

ÉTUDE DU PHÉNOMÈNE DE PLUIE HORS SAISON HIVERNALE AU SAHEL : CAS PARTICULIER DE L'ÉPISODE DE PLUIE DE MANGUES DES 12 ET 13 MARS 2016 SUR LE BURKINA FASO ET LE NIGER

**Hamza IBRAHIMA^{1*}, Madé FODÉ², Abdelkrim BEN MOHAMED²
et Amadou THIerno GAYE³**

¹*Ecole Africaine de la Météorologie et de l'Aviation Civile (EAMAC),
Niamey, Niger*

²*Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger*

³*Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal*

* Correspondance, e-mail : ediguinipere@gmail.com

RÉSUMÉ

L'évènement pluie hors saison reste aujourd'hui encore, une source d'interrogations pour l'ensemble de la communauté ouest africaine, tant par sa période et fréquence d'occurrence que par son intensité. Si ses impacts semblent être assez bien définis par les différents usagers, il n'en est pas de même pour son mécanisme de formation. Dans les routines de l'exploitation météorologique la question de pluie de mangues se pose en termes de processus physique de formation de nuages en général, et plus singulièrement en régime transitoire sec où la dynamique de l'atmosphère subit les influences d'interactions entre les régions tempérées et tropicales. La présente approche du phénomène consistera d'abord à bâtir théoriquement, les principaux schémas atmosphériques susceptibles de donner des précipitations en ces périodes de transition sèche ou humide. Il s'agira par la suite d'utiliser les données disponibles d'observation en temps réel (surface et altitude), l'imagerie satellitaire et / ou des modèles de prévision numérique de temps (PNT) pour instruire la situation météorologique et la situer dans la typologie des modèles de pluie de mangues établis. Il ressort de cette étude que l'épisode pluvieux du 12 au 13 Mars 2016 sur le Burkina Faso et le Niger est une perturbation du niveau 3 dans la classification de degré d'intensité du phénomène de pluie hors saison en Afrique de l'Ouest, et montre au besoin que les modèles de la PNT peuvent être utilisés dans la prévision de ce phénomène à temps réel de courtes ou de moyennes échéances ou à valeur de tendance saisonnière.

Mots-clés : *thalgweg extratropical, couches moyennes, perturbation frontale type, convectivement instable, pluie hors saison, mécanisme de formation, masses d'air.*

ABSTRACT

Study of rainfall phenomenon happening out of the rainy season over Sahel : particular case of the mango rain event on 12th to 13th march 2016 over Burkina Faso and Niger

The rainfall event out of rainy season is still a source of questions for the whole West African community, in terms of period of its occurrence, its frequency, as well as by its intensity. If its impacts seemed to be well defined, by the different end users, it is not the case for the mechanism of its formation. In operational meteorology, the problem of mango rain appears in terms of physical process of cloud formation in general and specially in dry transition regimes when the dynamic of atmosphere is under the influence of the interactions between tropical and mid-latitudes regions. The proposed hereby approach of the phenomenon will consist in establishing theoretical main atmospheric patterns which can give precipitation in dry or humid transition period. After that, the available surface data, upper air sounding and numerical weather prediction models (NWP) combined with satellite images will be used in order to characterize the meteorological situation and then find out the corresponding mango rain model. It appears that the mango rainfall event of 12th to 13th march 2016 over Burkina Faso and Niger is a perturbation of level 3 according the classification of the intensity of mango rain perturbation over West Africa. It also indicates that NWP model can be used for the short and medium range forecasting of this phenomenon, including its seasonal tendency.

Keywords : *extra tropical trough, medium levels, frontal type perturbation, convectively unstable, rainfall out of rainy season, mechanism of formation, air masses.*

I - INTRODUCTION

La pénétration dans les basses latitudes des thalwegs extratropicaux demeure la plus sensible des interactions entre régions tempérées et tropicales, susceptible de se produire en toutes saisons avec des conséquences variables d'un point à un autre [1]. De telles situations s'observent généralement dans les couches moyennes, mais peuvent également se retrouver à n'importe quel niveau de la troposphère [2, 3]. Lorsque ces ondes se manifestent dans la haute troposphère, elles introduisent de la divergence : une caractéristique dynamique recherchée dans la manifestation de la convection profonde sur de grandes étendues, de types lignes de grains ou zones orageuses [2], en été boréal. Dans les couches moyennes, la manifestation de ces ondes d'altitude s'accompagne généralement d'une couverture nuageuse de l'étage moyen, parfois accompagnée de précipitations. En hiver, la pénétration sur le Sahel de

ces thalwegs extratropicaux s'accompagne de vagues de froids et / ou de poussière [4, 5]. Au Niger, les températures très basses associées à ces situations, prennent parfois un caractère dramatique sous forme de gel par évaporation, très connu particulièrement sur les régions de Zinder / Magaria au Niger sous le nom de *Jawra*. Ce phénomène prend un caractère particulier pendant la phase de remontée de l'équateur météorologique (EM) [1], avec des formations de pluie hors saison, communément appelées pluie de mangues. Ces précipitations sont diversement appréciées d'une région à une autre en fonction de leur période d'occurrence et leur intensité ou encore du secteur d'activité des différents usagers. C'est ainsi que sur certains horizons on parle de pluie inutiles, de pluie de mangues, d'évènements rares ou exceptionnels [6]. Il y a donc lieu de chercher à comprendre le mécanisme physique et les grandeurs atmosphériques qui entrent en jeu dans la formation de l'un ou l'autre type d'évènement. L'objectif poursuivi à travers cette étude est d'utiliser l'ensemble des connaissances théoriques sur les processus physiques de formation des nuages pour dresser une méthodologie de classification et de suivi des perturbations de pluies hors saison au Sahel pouvant servir d'éléments de base à la prévision météorologique en temps réel et/ou à un pas de temps significatif de la saison.

II - MÉTHODOLOGIE

II-1. Processus physique et mécanisme de formation des pluies hors saison

La saison de pluie au Sahel est contrôlée par la structure de l'équateur météorologique (EM) et sa migration annuelle sur la région [1, 2, 7]. Elle dure environ quatre mois (de Juin à Septembre) [6, 8]. Les manifestations pluvieuses des mois de Mai et Octobre sont qualifiées respectivement de précoces et tardives. Aussi, du point de vue agropastoral, on qualifiera de pluies hors saison, toute autre précipitation tombée en dehors de cette période, Quelles peuvent être alors les causes essentielles de la différence entre les processus physiques de la formation de l'un et de l'autre évènement pluvieux ?

II-2. La saison de pluie au Sahel : conditions atmosphériques générales et mécanisme de formation des systèmes pluvio-orageux

Au Sahel, la saison de pluie correspond au séjour de l'équateur météorologique sur la région [1, 2, 7], et plus singulièrement des zones B, C₁ et C₂ de sa structure (*Figure 1*). C'est en d'autres termes, le temps que dure la phase de remontée et de retrait du front intertropical (FIT) sur ces latitudes.

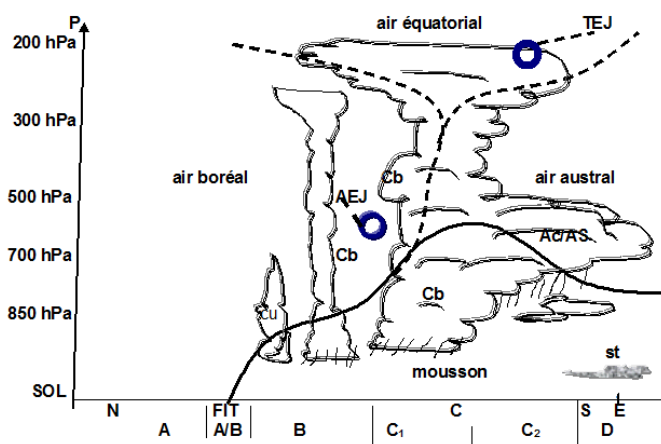
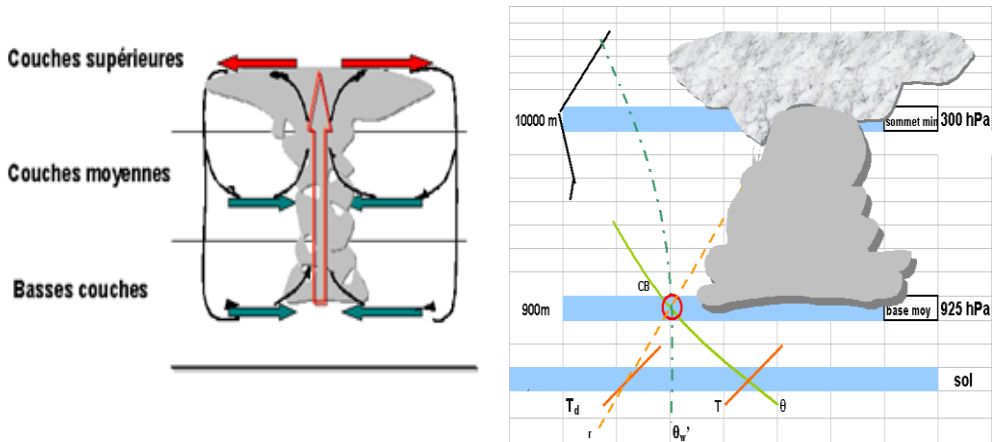


Figure 1 : Structure de l'EM et type de temps associé en Afrique occidentale et centrale du nord-ouest

Les activités pluvio-orageuses de saison de pluie sont d'origine convective et essentiellement localisées au sud de la trace au sol du FIT. On observe des orages isolés d'évolution diurne en zone B, des lignes de grains et zones orageuses en zone C₁ et des perturbations de type pluie de mousson en zone C₂. Dans ces domaines de mousson humide et convergente, couplés à une divergence synoptique de niveaux supérieurs, le flux est généralement ondulant dans les couches moyennes. Cet ensemble de conditions estivales se traduit en un mouvement ascendant de l'air instable avec *formation des cumulonimbus fortement pluvieux : c'est le phénomène de convection profonde (Figure 2 (a) et (b))* [7 - 10]. Les cumulonimbus se développent dans une atmosphère instable de type instabilité absolue (IA) instabilité convective sélective (ICS) sous certaines conditions de l'évolution diurne locale des masses d'air. Au Sahel, on estime que dès qu'un nuage cumuliforme (CUF) dont la base est estimée à 925 hPa, a son sommet à 300 hPa il s'agit d'un Cb, [8, 10]. La convection connaît une évolution diurne très marquée avec un minimum en fin de nuit / début matinée et un maximum en milieu et fin d'après-midi. Plusieurs phénomènes peuvent être à l'origine du déclenchement de la convection comme par exemple une advection d'air chaud et humide dans la basse troposphère et / ou encore un réchauffement différentiel à la base de l'atmosphère. Une convergence synoptique des masses d'air ou un forçage orographique sont d'autres facteurs dynamiques déclencheurs de la convection.



(a) Schéma théorique de convection profonde

(b) Coupe verticale d'un Cb en zone sahélienne : localisation de la base et du sommet

Figure 2 : Processus physique de formation des cumulonimbus Cb en zone tropicale sahélienne

II-3. Conditions atmosphériques et mécanisme des pluies hors saison au Sahel

Les pluies hors saison se manifestent dans le domaine A de la structure de l'équateur météorologique situé au nord de la trace au sol du FIT, [7, 11]. Ce domaine est sous l'influence d'air boréal sec d'harmattan chaud en été et automne, et froid en hiver et au printemps. Au cours de cette période, la moyenne et haute troposphère sont entièrement sous l'influence des hautes pressions subtropicales. Le ciel est généralement clair si non, peu nuageux dans l'étage supérieur. La visibilité peut être réduite par des litho-météores de types : brume sèche, brume de poussière ou même de tempête de sable / poussière, [4]. C'est dans cet ensemble de conditions météorologiques qu'apparaissent soudainement des masses nuageuses parfois pluvieuses, accompagnées ou non de manifestations orageuses. L'occurrence d'une telle perturbation sous-entend alors l'existence d'un autre mécanisme de formations nuageuses différent de la convection. Ce dernier devrait alors prendre en compte des sources de vapeur d'eau ou d'humidité d'origines différentes. Les masses nuageuses résultant de la convection sont pour la plupart de types cumuliformes, et sont initiées dans le flux de mousson de basses couches, Il s'agit principalement de *cumulus humilis*, *mediocris*, *congestus* et enfin les *cumulonimbus*, Les précipitations observées sont généralement sous forme d'averses, sauf sous les *Altostratus* / *Altostratus* épais, associés à une ligne de grains ou une zone orageuse. Quant au phénomène de pluie de mangues, il

prend naissance dans la moyenne et haute troposphère et peut s'intensifier et se manifester jusqu'en surface. A ce stade d'évolution, il s'intègre dans la dynamique de la mousson et affiche un caractère d'instabilité convective de types perturbation frontale où l'air léger généralement chaud et humide se laisse soulever par l'air froid d'origine polaire (**Figure 3**), [9, 12]. De même, l'air équatorial chaud et humide se soulèvera suite à la poussée de l'air tropical et tentera de passer au-dessus de l'air sahélo / saharien sec. Le refroidissement dû à la détente de la masse d'air équatorial et / ou tropical conduit à la formation des masses nuageuses convectivement instables le long de la zone de discontinuité. Ces dernières s'organisent en bandes orientées SW/NE généralement plus denses dans la partie sud.

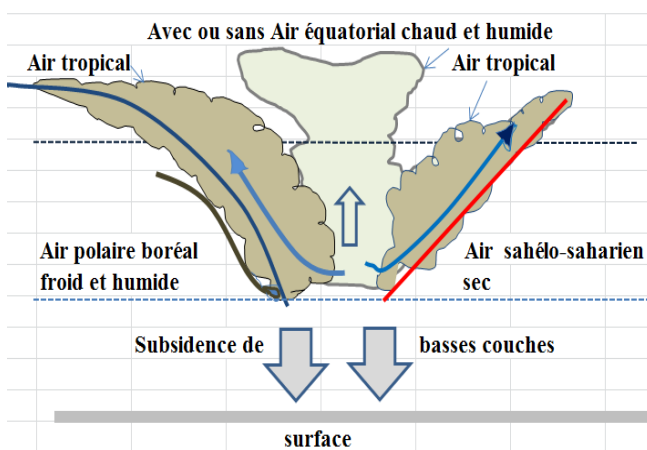


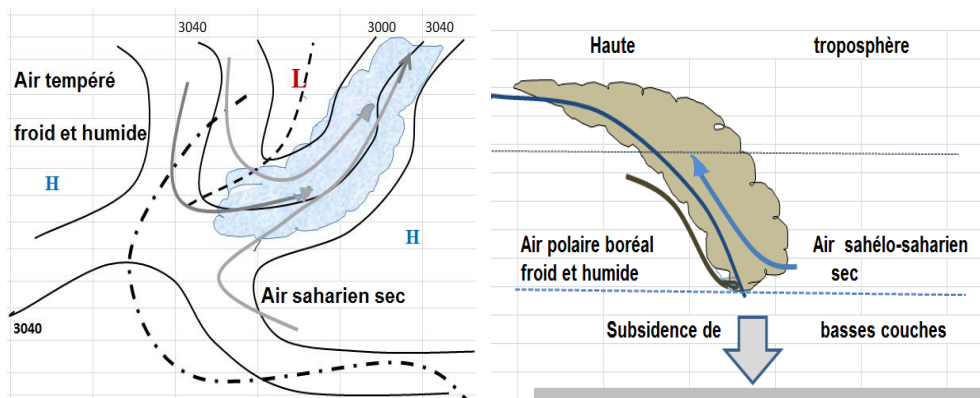
Figure 3 : Schéma atmosphérique ou mécanisme de formation nuageuse associée à une perturbation de type front polaire d'altitude en régime sahélo-saharien

En fonction de l'intensité de la perturbation (thalweg et / ou goutte froide), sa position et son extension méridienne, l'importance et les types de masses d'air mises en jeu (polaires, tempérées, tropicales avec ou sans équatoriales), son interconnexion avec la basse troposphère, nous avons pu identifier et mettre en évidence quatre types de modèles. Ces modèles prennent en compte les degrés d'évolution de la perturbation et la pluviosité du système nuageux associé :

- Modèle 1 : Nous convenons d'appeler ce modèle une perturbation de niveau zéro.

Elle est caractérisée par une situation météorologique de type thalweg extratropical de couches moyennes s'étendant ou non aux couches supérieures) et qui se limite essentiellement aux latitudes tropicales. Les masses d'air mises en jeu sont de types polaires (ou tempérées) et sahariennes. Le conflit entre ces

deux masses d'air s'érige en une dynamique de front froid dans la moyenne troposphère. L'air saharien ou sahélo-saharien en détente, s'humidifie par contact avec l'air polaire humide et donne naissance à des nuages moyens du genre *Altostratus* / *Altostratus* associés ou non à des *Cirrus* (*Ci*) / *Cirrostratus* (*Cs*), surplombant une atmosphère sèche de subsidence de basses couches en régime d'harmattan sur la région (**Figure 4**). Dans ces conditions, la probabilité de précipitations est très faible (voire quasiment nulle). Cette perturbation de pluviosité nulle est ainsi qualifiée de niveau zéro.



(a) Goutte froide ou thalweg extratropical de couches moyennes atteignant les latitudes tropicales

(b) Perturbation de type front froid dans les couches moyennes

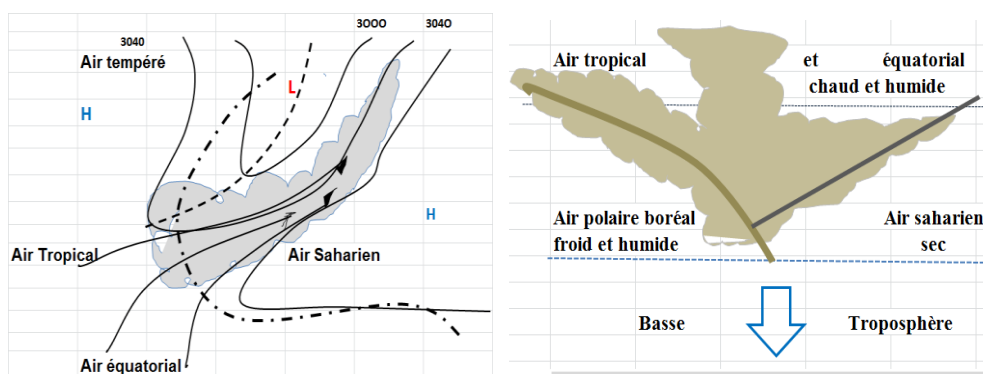
Figure 4 : Schéma atmosphérique ou mécanisme de formation de nuages moyens non pluvieux dans une perturbation de type front polaire d'altitude en régime sahélo-saharien

En effet, la vapeur d'eau mise en jeu n'est généralement pas suffisante pour générer des nuages précipitants. La perturbation se manifeste sous forme de bande de nuage de l'étage moyen associée ou non à des nuages de l'étage supérieur, et orientée SW/NE le long de la zone de mélange des deux masses d'air.

- Modèle 2 (Perturbation de niveau 1) : bande nuageuse de l'étage moyen avec pluie probable dans sa partie sud.

Le modèle n°2 ou Schéma atmosphérique d'une perturbation de niveau 1 correspond à une situation météorologique marquée par un thalweg extratropical de couches moyennes (s'étendant ou non aux couches supérieures) et qui se prolonge jusqu'au sud du Sahel. Quatre types de masses d'air sont alors mis en jeu dans une même dynamique. On peut noter de l'est

vers l'Ouest, de l'air sahélo / saharien (sec et chaud), l'air équatorial (chaud et humide), l'air tropical (relativement chaud et humide) et en fin de l'air polaire (froid et humide) se superposant les uns aux autres. Le conflit entre ces masses d'air s'érige en une dynamique d'occlusion à caractère de front froid dans la moyenne troposphère (**Figure 5**). L'air équatorial et tropical humide et chaud (instable) en détente synoptique donne naissance à des nuages de l'étage moyen très instables du genre AC *floccus* ou *castellanus* et des As associés ou non à des Ci/Cs. En dessous de ces masses nuageuses règne une atmosphère de subsidence sèche de régime d'harmattan sur la région. En effet, l'importance de la masse de vapeur d'eau mise en jeu dans ces processus dépasse largement le phénomène de *virga*. Des précipitations sont alors possibles. Cette perturbation de pluviosité appréciable est qualifiée de niveau 1, et prend le nom de pluies hors saison qualifiées de pluies de mangues, de pluie inutile ou d'évènement rare ou exceptionnel.



a) Goutte froide ou thalweg extratropical de couches moyennes manifeste jusqu'au sud du Sahel

(b) Perturbation de type occlusion à caractère de front froid dans les couches moyennes

Figure 5 : Schéma atmosphérique ou mécanisme de formation de nuages moyens localement pluvieux dans une perturbation de type front polaire d'altitude en régime sahélo-saharien

En effet, la pluviosité de la masse nuageuse dans ce cas est fonction de l'épaisseur de la couche d'air humide équatoriale / tropicale soulevée et du degré de stabilité des basses couches. Sur le Sahel occidental (Sénégal / Mauritanie) le phénomène peut déverser d'importantes quantités de précipitations. Il est connu sous l'appellation « HEUG » (en langue locale). La **Figure 6** montre la variation du profil vertical du vent dans une perturbation de pluie de mangues de niveau 1 observée les 19, 20 et 21 Février 2015 à Niamey comparée à la distribution au cours du mois. Cette rotation est très significative au niveau 700 hPa.

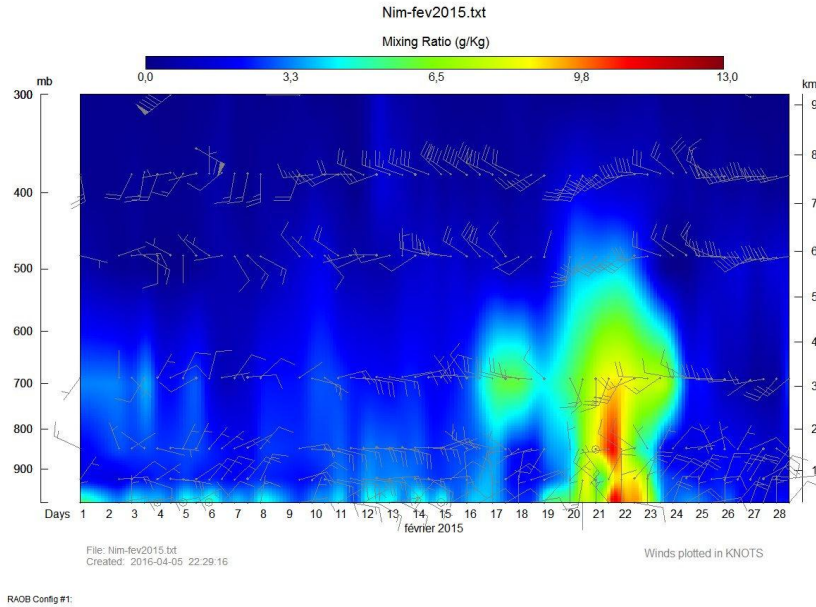


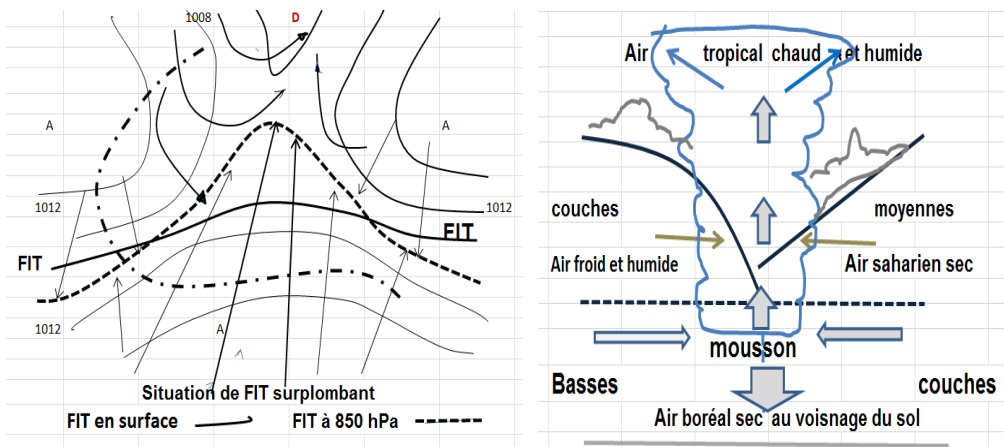
Figure 6 : Profil vertical du vent et du rapport de mélange associés à une perturbation de pluie de mangues de niveau 1 observée les 19, 20 et 21 Février 2015 à Niamey

La présence de l'air équatorial chaud et humide est marquée par la rotation du vent au niveau 700 hPa qui passe de direction nord-ouest le 19 à sud sud-ouest les 20 et 21 Février 2015 associée à de fortes valeurs du rapport de mélange.

- **Modèle 3 (Perturbation de niveau 2) :** bande nuageuse convectivement instable avec forte probabilité d'orage avec pluie au nord du FIT.

Le modèle n°3 de pluie hors saison correspond à une situation météorologique de profond thalweg extratropical associé ou non à une goutte froide de couches moyennes et s'étendant ou pas aux couches supérieures. Le thalweg se manifeste non seulement dans la frange supérieure des basses couches, mais se prolonge aussi jusqu'aux latitudes sud du Sahel. On assiste alors à un appel de mousson au nord du FIT, d'où une inversion avec l'altitude de la pente de l'équateur météorologique. Le flux de mousson remontant fusionne alors avec le flux d'air tropical et les flux d'origine polaire et saharienne détourné vers le Nord. On parle alors de situation de FIT surplombant. Cette nouvelle dynamique met ainsi en jeu cinq types de masses d'air au nord de la trace au sol du FIT à savoir : la mousson du sud convergente (chaude et très humide) surmontée de l'air polaire (ou tempéré relativement froid) et de l'air équatorial et tropical (relativement chaud et humide) et en fin de l'air saharien (sec et relativement chaud). Le conflit entre ces masses d'air s'érige en une

dynamique d'occlusion à caractère de front froid dans la moyenne et haute troposphère. L'air tropical / équatorial humide et chaud (donc instable) en détente synoptique donne naissance à des masses nuageuses de moyens très instables de genres AC *castellanus* et / ou *floccus*, et des As associés ou non à des Ci / Cs. Ainsi donc, le phénomène de convection prend naissance dans le domaine surplombant du FIT et renforce l'instabilité des couches moyennes et supérieures. On assiste alors à un processus de formation nuageuse mixte avec des activités pluvio-orageuses très intenses au nord de la trace au sol du FIT (**Figure 7**). Les événements de ce genre sont très fréquents au Sahel et sont d'une extrême rapidité. Ce type de perturbation est classé au niveau 2 du phénomène de pluie hors saison. La **Figure 7** donne un exemple de profil vertical du vent dans une perturbation de niveau 2 observée du 4 au 6 Février 2014 à Niamey.



(a) Goutte froide ou thalweg de couches moyennes fusionne avec la mousson dans la basse troposphère, mais sans atteindre le sol

(b) Perturbation de type occlusion à caractère de front froid dans les couches moyenne

Figure 7 : Schéma atmosphérique type ou processus de formation nuageuse mixte de type perturbation frontale et convection tropicale sur Sahel/Sahara

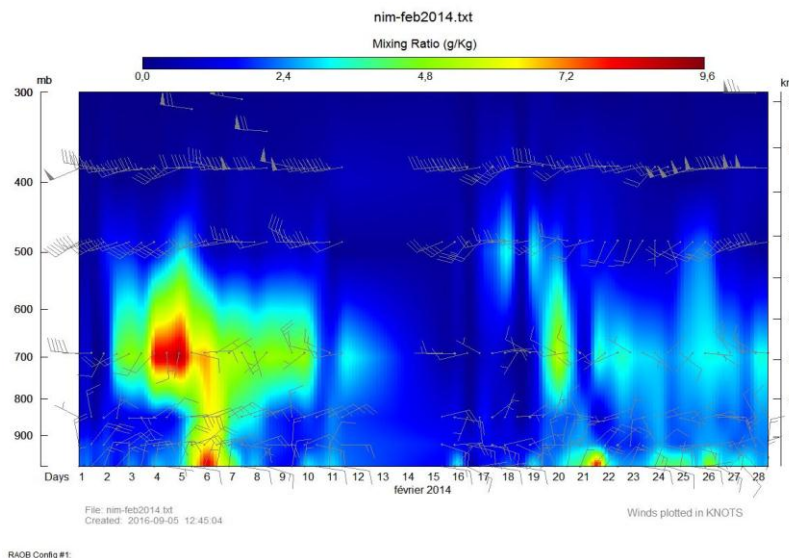
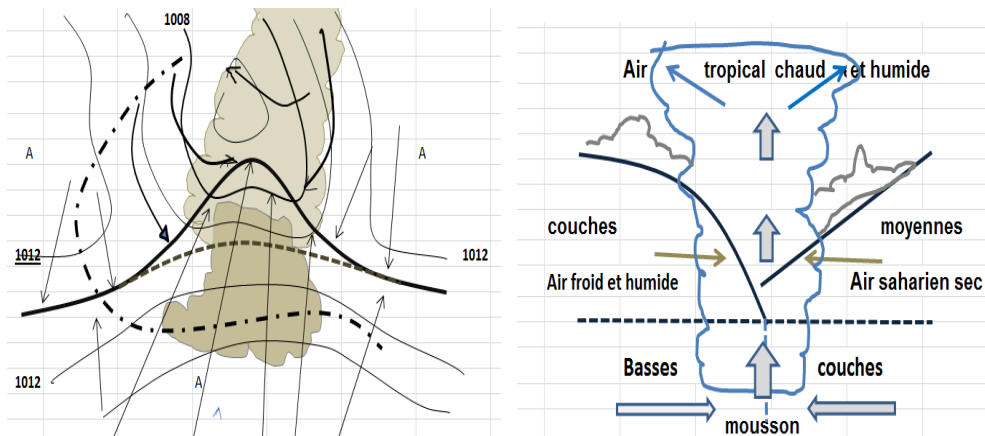


Figure 8 : Profil vertical du vent et du rapport de mélange associés à une perturbation de pluie de mangues de niveau 2 observée les 4,5 et 6 Février 2014 à Niamey

Niamey est encore sous l'harmatan dans les premiers mètres au-dessus du voisinage du sol.

- Modèle 4 (Perturbation de niveau 3) : Amas pluvio-orageux au sud du FIT se détachant de la bande nuageuse de moyens.

Le modèle n°4 de pluie hors saison correspond à une situation météorologique de profond thalweg extratropical associé ou non à une goutte froide de couches moyennes et s'étendant ou non aux couches supérieures. Le thalweg ou la goutte froide se manifeste jusqu'au sol en isolant un minimum dépressionnaire dans le sud du Sahara. Ce minimum fusionne par la suite avec les minima équatoriaux associés à la tour chaude équatoriale. On parle alors de rupture des hautes pressions subtropicales avec un appel de mousson. La nouvelle dynamique met ainsi en jeu cinq types de masses d'air dans la moyennes troposphère à savoir : la mousson originaire de Ste Hélène fortement convergente (chaude et très humide) dans les basses couches, l'air polaire (relativement froid et humide), l'air tropical et équatorial (chaud et humide) et en fin l'air saharien (sec et relativement chaud). Le conflit entre ces différentes masses d'air prend une allure d'occlusion à caractère de front froid dans la moyenne et haute troposphère avec formation des masses nuageuses de l'étage moyen très instables du genre AC *floccus* ou *castellanus* et des As associés ou non à des Ci/Cs. Les conditions thermodynamiques de convection s'organisent au Sud du FIT et renforce l'instabilité des couches moyennes et supérieures (**Figure 9**).



(a) Cas où la goutte froide ou le thalweg d'altitude atteint la surface et fusionne avec les minima équatoriaux.

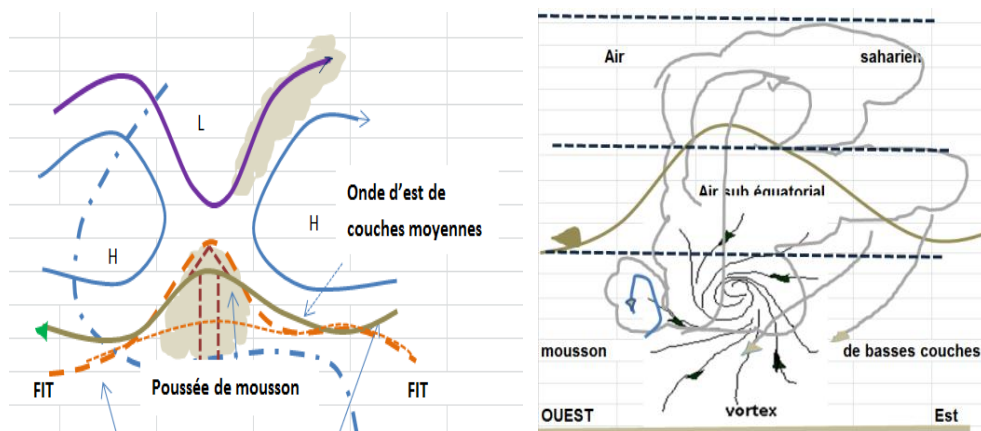
(b) Perturbation à caractère mixte: Amas nuageux convectif au sud du FIT se détachant de la bande nuageuse de l'étage moyen s'étirant vers le nord-est

Figure 9 : Schéma atmosphérique ou processus de formation nuageuse mixte de type perturbation frontale d'altitude et convection profonde en zone tropicale ouest africaine

On assiste alors à un processus de formation nuageuse mixte avec une bande de nuages instables de l'étage moyen, orienté Sud-Ouest / Nord-Est au Nord du FIT et un amas pluvio orageux au Sud du FIT se détachant de la bande nuageuse de l'étage moyen. Ce type de perturbation très fréquent au Sahel est classé au niveau 3 du phénomène de pluie hors saison.

- *Remarque :* Les différents modèles décrits plus haut montrent que la cause principale du phénomène des pluies hors saison au Sahel a son origine dans l'hémisphère nord. Il en ressort également que l'intensité de la perturbation résultante est fonction non seulement de la profondeur du thalweg extratropical, son inclinaison, mais aussi de son extension méridienne. Aussi, plus le thalweg extratropical se prolonge au sud, plus il fait appel à des masses d'air tropicales et équatoriales humides. Le caractère convectif d'une perturbation de pluies de mangues est donc intimement lié à l'importance du flux d'air chaud et humide de la moyenne troposphère et son degré d'interaction avec la mousson des basses couches. Ainsi, en excluant le cas particulier du FIT surplombant (modèle n°3), on peut conclure que seul le modèle atmosphérique n°2 offre des possibilités de pluies hors saison en l'absence de flux de mousson.

Cependant, il peut arriver que des perturbations de niveau zéro coïncident avec une poussée de mousson liée à un battement d'une puissante dorsale de l'anticyclone de Ste Hélène sur la région. La situation météorologique qui en découle est alors de type CCD (convergence dans la basse et moyenne troposphère et de la divergence dans les niveaux supérieurs) réputée être la composition ou *Schéma* atmosphérique le plus probable associé à un amas pluvio-orageux dans le domaine situé au sud du FIT (**Figure 10**).



(a) Thalweg extratropical de couches moyennes en phase avec un thalweg tropical évoluant dans le sud du Sahel

(b) Perturbation de type onde d'est active de couches moyennes

Figure 10 : Schéma atmosphérique ou processus physique de formation nuageuse mixte de type perturbation frontale d'altitude et convection profonde associée à une onde d'est de couches moyennes évoluant au sud du Sahel

La perturbation évolue en général vers le sud-ouest où les conditions d'humidité sont plus favorables. Cette particularité nous amène à introduire le concept d'un cinquième modèle de combinaison inter hémisphérique ou perturbation bi hémisphérique (PBH) où les causes de la formation nuageuse sont à la fois du Nord et du Sud. La **Figure 11** donne le profil vertical de vent associé à l'évènement pluie de mangues de type PBH observée du 5 au 10 Avril 2016 à Niamey. On note une rotation du flux d'est lors de la manifestation de la perturbation.

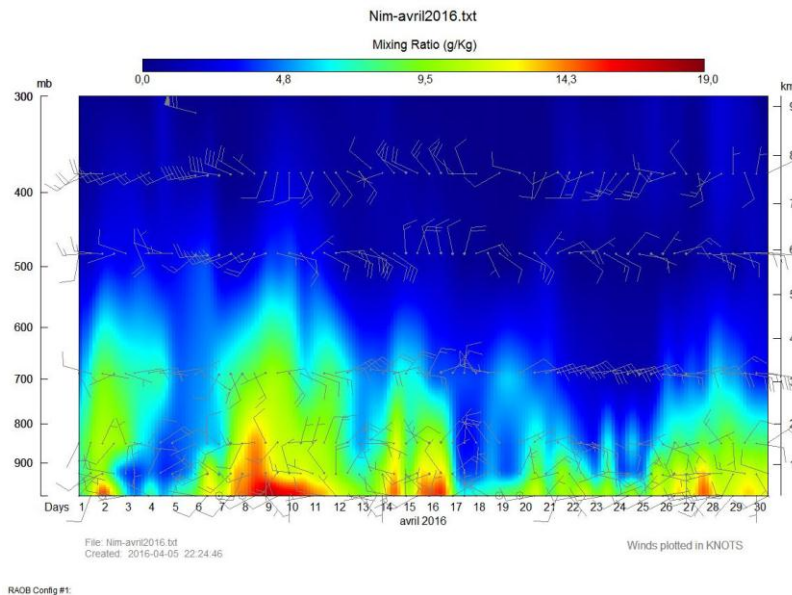


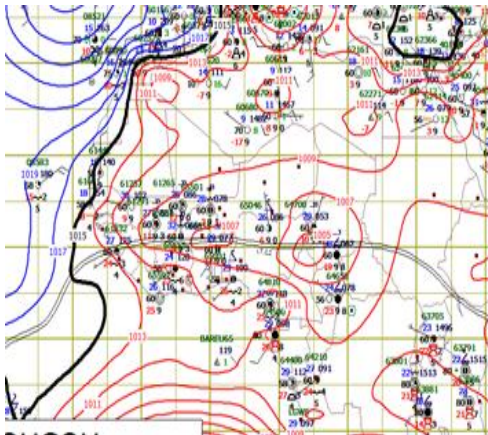
Figure 11 : Profil vertical du vent et du rapport de mélange associés à une PBH : exemple l'évènement pluies de mangues du 5 au 10 Avril 2016 sur Niamey

III - RÉSULTATS ET DISCUSSION

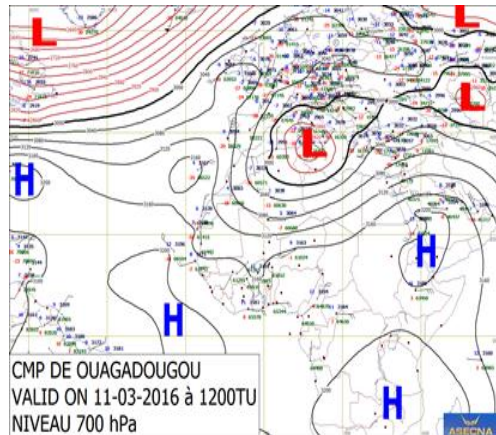
L'expression pluie de mangues est réservée au Sahel et dans les pays du golfe de guinée, aux perturbations pluvieuses hors saisons qui précèdent la cueillette et la consommation des mangues sur la région. Ces pluies débarrassent les manguiers et les fruits, de la poussière et autres dépôts salissants de l'harmattan. L'étude d'un tel phénomène de dimensions spatiotemporelles très complexes implique la connaissance des conditions atmosphériques de genèse et d'évolution de la perturbation qui lui donne naissance. On s'intéressera particulièrement aux types d'atmosphères associés au stade mature de la perturbation, mais aussi, au stade initial et de dissipation, voisins du signal néant. Nous caractériserons ensuite les grandeurs atmosphériques qui affichent les variations les plus significatives dans le passage d'un stade à un autre. Cet épisode de pluie hors saison a duré environ 48 heures (les 12 et 13 Mars 2016) sur le Burkina Faso et le Niger où il a déversé des quantités de pluie appréciable par endroit (34 mm à Tahoua au Niger). L'analyse de la situation météorologique se présente comme suit.

III-1. Stade initial : situation du 11 Mars 2016

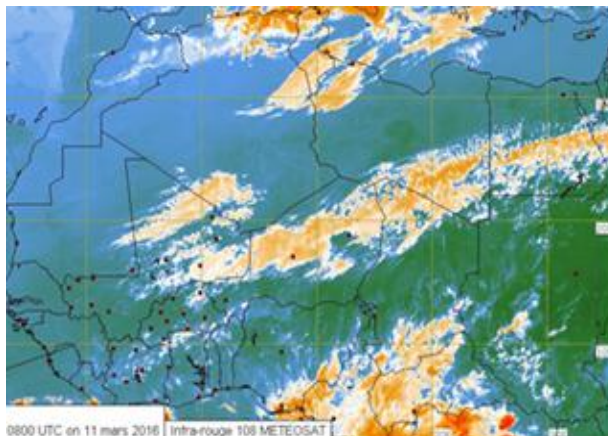
La situation météorologique était marquée en matinée du 11 Mars 2016 par la prédominance des basses pressions équatoriales sur le Nord des pays du golfe de Guinée et le Sud du Sahel. Une zone de marais barométrique occupe le Sahara et l'ensemble des autres régions de l'Afrique du Nord. Le FIT se positionne à 0600 TU le long 10°N de la Guinée Conakry au Tchad. Un minimum de géo potentiel est localisé dans les couches moyennes et supérieures sur le sud de l'Italie. Il se prolonge par un thalweg vers le sud-ouest sur le nord du Maroc. Vers la fin de la matinée et début après-midi, les basses pressions de l'Afrique du nord s'organisent en un minimum sur le Maghreb oriental et méditerranée centrale pendant que s'installe une dorsale sur le Maroc et l'ouest de l'Algérie. Cette dynamique met ainsi en conflit (*Figure 12 (b)*) dans les couches moyennes et supérieures des masses d'air maritime tropicales avec des masses d'air saharien et érige la situation météorologique en une perturbation de degré zéro (*Figure 12*) dans la classification du phénomène de pluie de manges au Sahel. L'image IR 108 μm de 0045 TU (*Figure 12 (c)*) montre une couverture nuageuse de type altocumulus peu épais pour être qualifiés de précipitations.



(a) Situation surface 11/03/2016
0600 TU



(b) Champ de géopotential à 700
hPa le 11/03/2016 1200 TU



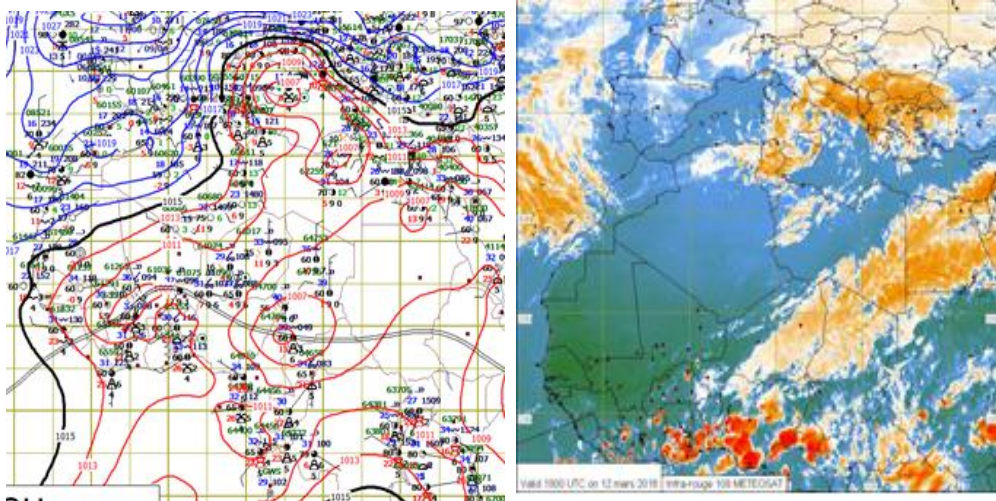
(c) Image MSG IR 108 μ m du 11/03/2016 0045 TU

Figure 12 : *Distribution spatiale des grandeurs atmosphériques et signature spectrale de la perturbation au niveau zéro*

III-2. Stade mature : situations des 12 et 13 Mars 2016

III-2-1. Situation du 12 / 03 / 2016

La dorsale des Açores progresse vers l'est sur le Sahara central / nord Sahel. Les basses pressions s'organisent sur l'Est de la Libye formant un même ensemble avec le minimum situé sur la Méditerranée centrale. Dans les couches moyennes et supérieures, le minimum géopotential situé dans le sud de l'Italie reste sans changement notable. Le FIT affiche une légère ondulation sur les régions de la boucle du Nier. Le flux de mousson se limite manifestement à 12 °N dans les 1000 premiers mètres au-dessus du sol sur le Mali et le Burkina Faso, mais accuse une remontée plus au nord dans l'est du Mali / ouest Niger. On note ainsi une inversion de la pente du flux d'air humide. Il en résulte une situation de FIT surplombant sur le domaine s'étirant du nord Bénin / Burkina Faso en direction de l'Air / Adrar des If foras. Cette situation est surmontée d'un flux d'air tropical et équatorial composant avec de l'air polaire (ou tempéré froid et humide) à l'arrière et de l'air saharien sec et relativement chaud à l'avant dans les couches moyennes. Le phénomène de convection est donc possible sur les régions de la boucle du Niger. Cette composition atmosphérique confère à la situation météorologique un caractère de niveau 2 dans la classification des perturbations des pluies hors saison au Sahel. Des cellules pluvio-orageuses sont encore visibles à 1800 TU (**Figure 13 (b)**) sur les régions de Dori (Burkina Faso) et Ayérou (Niger). La présence sur ces latitudes des foyers orageux est significative des conditions de FIT surplombant.



(a) Situation surface du
12/03/2016 1200 TU

(b) Image MSG IR 108 μ m du
12/03/2016 1800 TU

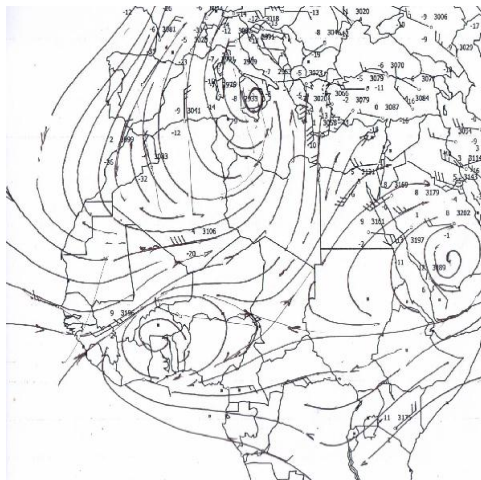
Figure 13 : Situation météorologique de 12 / 03 / 2016 à 1200 TU distribution des grandeurs atmosphérique et signature spectrale associée

Vers la fin de l'après-midi, la situation en surface devient plus nette avec un minimum dépressionnaire qui s'est creusé d'avantage sur la Méditerranée centrale en se prolongeant par un thalweg sur l'Est de la Libye. Ce dernier communique avec les basses pressions équatoriales sur le Sahara oriental. L'ondulation du FIT migre alors sur l'ouest du Niger (*Figure 13 (a)*)

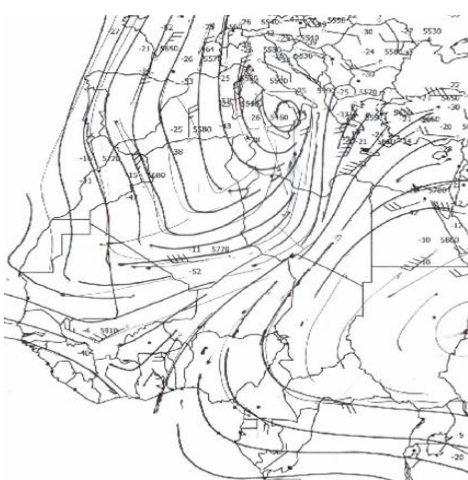
III-2-2. Situation du 13/03/2016

III-2-2-1. Situation météorologique du 13/3/2016 en matinée

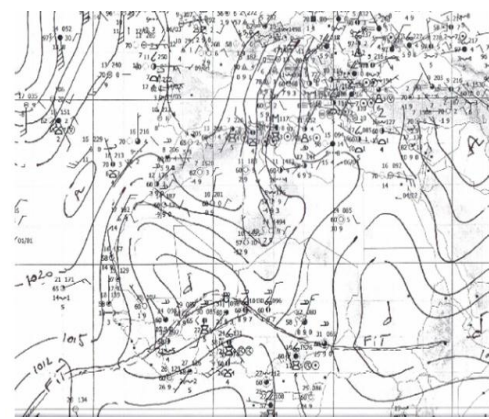
On note la persistance du minimum de géopotential dans la haute et moyenne troposphère localisé à 0000 TU sur le sud de l'Italie à 700 et 500 hPa. Le thalweg qui lui est associé à 500 hPa (*Figure 14 (b)*) bascule rapidement vers l'est dans sa partie sud pour se positionner sur le centre Algérie / extrême nord-ouest Mali. On note une forte pénétration de flux équatorial convergeant sur le Nigéria / Niger composant avec un flux d'air tropical maritime sur la Mauritanie / Mali. Les basses pressions se creusent d'avantage sur la Libye entraînant une pénétration plus franche du flux de mousson de basses couches. Le caractère mixte du processus de formation nuageuses se confirme avec la présence des foyers pluvio-orageux sur l'image de 0900TU (*Figure 14 (d)*) sur les régions de Po / Tenkodogo (sud-est Burkina Faso) et de Say / Namaro (extrême-ouest Niger). Il s'agit d'un renforcement de la situation de la veille au soir.



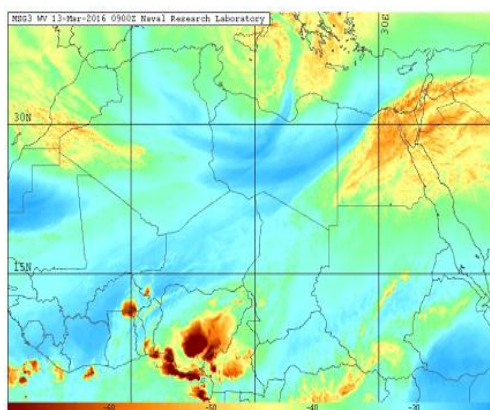
(a) géopotentiel 700 hPa
13/03/2016 à 0000 TU



(b) géopotentiel 500 hPa
13/03/2016 à 0000 TU



(c) Situation surface du
13/03/2016 0000 TU



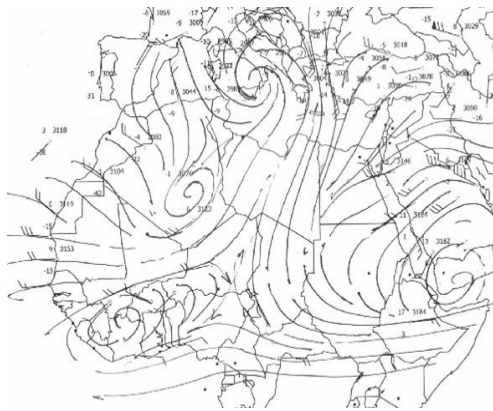
(d) Image MSG canal WV du
13/03/2016 à 0900 TU

Figure 14 : Distribution des grandeurs atmosphérique et signature spectrale associée à la situation météorologique de 13/03/2016 en matinée

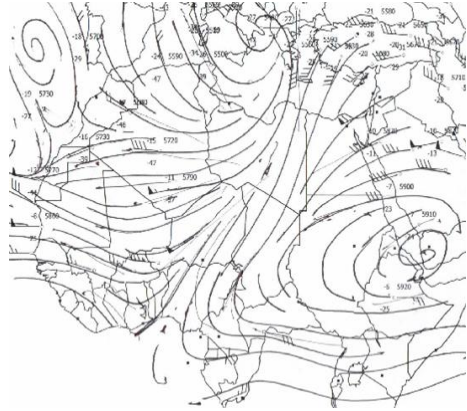
III-2-2-2. Situation du 13/3/2016 après-midi

Le 13 à 1200 TU, un minimum dépressionnaire est isolé sur la Méditerranée centrale. Ce dernier communique alors avec les basses pressions équatoriales manifestes sur le sud-est de l'Algérie et voisinages immédiats de la Libye. Il s'établit alors un véritable couloir dépressionnaire axé Cotonou / Agadez / Tripoli (**Figure 15 (c)**). Le flux de mousson remonte jusqu'à 23°N sur le nord

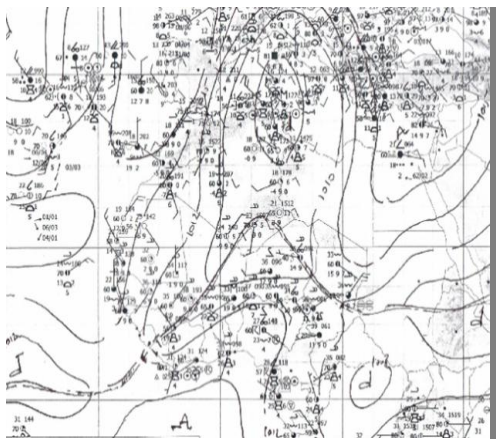
Niger, en sympathie avec le flux des masses d'air équatorial des couches moyennes (700 et 500 hPa). On note l'existence d'une onde d'Est axée sur le centre Nigéria à 700 hPa. Cette dernière est couplée à un flux de SSW à 500 hPa fortement convergent sur le Nigéria et voisinages. La perturbation de niveau 2 est alors à son paroxysme. La situation évoluera rapidement avec la formation d'une vaste cellule dépressionnaire sur le sud-ouest de la Libye / sud-est Algérie et nord Niger à 1800 TU (*Figure 15 (d)*).



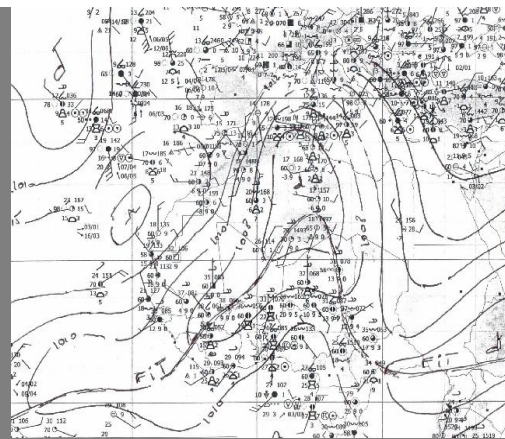
(a) géopotiel 700 hPa
13/03/2016 à 1200 TU



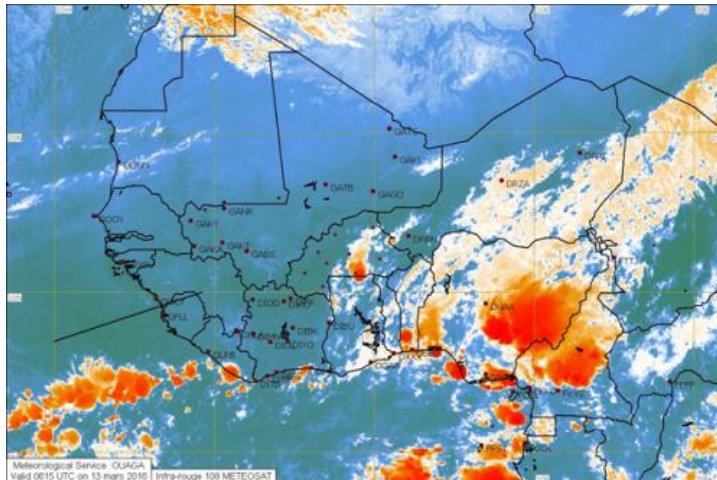
(b) géopotiel 500 hPa
13/03/2016 à 1200 TU



(c) Situation surface du
13/03/2016 1200 TU



(d) Situation surface du
13/03/2016 1800 TU



(e) Image MSG IR 108 μ m du 13/03/2016 1615 TU

Figure 15 : Distribution des grandeurs atmosphérique et signature spectrale associée à la situation météorologique du 13/03/2016 après-midi

Le flux de mousson s'établie alors jusqu'au sol. La situation météorologique prend alors les caractéristiques de convection profonde sur tout le domaine situé au sud de la trace au sol du FIT et particulièrement sur le Nigéria / Cameroun. L'image IR de 1645 TU (**Figure 15 (e)**) est une illustration du niveau atteint par la perturbation. On note la présence d'un amas nuageux à allure de ligne de grains sur le Nigéria / Cameroun qui se détache de la masse nuageuse de moyens. On retrouve ainsi une des caractéristiques types du niveau 3 d'une perturbation de pluie de mangues. La distribution du profil vertical de vent du mois de Mars (**Figure 16**) fait ressortir une rotation du vent assez significative dans les couches moyennes aux niveaux 700 et 500 hPa couplé à un flux de mousson manifeste jusqu'à 800 hPa. On notera surtout les fortes valeurs du rapport de mélange associées au flux de mousson, en comparaison avec celui du flux de sud-ouest des couches moyennes.

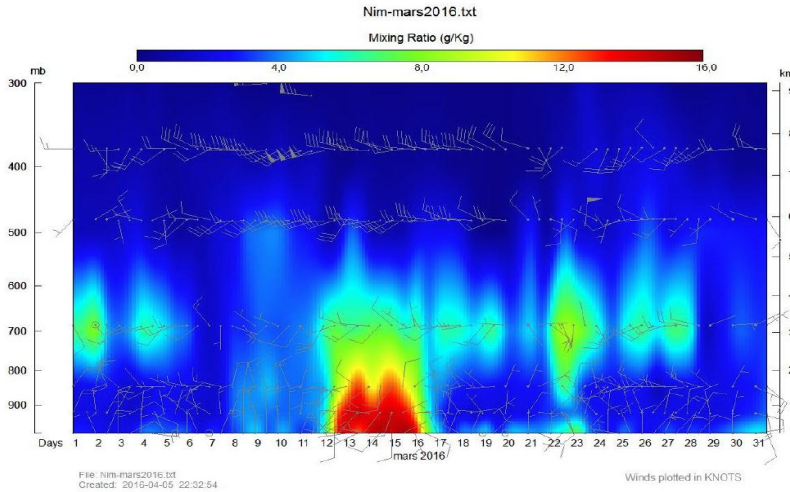


Figure 16 : Profil vertical du vent et du rapport de mélange associés à l'évènement pluies de mangues du 13 Mars 2016 sur Niamey

III-3. Stade ou phase de dissipation : situations du 14 Mars 2016

La situation météorologique affiche une hausse de pression le 14 Mars à 00 TU sur le Sahara central et le nord-est du Sahel. Le domaine sera plus tard occupé par une dorsale. Le minimum situé sur l'est de la Libye est rejeté sur l'est de l'Egypte et Méditerranée orientale. Le FIT se retire à 13°N sur la boucle du Niger, et au sud de 10°N de part et d'autre sur le Nigéria et la Côte d'Ivoire (**Figure 17**). En altitude, le flux de mousson se maintient jusqu'à Agadez revenant ainsi en situation de FIT surplombant sur la région. L'amas pluvio-orageux situé au sud du FIT s'éloigne davantage vers le Sud-Ouest sur l'océan. La bande nuageuse de moyens se dissipe progressivement dans sa partie sud marquant ainsi la fin de cet épisode.

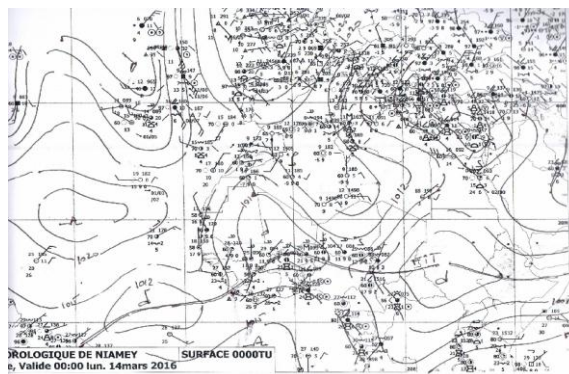


Figure 17 : Situation surface le 14/03/2016 à 0000 TU

IV - CONCLUSION

La présente étude montre que les événements météorologiques de pluies de mangues sont essentiellement liés à la profondeur du thalweg extratropical qui leur donne naissance, son intensité et son extension méridienne sur la région. Il en ressort de cette étude que l'intensité de la perturbation générée est fonction de la nature ou des caractéristiques thermodynamiques des masses d'air mises en jeu, et donc de l'inclinaison de l'axe du thalweg associé. Aussi, le présent épisode de pluie de mangues a atteint le niveau 3 de la classification des perturbations de pluie hors saison au Sahel. En Afrique de l'Ouest, et plus singulièrement au Sahel, les pluies de mangues résultent du phénomène d'interactions entre les régions tempérées et tropicales. Aussi, plus la perturbation fait appel à de l'air austral plus elle devient intense et augmente son degré de pluviosité. Du point de vue statistique, cette étude soulève la question de prédictibilité du phénomène pluie de mangues au Sahel en relation avec la fréquence d'occurrence d'ondes extratropicales profondes et s'intègre dans les réflexions sur les éléments de base de prévision saisonnière sur la région.

REMERCIEMENTS

La réalisation de cette étude est une conjugaison de multiples efforts, de sollicitations tout azimut et un investissement franc et soutenu de tous les auteurs. Aussi, nous saisissons cette opportunité pour exprimer notre reconnaissance à la Direction Nationale de la Météorologie du Burkina Faso et au Centre de Veille Météorologique de Niamey (Niger) qui ont bien voulu donner gracieusement les données, images et cartes synoptiques pour l'illustration de cette étude.

RÉFÉRENCES

- [1] - G. DHONNEUR, Traité de météorologie tropicale. Météo France, (1979).
- [2] - HAMZA et al., Les ondes d'altitude 300 / 200 hPa extratropicales nord et la dynamique des systèmes pluvio-orageux organisés au Sahel; quelle interconnexion ? Mémoire ingénieur EAMAC (Niamey), (1997) 100 p.
- [3] - S. HASTENRATH, Climate and circulation of the tropics. Springer, (1985).
- [4] - HAMZA et al., Prévision immédiate de litho météores ; guide pratique d'exploitation à l'usage du prévisionniste ouest africain, (2012).
- [5] - J. DUBIEF, Le climat du Sahara. Institut de Météorologie, Alger, (1959).
- [6] - S. NICHOLSON, Atlas of African rainfall and its interannual variability. Florida State University, (1988).

- [7] - GEORGES DHONNEUR, *Traité de météorologie tropicale. Application au cas particulier de l'Afrique occidentale et centrale*, Direction de la météorologie ASECNA, (1979).
- [8] - M. LEROUX, *Le climat de l'Afrique tropicale*. Edition Champion, (1983) 633 p.
- [9] - HAMZA et al., *Expérimentation de nouveaux concepts d'indices locaux dans la prévision des orages d'évolution diurne en Afrique tropicale : cas de site avec et sans radiosondage*, Mémoire de fin d'étude EAMAC (Niamey), (2015) 97 p.
- [10] - J. P. Triplet, G. Roche, *Météorologie générale*, École Nationale de la Météorologie, France, (1977) 317 p.
- [11] - HAMZA et al., *Expérimentation des nouveaux concepts d'indices d'instabilité pour la prévision des orages locaux d'évolution diurne en Afrique tropicale*, 23 Octobre 2006, projet de fin d'étude EAMAC (Niamey), (2006) 70 p.
- [12] - G. ROCHE, JEAN-PIERRE TRIPLET, *Météorologie générale*, Guide (broché), (1996).