

APPLICATIONS POSSIBLES DU LASER A LA METEOROLOGIE

par M. VILLEVIEILLE

1 - GENERALITES

On se propose ci-après de rechercher un certain nombre d'applications possibles du laser à la météorologie.

On évitera, à cette occasion, d'aborder tout problème d'ordre technique concernant l'instrument laser proprement dit (émetteur et récepteur). On se trouve à en fixer la terminologie.

1.1.- Le laser peut se définir simplement comme un pinceau de lumière cohérente et monochromatique, dans une gamme de longueurs d'ondes s'étendant du visible à l'infra-rouge très lointain (100 microns).

L'émetteur laser est constitué par une cavité résonante.

Le pinceau laser est collecté et analysé dans un récepteur, utilisant diverses méthodes que nous bastiserons "photométriques" (le terme "photométric" devant s'entendre ici dans un sens général et englobant des techniques aussi différentes que la photomultiplication, l'interférométrie, etc...). Dans un trajet sous vide, le pinceau est inaltéré.

Dans ce trajet au sein de l'atmosphère, le pinceau laser traverse un certain nombre de milieux inégalement absorbants, réfringents et diffusants, et subit de ce fait une modification par:

- . absorption
 - . réfraction
 - . diffusion
- ces trois phénomènes étant, en général, concomitants.

On désigne par "cible" ou "traceur" l'élément atmosphérique engendrant la modification.

1.2.- Le traceur atmosphérique pourra ainsi être constitué soit par un constituant absorbant H_2O , O_3 , CO_2 , etc... (atténuation du pinceau laser), soit par une couche d'inversion de température et humidité (réfraction du pinceau laser), soit par des éléments matériels immergés: aérosols, microréfecteurs, ballons etc... (diffusion du pinceau laser).

La notion de traceur laser recoupe de la sorte celle de traceur météorologique, c'est-à-dire d'un élément caractéristique identifiable au sein de la particule d'air, et semi-invariant (à une certaine échelle d'espace et de temps) au cours de l'évolution de celle-ci, capable de "marquer" le mouvement de la particule et de mettre en évidence ou de visualiser certains mécanismes "intérieurs" à celle-ci.

1.3.- Les trois définitions ci-dessus adoptées, concernant l'émetteur, le récepteur et le traceur laser, présentent le caractère de grande généralité indispensable pour tenir compte de l'évolution, prévisible et imprévisible, des techniques, dans ce domaine en transformation rapide.

2 - SPECIFICITE DU PINCEAU LASER

Le pinceau de lumière laser présente un certain nombre de caractères spécifiques, dont les trois plus importants, pour la gamme d'applications qui nous occupe, paraissent être:

- La collimation - Le faisceau laser s'inscrit dans une ouverture angulaire très faible (d'où le terme de pinceau), pour laquelle l'unité d'évaluation devient la seconde d'arc. Ce grand pouvoir de collimation a pour corollaire un grand pouvoir de résolution dans l'espace, permettant d'"ausculter" des particules d'air de très petites dimensions (s'exprimant, par exemple, en décimètres ou en mètres).

- La monochromaticité - Le pinceau laser est généralement très monochromatique, les lasers à gaz ou à semi-conducteurs atteignant la fraction de milli-Angström de largeur de raie. Cette propriété trouve application, en particulier, dans la recherche de fenêtres de transmission ou, au contraire, dans l'ajustement "au plus près" de raies d'absorption de gaz dans l'atmosphère.

- La cohérence spatio-temporelle - Le pinceau laser représente un train d'ondes électromagnétiques dont la cohérence est assurée dans l'espace (sur de très grandes distances) et le temps. Cette propriété trouve application dans la possibilité de traiter un pinceau laser à la manière des ondes radioélectriques, tant du point de vue de l'amplification que de la modulation; d'où la conception de transposer le radar, opérant classiquement dans les gammes d'onde décimétriques et centimétriques, voire millimétriques, en radar laser, ou lidar, opérant dans la gamme des ondes lumineuses et de l'infra-rouge, avec certains avantages particulier que l'on indiquera brièvement ci-dessous.

On notera cependant, au préalable, que l'introduction du terme lidar, comme terme générique désignant globalement l'instrument d'application du laser, risque de créer une confusion et de restreindre la généralité de l'analyse. On peut, en réalité, considérer deux cas:

1°- émetteur et récepteur laser sont réunis en un même point: le faisceau laser explore alors, par analyse du rayonnement rétrodiffusé, la géométrie en quelque sorte "extérieure" ou "apparente" d'une certaine cible. C'est à proprement parler le mode d'action du radar et on adoptera le terme transposé de lidar.

2°- émetteur et récepteur laser sont situés en des points géographiquement distincts: le récepteur laser explore alors la profondeur de la zone traversée par le pinceau incident, soit par l'atténuation sur le trajet rectiligne émetteur-récepteur, soit par analyse "latérale" du rayonnement diffusé.

Il n'existe pas, à notre connaissance, de terme général pour désigner ce deuxième mode d'investigation. On parlera simplement de transmissimétrie laser.

Il est clair que les procédés lidar et les procédés par transmission offrent des possibilités complémentaires, qui seront précisément inventoriées au paragraphe 3.

Cependant, la réalisation récente (à l'état de prototypes) de matériels d'essais lidar (Stanford Research Institute) incite à analyser plus particulièrement les avantages de cette formule.

Le lidar, est comme le radar, susceptible de fonctionner suivant deux principes:

- par télémétrie. On mesure alors la durée du temps de transit d'une impulsion dans son trajet aller-retour émetteur - cible - récepteur, et on en déduit la distance correspondante. Secondairement, on détermine les coordonnées angulaires du vecteur émetteur-cible. La précision de localisation de la cible que l'on peut atteindre dans ces conditions s'exprime en centimètres;

- par doppler-métrie. On mesure la dérive Doppler en fréquence d'une onde laser continue et on en déduit la vitesse radiale de la cible.

La précision sur la vitesse que l'on peut atteindre dans ces conditions s'exprime en centimètres par seconde (voire en millimètres par seconde).

Les ordres de grandeur de précision de mesure ci-dessus indiqués sont garantis:

- d'une part, par la perfection "géométrique" de plus en plus grande de l'impulsion laser (à front très raide) et accessoirement la puissance véhiculée par ces impulsions: les unités d'évaluation sont alors la nanoseconde et le gigawatt;

- d'autre part, par la stabilité de l'onde continue du laser et l'énormité des fréquences utilisées (pour des vitesses de l'ordre du m/s dérive Doppler chiffrable en Mhz dans le rouge).

Finalement, le lidar présente sur le radar ordinaire des avantages de:

- Finesse: le balayage par pinceau laser intéresse des "cellules" élémentaires beaucoup plus petites;
- Sensibilité: la rétrodiffusion Rayleigh du laser est obtenue avec des éléments matériels (aérosols, molécules) beaucoup plus petites;
- Précision: (la précision du radar laser a été définie plus haut); qui se chiffrent par des ordres de grandeur de performances supérieures d'une ou plusieurs magnitudes à ceux que l'on peut obtenir par le radar classique.

Cependant, le lidar connaît encore des limitations dues:

- à l'atténuation atmosphérique, forte dans l'infra-rouge et spécialement dans le cas de nuages (on citera des ordres de grandeur de 10 à 100 db/km);
- à la sensibilité même de l'appareillage, qui entraîne une multiplicité "d'échos" difficile à séparer et à identifier;
- à la difficulté d'automatisation de la "poursuite" d'une cible. Il est certain que ces difficultés pourraient être progressivement levées (choix de fenêtres de transmission, balayage en fréquence, "étages" de poursuite comportant des champs de plus en plus restreints, etc,...).

En définitive, on doit considérer que le lidar, dans l'état actuel des choses, ne permet pas la souplesse d'emploi du radar, mais représente, potentiellement, une capacité d'investigation infiniment supérieure, qui autorise à dire que, dans un avenir plus ou moins éloigné, il en prendra le relais dans toute la gamme d'utilisation classique, et dans une gamme nouvelle qui reste à définir.

3 - APPLICATIONS DU LASER A LA METEOROLOGIE

La multiplicité des applications concevables rend incommode toute classification. De manière assez arbitraire, on groupera donc ces applications en trois rubriques, en fonction du phénomène physique déterminant principalement l'effet utilisé, savoir:

- l'absorption,
- la réfraction,
- la diffusion.

3.1.- Absorption (+diffusion en effet secondaire)

3.1.1.- Télécommunications - La modulation d'un pinceau la-

ser pour la transmission simultanée d'un grand nombre de voies téléphoniques (*) ou de télévision, devient un des objectifs principaux des organismes internationaux de télécommunications. En France, le CNET a déjà obtenu des résultats intéressants dans ce domaine, résultats que le Ministre des P et T annonçait dans une récente communication à l'Assemblée Nationale, tout en indiquant que, du fait de l'absorption atmosphérique intense, l'avenir du procédé paraissait lié à la transmission dans un tube.

On conçoit qu'une telle technique limite très sérieusement l'extension et l'efficacité du nouveau procédé. D'autres solutions paraissent possibles; on peut se proposer de les examiner dans toute leur généralité par une étude systématique des conditions de l'atténuation atmosphérique, portant sur:

- toute la gamme des longueurs d'onde (jusqu'au plus lointain infra-route);
- des trajets horizontaux, verticaux ou obliques à différentes altitudes:
 - . pour des concentrations variables de constituants gazeux absorbants, notamment l'humidité (H_2O), CO_2 , O_3 , CH_4 , NO , etc...
 - . pour des concentrations variables de gouttelettes en suspension: cas des nuages (ou des états sub-nuageux) et du brouillard.

Cette étude aurait pour objet de définir:

- les taux d'atténuation à attendre pour différentes situations météorologiques et pour différents "climats" locaux;
- la variabilité de ce taux dans l'espace et le temps, en vue du choix possible:
 - . de la meilleure directivité;
 - . d'une formule nouvelle de transmission "pulsée".
- les fenêtres de transmission ménagées entre les bandes d'absorption des différents constituants ou "occupants" de l'atmosphère.

3.1.2.- Visibilité.

Les études précédentes comportent une application directe aux problèmes de la visibilité, c'est-à-dire de la perception d'un signal lumineux, à une certaine distance et pour certaines conditions météorologiques, par un instrument optique (éventuellement: l'oeil humain) possédant un seuil de sensibilité défini.

De telles études ont déjà été menées sur le plan scientifique par ARNULF et BRICARD, concernant l'atténuation par brumes

(*) premiers essais (d'ailleurs infructueux) de liaison phone satellite-sol par STAFFORD et SCHIRRA (décembre 65).

et brouillards dans le visible et l'infra-rouge; sur le plan technologique, par la Météorologie Nationale (essais d'appareillages dénommés visibilimètres).

La monochromaticité du laser apporterait à ce type d'expériences une rigueur nouvelle. L'utilisation en est évidente pour un certain nombre de besoins pratiques concernant la navigation aérienne (sur laquelle il n'est pas besoin d'insister), et, à un moindre degré, la navigation maritime (phares, dispositifs anti-collisions, pilotage portuaire, etc...) et la circulation routière (automatisation des règles de circulation par temps de brouillard, etc...).

On peut envisager une autre gamme d'applications avec la navigation spatiale: le faisceau laser visible depuis le satellite, représentant un "marqueur" géographique susceptible d'aider au recalage d'attitude de l'engin; en particulier, un certain nombre de "marqueurs" ainsi disposés sur les zones continentales (ou maritimes) permettraient d'obtenir une photogrammétrie extrêmement précise des "images" (conventionnelles ou radiométriques) du champ observé par satellites météorologiques (photogrammétrie spécialement intéressante dans le cas où ceux-ci auraient une attitude variable).

3.1.3.- Mesures de la concentration des constituants mineurs et de la température.

On se place ici dans les conditions générales du "sondage horizontal" (*) où l'émetteur et le récepteur sont disposés à une même altitude (les véhicules pouvant être des ballons, ou même des fusées), et situées à une certaine distance l'un de l'autre:

- distance parfaitement connue par radar (ou mieux par lidar, "extérieur" à l'opération ici décrite).

On mesure ainsi, sur un trajet de longueur déterminée, l'atténuation du pinceau laser. Si on se place à une altitude et dans des conditions telles qu'il n'y ait pas de nuages intermédiaires et que le phénomène de diffusion soit pratiquement négligeable, cette atténuation est en fonction: - de la concentration en constituants gazeux absorbants; - de la température, et, accessoirement, de la pression.

Si l'on se donne la température et la pression, mesurables par des moyens classiques (ou même, comme le suggérerait le projet MN/SE - BEMS, par mesure acoustique sur la même base d'émission-réception, la température se déduisant alors de la vitesse du son), l'atténuation observée permet de remonter à la concentration.

(*) Projet MN/SE - BEMS (1963).

On cherche ainsi à placer sur certaines bandes d'absorption sélective de H_2O , O_3 , CO_2 , CH_4 , NO , etc..., en utilisant même, si la possibilité existe, plusieurs raies laser distinctes, qui permettraient alors une détermination simultanée de la concentration et de la température.

La technique opératoire n'exige pas, d'ailleurs, absolument, un émetteur et un récepteur à bord de deux véhicules séparés; il suffit que l'un des véhicules comporte une cible du type catapote, pour que la réflexion ramène le faisceau laser sur le point géographique où se trouvent simultanément l'émetteur et le récepteur.

La formule du "sondage horizontal" ainsi décrite trouverait application à la détermination directe du profil vertical des concentrations de constituants mineurs (H_2O , O_3 , CO_2 , CH_4 , NO , etc...) à haute et très haute altitude (de 20 à 80 ou 100km), où toute mesure indirecte, parmi celles qui ont déjà été proposées, comporte l'inconvénient d'une grande imprécision.

3.2.- Réfraction (+ diffusion en effet secondaire)

3.2.1.- Turbulence en atmosphère claire.

On suppose (hypothèse partielle) que cette turbulence est liée à des tourbillons, introduisant dans l'atmosphère certains effets de "cavitation", c'est-à-dire d'interposition de couches d'air ou d'une "bulle", présentant une variation brusque (discontinuité) des gradients de température et humidité. Il en résulte une dispersion du faisceau laser par réfraction et diffusion, qui peut être effectivement détectée, bien que très incommode à interpréter quantitativement. Un ensemble émetteur-récepteur laser placé à bord d'un avion pourra ainsi, par l'augmentation du "trouble" à la réception, donner une indication sur l'existence d'une turbulence à distance de l'avion. Un système d'avertissement complet devrait comporter;

- un dispositif de balayage automatique en direction,
- un dispositif multi-fréquences, qui permettrait d'obtenir différentiellement une indication plus précise sur la distance de la zone turbulente. (inégaie atténuation du rayonnement).

L'état d'avancement actuel, spécialement en France, des études dans ce domaine fait l'objet de la partie II de ce rapport.

3.2.2.- Echanges convectifs

Dans les mêmes conditions que précédemment, les échanges convectifs de basses couches (ou de niveaux plus élevés) provoquent un "trouble" du faisceau laser qui pourrait être interprété, au moins qualitativement, comme une indication sur la stabilité ou l'instabilité de l'atmosphère.

Un "écho" plus net devrait pouvoir être obtenu sur la (ou les) couches d'inversion horizontales, qui ont pour premier effet de limiter supérieurement les échanges convectifs.

L'intérêt pratique de la notion d'échanges convectifs en basses couches amène à l'idée d'une provocation artificielle d'instabilité, par le chauffage de plaques dégageant de façon régulière des "bulles thermiques"; le développement ou le non développement des bulles ainsi créées, observables par l'intensité du "trouble" laser, donnerait une indication "à priori" sur la stabilité ou l'instabilité de l'atmosphère; par ailleurs, un affinement de la mesure pourrait permettre de déterminer la dérive horizontale de ces bulles au cours de leur ascension, c'est-à-dire, finalement, le vent des basses couches. Une telle technique qui pourrait être mise en oeuvre de manière quasi-continue trouverait application aux problèmes de pollution, aux champs de tir, etc...

3.2.3.- Sondage pression-température vertical.

On n'utiliserait en ce cas que le seul phénomène réfraction. La réfraction d'un pinceau lumineux laser dans la traversée des couches atmosphériques superposées, de moins en moins réfringentes, n'est évidemment pas différente en son principe de la réfraction des astres considérés en astronomie.

On peut lier la déviation angulaire du pinceau à la stratification en densité de l'atmosphère. Si l'on fait varier l'inclinaison du pinceau, on obtient des déviations angulaires inégales, dont la comparaison permettrait par un procédé analytique classique (inversion de matrice), de remonter à la stratification en densité. Faisant ensuite entrer en jeu la loi hydrostatique, on retrouverait finalement, le sondage vertical (p, T) classique, qui pourrait dès lors avoir un caractère permanent, dès l'instant que l'on saurait véhiculer à haute altitude un émetteur ou récepteur laser.

3.3.- Diffusion

Il s'agit là de l'effet le plus important du point de vue des applications immédiates, en l'état de la technique laser. On envisage trois types de diffusants atmosphériques.

3.3.1.- Les molécules

3.3.2.- Les diffusants "naturels" (aérosols, gouttelettes ou cristaux).

3.3.3.- Les diffusants, ou encore: réflecteurs "artificiels" (considérés à 3 échelles de dimensions: Micro-réflecteurs en poudre, micro-réflecteurs en ailettes, cataphotes véhiculés par ballons).

3.3.1.- Diffusants moléculaires: mesure de la température

La diffusion par les molécules, sensible dans le phénomène du bleu du ciel (qui permet à NERNST et SMOLUCHOWSKY d'aboutir à une estimation du nombre d'Avogadro), est utilisable pour la détermination de la température de la haute stratosphère et de la mésosphère, dans des conditions qui ont fait l'objet d'une analyse critique dans un autre rapport (*) et que l'on rappelle ici brièvement.

On dispose d'un laser à gaz-néon-hélium suffisamment puissant, travaillant en radiation bleue, et de monochromaticité quasi-parfaite (un demi milli-Angström de largeur de raie). Le pinceau est analysé latéralement; un interféromètre détermine l'élargissement Doppler, qui est directement lié à la vitesse d'agitation moléculaire, elle-même directement dépendante de la température (loi quadratique). On a ainsi accès à la température avec une incertitude que nous avons chiffré a priori supérieure à une vingtaine de degrés.

Nota -

On ne décrira pas ici un autre projet entrant dans le même cadre général, tendant à la mesure de la température de la mésosphère (de nuit) par excitation en résonance d'une raie de césium (émis par fusée; l'expérience n'étant pas autre chose que la transposition des expériences désormais classiques sur nuages alcalins, réalisées avec le soleil comme source excitatrice).

3.3.2.- Diffusants naturels

3.3.2.1.- Aérosols et poussières en suspension

L'analyse par laser de la répartition des aérosols et poussières atmosphériques, et des variations de leur concentration dans l'espace et le temps, représente une des applications les plus immédiatement évidentes de cette technique. Ce point est explicité dans la partie III de ce rapport.

On se bornera à souligner, en dehors des problèmes de pollution atmosphérique des basses couches, l'intérêt de telles études pour la mise en évidence d'accumulations d'aérosols et poussières à certains niveaux préférentiels de la haute troposphère et de la stratosphère. On a formulé l'hypothèse (*) que ces accumulations se produisaient effectivement aux niveaux de vent extrême, c'est-à-dire au niveau du "jet" troposphérique et au niveau du vent minimal stratosphérique ("stratonull"). Une meilleure connaissance du phénomène conduirait peut-être à l'explication d'anomalies radiométrique (I.R.) relevées par les satellites TIROS.

(*) Rapport au Comité Scientifique du CNES, Octobre 1965.

(*) C.R. de la France au COSPAR.

On sait par ailleurs, que la photométrie de l'horizon réalisée par les Soviétiques à bord de VOSKHOD a confirmé l'existence de telles couches diffusantes troposphériques et stratosphériques.

3.3.2.2.- Gouttelettes d'eau et cristaux: nuages

(Nuages denses, ou tenus-tels que cirrus fins, et états sub-nuageux). La technique laser doit apporter à l'étude de ces phénomènes une contribution décisive sur trois plans:

- Photogrammétrie du nuage. Le laser permet de définir avec une franche précision le modelé géométrique du nuage et ses variations. Cette possibilité apparaîtra particulièrement intéressante pour analyser depuis le sol le développement et le comportement:

- . des nuages convectifs et notamment des nuages convectifs violents;
- . des nuages lenticulaires;
- . des nuages nacrés;
- . des nuages artificiels créés par l'homme (y compris traînées d'avions à réaction);

mais surtout pourra trouver application aux satellites météorologiques, en permettant d'obtenir, depuis le bord de ceux-ci, par une technique de balayage, une véritable "photographie en relief" des nuages, permettant simultanément:

- . de distinguer leur altitude;
 - . d'apprécier leur évolution rapide dans le temps;
 - . de mesurer leur vitesse de déplacement.
- dynamique du nuage : le laser, opérant en Doppler, est capable de mesurer les vitesses relatives des différentes parties du nuage et devrait permettre, dans ces conditions, d'étudier;
- . les mouvements verticaux liés au développement, à l'entretien, puis à la dégénérescence de nuages;
 - . les mouvements horizontaux liés à la diffusion "latérale" du nuage, aux différents stades de son évolution;
 - . de manière générale, les effets advectifs qui interviennent dans la formation et la vie du nuage, en relation avec les échanges de "matière" nuageuse, c'est-à-dire les variations de concentration et de granulométrie des gouttelettes constituantes.
- précipitations: les études sur les précipitations, à caractère de pluie ou d'averse, entreprises avec le radar, pourront être largement développées avec l'instrument plus fin, plus sensible et plus précis que constitue le lidar.

3.3.3.- Diffusants ou réflecteurs artificiels

3.3.3.1.- Micro-réflecteurs

La longueur d'onde du laser permet d'utiliser la rétro-diffusion Rayleigh sur des micro-réflecteurs pulvérulents. Les poudres présentent l'avantage d'une vitesse de chute relativement faible, aux altitudes élevées et pourraient donc être utilisées pour des mesures de:

- vent et turbulence dans la haute stratosphère et la mésosphère.

Le nuage pulvérulent, dont on désire suivre la dérive et la diffusion serait, en ce cas déposé de fusée météorologique à un niveau voisin de la mésopause (80km).

Avec altitudes plus basses, l'avantage des poudres se transforme en inconvénients, du fait que le temps de résidence à un niveau donné devient abusivement long. On pourra alors utiliser les micro-réflecteurs en forme d'ailettes (samares), qui se prêtent à la mesure de:

- vent et turbulence, en deça de 30km,

mais aussi

- du vent vertical

et

- de la diffusion horizontale, en simulation des conditions d'un nuage naturel.

3.3.3.2.- Réflecteurs cataphotes (véhiculés par ballons plafonnants)

On dispose avec le ballon plafonnant d'un tracteur sensible des mouvements atmosphériques (à une certaine échelle). La précision de la mesure laser permet d'accéder, par poursuite de ces ballons, à:

- la vitesse et l'accélération du vent horizontal;
- la vitesse et l'accélération du vent vertical;
- la turbulence.

Dans ce dernier but, on peut envisager d'utiliser non pas un seul ballon, mais un attelage de 2 ou 3 ballons, dont on déterminera constamment par laser la configuration. Les variations de cette configuration, et la rapidité d'évolution de la géométrie ainsi formée, renseigneront directement sur la turbulence, du point de vue:

- . de son intensité,
- . de sa dimension (au sens d'Obukhov),
- . de sa fréquence spatio-temporelle.

Nota -

On reconnaîtra, de façon générale, que les possibilités décrites dans ce paragraphe recourent les objectifs du programme EOLE. Une expérimentation "en vrai grandeur" serait utile à la réalisation de ce programme; inversement, il est possible d'imaginer que la version future d'EOLE ou d'IRLS comportera un ensemble émetteur-récepteur laser à bord du satellite.

4 - CONCLUSION

4.1.- La liste d'applications du laser à la météorologie, établie ci-dessous n'est pas exhaustive et mérite d'être ultérieurement complétée.

Elle illustre simplement la richesse des possibilités qui s'offrent dans ce domaine; elle suggère que d'autres prolongements sont envisageables, si l'on se rapporte aux définitions très générales du premier paragraphe, et si l'on se place dans la perspective de progrès technologiques probablement rapides dans ce domaine.

C'est ainsi, par exemple, que l'évolution accélérée vers les lasers dits "de puissance" ouvre la voie au transport d'énergies importantes à distance par l'intermédiaire du pinceau laser, avec comme conséquence éventuelle la possibilité "d'alimenter" depuis le sol une cible artificielle (ballon, satellite) ou naturelle (par exemple, nuage).

On estime que ceci pourrait conduire à des développements inédits dans le domaine de la Météorologie active, concernant la nébulation ou la dénébulation artificielle.

M. VILLEVIEILLE