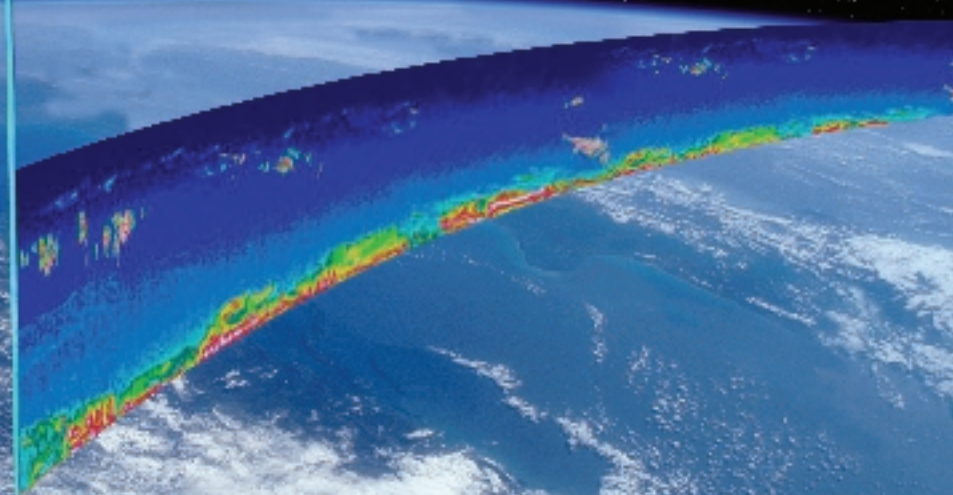


INFORMATION



CALIPSO

Percer les secrets des nuages



CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES



CENTRE NATIONAL
DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

SOMMAIRE

3 RÉSUMÉ

Calipso en chiffres

4 INCERTITUDES SUR LE CLIMAT

Le réchauffement climatique : un processus complexe

La machine climatique dérégulée

Le double jeu des nuages

Tous les nuages ne se ressemblent pas

Les aérosols : des incertitudes complémentaires

Trois milliards de tonnes d'aérosols émis chaque année

Une nécessité : améliorer les modèles prédictifs

Les mesures nécessaires

10 PERCER LES SECRETS DES NUAGES ET DES AÉROSOLS

Des mesures passives aux mesures actives

Vous avez dit lidar ?

Le rayon vert

Lidar ou radar ?

A-Train et Icare au service de la synergie actif-passif

Le train spatial de 13h30

15 ORGANISATION, INSTRUMENTS, PLATE-FORME ET LANCEMENT

Un projet franco-américain

Trois instruments complémentaires

Le duo lidar/IIR ouvre de nouvelles fenêtres sur les nuages

La charge utile en bref

Pari réussi pour la plate-forme Protéus

Protéus c'est aussi...

La répartition des rôles au sol

Lancé depuis la Californie, mis à poste depuis Toulouse

Delta 2

21 ANNEXES

23 CONTACTS - SITES INTERNET



INFORMATION

RÉSUMÉ

Hausse des températures, élévation du niveau moyen des mers, fonte des glaciers : les signes du réchauffement climatique sont connus. En revanche les mécanismes qui interviennent dans l'évolution du climat ne sont pas encore totalement décryptés par les scientifiques.

Une des questions majeures concerne la connaissance des forçages radiatifs liés aux nuages et aux aérosols, ainsi que la détermination des rétroactions induites par le réchauffement climatique. En effet, la difficulté à représenter les nuages et les aérosols, ces fines particules en suspension dans l'atmosphère, dans les modèles numériques utilisés par les climatologues est une source d'incertitude majeure dans la prévision du changement climatique. Autant dire que **le premier jeu global d'observations des profils verticaux de l'atmosphère** est très attendu par la communauté scientifique.

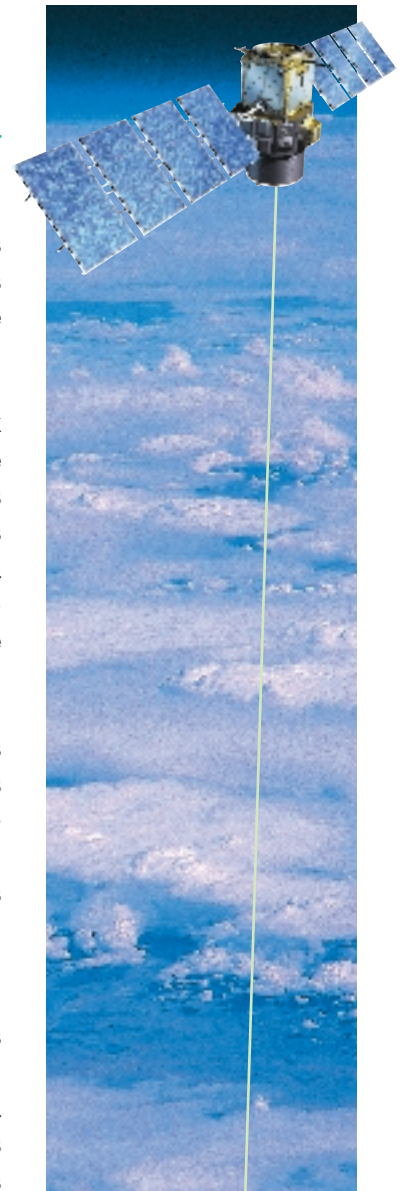
Ces profils verticaux seront fournis par deux satellites : **Calipso et Cloudsat**. Tous les deux fonctionnent globalement de la même manière en émettant des impulsions vers la surface de la Terre afin de percer les secrets des nuages et des aérosols. Ces impulsions, lumineuses pour le lidar de Calipso et micro-ondes pour le radar de Cloudsat, se réfléchissent sur les couches de l'atmosphère dont elles captent ainsi les différentes signatures.

Ces deux satellites partenaires sont lancés ensemble par une fusée américaine Delta 2 depuis la base de Vandenberg (Californie). Ils doivent rejoindre trois autres satellites déjà en orbite, Aqua et Aura de la NASA, ainsi que le microsatellite du CNES Parasol, pour former une constellation baptisée **A-Train**, et voleront alors en tandem à seulement 15 secondes d'écart. Entièrement dédié à l'observation des nuages, des aérosols et du cycle de l'eau, cet observatoire exceptionnel mettra en œuvre toutes les techniques de mesures actuellement disponibles depuis l'espace, donnant ainsi accès à la première vision en 3D de l'atmosphère terrestre.

Mission franco-américaine menée en coopération par **le CNES, la NASA et l'Institut Pierre-Simon Laplace (CNRS)**, Calipso (*Cloud-Aerosol Lidar Infrared Pathfinder Satellite Observations*) est développé à partir de la plate-forme de minisatellite Protéus conçue par le CNES et Alcatel Space. Son instrument principal, le lidar, a été conçu par la NASA et la société américaine Ball Aerospace. Une caméra visible (NASA) et un imageur infrarouge (CNES) complètent la charge utile en fournissant le contexte spatial de la mesure acquise par le lidar. Les laboratoires français ont participé à la définition de ces trois instruments.

L'ensemble des données de l'A-Train alimentera **le pôle de compétence thématique Icare** dédié à l'étude des interactions entre nuages, aérosols, rayonnement et cycle de l'eau. Installé au sein de l'Université des Sciences et Technologies de Lille et soutenu par le CNES, le CNRS, la région Nord-Pas-de-Calais et l'Union européenne, le centre de traitement et d'archivage d'Icare facilitera l'accès des climatologues aux données spatiales, en fournissant notamment des synthèses multi-capteurs.

La mise à poste de ce minisatellite est assurée par les équipes du Centre spatial de Toulouse et sa durée de vie nominale est de trois ans.



Calipso en chiffres

3 ans

durée de la mission

50 M€ courants

coût à achèvement pour la partie française, hors ressources humaines

90 m

diamètre du spot du lidar

190 M\$

participation américaine à la mission

530 watts

puissance électrique

585 kg

masse au lancement

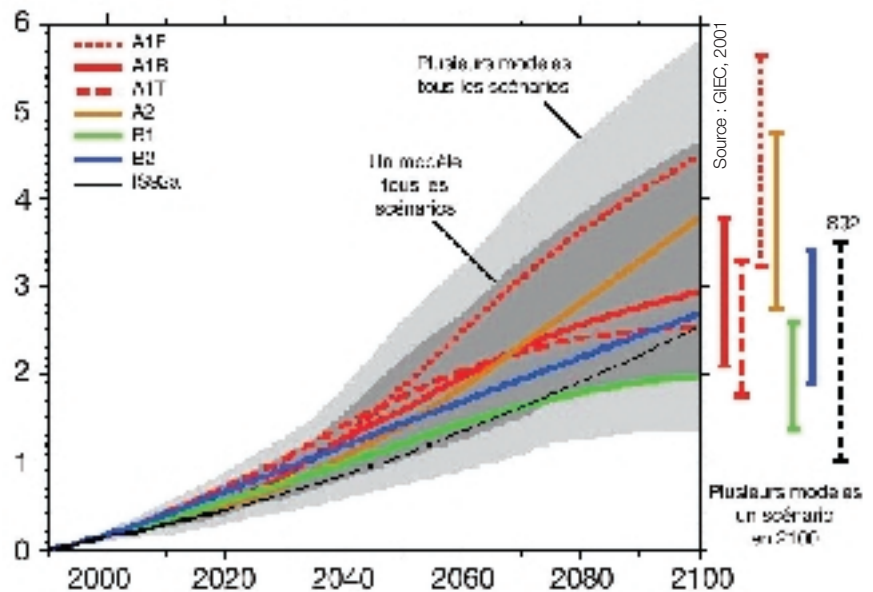
705 km

altitude de l'orbite



INCERTITUDES SUR LE CLIMAT

L'évolution du climat selon différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre. Selon les différentes concentrations d'émissions envisagées et les réponses des modèles climatiques utilisés, le Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) prévoit une hausse de la température moyenne à la surface de la Terre variant de 1,4 à 5,8°C.



Le réchauffement climatique : un processus complexe

Si le réchauffement de la planète, prédit par les modèles et déjà observé dans les faits, ne laisse plus aujourd'hui de doute, son amplitude et son évolution

sont en revanche encore largement incertains. La contribution au bilan énergétique de notre planète des fameux gaz à effet de serre à l'origine de ce réchauffe-

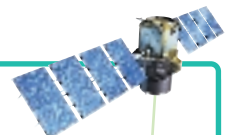
La machine climatique dérégulée

L'énergie disponible à la surface de la Terre provient du Soleil, l'apport de la géosphère étant négligeable. Environ un tiers de cette énergie est renvoyé vers l'espace, soit par réflexion, soit par diffusion par les nuages et les particules en suspension dans l'atmosphère. C'est l'**effet parasol**. L'énergie restante est absorbée, soit par l'atmosphère, soit par la surface de la Terre et transformée en chaleur. La surface terrestre, ainsi chauffée par le Soleil, renvoie un rayonnement infrarouge vers l'atmosphère.

Si on calcule la température théorique d'équilibre de la Terre à partir de la quantité d'énergie reçue du Soleil à travers l'atmosphère, on obtient environ - 18°C. Or la température moyenne intégrant les variations saisonnières et latitudinales est d'environ 15°C. Cette différence entre le calcul théorique et les mesures provient du fait que le rayonnement infrarouge terrestre n'est pas entièrement rediffusé vers l'espace. Une grande partie est interceptée par certains gaz de l'atmosphère : les

gaz dits à effet de serre (gaz carbonique, vapeur d'eau, méthane, oxyde d'azote, ozone, etc.) Les molécules de ces gaz absorbent le rayonnement infrarouge terrestre. L'énergie est ensuite renvoyée dans toutes les directions et participe donc au réchauffement de la Terre. C'est l'**effet de serre naturel**, propice au développement de la vie. Les nuages, qui ont une grande opacité au rayonnement infrarouge thermique, participent également à cet effet de serre naturel (cf. fig. p. 5).

Mais dans son effort d'industrialisation et de développement, l'homme tend à modifier la composition de l'atmosphère en y injectant de grandes quantités de gaz à effet de serre. Ce **forçage anthropique de l'effet de serre naturel** conduit à l'augmentation de la température moyenne à la surface de la Terre, de l'ordre de 0,4°C à 0,8°C depuis 1900. On observe également une élévation des températures minima et maxima, plus de jours de forte chaleur et moins de jours de gel sur la plupart des régions continentales.

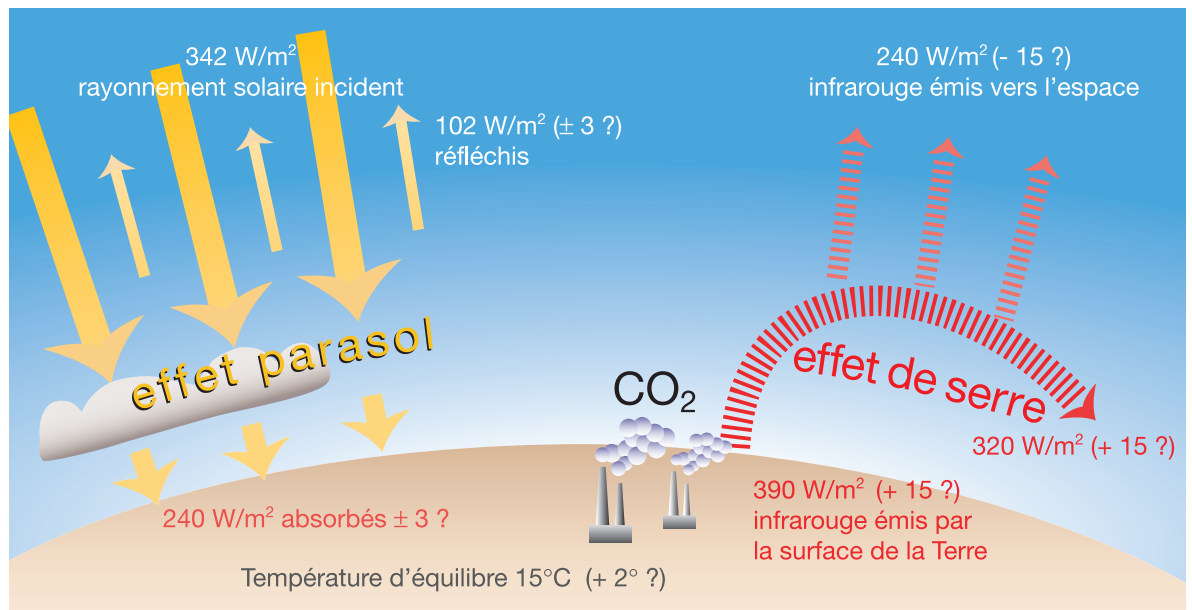


ment est connue pour divers scénarios possibles, minimum ou maximum, de développement des émissions humaines (cf. fig. p. 4). Il n'en va pas de même pour les **nuages de glace de haute altitude** ou les nuages d'**aérosols**, qui contiennent de fines particules en suspension dans l'atmosphère. Ces nuages ont de multiples effets sur le rayonnement qui commencent à être expliqués, mais dont les contributions sont largement incertaines. La capacité des aérosols à modifier les

propriétés de tous les nuages, et par conséquent à influencer sur les précipitations, est susceptible d'avoir des répercussions importantes sur la couverture nuageuse.

Mais quels seront en retour les effets de ce réchauffement sur la couverture nuageuse ? Aujourd'hui, les observations spatiales peuvent apporter des éléments de réponse à cette question essentielle et contribuer ainsi à résoudre ce problème de science... et de société.

Le bilan radiatif et sa perturbation anthropique : estimation de l'impact de l'effet de serre et de l'effet parasol sur le bilan énergétique de la Terre.



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%.

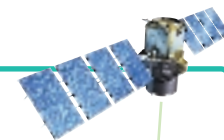
L'effet des nuages sur le **rayonnement infrarouge** émis par la Terre est moins évident mais tout aussi sensible. On sait par exemple que les plus fortes gelées matinales accompagnent des nuits claires. En effet au cours de la nuit, la Terre, qui n'est plus chauffée par le Soleil, se refroidit en rayonnant 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. p. 7), 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.

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





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 cirrifformes** (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 cumuli-formes**, 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.

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.

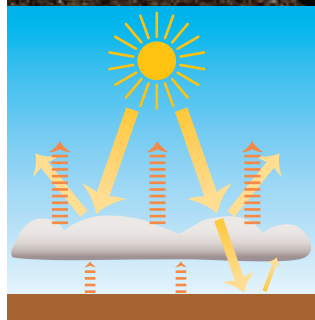
Dès lors, deux catégories de nuages sont particulièrement importantes à observer :

- 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 ;

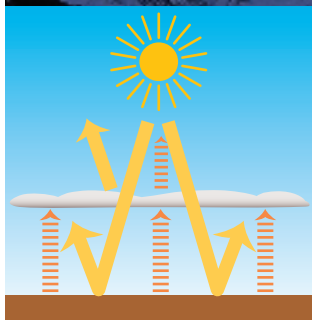
- les **cirrus**, parce qu'ils ont un effet de serre considérable, du fait de leur altitude élevée et de leur faible température, mais un effet parasol très faible puisqu'ils sont transparents, voire sub-visibles.



Nuage bas
(strato-cumulus) :
fort effet
d'albédo,
faible effet
infrarouge.



Nuage élevé
(cirrus) :
faible effet
d'albédo,
fort effet
infrarouge.

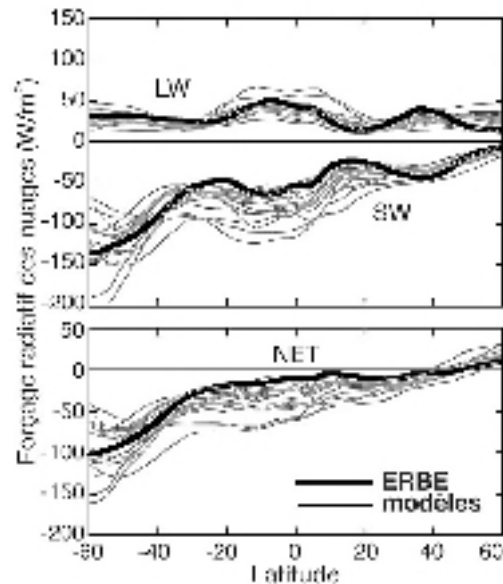


Nuage à grande extension verticale
(cumulo nimbus) :
fort effet
d'albédo,
fort effet
infrarouge.



fois ses caractéristiques macrophysiques (altitude et température de la base et du sommet, extension spatiale et taux de recouvrement pour les nuages multicouches), 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** (cf. encadré p. 6), 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.



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 (SW) et infrarouge (LW) et que la dispersion absolue est plus importante dans le domaine spectral visible (d'après Potter et Cess, 2004).

Les aérosols : des incertitudes complémentaires

Autres acteurs de premier plan du système climatique, les aérosols, ces fines particules d'origine naturelle ou humaine présentes dans l'atmosphère, ne doivent pas être isolés de cette problématique. Car **sans aérosols... il n'y aurait pas de nuages**. Or ces particules exercent trois effets sur le climat : direct, semi-direct et indirect. Avec des conséquences plus ou moins connues sur le bilan radiatif.

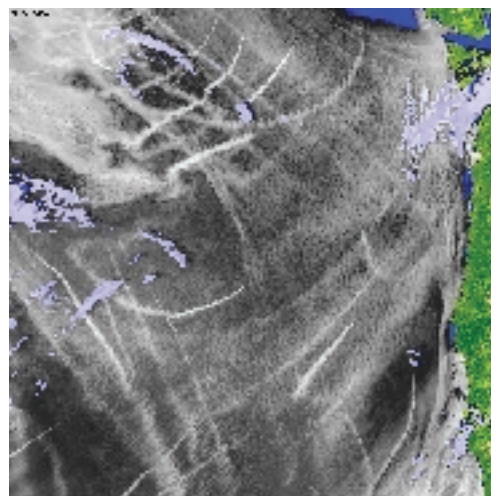
L'effet direct n'est autre que l'effet parasol évoqué

plus haut. Il s'agit d'un effet refroidissant, induit par les aérosols non-absorbants au-dessus d'une surface très réfléchissante.

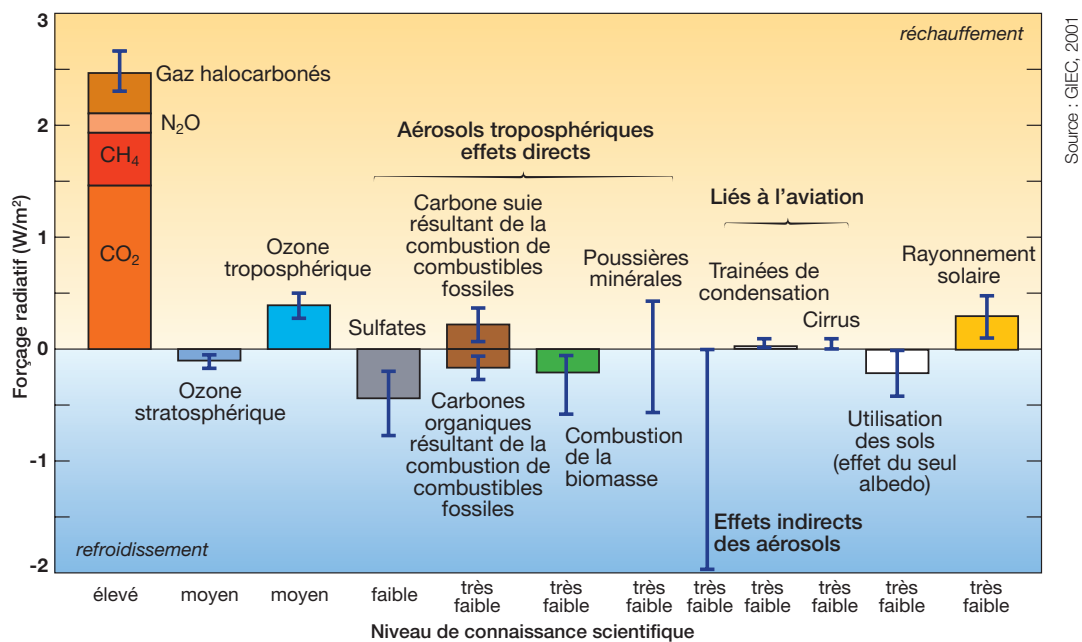
Comme les aérosols peuvent également absorber de façon plus ou moins importante le rayonnement solaire, ils modifient les profils de température et, par conséquent, ont un impact sur les conditions de formation des nuages, entraînant leur disparition ou modifiant leur extension géographique. C'est ce qu'on appelle **l'effet semi-direct**.

L'effet radiatif indirect

des aérosols résulte quant à lui des interactions entre aérosols et nuages. Ainsi les aérosols servent de **noyaux de condensation** lors de la formation des nuages d'eau liquide, de sorte qu'à contenu en eau fixé, un nuage issu d'une masse d'air pollué contient un nombre de gouttelettes supérieur à un nuage moins pollué. Bien que les gouttelettes soient plus petites, un tel nuage sera plus réfléchissant que celui issu d'une



La présence d'aérosols dans notre atmosphère sous l'œil des satellites. À gauche, panaches de feux observés par l'instrument Modis au-dessus des États-Unis. À droite, des traces de bateaux vus par le satellite NOAA 9 au large de la côte californienne en juin 1987.

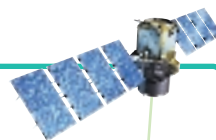


Source : GIEC, 2001

Forçage radiatif moyen global du système climatique en l'an 2000 par rapport à 1750

Le graphique ci-dessus compare les uns aux autres les différentes composantes – positives ou négatives – qui jouent sur les échanges d'énergie entre la Terre et l'espace (en Watts par mètre carré). La notion de forçage radiatif désigne le supplément – ou le déficit – de rayonnement reçu par la Terre du fait de la présence de la substance émise. Seule la contribution humaine est prise en compte. De gauche à droite on trouve respectivement : les contributions des gaz à effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O, halocarbures), de l'ozone stratosphérique (celui de la fameuse "couche") et de l'ozone troposphérique (celui des "pics de pollution"), des différents aérosols et des avions hors émissions directes de CO₂. Il montre également les conséquences du changement d'albédo découlant du changement d'usage des sols. Par exemple, la déforestation augmente l'albédo, car une forêt absorbe généralement plus de rayonnement que des cultures ou un sol nu. Enfin, bien que cela ne soit pas un effet dû à l'homme, la contribution des variations d'activité du Soleil est prise en compte. Pour toutes ces contributions, les rectangles représentent les valeurs les plus probables, et les tirets la zone d'incertitude. Lorsque le tiret est très grand par rapport au rectangle, cela signifie que l'on n'a qu'une vague idée de la valeur. Le niveau de compréhension des processus à l'œuvre – et donc le degré de confiance dans l'estimation – est indiqué en clair sur la dernière ligne (de élevé à très faible).

Trois milliards de tonnes d'aérosols émis chaque année



L'atmosphère contient de toutes petites particules solides ou liquides en suspension, appelées aérosols. Leur taille varie de quelques nanomètres à presque 100 microns, soit l'épaisseur d'un cheveu.

En moyenne globale, environ trois milliards de tonnes d'aérosols sont émis chaque année par une multiplicité de sources à la fois naturelles (cendres volcaniques, poussières désertiques, embruns marins) et humaines (fumées d'industrie, gaz d'échappement, poussières issues de feux agricoles), ce qui induit une très grande diversité de leurs propriétés.

Dans la stratosphère, les aérosols, principalement d'origine volcanique, sont rares mais ils peuvent résider plusieurs années. Dans la basse troposphère, où ils sont en général beaucoup plus abondants, les aérosols séjournent quelques jours seulement, cette durée variant essentiellement selon les précipitations.

Il en résulte que, contrairement aux gaz à effet de serre, la concentration des aérosols peut varier de plusieurs ordres de grandeur à des échelles régionales ou journalières.



masse d'air sans aérosols. C'est le **premier effet indirect, refroidissant**. Dans un second temps, puisque les gouttelettes sont plus petites, elles n'atteindront pas la taille critique au-delà de laquelle apparaît la précipitation et la durée de vie moyenne du nuage sera augmentée. La couverture nuageuse moyenne sur la Terre sera donc plus importante. Enfin, en réchauffant l'atmosphère à des niveaux où se forment généralement des nuages, les aérosols peuvent conduire à leur évaporation. L'ensemble de ces processus constitue le

deuxième effet indirect des aérosols sur le climat, qui peut être **refroidissant ou réchauffant**, notamment selon l'altitude du nuage. Il faut noter que l'on connaît encore plus mal l'effet des aérosols sur les nuages de phase mixte (eau et glace), qui se trouvent à moyenne altitude, ou sur les nuages de glace à haute altitude.

Cet effet indirect est actuellement la plus grande source d'incertitude sur l'estimation des forçages radiatifs depuis 1750 (cf. fig. p. 8).

Une nécessité : améliorer les modèles prédictifs

De même que la prévision météorologique est la seule façon de prévoir le temps des prochains jours, la prévision climatique est la seule façon d'anticiper le climat du XXI^e siècle. L'une comme l'autre reposent sur la **modélisation**. Or la prise en compte des nuages dans les modèles souffre encore de nombreuses imperfections. Celles-ci sont dues à la **difficulté de représenter les nuages à l'échelle de ces modèles**, de 30 à 50 km pour les modèles météorologiques et de 100 à 250 km pour les modèles climatiques. Ces échelles sont grandes au regard des phénomènes de condensation ou d'évaporation à l'origine respectivement de la formation ou de la dissipation des nuages ou des processus d'interaction entre aérosols et nuages. Pour pouvoir améliorer la représentativité des modèles, il faut recourir à des "**paramétrisations**", c'est-à-dire des représentations condensées des processus de sous-échelle.

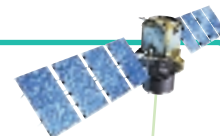
Or, pour améliorer significativement ces modèles et leurs paramétrisations, il est nécessaire de confronter leurs résultats avec des **mesures**, le plus exhaustivement possible. Mais les grandeurs calculées par les modèles ne sont pas nécessairement accessibles directement à la mesure. En particulier **les modèles ont une dimension verticale, l'altitude, qui échappe pour le moment aux mesures acquises depuis l'espace**. Or cette dimension est essentielle dans le processus de formation des nuages et le forçage radiatif dans l'infrarouge. De l'altitude dépend d'une part, la distance aux sources de vapeur d'eau et aux particules en majorité situées à la surface, et d'autre part la température du milieu.

Il faut donc effectuer de nouvelles observations, particulièrement sous forme de **profils verticaux**, mieux adaptées aux exigences de la modélisation à différentes échelles. Pour fournir des données efficaces aux modèles, il est nécessaire d'acquérir de façon simultanée le plus grand nombre de paramètres caractérisant les situations rencontrées. La liste est longue (cf. encadré ci-contre) et le nombre limité de sites instrumentés au sol et de campagnes intensives ne couvre

pas le besoin. C'est pourquoi un **regroupement des moyens d'observation disponibles depuis l'espace a été proposé dans le cadre de l'A-Train**. Ces mesures seront utilisées soit dans des évaluations statistiques à échelle globale, notamment pour l'étude des paramétrisations, soit dans des comparaisons à échelle régionale où l'accent sera mis sur l'étude de processus. L'objectif, étant, à terme, de pouvoir assimiler les mesures directement dans les modèles.

Calipso, tout comme l'observatoire A-Train dont il fait partie, s'inscrit dans cette stratégie de réduction des incertitudes par une meilleure connaissance des propriétés du milieu atmosphérique et des interactions qui s'y développent. Grâce à ses instruments, ce "chasseur de nuages" porte un regard neuf sur les aérosols et les nuages.

Les mesures nécessaires



- Connaître la **structure de la couverture nuageuse** (altitude du sommet et de la base, nombre de couches, couverture fractionnée ou pas) ;
- Établir des profils verticaux du **contenu en glace et en eau liquide** des nuages ;
- Identifier dans l'atmosphère les **couches d'eau surfondues** ;
- Connaître la **distribution verticale**, ou épaisseur optique, des aérosols ;
- Déterminer la **taille des particules d'aérosol et leur composition** (capacité de diffusion et d'absorption du rayonnement solaire, capacité d'activation des nuages) ;
- Connaître la distribution verticale des **précipitations** et leur intensité ;
- Obtenir les **luminances** en ondes courtes et ondes longues au sommet de l'atmosphère ;
- Obtenir des **mesures spectrales résolues** au sommet de l'atmosphère ;
- Obtenir des **profils de vapeur d'eau et de température**, ainsi que des profils de vent.



PERCER LES SECRETS DES NUAGES ET DES AÉROSOLS

Des mesures passives aux mesures actives

Les techniques classiques d'observation des nuages et des aérosols depuis l'espace mesurent le rayonnement visible ou infrarouge réfléchi par les cibles. Elles sont dites "passives" par opposition aux techniques "actives" pour lesquelles l'instrument est lui-même à la source du rayonnement utilisé pour sonder une cible.

Or, parce qu'ils sont fins et souvent associés à des structures multi-couches, **les cirrus échappent le plus souvent à cette imagerie passive**. En effet, par principe, les instruments de cette catégorie ne permettent pas de distinguer avec une bonne résolution verticale les différentes couches de nuages ou la superposition d'aérosols et de nuages, ce qui fausse significativement les classifications nuageuses et limite la possibilité d'étudier les interactions entre aérosols et nuages.

Pour percer les secrets de l'atmosphère, deux techniques ouvrent à l'heure actuelle de nouvelles perspectives : **le lidar** et le radar millimétrique ou "**radar à nuages**". Ces instruments ont déjà fait leurs preuves au cours de campagnes de mesures au sol ou aéroportées.

Le lidar a également déjà été utilisé depuis l'espace, que ce soit sur la Navette spatiale, au cours de l'expérience Lite menée en 1994, ou à bord du satellite Glas, lancé en 2003 par la NASA, afin d'effectuer des mesures altimétriques des surfaces glacées. **Quant au radar à nuages de Cloudsat, c'est la première fois qu'un tel instrument, présentant une sensibilité mille fois supérieure à un radar météorologique classique, vole dans l'espace.**

Avec une empreinte de 90 mètres pour l'un et 700 m pour l'autre, le lidar de Calipso et le radar de Cloudsat sondent, au cours de chaque orbite, la colonne d'atmosphère située à la verticale du satellite. L'échantillonnage au sol est réalisé tous les 330 m pour le lidar et 1,1 km pour le radar. La résolution verticale de chacun des instruments est de 30 m pour le lidar et de 500 m pour le radar. L'accès à la dimension verticale de l'atmosphère se fait ainsi en complément de la dimension horizontale, qui reste l'apanage des imageurs grand champ.

Vous avez dit lidar ?

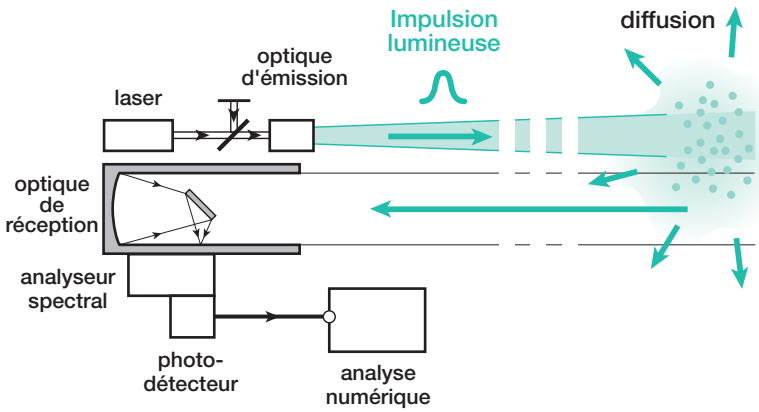
Le Lidar, pour *Light detection and ranging*, fonctionne sur le même principe que le radar, mais ici les ondes hyperfréquence sont remplacées par des ondes lumineuses émises par un **laser** (ultraviolet, visible, infrarouge). Lors de son parcours atmosphérique l'impulsion brève (quelques dizaines de nanosecondes) mais de forte intensité, émise par le laser de Calipso, est diffusée par les molécules gazeuses, les aérosols et les particules nuageuses. Les propriétés de l'atmosphère – variables physiques et concentration en constituants – sont déduites de l'intensité et des caractéristiques spectrales de la lumière renvoyée dans la direction de l'émission (cf. schéma p. 11).

Cette lumière est collectée par un **télescope** avant d'être analysée. Le fait que les impulsions laser soient très brèves permet d'obtenir une analyse en distance des "échos" et de "reconstituer" la structure verticale de l'atmosphère. **Le lidar peut-être utilisé de jour comme**

de nuit, même si les mesures de jour sont bruitées par la lumière naturelle détectée simultanément.

Le signal ainsi mesuré par le satellite s'exprime sous la forme d'une équation qui combine les propriétés de rétrodiffusion, de dépolarisation et d'atténuation de l'atmosphère. Un premier type de traitement permet d'extraire de ce signal les informations primordiales sur les diverses strates de l'atmosphère : **altitude de la base et du sommet des couches et classification en nuages fins, aérosols, nuages d'eau ou de glace**. D'autres algorithmes prennent ensuite le relais afin de caractériser les **propriétés optiques** des particules rencontrées : profil de rétrodiffusion pure et épaisseur optique des aérosols et des nuages. C'est là que les données doivent être complétées par celles issues d'autres capteurs, radar ou radiomètre passif, afin de lever l'indétermination de l'équation lidar.





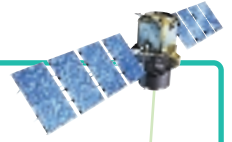
Le principe de fonctionnement du lidar.

Le rayon vert

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

La diffusion atmosphérique modifie cette polarisation incidente et la mesure de cette dépolarisation 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 dépolarisation 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 polycristaux.



Lidar ou radar

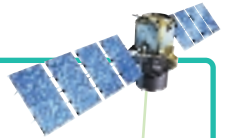
Si lidar et radar sont semblables sur le plan théorique, leurs capacités de détection sont bien différentes du fait de leurs longueurs d'onde très éloignées de part et d'autre de la distribution en taille des particules atmosphériques. La source laser émet un rayonnement visible à 532 nm et proche infrarouge 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 sur-

face 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 verra donc pas les aérosols, et sera 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.

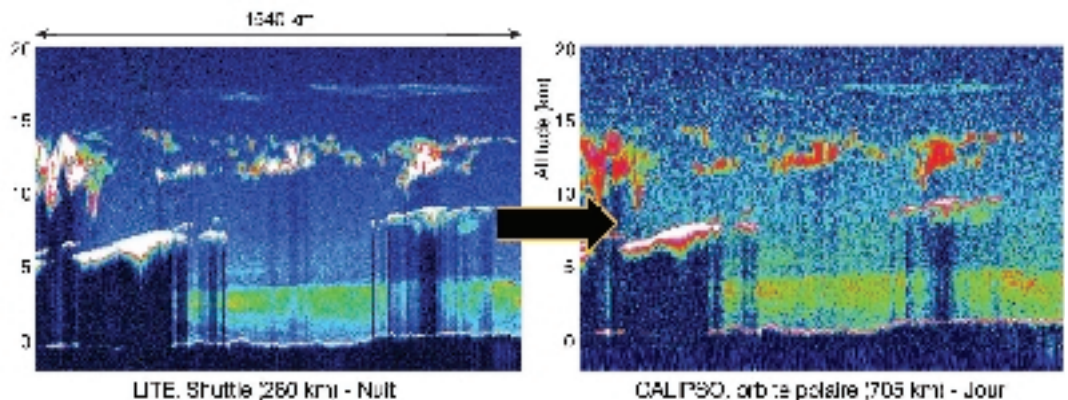
Par conséquent, **les nuages fins et les aérosols sont la prédilection du lidar tandis que le radar est performant pour les nuages bas.** La complémentarité de ces deux techniques explique pourquoi Calipso et Cloudsat vont voler en tandem, Cloudsat étant asservi en position à Calipso à moins de 15 secondes.



Profils lidar

À gauche : mesures lidar effectuées de nuit à 532 nm par le lidar Lite embarqué à bord de la Navette en septembre 1994 en région tropicale.

À droite : simulation à partir des données de Lite de ce qu'observerait Calipso dans le cas de mesures diurnes.

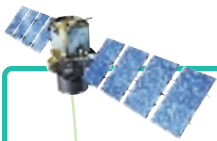


A-Train et Icare au service de la synergie actif-passif

Calipso et Cloudsat vont rejoindre l'**A-Train**, le plus grand observatoire atmosphérique jamais constitué. Cette constellation de six satellites, bâtie pas à pas grâce aux efforts conjugués de la NASA, du CNES et de l'agence spatiale canadienne (ASC) est une opportunité unique pour les scientifiques d'accéder à une panoplie de données et de **combiner pour la première fois vision verticale et horizontale de l'atmosphère**. Ils pourront par exemple comparer les profils verticaux établis par Calipso aux réflectances fournies sur un domaine spectral très large par Aqua, tout en bénéficiant d'informations

sur la polarisation de la lumière réfléchie délivrées par Parosol.

Afin de permettre aux scientifiques d'accéder plus facilement aux données issues de l'A-Train, mais aussi à celles d'autres capteurs, le **pôle de compétence thématique Icare** a été mis en place en 2003 par le CNES, le CNRS, l'Insu et L'Université des Sciences et Techniques de Lille (USTL), avec le soutien de la région Nord-Pas-de-Calais et de l'Union européenne. Ce pôle a pour but de créer une dynamique entre plusieurs laboratoires français autour de l'étude des interactions entre aérosols,



Les six satellites de l'A-Train franchiront chaque jour l'équateur avec quelques minutes d'écart autour de 13h30, heure locale, d'où le surnom d'Afternoon constellation ou "A-Train". Cependant la métaphore ferroviaire n'est pas tout à fait exacte, dans la mesure où ces engins ne se suivent pas en ligne droite tels des wagons. Chaque satellite vole, collecte des données et remplit sa mission indépendamment des cinq autres.

Aqua, en orbite depuis le 4 mai 2002, est considéré comme le "leader" de la constellation parce qu'il est le premier à franchir l'équateur chaque jour (à 13h30 heure locale pour les orbites montantes) et chaque nuit (à 1h30 pour les orbites descendantes), mais aussi parce qu'il embarque le plus d'instruments, uniquement passifs. Sa mission est centrée sur le **cycle de l'eau**. Il embarque un radiomètre imageur multispectral (Modis), un radiomètre pour la mesure du bilan radiatif (Ceres), un radiomètre micro-ondes (AMSR), un sondeur infrarouge à haute résolution spectrale (AIRS) et deux autres sondeurs micro-ondes pour établir des profils de température et d'humidité de l'atmosphère.

Aura, troisième satellite du Système d'Observation de la Terre de la NASA, après Aqua et Terra, a pour mission d'étudier la **qualité de l'air, l'ozone stratosphérique et l'évolution du climat**. En orbite depuis le 15 juillet 2004, ce satellite permet aux scientifiques de suivre les phénomènes de transport de pollution intercontinentaux et de remonter aux sources locales et régionales de ces pollutions atmosphériques. L'instrument HIRDLS (*High Resolution Dynamics Limb Sounder*) étudie la distribution globale des températures et des espèces chimiques dans la stratosphère et la haute troposphère en "scrutant" la couche nuageuse tandis que MLS (*Microwave Limb Sounder*) s'intéresse à la

Le train spatial de 13h30

concentration dans l'atmosphère d'espèces chimiques qui contribuent à la destruction de la couche d'ozone, dont le contenu total est observé par OMI (*Ozone Monitoring Instrument*) en même temps que l'épaisseur optique des aérosols.

Cloudsat, mission menée conjointement par la NASA et l'Agence spatiale canadienne, fournit la **structure verticale des nuages de glace**, des nuages d'eau suffisamment épais et des précipitations.

Calipso, mission NASA/CNES/IPSL, fournit des **profils verticaux de l'atmosphère**, utiles pour connaître la distribution verticale des propriétés des aérosols et des nuages fins.

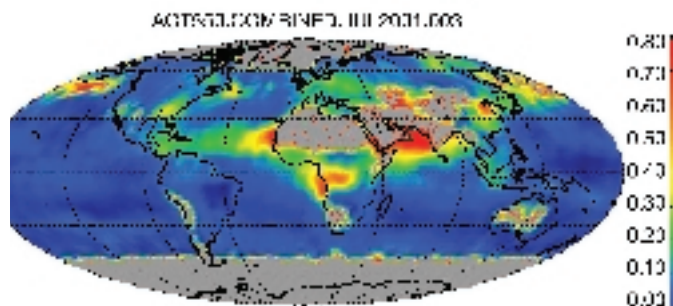
Parosol (Polarisation et Anisotropie des Réflectances au sommet de l'Atmosphère, couplées avec un Satellite d'Observation emportant un Lidar), deuxième microsatellite de la filière Myriade du CNES, est en orbite depuis le 18 décembre 2004. Son radiomètre imageur à grand champ Polder mesure les caractéristiques directionnelles de polarisation de la lumière réfléchie par les surfaces terrestres, afin d'améliorer notre connaissance **des propriétés radiatives et microphysiques des nuages et des aérosols**. Grâce à cette technique originale d'observation, les scientifiques pourront, par exemple, évaluer plus précisément la part des aérosols d'origine anthropique ou naturelle dans l'atmosphère.

Oco (*Orbiting Carbon Observatory*), dernier né de la constellation, sera placé en tête de l'A-Train lors de son lancement prévu en 2008. Il se penchera sur la **concentration en dioxyde de carbone** de l'atmosphère afin, notamment, de comparer les données spatiales aux mesures effectuées au sol dans ce domaine.

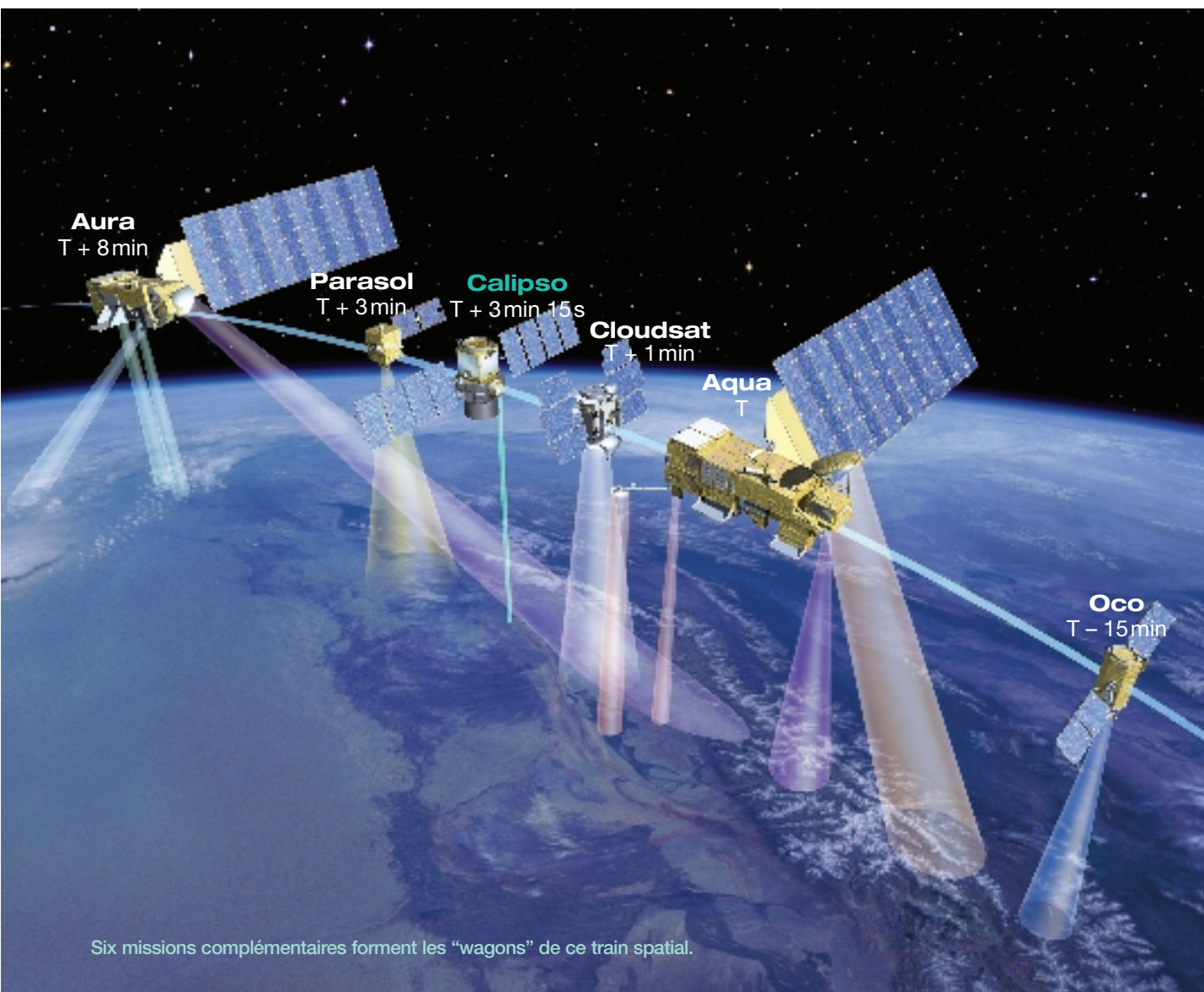


nuages, rayonnement et cycle de l'eau. Il repose sur deux idées fortes : mettre en commun les données et offrir à la communauté scientifique des services pour lui permettre de tirer parti du volume impressionnant d'informations qui découleront de l'A-Train. Il a également pour objectif de resserrer la boucle entre agences spatiales et scientifiques à travers la création d'un **Centre de Gestion et de Traitement des Données** (CGTD).

Opérationnel en 2005, le CGTD comprend une unité de développement, en charge du traitement scientifique et des logiciels d'analyse de données, et une unité d'exploitation dont le rôle est de produire des cartographies, des jeux de données et autres produits à forte



Un exemple de produit fourni par le pôle Icare : l'épaisseur optique des aérosols observée par l'instrument Modis à 550 nm en juillet 2001.



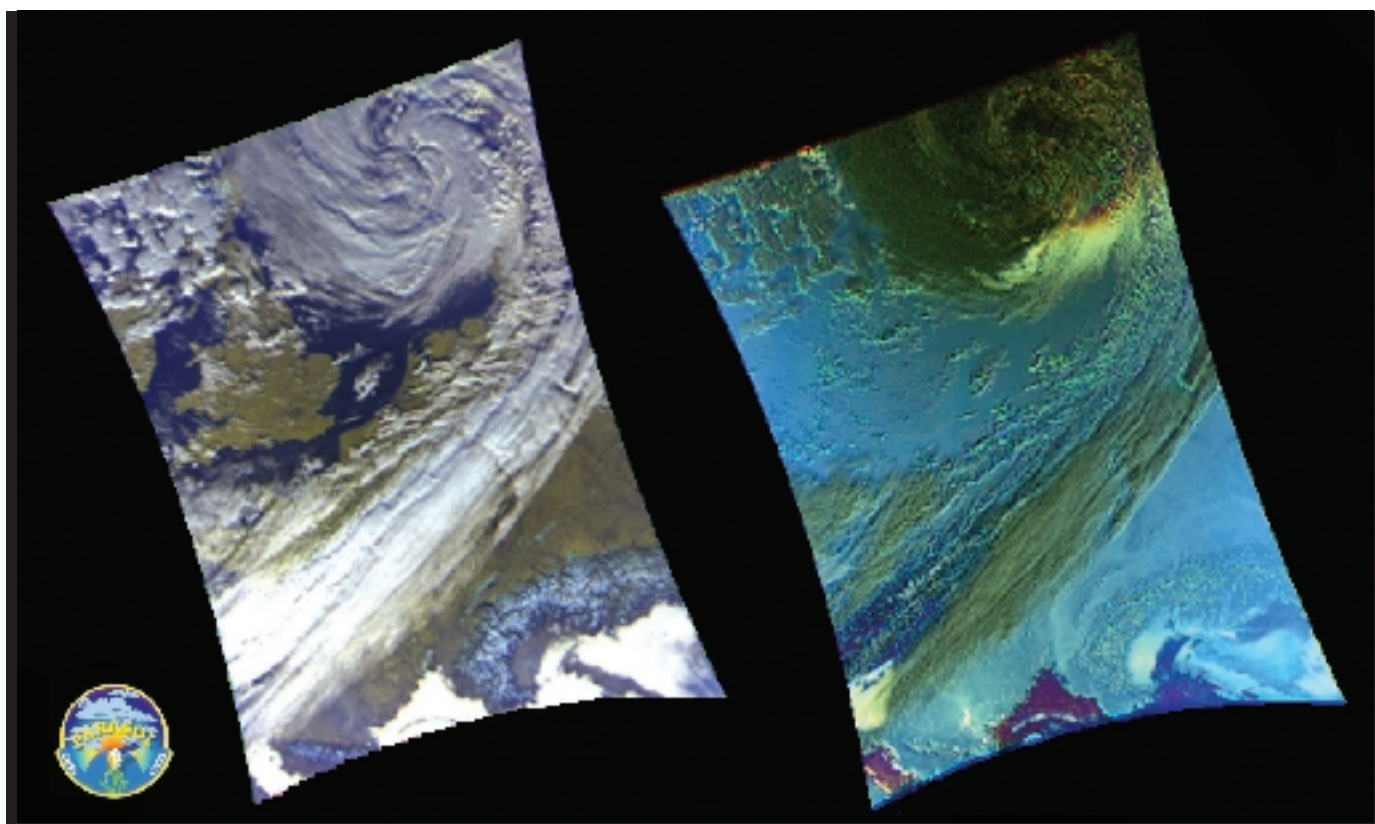
Six missions complémentaires forment les "wagons" de ce train spatial.

valeur ajoutée. Il est chargé de rapatrier l'ensemble des produits de la mission Calipso ainsi que les données de l'A-Train nécessaires pour les utilisateurs.

Un très grand nombre de **synergies** sont dès lors possibles à partir des mesures de l'A-Train. Tout d'abord, les mesures lidar et radar sont complémentaires entre elles, pour la classification des couches et pour la détermination du contenu en eau des nuages. En second lieu, les restitutions lidar et radar bénéficieront d'informations fournies par les radiomètres ima-

geurs pour améliorer leurs performances. En parallèle, les profils verticaux vont permettre de valider et améliorer les inversions réalisées à partir d'observations passives le long de la trace et d'accroître en retour la qualité des observations grand champ.

Les possibilités de combinaison des mesures acquises au sein de l'A-Train sont très nombreuses et constituent pour l'care autant de **produits multi-capteurs** à forte valeur ajoutée.



Parasol a débuté sa mission scientifique au sein de l'A-Train en mars 2005.

Quelques semaines plus tôt, le microsatellite livrait ses premières observations. Ce couple d'images a été acquis alors qu'une tempête commençait à sévir sur l'Europe du nord-ouest. Sur l'image de gauche (composition colorée), on distingue les Îles britanniques et la Manche, alors qu'une bande nuageuse traverse la moitié nord de la France. La neige présente sur les massifs montagneux est également visible dans des tons bleutés. L'image de droite, en lumière polarisée, montre un arc-en-ciel morcelé au nord-est de la zone observée. Celui-ci permet de conclure que sur cette zone les nuages sont composés par endroit de gouttelettes d'eau (arc lumineux) et par endroit de cristaux de glace (parties sombres). Sur la France la coloration grisée des nuages est due à leur haute altitude, ce qui réduit l'importance de la diffusion moléculaire située au-dessus du nuage (coloration bleutée). Le point très lumineux en bas à gauche est une réflexion spéculaire du Soleil dans le Golfe de Gascogne.

ORGANISATION, INSTRUMENTS, PLATE-FORME ET LANCEMENT

Un projet franco-américain

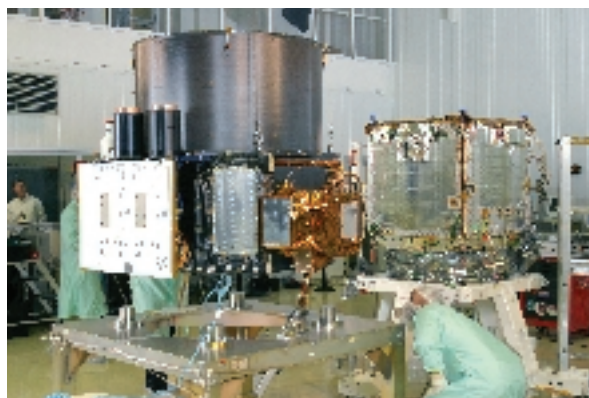
L'histoire du projet Calipso débute en 1998, lorsque le CNES et le Langley Research Center de la NASA répondent ensemble à un appel d'offre lancé par l'agence spatiale américaine. Soutenu par le Comité des Programmes Scientifiques du CNES lors du séminaire de prospective d'Arcachon, le projet implique dès le départ un partage des tâches et des responsabilités entre la NASA et le CNES. La responsabilité d'ensemble de la mission est confiée au Principal Investigator (PI) de la NASA, assisté des co-PI français et américain, respectivement issus de l'Institut Pierre-Simon Laplace (CNRS) et de l'Université d'Hampton en Virginie.

La conduite du projet est assurée par une **équipe intégrée NASA-CNES**, responsable de bout en bout du bon déroulement de la mission. Les tâches sont réparties de la façon suivante :

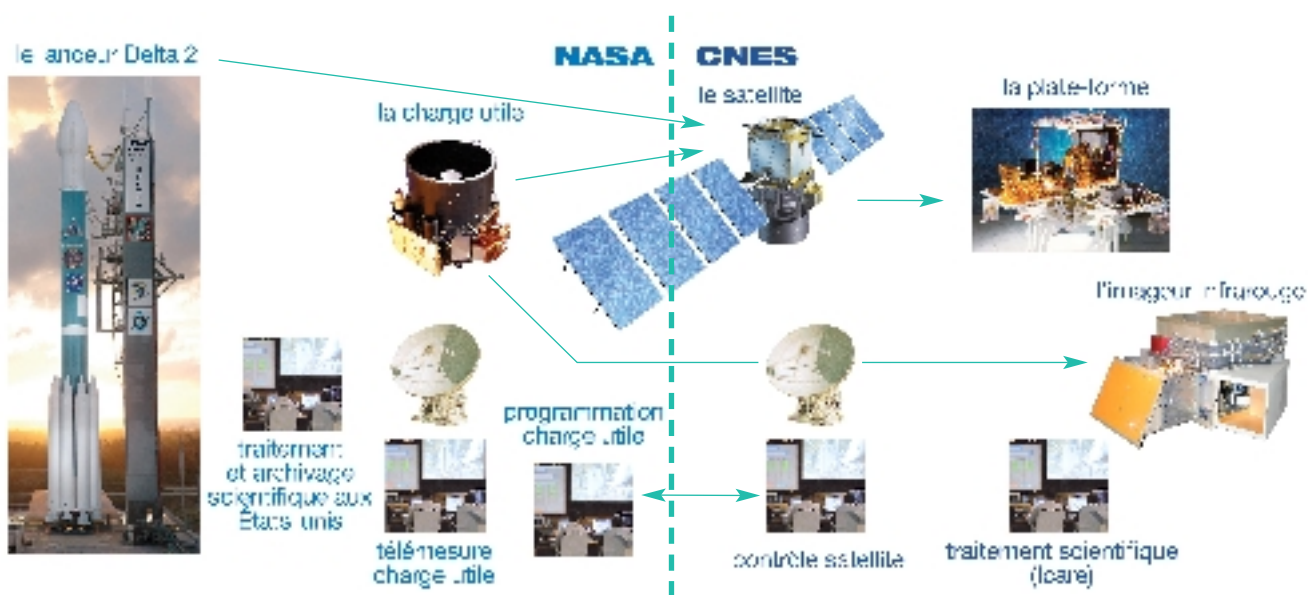
- La **NASA** est responsable de l'ensemble du système, de la charge utile, de l'instrument lidar, de la caméra visible et du centre de données scientifique américain.
- Le **CNES** se charge quant à lui de la plate-forme, de l'ingénierie, de l'assemblage et des tests du satellite, puis de son contrôle en orbite. Il fournit également l'im-

geur infrarouge, y compris les algorithmes de traitement et le centre d'expertise chargé de calibrer l'instrument en cours de mission.

Pendant toute la durée de vie de Calipso le CNES mettra donc en œuvre le satellite, la NASA gérant la charge utile et transmettant au CNES les commandes à télécharger. Cette mise en commun des moyens financiers et techniques assure **un retour partagé des résultats scientifiques pour les deux parties**.



Calipso en cours d'intégration
dans les locaux d'Alcatel Space à Cannes.



Le partage des responsabilités entre la NASA et le CNES.



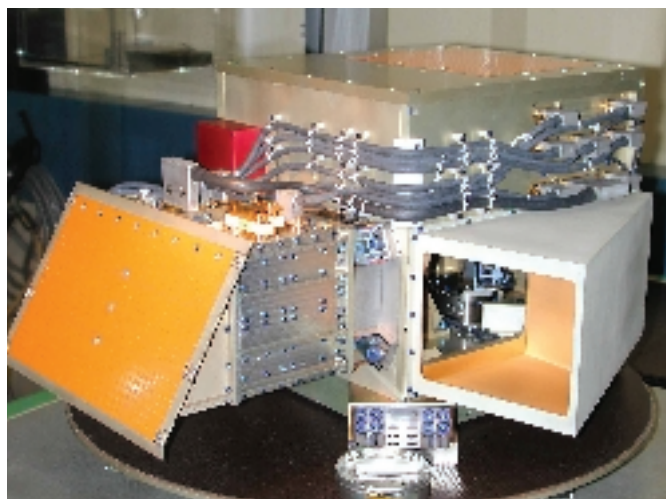
Trois instruments complémentaires

Caliop : un lidar 3 canaux

Développé par la NASA et la société Ball Aerospace, le lidar, instrument principal de la mission, mesure, de jour comme de nuit, les profils de rétrodiffusion depuis le sol et jusqu'à une altitude de 40 kilomètres avec une résolution de 30 mètres. L'**émetteur** laser produit une énergie de 110 mJ pour chacune des longueurs d'ondes, 532 et 1064 nm, avec une fréquence de répétition de 20,25 Hz. Cette fréquence permet d'obtenir un espacement de 333 mètres entre chaque empreinte, chacune d'elle ayant un diamètre de 90 mètres au sol. Le **récepteur** comprend un télescope d'un mètre de diamètre. Un mécanisme de pointage actif est utilisé pour maintenir l'alignement des faisceaux d'émission et de réception. Les données de basse altitude seront transmises à pleine résolution, alors que la moyenne verticale et horizontale des données de plus haute altitude sera établie à bord, afin de limiter la quantité de données à transmettre au sol.

IIR : un radiomètre infrarouge "made in France"

Développé par la société EADS-Sodern, sous la maîtrise d'œuvre du CNES, IIR est un radiomètre à trois canaux fonctionnant dans l'infrarouge thermique à 8,65 μm , 10,60 μm et 12,05 μm . Les images fournies par cet instrument permettront de situer le contexte de la mesure lidar de nuit et d'assurer la co-registation avec le radiomètre multispectral Modis embarqué sur Aqua. Ses mesures, combinées aux produits lidar, contribueront également à déterminer la taille des particules de



L'imageur radiomètre infrarouge IIR.

glace dans les nuages semi-transparents (cf. encadré ci-dessous).

IIR est composé d'une **caméra** (*Infrared sensor module – ISM*), associée à une **roue porte-filtres** pour la sélection des longueurs d'ondes et à un **corps noir** permettant de calibrer l'instrument en orbite. Le tout est complété par un miroir de changement de visée qui offre la possibilité de pointer l'instrument successivement vers la Terre, le corps noir et l'espace froid. Ce module ISM a été développé pour l'instrument de météorologie avancée lasi (*Infrared Atmospheric Sounding Interferometer*) et sera embarqué sur le satellite Métop 1 qui doit être lancé en 2006.

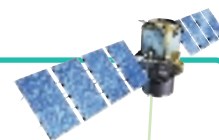
Le duo lidar/IIR ouvre de nouvelles fenêtres sur les nuages

L'association du lidar Caliop et de l'imageur infrarouge permet d'améliorer une technique classique d'estimation de la taille des particules nuageuses, appelée "*split-window*". Dans la fenêtre atmosphérique ("*window*") située dans l'infrarouge thermique entre 8 et 13 μm les propriétés d'absorption et de diffusion des nuages sont très sensibles à la longueur d'onde, si bien que la combinaison des températures de brillance mesurées dans plusieurs canaux de la fenêtre (3 canaux sont utilisés par l'imageur infrarouge) permet de déduire certaines caractéristiques de taille et de forme des particules nuageuses.

Cette "**reconnaissance**" de taille et de forme se fait par comparaison des mesures avec des simulations numériques. Les calculs nécessitent des hypothèses,

en particulier sur la température du nuage. La connaissance de l'altitude du nuage apportée par le lidar permet de fixer sa température au moyen d'un modèle météo.

De plus, l'information sur la forme des particules, déduite du rapport de dépolarisation lidar, va permettre de lever l'ambiguïté susceptible d'exister entre la forme et la taille des particules et d'affiner grandement l'estimation de ces deux paramètres. Ces améliorations sont sensibles pour des nuages glacés pour lesquels la forme et l'orientation des particules sont des paramètres critiques. C'est pourquoi un effort particulier a été porté sur la simulation des propriétés optiques des cristaux de forme complexe et les calculs de transfert radiatif rapides.



Étant donné le niveau de précision requis pour les applications scientifiques, l'emport d'un système de calibrage à bord est nécessaire. La méthode consiste à intercaler avec les images de la Terre des scènes froide et chaude uniformes, de température stable et connue avec précision... un peu comme on le fait pour étalonner un thermomètre domestique. La scène froide est obtenue en visant l'espace, dont la température est de 3 Kelvin, tandis que la scène chaude est réalisée à partir d'un corps noir, dispositif en forme d'anneau peint en noir de 9 cm de diamètre. Le Laboratoire de Météorologie Dynamique a conçu ce corps noir et effectué une caractérisation radiométrique complète de l'IIR dans une chambre à vide.

WFC : une caméra visible

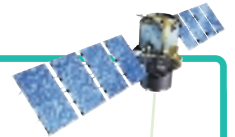
Développée par la NASA et Ball Aerospace, la caméra WFC est un **imageur visible mono-canal** dérivé d'un capteur d'étoiles commercial. Il s'agit d'une caméra CCD (un pixel couvre 125 x 125 m au sol), capable de fournir des images sur une fauchée de 60 kilomètres centrées sur la mesure du lidar. Ces images donneront le contexte de la mesure lidar de jour et permettront de resituer cette mesure dans les images à grand champ fournies par les autres instruments de l'A-Train. De nuit, cette fonction de "cadrage" est assurée par l'imageur infrarouge.

Pari réussi pour la plate-forme Protéus

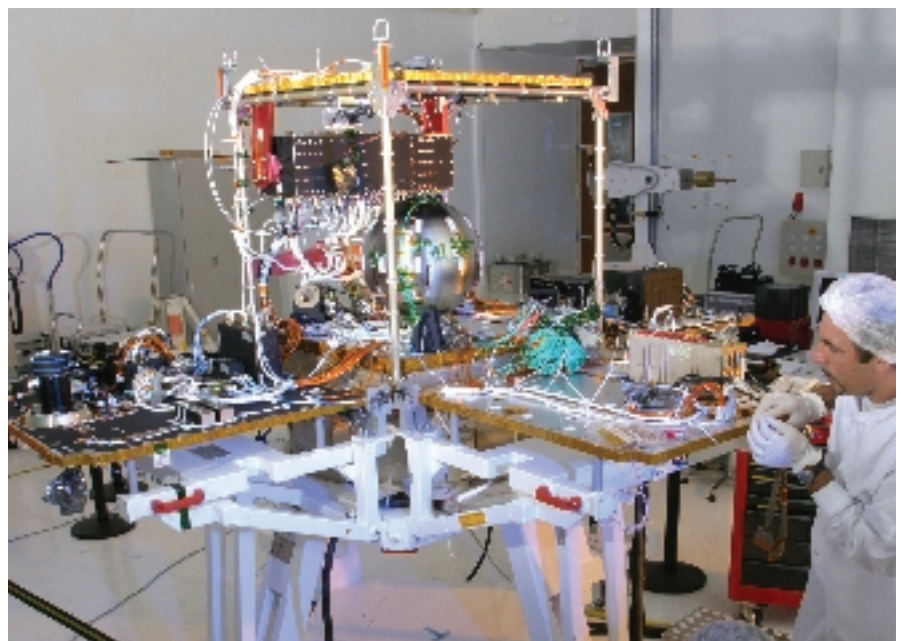
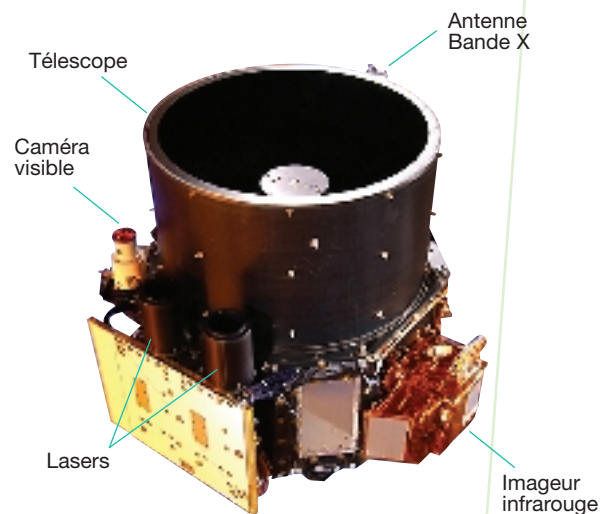
Après Jason-1 en orbite depuis le 7 décembre 2001, Calipso est le second satellite du CNES développé à partir d'une plate-forme Protéus (Plate-forme Reconfigurable pour l'Observation, les Télécommunications Et les Usages Scientifiques). Conçue par le CNES et Alcatel Space, celle-ci répond aux besoins des minisatellites d'environ 500 kilos et convient à tout type d'orbite d'altitude comprise entre 500 et 1 500 kilomètres.

Réaliser des satellites performants, fiables, utilisables pour des missions multiples et à faible coût : tels sont les grands principes qui ont guidé la mise en œuvre de ce nouveau standard, lequel englobe non seulement la plate-forme mais également la composante sol associée

La charge utile



- **Un lidar 3 canaux** (532 nm – 2 canaux selon des polarisations orthogonales – et 1064 nm) équipé d'un télescope de 1 m. Résolution verticale de 30 m.
- **Un imageur infrarouge 3 canaux** : (8,65 µm, 10,60 µm et 12,05 µm). Fauchée de 64 km et résolution d'1 km.
- **Une caméra visible** fonctionnant à 650 nm. Fauchée de 60 km et résolution de 250 m à 1 km.
- **Un calculateur 400 MIPS.**
- Une **mémoire de masse** état solide de 60 Gbits.
- Télémessure scientifique bande X
80 Mbps 40 Gbits/jour.
- Masse : 300 kg



La plate-forme de minisatellite **Protéus**.



pour la mise en œuvre des satellites et tout un environnement d'outils informatiques, de simulations et de moyens de développement.

Cette plate-forme permet ainsi, que ce soit pour les missions scientifiques ou d'applications, de :

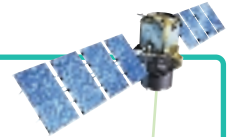
- **Réduire les coûts**, afin de faciliter la réalisation de programmes dans un contexte budgétaire toujours plus contraint ;

- **Optimiser les délais** de développement, notamment la phase d'intégration et d'essais après montage de la charge utile sur la plate-forme ;

- **Tester en orbite** de nouveaux instruments sur une charge utile de démonstration ;

- **S'adapter à différents lanceurs** commerciaux.

Les missions de la filière Protéus s'inscrivent dans des domaines aussi variés que l'océanographie, l'astronomie ou l'étude des nuages et des aérosols.



Protéus c'est aussi

Jason-1 et 2 : Depuis décembre 2001, le minisatellite franco-américain Jason-1 scrute les océans avec une précision jamais atteinte, que ce soit pour évaluer le niveau des mers, la hauteur des vagues ou encore la vitesse du vent. Jason-2, également conçu à partir de la plate-forme Protéus, doit assurer la continuité de la mission à partir de 2008 en poursuivant les objectifs de son grand frère : développer l'océanographie opérationnelle, civile et militaire, mieux comprendre le climat et renforcer la météorologie opérationnelle.

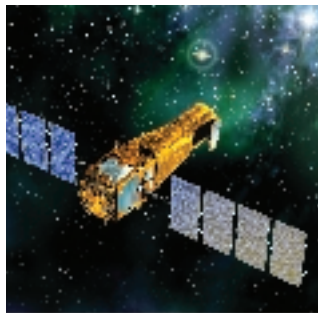
Corot : Troisième mission scientifique Protéus après Jason-1 et Calipso, Corot vise un double objectif en astrophysique : étudier la structure interne des étoiles à

travers leurs modes de vibration et détecter des planètes telluriques hors du système solaire. Ce minisatellite sera lancé au cours du vol inaugural du lanceur Soyouz 2-1b à la mi-2006 depuis le cosmodrome de Baïkonour.

Smos : Réalisée dans le cadre du programme Earth Explorer de l'ESA, cette mission à forte participation française et espagnole a pour but, à l'horizon 2007, de tester la possibilité d'évaluer globalement et régulièrement l'humidité superficielle des sols et la salinité des océans, deux paramètres essentiels au fonctionnement des écosystèmes et à la mécanique océanique. Ce radiomètre interférométrique est installé sur une plate-forme Protéus placée en orbite polaire.



Jason-2



Corot



Smos

La répartition des rôles au sol

La composante sol de Calipso est localisée à la fois en France et aux États-Unis et comprend trois entités principales :

La composante sol mission ou **MOGS** (*Mission Operations Ground System*), sous responsabilité NASA, rassemble :

- le centre de contrôle de la mission, situé au Langley Research Centre de la NASA à Hampton en Virginie,
- un système de distribution des données développé

par Ball Aerospace, chargé de recevoir la télémétrie scientifique plusieurs fois par jour, d'effectuer les traitements de niveau 0 et de transférer les fichiers au LaRC.

La composante sol satellite ou **SOGS** (*Satellite Operations Ground System*), située en France, rassemble :

- le centre de commande-contrôle du satellite installé au Centre spatial de Toulouse,
- une station de réception bande S installée à Kiruna (Suède), chargée d'envoyer les télécommandes



vers le satellite et de recevoir la télémétrie de servitude,

- un centre d'expertise technique (TEC) dédié au suivi en vol de l'imageur infrarouge. Installé au Centre spatial de Toulouse, le TEC est développé par Cap Gemini sous maîtrise d'œuvre CNES,
- un réseau de communication DCN (*Data Control Network*) chargé de fournir les liaisons entre les différentes entités de la composante sol.

Aux États-Unis, la **composante sol scientifique** est

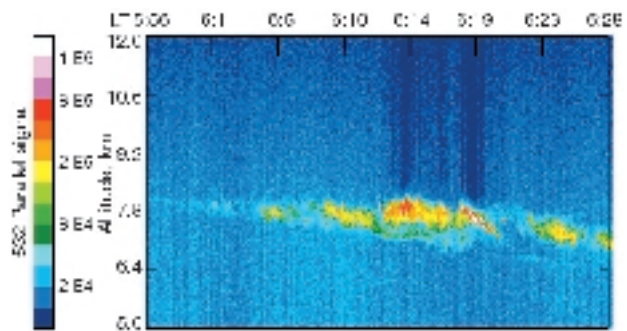
répartie entre deux entités situées au Langley Research Center :

- la *Science Computing Facility*, développé pour les besoins spécifiques de Calipso, réalise tous les traitements scientifiques de la mission,
- l'*Atmospheric Science Data Centre* archive les produits et les diffuse auprès des utilisateurs.

En France, le pôle de compétence thématique Icare effectue les traitements scientifiques des données A-Train.



Test atmosphérique du lidar.



Profil vertical de l'atmosphère obtenu au cours de ce test.

Lancé depuis la Californie, mis à poste depuis Toulouse

Lancé depuis la base de Vandenberg de l'US Air Force en Californie par une Delta 2, Calipso doit être placé sur une orbite polaire héliosynchrone à 705 km d'altitude.

Avant son lancement, Calipso, ses équipements de manutention et bancs de contrôle ont été acheminés depuis Alcatel Space à Cannes par avion jusqu'à la base de Vandenberg. La campagne de préparation du lancement a duré 11 semaines et s'est déroulée dans les locaux de la société Astrotech, puis sur le pas de tir des lanceurs Delta.

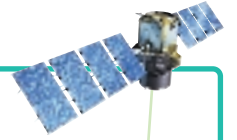
Afin d'assurer la mise en orbite conjointe de Calipso et de Cloudsat, le lanceur est équipé d'un système permettant d'emporter deux satellites : le **Dual Payload Attach Fitting** (DPAF). Ce système a permis notamment de mettre en orbite les satellites Jason-1 (CNES/NASA) et Timed en décembre 2001. Calipso, physiquement attaché au sommet de la structure porteuse, est la première charge utile à être séparée du lanceur. Une fois celle-ci déployée, le lanceur Delta effectue la séparation

de la structure porteuse, puis celle de Cloudsat.

La chronologie du lancement doit débuter à 12h 00min 57s, heure française. La séparation a lieu un peu plus d'une heure plus tard, après la fin de la phase balistique et de la poussée du deuxième étage. Les panneaux solaires sont ensuite déployés, puis c'est au tour des équipements de la plate-forme (GPS, senseur stellaire) d'être activés. La charge utile est quant à elle mise en route sept jours après le lancement.

Après Parasol en décembre 2004, le CNES et les équipes du Centre spatial de Toulouse assurent la mise à poste de ce nouveau wagon de l'A-Train. Responsables d'opérations, orbitographes et spécialistes réseau : tous les métiers sont mobilisés pour permettre au mini-satellite de rejoindre son **orbite définitive 40 jours après le lancement**. Entrant ensuite en phase de routine, Calipso sera toujours contrôlé depuis Toulouse mais sous la responsabilité globale de la NASA. Il aura alors trois ans pour mener à bien sa mission et révéler les secrets des nuages.





Delta 2

Commercialisé par Boeing et lancé depuis Cap Canaveral en Floride ou Vandenberg en Californie, le lanceur Delta 2 peut être adapté aux besoins propres à chaque mission. Dans sa version à deux étages, Delta 2 est capable de mettre en orbite des charges utiles de 6 tonnes en orbite basse.

La version utilisée pour lancer Calipso et Cloudsat comporte deux étages et neuf accélérateurs d'appoint. Haute de 40 mètres, sa masse au décollage est de 230 tonnes.



Calipso et ses équipements de test sont arrivés sur la base de Vandenberg le 20 mai 2005 à bord d'un avion Antonov.



ANNEXES

Les laboratoires français participant à la mission scientifique

L'équipe scientifique de Calipso est américano-française et implique plusieurs laboratoires français, dont le Service d'Aéronomie du CNRS, principal investigateur, le Laboratoire de Météorologie Dynamique, le Laboratoire d'Optique Atmosphérique et le Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, co-investigateurs. Plusieurs autres laboratoires français participent à la préparation de cette mission et à la phase de validation (Centre d'Étude des Environnements Terrestre et Planétaires (CETP) de l'IPSL - Vélizy ; ELICO, Université du Littoral, Wimereux ; Laboratoire de Météorologie Physique (LaMP), Université Blaise Pascal, CNRS, Clermont-Ferrand).

Service d'aéronomie



Unité mixte de recherche du CNRS, de l'Université Pierre et Marie Curie et de l'Université de Versailles Saint-Quentin, laboratoire de l'Institut Pierre-Simon Laplace, le Service d'Aéronomie a pour vocation première l'étude des processus physico-chimiques et dynamiques qui gouvernent l'évolution des principaux constituants de l'atmosphère terrestre (ozone stratosphérique, propriétés oxydantes de la troposphère, aérosols, relations Soleil/atmosphère et climat/environnement).

Le laboratoire s'intéresse également aux atmosphères

planétaires et cométaires ainsi qu'au milieu interplanétaire et interstellaire local.

Ce laboratoire effectue des observations au sol ou embarquées (ballons, avions, sondes spatiales), utilisant des instruments de détection active (lidars et radars) ou passive (spectrophotométrie, spectrométrie, diodes laser) issus de développements effectués au sein du laboratoire et en collaboration. Il mène également une activité de modélisation numérique des processus étudiés afin de disposer de l'outil intégrateur indispensable à l'analyse des observations. Enfin, il participe à la recherche en amont sur les instruments du futur.

Laboratoire de Météorologie Dynamique

Réparti sur trois sites (École Polytechnique, École Normale Supérieure, et Université Pierre et Marie Curie), unité mixte de recherche du CNRS, le Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS a pour objets de recherche les mécanismes, l'évolution et la prévision des phénomènes météorologiques et du climat.

L'équipe du LMD participe à la modélisation des processus climatiques, de la pollution atmosphérique et des atmosphères planétaires à grande échelle. Elle inclut une série d'activités théoriques axées sur la dynamique

des fluides géophysiques, la non linéarité et la turbulence à petite échelle. Elle implique l'analyse des mesures effectuées à partir de systèmes spatiaux concernant l'étude du bilan radiatif de la Terre, du rayonnement atmosphérique ou du cycle de l'eau dans les Tropiques. Elle participe également au développement d'instruments de mesure : télédétection par lidar, radiométrie par satellite, mesures aéroportées et sous ballons.

Le LMD fait partie de l'Institut Pierre-Simon Laplace.

Laboratoire d'Optique Atmosphérique



L'optique atmosphérique cherche à modéliser la propagation à travers l'atmosphère de la lumière reçue du Soleil et de la lumière infrarouge émise par l'ensemble des surfaces terrestres et de l'atmosphère. Les travaux menés au Laboratoire d'Optique Atmosphérique de Lille, unité mixte de recherche du CNRS, s'insèrent dans l'étude globale du climat.

Un premier objectif est de quantifier le rôle de ce

rayonnement solaire et infrarouge dans les échanges énergétiques de la planète, en particulier de préciser le rôle des nuages dans le bilan radiatif de la Terre dont ils constituent un facteur essentiel.

Un second axe de recherche porte sur la caractérisation, à l'échelle du globe, de différents paramètres qui sont en relation directe avec l'évolution climatique (nuages, aérosols, surfaces), en utilisant principalement l'observation par satellite.

Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement



Unité mixte de recherche CEA-CNRS créée en janvier 1998 par la fusion du Centre des faibles radioactivités et du Laboratoire de modélisation du climat et de l'environnement, le LSCE, situé à Gif-sur-Yvette, est centré sur l'étude des mécanismes de l'évolution du climat et de l'environnement externe de la Terre.

Ses principaux domaines d'activité sont :

- les sciences du climat, dont l'objectif est de comprendre les mécanismes de la variabilité naturelle du

climat à différentes échelles de temps.

- l'étude des cycles biochimiques, afin de comprendre les processus intervenant dans le cycle de composants clés qui interagissent avec le climat, comme le carbone ou les aérosols.

- la géochronologie et l'analyse des géomarqueurs, basées sur la maîtrise d'une palette de techniques appliquées à l'étude passée et présente de la géosphère et de ses relations avec le climat.

Le LSCE fait partie de l'Institut Pierre-Simon Laplace.

L'organisation industrielle

La plate-forme Protéus et l'ingénierie de Calipso ont été développées sous la maîtrise d'œuvre du CNES par **Alcatel Space** à Cannes.

La charge utile (lidar Caliop et caméra WFC) a été réalisée par la société **Ball Aerospace** (Colorado) sous la responsabilité de la NASA.

L'imageur infrarouge, sous responsabilité CNES, a quant à lui été développé par **EADS-Sodern** à Limeil- Brévannes (Val-de-Marne).



Les partenaires du pôle Icare



Département Sciences de l'Univers



Université des Sciences et Techniques de Lille



Institut National des Sciences de l'Univers



Feder

Fonds européen de développement régional



CONTACTS

CNES

Responsable presse

Sandra Laly

E-mail : sandra.laly@cnes.fr

Tél. : 01 44 76 77 32

Chef de projet Calipso

Bruno Belon

E-mail : bruno.belon@cnes.fr

Tél. : 05 61 28 18 51

Responsable programme Calipso

Vincent Cassé

E-mail : vincent.casse@cnes.fr

Tél. : 05 61 28 13 85

Scientifique de projet

Anne Lifermann

E-mail : anne.lifermann@cnes.fr

Tél. : 05 61 28 21 43

NASA

Responsable communication lancement

Debra Rahn

E-mail : Drahn@hq.nasa.gov

Relations presse/scientifiques

Gretchen Cook-Anderson

E-mail : Gcookand@nasa.gov

Alcatel Space

Chef de projet

Michel Jourdan

E-mail : michel.jourdan@space.alcatel.fr

Relations presse

Laurent Zimmermann

E-mail : laurent.zimmermann@space.alcatel.fr

CNRS

Responsable presse INSU-CNRS

Christiane Grappin

E-mail : christiane.grappin@cnrs-dir.fr

Tél. : 01 44 96 43 37

Direction océan-atmosphère INSU-CNRS

Nicole Papineau

E-mail : nicole.papineau@cnrs-dir.fr

Tél. : 01 44 96 43 78

Service d'Aéronomie

Investigateur principal : Jacques Pelon

E-mail : jacques.pelon@aero.jussieu.fr

Tél. : 01 44 27 37 79

Service d'Aéronomie - Université P. et M. Curie (boîte 102)

4 place Jussieu - 75252 Paris cedex 05 - France

Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement

Co-investigateur : François-Marie Bréon

E-mail : fmbreon@cea.fr

Tél. : 01 69 08 94 55

CEA/DSM/LSCE - 91191 Gif-sur-Yvette cedex - France

Laboratoire d'Optique Atmosphérique

Co-investigateur : Didier Tanré

E-mail : didier.tanre@univ-lille1.fr

Tél. : 03 20 33 70 33

Laboratoire d'Optique Atmosphérique -

Université des Sciences et Techniques de Lille 1 - bât. P5

59655 Villeneuve d'Ascq - France

Laboratoire de Météorologie Dynamique

Co-investigateur : Pierre Flamant

E-mail : flamant@lmd.polytechnique.fr

École Polytechnique

Tél. : 01 69 33 45 50

Co-investigateur : Hervé Le Treut

E-mail : letreut@lmd.ens.fr

École Normale Supérieure

Tél. : 01 44 32 22 29

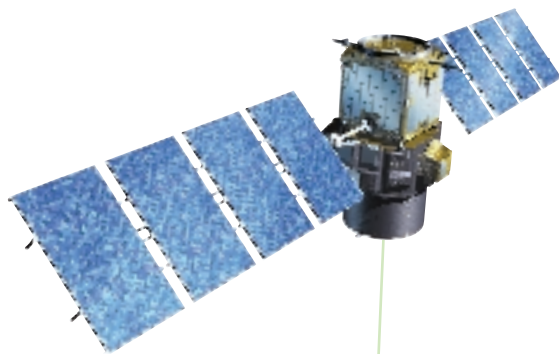
SITES INTERNET

- Site Calipso CNES : <http://smc.cnes.fr/CALIPSO/Fr/>
- Site Calipso NASA : www-calipso.larc.nasa.gov/
 - CNES : www.cnes.fr
- Centre national de la recherche scientifique : www.cnrs.fr
 - INSU : www.insu.cnrs.fr
 - Institut Pierre-Simon Laplace : www.ipsl.jussieu.fr
 - Service d'aéronomie : www.aero.jussieu.fr/
- Laboratoire de météorologie dynamique : www.lmd.jussieu.fr/
- Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement : www-lsce.cea.fr/
 - Laboratoire d'optique atmosphérique : www-loa.univ-lille1.fr
 - Site Icare : www-icare.univ-lille1.fr
 - NASA : www.nasa.gov/
- Missions d'observation de la Terre de la NASA : <http://earthobservatory.nasa.gov/>
 - Site Cloudsat : <http://cloudsat.atmos.colostate.edu/>





INFORMATION



Conception : Direction de la Communication
externe, de l'Éducation et des Affaires publiques
Service Développement et Ressources

Graphisme/réalisation : Cocoon studio

Photos : CNES, NASA, Communauté Européenne,
Alcatel Space, Météo France/M. Bravard/M. Buffet,
Médias France, Sodern, J-P. Haignéré, P. Carril, D. Ducros

Recherche iconographique : CNES Diffusion

Impression : Service Édition du CST

Jun 2005



CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES

De l'espace pour la Terre