

Nr. 131

DE CONSEQUENCES AGRICOLES POSSIBLES DE L'ABSORPTION
DE CERTAINES RAIES DU SPECTRE PAR LA VAPEUR D'EAU

par

Bernard Primault, Zurich

Juillet 1985

Rayonnement	551.521
Météorologie agricole	551.5:63
Afrique	(6)

Résumé

Un des moyens préconisés par la FAO de lutter contre la faim dans les régions les plus déshéritées de la terre est l'introduction de nouvelles cultures. Dans cette optique, on analyse l'importance de la vapeur d'eau de l'atmosphère pour la transmission du rayonnement dans les diverses parties du spectre (de l'ultra-violet à l'infra-rouge). On relève que des comparaisons de valeurs météorologiques découlant de mesures effectuées au sol ne suffisent pas pour analyser le climat. Il faut leur ajouter des mesures comparatives de l'irradiance dans les raies les plus affectées par la vapeur d'eau (rouge et infra-rouge). On démontre en particulier les différences existant entre les images de satellites prises dans le spectre visible et l'infra-rouge différencié (vapeur d'eau). En appendice, on relève d'autres effets du même genre dus à la pollution atmosphérique.

Zusammenfassung

Eines der Mittel, das von der FAO im Kampf gegen den Hunger in den ärmsten Gebieten der Erde empfohlen wird, ist die Einführung neuer Kulturen. Aus dieser Sicht wird die Bedeutung des atmosphärischen Wasserdampfes für die Strahlungstransmission in den verschiedenen Spektralbereichen (vom Ultraviolett bis zum Infrarot) analysiert. Es wird hervorgehoben, dass Vergleiche von meteorologischen Werten, die aus Messungen am Boden gewonnen wurden, nicht genügen, um das Klima zu analysieren. Als Ergänzung müssen Vergleichsmessungen der Einstrahlung in den Spektrallinien, die am meisten vom Wasserdampf beeinflusst sind (Rot und Infrarot), vorgenommen werden. Es werden insbesondere die Unterschiede zwischen den Satellitenbildern im sichtbaren und im Infrarot-Spektralbereich (Wasserdampf) hervorgehoben. Im Anhang werden andere Effekte ähnlicher Art, die durch die Verschmutzung der Atmosphäre verursacht werden, erläutert.

Riassunto

Un mezzo raccomandato dalla FAO per lottare contro la fame nelle zone più disastrose della terra è dato dall'introduzione di nuove colture agricole. In questa ottica si analizza l'importanza del vapore d'acqua nell'atmosfera per la trasmissione di radiazioni nelle diverse lunghezze dello spettro (dall'ultravioletto all'infrarosso). Si nota infatti, che paragoni di valori meteorologici derivati da misure effettuate al suolo, non sono sufficienti per analizzare il clima. Bisogna aggiungervi delle misure confrontabili dell'irradiazione nelle bande più interessate dal vapore d'acqua (rosso e infrarosso). In particolare modo vengono mostrate le differenze evidenziate dalle immagini satelliti riprese nello spettro visibile e nell'infrarosso differenziato (canale del vapore d'acqua). In appendice si illustrano altri effetti dello stesso genere dovuti all'inquinamento atmosferico.

Summary

One of the means recommended by FAO to alleviate the hunger problem in the poorest regions of the globe is the introduction of new cultures. In this aim, the importance of atmospheric water vapor to the transmission of the radiation is analysed for the different parts of the spectrum (from the ultra-violet to the infra-red). It turns out that comparisons of meteorological values derived from measurements carried out from the ground are not sufficient for climate analysis. One has to supplement them with comparative measurements of the irradiance for the lines which are the most affected by water vapor (red and infra-red). We have in particular considered the differences between the visible and the infra-red satellite imagery. In the appendix, we draw attention to other effects of the same kind due to atmospheric pollution.

De conséquences agricoles possibles de l'absorption de certaines raies du spectre par la vapeur d'eau.

1. Situation du problème

Notre planète compte de nombreuses régions désertiques par nature dues principalement aux mouvements verticaux de l'air (ascendants et surtout descendants). On les trouve à peu près aux mêmes latitudes dans les deux hémisphères: Sahara, Arabie, Pakistan, Indes, Colorado au nord, Kalahari, Australie au sud pour ne citer que les plus importantes et les plus connues.

En bordure de ces régions et en direction de l'équateur, on rencontre des zones affectées par des périodes de sécheresse plus ou moins longues, mais où le climat permet toutefois certaines cultures. Ces zones sont donc affectées par des famines plus ou moins rapprochées et de plus ou moins longue durée. On a cherché à y remédier en forant des puits pour amener vers la surface l'eau de nappes souterraines, très souvent fossiles.

A part l'importation de denrées alimentaires, palliatif onéreux et inefficace à la longue, et une irrigation problématique, on a cherché à introduire de nouvelles cultures pour y lutter contre la faim.

Pour éviter autant que faire se peut des échecs, on s'est efforcé de tenir compte des conditions locales ou au moins régionales de sol et de climat dans le choix des cultures et des variétés introduites. En ce qui concerne le climat, les comparaisons faites ne sont cependant pas toujours représentatives.

En effet, les relevés dont on dispose ne concernent pratiquement que la partie de l'atmosphère en contact direct avec le sol: les prescriptions internationales stipulent que les mesures des principaux paramètres météorologiques doivent être effectuées à 2 m de hauteur. Les relevés sont ainsi, il le semble tout au moins, comparables d'une région à l'autre.

Pourtant, si ce raisonnement est valable pour la majorité des éléments constitutifs du climat (température, humidité de l'air, précipitations, vent, durée d'insolation), il ne l'est pas pour tous.

Dans le développement des plantes, le rayonnement joue un rôle très important. En climatologie, on mesure le rayonnement global pour caractériser ce paramètre météorologique. Ce faisant, on intègre l'énergie totale reçue par une surface plane horizontale, mais sans distinction des variations dont peuvent être affectées les différentes parties du spectre. Une variation de ce rayonnement global peut provenir non d'une baisse ou d'une hausse généralisée du niveau énergétique, mais d'une modification (en général une baisse), voire de l'extinction totale, d'une seule raie pas nécessairement située dans le spectre visible.

Or, les plantes réagissent de façon très subtile aux impulsions reçues. Sauberer et Härtel le signalaient en 1959 déjà. Matsuda et Baumgartner (1975) soulignent le même phénomène en regard des forêts. Plus près de nous encore Schwank (1984) a démontré la sensibilité au rouge du trèfle blanc (*Trifolium repens* L.) dans sa phase d'allongement. Des comparaisons de l'intensité du rayonnement global ne sauraient donc suffire lors de la planification des cultures et surtout lors de l'introduction de nouvelles variétés (cultivars). Bien plus, des études systématiques du spectre naturel doivent être préalablement effectuées pour savoir si, sous cet aspect particulier, les conditions ambiantes sont comparables entre la région d'origine (ou de sélection/croisement) et la région prévue d'extension.

2. La teneur en eau de l'atmosphère et son influence sur l'intensité du rayonnement

On sait de longue date que l'eau en suspension dans l'air affecte le rayonnement du soleil. Pourtant, dans la plupart des cas, on ne considère que l'eau condensée, c'est-à-dire les nuages.

Dans le code synoptique, établi en priorité pour répondre aux besoins de la prévision du temps et du trafic aérien, on distingue trois groupes principaux de nuages: bas, moyens et élevés. Dans chaque groupe, on a en outre établi neuf classes afin de mieux caractériser la vision du ciel. Mais, l'observation de type synoptique est, par sa définition même, une observation faite au et du sol. Il suffit donc que la couche inférieure de nuages soit continue, pour rendre les couches plus élevées invisibles, même si la première est relativement ténue.

En outre, l'observation synoptique est toujours ponctuelle. Seule la confrontation de plusieurs observations donne une vue régionale par la constitution de cartes météorologiques (fig. 1). Cependant, là où la densité de la population est faible, le nombre de points d'observation est généralement faible lui aussi.

On a pensé parer à ces deux inconvénients en utilisant des satellites spéciaux qui photographiaient tout d'abord des régions particulières par défilements successifs, puis presque un hémisphère par position géostationnaire.

Si l'utilisation de telles plateformes d'observation comble effectivement la seconde lacune mentionnée, elle ne fait que déplacer le premier de ces inconvénients. En effet, les images de satellites prises dans le spectre visible, et ce sont celles-là seules dont il est d'abord question ici, ne font rien d'autre que l'observateur d'une station synoptique: observer l'ensemble du ciel. Les différences sont cependant de deux ordres: la direction du regard et l'échelle de grandeur.

L'observateur examine le ciel de bas en haut, le satellite de haut en bas. Si les nuages forment trois couches distinctes dont la plus basse et la plus élevée sont compactes et l'intermédiaire présente des nuages dispersés ou forme une strate continue, l'observateur ne mentionnera dans son message que des nuages bas et l'image de satellite ne présentera que des nuages élevés. Ni l'un ni l'autre ne mentionnera par contre la couche intermédiaire.

Quant à l'échelle de grandeur, elle découle de soi: la vue de l'observateur est limitée par la visibilité oblique et l'horizon, le satellite embrasse pratiquement la moitié du globe terrestre (fig. 2).

Pour atteindre une plus grande information quant aux nuages, on a équipé les derniers satellites lancés de caméras permettant une analyse différenciée du rayonnement infra-rouge émis par la terre. Ce rayonnement varie en intensité d'une part en fonction de la température de la surface et d'autre part, mais dans certaines raies seulement (voir plus loin chapitre 3), de la quantité d'eau contenue dans l'atmosphère sous forme liquide ou gazeuse (fig. 3). Une telle image ne permet toujours pas de différencier plusieurs couches nuageuses si la plus élevée est compacte, mais elle est représentative pour illustrer notre propos.

Le rayonnement dont jouissent les plantes pour leur développement a deux origines: le soleil lui-même et le milieu entourant la plante. On distingue ainsi entre le rayonnement direct et le rayonnement diffus. Tous les deux, ainsi que le rayonnement global, sont en général mesurés sur une surface horizontale. Si l'on dispose de valeurs mesurées d'une part du rayonnement direct et d'autre part du rayonnement diffus, le rayonnement global ne sera pas la somme arithmétique des deux, mais la somme du rayonnement diffus et du rayonnement direct multiplié par le cos. de l'angle du soleil par rapport au zénith.

Selon la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon (latitude du lieu, saison, heure du jour) l'angle que forment les rayons du soleil et le plan tangent à la surface du sol (horizontale) varie de 0° à un maximum variable. En outre, des obstacles les plus divers, en particulier des nuages, des bâtiments ou des feuilles peuvent intercepter plus ou moins complètement ce rayonnement. Malgré ces ombres projetées, on constate de jour un certain rayonnement. Ainsi, même par ciel couvert d'épaisses nuées, on perçoit le lever et le coucher du jour. Il y a donc alors toujours un certain rayonnement diffus. Mais la qualité de ces deux rayonnements direct et diffus, c'est-à-dire l'intensité du rayonnement ou irradiance dans les différentes lignes du spectre total (de l'ultra-violet à l'infra-rouge) n'est pas la même dans les deux cas.

A la figure 4, nous avons tracé les courbes théoriques d'irradiance du rayonnement global et direct en fonction de la longueur d'onde et cela pour un soleil situé à 45° au-dessus de l'horizon donc ayant un angle zénithal de 45° ($90-45$) et en admettant (pure vue de l'esprit) une atmosphère absolument dépourvue de vapeur d'eau. On pourrait tirer de cette figure que, dans ces conditions, l'irradiance du rayonnement global n'est plus grande que celle du rayonnement direct que pour les raies de l'ultra-violet, du violet et du bleu. Dès que l'on passe dans le vert, il y aurait inversion. Ceci n'est qu'apparent car le rayonnement global est calculé pour une surface horizontale. Par contre, le rayonnement direct n'atteint celle-ci qu'obliquement. En fait, il ne faudrait, dans cet exemple ne retenir que le 70% ($\cos 45 = 0,70$) des valeurs calculées du rayonnement direct pour comparer les 2 courbes. Cette figure nous montre également que l'irradiance ne suit pas une courbe continue, mais présente de nombreuses dépressions même dans une atmosphère pure et exempte de vapeur d'eau.

Si la part de vapeur d'eau augmente, l'aspect général de ces deux courbes ne change guère: On retrouve les pointes aussi bien que les dépressions aux mêmes endroits (fig. 5). Si les premières ne se sont pas modifiées (à première vue tout au moins), il n'en va pas de même pour les secondes: elles sont devenues encore plus nettes.

Si, retenant des fréquences (longueurs d'onde) déterminées, on calcule l'irradiance en fonction de diverses teneurs en vapeur d'eau de l'atmosphère entière, on constate pour certaines d'entre elles un fléchissement qui peut dépasser la moitié de la valeur initiale (cf fig. 6, 0.937 et 1.12 microns), voire atteindre l'extinction presque complète (cf fig. 6, 1,35 et 1,86 microns). Nous verrons plus loin les répercussions que cela peut avoir sur la végétation (cf. chapitre 6).

3. L'importance de la hauteur du soleil

Nous avons souligné plus haut que la part du rayonnement direct dans le rayonnement global diminuait en fonction du cos de l'angle au zénith. Cette part est donc maximum si le soleil est situé directement au-dessus du lieu considéré ($\cos 0^\circ = 1$) et nulle si le soleil est à l'horizon ($\cos 90^\circ = 0$).

Nous avons vu au début que notre propos se référerait avant tout aux zones de famines endémiques, celle du Sahel plus particulièrement. Cette région se situe de part et d'autre du 10ème parallèle nord. Voyons ce qui s'y passe au cours de l'année quant aux possibilités d'absorption de certaines raies du spectre.

Au solstice d'été (21 juin), le soleil se trouve par $23^\circ 27'N$, c'est à-dire au nord du Sahel et l'angle zénital minimum y est au midi vrai de 13° environ. Au solstice d'hiver (21 décembre) le soleil est situé par $23^\circ 27'S$, c'est-à-dire au sud de la région et plus bas sur l'horizon. L'angle zénital du midi vrai est alors de 33° environ. Entre ces deux positions extrêmes, le soleil franchit la zone et, deux fois l'an, l'angle zénital y devient nul au midi vrai. L'irradiance du rayonnement direct n'atteint que 97% au solstice d'été et 84% au solstice d'hiver de la valeur qu'elle a au moment où le soleil franchit le 10ème parallèle (16 avril et 28 août).

L'extinction étant fonction de l'angle au zénith, peu importe que le soleil soit alors situé au nord ou au sud du point de référence. Le raisonnement qui suit est donc non seulement valable pour tous les

points situés par 10° de latitude nord, mais aussi pour ceux situés par 10° de latitude sud, (dates extrêmes inversées s'entend).

Quant aux variations de l'irradiance diffuse, elle n'est, sous cette latitude, que peu influencée par l'angle zénithal du soleil, aussi cette fluctuation peut-elle être négligée.

Aux figures 7, 8 et 9 nous donnons la modification de l'irradiance pour le rayonnement global en fonction de la longueur d'onde, et pour le passage d'une atmosphère sèche à une atmosphère chargée de vapeur d'eau.

Malgré la variation de l'angle au zénith (0° fig. 7, 13° fig. 8 et 33° fig. 9), on ne décèle pas de grandes différences ni entre la fréquence des raies absorbées ni entre l'intensité de l'extinction. Par conséquent, les modifications spectrales du rayonnement global avec l'humidité de l'air sont pratiquement indépendantes de la saison.

4. Origine de l'humidité

Une carte climatologique de la région du Sahel montre une zone où les précipitations sont rares ou peu abondantes. Ceci est confirmé par les cartes du tapis végétal. Les séries climatologiques disponibles nous montrent en outre que le degré hygrométrique de l'air y est très faible durant de nombreux mois (cf. OMM 1971, Landsberg 1972).

On pourrait en conclure hâtivement que l'on a affaire à de l'air très sec, c'est-à-dire que l'irradiance au sol serait très voisine de celle calculée sans vapeur d'eau et cela pour toutes les fréquences (ou longueurs d'onde) du spectre total.

Or, la figure 3 nous révèle une très large bande d'air chargé d'humidité qui s'étend pratiquement de 10°S à 20°N et qui correspond à la zone de convergence inter-tropicale et aux contre-alizées. La première est visible à la fig. 2 sous forme de cumulo-nimbus alignés alors que les seconds n'y sont marqués par aucune nébulosité.

Ainsi, bien que les relevés effectués au sol et les images satellitaires dans le visible ne décèlent rien de particulier, la répartition de l'irradiance est notablement différente sur la zone sahélienne de ce qu'elle est par exemple sur le sahara proprement dit (aux alentours du 23ème parallèle nord).

5. Conséquences agronomiques

Dans leurs efforts pour lutter contre la famine, la FAO et l'OMM préconisent l'introduction de nouvelles cultures vivrières dans les pays en développement. Des études climatologiques préalables jouent un rôle non négligeable lors du choix qui est alors indispensable. Pourtant, on part exclusivement de comparaisons entre les conditions météorologiques régnant au sol, surtout de comparaisons de paramètres classiques: précipitations, température, humidité de l'air, durée d'insolation. On en tire en outre, quelques informations dérivées telles que évapotranspiration, bilan hydrique, etc.

Même en prenant de nombreuses précautions, on doit quelques fois enregistrer des échecs qui restent longtemps inexplicés.

En analysant très exactement les raisons de tels échecs, on est souvent frappé de lire que telle plante n'a pas franchi un certain stade phénologique dans sa nouvelle ambiance. Il s'agit généralement du stade de la floraison (riz R5 au Vietnam, blé mexicain au Niger par exemple). Ainsi, après un départ prometteur (bonne germination et élongation satisfaisante), le développement normal des plantes est comme stoppé sans que les individus semblent affectés dans leur ensemble (changement de couleur, de la turgescence ou autres).

Des travaux récents (Senger 1984, Schwank 1984) ont montré combien les plantes réagissent de façon subtile à la lumière reçue. Si l'allongement du trèfle blanc est commandé par la lumière rouge (Schwank 1984), pourquoi la phase de floraison de certaines variétés de céréales ne nécessiterait-elle pas un seuil minimum d'irradiance d'une ou de plusieurs lignes spécifiques situées justement dans le rouge et l'infra-rouge, lignes affectées par la présence de vapeur d'eau dans la haute atmosphère.

6. Conclusion

Lors de l'introduction de nouvelles cultures ou même de nouvelles variétés (cultivars), d'une culture déjà pratiquée, voire ancestrale, il ne suffit pas d'étudier si les conditions météorologiques et climatologiques au sol sont semblables entre pays (ou région) d'origine et nouvel emplacement. Il est indispensable de montrer que le spectre du rayonnement est comparable lui aussi et cela non seulement dans sa totalité énergétique (rayonnement global, diffus et direct en $W h m^{-2}$), mais aussi, voire surtout, dans sa composition.

7. Appendice

La vapeur d'eau n'est pas le seul gaz qui ait la propriété d'absorber le rayonnement d'une ou de plusieurs raies spécifiques du spectre. Le CO₂ en est un autre dont la teneur peut varier fortement et de façon suffisamment durable pour être comparé ici à la vapeur d'eau. Par conséquent, les conclusions exprimées ci-dessus, sont également valables pour cet important composant de l'atmosphère.

Des particules très ténues en suspension dans l'atmosphère ont, elles aussi, la propriété de modifier la composition du rayonnement et cela à tel point que cela devient visible à l'oeil nu. Rappelons ici le "soleil bleu" (Angström 1951, Baumbach 1951, Brunner-Hager 1951) dû, en Europe les 25, 26 et 27 septembre 1950, au passage à haute altitude d'un nuage de fumée provenant de vastes incendies de forêts au Canada.

En 1883 le volcan Perbuatan de l'île de Krakatau et tout près de nous (1982) celui de El Chichon ont projeté dans l'atmosphère et jusque dans la stratosphère, des quantités inimaginables de particules solides. Celles-ci ne se sédimentent que très lentement. Ainsi, nous possédons des relations du premier de ces phénomènes et des mesures du second montrant que la diminution du rayonnement peut durer plusieurs mois, voire des années (fig. 10 et Uchino et al. 1984).

8. Remerciements

Nous tenons à exprimer ici nos remerciements à M. Heimo de la section de météorologie technique de l'ISM qui a bien voulu se charger des calculs d'extinction et de leur représentation graphique.

9. Bibliographie

- Angström A. 1951. The blue sun of September 1950. Tellus. 3(3): 135-140
- Baumbach S. 1951. Die Erklärung der roten und blauen Sonne. Berichte des Deutschen Wetterdienstes in der U.S.-Zone. 5(35): 228-232
- Brunner-Hager W. 1951. Endphase des Phänomens der blauen Sonne, 27. Sept. 1950. Verhandlungen der Schw. Naturforschenden Gesellschaft, Luzern: 119-120

- Landsberg H.E. 1972. World survey of Climatology, Vol. 10.
Climates of Africa.
Elsevier Publishing Company, Amsterdam - London -
New York: 603
- Matsuda M. und Baumgartner A. 1975. Oekosystematische Simulation
des Nutzeffektes der Sonnenenergie für Wälder.
Forstwirtschaftliches Centralblatt. 94(2-3):
89-104
- OMM 1971. Normales climatologiques, (CLINO).
WMO/OMM - No 117. TP 52.
- Reiter R., Jäger H., Carnuth W. and Funk W. 1983. Effects of Vol-
canic Eruptions on Concentration and Vertical
Profiles of the Stratospheric Aerosol and Conclu-
sions as to Optical Depth, Transmission and Pos-
sible Climate Changes.
OMM, Environmental Pollution Monitoring and
Research Programme. No 20.
- Sauberer F. und Härtel O. 1959. Pflanze und Strahlung.
Akademische Verlagsgesellschaft Geest und Portig
K.-G. Leipzig. Probleme der Klimatologie. 5:
268
- Schwank O.F. 1984. Einfluss von Strahlung und Temperatur auf das
Wachstum von Weissklee (*Trifolium repens* L.) in
verschiedenen bewirtschafteten Naturwiesen.
Doktorarbeit an der ETHZ.
- Senger H. 1984. Blue Light Effects in Biological Systems.
A paraître dans: Proceedings in Life Sciences.
Springer Verlag. Berlin, Heidelberg, New York,
Tokyo.
- Uchino O., Maeda M., Tokunaga M., Seki K. and Hayami T. 1984.
UV Lidar Measurement of Stratospheric Aerosol
Layer. Observational Results at Fukuoka (33,6°N)
during October 1982 through May 1983.
Journal of the Meteorological Society of Japan.
62 (2): 357-362
- Adresse de l'auteur: Bernard Primault, Dr. Ing.
Institut suisse de météorologie
Krähbühlstrasse 58
CH - 8044 Zürich

Sommaire

1. Situation du problème	1
2. La teneur en eau de l'atmosphère et son influence sur l'intensité du rayonnement	2
3. L'importance de la hauteur du soleil	5
4. Origine de l'humidité	6
5. Conséquences agronomiques	7
6. Conclusion	7
7. Appendice	8
8. Remerciements	8
9. Bibliographie	8

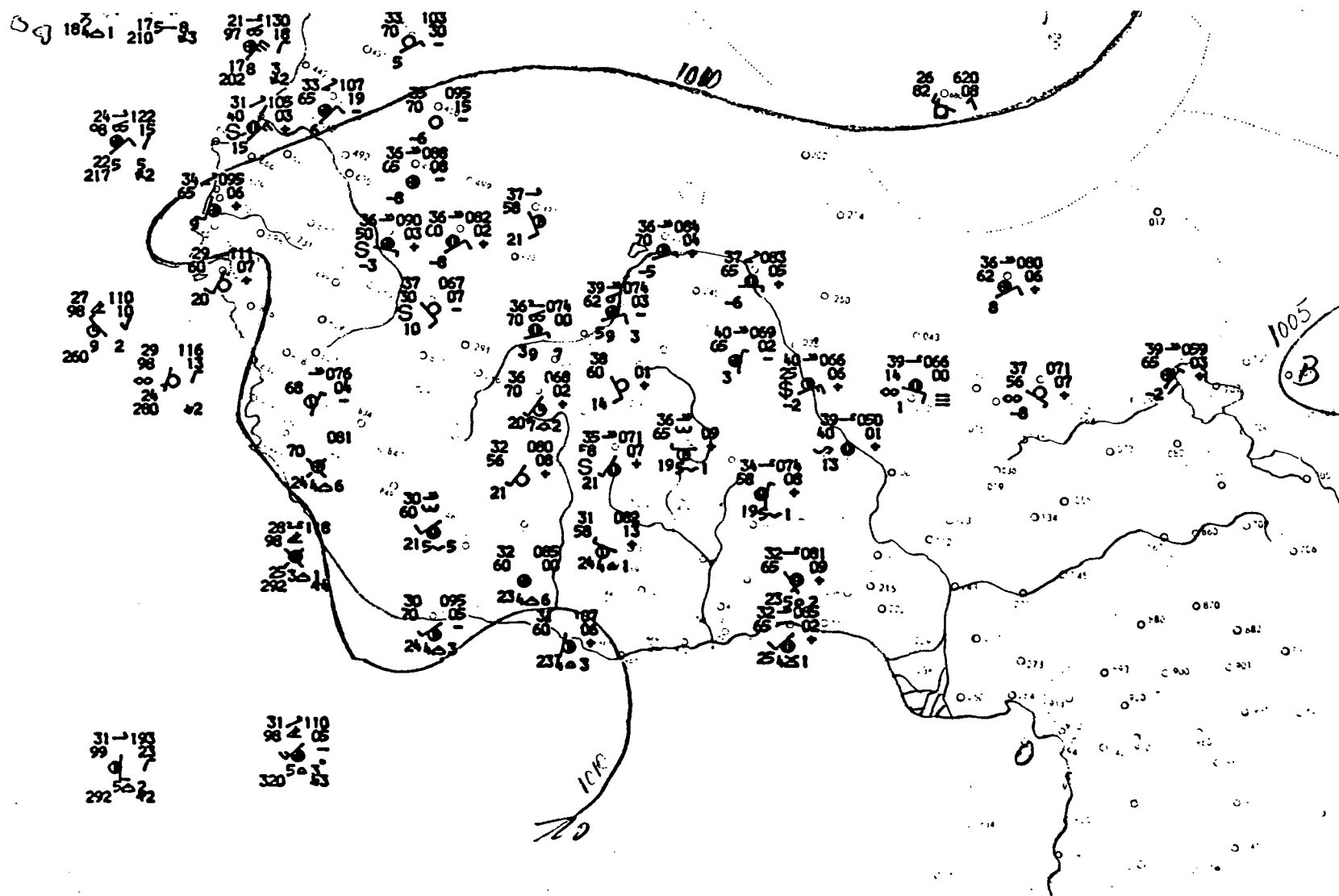


Figure 1 Carte météorologique de la région du Sahel le 3 avril 1984 à Ohtu. (Deutscher Wetterdienst).

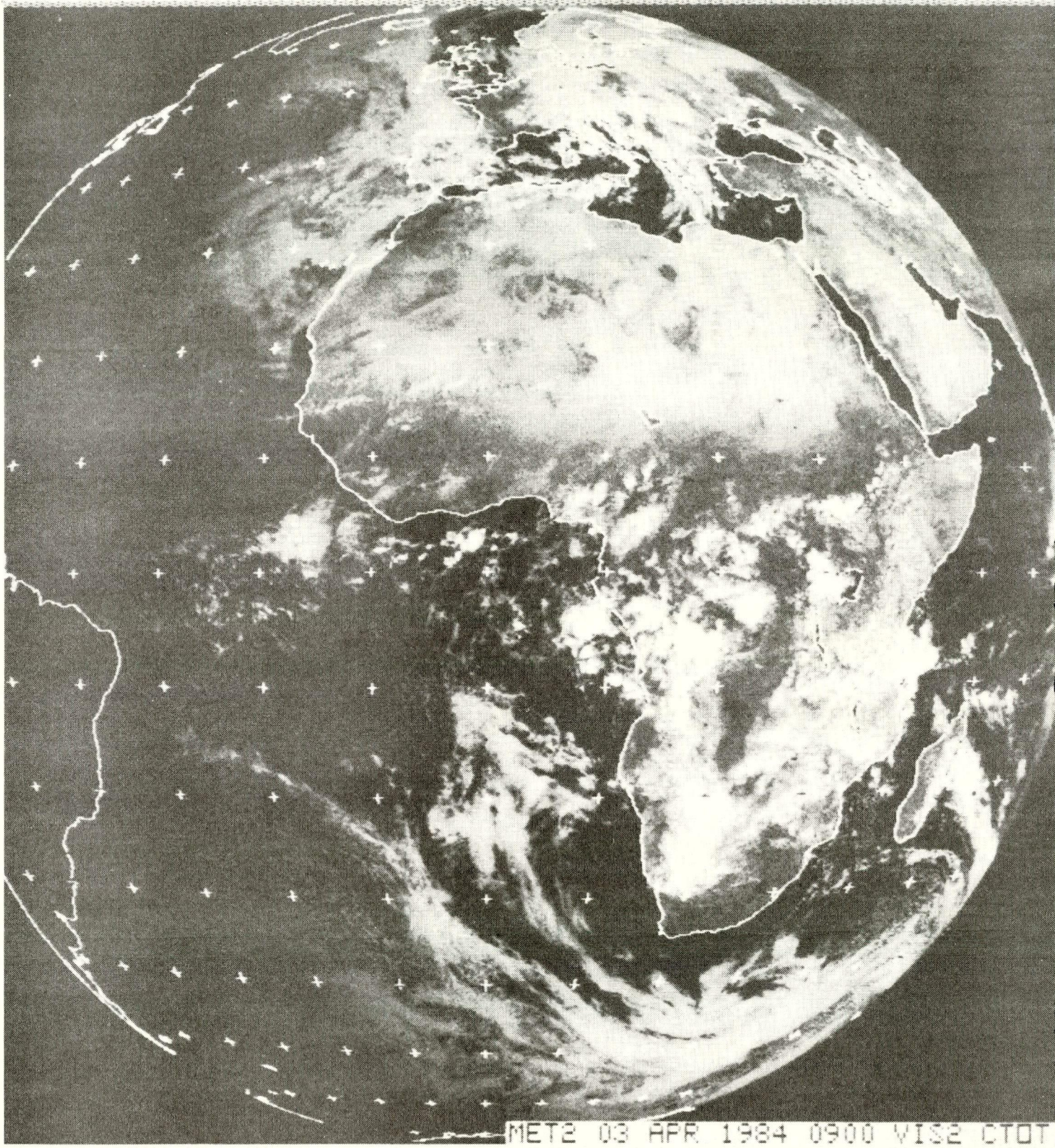


Figure 2 Image issue de METEOSAT 2, le 3 avril 1984 à 9htu dans le spectre visible.

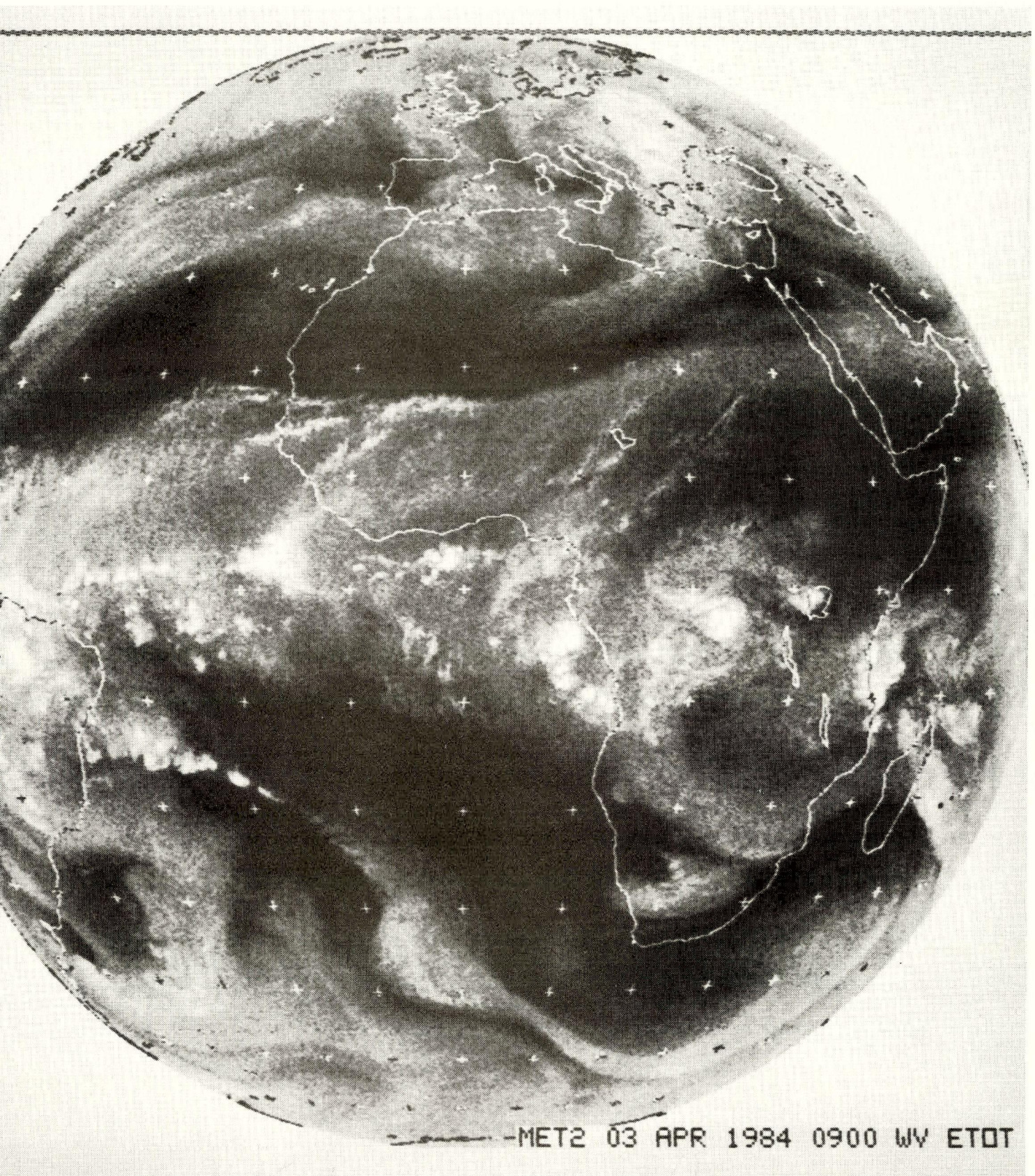
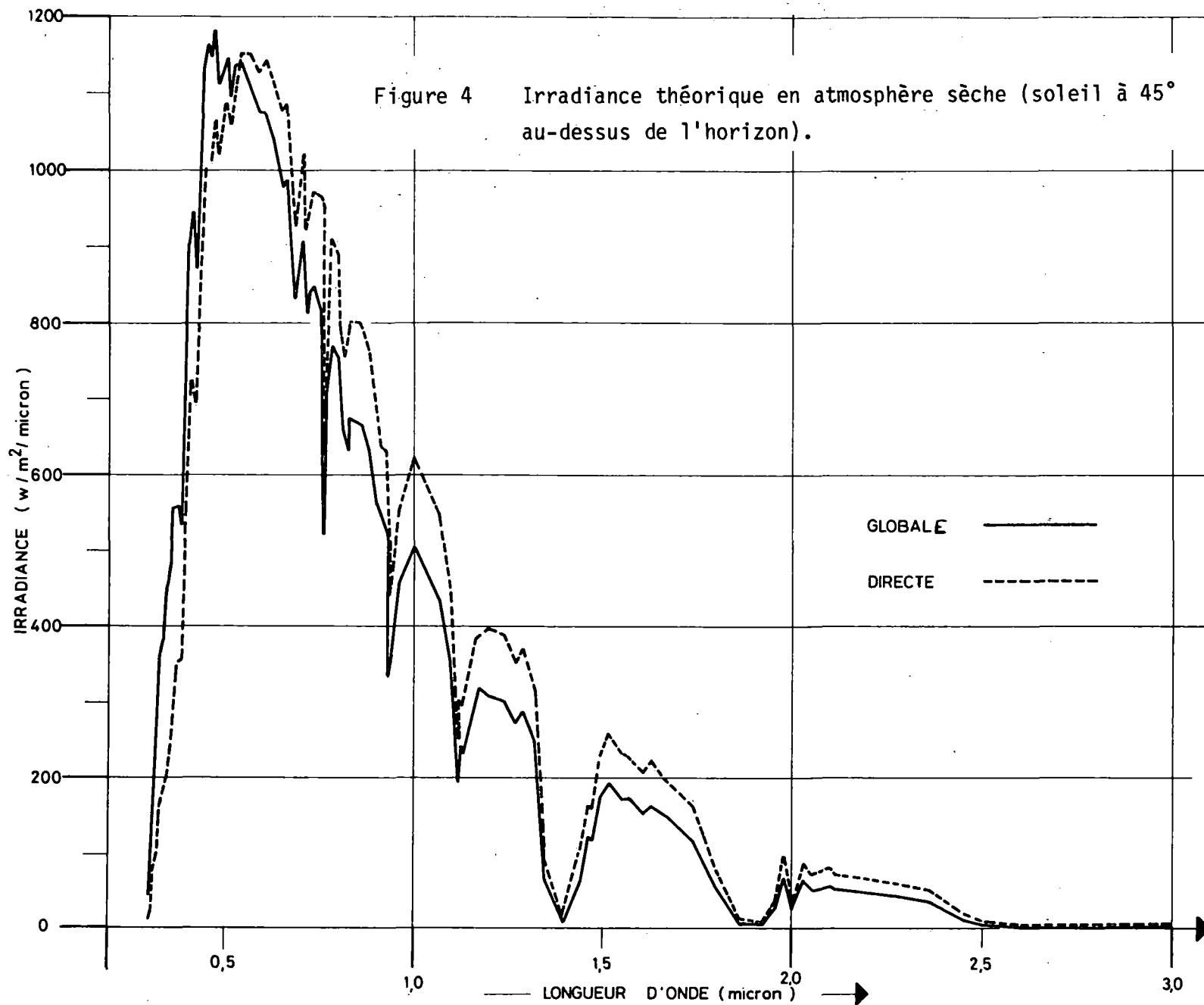
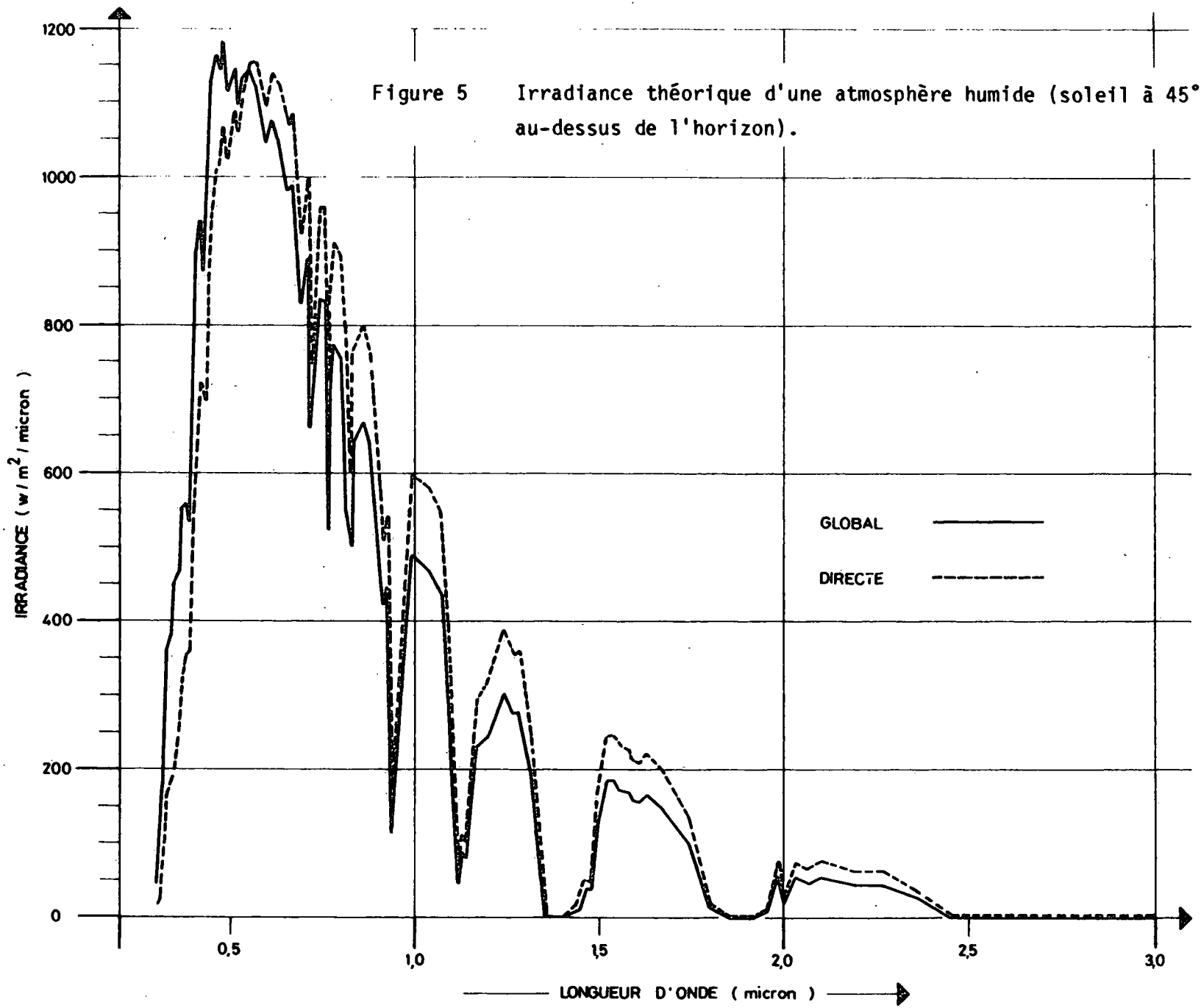


Figure 3 Image issue de METEOSAT 2, le 3 avril 1984 à 9htu: vapeur d'eau





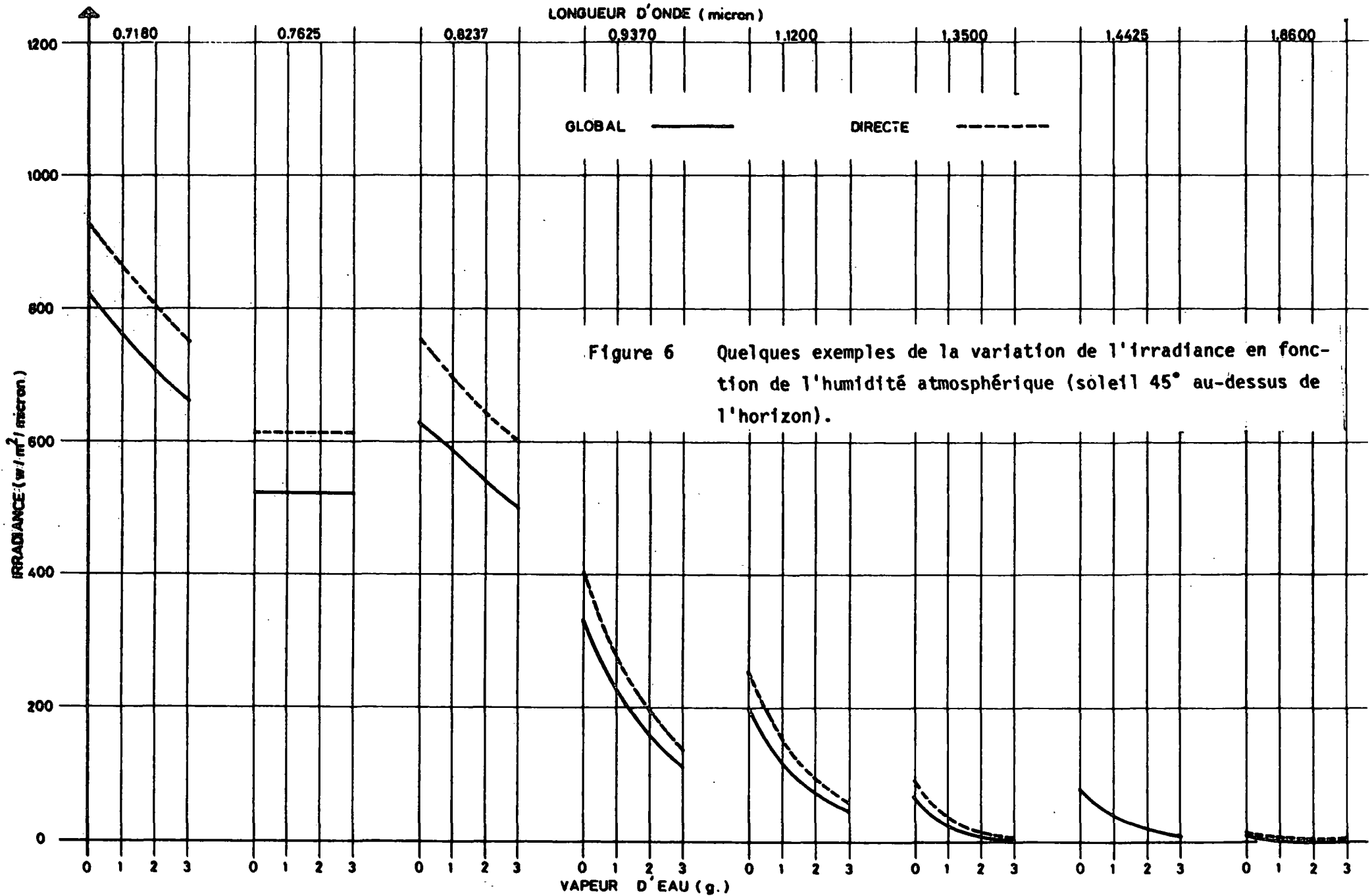
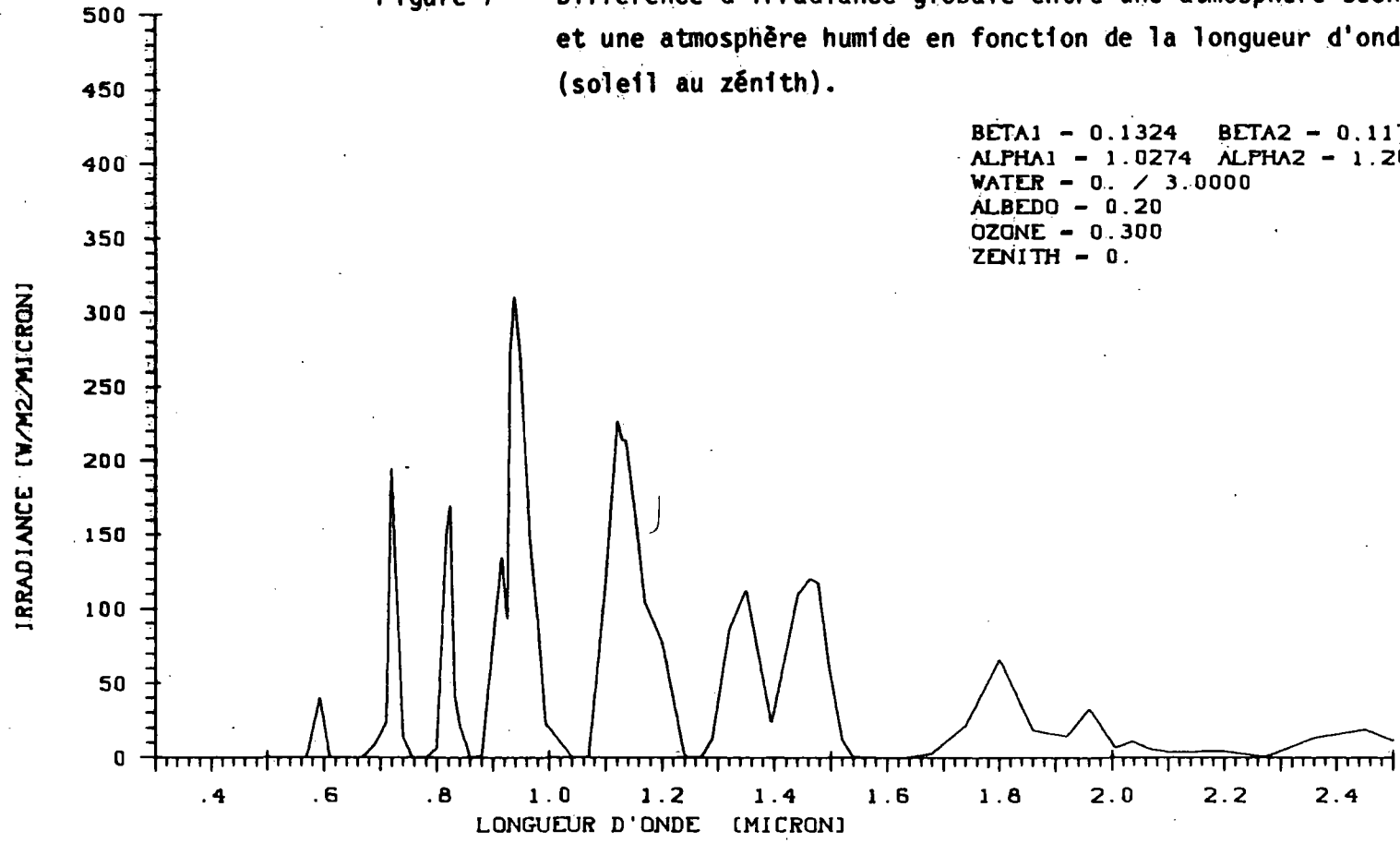


Figure 6 Quelques exemples de la variation de l'irradiance en fonction de l'humidité atmosphérique (soleil 45° au-dessus de l'horizon).

Figure 7 Différence d'irradiance globale entre une atmosphère sèche et une atmosphère humide en fonction de la longueur d'onde (soleil au zénith).



BETA1 - 0.1324 BETA2 - 0.1170
ALPHA1 - 1.0274 ALPHA2 - 1.2060
WATER - 0. / 3.0000
ALBEDO - 0.20
OZONE - 0.300
ZENITH - 0.

SERIMOD

Figure 8 Différence d'irradiance globale entre une atmosphère sèche et une atmosphère humide en fonction de la longueur d'onde (soleil à 77° au-dessus de l'horizon).

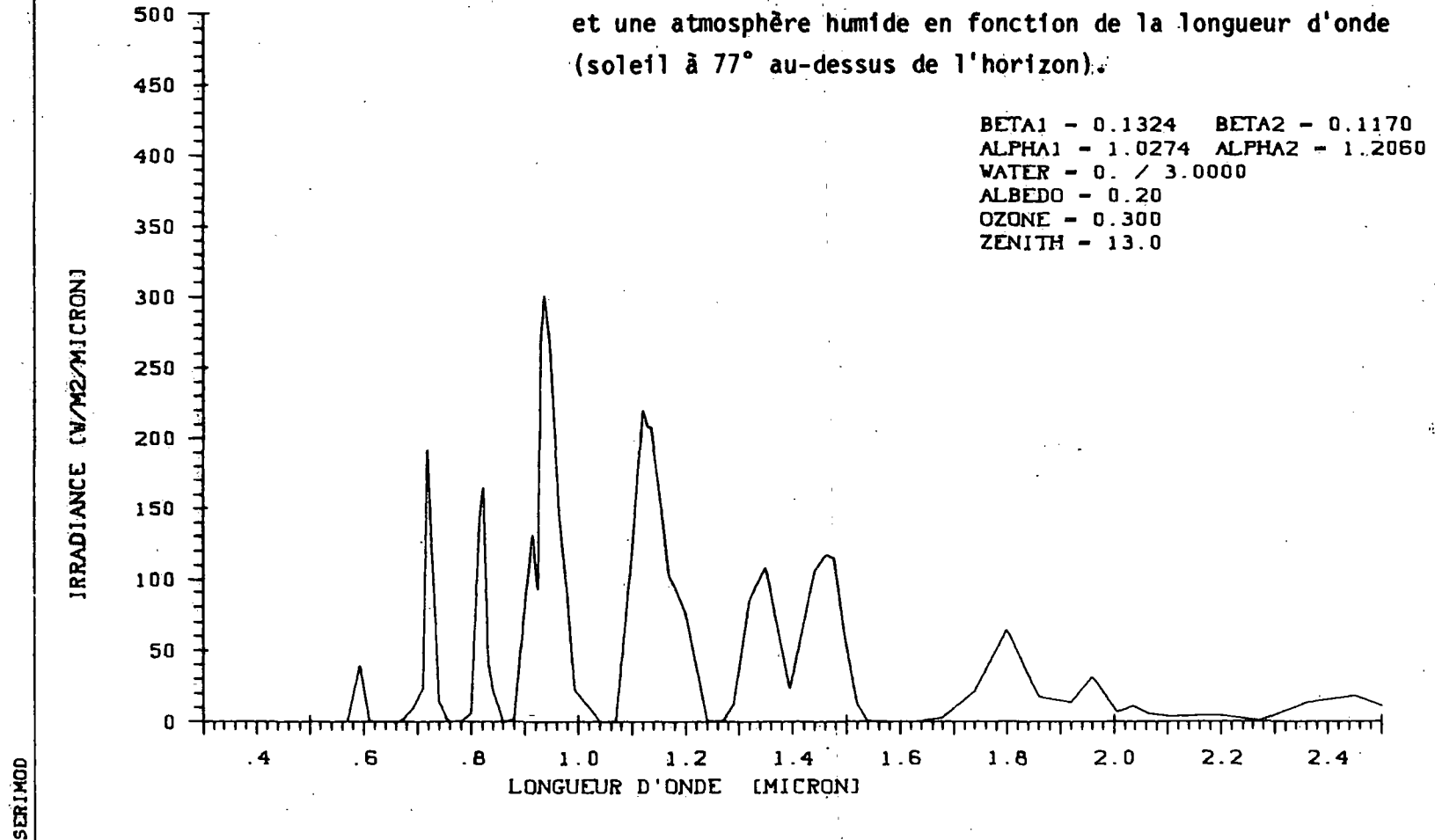
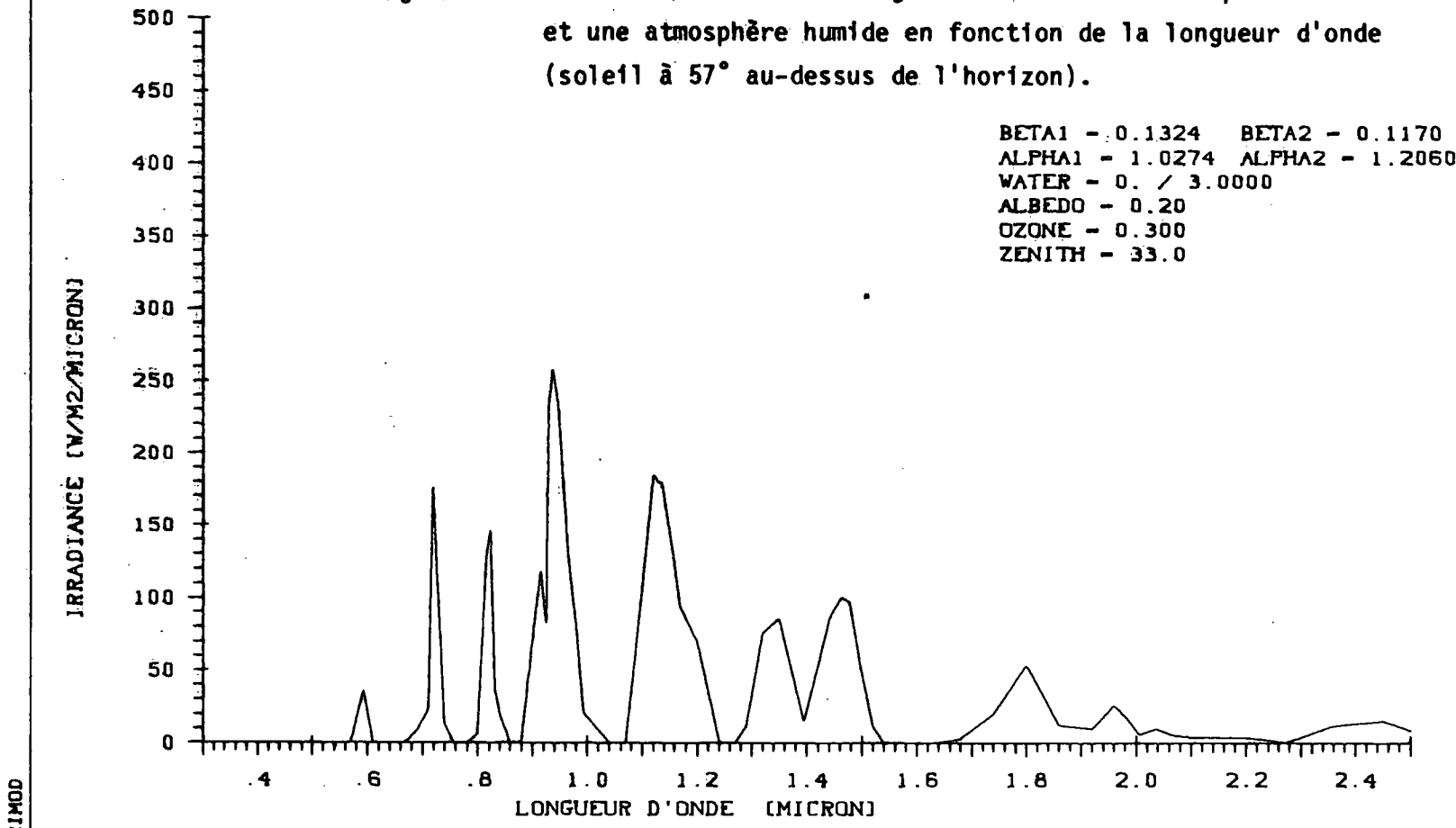


Figure 9 Différence d'irradiance globale entre une atmosphère sèche et une atmosphère humide en fonction de la longueur d'onde (soleil à 57° au-dessus de l'horizon).



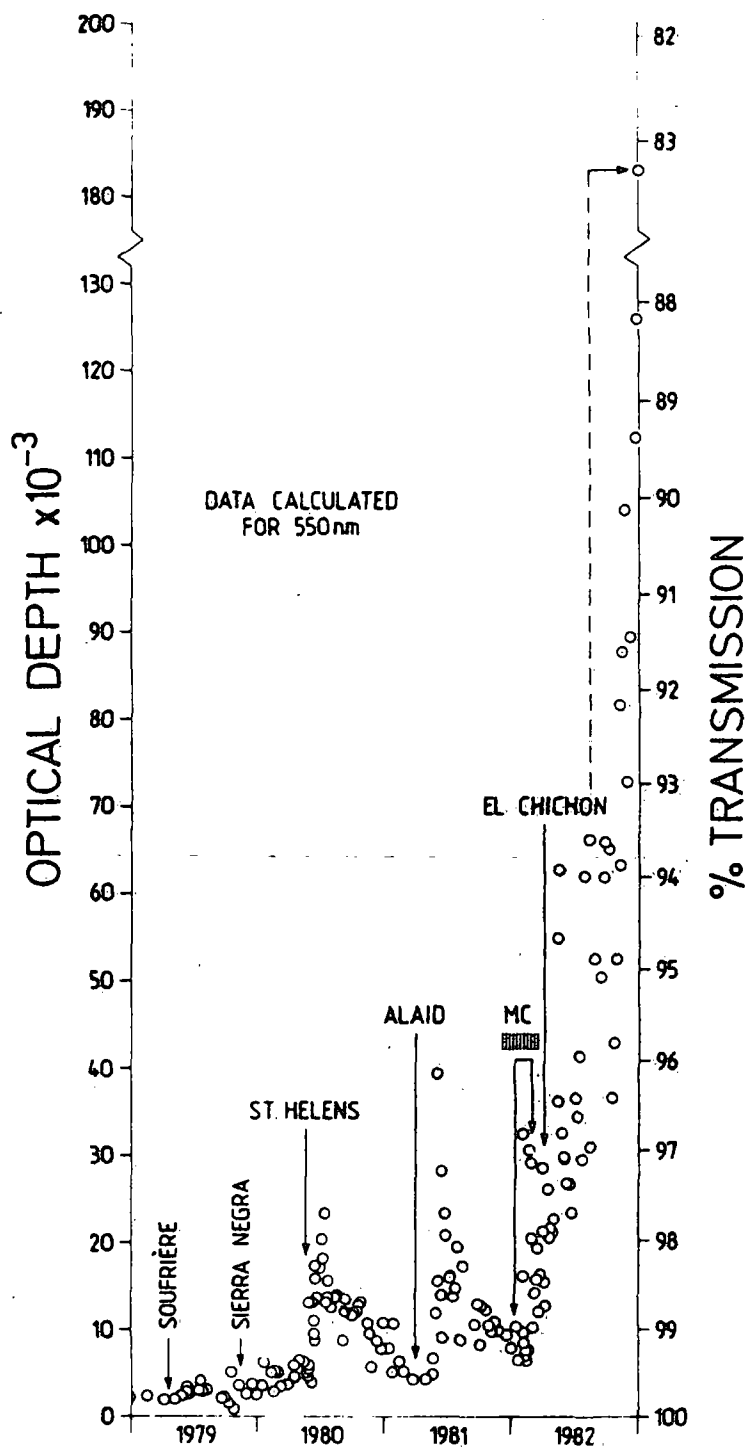


Figure 10 Variation de la transmission lumineuse de l'atmosphère mesurée à Garmisch-Partenkirchen après les dernières éruptions volcaniques.

