

## **PROSPECTIVE EN TÉLÉDÉTECTION ET PHYSIQUE ATMOSPHÉRIQUE**

**M. DESBOIS<sup>1</sup>**

---

### **RÉSUMÉ**

Les préoccupations des physiciens de l'atmosphère et des climatologues rejoignent celles des hydrologues continentaux d'une part parce que le cycle de l'eau joue un rôle fondamental dans les bilans d'énergie de l'atmosphère elle-même, en particulier dans les tropiques, d'autre part en raison de la nécessité de comprendre et de représenter convenablement les échanges à la surface. Cependant les échelles abordées sont généralement différentes. Une rencontre plus étroite des deux domaines est souhaitable, au prix d'une adaptation des objectifs de chacun : les modèles météorologiques mésoéchelle, les radars météorologiques... peuvent atteindre des échelles applicables à l'hydrologie ; tandis que les bilans hydrologiques intégrés à plus grande échelle, utilisables dans des modèles de circulation générale, doivent pouvoir être établis en combinant télédétection et modélisation hydrologique. Pour parvenir à ces objectifs, deux types d'expérimentation sont nécessaires :

- une expérimentation « mésoéchelle », portant sur des régions et des périodes de temps relativement courtes, et combinant mesures hydrologiques et mesures atmosphériques ;
- une expérimentation « grande échelle », portant sur de plus vastes régions et des périodes beaucoup plus longues, visant à établir des bilans à l'échelle de quelques mailles de modèles de circulation générale atmosphérique. Dans ce dernier cas, ainsi que pour les échelles interné-

---

<sup>1</sup>Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS, Palaiseau, France.

diaires, la télédétection a un rôle important à jouer. Ses possibilités actuelles sont limitées, mais seront complétées par de nouvelles missions satellitaires.

## INTRODUCTION

*Prospective en télédétection et physique atmosphérique* : ce vaste sujet doit être limité ici aux prospectives qui peuvent impliquer des interactions avec le domaine de l'hydrologie, en particulier de l'hydrologie continentale. Par ailleurs, dans le cadre des journées de l'Orstom, les phénomènes tropicaux seront privilégiés. De nombreux projets atmosphériques se concentrent sur ces régions, compte tenu de leur importance énergétique et de leur influence dans les processus climatiques globaux. Par ailleurs, il est banal de dire que la télédétection est particulièrement nécessaire dans les régions tropicales sous équipées en mesure terrain.

- Dans une première partie, les principaux problèmes liés aux phénomènes tropicaux qui intéressent les communautés météorologie et climatologie sont présentés, en fonction des échelles concernées, de leur interaction avec la surface continentale, des régions concernées.
- Dans une seconde partie, on rappelle les différents types d'expériences qui ont déjà été effectuées pour contribuer à la solution de ces problèmes, et on évoque les programmes futurs. On tente de dégager à partir de cette analyse rapide quelles sont les principales lacunes par rapport aux problèmes évoqués plus haut.
- La troisième partie est consacrée à l'apport actuel de la télédétection atmosphérique, et aux prospectives des prochaines années dans ce domaine (la télédétection des propriétés de surface n'est pas abordée). On tente en particulier de bien montrer les limitations de ces techniques, et leur complémentarité par rapport aux mesures de terrain.

Enfin, à partir de ces éléments, on cherche à dégager des thèmes de recherche où l'interaction hydrologie/atmosphère est particulièrement nécessaire, et les types de programmes qui pourraient répondre, au moins en partie, aux besoins de ces recherches.

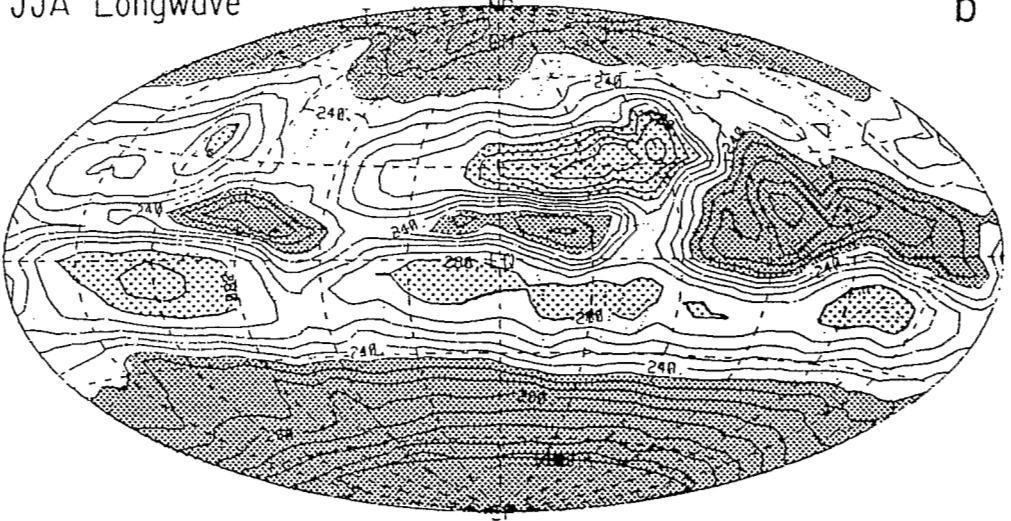
## LES PHÉNOMÈNES ATMOSPHÉRIQUES TROPICAUX : PROBLÈMES ACTUELS

Grâce aux satellites, des cartes globales moyennes de rayonnement ondes courtes ou ondes longues sortant (Erbe (BARKSTROM *et al.* 1989) - figure 1), de la nébulosité (ISCCP(ROSSOW et GARDER, 1993)), ou même des précipitations (GPCC (WMO/ICSU, 1990 - figure 2) et de la vapeur d'eau (SSM/I (ALISHOUSE *et*

al. 1990), canaux IR vapeur d'eau (PICON et DESBOIS, 1994)) sont maintenant accessibles. Elles montrent immédiatement le rôle essentiel des régions tropicales dans les échanges d'eau et d'énergie au niveau global. Toutes ces cartes montrent les mêmes structures de grande échelle, dont les plus marquantes sont la convection intertropicale et ses régions d'activité maximum (en particulier le « continent maritime »), les zones de mousson, les zones sèches subtropicales, coupées par des bandes plus humides. Ces structures marquent des éléments de la circulation générale bien connus tels que la convergence intertropicale et les cellules de Hadley et de Walker, les flux de mousson...

JJA Longwave

b



**Figure 1 :**

*Flux ondes longues émis par le système terre-atmosphère vers l'espace, en été, d'après les mesures du satellite Nimbus 7. En sombre : moins de 230 W/m<sup>2</sup>, en pointillé léger : plus de 280 W/m<sup>2</sup>.*

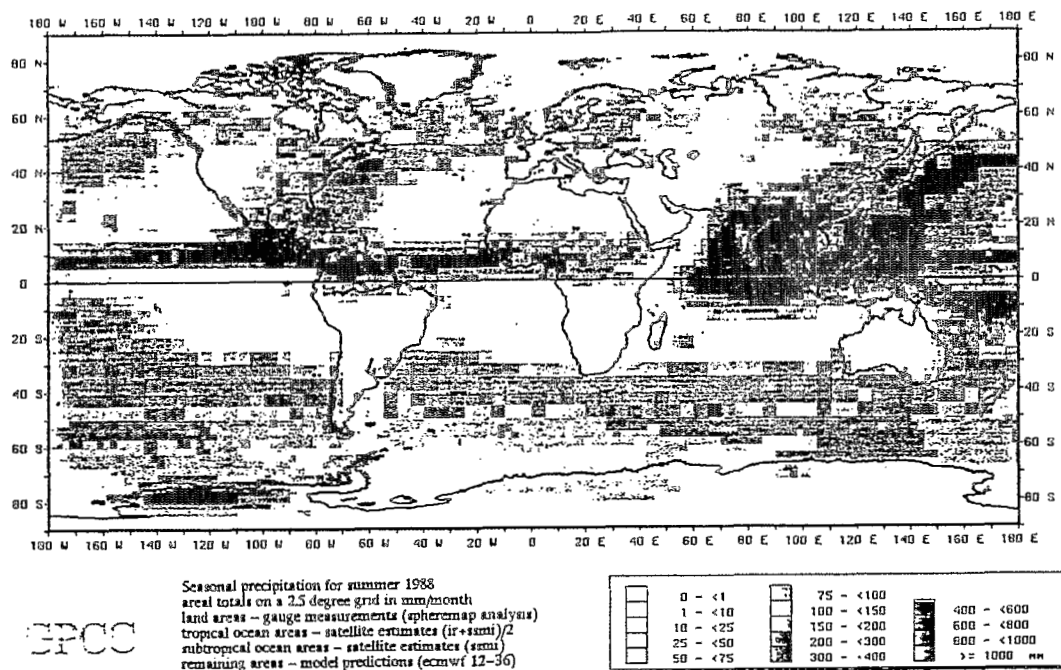


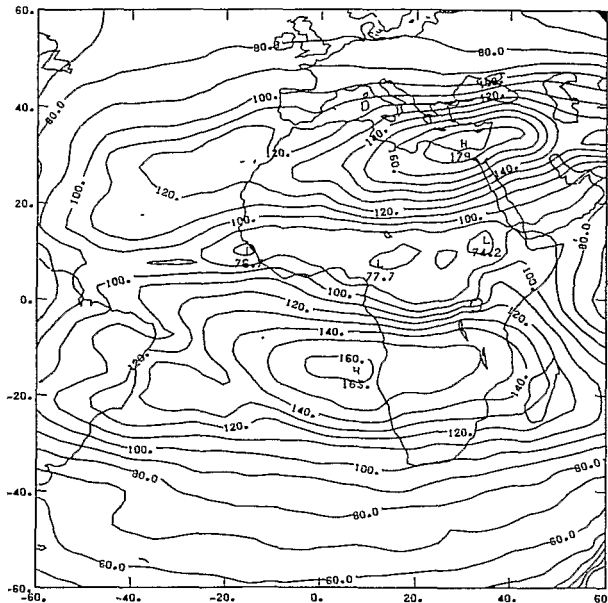
Figure 2 :

Estimation des précipitations globales pour l'été 1988 (en mm/mois) par le Global precipitation climatology centre.

Ces circulations de grande échelle sont également celles qui peuvent être le mieux représentées par les modèles de circulation générale atmosphérique, ce qui ne veut pas dire que les phénomènes associés, comprenant la représentation des systèmes nuageux et des précipitations, mais aussi l'interaction avec les océans et la surface continentale soient correctement décrits. C'est ainsi que le phénomène marquant du « El Niño Southern Oscillation » (Enso), facilement détectable sur les données conventionnelles comme satellitaires, est reproduit correctement par les modèles forcés par la température de surface de la mer, de même que les grandes variations interannuelles de la mousson indienne (LAVAL et LMD modelling group, 1994), ou celles des pluies sur le Nord Est du Brésil (FONTAINE *et al.*, 1994) mais le couplage océan-atmosphère qui induit ces oscillations n'est pas encore compris ni représenté d'une façon satisfaisante. Pour d'autres régions, comme l'Afrique, il est plus problématique d'obtenir une réponse aussi cohérente, même en forçant le modèles par les températures de mer observées. Sur les continents, les réactions du système couplé continent-atmosphère sont beaucoup plus rapides ; à long terme cependant, les modifications de la couverture

végétale (désertification (LAVAL et PICON, 1986), déforestation (POLCHER et LAVAL, 1994)) ont un rôle sur l'évolution du climat que les modèles atmosphériques ne représentent pas encore d'une façon unanime, en partie en raison de la paramétrisation des échanges d'eau et d'énergie à la surface.

Ces variations interannuelles de la circulation générale, clairement associées à des modulations des systèmes convectifs, ont également des conséquences sur les régions subtropicales et éventuellement sur les régions de latitudes tempérées. Au niveau des régions subtropicales, ce sont les grandes subsidences associées aux cellules de Hadley-Walker qui subissent des variations importantes, comme le montre notamment l'analyse des images du canal vapeur d'eau de Météosat (PICON et DESBOIS, 1990) (figure 3). Une des questions posées est celle de l'assèchement ou de l'humidification de la haute troposphère de ces régions, en liaison avec les fluctuations de la convection tropicale ; en raison de la contribution de cette vapeur d'eau à l'effet de serre. De même, les interactions avec les latitudes plus hautes par l'intermédiaire des « panaches tropicaux » (Mc GUIRK *et al.*, 1990) restent très mal connues.



**Figure 3 :**

*Radiances moyennes vapeur d'eau Météosat pour le mois de juillet 1985. Les radiances sont exprimées en comptes numériques. Les basses valeurs indiquent des régions humides, les valeurs élevées des régions sèches.*

À des échelles de temps plus courtes, les variations inter et intra-saisonniers des systèmes tropicaux suscitent également un grand intérêt. Les variations saisonnières, par exemple, ne se réduisent pas à une dérive régulière nord-sud de la bande de convection intertropicale. Elles se traduisent souvent par des passages rapides d'un état de régime à un autre, notamment dans le déclenchement des moussons, par exemple. Le rôle des masses continentales dans ces phénomènes est évident, mais encore insuffisamment compris. Quant aux variations intra-saisonniers, elles ont fait l'objet d'une attention particulière dans la dernière décennie, avec la découverte des fluctuations de 30-60 jours ou ondes de Madden Julian (MADDEN et JULIAN, 1971), qui sont associées à la propagation lente vers l'est de grosses masses convectives prenant naissance dans l'océan Indien (*Tropical Intra Seasonal Oscillation ou TISO* (EMANUEL, 1987)). Ce type de fluctuations n'a pas été mis clairement en évidence sur des continents comme l'Afrique ou l'Amérique du Sud, où différentes échelles temporelles modulent les systèmes convectifs.

Dans le cas de l'Afrique, par exemple, les ruptures parfois constatées dans la saison des pluies sont inexplicables. À des échelles plus courtes, par contre, les ondes d'est ont été largement étudiées (REED *et al.*, 1977), mais bien des inconnues demeurent dans leurs relations avec les phénomènes convectifs.

On arrive là au niveau de la paramétrisation de la convection dans les modèles de grande échelle, c'est-à-dire à des échelles de l'ordre de la maille de ces modèles. Les paramétrisations actuellement employées sont relativement grossières, et ce n'est que dans l'étude des systèmes convectifs de moyenne échelle que résident les possibilités d'amélioration. Il faut être conscient que de multiples questions se posent au sujet des systèmes convectifs tropicaux comme :

- quels sont les paramètres déterminants de l'activité convective (convergence grande échelle d'humidité, ondes tropicales, flux locaux d'humidité, de chaleur sensible, stabilité atmosphérique...) ?
- Quelle est l'origine de l'eau condensée dans les systèmes tropicaux (provenance océanique, recyclage dans des régions continentales, évaporation locale, flux en altitude...) ?
- Comment se traduisent les influences locales (orographie, zones côtières, végétation, nappes d'eau,...) sur la génération et l'évolution des systèmes ?
- Qu'est-ce qui détermine l'organisation des systèmes ?
- Comment fonctionne le cycle diurne des systèmes (nuages et précipitations) ?
- Quelles sont leurs interactions avec le rayonnement (influence des nuages sur le bilan radiatif dans l'atmosphère et au sol, influence éventuelle du rayonnement sur les nuages) ?

- Quelle est la proportion de pluie convective et stratiforme dans les différents systèmes ?
- Quelle est l'importance relative du forçage radiatif des nuages et de la libération de chaleur sensible dans les divers systèmes convectifs tropicaux ?
- Quelle est la proportion des flux ascendants qui contribue à l'alimentation de ces cellules à grande échelle par rapport aux circulations à l'échelle du système convectif ?
- Une période plus sèche (plus humide) se traduit-elle par une moins (plus) grande intensité des systèmes ou un moins (plus) grand nombre ?

La plupart de ces questions se posent à des échelles qui font intervenir à la fois les conditions météorologiques synoptiques et les conditions locales ; c'est pourquoi elles sont difficiles à aborder uniquement par des expériences locales ou uniquement par des raisonnements à grande échelle.

Aux échelles encore inférieures, on en arrive à la résolution des cellules orageuses, et à considérer plus en détail la dynamique interne et la microphysique des systèmes. Ces études sont fondamentales pour la compréhension détaillée des mécanismes, mais aussi pour l'interprétation des mesures de télédétection, enfin en relation avec l'hydrologie fine de petites régions. Elles sont cependant moins prioritaires actuellement pour les atmosphériciens que les questions concernant les systèmes de mésoéchelle dans leur ensemble.

## LES EXPÉRIENCES EFFECTUÉES ET LES PROGRAMMES FUTURS

L'expérience de météorologie tropicale la plus fructueuse a sans conteste été Gate (HOUGHTON, 1974), réalisée dans l'Atlantique tropical en 1974. Les principaux résultats ont été obtenus en particulier grâce à la couverture radar et météorologique d'une zone suffisamment grande pour que les systèmes soient décrits dans leur ensemble, et que des synergies utiles apparaissent avec les données satellitaires.

Les résultats de Gate font encore référence, par exemple pour tout ce qui concerne les précipitations tropicales océaniques : étalonnage des mesures satellitaires, modèles de variabilité spatio-temporelle des précipitations, mise au point de méthodologies radar d'estimation des précipitations... Par ailleurs, Gate a permis de documenter finement les systèmes convectifs de mésoéchelle qui, après avoir pris naissance sur l'Afrique, traversent l'Atlantique en donnant parfois naissance à des cyclones tropicaux.

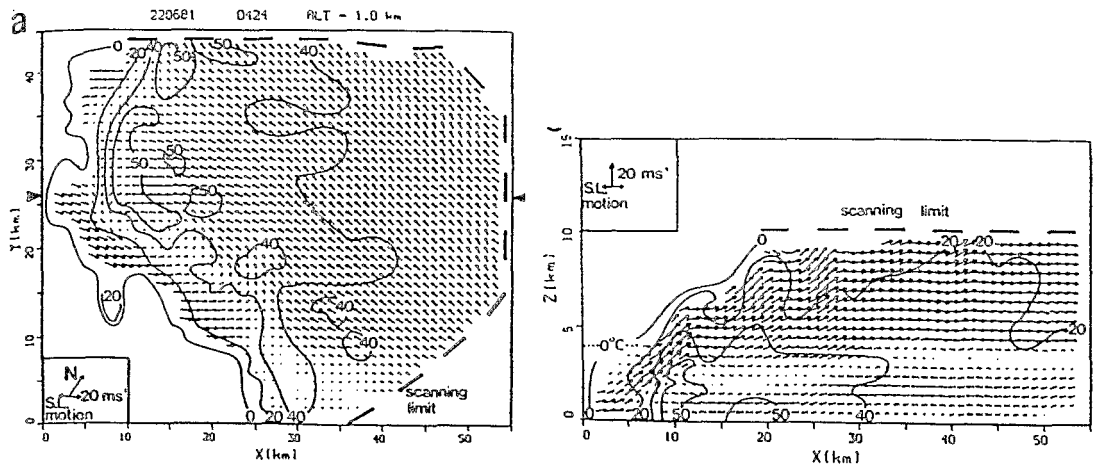
Toga-Coare (WEBSTER et LUKAS, 1992), réalisée en 1993-94, devrait apporter le même type d'informations, pour une région océanique totalement différente, celle de la « warm pool » du Pacifique équatorial ouest, qui fait en même temps

partie de la région du monde où la convection est la plus intense. Cependant, cette expérience comporte un volet océanique beaucoup plus développé, puisqu'elle est axée sur la réponse couplée de l'océan et de l'atmosphère. De plus, un certain nombre de méthodologies ont évolué : meilleure modélisation opérationnelle à grande échelle, meilleurs modèles mésoéchelle, meilleures données satellitaires notamment avec l'apport des instruments micro-ondes.

En ce qui concerne les expériences purement continentales, elles ont souvent porté sur des études à échelle plus fine, s'intéressant notamment à la dynamique et la thermodynamique interne de systèmes nuageux particuliers, comme les lignes de grains africaines pendant COPT 81 (ROUX *et al.* 1984). Dans cette expérience, où les deux radars doppler avaient fourni d'excellentes études de cas (figure 4), les faiblesses venaient du manque d'encadrement synoptique et de l'absence de satellite géostationnaire.

Un autre objet largement étudié est le cyclone tropical, auxquels de nombreux efforts ont été consacrés, surtout aux États-Unis. Beaucoup reste cependant à faire dans ce domaine, par exemple sur les pluies associées aux cyclones, notamment lorsqu'ils rencontrent des continents ou des îles.

Il faut aussi mentionner les études sur les types de nuages particuliers dans le cadre de Fire (First ISCCP Regional Experiment). Jusqu'à présent, ces études se sont axées sur des nuages ayant une forte influence sur le bilan radiatif, mais non précipitants : les cirrus des régions tempérées et les stratocumulus océaniques. La phase III de Fire prévoit d'orienter peu à peu les études cirrus vers les cirrus des régions tropicales.



**Figure 4 :**

*Horizontal and vertical cross section of a squall line observed by a dual-Doppler radar system during COPT 81. Motions relative to the squall line are indicated, as well as radar reflectivities.*



C'est plus récemment que sont apparues les préoccupations d'étude des échanges surface continentale-atmosphère, incluant les processus hydrologiques, avec notamment les expériences Hapex. Hapex-Sahel est présenté par ailleurs dans ces journées ; mais il faut noter que cette expérience était centrée sur une période d'assèchement, et n'incluait donc que peu les phénomènes de précipitations et d'interaction avec les systèmes convectifs atmosphériques. À plus grande échelle maintenant, c'est le programme GCIP qui se préoccupe des bilans hydrologiques à l'échelle d'un très grand bassin, celui du Mississippi, entièrement couvert par un réseau de radars-doppler pour la détermination des précipitations.

Dans l'avenir, l'expérience tropicale continentale prévue sur le Brésil (Lambada) sera, sous réserve d'inventaire des moyens mis réellement en œuvre, certainement profitable à la fois pour l'étude des systèmes convectifs au-dessus de la forêt équatoriale et pour les bilans de surface.

Il est malheureusement impossible d'être exhaustif dans la liste des programmes prévus. Il faut signaler toutefois que plusieurs dispositifs d'observation seront mis en place ou renforcés dans des régions tropicales pluvieuses pendant l'expérience spatiale TRMM (THEON *et al.*, 1992), qui aura lieu à partir de 1997. Nous y reviendrons ci-dessous, mais on peut déjà noter que le continent africain est absent de ces programmations.

## APPORT DE LA TÉLÉDÉTECTION ATMOSPHÉRIQUE, PERSPECTIVES

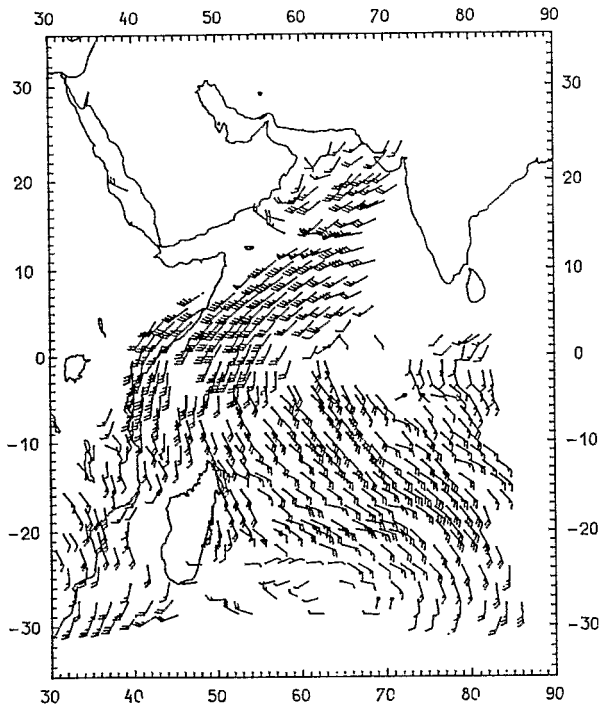
L'apport de la télédétection atmosphérique pour la météorologie et la climatologie tropicale est d'ores et déjà considérable, mais reste cependant souvent qualitatif, et, est de ce fait sous-utilisé pour les applications numériques ou quantitatives, telles que l'initialisation des modèles de circulation générale ou l'établissement de bilans d'énergie atmosphériques ou de surface. Par ailleurs, beaucoup des variables recherchées sont mieux déterminées sur les océans que sur les continents :

- température : dans les régions tropicales peu pourvues en radiosondages, les profils verticaux de température, obtenus principalement grâce aux sondeurs IR (TOVS) des satellites Noaa, devraient être utiles. En fait, leur précision limitée associée à une mauvaise résolution verticale, ne permet pas de mettre en évidence des phénomènes tels que les inversions, ou de faibles changements de la stabilité de l'atmosphère. De plus, dans les régions de l'ITCZ, ou même à son voisinage, les nuages convectifs et les cirrus restreignent considérablement le domaine d'application de méthodologies développées pour le « ciel clair » ;
- humidité : les instruments micro-ondes permettent maintenant une restitution fiable de la quantité de vapeur d'eau intégrée ( $\pm 3 \text{ kg/m}^2$  pour des contenus de  $50 \text{ kg/m}^2$ ), mais uniquement au-dessus de l'océan. Une

estimation de la vapeur d'eau dans la haute troposphère peut être obtenue grâce aux canaux « vapeur d'eau » des satellites géostationnaires (PICON et DESBOIS, 1994) ; quant aux sondeurs IR, ils peuvent en gros actuellement séparer trois niveaux, mais leur précision absolue reste très limitée.

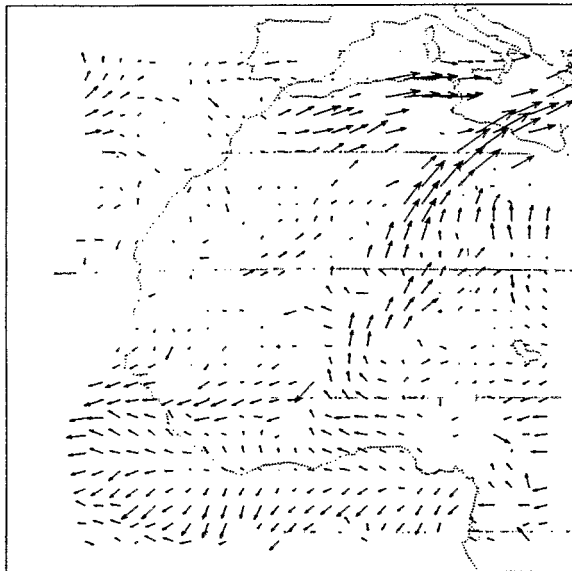
Pour ces deux paramètres, dont l'introduction dans les modèles de prévision est possible, on ne note d'impact positif que dans l'hémisphère sud, mais pas dans les régions tropicales.

- vent : les vents-nuages (par suivi des nuages sur les images de satellites géostationnaires) sont opérationnels depuis longtemps. En ce qui concerne les basses couches atmosphériques, ils s'avèrent très utiles au-dessus des océans tropicaux, où le suivi des cumulus d'alizés (ou de mousson (DESBOIS, 1979) - figure 5) est possible ; mais leur production est plus problématique au-dessus des continents. Pour les hautes couches, les cirrus constituent des traceurs acceptables, malgré des problèmes de sous estimation. Plus récemment, l'utilisation de vents dérivés du canal vapeur d'eau (figure 6) a permis d'améliorer et d'étendre la détermination des vents hauts ; (LAURENT et DESBOIS, 1992) ;
- bilan radiatif au sommet de l'atmosphère : l'existence d'instruments comme ceux d'Erbe, et plus récemment ScaRaB (KANDEL, 1992), permettent de mesurer les flux ondes courtes (0.2-4  $\mu\text{m}$ ) et ondes longues (4-200  $\mu\text{m}$ ) provenant du système terre-atmosphère avec des précisions de quelques  $\text{W}/\text{m}^2$ . Le lien avec les bilans radiatifs au sol n'est pas évident, puisqu'il requiert à la fois une bonne connaissance des paramètres « ciel clair » de l'atmosphère et des propriétés des nuages ;
- propriétés de la couverture nuageuse : on regroupe sous ce terme aussi bien la couverture nuageuse elle-même (pourcentage de surface couverte par des nuages), le type de nuage présent, que l'épaisseur optique de ces nuages, la température de leur sommet, leur contenu en eau condensée, la phase (glace ou eau liquide) des particules nuageuses, voire la taille des particules. Au niveau climatique, ISCCP (ROSSOW et GARDER, 1993) représente le traitement optimum de l'ensemble des données IR thermique et VIS des satellites opérationnels disponibles depuis 1983. De ces données peuvent être déduites des propriétés statistiques de la couverture nuageuse, en particulier tropicale : position de l'ITCZ, identification des nuages et systèmes nuageux, taille et nombre de ces systèmes (TOLEDO *et al.*, 1992). Au niveau des déterminations instantanées plus fines, l'apport des instruments micro-ondes a été déterminant ces dernières années, mais doit encore être amélioré, notamment par une utilisation combinée avec les données IR ;
- précipitations : il est clair que ce paramètre intéresse non seulement les atmosphéristes, mais aussi les hydrologues. À l'heure actuelle cependant, les besoins des hydrologues ne peuvent pas être satisfaits par les précisions atteintes :



**Figure 5 :**

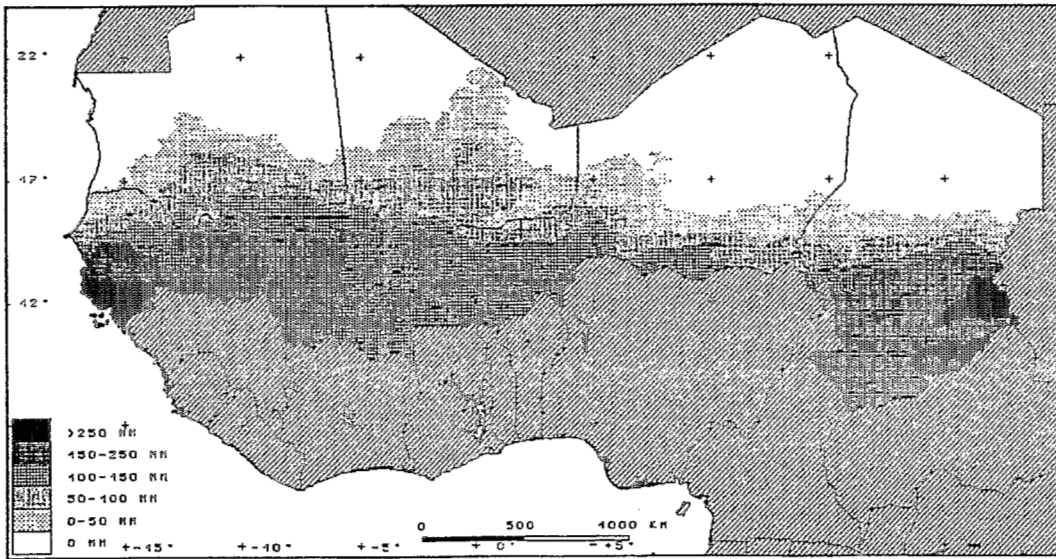
*Vents basses couches mesurés le 21 juin 1979 au moyen du satellite Goes Océan Indien.*



**Figure 6 :**

*Vents hautes couches (vers 200 - 300 hPa) mesurés grâce aux images « vapeur d'eau » du satellite Météosat, le 21 juin 1989.*

— les méthodes à seuil IR, comme celle du Goes Precipitation Index (ARKIN, 1979), sont basées sur le nombre et/ou l'étendue des événements à sommets plus froids qu'un certain seuil se produisant sur une région donnée. Leur principe est que l'activité des systèmes convectifs, liée aux précipitations qu'ils produisent, se traduit aussi par l'extension des nuages élevés qu'ils génèrent (non seulement les nuages convectifs proprement dits, mais également les nuages stratiformes élevés qui en émanent). Par conséquent, la valeur de telles méthodes ne peut être que statistique (production de moyennes mensuelles sur des surfaces de quelques degrés carrés à l'aide d'images horaires ou bi-horaires provenant de satellites géostationnaires), et elles ne peuvent en aucun cas fournir ni des valeurs instantanées, ni même des localisations des zones précipitantes. Les mêmes remarques s'appliquent à la méthode Epsat de l'Orstom Lannion (CARN *et al.*, 1989), qui introduit un indicateur supplémentaire, la température radiative du sol (figure 7) ;

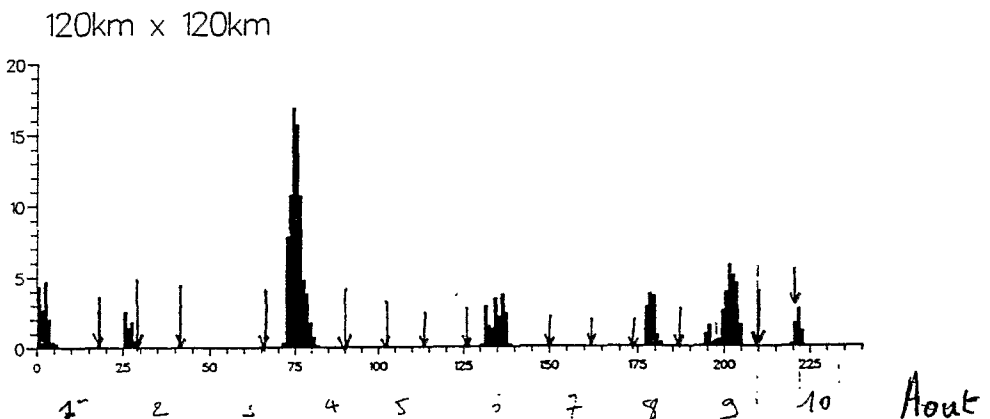


**Figure 7 :**

*Pluie estimée en juillet 1993 sur les pays du Sahel par l'algorithme de l'Orstom Lannion, qui combine un indicateur de fréquence d'occurrence des nuages et un indicateur de température de la surface du sol.*

— les méthodes basées sur l'absorption ou la diffusion du rayonnement microonde (SPENCER *et al.*, 1989) par les éléments nuageux précipitants eux-mêmes sont beaucoup plus proches de la mesure physique. Cependant, la précision des mesures instantanées reste encore très discutable (une valeur d'erreur de l'ordre de 100 % de la mesure est parfois citée). Les méthodes par absorption ne fonctionnent qu'au-dessus des océans. Au-dessus des continents, peu de tests systématiques ont été effectués, car les atmosphériciens préfèrent utiliser les données du réseau pluviométrique conventionnel ou les données radar. Il est vrai que, même dans un cas de détermination correcte des valeurs instantanées, l'échantillonnage actuel des instruments micro-ondes ne permet pas d'obtenir de valeurs moyennes significatives (figure 8). C'est pourquoi un effort est actuellement fait vers le développement de méthodes combinées IR-micro-ondes qui associent l'échantillonnage correct obtenu à partir des géostationnaires en IR aux déterminations plus précises des zones précipitantes et des taux de précipitation par les instruments micro-ondes sur des satellites à orbite basse (JOBARD et DESBOIS, 1994).

Ces efforts pour améliorer la détermination des précipitations sont structurés notamment autour du programmes GPCP (WMO/ICSU, 1990) (Global Precipitation Climatology Programme) qui organise des campagnes de validation — Japon, Europe, région Toga-Coare — et développe une climatologie multi-sources au CPCC (Climatology Centre). Il existe par ailleurs une validation spécifique des algorithmes microondes de précipitation autour du programme Wetnet, dont le but est d'exploiter au mieux les données SSM/I. Enfin, des activités du même type se développent autour du programme spatial TRMM (THEON *et al.*, 1992) destiné spécifiquement à la mesure des précipitations tropicales.



**Figure 8 :**

Précipitations moyennes sur le degré carré d'Epsat-Niger à Niamey, pendant une période de 10 jours. Les flèches indiquent les instants où une image SSM/I était disponible.

Parmi les prospectives en télédétection atmosphérique, on peut distinguer celles qui sont à relativement long terme (après 2 000) et les développements qui seront utilisables avant cette date. Par ailleurs, nous n'insisterons ici que sur les développements qui sont susceptibles d'intéresser l'interaction continent atmosphère en particulier dans les régions tropicales :

- surveillance du bilan radiatif : le programme ScaRaB (KANDEL *et al.*, 1992) déjà en cours, sera poursuivi par un deuxième lancement en 96, qui devrait assurer une surveillance continue de ce paramètre. Les instruments américains Ceres devraient assurer leur part de surveillance, à partir du premier modèle lancé en 1997 sur TRMM ;
- géostationnaires de nouvelle génération : les nouveaux géostationnaires disposeront de davantage de canaux spectraux IR, d'une meilleure répétitivité (le quart d'heure), et d'une résolution spatiale améliorée. La classification des nuages et la détermination de certaines de leurs propriétés pourra être améliorée par des méthodes similaires à celles employées actuellement avec AVHRR. En ce qui concerne la détermination des précipitations, une meilleure discrimination pourra être faite entre nuages convectifs et nuages stratiformes associés. D'autre part, des sondes IR existeront sur certains des géostationnaires. C'est le cas pour GOES-I, qui est maintenant opérationnel ; GMS nouvelle formule devrait être lancé dans un délai d'un an, et Météosat Next vers 1998 ;
- instruments micro-ondes : de nouveaux instruments de sondage micro-onde sont attendus pour les satellites météorologiques opérationnels à orbite basse (AMSU A et B) ; une nouvelle génération d'instruments SSM/I, connue sous le nom de SSM/I S, devrait prochainement voir le jour sur les satellites météorologiques militaires américains ;
- polder : cet instrument français à visée multidirectionnelle travaillant dans les longueurs d'onde visible sera lancé à bord du satellite japonais Adeos en 1996. En dehors de ses capacités pour la télédétection de surface, Polder permettra de déterminer des variables comme la vapeur d'eau intégrée au-dessus des continents, les propriétés bidirectionnelles de la réflectivité des nuages, la pression au sommet des nuages, les aérosols troposphériques ;
- TRMM (THÉON *et al.*, 1992) (Tropical Rainfall Measurement Mission) : cette mission nippo-américaine emportera un instrument de bilan radiatif (Ceres), un imageur VIS-IR (du type AVHRR), un imageur micro-ondes (type SSM/I), un détecteur d'éclairs, et surtout un radar-précipitations développé par le Japon. Ce radar devra fournir des indications sur la répartition verticale des précipitations, mais sera également utilisé en synergie avec l'instrument micro-ondes passif et l'imageur VIS-IR pour la détermination du taux de précipitation instantanée.

Cette expérience devrait faire faire un saut qualitatif dans la détermination des précipitations, bien qu'il ne soit pas question d'installer des radars précipitation en orbite de manière opérationnelle. Cependant, le radar contraint la plate-forme TRMM à une orbite basse (380 km), limitant par là même la fauchée des autres instruments, ce qui aboutit à des échantillonnages à peu près aussi désastreux des régions tropicales qu'avec les orbites héliosynchrones actuelles. La stratégie adoptée est donc d'améliorer grâce à TRMM l'algorithme de détermination des précipitations instantanées, puis de la transposer pour une meilleure utilisation des instruments micro-ondes et infrarouges existants ; ceci ne pourra se faire que si des expériences *in-situ* bien ciblées sont organisées pendant la durée de fonctionnement de TRMM. Certaines sont déjà prévues dans différents pays tropicaux. Il est important de se placer dans des régions de précipitations fréquentes, de façon à utiliser au mieux l'échantillonnage restreint de TRMM.

- Les plate-formes polaires européennes Envisat puis Metop emporteront (vers 2 000 ?) un grand nombre d'instruments performants qu'il n'est pas question de décrire ici en détail. Un point important sera l'existence de sondeurs infrarouges interférométriques, nettement plus performants que ceux existant actuellement (IASI). Par ailleurs, des imageurs-sondeurs plus performants que ceux existant actuellement sont également à l'étude dans le domaine micro-onde (MIMR), avec notamment une meilleure résolution spatiale que les SSM/I.

La prospective à plus long terme se tourne vers le développement d'instruments « actifs » du type radar ou lidar. La priorité semble donnée actuellement, à l'Esa comme à la Nasa, plus à la détermination des propriétés des nuages (lidar rétrodiffusion, radar-nuages) qu'à la détermination des précipitations par radar.

C'est pourquoi il paraît opportun actuellement de promouvoir de nouvelles missions destinées à l'étude des précipitations tropicales. Dans le groupe de recherche « énergie et cycle de l'eau dans les tropiques » du LMD, nous avons toujours souligné le fait que la détermination des précipitations en zone tropicale était autant un problème d'échantillonnage qu'un problème de détermination instantanée ; ceci a été largement confirmé par les résultats d'Epsat-Niger (LEBEL *et al.*, 1992), mais aussi par des études récentes sur Toga-Coare. Après avoir montré l'utilité, sous de telles contraintes, d'utiliser les combinaisons IR-micro-ondes, nous avons proposé d'améliorer l'échantillonnage micro-onde des régions intertropicales au moyen d'un satellite à orbite adaptée. C'est l'objectif du projet « Tropiques » (DESBOIS, 1995) dont l'étude a été approuvée par le CNES, dans le cadre des projets de petits satellites.

L'originalité de Tropiques est de privilégier la couverture spatio-temporelle par rapport à la précision instantanée de détermination. La définition préliminaire de la mission fait appel à une orbite de 1 000 à 1 250 km d'altitude, permettant des

fauchées de plus de 2 000 km pour le radiomètre micro-onde et l'instrument de bilan radiatif, qui sont les deux instruments de base retenus. L'orbite n'est inclinée que de 15° sur l'équateur, afin d'assurer un rythme moyen proche d'une donnée toutes les trois heures pour n'importe quel point de la bande 20°N-20°S.

### **THÈMES DE RECHERCHE ET EXPÉRIENCES À DÉVELOPPER DANS LE CADRE D'UNE INTERACTION ATMOSPHÉRICIENS - HYDROLOGUES**

La réflexion sur ces thèmes a déjà eu lieu dans le cadre de discussions organisées entre hydrologues et atmosphériciens français dans le cadre du PNEDC. Il n'est pas question de la reprendre ici, ni d'élaborer des plans d'expériences précis. Il s'agit plutôt de tirer des conséquences sur certaines orientations des observations faites dans les paragraphes précédents, et des grandes lignes définies lors des discussions PNEDC.

Il existe un besoin d'expériences bilan énergétique et hydrique à la surface et dans l'atmosphère en région continentale tropicale humide. Une preuve en est par exemple le désaccord des modèles sur les conséquences d'expériences de déforestation, une autre, la mauvaise compréhension des causes des variations de la convection dans ces régions.

Ce type d'expérience doit avoir une couverture spatiale assez grande et temporelle assez longue pour :

- analyser les fluctuations des systèmes météorologiques à diverses échelles (cycle diurne, ondes, cycle saisonnier),
- explorer d'une façon statistiquement significative divers types de systèmes pluvieux et les réponses hydrologiques à différentes échelles spatio-temporelles.

L'encadrement météorologique de telles expériences doit être suffisant pour les besoins d'initialisation d'un modèle météorologique mésoéchelle, permettant de simuler entre autres les interactions surface-atmosphère et la répartition des précipitations.

Il existe un besoin de validation des mesures satellitaires de précipitation en région suffisamment pluvieuse, sous divers types de régimes climatiques et de systèmes mésoéchelle, et ceci particulièrement durant la durée de vie de TRMM. Ces validations doivent être possibles aux échelles instantanées et pour des valeurs moyennes.

Compte tenu des échelles accessibles par les satellites, la « décomposition des champs de précipitation » est toujours nécessaire en entrée des modèles hydrologiques ; diverses méthodes doivent être testées à partir d'estimations satellitaires et de données sol (pluviographiques et radar). En plus des méthodes stochastiques souvent utilisées, des méthodes statistiques de type Auhely, incluant des paramètres météorologiques, pourraient être testées en région tropicale présentant du relief ; la modélisation mésoéchelle pourrait également intervenir dans ces



développements méthodologiques. Un des buts est l'obtention, à partir d'une estimation satellitaire trop lissée, d'une entrée hydrologique « précipitations » valable sur des surfaces significatives au niveau régional ou d'un grand bassin versant, un autre étant de pouvoir décomposer les champs de précipitation issus des modèles grande échelle.

Un point intéressant météorologistes et hydrologues est la détection et l'évaluation des paramètres des « événements exceptionnels », qui accumulent parfois en quelques heures une proportion notable des précipitations d'une saison. Il est bien entendu difficile de programmer la saisie d'événements exceptionnels, par définition rares, mais certaines régions peuvent s'y prêter davantage.

En conclusion, on constate qu'il y a matière à définir (au moins) une expérience d'intérêt commun hydrologie-physique de l'atmosphère en région tropicale continentale à précipitations abondantes. Cette expérience doit être plutôt axée sur l'extension et la durée que sur une action « coup de poing » mobilisant de nombreuses équipes et des moyens exceptionnels (type avions) sur une région restreinte pour une période limitée (ce qui n'exclut pas de telles interventions pendant l'expérience principale). Les principaux moyens à mettre en place sur une région de quelques 100 x 100 km sont des mesures hydrologiques et pluviométriques, incluant des mesures radar bien calibrées, et un renforcement de l'encadrement météorologique. Le fonctionnement d'un tel site pendant l'expérience TRMM serait le bienvenu, surtout s'il est situé dans une région climatologique non représentée par les autres sites TRMM.

**BIBLIOGRAPHIE**

- ALISHOUSE J.C., SNIDER S., VONGSATHORN J., FERRARO R.R., 1990. Determination of oceanic total precipitable water from the SSM/I. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 28, 811-816.
- ARKIN P. A., 1979. The relationship between fractional coverage of high cloud and rainfall accumulation during GATE over the B-Scale array. *Mon. Wea. Rev.*, 107, 1382-1387.
- BARKSTROM B.R., HARRISON E., SMITH G.L., GREEN R., KIBLER J., CESS R. the ERBE Science Team, 1989. Earth Radiation Budget Experiment (ERBE) archival and April 1985 results. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 70, 1254-1262.
- CARN M., LAHUEC J.-P., DAGORNE D., GUILLOT B., 1989. Rainfall estimation using TIR Meteosat imagery : importance of the soil surface maximum radiative temperature in satellite derived rainfall assessments over Western Sahel. Proceedings of the 4th conference on satellite meteorology and oceanology, San Diego, Californie, 126-129.
- DESBOIS M., 1979. Champs de vent déduits des déplacements des nuages mesurés à partir d'images successives du satellite Goes I.O. au-dessus de l'Océan Indien. Note LMD n° 97, Septembre 1979.
- DESBOIS M., 1995. Tropiques, a small satellite for the study of the variability of water and energy cycles in the intertropical band. In *Platforms and Systems*, William L. Barnes, Brian J. Horais, Editors, Proc. SPIE 2317, 136-147.
- EMANUEL K.A., 1987. An air-sea interaction model of intraseasonal oscillation in the tropics. *J. Atmos. Sci.*, 44, 2324-2340
- FONTAINE B., JANICOT S., ROCHA DE ARAGÃO J.O., 1994. Analyse des relations entre les pluies dans le Nord-Est du Brésil et la température de l'océan Atlantique ; observations et simulations dans le modèle du LMD. Communication personnelle.
- HOUGHTON H. D., 1974. The central programme for the GARP Atlantic Tropical Experiment. Gate report n° 3, W.M.O., 35 p.

- JOBARD I., DESBOIS M., 1994. Satellite estimation of the tropical precipitation using the Meteosat and SSM/I data. *Atmospheric Research*, 34, 285-298.
- KANDEL R., and the ScaRaB project team, 1992. Earth radiation budget observation for climate research — the ScaRaB project. IRS'92, Tallinn, Ed. Keevallik & Karner, A. Deepak Publ.
- LAURENT H., DESBOIS M., 1992. Measurement and validation of atmospheric motions detected on water vapor Meteosat imagery. *Adv. Space. Res.*, 12, 7, 105-114.
- LAVAL K., the LMD modelling group, 1994. Modélisation de la mousson, expérience Moneg. Lettre PIGB-PMRC-France, Juin 1994.
- LAVAL K., PICON L., 1986. Effect of a change of the surface albedo of the Sahel on Climate. *J. Atmos. Sci.*, 43, 2418-2429.
- LEBEL T., SAUVAGEOT H., HOEPPFNER M., DESBOIS M., GUILLOT B., HUBERT P., 1992. Rainfall estimation in the Sahel : the Epsat-Niger experiment. *Hydrological Sciences*, 37, 1396-1406.
- MADDEN R. A., JULIAN P. R., 1971. Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.*, 28, 702-708
- MCGUIRK J. P., THOMPSON A. H., ANDERSON L. L., Jr., 1989. Synoptic scale Moisture Variation over the tropical Pacific Ocean. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 1076-1091.
- PICON L., DESBOIS M., 1994. High level moisture observations and derived parameters from Meteosat and other geostationary satellites. Cospar, Hamburg 1994, invited paper. To be published in *Space Research*, 22 p.
- PICON L., DESBOIS M., 1990. Comparisons between Meteosat water vapor radiance field and E.C.M.W.F. analysed fields for July 1985. *J. Climate*, 3, 865-876.
- POLCHER J., LAVAL K., 1994. A statistical study of regional impact of deforestation on climate of the LMD-GCM. To appear in *Climate Dynamics*.

- REED R.J., NORQUIST D.C., RECKER E.E., 1977. The structure and properties of African wave disturbances as observed during phase III of Gate. *Mon. Wea. Rev.*, 105, 317-333.
- ROSSOW W.B., GARDER L.C., 1993. Cloud detection using satellite measurements of infrared and visible radiances for ISCCP. *J. of Climate*, 6, 2341-2369.
- ROUX F., TESTUD J., PAYEN M., PINTY B., 1984. West-African squall line thermodynamic structure retrieved from dual-Doppler radar observations. *J. Atmos. Sci.*, 41, 3104-3121.
- SPENCER R.W., GOODMAN H.M., HOOD R.E., 1989. Precipitation retrieval over land and ocean with the SSM/I : identification and characteristics of the scattering signal. *J. Atmos. Ocean Techn.*, 6, 254-273.
- THEON J. S., MATSUNO T., SAKATA T., FUGONO N., 1992. « The Global Role of Tropical Rainfall » A. Deepak Pub. Co., Hampton, Va, 280 p.
- TOLEDO MACHADO L. A., DESBOIS M., DUVEL J.-Ph., 1992. Structural characteristics of deep convective systems over tropical Africa and the Atlantic Ocean. *Mon. Wea. Rev.*, 120, 392-406.
- WEBSTER P.J., LUKAS R., 1992. Toga Coare : The coupled ocean-atmosphere response experiment. *Bull. Am. Met. Soc.*, 73, 1377-1416.
- WMO/ICSU., 1990. The global precipitation climatology project — implementation and data management Plan. WMO/TD-N° 367, Geneva, June 1990.