

TRANSPORT DE LA VAPEUR D'EAU LORS DES ADVECTIONS FROIDES EN AFRIQUE DE L'OUEST

Ali Khelifa et Pierre de Félice

Laboratoire de météorologie dynamique

École polytechnique

91128 Palaiseau Cedex

RÉSUMÉ

On étudie une bande nuageuse, orientée du sud-ouest vers le nord-est, qui apparaît parfois sur l'Afrique de l'Ouest en hiver. Lorsque le nuage est bien établi, il s'étend depuis l'embouchure de l'Amazone, au sud-ouest, jusqu'à la Méditerranée centrale ou orientale, au nord-est.

Cette bande nuageuse est associée à une forte ondulation du courant-jet subtropical sur l'Atlantique avec un talweg s'étendant du Sud-Ouest de l'Europe vers l'Atlantique central. Un courant-jet rapide (50 m/s) borde cette bande nuageuse au nord-ouest. Dans cette bande, à tous les niveaux de la troposphère, l'air est plus riche en vapeur d'eau et il y a un important transport de vapeur d'eau des régions équatoriales vers les latitudes moyennes. De plus, la vapeur d'eau est plus abondante sur l'Afrique de l'Ouest dans les basses couches, vers 7,5° nord, en présence de la bande nuageuse qu'en son absence.

ABSTRACT

Water vapor transport during cold advections in Western Africa

We study a cloud band oriented from south-west to north-east which appears sometimes over West Africa during winter. When the cloud band is well established, it stretches out from the Amazone mouth, at the south-west, to Central or east Mediterranean at the north-east. This cloud band is associated to a large undulation of the jet-stream over the Atlantic, together with a trough extending from South-West of Europe to Central Atlantic. A fast subtropical jet-stream (50 m/s) edges this cloud band on its north-west side. In this cloud band at all levels of the troposphere, the air is very humid and there is an important transport of water vapor from equatorial regions to middle latitudes. In addition, water vapor is more abundant over West Africa in the low layer of the troposphere, at 7.5° N.

Le régime des pluies au Sahel est très fortement marqué par le cycle saisonnier. L'année se partage entre une saison des pluies estivale dont la durée va croissant du nord au sud, avec un maximum de précipitations généralement en août, et une saison sèche hivernale dont la durée croît du sud au nord, pendant laquelle il ne pleut pratiquement pas. Ce schéma n'est pas toujours respecté et il arrive qu'il pleuve durant la saison sèche. Les quantités d'eau recueillies peuvent être importantes et avoir des conséquences bénéfiques pour les cultures maraîchères, les arbres et l'alimentation des nappes phréatiques. Les conséquences sont néfastes pour les récoltes d'arachides si ces pluies tombent sur les arachides exposées en plein air (décembre-janvier) qui sont alors gâtées et deviennent impropres à la consommation ou à la fabrication d'huile comestible. Ces pluies, hors saison des pluies, ont reçu divers noms selon les régions. Nous les appellerons **heug**, par leur nom sénégalais.

LES SITUATIONS DE HEUG

Ces pluies ont beaucoup étonné les météorologistes d'Afrique de l'Ouest qui en ont fait de nombreuses descriptions. Germain (1966) décrit une situation typique de heug en décembre 1956 sur l'Afrique de l'Ouest. Il cherche une corrélation entre le mauvais temps observé au Sénégal et en Mauritanie (58 mm de pluie en deux jours à Dakar et 51 mm en un jour à Nouakchott) et les anomalies dans la répartition verticale du vent, notamment la présence d'un courant-jet d'ouest montré par le radiosondage de Dakar. Sa conclusion est que le heug est lié à une advection d'air polaire, en provenance des latitudes moyennes de l'hémisphère nord, vers les régions tropicales. Vittori (1967) décrit deux heugs sur le Sénégal et la Mauritanie, survenus du 12 au 14 décembre 1966 et du 1^{er} au 3 mars 1967, et les attribue à une advection d'air maritime. Il donne une statistique des cas de heug sur dix ans (1951-1960) pour le Sénégal et la Mauritanie. Il montre que, même si, dans certains cas particuliers, les pluies sont abondantes, elles sont néanmoins très faibles en moyenne. Voiron (1968) observe de fortes précipitations en décembre 1964 au Mali (20 mm en un jour à Bamako) et au Burkina-Faso. Il les attribue à une pénétration d'air froid en provenance des latitudes moyennes boréales vers l'Afrique tropicale.

Leroux (1983) décrit deux cas de heug, l'un les 10 et 11 novembre 1973, qui a donné un peu de pluie en Mauritanie (2 mm) et au Maroc (5 mm), et l'autre du 28 novembre au 3 décembre 1978, qui a donné des pluies de 20 à 30 mm sur le Sud-Est du Sénégal et l'Ouest du Mali. Ces pluies provenaient d'altocumulus dont la base était située vers 2 500 m ou même plus haut. Dans le premier cas cité par Leroux, les gouttes de pluie traversaient de l'air très sec avant d'atteindre le sol et il est probable qu'elles s'évaporent en partie, tandis que, dans le deuxième cas, l'air traversé était nettement plus humide et l'évaporation des gouttes devait y être plus faible. Comme les auteurs précédents, Leroux attribue ces heugs à des intrusions d'air polaire dans les basses latitudes. Leroux représente la couverture nuageuse, déduite de l'image du satellite *Météosat*, sur l'Afrique au nord de l'équateur. On y voit une bande nuageuse qui s'étend du large de la Sierra Leone au sud-ouest, où elle se confond avec la Zone de convergence intertropicale (ZCIT), jusqu'à la Turquie au nord-est.

On trouve des descriptions de heug au Tchad (Morell, 1973), en Libye (Griffiths et Soliman, 1972), au Soudan et en Éthiopie (Solot, 1943), en Égypte (Zohdy, 1971) et en Arabie (Zohdy, 1970).

Les pluies de heug, au cours de la saison sèche, sont très remarquées, mais il arrive, quoique beaucoup plus rarement, que l'on note, dans les basses latitudes en été, des arrivées d'air polaire des latitudes moyennes, qui passent en général inaperçues (Altes, 1984).

Les passages de perturbations des latitudes moyennes sur l'Afrique sont fréquents au nord du Sahara en hiver. Lorsque ces perturbations atteignent le Maghreb en provenance du nord ou du nord-est, après avoir traversé la Méditerranée occidentale, elles donnent généralement beaucoup de pluie. La Méditerranée est alors relativement chaude et l'air s'y enrichit en vapeur d'eau. L'abondance des pluies d'hiver d'Afrique du Nord, contrastant avec les sécheresses hivernales d'Europe occidentale, est un trait bien connu du climat méditerranéen.

Par ailleurs, il arrive fréquemment, en hiver et surtout au printemps, que des perturbations des latitudes moyennes atteignent le Nord du Sahara où elles provoquent des vents de sable, plus ou moins violents, parfois accompagnés d'un peu de pluie.

Presque tous les auteurs cités observent que le heug se produit lorsqu'un talweg apparaît sur l'Ouest de l'Afrique de l'Ouest ou sur le proche Atlantique.

MÉTHODOLOGIE

Dans ce travail, nous nous proposons d'étudier le rôle des advections froides sur le transport de la vapeur d'eau sur l'Afrique de l'Ouest.

Ce travail est assez différent de celui de De Félice et Viltard (1976) qui décrivent ce type de bande nuageuse sur l'Afrique de l'Ouest. Les auteurs y suggèrent une explication des types de nuages qui la composent par une circulation méridienne liée au courant-jet subtropical, mais n'étudient pas le transport de la vapeur d'eau. L'article de Thépenier et Cruette (1981) est consacré, comme le



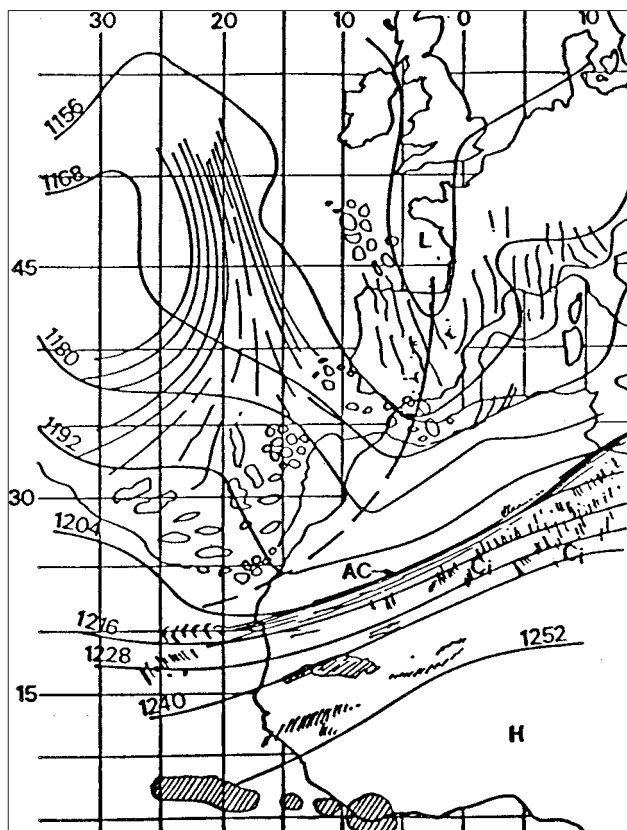


Figure 1 - Carte type du courant-jet subtropical et des isohypses au niveau 200 hPa. Le talweg d'altitude est indiqué par un trait allant de la dépression [L] située sur le golfe de Gascogne au nord-est, passant à peu près sur Gibraltar, puis au sud des Canaries, où le trait discontinu signifie que le talweg est moins net. Le nuage auquel on s'intéresse est bordé au nord-ouest d'altocumulus [Ac] et au sud-est de cirrus [Ci]. (D'après de Félice et Viltard, 1976)

précédent, aux bandes nuageuses qui s'étendent des tropiques aux latitudes moyennes en hiver, mais il s'intéresse au Pacifique nord et, plus particulièrement, au rôle de ces bandes nuageuses dans la formation ou le renforcement des cyclones extratropicaux. Cette conjonction de deux phénomènes, l'un à trajectoire approximativement zonale et l'autre à trajectoire sud-ouest - nord-est, est utilisée par Joly (1995) pour expliquer les perturbations de l'Atlantique nord.

Les données dont nous nous servons sont décrites en détail par la suite. La teneur en vapeur d'eau de l'air est extraite des analyses du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT) : les observations de vapeur d'eau en altitude utilisées pour ces analyses sont fournies par les radiosondages, relativement rares dans la zone étudiée puisque, au sud du Sahara, il n'y a que six stations, y compris celle du Cap-Vert. Quelques comparaisons entre les analyses et les radiosondages semblent indiquer que les analyses ne sont pas trop erronées et que l'on peut leur accorder quelque crédit.

Nous décrivons ensuite très sommairement les bandes nuageuses orientées du sud-ouest vers le nord-est sur l'Afrique de l'Ouest, analogues à celles que Leroux (1983) décrit et associe au heug. Ces bandes ressemblent beaucoup aux bandes nuageuses analysées par Thépenier et Cruette (1981), à l'aide des images du satellite *Goès 1*, sur l'océan Pacifique. Nous proposons un classement subjectif de ces bandes telles qu'elles apparaissent sur les images de *Météosat* et nous évaluons leur nombre selon les mois. Puis, nous justifions ce classement subjectif en montrant dans quelle mesure la circulation générale est différente selon que ces bandes nuageuses sont bien visibles ou absentes.

La description de la teneur en vapeur d'eau de l'air et de son transport est suivie par la discussion et les conclusions.

LES DONNÉES

La plupart de nos résultats sont obtenus à partir de l'analyse de treize années (1981-1993) de données biquotidiennes (0 et 12 h UTC) : l'altitude géopotentielle, les deux composantes horizontales du vent, la température et l'humidité relative provenant de l'analyse du CEPMMT aux niveaux 1 000, 850, 700, 500, 300, 200 et 100 hPa. Ces champs sont définis sur une grille régulière de 2,5 degrés par 2,5 degrés, entre les latitudes 10° sud et 50° nord et les longitudes 60° ouest et 45° est. Nous avons inclus les données quotidiennes du *Bulletin météorologique européen (BME)*, avec une attention particulière pour les cartes synoptiques des niveaux 500 hPa et 200 hPa à 0 h UTC et les données quotidiennes à 11 h 55 UTC des images ISCCP-B2 de *Météosat* (Schiffer et Rossow, 1983) pour les mêmes années. Cette heure est choisie de façon à disposer sur toute la zone d'une image dans le canal visible, bien qu'il y ait environ douze heures de différence avec l'heure des cartes du *BME*.

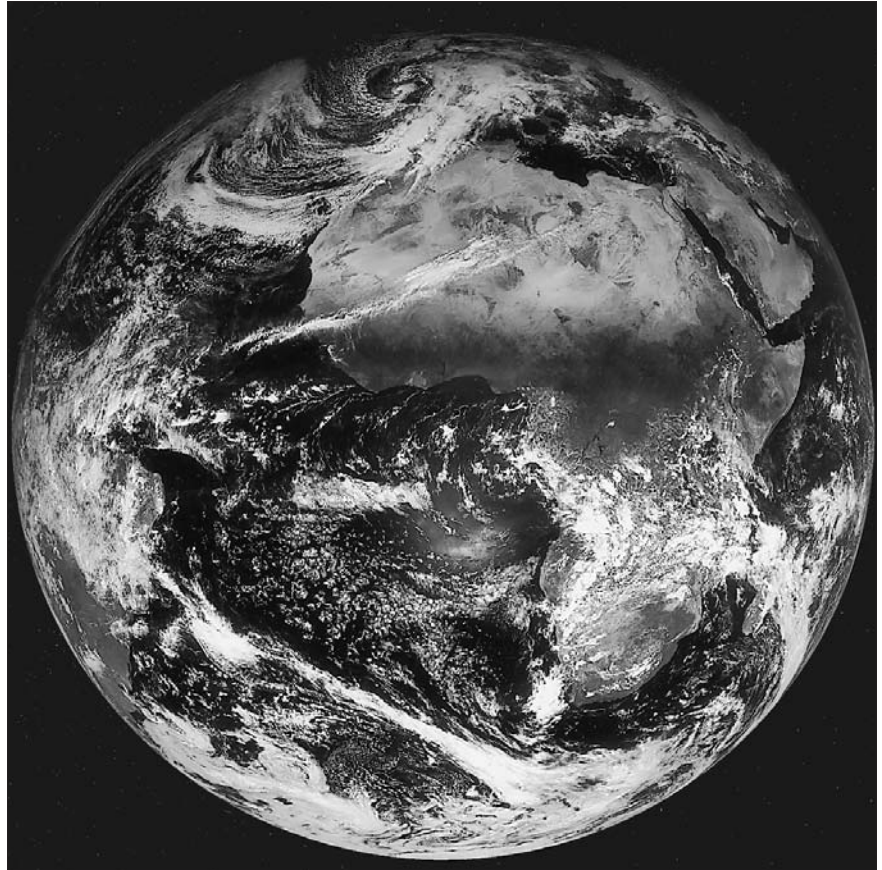
RÉPARTITION SAISONNIÈRE DES ADVECTIONS FROIDES

De Félice et Viltard (1976) donnent une carte caractéristique d'une situation de heug à 200 hPa (figure 1). Un talweg barométrique orienté approximativement du sud-ouest vers le nord-est s'observe de la moyenne à la haute troposphère. Le plus souvent, il existe en même temps un talweg à l'est de l'Amérique du Nord, tandis qu'une dorsale recouvre l'Atlantique. Les images des satellites *Essa 8* et *Itos* montrent un nuage en bande, d'une largeur de 200 à 500 km et d'une longueur de 1 000 à 1 500 km, parallèle au talweg. La bordure nord de ce nuage est nette, sa bordure sud est plus floue.

Sur l'image provenant du canal visible du satellite *Météosat*, ces nuages paraissent brillants. Ils sont assez épais pour porter ombre ; leur épaisseur est confirmée par l'examen du canal infrarouge. La bordure sud de cette bande nuageuse est formée de nuages assez étroits, de 20 à 40 km de large, orientés perpendiculairement à la bande principale. Lorsque ce nuage en bande est vu d'une station terrestre, cette dernière signale des altocumulus et des cirrus.



Figure 2 - Image dans le canal visible du satellite *Météosat* le 6 janvier 1994 à 12 h UTC, montrant une bande nuageuse nette sur l'Afrique. (Photo Météo-France, CMS Lannion)



Après avoir étudié de nombreux cas de heug, il nous a semblé que la présence de la bande nuageuse était un trait caractéristique du phénomène, facile à repérer sur les images de *Météosat*. Nous avons examiné les trois images quotidiennes à 12 h UTC dans les canaux visible, infrarouge et vapeur d'eau, pour les années 1981 à 1993. Nous avons classé subjectivement ces images en quatre catégories, de $Q=3$ à $Q=0$. La cote $Q=3$ est attribuée à l'image lorsque la bande nuageuse est bien nette sur les trois canaux, relativement brillante sur le canal visible, présentant un bord net du côté polaire, effiloché du côté équatorial, sans interruption sur au moins 1 500 km (figure 2). La cote 2 correspond à une bande nuageuse plus courte, un peu morcelée, paraissant moins épaisse. La cote 1 est donnée lorsque l'on distingue une bande nuageuse orientée approximativement sud-ouest - nord-est à travers l'Afrique, peu épaisse, morcelée et de courte étendue. On ne retient que les bandes dont l'extrémité sud-ouest se trouve au sud de $20-25^\circ$ nord. La cote 0 est attribuée lorsqu'aucun nuage en bande n'est visible, ni sur le canal visible, ni sur le canal infrarouge, sur l'Afrique de l'Ouest.

Nous n'avons pas retenu les images recueillies avant août 1981, car elles n'ont pas été constituées par l'European Space Operation Center de la même façon que celles qui ont suivi, et notre appréciation subjective risquait de ne pas être la même pour les images les plus anciennes et pour les plus récentes.

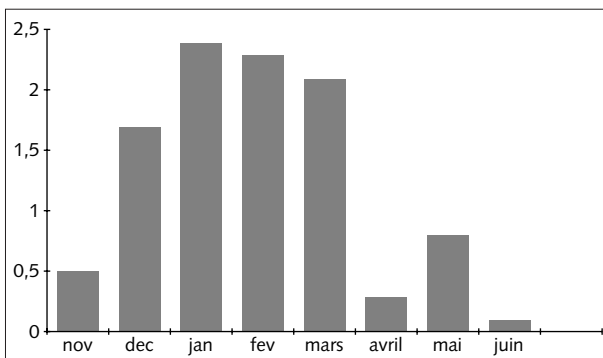


Figure 3 - Nombre moyen de jours par mois (1981-1993) où un nuage en bande, coté $Q=3$, a été identifié sur les images du canal infrarouge de *Météosat*.

La figure 3 donne le nombre moyen de jours par mois où la cote $Q=3$ a été attribuée. On voit que c'est dans les mois d'hiver (décembre, janvier, février et mars) que les nuages en bande sont les plus fréquents. Dans un travail de Font-Tullot (1956), on trouve les pourcentages d'advections froides aux Canaries vers 28° nord (figure 4). Nous ne savons pas exactement comment l'auteur a caractérisé les advections froides, ni sur quelles années il a fait sa statistique, mais la comparaison entre ses chiffres et les nôtres fait apparaître deux points intéressants.

En premier lieu, la courbe obtenue par Font-Tullot est bimodale, avec un premier maximum en novembre et un deuxième en mars-avril, tandis que notre courbe est unimodale, avec un maximum en janvier, si l'on néglige le petit maximum de mai, difficilement explicable. Cette distribution rappelle celle des pluies d'été au sud du Sahara. En effet, il

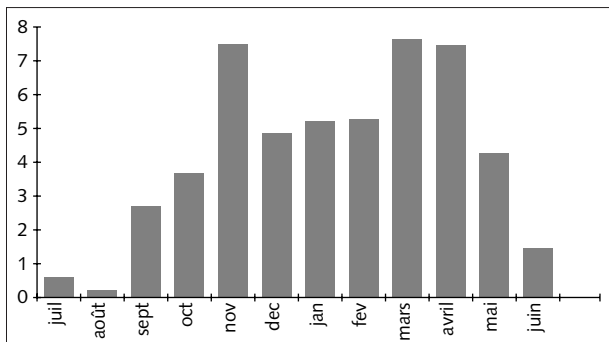


Figure 4 - Nombre moyen de jours par mois où une advection froide a été observée aux îles Canaries. (D'après Font-Tullot, 1956)

existe deux maxima de précipitations, au sud de 10° nord environ, l'un vers mai-juin et l'autre vers octobre-novembre, et un seul maximum au nord de 10° nord, en août, comme le montrent les cartes des pages 8 et 9 de l'atlas de Nicholson et al. (1988). Cette répartition des pluies est la conséquence de l'oscillation annuelle de la ZCIT qui, par son déplacement printanier du sud vers le nord et son retrait automnal du nord vers le sud, entraîne deux saisons des pluies près de la côte sud de l'Afrique de l'Ouest et une seule saison des pluies au Sahel. Nous nous trouvons peut-être devant un phénomène analogue pour le heug. Un déplacement vers le sud des anticyclones subtropicaux en automne permet aux advections froides venues du nord d'atteindre de basses latitudes, tandis qu'au printemps le déplacement vers le nord de ces anticyclones empêche ces advections froides d'arriver sur l'Afrique de l'Ouest. L'oscillation annuelle

des advections froides pourrait être liée à la variation annuelle de la déclinaison du soleil, comme on le constate pour l'oscillation des pluies liée à la ZCIT.

Le deuxième point est que le nombre d'advections froides recensées par Font-Tullot (environ 7,5 par mois en mars, avril et novembre) est à peu près trois fois plus grand que le nombre d'apparitions de la bande nuageuse cotée Q=3 (environ 2,5 par mois en janvier) pour les treize années de 1981 à 1993. Cela est peut-être dû à la manière d'apprécier les advections froides ; peut-être aussi au fait que les Canaries sont situées au nord de la zone à laquelle nous nous intéressons, donc plus proches des zones sources d'air froid. Thépenier et Cruette (1981) parlent de neuf cas de bandes nuageuses par mois dans le Pacifique est, au niveau du jet américain, ces bandes nuageuses étant caractéristiques des advections froides.

L'hiver 1984-1985 a été particulièrement riche en bandes nuageuses (17 cas où Q=3 de décembre à mars, soit 4,2 par mois environ), ce qui est à peu près le double des valeurs moyennes des treize années étudiées. Dans l'étude qui va suivre, nous nous intéressons plus particulièrement à cet hiver.

STRUCTURE DU VENT AU VOISINAGE DE LA BANDE NUAGEUSE

On a calculé la moyenne du vent aux niveaux 500, 300 et 200 hPa pour les jours où Q=3, à partir des analyses du CEPMMT. Les vents analysés et les vents pointés sur la carte du BME sont, dans l'ensemble, en bon accord, en particulier au niveau 200 hPa où le nombre des observations est plus grand qu'aux niveaux inférieurs. On note cependant quelques différences, surtout pour la direction du vent. Souvent, au voisinage de la côte ouest de l'Afrique, entre 20° et 30° nord, là où les observations des avions sont abondantes, les vents analysés et les vents observés font un angle qui peut atteindre 60 degrés.

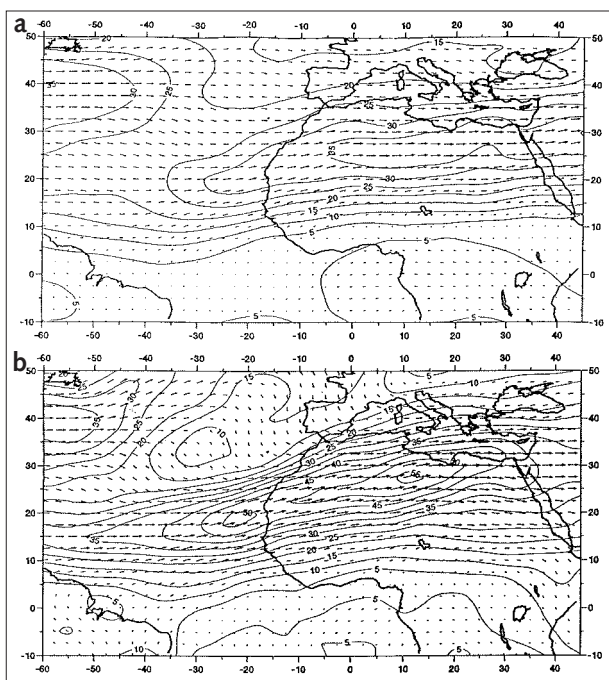


Figure 5 - Vent moyen et isotaches à 200 hPa, en m/s :
 a) sur tous les jours de la période comprise entre le 1^{er} janvier et le 31 mars 1985,
 b) sur tous les jours où Q=3, pour cette même période.

Nous pensons cependant que les isotaches présentées (figure 5) sur la surface 200 hPa ne sont pas trop éloignées de l'observation. Dans le cas moyen (figure 5a), les vents sont d'ouest avec une très faible composante ouest - sud-ouest, vers 20° nord entre 30° ouest et 0° ; les vitesses maximales sur l'Afrique, vers 25-30° nord, sont de 35 m/s. Dans les cas Q=3 (figure 5b), on note une très forte ondulation des vents à l'ouest de l'Espagne, où ils sont de nord et relativement faibles (environ 15 m/s). Le talweg, décrit par tous les auteurs qui ont étudié les cas de heug, s'observe bien sur cette figure. Il s'étend de l'Europe centrale vers le sud-ouest. Les cartes d'isothermes confirment l'existence d'une zone froide orientée nord-est - sud-ouest, de l'Europe occidentale à l'Atlantique tropical. Au sud-est de cette zone, on voit le courant-jet subtropical orienté sud-ouest - nord-est, avec des vents qui atteignent 55 m/s sur la Libye et 50 m/s sur l'Atlantique.

L'allure des isotaches aux niveaux 300 et 500 hPa ressemble beaucoup à celle de la figure 5, bien que les vitesses soient plus petites. Il y a toujours une forte ondulation du vent sur l'Atlantique en cas de heug et une grande vitesse de courant-jet subtropical sur l'Afrique, orienté sud-ouest - nord-est.

L'allure des isotaches aux niveaux 300 et 500 hPa ressemble beaucoup à celle de la figure 5, bien que les vitesses soient plus petites. Il y a toujours une forte ondulation du vent sur l'Atlantique en cas de heug et une grande vitesse de courant-jet subtropical sur l'Afrique, orienté sud-ouest - nord-est.

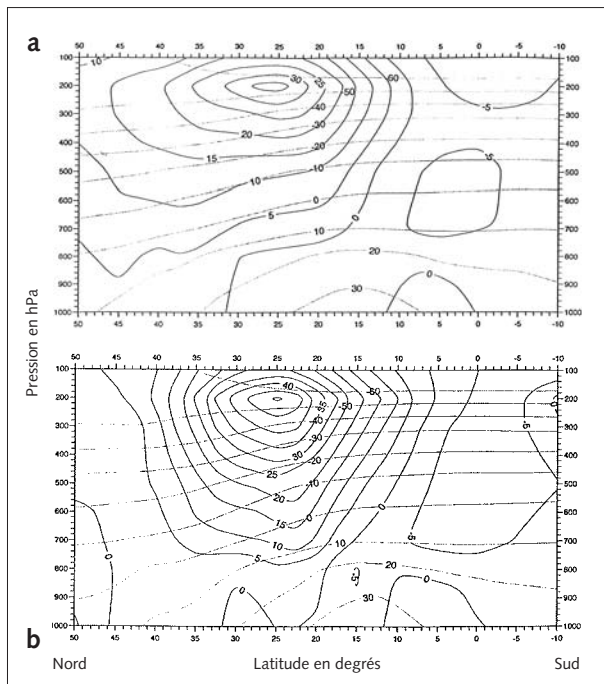


Figure 6 - Coupe méridienne moyenne du vent zonal (en m/s) et de la température (°C) sur le méridien 0° :
 a) sur tous les jours de la période comprise entre le 1^{er} janvier et le 31 mars 1985,
 b) sur tous les cas où Q=3, pour cette même période.

La figure 6 est une coupe verticale méridienne moyenne du 1^{er} janvier au 31 mars 1985 du vent zonal sur le méridien 0° ; on y a porté les isotaches et les isothermes.

Sur la figure 6a (cas moyen) le maximum de vitesse (environ 35 m/s) se situe à 200 hPa, à 25-30° nord. Le gradient horizontal de la vitesse zonale est relativement faible.

Sur la figure 6b (cas Q=3), le maximum de vitesse est de 55 m/s à 200 hPa, légèrement plus au sud que dans le cas moyen. Le gradient horizontal de la vitesse zonale à 200 hPa est nettement plus fort que dans le cas moyen. On remarque aussi que la pente des isothermes est beaucoup plus grande dans le cas Q=3 que dans le cas moyen.

Les images du canal vapeur d'eau de *Météosat* sont souvent délicates à interpréter. Ce canal mesure le rayonnement dans des longueurs d'onde voisines de la bande d'absorption (6,3 µm) de la vapeur d'eau. On admet généralement que le rayonnement mesuré provient d'une couche d'air contenant à peu près 3 mm d'épaisseur réduite de vapeur d'eau. Lorsque l'énergie reçue par le radiomètre est faible, cela indique que la vapeur d'eau qui émet le rayonnement est à une température basse, donc à haute altitude ; au contraire, quand l'énergie reçue est grande, cela signifie que la vapeur d'eau qui émet ce rayonnement est à une haute température, donc à basse altitude, ce qui implique que l'air qui la surmonte est très sec. Les zones où le signal vapeur d'eau est grand correspondent donc, en général, à des zones de subsidence dans les hautes couches. Lorsque l'on reporte l'image vapeur d'eau sur les cartes synoptiques à 200 hPa, on voit que le jet de sud-ouest coïncide assez bien avec la limite entre la zone froide, qui marque la présence de la bande nuageuse, et la zone chaude, qui borde cette zone nuageuse au nord.

Cette configuration peut probablement s'expliquer par la circulation agéostrophique autour du jet subtropical (Keyser et Shapiro, 1986 ; Cammas et Ramond, 1989). Dans la partie où le jet accélère, la circulation transversale est directe avec ascendance à droite du jet, ce qui favorise la formation des nuages, et subsidence à gauche du jet, ce qui apporte de l'air stratosphérique sec. Lorsque le jet ralentit, la circulation s'inverse. Cela se produit en général dans la partie nord-est des images de *Météosat*, mais la liaison entre nuages et courant-jet y est moins nette que plus à l'ouest.

ÉPAISSEUR RÉDUITE DE LA VAPEUR D'EAU

Cette épaisseur est calculée pour chaque couche d'air comprise entre deux niveaux voisins sur lesquels le CEPMMT fournit des analyses de l'humidité relative.

À partir de celle-ci, de la température et de la pression, on calcule l'humidité spécifique q . Connaissant q à deux niveaux voisins, on calcule la masse de la vapeur d'eau contenue dans un cylindre vertical, de section droite égale à l'unité, limité par ces niveaux. Si p est la pression et g l'accélération de la pesanteur, la masse de vapeur d'eau par unité de surface entre les niveaux 1 et 2 est :

$$M = \frac{(q_1 + q_2)}{2g} (p_1 - p_2)$$

Nous avons calculé les épaisseurs de vapeur d'eau pour chaque point de grille et pour chacune des couches 1 000-850, 850-700, 700-500 et 500-300 hPa, pour chaque jour de la période comprise entre le 1^{er} janvier et le 31 mars 1985. Puis, nous avons calculé en chaque point, pour chaque couche, la masse moyenne sur tous les jours de la période et la masse moyenne pour les cas pour lesquels Q=3.

De Félice et al. (1982) ont calculé des épaisseurs de vapeur d'eau moyenne à partir des radiosondages de Dakar, Bamako, Niamey, N'djaména, Abidjan et Douala pour tous les mois de l'année, entre 1970 et 1975. Ils ont observé que dans les quatre stations sahéennes, la teneur en vapeur d'eau ne variait pas beaucoup de janvier à mars, mais qu'elle commençait à croître à partir d'avril. C'est la raison pour laquelle, dans le but de comparer les épaisseurs (et les flux



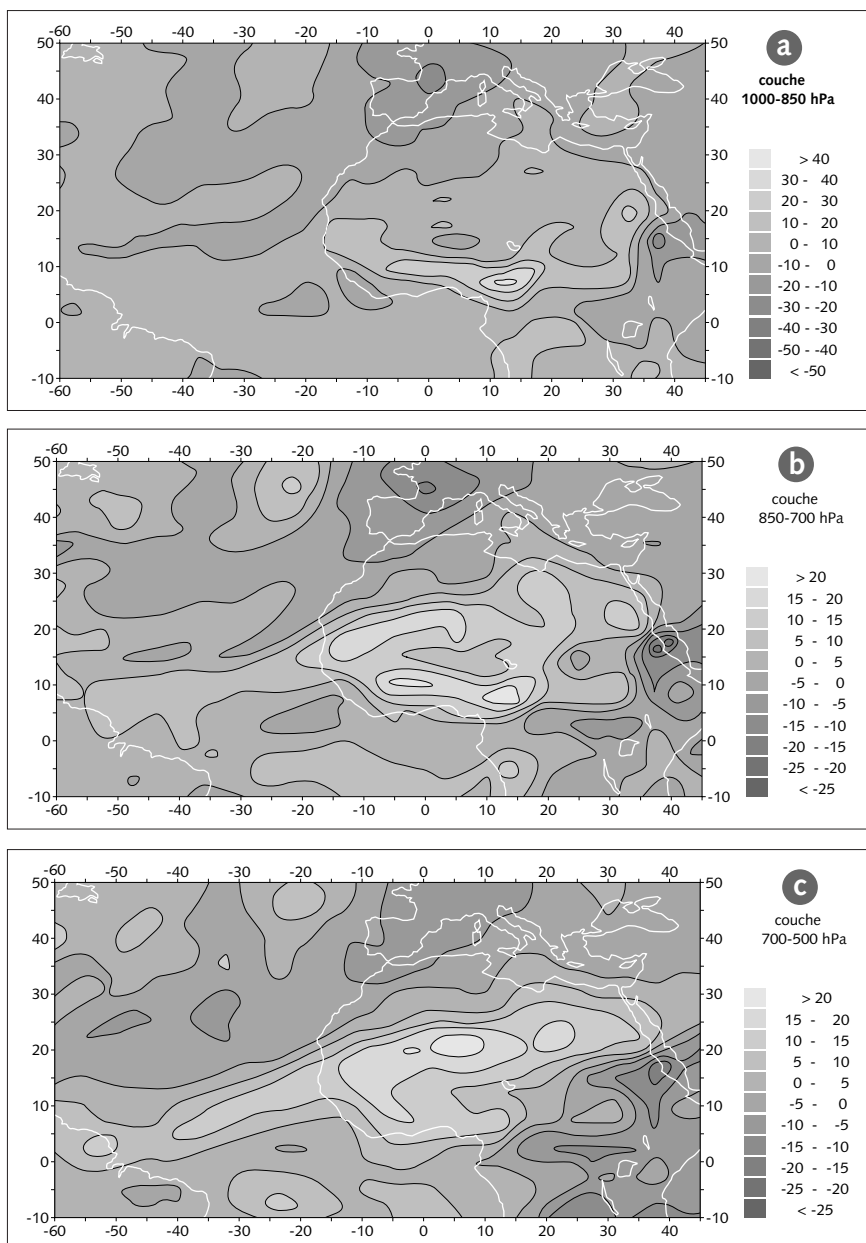


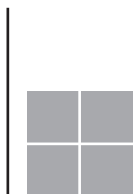
Figure 7 - Différence moyenne des masses de vapeur d'eau par unité de surface entre les cas Q=3 et la moyenne calculée entre le 1^{er} janvier et le 31 mars 1985 (en hg/m^2) :
 a) couche 1 000-850 hPa,
 b) couche 850-700 hPa,
 c) couche 700-500 hPa.

de vapeur d'eau, comme on le fera au paragraphe suivant), on a restreint cette étude comparative entre les cas moyens et les cas avec bande nuageuse aux mois durant lesquels, en moyenne, la teneur en vapeur d'eau ne variait pas. Après avoir noté que les épaisseurs déduites des analyses du CEPMMT étaient assez voisines des épaisseurs déduites des radiosondages, on a calculé les différences, couche par couche, entre les épaisseurs de vapeur d'eau en présence de la bande nuageuse et le cas moyen (figure 7).

La figure 7a donne cette différence dans la couche 1 000-850 hPa. On remarque un écart positif important (atteignant $4 kg/m^2$, soit environ 20 % de la masse d'eau de cette couche) sur le Sud de l'Afrique de l'Ouest, depuis les monts du Cameroun à l'est jusqu'en Guinée à l'ouest. On note une différence négative sur le Sud-Ouest de l'Europe et le Nord-Ouest de l'Afrique.

La figure 7b est relative à la couche 850-700 hPa. On retrouve des différences positives juste au nord de la Basse-Côte. Il apparaît un excès de vapeur d'eau orienté sud-ouest - nord-est de l'embouchure de l'Amazone (où cet excès est faible) jusqu'à la Libye. Il y a toujours des différences négatives au nord de cette zone.

La figure 7c présente la couche 700-500 hPa. Le maximum Cameroun-Guinée est encore présent et, surtout, le maximum s'étendant de l'embouchure de l'Amazone jusqu'au Sud de l'Égypte devient très fort, atteignant $2 kg/m^2$, soit



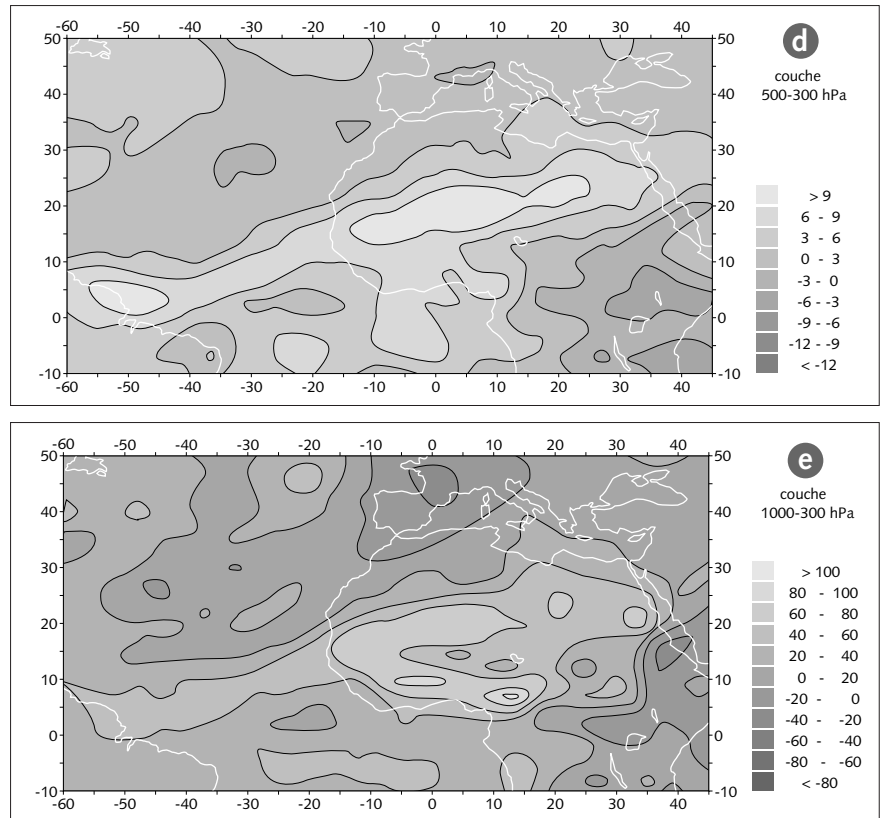


Figure 7 (suite) - Différence moyenne des masses de vapeur d'eau par unité de surface entre les cas Q=3 et la moyenne calculée entre le 1^{er} janvier et le 31 mars 1985 (en hg/m²) :

d) couche 500-300 hPa,
e) couche totale 1 000-300 hPa.

environ 30 % de la masse de vapeur d'eau moyenne dans cette couche. Il y a des différences négatives fortes au nord-ouest de cette zone.

La figure 7d est relative à la couche 500-300 hPa. À part un petit excès (0,4 kg/m²) sur les monts du Cameroun, le maximum de la Basse-Côte ne se voit plus guère, alors que le fort maximum (0,8 kg/m²) est très net du Brésil à l'Égypte, montrant un accroissement de 40 % de la vapeur d'eau lors de la présence d'une bande nuageuse.

La figure 7e est relative à l'épaisseur totale de la troposphère. Elle ressemble évidemment beaucoup aux figures 7a et 7b puisque c'est dans ces couches que se trouve la plus grande partie de la vapeur d'eau atmosphérique. On y retrouve le maximum situé juste au nord de la Basse-Côte et le maximum allongé du Brésil vers l'Égypte et la mer Rouge, ainsi que les différences négatives du Sud-Ouest de l'Europe vers l'Atlantique tropical central.

TRANSPORT DE LA VAPEUR D'EAU

Nous avons calculé, sur la période comprise entre le 1^{er} janvier et le 31 mars 1985, le transport de la vapeur d'eau, couche par couche, pour chaque point de grille, à l'aide des analyses du CEPMMT.

Les transports zonal et méridien entre les niveaux 1 et 2 sont donnés respectivement par :

$$\left(\frac{u_1q_1 + u_2q_2}{2g}\right) \cdot (p_1 - p_2) \quad \text{et} \quad \left(\frac{v_1q_1 + v_2q_2}{2g}\right) \cdot (p_1 - p_2)$$

où u et v sont les composantes zonale et méridienne du vent.

La figure 8 est relative à la couche 1 000-850 hPa. Sur la figure 8a (cas moyen) comme sur la figure 8b (cas Q=3), on reconnaît les flux d'est dus aux alizés de nord et de sud, avec des valeurs atteignant 170 kg.m⁻¹.s⁻¹ au nord-est de la côte brésilienne, et le flux d'ouest des latitudes moyennes, de l'ordre de 120 kg.m⁻¹.s⁻¹ vers 35° nord sur l'Ouest Atlantique. La figure 8c présente la différence entre les deux cartes précédentes. On note surtout un important flux de nord-est en provenance de l'Europe de l'Ouest et atteignant 50 kg.m⁻¹.s⁻¹ vers 30° nord-30° ouest.



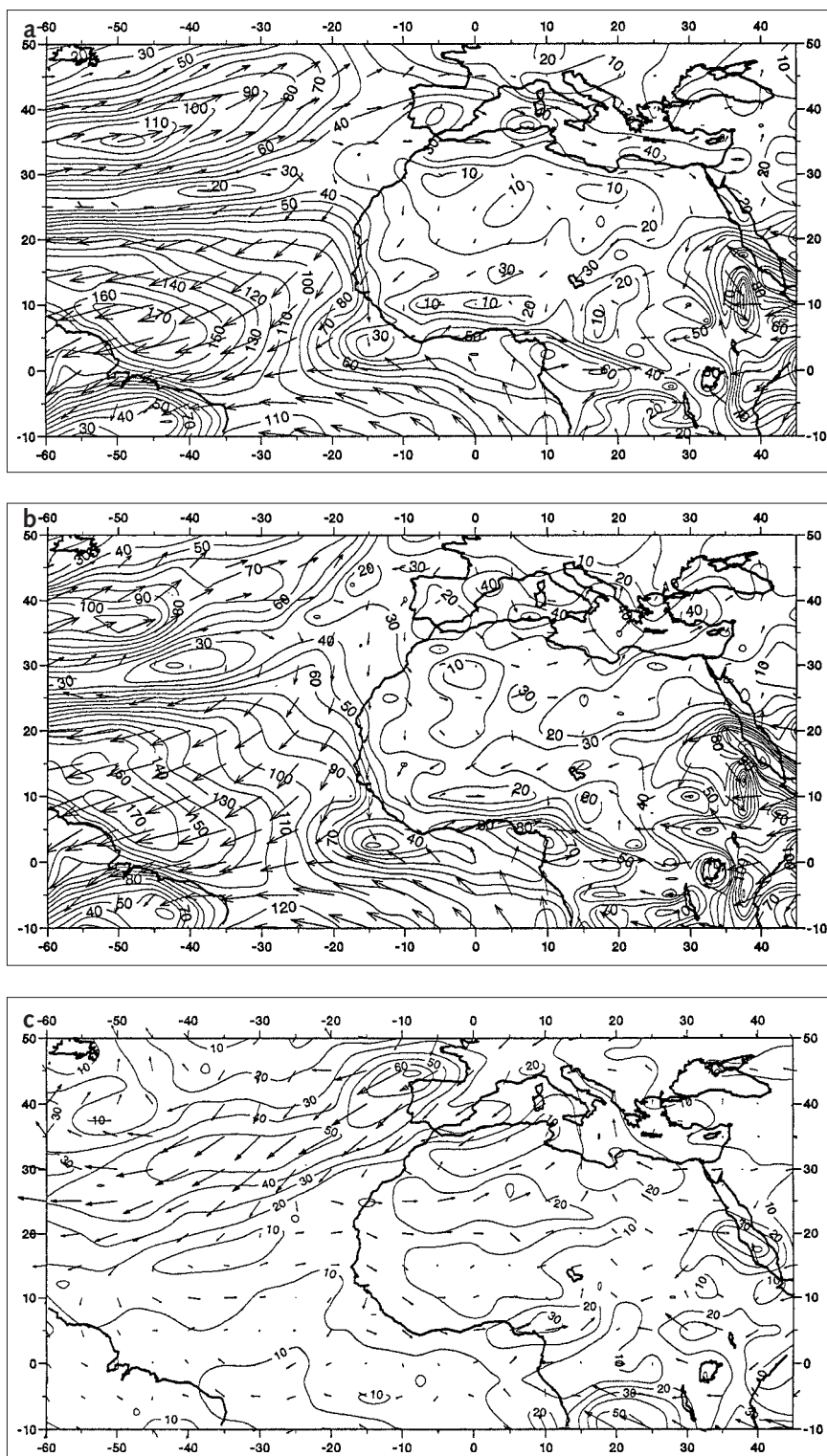
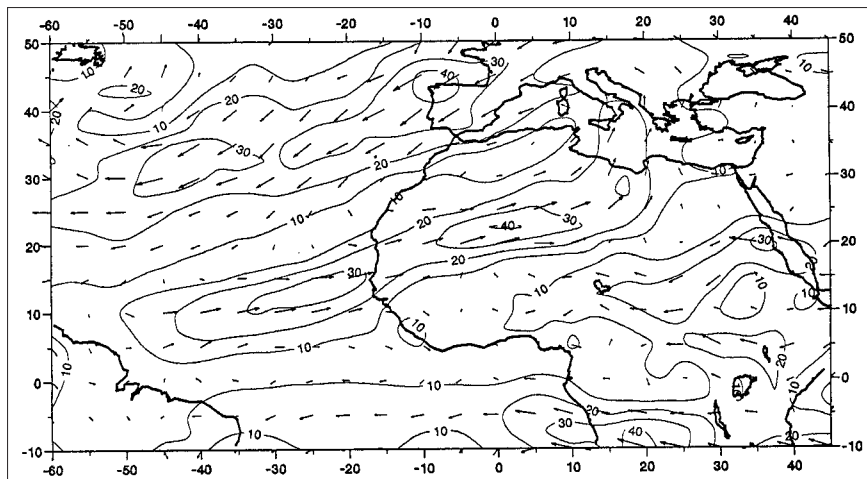


Figure 8 - Masse de vapeur d'eau transportée en moyenne à travers un rectangle vertical de largeur unité limité par les niveaux 1 000-850 hPa, pour la période s'étendant du 1^{er} janvier au 31 mars 1985 (en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) :
 a) cas moyen,
 b) cas $Q=3$,
 c) différence $b - a$.

La figure 9 donne la différence des flux entre le cas $Q=3$ et le cas moyen dans la couche 850-700 hPa. On y observe un fort transport dirigé depuis l'Ouest vers le sud-ouest et un flux à peu près d'égale valeur ($30 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) du Brésil vers la Libye. Cette allure se retrouve dans la couche 700-500 hPa, ainsi que sur la figure 10 qui est relative à la couche 500-300 hPa. Les figures 10a et 10b montrent que le flux est dirigé du sud-ouest vers le nord-est, même dans le cas moyen ($30 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$), et qu'il est presque double dans le cas $Q=3$, car la différence des flux atteint $25 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$. Ce maximum est dû, d'une part, au courant-jet subtropical, plus rapide lorsque $Q=3$ (de l'ordre de 50 m/s) que dans le cas moyen (de l'ordre de 35 m/s) à 200 hPa, et, d'autre part, à la plus forte quantité de vapeur d'eau dans cette bande dans le cas $Q=3$.

Figure 9 - Différence moyenne des masses de vapeur d'eau transportées dans le cas $Q=3$ et dans le cas moyen, pour la période comprise entre le 1^{er} janvier et le 31 mars 1985, à travers un rectangle vertical de largeur unité limité par les niveaux 850 et 700 hPa (en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$).



DISCUSSION ET CONCLUSION

Un nuage en bande orientée du sud-ouest vers le nord-est depuis la ZCIT jusqu'aux latitudes moyennes est un phénomène qui s'observe de temps en temps en hiver et au printemps dans l'hémisphère nord sur l'Afrique et le Pacifique. Sur l'Afrique, cette bande nuageuse est formée de nuages relativement élevés qui donnent parfois de la pluie en dehors de la saison des pluies. Cette bande nuageuse s'observe lorsqu'une ondulation apparaît dans le courant-jet d'ouest sur l'Atlantique et qu'un talweg d'altitude s'étend du sud-ouest de l'Europe occidentale vers l'Atlantique tropical central.

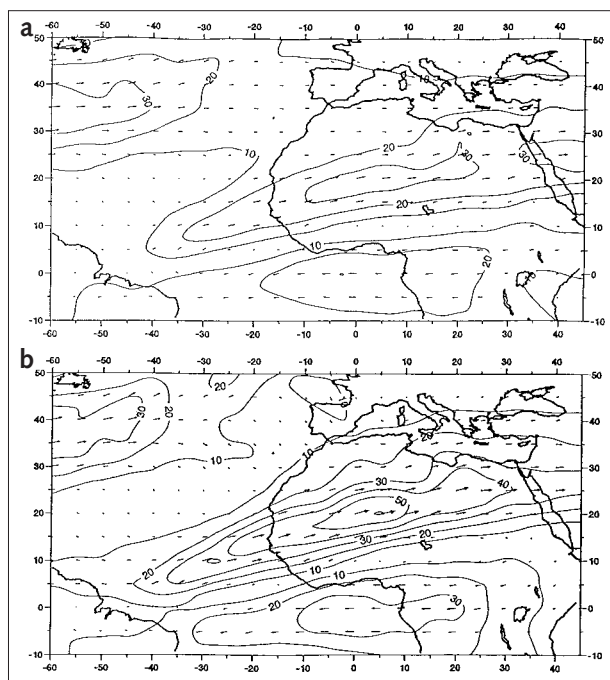


Figure 10 - Analogie aux figures 8a et 8b pour la couche 500-300 hPa.

Cette zone de basse pression, surtout visible aux niveaux supérieurs de la troposphère (500-200 hPa), est bordée au sud-est par un courant-jet très rapide (de l'ordre de 50 m/s). Le long du courant-jet, sur sa droite, s'étend parfois la bande nuageuse sur plus de 4 000 km et, sur sa gauche, les images satellitaires dans le canal vapeur d'eau révèlent une zone où l'air est très sec en altitude.

Nous avons calculé les épaisseurs réduites et les flux de vapeur d'eau moyens à l'aide des analyses du CEPMMT. Avant de publier les résultats, nous les avons comparés à ceux que de Félice et al. (1982) ont obtenus à l'aide des radiosondages de quatre stations sahéliennes (Dakar, Bamako, Niamey, N'djaména) et de deux stations de la Basse-Côte (Abidjan et Douala) sur l'intervalle 1970-1975. Les flux de vapeur d'eau de janvier ont été comparés à ceux trouvés par Camara (1978), qui utilisait les mêmes radiosondages sur la même période. Les valeurs moyennes que nous avons trouvées sont tout à fait comparables à celles qui avaient été obtenues lors de ces deux études.

En cas de heug, la moyenne et la haute troposphère (700-300 hPa) sont plus riches en vapeur d'eau que dans le cas moyen, dans une bande orientée du sud-ouest vers le nord-est et coïncidant avec la bande nuageuse. Nous avons trouvé que, dans cette bande, le flux de vapeur d'eau était plus grand en cas de heug qu'en son absence.

La bande nuageuse a souvent son origine au sud-ouest dans la ZCIT ; cela suggère que la circulation de la vapeur d'eau suit le schéma décrit par Thépenier et Cruette (1981). Ces auteurs situent dans un cumulonimbus de la ZCIT Pacifique l'origine des bandes nuageuses, orientées du sud-ouest vers le nord-est et révélées par le satellite *Goese 1* sur cet océan. Le courant-jet subtropical d'Afrique transporterait vers les latitudes moyennes la vapeur d'eau en provenance de la ZCIT, située en hiver non loin de l'équateur, c'est-à-dire près de l'embouchure de l'Amazone.

Nous avons aussi trouvé que l'épaisseur réduite de la vapeur d'eau est nettement plus grande dans les basses couches (1 000-700 hPa) sur le nord de la Basse-Côte, entre les monts du Cameroun et la Guinée, vers 7,5° nord, en présence de heug

qu'en son absence. Cette vapeur d'eau pourrait alimenter la bande nuageuse. D'abord transportée vers l'ouest, elle serait prise, à l'ouest de la côte d'Afrique, dans le courant-jet subtropical soufflant du sud-ouest vers le nord-est. La circulation transversale au jet crée les nuages sur le côté droit de celui-ci et, sur sa gauche, une zone de subsidence sans nuage d'altitude.

Une étude qui utiliserait de meilleures données sur la vapeur d'eau permettrait probablement de mieux comprendre le mécanisme de son transport. Les efforts faits aujourd'hui pour mieux évaluer la teneur en vapeur d'eau de l'air grâce aux sondeurs verticaux des satellites devraient y contribuer.

BIBLIOGRAPHIE

- Altes E., 1984 : Évolution des invasions polaires de l'Afrique septentrionale à l'Afrique occidentale. Thèse de 3^e cycle de climatologie de l'université de Dijon, vol. 1, 175 p.
- Camara M. O., 1978 : Analyse des transferts de vapeur d'eau en Afrique occidentale et centrale. IUT, département de météorologie, Dakar.
- Cammas J.-P. et D. Ramond, 1989 : Analysis and diagnosis of the composition of ageostrophic circulation in jet-front systems. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 2447-2461.
- De Félice P. et A. Viltard, 1976 : Aérojet subtropical d'hiver et nuages associés. *La Météorologie* 6^e série, 6, 223-225.
- De Félice P., A. Viltard et M. Camara, 1982 : Vapeur d'eau dans la troposphère en Afrique de l'Ouest. *La Météorologie* 6^e série, 29, 129-134.
- Font-Tullot J., 1956 : El tiempo atmosférico en las Islas Canarias. Servicio. Met. Nat. Memoria, A, 28, Madrid, 96 p.
- Germain H., 1966 : Situation typique de petit hivernage (heug). PDEM n° 9, Asecna, Dakar.
- Griffiths J. F. et K. H. Soliman, 1972 : The Northern Desert. *Climates of Africa*, 75-110.
- Keyser D. et M. A. Shapiro, 1986 : A review of the structure and dynamics of upper-level frontal zones. *Mon. Wea. Rev.*, 114, 452-499.
- Joly A., 1995 : Le front polaire : un concept dépassé... qui a la vie dure. *La Recherche*, 26, 273, 128-135.
- Leroux M., 1983 : *Le climat de l'Afrique tropicale*. Ed. Champion, 663 p.
- Morell M., 1973 : Notes sur deux situations météorologiques remarquables observées au Tchad. PDEM n° 30, Asecna, Dakar.
- Nicholson S. E., K. Jeeyoung et J. Hoopingarner, 1988 : Atlas of African rainfall and its interannual variability. Dept. of Met., The Florida State University, Tallahassee, Floride 32306, États-Unis.
- Schiffer R. A. et W. B. Rossow, 1983 : The International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP), the first project of the World Climate Research Programme. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 64, 779-784.
- Solot S. B., 1943 : The meteorology of central Africa. Res. Center, Accra, Ghana.
- Thépenier R.-M. et D. Cruette, 1981 : Formation of cloud bands associated with the American subtropical jet-stream and their interaction with midlatitude synoptic disturbances reaching Europe. *Mon. Wea. Rev.*, 109, 2209-2220.
- Vittori A., 1967 : Note sur les invasions polaires en altitude sur le Sénégal et la Mauritanie. PDEM n° 10, Asecna, Dakar.
- Voiron H., 1968 : Étude de deux perturbations typiques de saison sèche en Afrique occidentale. PDEM n° 14, Asecna, Dakar.
- Zohdy H., 1970 : The vertical motion fields during a winter cold outbreak over Yemen. *Met. Res. Bull.*, 2, 1, 117-127.
- Zohdy H., 1971 : On the interaction between extratropical and tropical disturbances over Africa as seen from satellite pictures. *Met. Res. Bull.*, 3, 1, 87-106.

