
LA TELEDETECTION SPATIALE

LIDAR

1.1 Introduction

Dans ce chapitre nous ferons une présentation générale de la technologie de télédétection que constitue le lidar à rétrodiffusion.

Nous définirons dans un premier temps quelles sont les méthodologies utilisées permettant de restituer les paramètres caractérisant les propriétés optiques et radiatives de l'atmosphère.

Nous retracerons ensuite le cheminement historique de cette technologie sur les 40 dernières années, depuis sa création, jusqu'à sa récente implémentation dans le cadre des missions spatiales telles que LITE, GLAS et CALIPSO. Nous présenterons ces missions spatiales et donnerons pour chacune d'elles les caractéristiques de l'instrument lidar utilisé.

1.2 La méthode de télédétection lidar

1.2.1 Description générale de la technologie lidar

Le LIDAR, acronyme de LIght Detection And Ranging, est un système de télédétection active fonctionnant sur le même principe qu'un RADAR (RAdio Detection And Ranging) ou qu'un SODAR (SOund Detection And Ranging). Le lidar a eu historiquement comme autre nom « laser radar », « optical radar » et « ladar ». Comme ces instruments, le lidar a pour but d'apporter de l'information sur une cible donnée, et/ou sur le trajet effectués jusqu'à cette cible. Mais à la différence du RADAR et du SODAR, le lidar utilise une source laser, émettant dans le domaine

spectral optique, pour des longueurs d'ondes allant de l'ultraviolet (environ $0.2 \mu\text{m}$) à l'infrarouge (environ $10 \mu\text{m}$).

Le faisceau laser émis est diffusé par les molécules et les particules en suspension dans l'air (voir la **Figure 1.2.1**). La lumière réfléchie (ou rétrodiffusée) est collectée par un système de télescope, ou un système de lentilles. Le signal est ensuite obtenu grâce à un photomultiplicateur (PM) ou une photodiode à avalanche (APD), couplée à une chaîne électronique d'analyse des signaux. Le signal y est filtré afin d'éliminer les signaux ne provenant pas du laser. Le signal est ensuite numérisé et enregistré en vue des traitements algorithmiques d'extraction, qui seront appliqués de façon informatique.

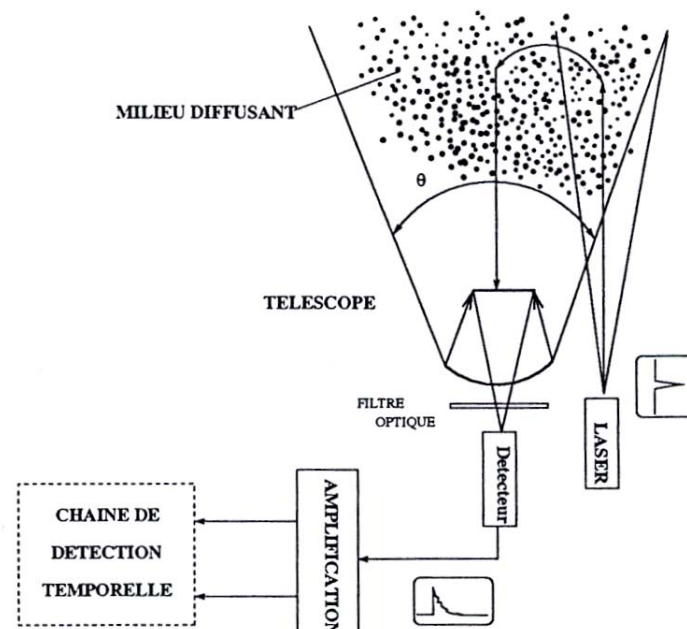


Figure 1.2.1 : Principe de fonctionnement d'un lidar

Il existe principalement quatre grands types de système lidar :

- **Le lidar à rétrodiffusion** : Le lidar à rétrodiffusion est le plus ancien des lidar. Il mesure la puissance du rayonnement optique « rétrodiffusé » par l'atmosphère. Cette puissance est fonction de la réflectivité des couches atmosphériques traversées par le faisceau laser et de l'atténuation du rayonnement optique le long du trajet aller-retour. La réflectivité de

l'air est elle-même fonction de la concentration en cibles rétrodiffusantes et du pouvoir réflecteur de chaque cible.

- **Le lidar à absorption différentielle** : Les premières expériences mettant en œuvre un lidar à absorption différentielle date du début des années 80. Le lidar DIAL cible une molécule chimique particulière. Le principe est simple : deux rayonnements sont émis simultanément, ou presque, sur deux longueurs d'ondes très proches l'une de l'autre, dont l'une est absorbée par les molécules cibles et l'autre pas. A une altitude donnée, le rapport entre les puissances reçues est proportionnel à l'absorption différentielle entre les deux voies. Celle-ci est fonction de la densité des cibles et de leur pouvoir absorbant, lui-même proportionnel à la température. Il est alors possible de remonter à la densité des cibles, ou à la température si l'on choisit une molécule comme l'oxygène dont la densité est connue.
- **Le lidar Doppler** : ce lidar effectue la mesure de la vitesse du vent. Cette dernière est déterminée à partir du décalage de longueur d'onde entre les ondes émises et reçues (effet Doppler). Les lidars Doppler se sont développés à partir des années 80.
- **Le lidar Raman** : Comme les lidar Dial, les lidar Raman ciblent une particule particulière. Le principe est d'émettre dans une gamme de longueur d'onde susceptible de donner lieu à une diffusion anélastique de la part de la cible. Le rayonnement diffusé est à une longueur d'onde décalée par rapport à la longueur d'onde d'émission. Ce décalage en fréquence est alors propre à la nature de la molécule à étudier. C'est ainsi que l'on va remonter à la concentration de cette dernière. La diffusion Raman fut historiquement la première voie envisagée pour la mesure de la concentration chimique, de rapport d'humidité ou de température. Les premières expériences furent conduites à la fin des années 70. Avec l'apparition des instruments capables de fonctionner de jour comme de nuit, il présente aujourd'hui une véritable alternative au lidar DIAL.
- **Le lidar femtoseconde** : Nouveau type de lidar, basé sur un système laser produisant des impulsions ultrabrèves (100fs) et de fortes puissances (TW). En effet, lorsqu'une impulsion de très haute puissance crête est envoyée dans l'atmosphère, elle subit spatialement deux effets principaux qui se compensent : la focalisation par effet Ker (variation radiale de l'indice de réfraction non-linéaire due au profil Gaussien de l'intensité) et la diffraction. Le faisceau laser se focalise ainsi en un (ou plusieurs) filament(s) de petit diamètre (100 μm) qui par diffraction a tendance à diverger à nouveau. Ceci aboutit à un régime d'équilibre où la lumière est autoguidée sur de grandes distances.

Parallèlement à cet effet de variation spatiale de l'indice de réfraction non-linéaire, la variation temporelle de la phase induit un élargissement spectral très important : il y a création d'un continuum de lumière blanche. L'écho du continuum rétrodiffusé est analysé par un spectromètre couplé à un télescope.

La présence des gaz polluants est alors détectée par des bandes d'absorption dans le spectre du continuum. L'extraordinaire étendue spectrale, de l'UV à l'IR jusqu'à 5 μ m, permet alors une détection à plusieurs longueurs d'ondes.

Les questions principales à se poser afin de caractériser et identifier un système lidar sont :

- Une détection **Incohérente** (Détection directe du signal brut) ou **Cohérente** (Hétérodyne) ? La détection cohérente correspond à un montage interférométrique utilisant le mixage du signal avec celui de l'oscillateur local.
- Une émission **Pulsée** ou **Continue** (CW, Continuous-Wave) ? Les lidars CW sont utilisés quand le signal doit être intégré sur une longue période de temps, et/ou quand la cible est très proche. Cette technique est principalement utilisée pour déterminer les propriétés moyennes sur le trajet de la source à la cible.
- Un système lidar **Monostatique** ou **Bistatique** ? Un système lidar est dit monostatique si l'axe d'émission du faisceau laser et l'axe de réception du télescope sont proches l'un de l'autre tout en étant pratiquement parallèles.
- Un lidar **Doppler** ou **Non Doppler** ?
- Une détection à longueurs d'onde **unique**, ou **DIAL** ou **femto-seconde** ?
- Un mode de détection en **comptage** de photons, ou en **analogique** ? Lorsque le flux de photons incident sur la cathode est faible, on utilise le mode comptage qui consiste à compter le nombre d'impulsions électriques engendrées par l'émission des photoélectrons. Par contre, un flux de photons trop important conduit à un phénomène de saturation du système de comptage qui perd alors sa linéarité. Dans ce cas, il est nécessaire d'utiliser le mode analogique dans lequel le courant moyen de sortie du détecteur est échantillonné par un analyseur de transitoires.
- Quel est le type de **plateforme** utilisée (Laboratoire, véhicule au sol mobile, avion, ballon, bateau, navette, satellite, ...) ?

Spécificité des instruments lidar utilisés dans notre étude

Les instruments de détections actives (LITE et GLAS) utilisés dans le cadre de cette thèse sont pour l'ensemble des lidars à **rétrodiffusion**, **spatiaux** (embarqués sur une **navette spatiale**/ un **satellite**), **monostatique**, utilisant une détection **incohérente**, et une émission laser **pulsée**. Le faible flux de photons reçus par le système d'observation d'un lidar spatial nécessite une configuration de détection en **mode comptage**. Nous ne chercherons pas à utiliser les données de ces instruments pour caractériser la composition chimique des constituants atmosphériques, mais plutôt pour caractériser leurs propriétés optiques à l'échelle globale. Nous nous limiterons donc dans la suite de ce mémoire à ce type de lidar.

1.2.2 Propriétés optiques des diffuseurs

L'étude de l'atmosphère par instrumentation lidar nécessite un minimum de connaissance sur les propriétés optiques des nuages et des aérosols, et donc sur leurs propriétés de diffusion. Nous essaierons brièvement dans ce paragraphe de décrire le principe de l'interaction entre le laser et l'atmosphère.

Lors de la propagation de l'onde émise par le laser, on peut envisager deux types de diffusions par les composants atmosphériques rencontrés.

- Une diffusion **élastique** qui se produit sans échange d'énergie entre les photons incidents et la molécule rencontrée. Le photon est alors diffusé sans changement de fréquence. C'est le cas de la diffusion de **Rayleigh** (lorsque la taille du diffuseur est largement inférieure à la longueur d'onde utilisée) ou de celle de **Mie** (lorsque la taille du diffuseur est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde utilisée).
- Une première diffusion **inélastique** : la diffusion **Raman**. Dans moins d'1% des cas, lorsque qu'un photon rencontre une molécule, ce dernier peut alors être absorbé par la molécule.

L'énergie du photon alors diffusée correspond aux nombreuses vibrations et/ou rotations de la molécule. On observe alors un décalage de la fréquence de l'onde incidente ν_0 . Les photons sont alors diffusés selon 2 fréquences : $\nu_0 + \nu_r$ (décalage vers les hautes fréquences correspondant aux raies anti-Stokes) et $\nu_0 - \nu_r$ (décalage vers les basses fréquences correspondant aux raies Stokes). Ce décalage de fréquence est caractéristique de la molécule rencontrée et permet donc de la discriminer.

-Une seconde diffusion **inélastique** : la **fluorescence** : Une fois l'énergie du photon absorbée par une molécule ou un atome, ces derniers se retrouvent alors dans un état électroniquement excité. Le retour à l'état fondamental peut alors se faire de différentes manières. Le photon réémis par la molécule ou l'atome excité peut être de même longueur d'onde que la longueur d'onde d'excitation (fluorescence de résonance), qui montre peu d'intérêt. Cependant la dé-excitation peut aussi se faire en effectuant une ou plusieurs transitions vers des états d'énergie plus faible que l'état électronique excité, mais plus grand que l'état d'énergie fondamental. La molécule ou l'atome émet alors un photon de plus faible énergie, correspondant à la différence d'énergie entre l'état excité et les états électroniques intermédiaires.

Les lidar utilisés dans le cadre de cette thèse émettent aux longueurs d'ondes de 532 nm et de 1064 nm. Pour ces longueurs d'ondes, seule la diffusion élastique sera considérée, ces longueurs d'ondes ne correspondant à aucune raie d'absorption d'un des constituants de l'atmosphère. En conséquence, les seuls processus à prendre en compte sont la diffusion par les aérosols et par les molécules.

Sans interactions multiples, la diffusion par les particules (supposées sphériques et de rayon r) est décrite par la diffusion de Mie. Celle-ci permet le calcul des facteurs d'efficacité de diffusion (Q_d), d'absorption (Q_a), et d'extinction (Q_e). Ces facteurs sont fonctions de l'indice de réfraction m de la particule, ainsi que du paramètre de taille k_r , ou k est le vecteur d'onde.

En l'absence de diffusion multiple, l'intensité résultante de la traversée par une onde lumineuse d'un volume contenant des particules atmosphériques sur une distance d est donnée par la loi de Beer Lambert :

$$I = I_0 \exp(-\alpha d) \quad (1.1)$$

ou α est le coefficient d'extinction, résultant de la somme des contributions dues à l'extinction et l'absorption. On appelle la transmission, $T(r,\lambda)$, le rapport I/I_0 .

Comme les particules sont distribuées aléatoirement dans l'espace, les phases des ondes réémises par les différentes particules ne présentent pas de relation de cohérence. Par conséquent l'intensité diffusée est la somme des intensités individuelles. Il faut alors pondérer les facteurs d'efficacité $Q_{d,a,e}$ par une fonction de distribution $\rho_p(r)$ des particules (p) et $\rho_m(r)$ des molécules (m) pour calculer le coefficient d'extinction $\alpha_{p,m}$ lié à la surface élémentaire de chaque particule (molécule). On peut alors poser le coefficient d'extinction :

$$\alpha_{p,m} = \pi \int_0^{\pi} r^2 \cdot Q_e(k_r, m) \cdot \rho_{p,m}(r) \cdot dr \quad (1.2)$$

Dans le cas de la télédétection par une source lidar, le signal analysé est dû à la rétrodiffusion, on définit alors le coefficient de rétrodiffusion :

$$\beta_{p,m} = \pi \int_0^{\pi} r^2 \cdot Q_r(k_r, m) \cdot \rho_{p,m}(r) \cdot dr \quad (1.3)$$

Un autre paramètre important pour la restitution des propriétés optiques des diffuseurs est le rapport k entre l'extinction et la rétrodiffusion :

$$k_{p,m} = \frac{\alpha_{p,m}}{\beta_{p,m}} \quad (1.4)$$

Il est égal à la fonction de phase normalisée à 4π sr de la diffusion pour un angle $\varphi=\pi$. Le coefficient moléculaire k_m vaut $3/8\pi$ (Measures, 1984), et pour les particules, k_p dépend du type de l'aérosol.

On peut désormais écrire le coefficient de rétrodiffusion volumique, $\beta(r,\lambda)$, le coefficient d'extinction volumique, $\alpha(r,\lambda)$, et la transmission, $T(r,\lambda)$ comme les résultantes des contributions moléculaires et particulaires :

$$\beta(r) = \beta_m(r) + \beta_p(r) \quad (1.5)$$

$$\alpha(r) = \alpha_m(r) + \alpha_p(r) \quad (1.6)$$

$$T(r) = T_m(r).T_p(r) \quad (1.7)$$

Les mesures lidar sont affectées par la présence de diffusion multiple. Nous reviendrons sur ce point dans une prochaine section, mais nous supposerons que le coefficient de diffusion reste inchangé et que seule la transmission l'est. Nous noterons α_a la valeur apparente de l'extinction α_p . Nous pouvons alors écrire que $\alpha_a = v \alpha_p$, où v est le paramètre de diffusion multiple ($v < 1$) défini par Platt ([Platt, 1973]).

1.2.3 L'équation lidar

L'équation lidar permet de définir la puissance rétrodiffusée en fonction des paramètres du système et de la diffusion de l'atmosphère. La puissance instantanée reçue par le détecteur peut s'écrire de façon analytique comme la double convolution de la puissance émise par la réponse atmosphérique, elle-même convoluée par la réponse du système électronique de détection.

Ayant le souci didactique de bien faire comprendre chaque terme de cette équation, nous en proposons une construction « pas à pas » dans la suite de cette section.

Supposons donc que nous ayons une source laser émettant un faisceau très étroit, ayant un angle de divergence ϕ , et illuminant un faible volume, $dV = A_t dr$, avec A_t (t pour target) correspondant à la surface de la cible (voir la **Figure 1.2.2**). Le volume dV contient n particules par unité de volume, et chaque particule diffusante ayant une section efficace différentielle $d\sigma/d\Omega$:

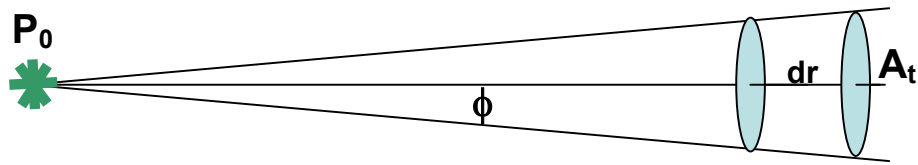


Figure 1.2.2 : Angle solide correspondant au faisceau lidar

La puissance illuminant chaque diffusant est donc :

$$P_I(\lambda, r) = \iint_{d\lambda dV} I(\lambda, r, \rho) n \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\theta} dV d\lambda \quad (1.8)$$

ou P_I est la puissance atteignant chacun des diffusants, et \mathbf{I} est l'intensité rayonnée en $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\text{nm}^{-1}$. Pour un laser, $I(\lambda) = I_0.\delta(\lambda - \lambda_0)$ ou λ_0 est la longueur d'onde d'émission du laser.

Nous pouvons aussi définir le coefficient différentiel de diffusion volumique $\beta_{\theta} = n d\sigma / d\Omega$, ou l'angle θ est fixé à π pour un lidar rétrodiffusion.

Notre volume est $dV = A_t dr$ et, constatant que $I(\lambda, r, \rho) A_t d\Omega = \mathbf{P}_0$, nous pouvons écrire la puissance incidente sur la cible comme étant :

$$P_I(\lambda, r) = \int_{dr} P(\lambda_0, r) e^{-\int_0^r \alpha(r') dr'} \beta_{\pi} dr \quad (1.9)$$

ou $\alpha(r)$ est le coefficient d'extinction volumique sur le parcours jusqu'à la cible (l'intégrale correspondant à la transmission jusqu'à la cible).

Nous savons que le temps mis par la lumière pour atteindre la cible et revenir est de $2r = ct$ et que pour un volume de taille supérieure à la durée d'émission de l'impulsion laser $\tau_L \leq \Delta t$, nous pouvons écrire :

$$P_l(\lambda, r) = \int_{\frac{ct}{2}}^{\frac{c(t+\Delta t)}{2}} P(\lambda_0, r) e^{-\int_0^r \alpha(r') dr'} \beta_\pi dr \quad (1.10)$$

En supposant que β est constant sur cette petite intervalle de temps, nous avons alors :

$$P_l(\lambda, r) = P(\lambda_0, r) e^{-\int_0^r \alpha(r') dr'} \beta_\pi \frac{c\Delta t}{2} \quad (1.11)$$

Nous cherchons maintenant à mettre en équation l'énergie retournée vers le télescope.

En posant A_0 , l'ouverture du télescope, l'angle solide de réception est donc égal à $d\Omega = A_0/r^2$,

et nous pouvons poser :

$$P_r(\lambda, r) = P(\lambda_0, r) e^{-2\int_0^r \alpha(r') dr'} \beta_\pi \frac{c\Delta t}{2} \frac{A_0}{r^2} \quad (1.12)$$

Les autres éléments rentrant en compte dans le bilan de transmission sont :

- La Transmission T_i , correspondant à la traversée des éléments optiques de réception, ainsi qu'à l'effet de fenêtrage introduit par le détecteur.
- Nous ne mesurons pas directement à partir du détecteur une puissance, mais une tension, et nous devons par conséquent introduire une notion de gain de détection électronique $V_r = G \cdot P_r$.

Nous obtenons finalement l'équation :

$$P(r) = \frac{C}{r^2} \cdot F(r) \beta_\pi(r) \cdot e^{-2\int_0^r \alpha(r') dr'} + P_b(r) + P_d(r) \quad (1.13)$$

ou :

- C est la constante d'étalonnage du système expérimental. La constante C inclut la surface A_t du télescope, la transmission du système optique T_s (comprenant l'efficacité de l'optique de réception (η_0) ainsi que celle du filtre (η_f)), le rendement quantique du détecteur (η_d), le gain G du détecteur, et l'énergie par impulsion du laser E_0 .

$$C = A_t T_s \eta_d G E_0 \frac{c}{2} = A_t \eta_0 \eta_f \eta_d G E_0 \frac{c}{2} \quad (1.14)$$

- $F(r)$ est la fonction de recouvrement du système, ou fonction de transfert optique, associée au recouvrement entre le faisceau émis et le champ de vue de détection.
- P_b est la puissance de bruit due à la luminance du ciel

- P_d est la puissance de bruit résultant des bruits de la chaîne de détection (courant d'obscurité, «dark current ») et de la mise en forme du signal.

Pour analyser les propriétés atmosphériques, on considère habituellement le signal corrigé du bruit, du facteur de recouvrement et de l'angle solide de diffusion. On obtient alors l'équation générale lidar (voir Measure, 1984):

$$S(r) = \frac{r^2}{F(r)} (P(r) - P_b(r)) = C\beta_\pi(r) \exp\left[-2\int_0^r \alpha(r') dr'\right] \quad (1.15)$$

A la simple analyse de cette équation, nous nous rendons compte que le calcul des deux inconnues β_π et α à partir de $S(r)$, en d'autre terme l'inversion de cette équation, n'est pas aisée, car nous sommes alors en présence d'un système sous déterminé (une équation et deux inconnues). De plus, β_π et α sont fonction de l'altitude z et de la composition atmosphérique (moléculaire et aérosols).

1.2.3.1 Analyse du facteur de calibration C en mode comptage

Comme précisé précédemment, l'utilisation d'un instrument lidar à bord d'un système spatial sous entend un faible flux de photon acquit par le système de détection. L'avantage d'une détection en comptage de photon par rapport à une acquisition en analogique, est d'offrir une meilleure efficacité quantique, d'être généralement plus précis, et de ne poser que peu de problèmes d'acquisition pour des signaux de très faibles niveaux. Le mode comptage du nombre de photons est par conséquent le mode le plus couramment utilisé par de tels systèmes satellites.

Le détecteur utilisé peut soit être un photomultiplicateur à tube (PMT) ou une diode à avalanche en mode Geiger (APDG). Pour les missions GLAS, LITE et CALIPSO, les détecteurs utilisés à 532 nm (et à 355nm pour LITE) sont des détecteurs PMT, alors qu'à 1064 nm les détecteurs sont constitués par des photodiodes à avalanche silicone.

La raison en est que la voie à 532 nm est généralement la voie sur laquelle la détection des cirrus, des couches aérosols et de la couche limite planétaire (CLP, en anglais « Planetary Boundary Layer », PBL) est la meilleure. La différence entre le faible nombre de photons rétrodiffusés par une couche d'aérosols, et le grand nombre de photons rétrodiffusés par un nuage nécessite par conséquent une grande dynamique de comptage sur cette voie. On utilise alors pour cette voie une batterie de PMT (8 PMT dans le cas de GLAS par exemple). On bénéficie en outre par ce moyen d'une efficacité quantique raisonnable, associée à un très faible bruit de courant. On augmente de plus la redondance entre les détecteurs dans le cas éventuel du dysfonctionnement d'un ou de plusieurs détecteurs.

Malgré cette très large dynamique du PMT, nous observerons, dans les cas des nuages denses, une saturation du signal à 532 nm. Bien que la réponse du détecteur ne soit alors plus linéaire, la mesure de l'altitude du sommet des nuages restera cependant encore possible.

La sensibilité à 1064 nm est pour sa part limitée par le bruit de détection inhérent à cette voie. Une mesure bien moins fine que celle effectuée à 532 nm sera donc effectuée. Une APD (Avalanche Photo Diode) unique est utilisée, montrant généralement une bande passante bien plus importante qu'à 532 nm (0.1 nm à 1064nm pour 30 picomètres à 532 nm pour la mission GLAS), ainsi qu'un champ de vue (FOV, Field of View) plus large (475 μ m à 1064nm pour 150 μ m pour la mission GLAS).

Cette voie à 1064nm fournit cependant un rapport signal à bruit suffisant pour faire la mesure des nuages optiquement denses, et pourra alors être directement utilisée dans le but d'estimer quelle aurait été la forme des signaux saturés à 532 nm.

- Dans le cas d'un PMT, la constante de calibration est donnée par :

$$C = gE_0 A_i T_s \lambda q / 2h \quad (1.16)$$

ou λ est la longueur d'onde, q est la probabilité de détection photonique ou l'efficacité quantique, et h est la constante de Planck, et g est le gain en tension du préamplificateur du détecteur.

- Dans le cas d'un APD, la constante de calibration est donnée par :

$$C = E_0 A_i T_s c r g_v / 2 \quad (1.17)$$

ou r est la réponse du détecteur en Ampère/watt, et g_v est le gain en tension du préamplificateur du détecteur.

1.2.3.2 Analyse de la luminance atmosphérique en mode comptage

Le signal réellement enregistré par les détecteurs prend en compte les photons issus de la luminance atmosphérique qui peut représenter une source non négligeable de bruit. Les contributions à cette luminance sont de 2 origines :

- Le rayonnement solaire diffusé par les constituants de l'atmosphère ou la surface
- Le rayonnement propre du système Terre-atmosphère.

Il faut noter que la luminance atmosphérique peut varier de plusieurs ordres de grandeur en fonction de la luminosité solaire et de la couverture nuageuse. De jour, elle varie de $0.1 \text{ Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}\text{sr}^{-1}$ en ciel clair à $1 \text{ Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}\text{sr}^{-1}$ en ciel nuageux, alors que de nuit, elle prend des valeurs de l'ordre de $0.1 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{nm}^{-1}\text{sr}^{-1}$ mais augmente de deux ordres de grandeur pour une période de pleine lune ([Chazette, 1990]).

En mode comptage, le signal de radiance en terme de nombre de photons dû à la luminance du ciel s'écrit :

$$n_b = AT_s I_b \Omega \Delta f / hc \quad (1.18)$$

ou I_b est la radiance du ciel, Ω est l'angle solide du récepteur et Δf est la bande passante du récepteur (largeur de la transmission à mi-hauteur du filtre) et h la constante de Planck ($6.62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}^{-1}$).

1.2.3.3 Le rapport signal sur bruit (RSB) en mode comptage pour un PM

Le bruit d'obscurité d'un PM correspond aux photoélectrons d'obscurité qui seraient détectés avec une énergie du même ordre de grandeur que le seuil énergétique du système de comptage. Il est très faible, inférieur à 100 photoélectrons par seconde à 25°C. Le seul bruit à retenir est alors le bruit de grenaille. Il est maintenant nécessaire d'introduire le nombre de tirs lidars p , effectués pendant la mesure pour définir le rapport signal sur bruit. Puisque la puissance détectée est directement proportionnelle au nombre de photons détectés, nous travaillerons avec cette dernière grandeur.

Le signal délivré par le détecteur suit une distribution statistique de Poisson. Cette loi statistique caractérise la photoémission des électrons par la photocathode. Le bruit, défini alors par l'écart type de la distribution s'écrit alors :

$$\sigma(r) = \frac{\sqrt{n(r) + n_b}}{\sqrt{p}} \quad (1.19)$$

avec $n(r)$ le nombre de photons rétrodiffusés hors influence de la luminance atmosphérique (le fond de ciel).

Le rapport signal sur bruit, noté RSB, est alors donné par :

$$RSB(r) = \sqrt{p} \frac{n(r)}{\sqrt{n(r) + n_b}} \quad (1.20)$$

Les RSB est directement proportionnel à la racine du nombre de tirs. Il sera d'autant meilleur que le filtre sera de bande étroite, le champ d'ouverture étroit aussi et le nombre de tirs grand. Un compromis est donc à trouver entre ces trois grandeurs afin d'obtenir un RSB optimum.

Les mesures de jour et de nuit doivent être traitées différemment en ce qui concerne le RSB. En effet, lors d'une détection de nuit :

$$n_b \ll n(r) \text{ donc } RSB(r) \approx \sqrt{pn(r)} \quad (1.21)$$

Le nombre de photons rétrodiffusés est proportionnel à l'énergie émise E_0 , d'où en utilisant les égalités $P_0 = f_t E_0$ et $p = f_t \Delta t'$ avec f_t la fréquence de tir pour accumuler p tirs :

$$RSB(r) \approx \sqrt{\Delta t' P_0} \quad (1.22)$$

De jour, par contre, le fond de ciel est prépondérant dans le bruit :

$$n_b \gg n(r) \text{ donc } RSB(r) \approx \sqrt{p} \frac{n(r)}{\sqrt{n_b}} \quad (1.23)$$

Ce qui peut encore s'écrire :

$$RSB(r) \approx \frac{1}{\sqrt{n_b}} E_0 \sqrt{\Delta t'} \sqrt{f_t} \quad (1.24)$$

Si nous considérons une durée de mesure et une puissance d'émission fixées, nous constatons en comparant les relations du RSB de jour et de nuit que :

- de nuit, le RSB dépend indifféremment de l'énergie E_0 ou de la puissance d'émission P_0 et pour une puissance P_0 donnée on peut donc diminuer E_0 en augmentant la fréquence de tir.
- de jour, pour une puissance P_0 donnée, le RSB diminue comme la racine carrée de la fréquence de tir. Par contre, il augmente comme l'énergie d'émission E_0 à cadence donnée. Il est préférable de travailler avec une énergie émise par impulsion laser élevée.

1.3 Historique du lidar spatial

Dès les premiers balbutiements de cette technologie dans le début des années 60, le lidar a toujours eu une vocation intrinsèquement reliée au spatial.

L'étincelle ayant donné la naissance à la technologie lidar est constituée par la construction par Ted Maiman en 1960, du premier laser pulsé à haute énergie (Laser à rubis).

L'intérêt de cette découverte a rapidement été compris, et dans un délai record de deux années, la première démonstration d'un radar laser, alors nommé radar optique a été effectuée par

Ligda au Stanford Research Institute. Dans le cadre du projet « Project Luna See »²⁵, Giorgio Fiocco et L.D. Smullin, obtinrent les premiers échos lidar de la surface lunaire, pendant 3 nuits de mai 1962 (voir la

Figure 1.3.1). La nouvelle a rapidement eu un grand écho dans la littérature scientifique (Smullin and Fiocco, 1962), et non scientifique (première page du New York Time le 11 mai 1962). L'année suivante, Giorgio Fiocco, de l'Université de Rome publiait les premiers profils lidar.

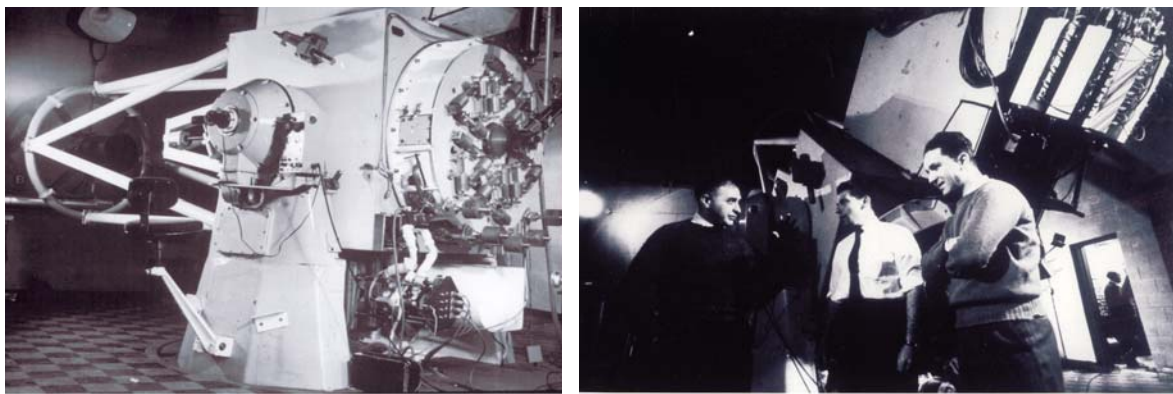


Figure 1.3.1 : Photographie de gauche : premier lidar ayant permis d'obtenir les échos de surface lunaire en mai 1962. Photographie de droite : Les pères du premier lidar en 1962 (de gauche à droite L.D SMullin, S. Kass et G. Fiocco).

Le développement du lidar a, et on le voit bien, profité de l'existence de l'énorme travail de théorisation du signal déjà effectué par la communauté radariste, pendant et à la suite de la seconde guerre mondiale. Ce fait explique le peu de temps ayant été nécessaire à la construction du premier lidar dès lors que la technologie laser était née, et la très grande vitesse à laquelle elle a pu être intégrée au sein des missions spatiales.

²⁵ Aussi appelé ironiquement à l'époque « lunacy project », ce qui montre le peu d'espoir qui était apporté à la faisabilité de ce projet.

1962: Premiers echo de surface lidar (Ligda, Fiocco)
1964: Collis and Ligda Nature 203, 508 papier sur la turbidité de la troposphère
1964: Schotland propose le lidar DIAL (Differential Absorption Lidar)
1964: Premier celomètre laser (Andermo)
1964: Observations de Fiocco et Grams sur les aerosols stratospheriques
1964: Schotland mesure la vapeur d'eau dans l'atmosphère en utilisant un DIAL
1965: Premières observations de Collis sur la structure nuageuse
1969: Melfi, Lawrence et McCormick mesure la vapeur d'eau atmosphérique avec un lidar Raman
1971: Schotland et Sassen montre la dépolarisation dans les nuages
1972: Uthe BAMS 53, 358 étude sur l'évolution de la couche limite
1972: Lawrence et al. propose un lidar Doppler CO ₂ pour la mesure du vent
1973: Pal et Carswell mesure l'épaisseur optique des nuages
1974: Platt, étude sur la microphysique nuageuse
1975: Uthe et Allen , étude des cirrus.
1975: McCormick et Fulle, étude des aérosols Volcaniques
1976: Résumé dans Applied Physics 14 "Laser Monitoring of the Atmosphere". ed. Ed Hinckley published. pp 372 : "what is known about lidar".
1977: Hoff obtient ses premiers profiles lidar avec un lidar à rubis AES.
1977: Biomation fournis le premier digitaliseur à 8 bit 100 MHz pour ordinateur PDP-11.

Table 1.1 : Développement du lidar au cours des années 1960-1980

La vitesse de développement de cette technologie (cf. la **Table 1.1**) a cependant été freinée au cours des années 70, par l'inexistence de système d'acquisition informatique capable à cette époque de faire l'acquisition de signaux à haute fréquence. Cette lacune ne sera compensée qu'à partir de 1977.

Cependant, l'acquisition et le traitement des données lidar nécessitent des coûts en calcul, de la place en mémoire, des capacités de stockage, des vitesses de connectiques,... qui n'étaient pas disponibles à cette époque (voir la **Figure 1.3.2**). Il aura fallu attendre réellement le milieu des années 1980 pour effectuer des opérations d'acquisition en temps réel, et bien plus tard pour gérer les flux de données qui étaient générées.²⁶

²⁶ A titre de comparaison, on peut se reposer sur la pseudo loi de Moore [Moore, 1965], qui énonce le doublement des capacités des instruments informatiques tous les 18 mois. Pour anecdote, les 40 Go constituant l'ensemble des données LITE telles que fournies par la NASA en 1994, ne pouvaient pas être traitées par un ordinateur standard présent dans un laboratoire lambda de cette époque. Pour information :

Au moment de l'écriture de ce manuscrit (2006), nous voyons la sortie de l'Intel® Core® 2 Extreme QX6700, offrant le nombre de 2×291.10^6 transistors. Nous avons par conséquent aujourd'hui des ordinateurs qui sont environ 180 fois plus puissants que ceux utilisés en 1994 (Ex.: Intel®Pentium®, $3,1.10^6$ transistors), ce qui réduit d'autant les temps de calculs nécessaires.

Le laboratoire du SA possédait en 1994 une taille de disque totale de 70Go (Serveur Eole, HP 740/256 Mo), soit à peine plus que la taille de la base LITE. Et ceci réparti sur plus d'une centaine d'utilisateurs. Aujourd'hui, cette taille est d'environ 10To, soit 140 fois plus importante qu'en 1994. J'estime à 300Go la taille totale qu'il m'a été nécessaire lors du traitement des données LITE pour effectuer mes analyses, soit 7.5 fois la taille de la base de données initiales.

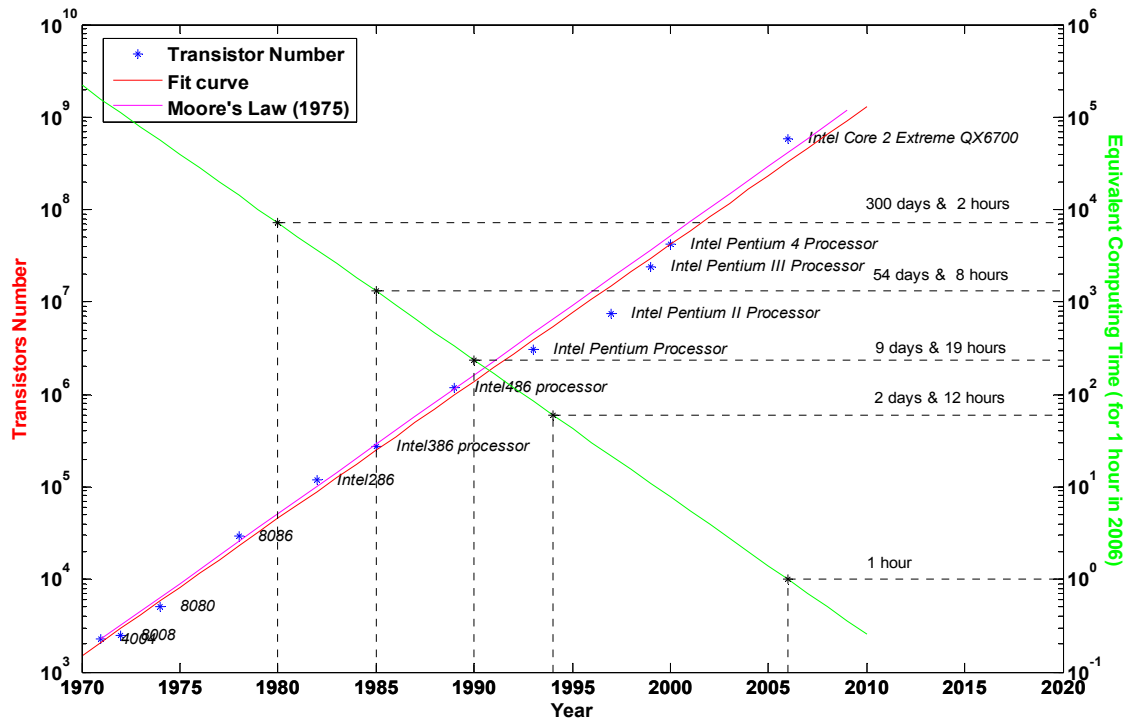


Figure 1.3.2 : Evolution des performances informatiques entre 1970 et 2006, en nombre de Transistors. La régression linéaire correspondante à cette évolution (en magenta), ainsi que la loi de Moore de 1975 (en rouge) sont données pour comparaison. Les temps équivalents de calculs rapportés au temps de calculs de 2006 sont donnés par la ligne verte.

Au fur et à mesure des améliorations technologiques apportées dans sa conception, le lidar été perçu par la communauté scientifique comme un outil de télédétection exceptionnel, et a par conséquent été rapidement intégré afin de répondre à diverses questions scientifiques et à diverses applications technologiques nécessitant une finesse de mesure jusqu'à maintenant inégalée.

On peut citer, et ceci de façon non exhaustive parmi les applications actuelles :

- La Météorologie (mesures dynamiques des températures, vents, ondes, ozone, pollution, etc.)
- L'Astronomie (optique adaptative, cartographie planétaire)
- La Topographie (surveillance de l'érosion)
- L'Océanographie (bathymétrie, zones de pêche)
- L'Ecologie (mesure au sol et sur la canopée)

- La Construction civile et l'aéronautique (mesure du stress des structures, manoeuvres des avions près des aéroports)
- La Sécurité civile (mesure des excès de vitesses sur la route, sécurité portuaire, lutte anti-terroriste).

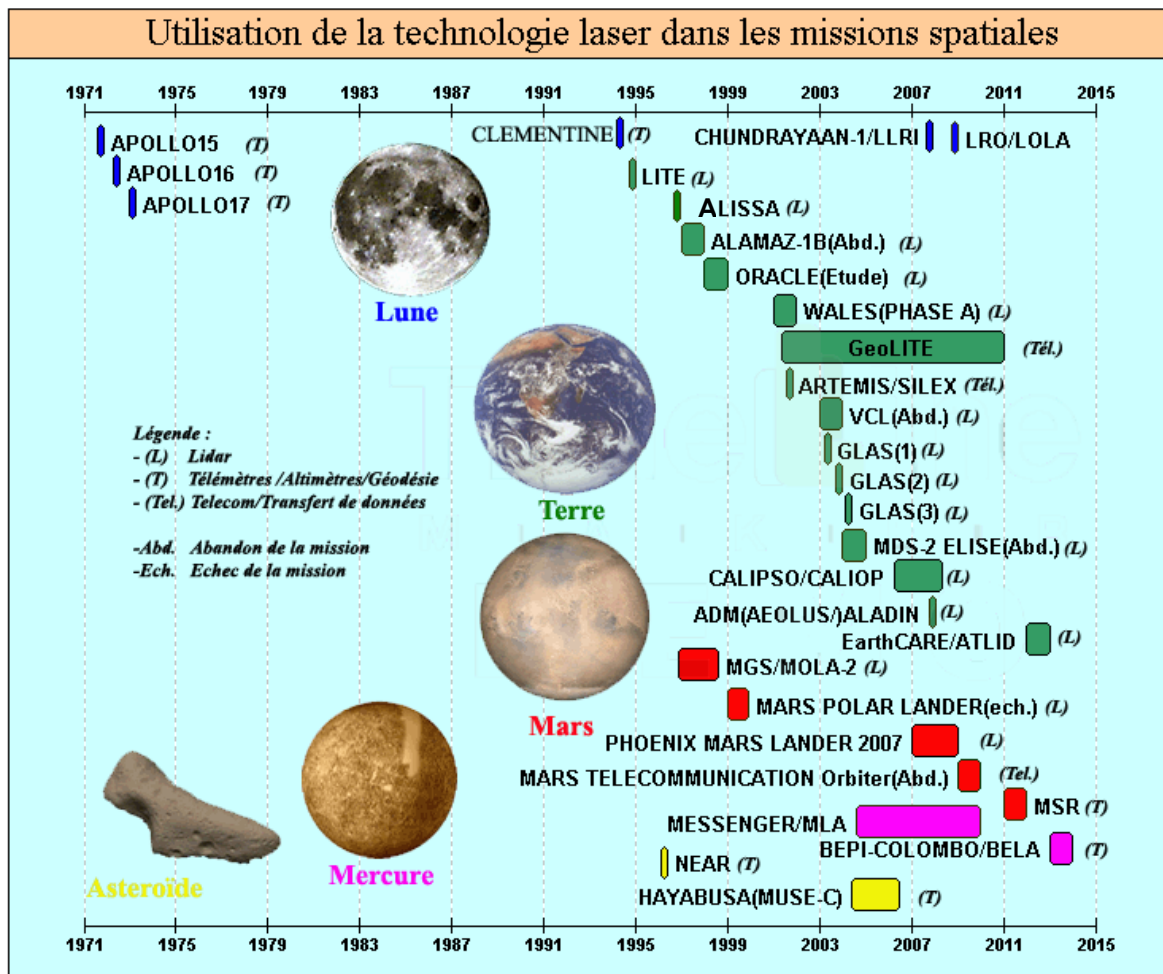


Figure 1.3.3 : Planification des missions spatiales mettant en jeu l'utilisation de la technologie laser. Pour chacune de ces missions, la couleur utilisée caractérise l'astre auquel la mission est rattachée. La fonction principale de l'instrument (lidar, télémètre, télécommunication) a été reportée pour chacune de ces missions. Les missions qui ont connu un échec ou qui ont été abandonnées avant lancement sont aussi reportées.

Les années 1980 voient donc la multiplication du nombre de stations sols comprenant des lidars. Cette augmentation du nombre de stations amènera dans le début des années 1990 au

regroupement de certaines stations en réseau, permettant un élargissement de cette analyse à des échelles continentales. On recense principalement les réseaux (voir la **Figure 1.3.4**):

- EARLINET²⁷ (Europe),
- ARM²⁸ (Etats-Unis, Alaska et Nouvelle-Guinée),
- ADN²⁹ (Chine, Japon, Corée),
- Cis Linet (Russie).
- NDSC (Etats-Unis, Canada, NZ, UK, EU, Russie, Japon), aussi appelé NDACC³⁰
- MPLNET (NASA Micro-Pulse Lidar Network) : colocalisation des lidars avec les sites AERONET.

Dans le but d'apporter une couverture plus globale des structures nuageuses et aérosols, l'export de cette technologie vers le spatial est dès lors envisagé.

L'instrument lidar est dans un premier temps intégré à bord d'avions, ce qui permet de tester cette technologie avec les contraintes inhérentes à des conditions de vol, c'est-à-dire les vibrations, les restrictions de volume et de poids, l'alimentation, etc. Cette étape essentielle, offre en outre l'intérêt d'analyser de la structure nuageuse à méso-échelle. Ces analyses ont par la suite été comparées et validées avec celles obtenues à partir de stations sols.

En parallèle, deux utilisations du lidar ayant déjà été validées « au sol » (sur terre) vont successivement être exportées vers le spatial (voir la **Figure 1.3.3**):

- Le lidar vu comme outil de **Téléométrie/Altimétrie/Géodésie** : Cette première utilisation a permis de faire les premières études géodésiques lunaires, à bord des missions Apollo 15 (juillet 1971) ,16 et 17 (avril et décembre 1972), et à bord de la mission Clémentine en 1994. Cette emploi du lidar a, entre autre, par la suite, été utilisé pour faire l'analyse de la géodésie de la terre elle-même (Mission GLAS en

²⁷ EARLINET : European Aerosol Research Lidar Network

²⁸ ARM : Atmospheric Radiation Measurement Program

²⁹ ADN : Asian Dust Network

³⁰ NDACC : Network for the Detection of Atmospheric Composition Change

2003, analyse de la hauteur de la calotte glaciaire), ainsi que l'analyse et l'approche d'astéroïdes dans le cadre des missions NEAR (1996) et mission HAYABUSA(ex MUSE-C) (2003). Les futures missions MSR (2011) et BEPI-COLOMBO (2013) auront pour fonction de retrouver la géodésie des planètes Mars et Mercure.

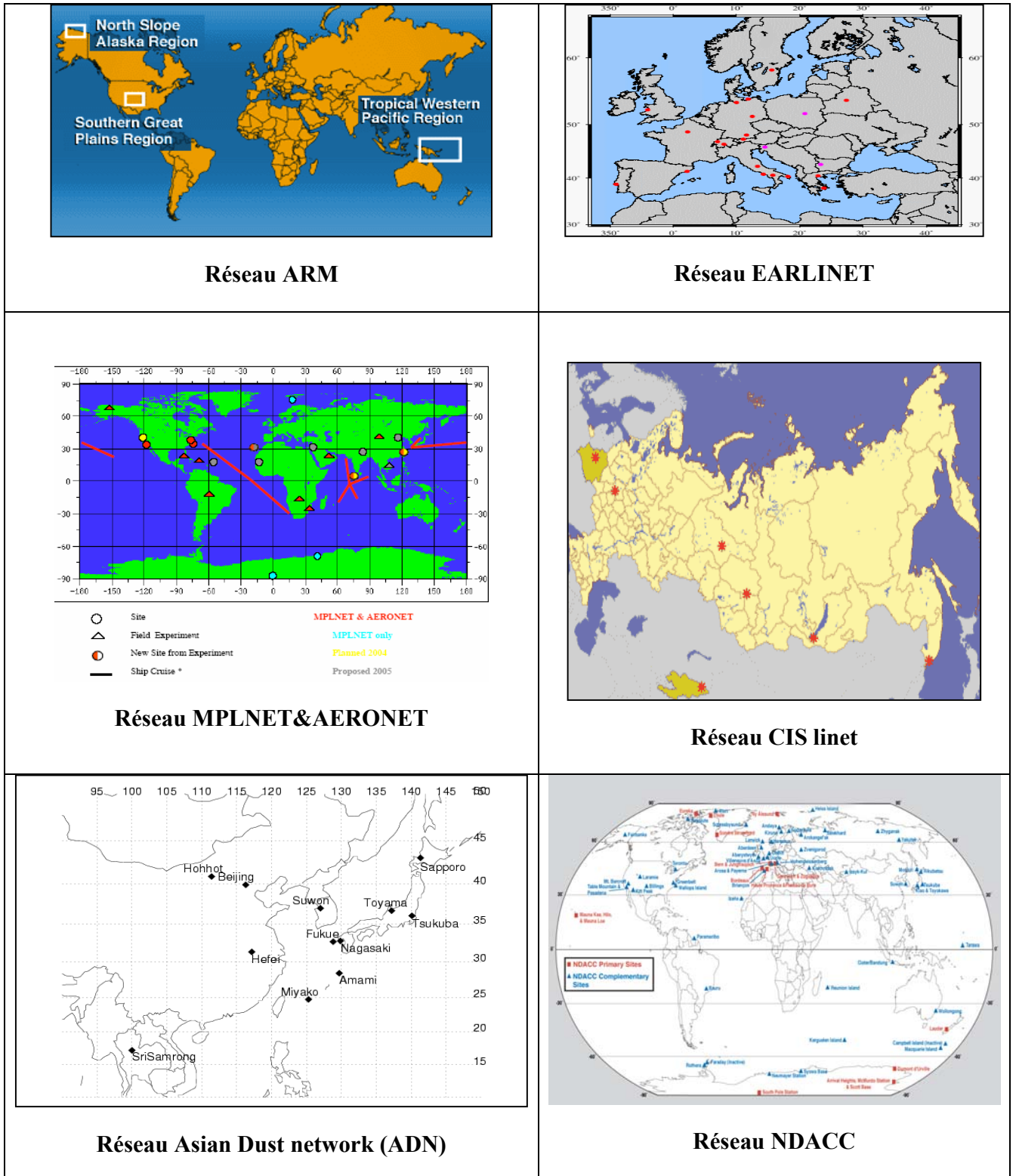


Figure 1.3.4 : Principaux réseaux lidar mondiaux

- Le lidar vu en tant que **profileur atmosphérique** : Cette nouvelle utilisation du lidar, est mise à l'étude dès 1985, et initiée en septembre 1994 par la mission américaine LITE. Embarquée à bord de la navette spatiale Discovery, cette mission a permis de mesurer pendant 10 jours la couverture nuageuse et les couches d'aérosols terrestres. Le succès de cette mission, dont la qualité des données reste encore aujourd'hui, il faut le dire, inégalée, a constitué la démonstration de la possibilité et de l'importance de l'implémentation de cette technologie au sein de stations satellites, permettant d'obtenir une information globale et de longue durée.

La mission franco-russe ALISSA, basée à bord d'un module Pryorda arrimé à la station spatiale MIR, tenta en 1996 de remplir les mêmes objectifs que la mission LITE, mais sans atteindre le succès de son prédécesseur, mettant en relief les difficultés à résoudre quant à l'intégration d'un lidar en mode « autonome » à bord d'un satellite.

La mission américaine GLAS est donc en 2003 la première mission spatiale satellite intégrant un instrument lidar. Cette mission a permis d'obtenir des renseignements sur la climatologie nuageuse sur une plus longue période que celle fournie par mission LITE. Cependant, cette mission a connu des défaillances touchant le fonctionnement de ses lasers, réduisant ainsi la durée de mesures (initialement prévue sur 3 ans) à quelques mois. Afin d'économiser les lasers et augmenter leurs durées de vie, les enregistrements ont donc été répartis sur 4 périodes de mesures entre 2003 et 2004 (voir la **Figure 1.3.3**). La détection des aérosols à partir des données de GLAS a de plus été rendue difficile de par son très faible rapport signal à bruit, empêchant la construction d'une climatologie aérosols complète.

L'aboutissement actuel de l'ensemble de ces développements est constitué par la mission franco-américaine CALIPSO/ Aqua-Train, lancée en avril 2006. Un des objectifs principaux de cette mission est de tirer partie de la synergie possible entre les instruments actifs (lidar, radar) et passifs. Cette synergie nous permettra d'améliorer de façon conséquente notre connaissance de la distribution statistique nuageuse. De plus, la presque simultanéité des mesures entre les détecteurs passifs et

actifs nous permettra d'améliorer l'inversion des données lidar aérosols, ce qui permettra de réduire l'incertitude sur l'impact radiatif de ces derniers.

1.4 Présentation des missions spatiales lidar

Nous présenterons dans cette section les deux missions spatiales LITE et GLAS directement utilisées dans le cadre de la thèse. Nous passons sur les caractéristiques techniques de la mission ALISSA, dont les données, de moindre qualité, n'ont pas été utilisées. Cette étude étant effectuée en vue de la mission CALIPSO, nous donnons à titre indicatif les caractéristiques de l'instrument CALIOP ainsi que ses performances attendues.

1.4.1 La mission LITE

La mission LITE (Lidar In-space Technology Experiment, NASA) a été initiée en 1985 afin de démontrer la faisabilité d'un lidar dans l'espace. Il avait alors été décidé que la démonstration la plus convaincante d'un lidar spatial concernerait les recherches sur l'atmosphère. Afin de répondre à cet objectif, le groupe scientifique LITE SSG (Science Steering Group) a été formé en 1988 afin de définir les performances à atteindre par le développement d'un tel instrument, de guider et planifier les expériences de la mission LITE, et d'exploiter les données scientifiques qui seront fournies par l'instrument.

LITE a volé à bord de la navette spatiale Discovery, au cours de la mission STS-64 de la NASA, entre le 9 Septembre et le 20 septembre 1994 (voir la **Figure 1.4.1**).

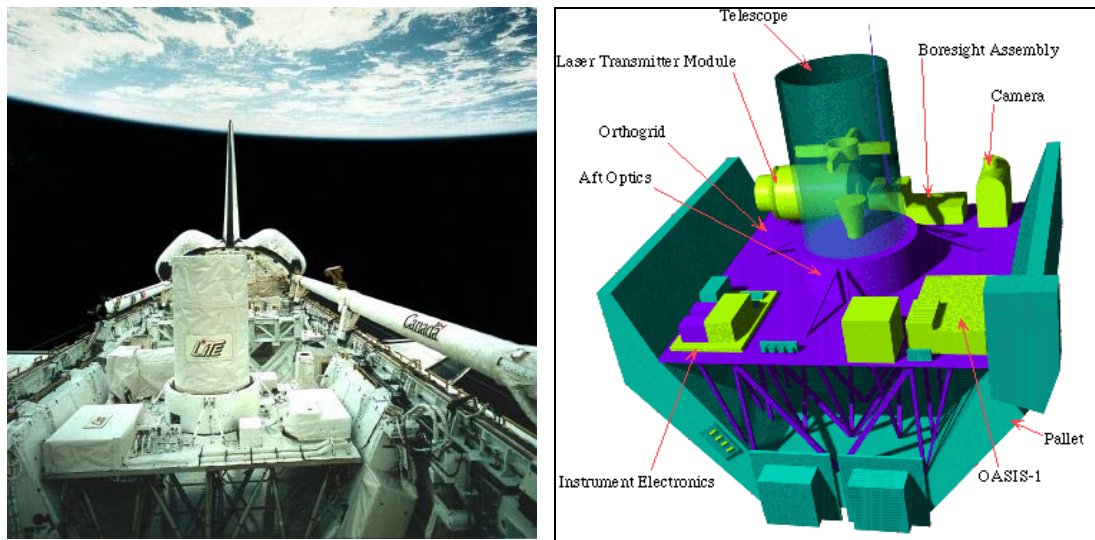


Figure 1.4.1 : *A gauche : Le lidar LITE à bord de navette spatiale de la mission STS-64. A droite : Plan d'installation des divers instruments de la mission LITE sur la palette d'intégration.*

EMISSION	LITE
Laser	Diode-pumped Nd :Yag
Energie d'impulsion	De 380 à 532 mJ à 532 nm, de 400 à 471 mJ à 1064nm
Cadence d'impulsion	10 Hz
Polarisation ? Fréquence ?	non
Divergence nominale du faisceau	à 355 nm, 0.9 mrad (laserA), 1.1 mrad (laser B) à 532 nm, 1.1 mrad (laserA), 1.2 mrad (laser B) à 1064 nm, 1.8 mrad (laserA), 1.8 mrad (laser B)
Diamètre de l'empreinte au sol	280 m
Espacement entre les empreintes	740 m
RECEPTION	
Diamètre du Télescope	1 mètre
Champ de vue (FOV)	3 mrad de nuit /1.1 mrad de jour
Détecteurs	PMT (532 nm + 355 nm) + APD à 1064 nm
Résolution des Données	
Résolution Horizontale	740m
Résolution verticale	15m
Durée de vie	10 jours
Orbitographie	
Altitude	De 260 km à 240 km en fin de mission
Inclinaison	57° Orbite circulaire
Plate-forme	berceau/ palette dans la baie à charge utile de la navette spatiale Discovery

Table 1.2 : Caractéristiques techniques de la mission lidar LITE

Les caractéristiques de la mission LITE sont données dans la **Table 1.2**. L'émetteur de l'instrument LITE consiste en une lampe flash pompée (laser Nd:YA) qui est doublé et triplé en fréquence afin de fournir en sortie des impulsions quasi-simultanées à 1064 nm, 532 nm et 355 nm. Le récepteur est un télescope de 1 mètre de diamètre. Un système de contrôle actif est utilisé afin de maintenir l'alignement entre l'émetteur laser et le récepteur. Une platine rotative à trois ouvertures est située près du point focal du télescope. Une des trois ouvertures peut ainsi être sélectionnée, ou alors un obturateur peut être fermé afin d'empêcher l'entrée de la lumière dans le système optique.

Une partie du signal reçu à 532 nm est focalisée sur un détecteur quatre cadrans qui est utilisé afin de dériver l'erreur sur le signal dû à l'alignement. Un séparateur de faisceau dichroïque est utilisé pour séparer les trois longueurs d'ondes. Les faisceaux correspondant sont alors respectivement dirigés vers trois détecteurs : des tubes photomultiplicateurs (PMT) à 355 et 532 nm, et une photodiode à avalanches à 1064nm

Une description plus détaillée de la mission LITE, ainsi que l'ensemble des données correspondantes sont en libre accès, et accessible sur Internet à l'adresse web <http://www-lite.larc.nasa.gov> .

1.4.2 La mission GLAS

La mission GLAS (Geoscience Laser Altimeter System) (voir la **Figure 1.4.2**) est une mission couverte intégralement par la section ESE (Earth Science Enterprise) de la NASA. GLAS est un instrument qui a été conçu pour mesurer la topographie de la calotte glaciaire et ses évolutions temporelles. L'instrument GLAS Permet mesure aussi les propriétés nuageuses et aérosols.

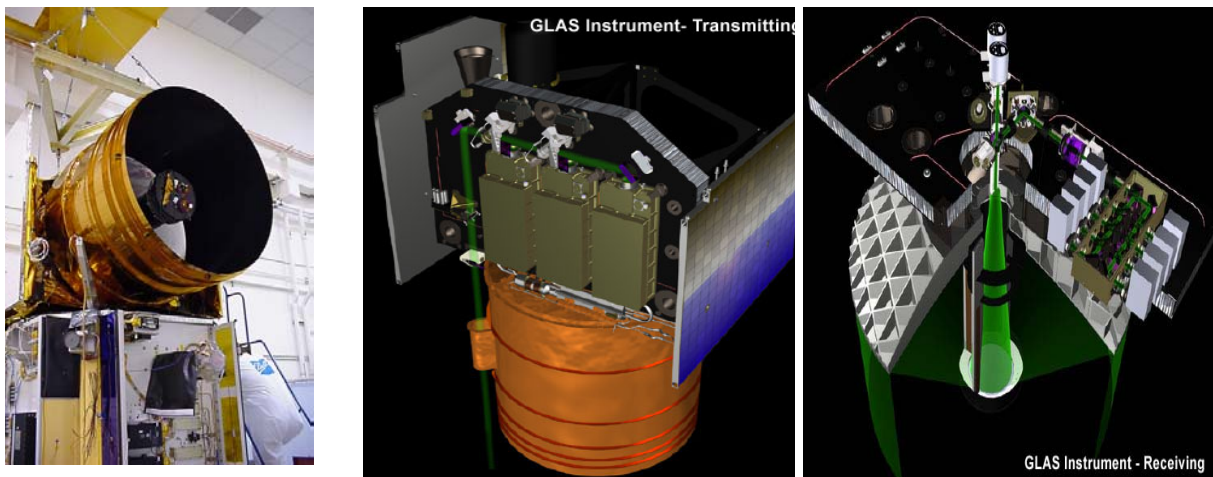


Figure 1.4.2 : *A gauche : Le satellite ICESat en intégration. Au centre et à droite: Vue en coupe du satellite ICESat montrant le lidar GLAS en mode d'émission et en mode de réceptions.*

L'instrument GLAS est porté par le satellite ICESat (the Ice, Cloud and land Elevation Satellite, qui a été mis en orbite le 13 janvier 2003 à partir de la base militaire de l'US Air Force Vandenberg située en Californie.

L'ensemble des observations de l'instrument GLAS s'étend sur les périodes du 12/03/2003 au 20/03/2003, du 25/09/2003 au 18/11/1003, et du 17/02/2004 au 21/03/2004.

Les caractéristiques de la mission GLAS sont données dans la **Table 1.3**. Une diode laser Nd:YAG opérant dans le proche infra rouge (1064 nm) est utilisée pour la mesure de la topographie de surface. La lumière rétrodiffusée à 532 nm est utilisée pour effectuer la mesure des aérosols et des autres caractéristiques de l'atmosphère. Les photons rétrodiffusés sont collectés par un télescope d'un mètre de diamètre, à la cadence de 40 impulsions par seconde. L'empreinte sur la surface terrestre du spot à un diamètre de 70 mètres, et l'espace entre les spots est de 175 mètres. L'altitude de l'orbite est de 600 km, avec une inclinaison de 94°.

La résolution de l'orbitographie en mode mission, est déterminée par une répétitivité du satellite de 183 jours, entraînant une résolution spatiale à l'équateur de 15 km.

Une description plus détaillée de la mission GLAS, ainsi que l'ensemble des données correspondantes sont en libre accès, et accessible sur Internet à l'adresse : <http://nsidc.org/data/icesat/index.html>

EMISSION	GLAS
Laser	Diode-pumped Nd :Yag
Energie d'impulsion	36 mJ/74 mJ (532 nm/1064 nm)
Cadence d'impulsion	40 Hz
Durée de l'impulsion	4 ns
Largeur de bande	30 pm à 532 nm, 800 pm à 1064 nm
Polarisation ? Fréquence ?	Non
Divergence nominale du faisceau	110 μ rad à 532 nm / 110 μ rad à 1064 nm
Diamètre de l'empreinte au sol	70 m
Espacement entre les empreintes	175 m
RECEPTION	
Diamètre du Télescope	95 cm
Champ de vue (FOV)	0.19 mrad à 532 nm / 0.5 mrad à 1064nm
Détecteurs	compteur GAPD à 532 nm, APD à 1064nm
Résolution des Données	
Résolution Horizontale	175 m
Résolution verticale	76.8 m
Durée de vie	3 ans prévu initialement
Orbitographie	
Altitude	590 km
Inclinaison i	94°
Demi Grand Axe a	6970,00 km (mode initial) 6971 ,50 km (mode mission)
Excentricité e	0.0013
Estimation Cycle / Phasage (jour)	16 jours
Résolution à l'équateur sur le cycle de répétitivité	2693,25 km (mode initial) (calcul logiciel Ixions) 2694,00 km (mode mission)
Triplet de Phasage	[15 -22 183] 2723 (mode initial) [15 -1 8] 119 (mode mission)
Nbre de Révolutions / Jours	14.9
Plate-forme	Ball Commercial Platform 2000 (BCP 2000)

Table 1.3 : Caractéristiques techniques de la mission lidar GLAS/ICESat

1.4.3 La mission CALIPSO et L'A-Train

Le satellite Calipso (Cloud-Aerosol Lidar Infrared Pathfinder Satellite Observations), est né d'une coopération entre la NASA, le CNES, l'Institut Pierre-Simon Laplace du CNRS et l'entreprise Alcatel Alenia Space. Il a été développé à partir de la mini plate-forme satellite PROTEUS, conçue par le CNES et Alcatel Space. Les laboratoires français ont participé à la définition des trois instruments embarqués.

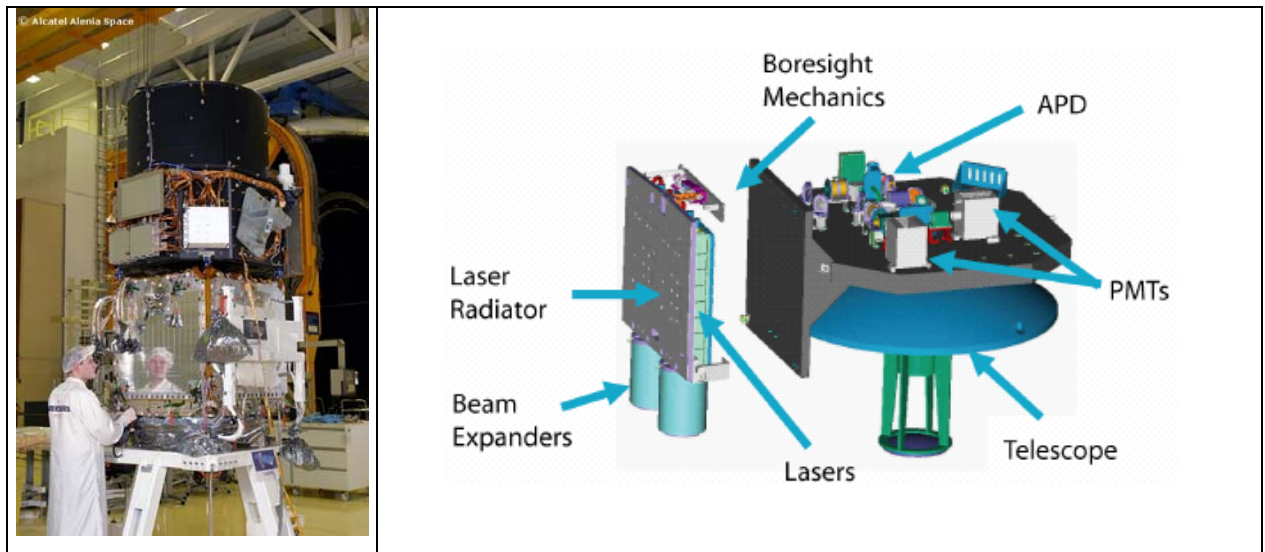


Figure 1.4.3 : *A gauche :* Le satellite CALIPSO en intégration chez ALCATEL à Canne la Bocca ; *A droite :* Transmetteur laser et système de réception de CALIOP.

CALIPSO fournit un jeu de données uniques de profils verticaux de l'atmosphère terrestre mesurés, grâce à son lidar à rétrodiffusion nommé CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization). CALIOP a été conçu par la NASA et la société américaine Ball Aerospace. Une caméra visible (WFC, NASA) et un imageur infrarouge (IIR, CNES) complètent la charge utile de CALIPSO, fournissant le contexte spatial de la mesure acquise par le lidar CALIOP.

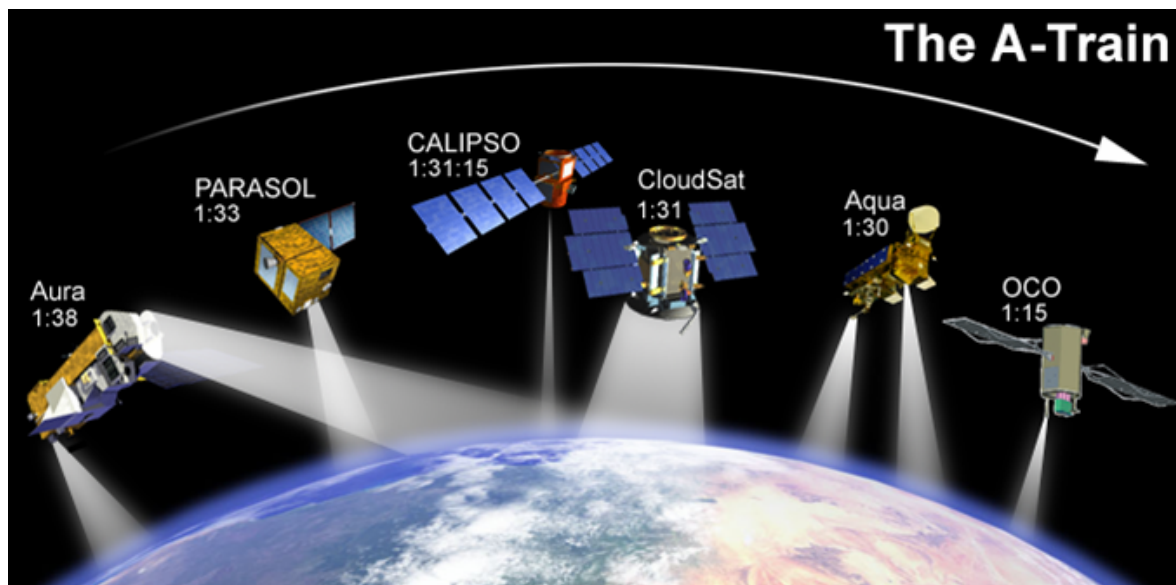


Figure 1.4.4 : Constellation de satellites composant le A-Train

Les satellites CALIPSO et CLOUDSAT (NASA, ASC) ont été tous deux lancés le 28 avril 2006 à partir de la base militaire de Vandenberg (Californie). Ils ont rejoint leurs orbites définitives après deux mois d'opérations courant juillet 2006. Ils rejoignent ainsi trois autres satellites déjà en orbite, Aqua et Aura de la NASA, ainsi que le microsatellite du CNES nommé PARASOL (CNES), formant ainsi une constellation de satellites baptisée A-Train³¹ (voir la **Figure 1.4.4**), qui voleront alors en tandem à seulement 15 secondes d'écart. En 2008, Le satellite OCO (NASA), viendra compléter cette formation. L'A-Train au grand complet constituera alors la première réalisation de ce type de constellations, entièrement dédiée à l'observation de la terre.

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. Il permettra de plus de profiter de la synergie possible entre l'ensemble de ces instruments de télédétection.

L'ensemble des données de l'A-Train alimente le pôle de compétence thématique Icare dédié à l'étude des interactions entre nuages, aérosols, rayonnement et cycle de l'eau. Le centre de traitement et d'archivage d'Icare facilitera l'accès des climatologues aux données spatiales.

La synergie entre les différents capteurs, offrant chacun une mesure quasi simultanée de l'atmosphère sera alors mise en place, et exploitée dans le but d'améliorer notre connaissance de l'atmosphère.

Ces derniers satellites profiteront avantageusement de leur proximité pour permettre l'exploitation de la synergie instrumentale, et en particulier les synergies instrumentales possibles entre Radar/Radiomètre (Cloudsat/Parasol), Lidar/Radiomètre (Calipso/Parasol), et Radar/Lidar (Cloudsat/Calipso).

Un des objectifs principaux de cette mission est de réduire les incertitudes sur notre connaissance de l'impact radiatif des nuages et des aérosols.

³¹ Ces 6 satellites franchiront l'équateur avec quelques minutes d'écart vers 13h 30 heure locale d'où le nom d'« Afternoon Train ou A- Train »

Les principales caractéristiques de l'instrument CALIOP sont fournies en **Table 1.4**.

EMISSION	CALIOP/CALIPSO
Laser	Diode-pumped Nd :Yag
Energie d'impulsion	110mJ 532 nm 110mJ 1064 nm
Cadence d'impulsion	20.16 Hz
Durée de l'impulsion	20nsec
Largeur de bande	30 pm à 532 nm 100 pm à 1064 nm
Polarisation ? Fréquence ?	Oui, à 532nm
Divergence nominale du faisceau	110 à 115 μ rad à 532 nm 130 à 140 μ rad à 1064 nm
Diamètre de l'empreinte au sol	70 m
Espacement entre les empreintes	330m
RECEPTION	
Diamètre du Télescope	1 mètre
Champ de vue (FOV)	130 μ rad
Détecteurs	PMT à 532 nm APD à 1064 nm
Résolution des Données	
Résolution Horizontale	330 m entre -0.5 km et 8.2 km 1 km entre 8.2 km et 20.2 km
Résolution verticale	30 m entre -0.5 km et 8.2 km 60 m entre 8.2 km et 20.2 km
Durée de vie	3 ans
Orbitographie	
Altitude	705 km
Inclinaison i	98.2°
Demi Grand Axe a	7077,739 km
Excentricité e	0.001182
Estimation Cycle / Phasage (jour)	16 jours
Résolution à l'équateur sur le cycle de répétitivité	2751,93 km (calcul Ixions)
Triplet de Phasage	[15 -7 16] 233
Nbre de Révolutions / Jours	14.57
Plate-forme	PROTEUS (ALCATEL)

Table 1.4 : Caractéristiques techniques du lidar CALIOP et de la mission CALIPSO

1.4.4 Le futur : la mission EarthCare

La mission EarthCare (Earth Clouds Aerosols and Radiation Explorer) (voir la **Figure 1.4.5**) est une mission menée par l'agence spatiale européenne (ESA) et le Japon (Japan Aerospace Exploration Agency). Elle a pour principal objectif, de déterminer l'interaction et l'impact des nuages et des aérosols sur le bilan radiatif de la planète. Le but est de fournir une importante base de données à grande échelle, constituée de profils verticaux de nuages et d'aérosols. Toutes ces informations permettront ainsi de valider et d'améliorer les modèles numériques de circulation atmosphérique et de prévision météorologique. Le lancement de cette mission est prévu en 2011. Elle disposera d'un radar (CPR (Cloud Profiler Radar), JAXA/NICT) et d'un lidar (ATLID (ATmospheric LIDar), ESA) à haute résolution spectrale basée sur la même plate-forme, ce qui supprimera les potentiels problèmes de colocalisation retrouvés sur l'A-Train.

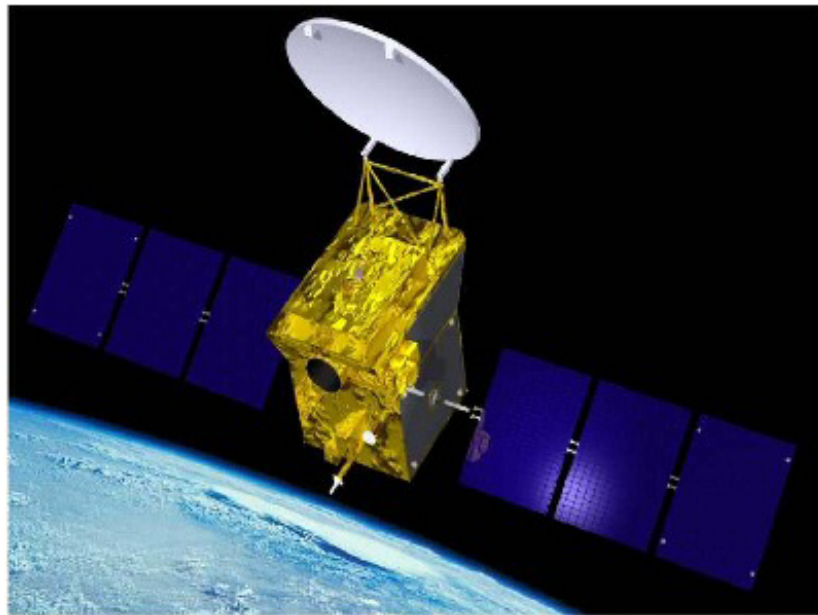


Figure 1.4.5 : Une des possibles configurations du satellite de la mission EarthCare

Il disposera aussi de l'imageur multi spectral MSI (Multi-Spectral Imager, ESA), et du radiomètre large bande BBR (BroadBand Radiometer).

L'imageur MSI permettra de distinguer les différents types de nuages et d'aérosols, et de donner le contexte météorologique et optique des profils échantillonnés par le Lidar et le

Radar. Le radiomètre BBR permettra de donner les radiances au sommet des nuages afin de valider les restitutions des propriétés radiatives des nuages obtenues par les instruments de télédétection active.

Les caractéristiques du lidar ATLID ont été définies par ALCATEL SPACE, dans le cadre de l'étude de Phase A. Il sera constitué d'un laser Nd-YAG, opérant à la longueur d'onde de 354,8 nm. La fréquence de répétition sera de 70 Hz, pour une énergie émise de 25 mJ par tir lidar ([Pain et al, 2004]).

Les deux principaux objectifs de cette mission seront comme dans le cas de l'A-train, de décrire les propriétés des nuages et des aérosols.

1.4.5 La future mission ADM/Aeolus

Mission centrale prévue pour un lancement en 2009 dans le cadre du programme Earth Explorer de l'agence spatiale européenne ESA, ADM-Aeolus (voir la **Figure 1.4.6**) permettra d'étudier des champs tridimensionnels de vents à l'échelle de la planète, dans le but d'affiner les caractéristiques actuellement connues et d'améliorer les techniques de modélisation et d'analyse de l'atmosphère terrestre pour les besoins des prévisions météorologiques et de la recherche en climatologie.



Figure 1.4.6 : Conception d'artiste du satellite d'observation ADM-Aeolus (credit: ESA/ESTEC)

ADM-Aeolus (Atmospheric Dynamics Mission) est équipé d'un lidar anémométrique à effet Doppler composé d'une source à impulsions laser et d'un récepteur capable de mesurer le saut de fréquences sur un signal en retour réfléchi à différents niveaux de l'atmosphère. Les données ainsi recueillies permettront de déterminer la force et la direction des vents par niveau d'altitude, mais également les taux d'humidité et de poussières présents dans l'atmosphère.

Au cœur d'Aeolus, Aladin (Atmospheric LAsEr Doppler INstrument) est un lidar à détection directe et incorporant une imagerie de Mie (impulsions reflétées par les aérosols et les nuages) et de Rayleigh (réflexions moléculaires). Le nom d'Aeolus est celui de l'homme désigné par les dieux de la mythologie grecque comme gardien des vents.

EADS Astrium est maître d'œuvre de la mission, de l'instrument Aladin (Atmospheric LAsEr Doppler INstrument), de l'architecture de la plate-forme électrique et des sous-systèmes.

Les principales caractéristiques du lidar ALADIN, sont fournies dans la Table 1.5 [Durand et al., 2005].

Instrument type	Diode-pumped Nd:YAG lidar with active Q-switch
Transmitter (emitter) - Emission wavelength - Pulse energy (emitted power) - Pulse Repetition Frequency (PRF), pulse width - Line width - Duty cycle	355 nm (eye-safe UV spectral region) 150 mJ/pulse 100 Hz, 15 ns 30 MHz 25%
Receiver - Line width of Fizeau spectrometer - Line width of double Fabry-Perot receiver - Spacing of double Fabry-Perot receiver - Optical efficiency (Mie/Rayleigh receivers) - Detector quantum efficiency (Mie/Rayleigh) - Signal detection (Mie receiver) - Signal detection (Rayleigh receiver)	30 MHz (Mie scattering) 2 GHz (Rayleigh scattering) 5 GHz (Rayleigh scattering) 3.1% / 4.6% 75% Silicon CCD detector in accumulation mode Silicon CCD detector and two read-outs
Signal processing capabilities - Altitude range (Mie + Rayleigh) - Vertical resolution - On-chip horizontal accumulation length - Processing integration length	-1 to 26.5 km (extendable) 1 km (adjustable) 3.5 km (adjustable) in along-track direction 50 km (sample)
Opto-mechanical subsystem - Telescope diameter, f number - Optical efficiency - TFOV (Total instrument FOV)	1.5 m aperture Cassegrain type telescope, f/0.9 0.8 22 μ rad
Instrument mass, power	450 kg, 800 W average power (25% duty cycle)
Instrument data rate	11 kbit/s (max)

Table 1.5 : Paramètres principaux de l'instrument ALADIN.
(http://directory.eoportal.org/pres_ADMAeolusAtmosphericDynamicsMission.html)