

Ecole Nationale de La Météorologie/UFR

# Cours de Météorologie tropicale

*Appendices*

Support de cours réalisé par Florent Beucher



# Table des matières

<b>A</b>	<b>Manuel du prévisionniste pour tracer le WASA/F (West African Synthetic Analysis/Forecast)</b>	<b>5</b>
A.1	Introduction . . . . .	6
A.2	Les 10 principales caractéristiques de la MAO . . . . .	7
A.2.1	Le Front InterTropical (FIT) . . . . .	7
A.2.2	La dépression thermique $Dt$ . . . . .	8
A.2.3	Le Jet d'Ouest SubTropical (JOST) . . . . .	8
A.2.4	Thalwegs situés au nord du FIT . . . . .	9
A.2.5	Le Jet d'Est Tropical (TEJ) . . . . .	10
A.2.6	Le Jet d'Est Africain (JEA) . . . . .	10
A.2.7	Les ondes d'est africaines (OEA) et vortex cycloniques $C$ . . . . .	10
A.2.8	Air sec de moyenne troposphère . . . . .	12
A.2.9	La couche du flux de mousson d'ouest et énergie de basses couches . . . . .	12
A.2.10	Convection . . . . .	13
A.3	Illustration (figure A.2) . . . . .	17
A.4	Conclusions . . . . .	17



## Annexe A

# Manuel du prévisionniste pour tracer le WASA/F (West African Synthetic Analysis/Forecast)



Projet N°004089

AMMA (African Monsoon Multidisciplinary Analysis : Projet  
International Multidisciplinaire sur l'Afrique de l'Ouest)

Début du projet : 1<sup>er</sup> janvier 2003

Durée : 60 mois

Lead contractor : CNRM

Coordinator of deliverable : Jean-Philippe Lafore

Auteurs du guide : J.P. Lafore (Météo-France (MF)), P. Chapelet (MF), Z. Mumba (ACMAD), N. Chapelon (MF), M. Dufresne (ACMAD), R. Agbadu (MF), A. Abdoul-Aziz (MF), H.Hama (Niger ASECNA), N.Asencio (MF), F. Couvreur (MF), M. Nuret (MF), A. Garba (EAMAC)

Projet co-fondé par la Commission Européenne inclus dans le 6<sup>e</sup> plan de marche 2002-2006

Article traduit par Florent Beucher avec l'autorisation des auteurs en juillet 2007

## A.1 Introduction

La tâche du prévisionniste revient à analyser de nombreuses observations et des résultats de modèles numériques (analyse et prévision) avant d'élaborer sa prévision pour une échéance et un lieu donnés. Cette synthèse des informations est très complexe car elle implique des critères à la fois objectifs et subjectifs où le savoir-faire du prévisionniste devient un atout très appréciable pour améliorer la qualité de sa prévision finale. Les difficultés sont encore plus grandes sous les tropiques car à la différence des moyennes latitudes, l'atmosphère est faiblement équilibrée ce qui signifie qu'elle est peu prédictible, essentiellement pour les événements convectifs (d'échelle aérologique ou de méso-échelle). Par conséquent, il devient urgent d'améliorer la compréhension des processus liés à la convection tropicale.

L'objectif de cette note est de proposer un cadre pour guider la tâche du prévisionniste pendant la Période d'Observations Spéciale (SOP) du projet AMMA qui s'est attaché à étudier précisément la Mousson d'été (juin à septembre) d'Afrique de l'Ouest (MAO). Cette proposition de technique de prévision est basée sur la préparation d'une carte synthétique qui résume tous les éléments-clés de la MAO que ce soit pour l'analyse ou la prévision à une échéance donnée. Cette carte synthétique est appelée WASA (West African Synthetic Analysis) pour l'analyse et WASF (West African Synthetic Forecast) pour la prévision. La prévision finale des événements météorologiques résulte de la combinaison des principales caractéristiques de la MAO (listées ci-dessous) qui suivent certaines règles décrites dans ce guide.

Les 10 caractéristiques suivantes de la MAO, toutes considérées comme primordiales, sont tracées sur la même carte (figure A.1) dans l'objectif d'analyser rapidement la situation météorologique et de prévoir la convection profonde sur l'Afrique de l'Ouest :

1. Le Front InterTropical (FIT) (en anglais, Intertropical Discontinuity : ITD)
2. La dépression thermique saharienne (Dt) (en anglais, Saharan Heat Low : HL)
3. Le Jet d'Ouest SubTropical (JOST) (en anglais, Subtropical Jet : STJ)
4. Thalwegs en provenance des moyennes latitudes (en anglais, Troughs extending from midlatitudes)
5. Le Jet d'Est Tropical (en anglais, Tropical Easterly Jet : TEJ)
6. Le Jet d'Est Africain (JEA) (en anglais, African Easterly Jet : AEJ)
7. Les Ondes d'Est Africaines (OEA) (en anglais, African Easterly Waves : AEW) et vortex cyclonique (en anglais, cyclonic vortices : *C*)
8. Air sec en moyenne troposphère (en anglais, midlevel dry air)
9. Le flux de mousson et l'énergie de basses couches associée (en anglais, westerly Monsoon layer)
10. L'activité convective avec 3 cas distincts :
  - (a) les zones où la convection est inhibée
  - (b) les cellules convectives isolées (pas d'organisation de méso-échelle)
  - (c) les systèmes convectifs de méso-échelle (Meso-Scale Convective Systems : MCS) et les lignes de grain (Squall Lines : SL).

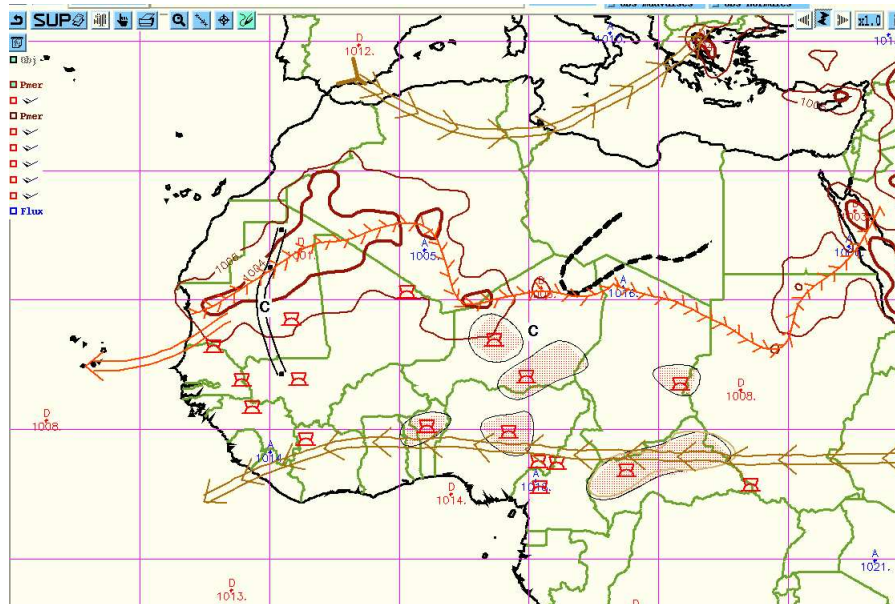


FIG. A.1 – Illustration des différents éléments-clés figurant sur le WASA/F.

## A.2 Les 10 principales caractéristiques de la MAO

### A.2.1 Le Front InterTropical (FIT)



Le FIT est une discontinuité proche de la surface qui divise l'Afrique en deux grandes zones depuis l'Atlantique jusqu'au Soudan, avec :

- au sud du FIT, un flux de mousson de secteur sud/sud-ouest contenant de fortes énergies (fortes  $\theta'_w$ ) et dont l'épaisseur atteint approximativement les niveaux 800-850 hPa ;
- au nord du FIT, un flux de nord très sec (faibles valeurs de point de rosée  $T_d$  et de  $\theta'_w$ ).

Les trois critères nécessaires pour tracer la ligne du FIT sont classés par ordre d'importance décroissante :

- ligne de convergence en surface (10 m. ou 950 hPa) entre les vents de sud-ouest et nord-est. Ce critère est plus facile à utiliser la nuit que le jour ;
- fort gradient d'humidité en surface. On peut utiliser la  $\theta'_w$  (écartement de  $0.5^\circ$ ), le  $T_d$  (tracer l'isoline  $15^\circ\text{C}$ ) ou l'humidité relative (tracer l'isoline proche de 40%) ;
- ligne de pression minimale. Ce critère est particulièrement utile près de la côte Ouest de l'Afrique où les deux précédents critères sont difficiles à appliquer. La dépression thermique située au nord du Mali et de la Mauritanie (très étendue zonalement) se prête bien à ce critère car elle est proche du FIT (cf. section sur la dépression thermique pour détails).

Comme ces trois critères ne mènent pas forcément au même tracé, le prévisionniste doit utiliser ses connaissances et son expérience pour savoir quel critère a plus ou moins de validité selon la saison et le lieu <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Note personnelle : l'utilisation du TH (tour d'horizon) permet également de repérer facilement le FIT car y figurent le  $T_d$ , le vent et la nébulosité.

Sur l'Océan Atlantique, la Zone de Convergence InterTropicale (ZCIT) est tracée dans la zone de convergence des alizés, du maximum d'énergie ( $\theta'_w > 21^\circ C$ ) à 950 hPa, et de la localisation des MCS. Il y a une suite logique entre la ZCIT et les systèmes convectifs qui sortent de l'Afrique de l'Ouest, mais pas avec le FIT. Par conséquent, il n'y a pas lieu de relier la ZCIT avec le FIT.

### A.2.2 La dépression thermique $Dt$

La dépression thermique est repérée par le tracé d'une isobare dont le seuil dépend de l'heure de la journée. Nous devons en effet prendre en compte le fort cycle diurne avec un minimum de pression observé vers 18 heures TU et un maximum vers 12 heures TU.

Nous proposons de tracer la pression-mer avec un écartement de 1 hPa en suivant ces critères :

- à 12 TU, inférieure à 1010 hPa
- à 18 TU, inférieure à 1006 hPa
- à 00 TU, inférieure à 1008 hPa
- à 16 TU, inférieure à 1008 hPa

Si la dépression thermique est faible et non visible avec ces seuils, la localisation et la valeur du minimum de pression-mer doivent malgré tout être signalées. La plupart du temps, la dépression thermique est située sur le Nord du Mali et de la Mauritanie, mais on observe aussi des dépressions thermiques qui se déplacent d'est en ouest le long du FIT.

Le cycle diurne de la dépression thermique est le suivant :

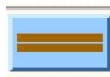
- la dépression thermique atteint son maximum d'intensité (minimum de pression) en soirée (vers 18 TU) en liaison avec le chauffage diurne ;
- comme sous les tropiques, le champ de vent met du temps à s'équilibrer avec le champ de pression, le maximum de vent ne s'observe pas en soirée mais plutôt en fin de nuit ;
- à cause du cycle diurne du vent décrit ci-dessus, le maximum de convergence s'observe en fin de nuit (entre les réseaux de 00 et 06 UTC) alors que le minimum est atteint en cours de journée.
- le FIT se situe en général au niveau du minimum barique de la dépression thermique qui s'étend vers le nord en cours d'après-midi ;

Pour analyser la structure de la dépression thermique, deux critères sont utiles :

- la température à 1500 mètres permet de garder la trace tout au long de la journée de la dépression thermique. La température la plus forte ( $>24^\circ C$ ) résulte de la convection sèche ;
- une coupe verticale de  $\theta$  dans la dépression thermique (ou radiosondage) permet également d'apporter des informations utiles puisqu'à 18 heures TU, la convection sèche a permis d'homogénéiser l'ensemble de la couche limite entre la surface et les niveaux 700-600 hPa ( $\theta \simeq 44 - 45^\circ C$ ).

Les dépressions thermiques sont cantonnées en basse troposphère, mais il arrive qu'elles atteignent une extension verticale plus importante. Dans certains cas, on observe au sein même de la dépression thermique, un vortex cyclonique à 850 hPa voire une onde à 700 hPa. On peut alors utiliser les symboles du vortex cyclonique et de l'onde d'est africaine (voir ci-dessous) pour identifier ces éléments situées au nord du FIT parce que ces circulations peuvent ensuite se dissocier de la dépression thermique et interagir avec le JEA, donnant alors naissance à une *véritable onde d'est africaine*.

### A.2.3 Le Jet d'Ouest SubTropical (JOST)





Le coeur du jet à 200 hPa doit être tracé à l'aide des lignes de flux <sup>2</sup>. La difficulté vient du fait que le seuil peut varier d'une saison à l'autre. On propose de prendre 45 kts pendant la MAO puisqu'il est moins actif pendant cette période, et 60 kts en hiver. Le JOST se situe en moyenne climatologique au-dessus du Maghreb pendant la période de mousson d'été avec des incursions vers le Sahel aux périodes de transition (juin et septembre); en hiver, il se positionne de façon permanente au-dessus du Sahel.

Le JOST permet de transférer l'énergie entre les tropiques et les moyennes latitudes. Trois circulations caractéristiques présentent un grand intérêt pour l'Afrique de l'Ouest :

- les zones d'accélération et de décélération du JOST, appelées *entrée* et *sortie* de jet, peuvent forcer des circulations agéostrophiques. Les ascendances sont alors renforcées au sein de la troposphère en entrée droite et sortie gauche du jet (inversement pour les subsidences). Les conséquences sont visibles sur le champ de vitesses verticales en moyenne troposphère vers 600 hPa. Dans ce cas, pour identifier les entrées et sorties de jet, le prévisionniste peut utiliser le même symbole qu'aux moyennes latitudes.
- Les thalwegs d'altitude ou les vortex cycloniques à 200-300 hPa sont souvent associés à des anomalies de tourbillon potentiel (TP) et à de l'air froid dans les couches inférieures (300-400 hPa). La signature sur l'image vapeur d'eau est nette (l'air très sec et subsident apparaît en noir foncé). Il peut y avoir un jet au sud/sud-est du noyau de TP. Ces événements météorologiques peuvent s'observer tout au long de l'année sur l'Afrique de l'Ouest, à l'exception des deux mois de mousson (juillet et août). L'intrusion d'air froid en haute troposphère associé à ces événements favorise la convection au sud-est du maximum de TP. Dans les cas les plus violents, cet événement parvient à modifier la circulation sur l'ensemble de la troposphère ce qui génère de fortes pluies en pleine saison sèche, même le long de la côte du Golfe de Guinée (la question reste ouverte pour savoir si ces événements sont à l'origine des *pluies des mangues*?)
- La présence d'air sec en provenance des moyennes latitudes est discutée dans la section sur les *intrusions d'air sec* ainsi que dans le paragraphe des *thalwegs voyageant au nord du FIT*.

#### A.2.4 Thalwegs situés au nord du FIT



Une des caractéristiques principales de la circulation au nord du FIT est l'advection d'air sec vers 500 hPa. L'air sec s'accumule le long de thalwegs situés entre 500 et 600 hPa qui proviennent de la circulation d'altitude (vers 200 hPa) des moyennes latitudes. Au fur et à mesure que ces thalwegs se déplacent vers les tropiques, leurs structures se modifient fortement. Ils s'orientent selon un axe sud-ouest/nord-est avec des vents nettement plus marqués sur l'un des côtés et prennent alors une structure de *plume tropicale*. Selon le flanc du thalweg touché par les vents les plus forts, certaines plumes advectent de l'air sec vers le sud-ouest et d'autres vers le nord-est.

Le thalweg se trace à l'aide des lignes de flux à 500-600 hPa et en suivant l'axe de maximum de tourbillon absolu. Comme le maximum de vent se situe souvent vers 600 hPa, nous proposons d'utiliser le même symbole que le JEA (voir ci-dessous) pour identifier cette structure de jet (seuil de 25 kts). Puisque ces jets s'observent au nord du FIT, il n'y a pas de confusion possible avec la structure et le concept théorique du JEA même si parfois, ils se connectent entre eux.

Une coupe verticale est nécessaire pour analyser la structure de ces jets parce qu'ils peuvent soit :

---

<sup>2</sup>Note personnelle : on peut également faire une coupe verticale du vent normal

- être une structure limitée aux niveaux 500-600 hPa avec de l'air sec à 500 hPa et un maximum de vent à 600 hPa ;
- ces deux éléments (air sec et vent) peuvent s'étendre jusqu'en surface et interagir avec une dépression thermique en injectant de l'air sec dans le vortex cyclonique de basses couches.

Le thalweg situé le long des côtes marocaines et mauritaniennes est une structure de basses couches permanente qui est générée par le contraste thermique entre un océan froid (zone d'upwelling côtier) et un continent chaud. L'intensité de ce thalweg est un élément important à suivre dans cette région.

### A.2.5 Le Jet d'Est Tropical (TEJ)



Le TEJ est un jet d'Est situé vers 200 hPa qu'on observe pendant la mousson d'été à des latitudes situées au sud du FIT. Le jet est tracé à l'aide des lignes de flux et en seuillant le vent au-delà de 35 kts. La relation entre activité convective et TEJ n'est pas évidente, mais on observe souvent une accélération des vents d'est au sud des MCS les plus importants en relation avec la circulation anticyclonique d'altitude à 200 hPa créée par *effet miroir*.

Puisque ce jet n'est pas très fort et peut afficher une large extension méridienne, il peut quelquefois être difficile de trouver le cœur du jet. Le cas échéant, une coupe verticale le long d'un axe nord-sud permet de mieux comprendre sa structure en 3D. A certaines longitudes, il est possible de trouver deux axes de TEJ.

### A.2.6 Le Jet d'Est Africain (JEA)



Le JEA est un jet d'Est qui se situe en moyenne troposphère entre 500 et 700 hPa avec une moyenne climatologique vers 600 hPa. Le seuil de vent choisi pour le tracer à 600 hPa dépend du modèle : cela va de 20 kts pour le modèle anglais à 25 kts pour le modèle français ; pour une analyse à 700 hPa, le seuil est inférieur. Le JEA doit être tracé à l'aide des lignes de flux. Le prévisionniste doit effectuer de nombreuses coupes verticales pour trouver la localisation et l'altitude de l'axe du JEA.

La côte guinéenne au Sud et le FIT au Nord sont les frontières naturelles du JEA. S'il est rare de trouver de forts vents à 600 hPa dans le Golfe de Guinée pendant la mousson d'été, il est en revanche assez fréquent d'en observer au nord du FIT, et dans ce cas, on utilise le même symbole que le JEA même s'ils ne sont pas de même nature (comme on l'a mentionné plus haut).

### A.2.7 Les ondes d'est africaines (OEA) et vortex cycloniques C



Le tracé des ondes d'est africaines est l'un des exercices les plus difficiles pour le prévisionniste parce qu'il est forcément lié à une part de subjectivité. Le critère nécessaire à garder à l'esprit est la continuité temporelle de la structure. Nous pouvons souvent suivre une onde

d'est pendant plusieurs jours lorsqu'elle traverse successivement l'Afrique (depuis le Tchad jusqu'au Sénégal) puis l'Océan Atlantique.

L'axe du thalweg est en général orienté sud-nord et correspond au maximum de rotation des vents à 600 ou 700 hPa. Il est plus facile de repérer l'onde d'est avec les lignes de flux et surtout avec le champ de tourbillon absolu (seuil à 6). Mais lorsqu'une plage de tourbillon présente une forme allongée (selon l'axe zonal), c'est plus souvent lié au cisaillement horizontal du JEA qu'à une onde d'est.

A 850 hPa (i.e au niveau où le vent faiblit au-dessus de la couche de mousson), on peut observer des circulations cycloniques fermées et on peut repérer le centre du vortex par la lettre *C* s'il est associé à un maximum de tourbillon au même niveau (seuil 6). Le vortex cyclonique apparaît dans trois types de structures différentes qui ne sont pas toujours totalement déconnectées entre elles :

1. au nord du FIT, il peut correspondre à une extension verticale de la dépression thermique ;
2. près du JEA, il est souvent associé à une onde d'est à 600 ou 700 hPa. Le couplage d'un vortex cyclonique avec une onde d'est signifie que l'onde possède une forte extension verticale et qu'elle sera capable de favoriser de la convection organisée à méso-échelle. La configuration classique est un *C* situé juste à l'arrière de l'onde d'est (i.e. sur la face est), mais il existe de grandes variations à ce schéma ;
3. loin du JEA, ce vortex semble être associé à une forte intrusion d'air sec au-dessus de la couche de mousson, entre les niveaux 850 et 600 hPa.

Le prévisionniste doit faire une coupe verticale pour identifier la structure associée au vortex cyclonique. Le niveau 850 hPa représente dans la circulation de la mousson d'été un niveau intermédiaire stratégique pour le prévisionniste car il permet de repérer non seulement la trace des événements les plus marquants dans les basses couches (flux de mousson, dépression thermique) mais aussi ceux associés à la moyenne troposphère (ondes d'est, intrusion d'air sec).

Le lien entre convection et structure des OEA constitue toujours un domaine de recherche active mais il semble qu'on puisse au moins trouver deux origines aux ondes :

1. les ondes en provenance du nord du FIT (générées probablement par des vents forts au-dessus des reliefs sahariens) qui vont, au cours de leur déplacement vers le sud, interagir avec le JEA. Les modèles sont en général capables de bien prévoir ces ondes ;
2. les ondes qui naissent ou qui sont réactivées au centre de certains MCS. Les modèles qui n'ont pas une bonne représentation de ces MCS ne prévoient pas ces ondes.

La prédictabilité de ces deux types d'ondes est probablement très différente.

Le comportement des MCS liés à des ondes d'est peuvent se comporter de deux manières très différentes :

1. les MCS-lents qui voyagent avec l'onde et qui se déplacent à la même vitesse vers l'est ;
2. les MCS-rapides qui sont deux fois plus rapides (10-30 m/s) que les ondes (moins de 10 m/s) et qui laissent les ondes derrière eux.

Il est important de faire cette distinction puisque la convection dans les modèles ne représentent pas correctement le second type de MCS (pas de traitement du courant de densité). En conséquence, le prévisionniste doit être vigilant car les modèles numériques font trop souvent suivre le MCS avec l'onde d'est.

## A.2.8 Air sec de moyenne troposphère

L'air sec de moyenne troposphère est un élément-clé qui peut dans un cas inhiber la convection ou dans l'autre la renforcer. Ce rôle contradictoire est très important à élucider si l'on veut bien comprendre la MAO, car l'air sec est souvent présent au-dessus du Sahara et du Sahel. L'origine de cet air sec et de son interaction avec la convection est encore un sujet de recherche. Par exemple, Roca et al en 2005 [?] suggèrent que ces intrusions peuvent venir des moyennes latitudes. La sortie droite du jet polaire situé sur l'Europe de l'Ouest constitue une trajectoire classique de cet air sec. Les particules subsident le long du JOST qui correspond à une barrière de TP avant de continuer leur chemin sur le Sahara en direction du Sahel. Cette interaction avec les moyennes latitudes est l'une des hypothèses sur l'origine des masses d'air sèches sur l'Afrique de l'Ouest.

L'influence de l'air sec sur la convection peut avoir ces deux effets opposés :

- Une large plage d'air sec peut inhiber complètement la convection. La barrière énergétique que représente l'air sec est visible sur un profil vertical (CIN). Un MCS qui se déplace vers une telle zone peut se dissiper ;
- un MCS bien développé se déplaçant sur le bord d'une zone d'air sec peut être réactivé grâce au courant de densité. Il se transforme alors en ligne de grain et sa vitesse de déplacement augmente. On observe souvent de la convection entourée d'air sec.

Nous proposons de repérer la présence d'air sec par une ligne où le gradient horizontal de  $T_d$  (environ  $-36^\circ\text{C}$ ), ou d'humidité (moins de 15%) ou de  $\theta'_w$  (moins de  $19^\circ$ ) est maximal. L'air sec est généralement situé à 500 hPa au nord du FIT mais lorsqu'il surplombe la couche de mousson, son altitude varie entre 500 et 700 hPa. Des coupes verticales peuvent aider à définir les contours de la plage d'air sec ainsi que son niveau associé, qui peut se situer très occasionnellement à 400 ou 800 hPa. Représenter une zone d'air sec n'a d'intérêt qu'au sud ou le long du FIT <sup>3</sup>. Comme mentionné ci-dessus, une analyse rapide des vents à 600 hPa montre si cet air sec est advecté vers le sud-ouest ou le nord-est.

Le terme *intrusion d'air sec* est lié à une masse d'air très sèche (très faibles  $T_d$  ou  $\theta'_w$ ) en provenance de la stratosphère des moyennes latitudes. Au nord du FIT, pour être certain que ce soit une *intrusion d'air sec*, on doit seuilier avec des valeurs de  $\theta'_w$  inférieures à  $19^\circ\text{C}$  au niveau 500 hPa. Ensuite, même si cet air peut se mélanger avec un peu d'humidité, il peut encore conserver ses caractéristiques d'*air sec* (visible avec le maintien d'un fort gradient horizontal de  $\theta'_w$ ). C'est seulement au regard des analyses passées que l'on peut s'assurer de l'origine de cet air sec. Pour clarifier la signification de ces termes, nous proposons ces définitions :

- *intrusion d'air sec des moyennes latitudes (mid-latitudes dry intrusion)* : intrusion dans la troposphère tropicale d'air stratosphérique en provenance des moyennes latitudes ;
- *intrusion d'air sec (dry intrusion)* : advection d'air sec ( $\theta'_w$  autour de  $18$  ou  $19^\circ\text{C}$  avec le critère de gradient utilisé ci-dessus) ;
- *air sec (dry air)* : tous les autres cas.

## A.2.9 La couche du flux de mousson d'ouest et énergie de basses couches

Tracer le FIT n'est pas suffisant pour caractériser le flux de mousson. Nous devons avoir des informations supplémentaires sur sa circulation, son épaisseur et son contenu en énergie, mais une représentation synthétique de ces éléments n'est pas encore disponible. Des champs comme l'*hauteur d'eau précipitable* contenu dans le flux de mousson ou d'*intégration verticale du flux de mousson* sur son épaisseur seraient précieux <sup>4</sup>.

---

<sup>3</sup>Note personnelle : en effet, au nord du FIT, l'air sec est omniprésent d'où l'absence d'intérêt de le représenter.

<sup>4</sup>Note personnelle : par exemple pour connaître le flux d'humidité transporté par le flux de mousson etc .

A l'heure actuelle, seuls les vents et les lignes de flux à 950, 925 et 850 hPa sont les champs disponibles pour caractériser l'accélération du flux de mousson. Le prévisionniste doit être vigilant sur la côte Atlantique (Mauritanie et Sénégal) puisqu'il peut y avoir trois types de flux dans cette région avec des interactions complexes :

- le flux de mousson qui vient du sud;
- le vent de nord-est qui vient de la dépression thermique saharienne;
- le vent de nord-ouest en provenance de l'Océan Atlantique Subtropical (vers 30/40°) avec possible advection d'air froid.

L'épaisseur du flux de mousson est disponible grâce à une coupe verticale des champs de vent et d'humidité.

L'énergie du flux de mousson est en partie indiquée par le champ de  $\theta'w$  à 950 hPa.

Les accélérations du flux de mousson ('monsoon surge') ou les rapides poussée de mousson vers le nord sont identifiées par le déplacement vers le nord du FIT si on a utilisé le critère basé sur l'humidité pour le tracer (détail, cf. section FIT). Mais il est toujours préférable d'analyser le déplacement du maximum de  $\theta'w$  à 950 hPa près du FIT.

## A.2.10 Convection



Analyser et prévoir les zones de convection, leur type et leur intensité dans le meilleur des cas, est un des principaux objectifs du prévisionniste pendant la période de mousson d'été.

### Les critères de détection

Pour tracer l'analyse (WASA), le prévisionniste doit repérer les zones de convection les plus intenses grâce à l'imagerie satellitale infrarouge (l'orange correspond à  $-65^\circ$ ) et utiliser le 'MCS tracking'<sup>5</sup> pour estimer la vitesse de déplacement des MCS (utiliser les trois ou quatre dernières images). Le tracé doit être précis et ajusté avec la dernière image satellite InfraRouge. Le MCS sera représenté comme une zone fermée avec le symbole convectif à l'intérieur. Pour zones où se développe de la convection isolée, seul le symbole des cumulonimbus (sans zonage) doit être dessiné.

Ensuite, le prévisionniste doit regarder la convection analysée par le modèle et vérifier si c'est en accord avec celle estimée par les satellites. Ce n'est pas une tâche si facile puisqu'il n'y a pas d'estimation simple de l'activité convective. Mais le prévisionniste peut utiliser les critères suivants pour détecter les MCS les plus virulents et à longue durée de vie ( $> 9$  heures) :

- les pluies cumulées sur une courte période (3 ou 6 heures) montrent un pic d'intensité. Les cumuls peuvent être relativement faibles (moins de 10 mm) pour les MCS évoluant près du FIT parce qu'une grande partie des pluies s'évaporent à cause de l'air très sec en moyenne troposphère (le flux de mousson près du FIT se cantonne à la très basse troposphère) ;
- les vitesses verticales de moyenne troposphère (600-700 hPa) sont proches de leur pic d'intensité. C'est la libération de chaleur latente produite par la convection qui génère ces ascendances (équation ??) ;
- l'humidité relative dans la couche 600-700 hPa est supérieure à 80% ;
- dans certains cas, on observe de la divergence à 200 hPa et de la convergence près du niveau 700 hPa<sup>6</sup> ;

---

<sup>5</sup>Outil développé à Météo-France dans le cadre de la Prévision Immédiate.

<sup>6</sup>Note personnelle : dans un MCS en phase mature, une dépression de méso-échelle se développe vers 3000 mètres d'altitude. Elle est liée à une bulle d'air chaud générée par la libération de chaleur latente. Cette dépression de méso-échelle créé alors de la convergence à ce niveau.

- cet exercice est plus facile à 6 heures du matin puisqu’il ne reste plus que les MCS en fin de nuit. A 18 heures TU, la convection diurne étant à son maximum, il est alors difficile de faire la différence entre convection isolée et MCS.

Pour effectuer une prévision de la convection (WASF), le prévisionniste doit synthétiser plusieurs informations. C’est la tâche la plus difficile puisque les modèles sont peu performants pour prévoir la convection tropicale. En effet, les paramétrisations actuelles de la convection ne traitent pas correctement tous les différents processus et leurs différentes phases (déclenchement, inhibition, propagation, évaporation etc ..) qui constituent pourtant des éléments clés de la MAO. Mais les modèles sont plus performants lorsqu’il s’agit de prévoir des éléments de grande échelle comme ceux listés ci-dessus (FIT, Dt, jets, intrusion d’air sec). Dans les situations météorologiques où l’une de ces structures de grande échelle influence la convection, la prédictabilité de la convection augmente et peut devenir aussi bonne que la structure de la grande échelle.

### Quatre types de facteurs peuvent influencer la convection

1. Les ascendances convectives (*convective updraft*) :
  - **CAPE** : le prévisionniste doit être très prudent avec ce paramètre car la valeur dépend de la méthode utilisée pour le calculer. Par exemple, on ne peut pas comparer la valeur de CAPE calculée à partir d’un radiosondage venant du modèle ARPEGE avec celle déterminée à partir d’un véritable radiosondage : une valeur de CAPE nulle dans ARPEGE signifie que le modèle est divergent dans les basses couches alors que dans la réalité, on peut observer une valeur de CAPE loin d’être négligable. D’autre part, les valeurs maximales de CAPE calculées par le modèle sont aberrantes. Au final, la principale information intéressante de ce champ est que le schéma de convection dans ARPEGE est activé pour chaque point de grille du modèle affichant une valeur de CAPE non nulle.
  - **Energie de basses couches** : la convection la plus intense est supposée se développer dans les régions de  $\theta'_w$  maximales près de la surface avec un flux de mousson suffisamment épais. Le prévisionniste doit aussi vérifier que les lignes de flux à 950 ou 850 hPa confluent dans cette zone.
  - **Hauteur d’eau précipitable (*Integrated Water Vapor (IWV)*)** : lorsque les quantités sont faibles ( $<40 \text{ g/m}^2$  ?), il ne pleut pas ou les pluies s’évaporent avant d’atteindre le sol.
  - **CIN** : dans les zones de fortes CIN, la convection ne peut pas se déclencher ; par contre, certains MCS déjà bien formés parviennent à traverser de telles zones défavorables à la convection sans être atténuées. La CIN au-dessus du flux de mousson est probablement associée à la présence d’une couche d’air sec et chaud en moyenne troposphère. Puisque ce champ n’est pas disponible sur ARPEGE, le prévisionniste doit regarder les radiosondages analysés ou prévus par le modèle.
2. Courants subsidents et courant de densité (*downdraft and density current*) :
 

Ces circulations sont fortement liées à la présence d’air sec en moyenne troposphère. En effet, à cause de l’évaporation des précipitations, la flottabilité des particules devient négative ce qui génère des *courants subsidents*. Ils alimentent des masses d’air froid qui s’étalent à la surface sous forme de *courant de densité* qui vont favoriser à leur tour la formation de nouvelles cellules convectives. A cause de ce processus, la convection se développe souvent en limite des plages d’air sec.
3. Cisaillement vertical de vent (*shear*) :
 

le cisaillement entre la basse et la moyenne troposphère est souvent faible sous les tropiques, sauf au-dessus du Sahel à cause de la présence du JEA. Ce cisaillement vertical de vent entre le JEA et le flux de mousson sous-jacent est modéré (15 m/s sur 4 km d’altitude) et de secteur est. Ce cisaillement unidirectionnel (pas de rotation du cisaillement avec l’altitude) favorise

la formation de nouvelles cellules convective en aval du courant de densité. Ce processus explique pourquoi les lignes de grain sur l'Afrique de l'Ouest s'organisent perpendiculairement au cisaillement vertical de vent et se déplace aussi vite que le JEA.

#### 4. Autres forçages :

- **les ondes d'est** bien développées (avec un vortex cyclonique associé à 850 hPa) peuvent forcer la convection, en général le long de l'axe du thalweg ou sur sa face ouest. Un MCS peut aussi générer ou renforcer une onde d'est.
- Un **thalweg d'altitude ou vortex cyclonique à 200-300 hPa** associé à une anomalie de TP et à de l'air froid peut forcer la convection sur son flanc sud-est (voir ci-dessus la section sur le JOST).
- **La topographie** : la convection démarre souvent dans les zones de relief comme le massif de l'Aïr, le Plateau de Jos, du Cameroun, Fouta Jalon etc.. ce qui est confirmé par la climatologie. Une bonne connaissance du relief permet au prévisionniste expérimenté de prévoir les départs de convection dès midi dans certaines zones précises. L'outil 'MCS tracking' permet aussi de détecter plus facilement les départs de convection dont la localisation peut être vérifiée par recoupement avec les caractéristiques du lieu (topographie, inhomogénéités de surface etc.).
- **Les flux de surface et caractéristiques du sol** :  
Le contenu en eau est un élément clé pour prévoir le développement de la convection. En effet, il manque des observations in-situ pour surveiller les conditions de surface. Les pluies cumulées des jours passés fournit une information intéressante sur le contenu en eau dans le sol.  
Par ailleurs, le couplage de la surface avec l'atmosphère reste un sujet de recherche<sup>7</sup>. La notion essentielle à connaître sur le couplage surface-atmosphère est que sur sol sec, les flux de chaleur sensible sont très importants d'où un cycle diurne très marqué qui favorise le développement des premières cellules convectives. Par contre, un sol humide permet de recharger en continu l'énergie contenue en basses couches grâce à d'importants flux de chaleur latente ce qui permet à la convection de durer plus longtemps (> 9 heures) et de s'intensifier au fil des heures.
- **Cycle diurne** :  
Il est fort sur l'Afrique de l'Ouest. La convection est minimale en fin de matinée. Elle se réactive rapidement à partir de midi pour atteindre un pic entre la fin d'après-midi et le début de soirée. Pendant la nuit, seuls les systèmes les plus importants et violents persistent.
- **Rayonnement** :  
Au cours de la nuit, le refroidissement par rayonnement InfraRouge au-dessus des enclumes et dans les zones de ciel clair entourant les cumulonimbus renforce la convection par augmentation du différentiel thermique (ce qui signifie que la CAPE augmente à nouveau en fin de nuit).

### Les trois types de convection

1. **Les lignes de grain** nécessitent la combinaison de trois facteurs : instabilité convective, air sec en moyenne troposphère et fort cisaillement vertical de basses couches. Il ne pleut pas beaucoup dans ces systèmes (forte évaporation des pluies avant d'atteindre le sol) mais leur dynamique est forte (rafales de vents violente) et leur durée de vie peut être importante (plus d'une journée). Au coeur de la saison humide de la MAO (juillet à septembre), le Sahel est la région de prédilection de ces systèmes grâce à la combinaison de l'instabilité convective

---

<sup>7</sup>par exemple : des travaux de recherche sont par exemple menés au CNRM pour savoir s'il y a une mémoire de l'eau à l'échelle intrasaisonnière.

en basse troposphère et de l'occurrence du JEA en moyenne troposphère qui advecte de l'air sec.

2. **les zones de convection moins bien organisée (ou quelquefois de gros MCC)** s'observent lorsque le cisaillement vertical de vent et l'air sec de moyenne troposphère sont peu prononcés. De tels systèmes génèrent plus de pluie que les lignes de grain, surtout lorsque le IWV est élevé. La zone convective est constituée d'un ensemble d'orages isolés pas forcément organisés entre eux (pas de circulation de méso-échelle bien visible comme dans une ligne de grain).
3. **Convection diurne** : la plupart du temps, la convection isolée débute en cours d'après-midi sur de vastes zones. La majorité des cumulonimbus se dissipent au cours de la première moitié de la nuit mais il arrive toujours qu'un ou deux systèmes convectifs parviennent à survivre toute la nuit comme peuvent le faire sans difficulté les MCS. Il n'est pas évident de prévoir lesquels y parviendront, mais s'il reste vigoureux après le seuil des 18 heures TU, on peut présager que le système convectif restera actif toute la nuit.

### Convection inhibée

Les modèles ont beaucoup de mal à prévoir les zones où la convection ne se déclenche pas. Cependant dans certains cas, le prévisionniste parvient à identifier les éléments qui contribuent à inhiber la convection. Il peut alors localiser sur le WASA/WASF les zones où la probabilité de convection est faible à l'aide des éléments décrits ci-dessous :

- la CIN est souvent associée à de larges zones d'air sec advectées au-dessus du flux de mousson ;
- la présence d'un thalweg à 200 hPa peut empêcher la convection de démarrer au-dessus d'une grande partie de l'Afrique de l'Ouest. Ce thalweg se déplace lentement vers l'ouest en association avec les vents de nord-est (TEJ) ;
- occurrence d'une zone de subsidence de grande échelle ;
- occurrence d'une dorsale (à quel niveau ?)
- faible IWV
- circulation anticyclonique entre deux ondes d'est africaines ;
- vortex anticyclonique à 850 hPa (visible surtout à l'aide des lignes de flux).

Il arrive aussi parfois que les MCS se dissipent rapidement. C'est souvent difficile de trouver une explication, mais certaines d'entre elles peuvent être :

- un trop fort cisaillement vertical de vent en liaison avec un fort TEJ ;
- un assèchement des basses couches par exemple, lorsque le MCS traverse le FIT ;
- certaines circulations près de la côte Atlantique génèrent un flux d'ouest/nord-ouest qui semble dissiper les MCS ;
- une dissipation temporaire de la convection en matinée suivie d'une réactivation en cours d'après-midi.

Pour prévoir l'occurrence des MCS malgré le mauvais comportement des schémas de convection dans les modèles de grande échelle, les prévisionnistes doivent suivre cette méthode simple :

- vérifier les erreurs de localisation des MCS dans l'analyse et essayer de les compenser dans la prévision ;
- identifier la convection dans la prévision. Si de l'air sec est présent à côté du MCS, il peut se transformer en ligne de grain et donc s'accélérer (vers l'ouest). Le prévisionniste doit alors intégrer ce processus pour corriger soi-même la position du MCS (que le modèle est incapable de prévoir) ;
- surveiller les conditions favorables sur la partie nord du flux de mousson (régions du Sahel). Si le modèle ne prévoit pas de convection malgré des conditions favorables, le prévisionniste peut essayer de prévoir un MCS dans la région située entre une onde d'est et une intrusion d'air sec en moyenne troposphère.



### A.3 Illustration (figure A.2)

Les 9 premiers éléments-clés de la MAO sont fournis par les sorties de modèles numériques (CEP, ARPEGE, UKMO) et tracés selon les règles précisées ci-dessus. Les données sont transmises depuis l'Europe par le canal de transmission RETIM-Afrique et sont disponibles à l'ACMAD (Niger) avec SYNERGIE<sup>8</sup> (4 PC). Comme les modèles prévoient mal la convection dans les régions tropicales, le travail final du prévisionniste est donc de synthétiser ces 9 éléments-clés pour améliorer la prévisibilité des MCS. Par exemple, les MCS actifs et rapides ( $>10$  m/s) ont besoin pour se développer d'un air instable, de fortes hauteurs d'eau précipitables (IWV), de forts cisaillements verticaux de vents (JEA), d'air sec en moyenne troposphère et la proximité d'un thalweg d'onde d'est ou d'un vortex cyclonique à 850 hPa. La Figure A.2 fournit un exemple de bonne prévision de deux MCS sur l'Afrique de l'Ouest le 19 juillet 2006 avec deux jours d'avance.

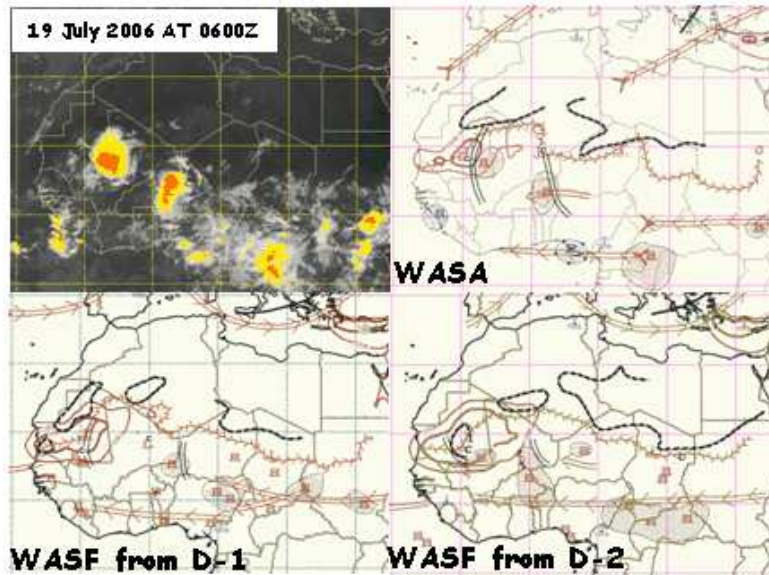


FIG. A.2 – WASA du 06TU le 19 juillet 2006 (en haut à droite) comparé avec l'image satellite InfraRouge (en haut à gauche) et correspondant bien aux WASF prévus 1 jour à l'avance (en bas, à gauche) et même 2 jours à l'avance (en bas, à droite).

### A.4 Conclusions

Nous avons présenté dans ce document une nouvelle méthode de prévision qui s'est développée pour combler les besoins du Centre Opérationnel d'AMMA basé à Niamey (Niger) pendant la période humide d'Observations Spéciales d'AMMA 2006 (Wet-SOP). C'est le résultat d'une intense collaboration entre les prévisionnistes africains de l'ACMAD et d'ASECNA avec certains scientifiques du groupe WP2.1 d'AMMA. La constitution d'un Centre de Prévision International (International Forecasting Core Group) a également apporté son soutien avec la participation de certains centres de prévision numérique (ECMWF, Météo-France, NOAA/African Desk, UK Met Office) pour fournir des produits et des diagnostics issus de modèles.

<sup>8</sup>Outil de prévision développé à Météo-France

Une équipe de 18 prévisionnistes africains a fourni de façon opérationnelle les prévisions pendant toute la période SOP-humide d'AMMA 2006 qui s'est tenue en Afrique de l'Ouest du 1<sup>er</sup> juin à fin septembre. Ils ont été formés avec cette méthode pendant deux semaines, juste avant que la SOP-humide ne démarre. L'équipe de prévisionnistes d'AMMA a appliqué cette méthode pendant la saison humide de la mousson 2006, ce qui a permis de la tester in-situ. Cette méthode a pu être améliorée pendant la période SOP grâce aux discussions fructueuses entre prévisionnistes (africains et français) et scientifiques.

D'autres travaux devront être effectués pour évaluer objectivement cette méthode de prévision. Cette méthode doit par exemple améliorer les règles de tracé en se basant sur des diagnostics plus objectifs et mieux adaptés à la région.

Nous espérons que cette expérience pratique en prévision opérationnelle contribuera au développement d'une nouvelle méthode de prévision pour la MAO et qu'elle pourra s'étendre à l'ensemble de l'Afrique et pour toutes les saisons.