

Bulletin de l'Union des Physiciens

Association de professeurs de Physique et de Chimie

Les satellites et la météorologie

1. LES VARIABLES METEOROLOGIQUES.

Pour nous permettre d'étudier le rôle que peuvent jouer les satellites dans la météorologie d'aujourd'hui et de demain, il est tout d'abord nécessaire de donner un aperçu schématique de la physique de l'atmosphère et des variables qu'il convient d'observer et de mesurer pour atteindre une connaissance suffisante de ce milieu et envisager la prédiction de ses évolutions.

La météorologie, au sens où nous la prendrons ici dans ses rapports avec les sciences spatiales, a pour but l'étude et la prédiction des évolutions, à l'échelle planétaire, de la partie la plus dense de l'atmosphère, qui influence directement la vie sur la terre et qui constitue les couches connues sous le nom de troposphère et basse stratosphère. Dans cette zone, l'atmosphère peut être considérée comme un milieu neutre, par opposition aux couches supérieures où les phénomènes photochimiques, électriques et magnétiques dus à l'action du rayonnement solaire et du champ magnétique terrestre jouent un rôle prépondérant. Aux échelles de temps météorologiques (quelques dizaines de jours), les interactions entre les basses et les hautes couches peuvent être négligées, en première approximation. L'air atmosphérique des météorologistes est un mélange, en proportions invariables, de différents gaz constituant l'air sec, et de vapeur d'eau en proportion variable, auquel s'ajoutent des particules en suspension, dont les principales sont les gouttelettes d'eau et les cristaux de glace. Un constituant joue un rôle particulier, par son action très importante sur la vie terrestre : c'est l'ozone, en très faible quantité dans les basses couches, mais dont la couche principale se trouve à la limite supérieure de la zone à laquelle s'intéresse la météorologie.

Pour mettre en évidence la nature des mesures indispensables, bornons-nous pour l'instant à considérer une atmosphère sèche et sans aérosols en suspension : la détermination de son évolution à partir d'un état donné exige théoriquement la connais-

sance, à l'instant initial, et en chaque point, des quantités suivantes : pression, masse volumique, vecteur vitesse, et une variable thermodynamique, par exemple la température, ainsi que des conditions aux limites, c'est-à-dire la connaissance des paramètres qui définissent l'état de la surface solide ou liquide qui limite l'atmosphère vers le bas, ainsi que ceux qui définissent les interactions avec les couches supérieures et le milieu interplanétaire. Cependant, des considérations d'échelles (en fait fondées sur des développements asymptotiques et des méthodes de perturbation) permettent de réduire considérablement ces exigences :

La terre est un solide qui tourne d'un mouvement uniforme autour de son axe et, si aucune hétérogénéité ou perturbation n'intervenait, l'atmosphère serait entraînée en bloc dans ce mouvement solide : il n'y aurait pas de vent. Dans une telle situation théorique, on montre facilement que l'atmosphère serait stratifiée en densité, et donc en température, les paramètres de pression p , de masse volumique ϱ et de température T étant reliés par la relation d'état des gaz parfaits :

$$(1) \quad p = \varrho RT.$$

La réalité est, bien entendu, plus complexe, mais cette stratification reste une des caractéristiques principales de l'atmosphère, ce qui entraîne en particulier que, pour l'essentiel, les mouvements de grande échelle de l'atmosphère sont horizontaux. La pression et l'altitude sont donc, à une bonne approximation, et toujours à grande échelle, reliées par la relation hydrostatique :

$$(2) \quad dp = -\varrho g dz.$$

Quant à l'évolution du champ des vitesses (horizontales), elle peut être décrite par l'équation de NEWTON, que l'on peut écrire, dans un repère galiléen, et en simplifiant quelque peu :

$$(3) \quad \varrho \frac{d\vec{V}}{dt} + \overrightarrow{\text{grad}_H p} \simeq 0.$$

En tenant compte de l'équation d'état, on peut écrire (2) sous la forme :

$$\frac{dp}{p} = -g(z) \frac{dz}{RT(z)}$$

qui s'intègre en :

$$(4) \quad p = p_s \exp \left(-\frac{1}{R} \int_0^z \frac{g(z)}{T(z)} dz \right)$$

où p_s désigne la pression au sol. L'évolution de cette pression

au sol est donnée par la variation de masse de la colonne d'air au-dessus d'un domaine élémentaire, ce qui conduit à :

$$(5) \quad \frac{dp_s}{dt} = - \int_0^{p_s} \operatorname{div}_H \vec{V} dp.$$

Il apparaît donc, à cet ordre d'approximation que la connaissance, à un instant donné, du champ de pression *au sol*, et des champs de vitesses horizontales et de température à toute altitude, permet de prédire ces mêmes champs à un instant ultérieur (il faut évidemment adjoindre une équation thermodynamique pour définir l'évolution de la température, mais elle est omise ici pour ne pas alourdir l'exposé).

Ainsi donc, les variables à mesurer, en première urgence, pour la prédiction à court terme, sont :

- la pression au sol,
- le profil vertical de température,
- les composantes horizontales du vent à toute altitude.

2. LES MESURES CONVENTIONNELLES.

Nous allons maintenant examiner comment ces mesures de base sont réalisées par les moyens conventionnels et quelle est la contribution des satellites dans ce domaine.

Le réseau météorologique d'observation au sol fournit évidemment la pression au sol. Les mesures de vitesse de vent et température sont réalisées en routine dans chacune des stations du réseau aérologique, plusieurs fois par jour, au moyen de ballons-sondes suivis par radar (pour le vent) et transmettant au sol les mesures de température, de pression et d'humidité. Cependant ce réseau, s'il est suffisamment dense sur les pays développés de l'hémisphère nord, est notablement trop lâche ailleurs, et pratiquement inexistant sur la plus grande partie (océanique) de l'hémisphère sud. La réalisation d'une densité suffisante d'observations conventionnelles sur tout le globe n'est pas envisageable, pour des raisons techniques et surtout financières. L'observation spatiale apporte là des possibilités très intéressantes, progressivement testées puis mises en place de façon opérationnelle depuis le début de l'ère spatiale.

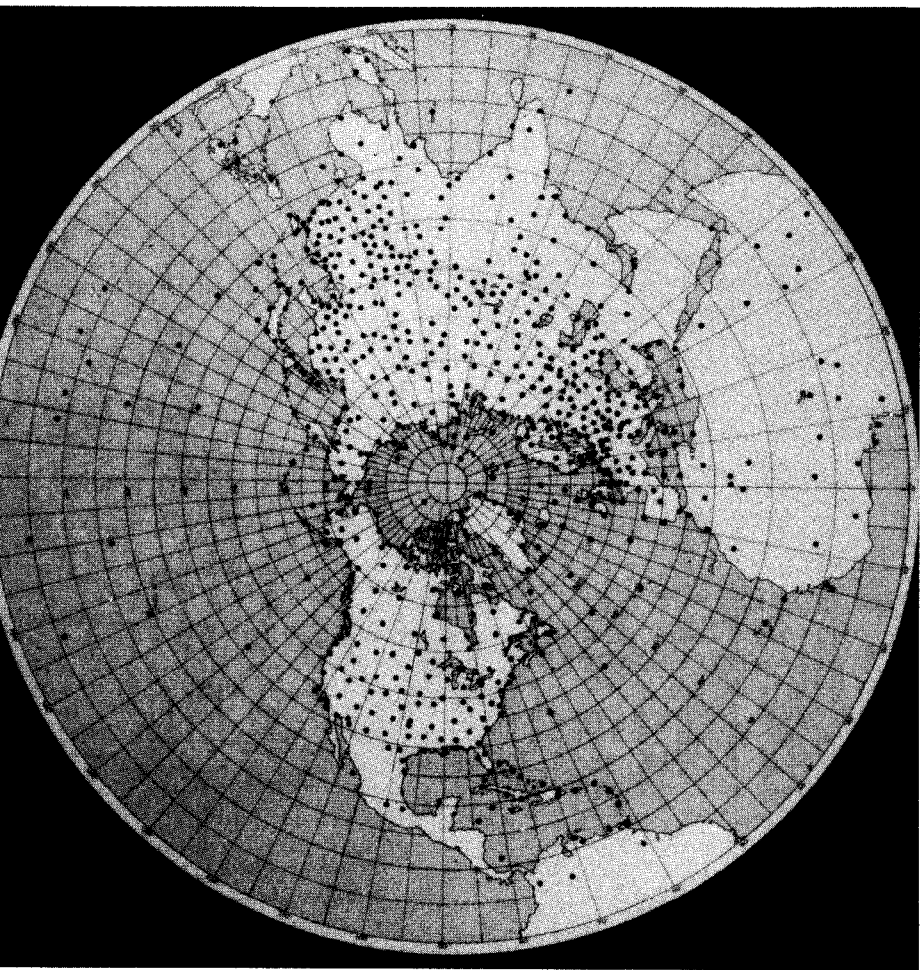


Photo 1

Photos 1 et 2 : Emplacement des stations météorologiques du réseau aérologique. On constate l'inhomogénéité de cette répartition et sa très faible densité sur l'hémisphère sud.

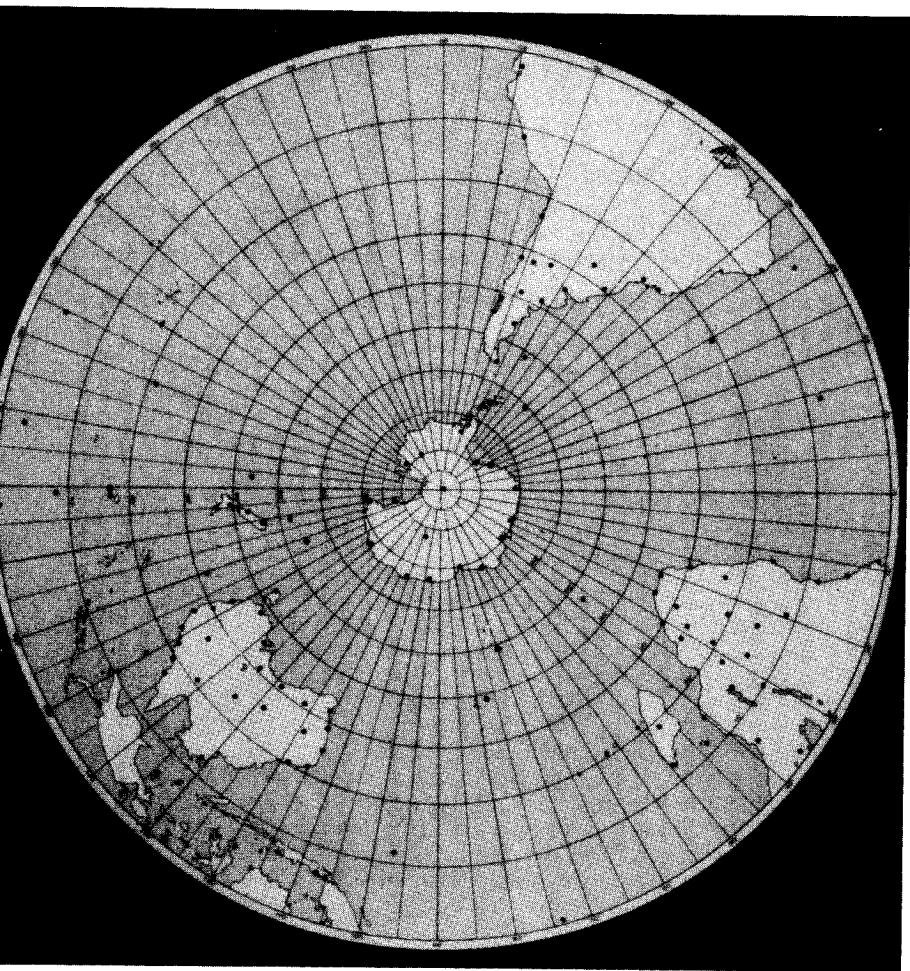


Photo 2

3. LES METHODES SPATIALES.

Les seules propriétés physiques d'un corps que l'on puisse pratiquement mesurer directement à distance sont les propriétés radiatives : plus exactement, on obtient la « quantité de rayon-

nement » atteignant l'appareil de mesure dans une plage spectrale déterminée et arrivant dans un angle solide donné.

Les deux sources naturelles de rayonnement d'intensité appréciable pour le problème qui nous intéresse ici sont le soleil et la terre. Le soleil rayonne approximativement comme un corps noir à $6\,000^\circ\text{K}$, ce qui correspond (loi de WIEN) à une densité spectrale maximale pour une longueur d'onde voisine de $0,5\,\mu\text{m}$. La quasi-totalité de l'énergie est émise dans la bande $0,25$ à $5\,\mu\text{m}$. La terre émet, en première approximation, comme un corps noir à 300°K , donnant une émission appréciable dans la bande 5 à $100\,\mu\text{m}$, avec une densité spectrale maximale aux environs de $10\,\mu\text{m}$. Par ailleurs, la terre et son atmosphère absorbent une partie du rayonnement solaire incident, et réfléchissent le reste.

Les quantités qui nous intéressent (p , T , $\vec{V}$) doivent être obtenues de façon indirecte à partir de mesures d'énergie provenant de la terre et reçues par le satellite dans les bandes spectrales précédentes. En fait, la région de l'ultraviolet ($\lambda < 0,3\,\mu\text{m}$) n'est pratiquement pas utilisable, la presque totalité de l'énergie dans cette bande étant absorbée sélectivement par l'oxygène, l'azote et surtout l'ozone dans la haute atmosphère. Par ailleurs, l'atmosphère, compte tenu de sa composition, ne transmet pas toutes les longueurs d'onde de façon analogue : dans certaines régions spectrales (fenêtres), l'air clair est pratiquement transparent (fenêtre visible de $0,4$ à $0,7\,\mu\text{m}$, fenêtre infrarouge « thermique » de 10 à $12\,\mu\text{m}$) ; dans d'autres régions (bandes d'absorption), le rayonnement est partiellement ou totalement absorbé (bandes de CO_2 à $15\,\mu\text{m}$, de l'ozone à $9,6\,\mu\text{m}$, de la vapeur d'eau à $7-8\,\mu\text{m}$). Conformément aux lois de la thermodynamique, les gaz atmosphériques émettent d'ailleurs aux longueurs d'ondes où ils absorbent le rayonnement. Enfin les nuages ont des propriétés radiatives complexes mais peuvent dans certains cas être considérés comme des corps noirs : leurs propriétés radiatives sont alors fixées par leur température. La complexité et la diversité de ces comportements sont mis à profit par les divers systèmes expérimentaux dont nous allons brièvement parler maintenant.

L'imagerie « visible ».

L'utilisation du rayonnement réfléchi dans la fenêtre « visible » a été la première méthode d'observation mise en œuvre et reste la plus utilisée : dès 1960 le premier satellite météorologique américain ITOS.1 emportait des caméras de télévision qui donnèrent les premières images opérationnelles de la couverture nuageuse de la terre à l'échelle planétaire, faisant connaître les configurations désormais classiques des systèmes nuageux et ouvrant la voie à de fructueuses études de météorologie synop-

tique. Ceci a ouvert la voie à toute une famille d'instruments embarqués, fournissant de façon opérationnelle une couverture photographique bi-quotidienne de la planète, tout d'abord limitée aux images prises de jour, puis étendue aux images nocturnes utilisant le rayonnement thermique de la surface et des nuages dans la fenêtre infrarouge 10-12 μm ; en même temps a été mis en place un dispositif de transmission quasi immédiate et universelle de ces images (Automatic Picture Transmission), rendant les plus grands services aux organismes de prévision.

Ces systèmes, mis en œuvre sur des satellites à orbite circulaire quasi polaire, remplissent correctement la mission proposée, en donnant une couverture périodique du globe entier. Ils ne permettent cependant pas de répondre au problème que nous avons posé pour la mesure de p_s , T , $\vec{V}$.

4. LA MESURE DU VENT.

Le champ des vitesses horizontales peut cependant être déduit d'images de la couverture nuageuse, à condition que l'on dispose d'un observatoire spatial fixe par rapport à la terre : c'est ce qui a été réalisé pour la première fois en 1966 avec le satellite géostationnaire ATS-1 : en comparant deux images séparées par un intervalle de temps donné et en mesurant le déplacement des seuls éléments variables de ces images que sont les nuages, on obtient le champ des déplacements nuageux : sous réserve que les mouvements des nuages soient représentatifs des champs de vent (ce qui exclut les nuages orographiques, les nuages d'onde et les développements convectifs), et sous réserve qu'il existe des nuages dans la zone étudiée, on obtient ainsi des résultats très intéressants ; le système a été très largement développé depuis 1966 : augmentation de la résolution (les éléments d'image ont actuellement 1 à 4 km de côté), utilisation d'imagerie infrarouge, mise au point de systèmes d'exploitation plus ou moins automatiques et d'algorithmes permettant, dans les cas favorables, de définir l'altitude des couches nuageuses utilisées. Ceci a donné lieu à la mise en place, à l'occasion de la première expérience météorologique mondiale (P. E. M. G. du 1-12-1978 au 30-11-1979) d'un système de cinq satellites géostationnaires couvrant, avec des recouvrements dans la zone intertropicale, toute la zone de latitude inférieure à 50°. En particulier, le satellite européen METEOSAT fournit des informations dans trois canaux : fenêtre visible, fenêtre infrarouge thermique, et bande d'absorption de la vapeur d'eau entre 5,9 et 7,1 μm . Malgré ses faiblesses, dont la plus importante est actuellement l'imprécision de la détermination de l'altitude des vecteurs vents calculés, ce système apporte une contribution essentielle au système mondial d'observation.

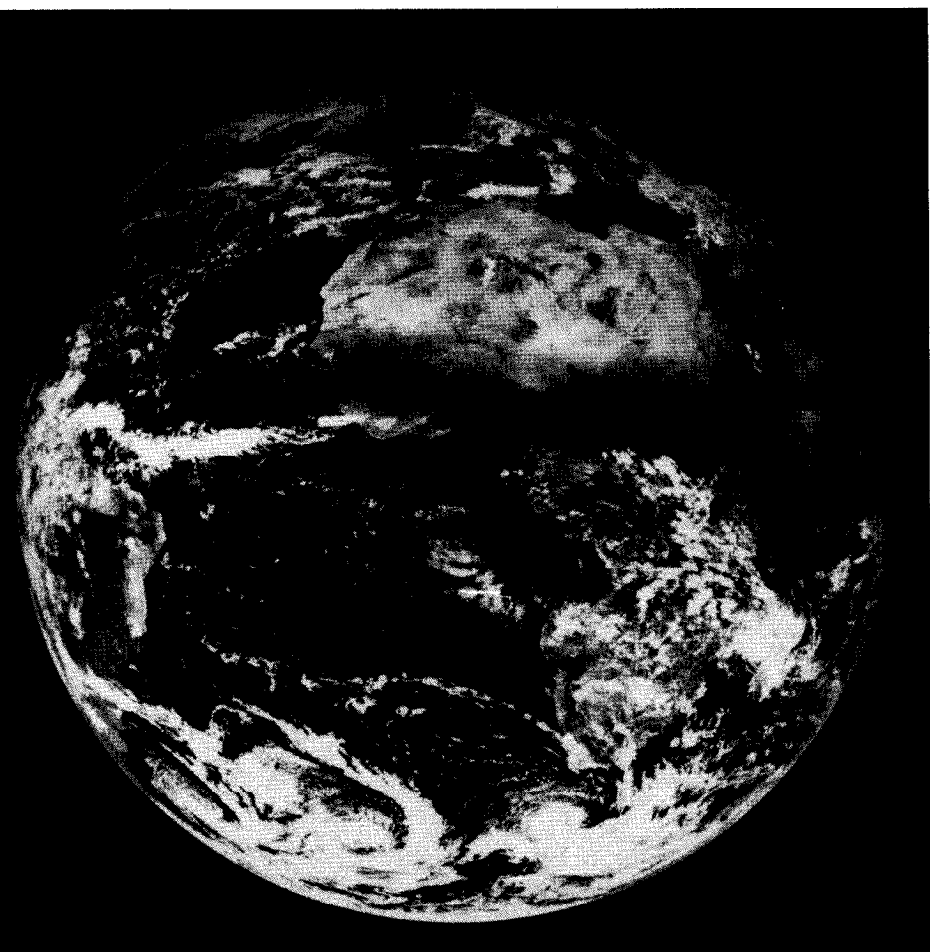


Photo 3. — Canal « visible ».

Photos 3, 4 et 5

Images simultanées prises par Météosat :

Pour l'image visible, les scènes les plus brillantes apparaissent en blanc, les moins réfléchissantes en noir.

Pour les images infrarouges, les scènes sont d'autant plus claires que leur température radiative apparente est plus froide. Ceci explique

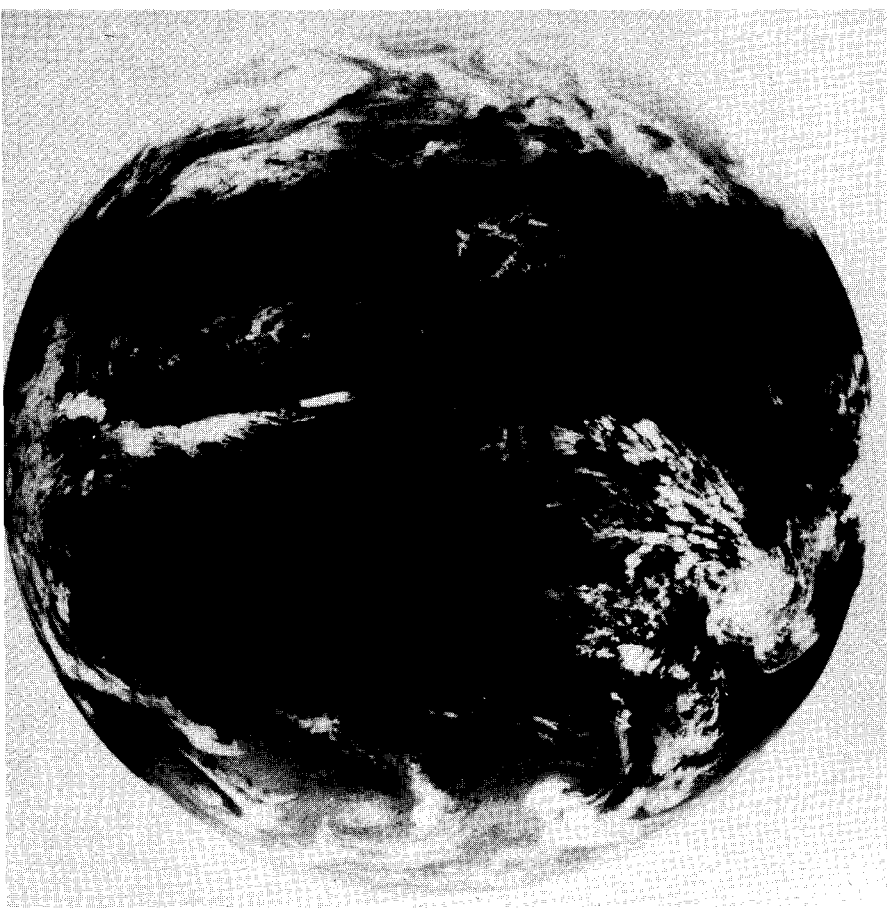


Photo 4. — « Infrarouge thermique » (10 à 12 μm).

que le fond de ciel est noir pour l'image visible, et blanc pour les deux autres. L'information que fournit le canal « vapeur d'eau » provient des couches supérieures de la stratosphère : on retrouve sur cette image les structures des masses nuageuses (eau condensée) présentes sur les deux autres, mais aussi les structures liées à la présence de l'eau sous forme gazeuse, qui n'apparaissent pas sur l'image visible et l'image infrarouge « thermique ».

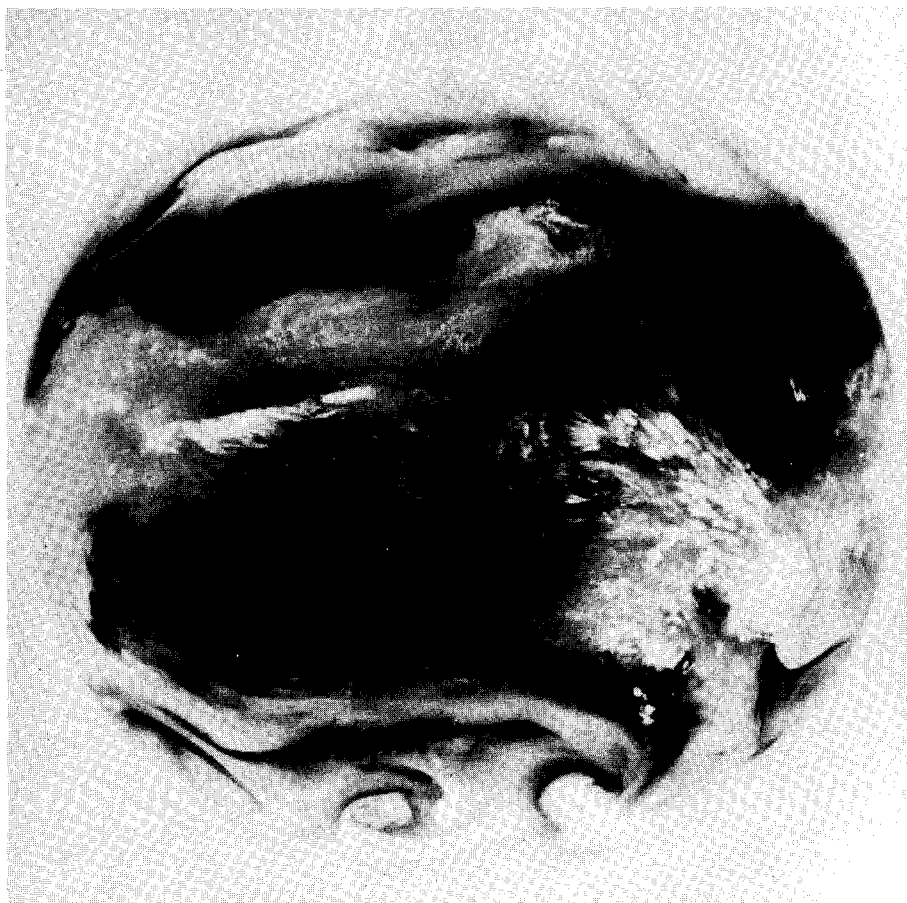


Photo 5. — Canal « vapeur d'eau » bande d'absorption de la vapeur d'eau entre 5.9 et 7.1 μm .

L'appareil de mesure actuellement mis en œuvre sur ces satellites géostationnaires est un radiomètre à balayage, explorant point par point, grâce à un télescope à deux degrés de liberté, la totalité de la partie visible du globe terrestre (environ un quart de sa superficie). Sur METEOSAT l'un des degrés de liberté est obtenu par la rotation du satellite autour de son

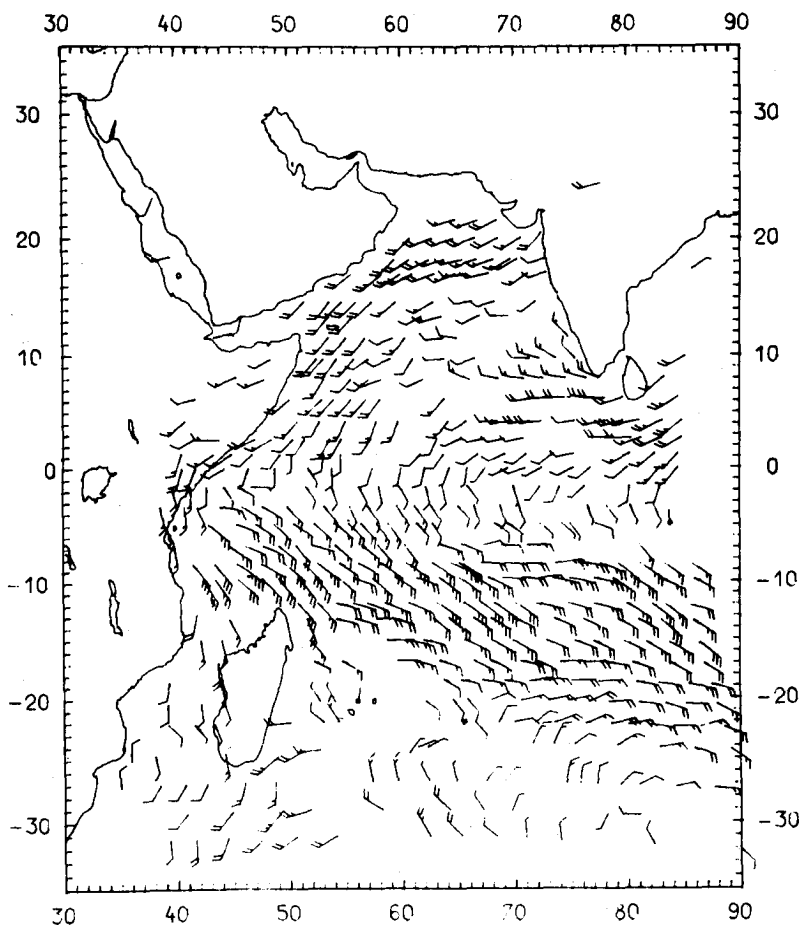


Fig. 6

Figures 6 et 7 : Champs de vent à bas niveau obtenus à partir d'images du satellite géostationnaire GOES/10 avant et après le déclenchement de la mousson indienne d'été en 1979. Comparer la densité d'informations ainsi recueillie à celle des stations météorologiques de l'Océan indien (photos 1 et 2).

axe, l'autre par le basculement progressif d'un miroir. L'élément sensible est un photodétecteur quantique (HgTe — CdTe) maintenu à température très basse par refroidissement radiatif. Les problèmes technologiques de précision géométrique et radio-

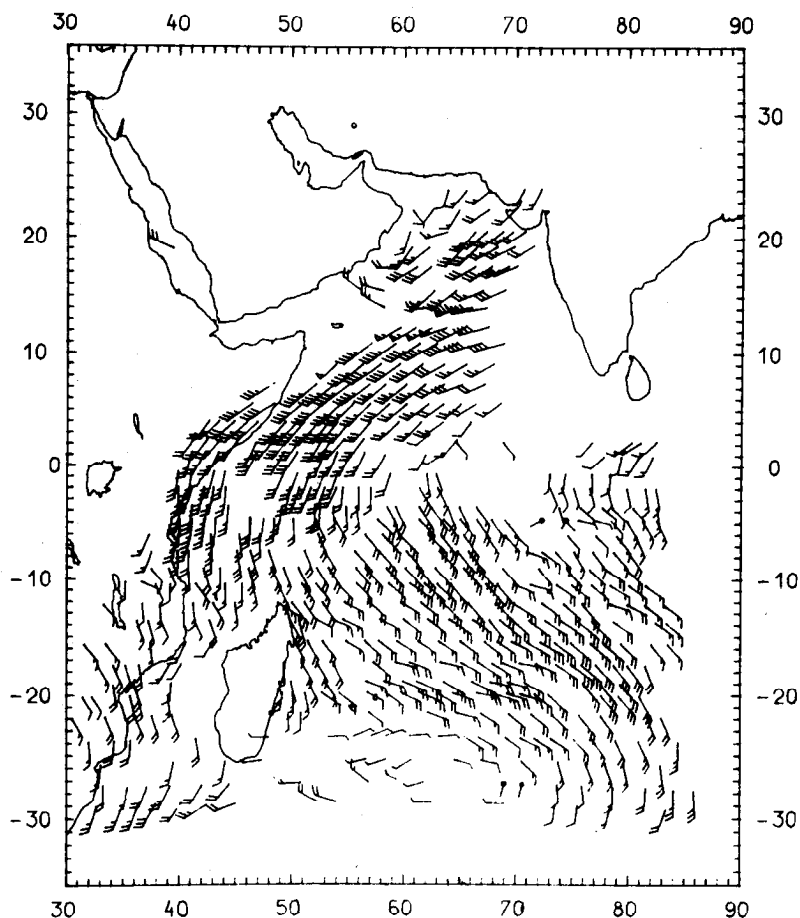


Fig. 7

métrique, de calibration et de transfert de l'information font de ces satellites des instruments à la pointe des techniques optique, mécanique et radiométrique.

5. LA MESURE DE LA TEMPERATURE.

L'analyse du spectre du rayonnement infrarouge qui émerge de l'atmosphère, permet au moins théoriquement la détermination du profil vertical de température : l'intensité radiative monochromatique reçue par un appareil de mesure visant par exemple

au nadir, dans une atmosphère claire, à la longueur d'onde λ peut s'exprimer schématiquement sous la forme :

$$(6) \quad I(\lambda) = \int_0^H B(\lambda, T(z)) g(\lambda, z) dz$$

où B est la fonction de PLANCK, dépendant d'une façon connue de la longueur d'onde λ et de la température T à l'altitude z et g une fonction de poids, indépendante, en première approximation, de la température, mais dépendant fortement de la longueur d'onde λ et de l'altitude z . H désigne la hauteur de l'atmosphère. On conçoit donc que cette équation intégrale puisse être résolue par rapport à l'inconnue $T(z)$, pourvu que l'on dispose de mesures à différentes longueurs d'onde et que l'on connaisse les fonctions de poids correspondantes.

Ce principe, mis en œuvre dès 1969 sur NIMBUS. 4 est utilisé opérationnellement depuis 1972, avec les satellites ITOS. D et suivants : on utilise la bande d'absorption du CO_2 à $15 \mu\text{m}$, mettant à profit la remarquable constance du rapport de mélange de ce gaz dans l'atmosphère. Malgré des résultats initiaux spectaculaires (les premières comparaisons avec les radio-sondages classiques furent excellentes) et des progrès techniques considérables tant sur le plan des sondeurs que sur ceux des méthodes d'inversion, de nombreuses difficultés subsistent : l'une des principales provient de la contamination des mesures par la vapeur d'eau, la couverture nuageuse ou les aérosols (brumes, poussières, etc.).

Les sondeurs les plus performants utilisent jusqu'à 15 canaux dont certains servent à éliminer l'influence de la vapeur d'eau et de la couverture nuageuse. D'autre part, on augmente la densité des mesures en utilisant des sondeurs à balayage au lieu de sondeurs visant au nadir. Enfin l'utilisation de tels sondeurs, à nombre réduit de canaux est prévue sur les satellites géostationnaires de la prochaine génération.

Il est clair que, si l'on choisit des bandes spectrales où les caractéristiques radiatives dépendent d'autres variables que la température, le même type de technique permet d'atteindre d'autres profils verticaux. Cette méthode est actuellement explorée, en particulier sur les satellites scientifiques du type NIMBUS, pour la détermination des profils verticaux d'humidité ou de concentration d'ozone.

Les méthodes d'analyse du rayonnement électromagnétique naturel permettent encore la détermination de bien d'autres paramètres d'intérêt météorologique, mais je ne puis m'étendre trop sur ce sujet : citons simplement l'analyse du rayonnement

infrarouge et du rayonnement millimétrique pour la détermination de la température de surface de la mer, du rayonnement millimétrique pour l'obtention de l'étendue et l'épaisseur des glaces, pour l'analyse de précipitations et l'humidité des sols.

6. LA COLLECTE DE DONNEES.

D'autres paramètres, et parmi eux la pression au sol, ne semblent pas encore accessibles, avec la précision requise, par ce type de méthode. Il reste donc pour l'instant indispensable de mesurer sur place un certain nombre de grandeurs physiques avec des capteurs appropriés. Dans ce domaine aussi, cependant, le satellite météorologique peut jouer, et joue effectivement un rôle de plus en plus important : celui de collecter et disséminer les données, et dans le cas de plates-formes automatiques de mesures mobiles (ballons, bouées), celui de localiser ces plates-formes.

Cette technique a été expérimentée pour la première fois à grande échelle par le satellite français EOLE en 1971, pour assurer la localisation d'une flotte de 500 ballons libres, destinés à étudier la circulation de l'atmosphère au niveau 200 mb (environ 12 000 m). Les ballons porteurs d'une balise radio, étaient localisés par une mesure simultanée de leur distance r au satel-

lite et de la quantité $\frac{dr}{dt}$ obtenue par mesure d'une dérive dop-

pler. Un système moins complexe, utilisant la mesure de $\frac{dr}{dt}$

seulement a été ensuite mis en service opérationnel depuis 1978 sur les satellites de la série TIROS-N. Au cours de la P.E.M.G., ce système (ARGOS) construit par le C.N.E.S., est utilisé de façon satisfaisante pour la localisation et la collecte des données de près de 300 bouées automatiques, permettant d'obtenir dans les zones océaniques de l'hémisphère sud, un réseau de bonne densité pour la mesure de la pression au sol. Le système ARGOS a aussi, en mai-juin 1979, permis la réussite d'une expérience mettant en œuvre 90 ballons libres pour l'étude de la mousson indienne.

Photos 8 et 9 : Deux exemples de collecte de données météorologiques par des plates-formes mobiles localisées et relayées par le système ARGOS.

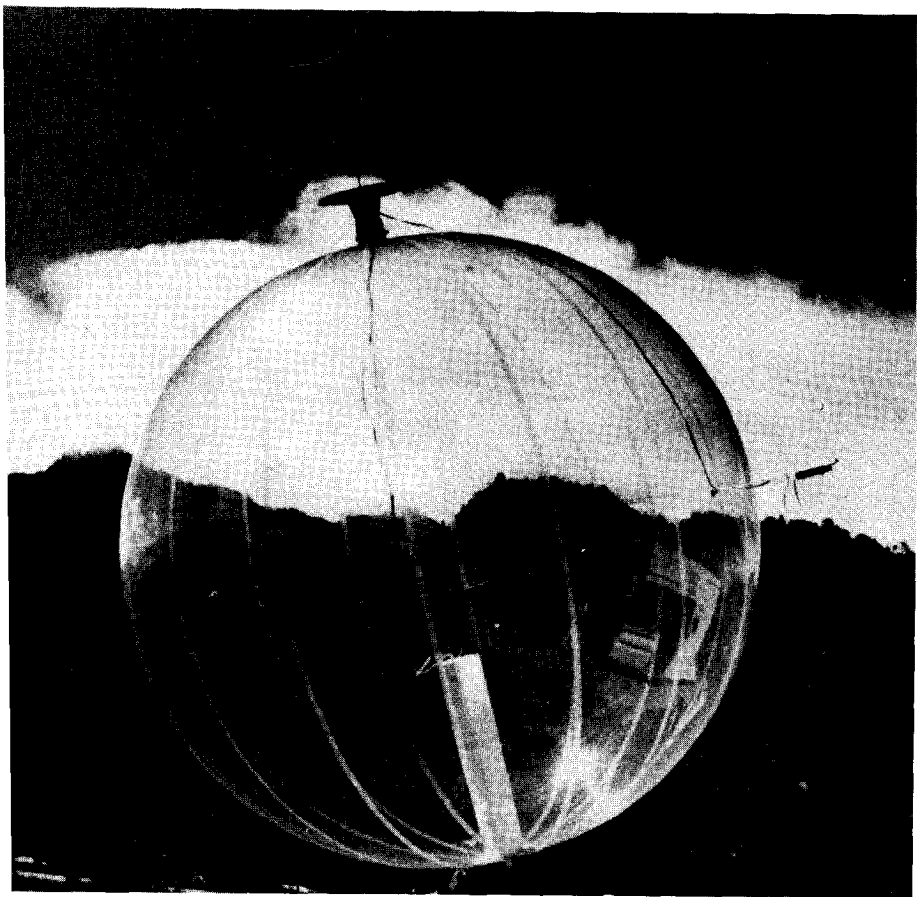


Photo 8

Ballon surpressurisé de 2,5 m de diamètre utilisé pour l'étude de la mousson indienne. Ces ballons flottent à environ 1 000 m d'altitude et emportent des capteurs de pression, température et humidité (expérience BALSAMINE : Laboratoire de Météorologie dynamique - C.N.E.S.).

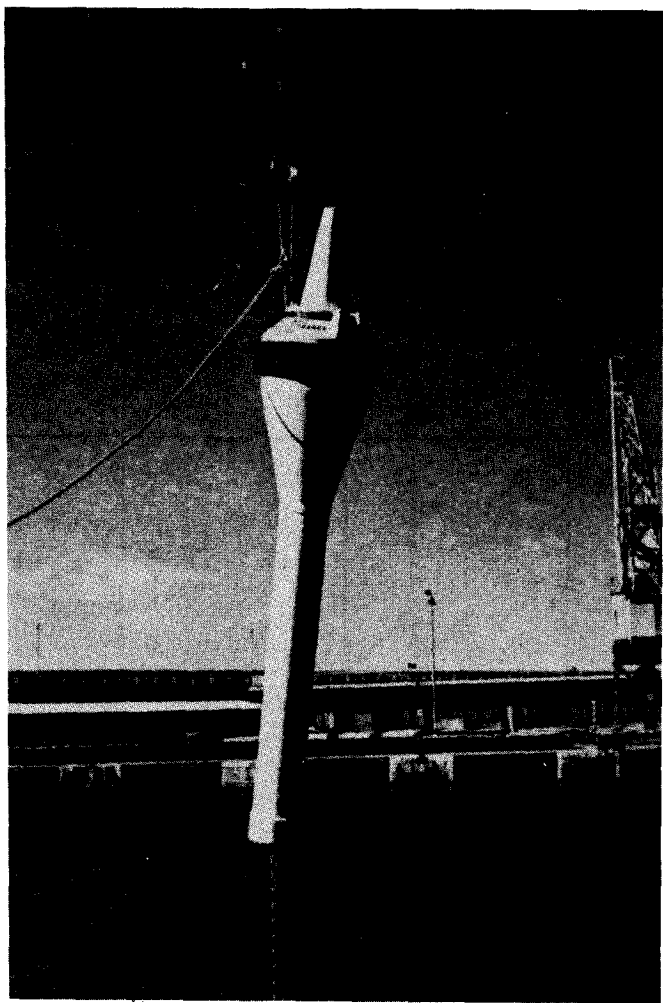


Photo 9

Bouée MARISONDE de la Direction de la Météorologie (E.E.R.M.) utilisée pendant la Première Expérience Météorologique Globale (P.E.M.G.) en 1978-1979 pour mesurer, dans les océans de l'hémisphère sud, la pression atmosphérique au niveau de la mer et la température de la mer.

7. QUELQUES CARACTERISTIQUES COMMUNES AUX SATELLITES METEOROLOGIQUES.

Dans le cours de cet exposé, il est apparu, (du moins je l'espère!), l'intérêt évident des orbites circulaires : les instruments travaillent à distance fixe de leur cible, ce qui en facilite la conception. Par ailleurs, les orbites intéressantes sont de deux types : orbite géostationnaire ou orbite quasi polaire.

L'orbite géostationnaire est forcément dans le plan de l'équateur et son rayon fixé par la durée de la période de révolution (24 h) est de 35 790 km.

Parmi les orbites quasi polaires, certaines sont particulièrement intéressantes et souvent utilisées : ce sont les orbites héliosynchrones, dont la ligne des nœuds dérive d'environ un degré par jour, de façon à ce que le plan de l'orbite fasse toujours le même angle avec la ligne soleil - terre : le satellite passe ainsi tous les jours à la même heure solaire locale en un point déterminé, ce qui facilite l'exploitation météorologique régulière. Ceci n'est évidemment possible que parce que le potentiel d'attraction terrestre n'est pas purement sphérique (sinon l'orbite serait dans un plan fixe par rapport à un repère galiléen).

8. PERSPECTIVES D'AVENIR.

La météorologie spatiale est entrée dans une phase opérationnelle. Cependant, les techniques de mesure sont loin d'être figées, et de nouveaux instruments sont sans cesse expérimentés sur des plates-formes scientifiques. En particulier l'utilisation de méthodes actives (le satellite porte une source de rayonnement dirigée vers la terre et on étudie le rayonnement rétrodiffusé, réfléchi ou réémis) semble prometteuse pour de nombreuses applications météorologiques (pression, vitesse du vent au niveau de la mer, etc.). De même, des techniques actuellement disponibles seulement en laboratoire (détection hétérodyne infrarouge par exemple) prennent pied peu à peu dans les projets spatiaux.

Par ailleurs, les sujets d'étude se multiplient : la compréhension de l'évolution des climats nécessite par exemple une connaissance très approfondie du bilan radiatif de la terre. Il n'est jusqu'aux atmosphères des planètes telle Vénus, dont la météorologie n'apparaisse comme un sujet actuel (projet franco-soviétique Venera). La météorologie spatiale a donc de beaux jours devant elle !

A. BERROIR,

(Université P.-et-M.-Curie - Paris VI).

LES CLICHES ONT LES ORIGINES SUIVANTES :

- 1 et 2 D'après TRIPLET et ROCHE, Météorologie Générale (Ecole de la Météorologie).
 - 3, 4, 5 Documents photographiques L.M.D. d'après des documents de l'Agence Spatiale Européenne.
 - 6, 7, 8 Clichés L.M.D.
 - 9 Cliché Direction de la Météorologie, E.E.R.M.
-