SITUATION MÉTÉOROLOGIQUE DES 4 ET 5 MAI 2007 À DOUALA AU CAMEROUN : ANALYSE DES OBSERVATIONS ET PRÉVISION NUMÉRIQUE

David MONKAM et André LENOUO
Département de Physique, Faculté des Sciences, Université de Douala
BP 24157 Douala, Cameroun
courriel : lenouo@yahoo.fr

Soumis le 5 juillet 2008, accepté le 13 avril 2009 - © *Revue Télédétection*, 2010, vol. 9, n° 1, p. 43-57

Résumé

Les conditions météorologiques lors du crash, peu après son décollage, d'un Boeing B737-800 de la compagnie Kenya Airways à l'aéroport international de Douala au Cameroun le 05 mai 2007, sont étudiées. L'analyse des indices de convection calculés à partir des radiosondages de l'aéroport international de Douala montre de fortes instabilités propices à la formation d'orages et de foudres. Les conditions associées à l'intensification de la convection sont confirmées par l'étude des champs de certains paramètres météorologiques. Sur le champ de la température potentielle apparaît une masse d'air chaude au niveau de l'Equateur qui se refroidit vers les côtes du Golfe de Guinée avant de se réchauffer sur le continent. Ceci est corrélé avec les variations à 925 hPa de la vorticité et de la divergence horizontale. Cette région du Golfe de Guinée est marquée par une ascendance liée à une convergence horizontale en surface au-dessous d'une zone dépressionnaire. La vorticité en surface est caractérisée par de fortes valeurs négatives, en relation avec une advection thermique chaude qui tend à renforcer l'ascendance. L'analyse de l'image satellitaire du 04 au 05/05/2007 montre que Douala est une zone orageuse avec un système convectif particulier de type V. La prévision par le modèle ETA des caractéristiques de la circulation générale, fait apparaître une situation permanente de haute pression en surface et de dépression en altitude dans la zone du golfe de Guinée. Ceci favorise le développement des perturbations orageuses propres à cette partie du globe. L'utilisation de ce modèle pourrait améliorer sensiblement la prévention de telles catastrophes dans la région.

Mots clés : Mousson Africaine, indices de convection, orage, modèle Eta

WEATHER CONDITIONS IN DOUALA IN CAMEROON ON THE 4TH AND 5TH OF MAY 2007 : ANALYSIS OF OBSERVATIONS AND NUMERICAL PREDICTION

Abstract

The weather conditions during the crash a few minutes after take off from the Douala international airport (Cameroon) of a Kenya Airway's Boeing B737-800 on the 5th of May 2007, are determined. The analysis of convection indices computed using the radiosondes of the Douala international airport shows strong instabilities favourable to the generation of thunderstorms and thunderbolts. The conditions associated with the intensification of the convection are confirmed by the study of the mean fields of certain meteorological parameters. On the field of the potential temperature appears a warm air mass the around the Equator that gets cold towards the coats of the Gulf of Guinea before get warmer on the continent. This is correlated with the variations at 925 hPa of the vorticity and the horizontal divergence. This Gulf of Guinea region is marked by an ascendance linked to a surface horizontal convergence under a trough of low pressure zone. The surface vorticity is characterized by strong negatives values, in connection with a hot thermal advection that tends to reinforce the ascendance. The analysis of the satellite image on the 4th and 5th of May 2007 show that Douala is a thunder zone, with a convective system of type V. The prediction of the characteristics of the general circulation using ETA model shows a permanent situation of high surface pressure and low high level pressure in the Gulf of Guinea zone. This favours the development of thunder perturbations characterizing this part of the globe. The use of this model could help avoid such catastrophes in this region.

Keywords : African monsoon, convection indices, thunderstorm, Eta model

1. INTRODUCTION

Au Cameroun comme dans la plupart des pays en développement, pour prévoir la convection dans les conditions pratiques de la prévision opérationnelle, les météorologistes ne disposent pas de moyens d'observations nécessaires pour décrire la structure de l'atmosphère aux échelles pertinentes. Ils doivent analyser les données quand elles sont disponibles, pour rechercher les fondamentaux de la convection tels que l'instabilité, le soulèvement et l'alimentation en humidité. L'instabilité est une condition nécessaire à la convection. Plusieurs études ont été menées depuis une vingtaine d'années sur les liens entre l'instabilité et la pluie, mais rarement en Afrique. Il en est de même des études consacrées à la prévision d'orages. Charba (1979) a mis en place un système opérationnel de prévision de tornades à l'aide d'une méthode de régression linéaire prenant en compte l'instabilité sous forme de divers indices tandis que Peppler et Lamb (1989) ont étudié les liens entre indices et pluie pour le Centre de l'Amérique du Nord. Collier et Lilley (1994) ont traité de manière générale de la problématique de prévision d'orages au nord-est de l'Europe en utilisant des indices de convection, des données de satellite et de radar. Ces auteurs ont considéré quatre indices d'instabilité et 136 cas d'orages. Anderson *et al.* (1989) se sont intéressés à trois indices de convection pour l'observation et la prévision des orages en Suède. Les résultats de ces investigations sont souvent utilisés dans ces régions pour améliorer la qualité des prévisions météorologiques et éviter certaines catastrophes.

Pour l'Afrique jusqu'ici, très peu de travaux ont été consacrés à l'étude et la prévision des orages. Or des 50000 orages dénombrés par jour dans le monde, les plus violents se produisent en zone tropicale et subtropicale, là où l'humidité est la plus forte et la chaleur la plus intense. C'est le cas de la ville de Douala située sur les côtes du Golfe de Guinée, à 4.0° N, 9.7°E. Son climat est très chaud avec plus de 35°C au mois de mai et très humide avec une pluviométrie de l'ordre de 700 L/m^2. C'est à l'aéroport international de Douala que s'est produit, peu de temps après son décollage, dans la nuit du 4 au 5 mai 2007, le crash du vol n° KQ507 de la Kenya Airways tuant 114 personnes. Diverses hypothèses ont été évoquées. La figure 1 présente la répartition des causes principales dans les accidents aériens. L'erreur humaine est la cause principale. Ce qui implique un entraînement régulier et intense des équipages. En second lieu vient la défaillance de l'avion, mais cela est de moins en moins vrai avec les avions modernes. Les conditions météorologiques constituent la troisième cause et pourraient être à l'origine de ce crash. En Afrique, il se produit environ 25% des accidents enregistrés annuellement dans le monde pour un trafic d'à peine 4,5%. Les aéroports dans cette partie du monde sont souvent dans un état de délabrement poussé. Les pistes d'atterrissage ne sont pas toujours bien entretenues. Elles côtoient parfois des habitations et la signalisation est souvent inexistante. La sécurité dans les aéroports de 17 pays d'Afrique dont le Cameroun, est assurée par l'ASECNA (Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et Madagascar). Mais la plupart de ces aéroports sont techniquement mal équipés, avec pour beaucoup l'absence de radars. Cependant, la nouvelle génération de B737 équipée d'un radar météorologique est techniquement évoluée, conforme aux nouvelles exigences du transport commercial. C'était le cas du B737-800 de la Kenya Airways. Ceci permet d'écarter la défaillance de l'avion et d'envisager les causes liées aux conditions météorologiques.

Ainsi, l'objet de ce travail est d'étudier les conditions météorologiques à Douala durant la période du crash. Nous menons l'étude de l'évolution de la convection du 4 au 5 mai 2007 en nous appuyant sur certains travaux récents. Sénési et Thépenier (1997) ont déterminé les occurrences d'orages dans l'Île de France à l'aide des indices d'instabilité déduits du radiosondage de Trappes, près de Paris. Leurs résultats montrent une amélioration sensible apportée à la prévision par ces indices. Ils nous encouragent à entreprendre des études sur les orages et foudres à Douala, à l'aide des indices de convection calculés à partir de radiosondes des 4 et 5 mai 2007. Les travaux de Collier et Lilley (1994), Anderson *et al.* (1989) mentionnés ci-dessus montrent que les indices de convection seuls ne suffisent pas pour l'observation et la prévision des orages et que la pertinence dans le choix des indices dépend aussi de la zone étudiée. Monkam (2002) a trouvé des fortes corrélations, significatives à 95%, entre l'énergie potentielle convective disponible ou CAPE (Convective Available Potential Energy) qui est un indice de convection associée à la théorie du soulèvement, et les précipitations en Afrique de l'Ouest. Deme *et al.* (2005) à l'aide des équations de régression linéaires prenant en compte la CAPE avec divers autres indices de convection, ont mis en place un système de prévision des précipitations à Dakar au Sénégal. Ainsi, des indices de convection choisis à l'aide de ces récents travaux sont calculés à partir du radiosondage de l'aéroport international de Douala des 4 et 5 mai 2007, pour mettre en évidence les instabilités propices à la formation d'orages et des foudres, lors du crash du Boeing B737-800 de la compagnie Kenya Airways. Les conditions météorologiques associées à l'intensification de la convection sont étudiées à l'aide de ces indices mais aussi des différents jeux de données d'observations et des simulations des champs de certains paramètres météorologiques. Divers auteurs (Sultan et Janicot, 2000 ; Janicot et Sultan, 2001, parmi d'autres) ont montré que dans la zone d'étude, les mauvaises conditions météorologiques sont largement influencées par la mousson africaine qui démarre effectivement au mois de mai. Ceci nous conduit à étudier l'influence de la circulation de mousson. Nous procédons d'abord à l'analyse des observations à partir des radiosondages, des images satellitaires, des données de TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), puis à la prévision à posteriori à l'aide d'un modèle de prévision numérique ayant une résolution spatiale de quelques dizaines de kilomètres, afin d'envisager des perspectives d'évolution en prévision numérique dans la prévention d'évènements à fort impact dans la région.

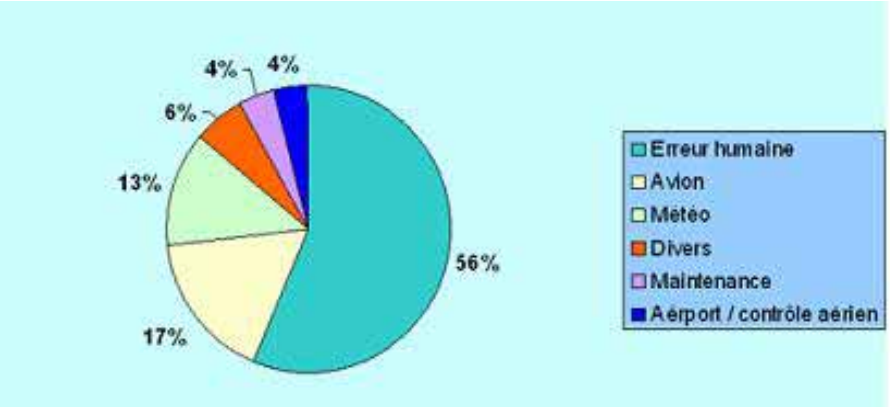


Figure 1 : Répartition en pourcentage des causes principales dans les accidents aériens (adapté de Freissinet 2007).
Figure 1 : *Percentage of the main causes of air crash* (*adapted from Freissinet 2007).*

Après avoir présenté les traits caractéristiques de la zone d'étude et sa climatologie avec l'influence de la mousson, nous décrivons les données et la méthodologie utilisées. Nous présentons ensuite les résultats de l'analyse de ces données en montrant l'évolution des indices de convection, des observations satellitaires et des caractéristiques de la circulation générale vers la formation d'orages, des foudres et des précipitations. Enfin nous présentons les résultats des prévisions numériques.

2. DESCRIPTION ET CLIMATOLOGIE DE LA ZONE D'ÉTUDE : INFLUENCE DE LA MOUSSON

Repérée par les coordonnées géographiques 4,0°N, 9,7°E, la ville de Douala est une agglomération d'un peu plus de 2,5 millions d'habitants, située sur les côtes du Golfe de Guinée (fig. 2). Son climat est très chaud et très humide. Le mois de mai s'avère être le début réel de la période de mousson. En se fondant sur l'analyse des observations pluviométriques de l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) et sur les réanalyses de NCEP/NCAR sur la période 1968-90, Sultan et Janicot (2004) ont étudié la mise en place de la mousson à partir du déplacement méridien saisonnier de la ZCIT (Zone de Convergence Inter Tropicale) et ont montré que ce déplacement est caractérisé par une transition rapide entre une première position d'équilibre à 5°N en mai et en juin, marquant la première saison des pluies en Afrique guinéenne , et une deuxième latitude d'équilibre à 10°N en juillet et en août, au moment du cœur de la saison humide en Afrique soudano-sahélienne. Le Cameroun, situé entre 2°N et 13°N, est concerné par ces deux saisons de pluies associées aux deux phases de la mousson.

Il s'agit plus précisément de la mousson Atlantique qui, par référence aux masses d'air, correspond au flux océanique transéquatorial qui apporte la pluie à l'intérieur du continent ou plus exactement un capital d'eau précipitable mis en valeur par l'évolution dynamique interne et les perturbations qui affectent la masse d'air. Ainsi, l'essentiel de l'humidité dont bénéficie l'Afrique de l'Ouest et Centrale de l'ouest provient de l'Atlantique équatorial et austral. La situation climatique de Douala durant cette période de mousson est caractérisée par des conditions favorables à la formation notamment (i) d'orages et de foudres, (ii) aux précipitations dont certaines sont violentes et intermittentes tandis que d'autres durent parfois plus d'une semaine, (iii) d'une dépression dans la moyenne troposphère vers 600 hPa., souvent appelée « dépression du Cameroun » par certains auteurs (Suchel, 1972), favorisant l'ascendance et conduisant à des précipitations massives :

- L'un des aspects importants de la mousson Atlantique réside essentiellement dans la structure verticale de la masse d'air advectée et de son évolution dynamique au cours de son déplacement. Suchel (1972) montre que, cette mousson est en effet très épaisse et s'étend normalement jusqu'à 3000 m et souvent jusqu'à 4000 m (soit environ 600 hPa) sur le Cameroun. Dans la région de Douala, elle présente sur sa hauteur une humidité absolue et relative considérables. De plus ses couches nuageuses sont denses et tenaces, ce qui donne lieu à une forte nébulosité dans la région. Parmi ces nuages denses, on distingue notamment les cumulonimbus qui contribuent à la formation d'orages et de foudres.

- La masse d'air de mousson généralement plus chaude et plus riche en vapeur d'eau déverse sur la zone de Douala des précipitations très soutenues et prolongées. Pendant cette période de mousson correspondant à la saison de pluie, on a des averses qui peuvent aller jusqu'à une semaine sans interruption. Cet événement est localement appelé « la pluie de 7 jours ». Il convient aussi de préciser qu'il existe dans cette région des perturbations appelées lignes de grains prenant naissance dans un flux d'est en altitude. Ces perturbations, en utilisant l'humidité des masses d'air de la mousson qui ont évolué vers le continent, provoquent des précipitations violentes mais plus discontinues qui deviennent principalement très orageuses. Ainsi les pluies sont parfois violentes et intermittentes comme cela a été le cas en cette nuit tragique du 5 mai 2007 à Douala.

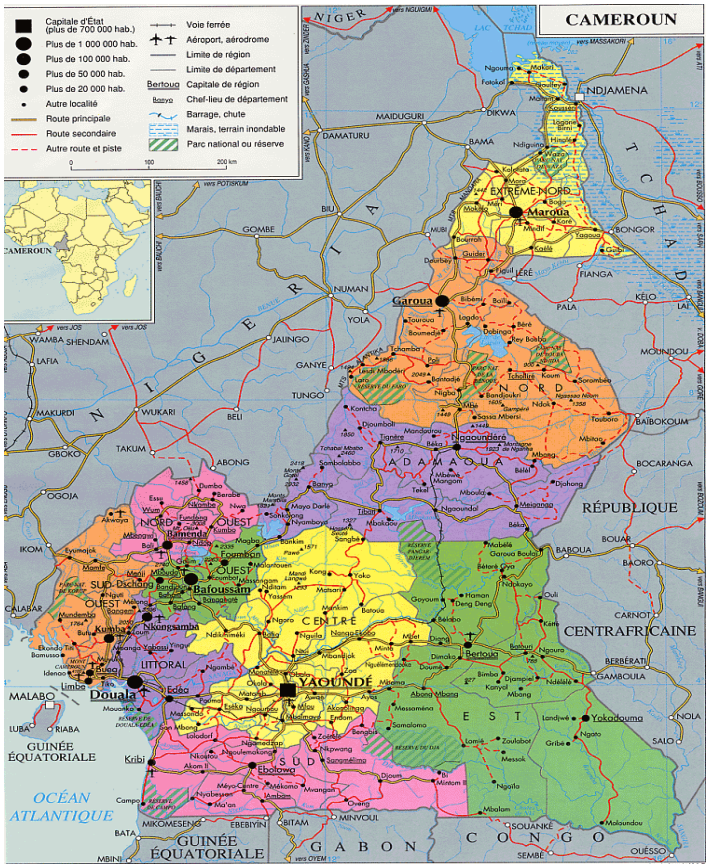


Figure 2 : Carte de localisation de la zone d'étudiée avec la ville de Douala.
Figure 2 : *Map of localization of the studied area with the city of Douala.*

- Le mouvement des masses d'air associées à la mousson vers le continent, ou encore l'advection atlantique par le Golfe de Guinée, donne lieu à la formation d'une dépression au niveau des couches moyennes de la troposphère. La présence de cette dépression implique des mouvements ascendants associés à une forte instabilité et conduit souvent à des précipitations massives.

Cette brève présentation de la zone d'étude et de sa climatologie permet d'orienter la suite de ce travail. Nous chercherons à montrer la présence de l'un ou de plusieurs de ces conditions météorologiques favorables à la formation des précipitations massives ou violentes et intermittentes, d'orages et de foudres, ou d'un système réunissant plusieurs de ces conditions, au moment du crash du Boeing 737-800 de Kenya Airways. Pour cela, nous présentons dans la prochaine section les données et la méthodologie utilisées.

3. DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE

3.1. Données

Nous disposons des radiosondages réalisés à l'aéroport international de Douala à 12 et 00 UTC, avec une résolution verticale de l'ordre de 5 hPa. Nous utilisons pour cette étude les radiosondages du 3 au 6 mai 2007, de manière à bien entourer les moments du crash.

Le site d'étude qui couvre principalement la ville de Douala, est situé en zone tropicale humide, ce qui conduit à exploiter les données de télédétection compte tenu de la présence presque permanente d'un couvert nuageux. Nous disposons de l'image Meteosat-8 tirée de synergie de l'ACMAD le 05/05/2007 à 07:30 UTC, présentant des nuages bas et épais en blanc, couvrant toute la zone du Golfe de Guinée. Nous exploitons aussi les images Meteosat-9 sur la bande IR_108 de 15 UTC le 04/05/2007 à 00 UTC le 05/05/2007, toutes les trois heures, avec des nuages bas et épais en blanc couvrant toute la zone du Golfe de Guinée comme celle de Meteosat-8.

Nous disposons des données de précipitations de TRMM. Ce sont des cumuls sur 3 heures 18H-21H, 21H-24H le 04/05/2007 et de 00-03H le 05/05/2007. Ces intervalles de temps sont choisis pour se rapprocher le plus possible de l'instant du crash.

Nous utilisons les réanalyses de NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research), projetées en points de grille sur une maille carrée de 2,5° de côté, toutes les 6 heures sur 17

niveaux de pression entre 1000 et 10 hPa. Ces réanalyses sont les résultats d'une assimilation entre les mesures qui ont été faites par les stations en surface et en altitude, par les avions, les bateaux, les satellites, etc, et les prévisions à court terme (6 heures) des modèles de prévision, de sorte qu'elles constituent aujourd'hui, les meilleurs estimations possibles des paramètres météorologiques (Kalnay *et al.* 1996). De nombreux travaux ont montré que ces réanalyses sont très proches des données d'observations en Afrique de l'Ouest.

3.2. Méthodologie

Nous présentons ici brièvement la méthodologie utilisée pour l'analyse de ces données. Pour l'étude de la convection, nous calculons à partir des radiosondages, certaines grandeurs appelées des indices de convection. Nous menons ensuite l'étude de l'évolution de ces indices dans le temps jusqu'au moment du crash, à l'aide de différents radiosondages. Pour une meilleure perception de ces indices, ils sont représentés sur des courbes du type émagramme 761, tracées à partir des différents radiosondages. Il existe plus de 60 indices de convection mais pour cette étude nous nous sommes limités au calcul de six indices bien indiqués pour la région. Il s'agit notamment de :

- L'énergie potentielle convective disponible ou CAPE (Convective Available Potential Energy) qui est l'énergie totale ayant la possibilité d'être convertie en énergie cinétique à composante verticale dans le cas d'une ascendance convective. Cet indice est lié à la théorie du soulèvement de la parcelle d'air. La CAPE est par ailleurs utilisée comme étant une mesure de l'instabilité convective conditionnelle (Ducrocq *et al.*, 2003). C'est aussi l'indice de puissance des orages et du temps violent (Kerry, 1994). Ainsi plus la CAPE est importante, plus le courant ascendant est puissant et donc plus l'orage disposera de l'énergie. Ainsi, pour des valeurs de CAPE comprises entre 1000 et 2500 J/kg, l'atmosphère est modérément instable, ce qui peut donner lieu à des orages modérés et parfois violents. Quand la CAPE est comprise entre 2500 et 3500 J/kg l'atmosphère est très instable et conduit à de forts orages et des possibilités de tornades. Pour des valeurs supérieures à 3500 J/kg., l'atmosphère est extrêmement instable ce qui entraîne des orages violents et une forte probabilité de tornades ;

- L'indice K : K=T(850)- T(500)+ Td(850)- T(700)+ Td(700). Cet indice mesure la probabilité de développement d'orages dans les masses d'air. T et Td désignent respectivement la température et la température du point de rosée aux niveaux 500, 700 et 850 hPa. En général, pour des valeurs de K supérieures à 35 le risque d'orages est élevé avec plus de 80% de probabilité ;

- L'indice de Showalter indique la force d'une tempête (Shox). Cet indice est utilisé pour les prévisions des orages compte tenu des différents facteurs intervenant dans l'évolution des cumulonimbus. En générale quand les valeurs sont inférieures à 2, les risques d'orages ou de tempêtes sont très élevés ;

- La quantité totale d'eau précipitable (Pwat) : Elle correspond à l'intégration de la vapeur d'eau sur la verticale. Sa valeur est comparée aux précipitations pour rechercher les épisodes orageux ;

- Plcl indique la pression du niveau de condensation par soulèvement ;

- Tlcl indique la température du niveau de condensation par soulèvement.

L'analyse des images satellitaires est orientée vers la recherche des systèmes nuageux du type cumulonimbus dont l'extension verticale est favorable à la formation d'orages et foudres. Ce type de nuage peut atteindre une dizaine de kilomètres d'épaisseur. Le cumulonimbus est le nuage le plus craint des aéronautes. En effet, la foudre, la grêle et les forts cisaillements de vents à l'intérieur du nuage s'ajoutent au risque de givrage (présent lorsque la température de l'air extérieur est comprise entre - 40 et 0°C) et contribueraient à mettre en péril l'avion (et ses occupants).

Les champs météorologiques tels que de l'altitude géopotentielle ou du vent par exemples sont tracés pour différents réseaux (06, 12, 18 et 00 UTC) de NCEP/NCAR pour analyser les caractéristiques de la circulation générale dans la zone du Golfe de Guinée.

Le modèle ETA est utilisé pour la prévision à posteriori du 04/05/2007, avec un pas de 3 heures à partir de 18H UTC (18, 21 et 24 H) du géopotentiel à 500 hPa, puis à 300 hPa superposé au champ de pression au niveau de la mer. Le modèle simule aussi le cumul des précipitations sur 3 heures : 18H-21H, 21H-24H le 04/05/2007 et de 00-03H le 05/05/2007. Les résultats sont ensuite comparés aux précipitations issues de TRMM.

4. ANALYSE DES OBSERVATIONS

4.1. Analyse des indices de convection

Les figures 3a, b et c montrent les radiosondages réalisés le 04/05/2007 à 00 UTC et 12 UTC, et le 05/05/2007 à 00 UTC à l'aéroport de Douala. Les indices de convections apparaissent sur les différentes figures. Mais pour une lecture rapide, nous les rappelons ici dans l'ordre d'apparition des 3 radiosondages :

- La CAPE prend les valeurs 2419, 3786 et 1175 J/kg. Toutes ces valeurs sont positives et confirment une instabilité, donc une ascendance. Cette instabilité est plus marquée sur le radiosondage du 04/05/2007 à 12 UTC où CAPE est de 3786 J/kg. Ainsi, les valeurs obtenues pour les deux premiers radiosondages indiquent clairement qu'il y

avait une instabilité persistante sur la ville de Douala durant cette période. Car la valeur de CAPE d'environ 3786 J/kg implique clairement une atmosphère extrêmement instable pouvant conduire à des orages violents et des tornades. Le 5 mai à 0000 UTC CAPE vaut 1175 J/kg, ce qui correspond à une atmosphère modérément instable pouvant donner lieu à des orages modérés ou violents.

- L'indice K vaut successivement 34,5, 36,7 et 39,1 dans les trois radiosondages. On note que la valeur de l'indice K cette nuit fatidique est supérieure à 35 et indique un fort risque d'orages avec plus de 80% de probabilité.

- L'indice de Showalter prend les valeurs -1, 0 et -1 pour les trois radiosondages. Toutes ces valeurs sont inférieures à 2. Ce qui indique des averses et/ou des orages probables durant cette période. Les risques de tempêtes sont très élevés.

- La quantité totale d'eau précipitable a la même valeur, 6 cm pour les trois radiosondages. Cette valeur comparée au cumul des précipitations du mois de mai qui est de l'ordre de 500L/m^2 à Douala avec plus de 15 jours de pluies, montre que nous sommes en présence d'un intense épisode orageux.

- Les valeurs de Plcl montrent que le niveau du bas de nuage est à 993, 927 et 985 hPa pour les trois radiosondages. La température (Tlcl) à ces niveaux est égale à 25 pour le premier et à 23°C pour les deux autres.

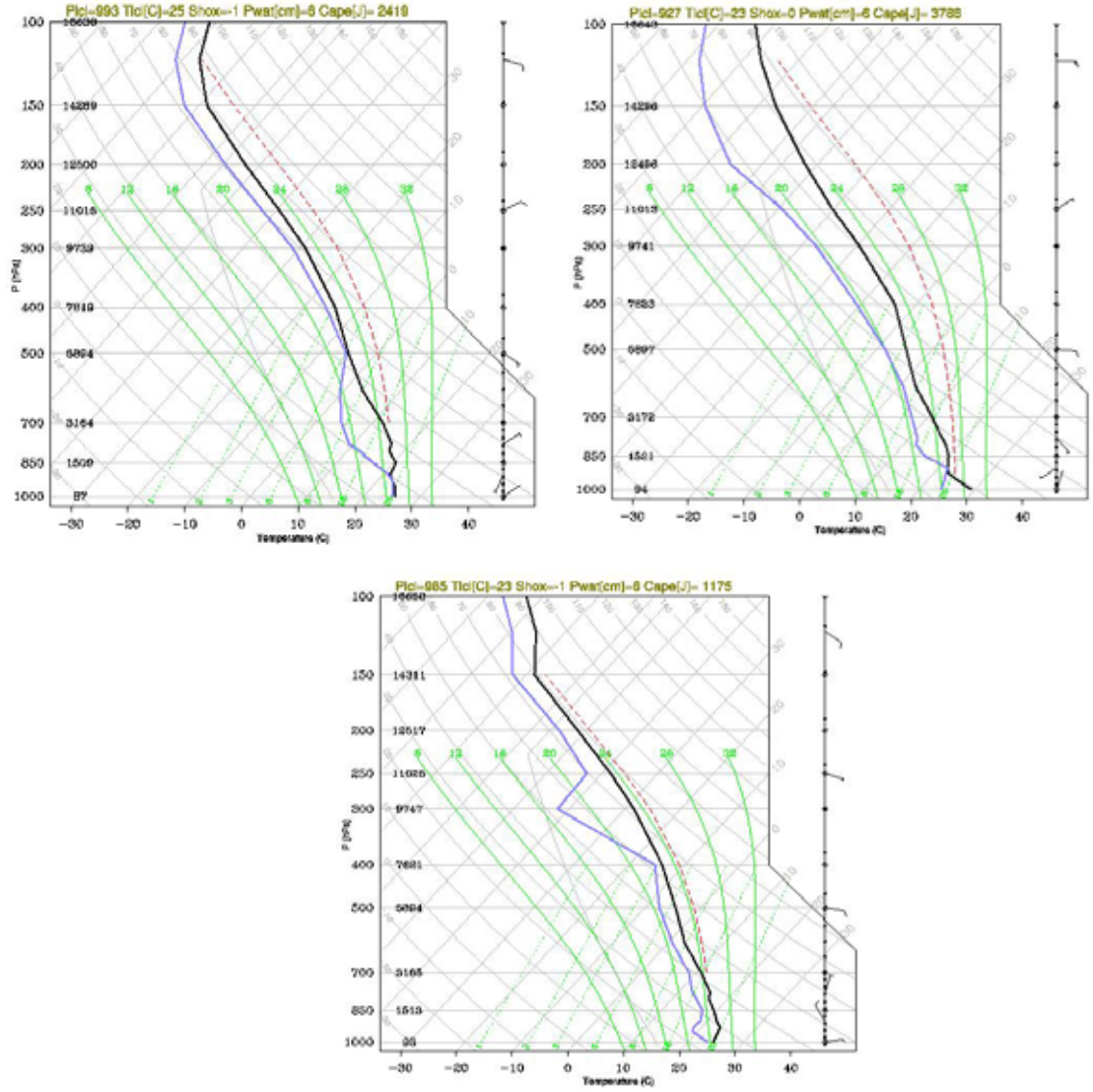


Figure 3 : Radiosondages réalisés à l'aéroport international de Douala le 04/05/2007 à 00 UTC (a) et 12 UTC (b) et le 05/05/2007 à 00 UTC (c). On a en noir la température du point d'état (°C), en bleu la température du point de rosée (°C) et en trait interrompu rouge la température pseudo-adiabatique potentielle (K).

Figure 3 : *Radiosondes of Douala international airport on the 4th of May 2007 at 00 UTC (a) and 12 UTC (b) and the 5th of May 2007 at 00 UTC (c). The state curve of temperature is in black (°C), the curve of dew temperature is in blue (°C); the pseudo-adiabatic curve is in red line-point (K).*

En plus de ces indices de convection, sur toutes ces figures 3a, b et c, on note aussi une forte instabilité thermodynamique entre le sol et 700 hPa avec des brusques changements de direction de vent qui occasionnent des mouvements tourbillonnaires très intenses. En définitive, la ville de Douala réunissait toutes les conditions météorologiques conduisant à la formation des orages et des foudres. Ces résultats sont aussi confirmés par les images satellitaires.

4.2. Analyse des images satellitaires

La figure 4 présente l'image satellitaire tirée du site de l'ACMAD ce jour du 05/05/2007. La ville de Douala est explicitement indiquée sur la figure. Sur cette image dans le canal visible, les nuages apparaissent en blanc. Plus ils sont épais plus le blanc est intense. On distingue sur l'image des nuages épais remontant du Golfe de Guinée vers le sud du Tchad. Le blanc intense de ces nuages révèle leur fort développement vertical. Seuls les cumulonimbus possèdent ces caractéristiques. Nous sommes donc en présence d'une zone orageuse.

La figure 5 présentant les images satellitaires Météosat à partir de 15 UTC le 04/05/2007 toutes les trois heures, donne avec plus de précisions, l'évolution des nuages jusqu'à l'heure fatidique. Sur cette figure, la ville de Douala peut être repérée en se référant à la figure 4. Ainsi, sur ces images du canal IR, les nuages apparaissant en blanc sont d'autant plus intenses que épais. On distingue sur l'image des nuages épais s'étendant sur les côtes de toute l'Afrique de l'Ouest et du Golfe de Guinée. Le blanc intense de ces nuages révèle leur fort développement vertical, caractérisant les cumulonimbus. Comme dans la figure 4, nous sommes en présence d'une zone orageuse. L'extension verticale des cumulonimbus est manifeste et les lignes correspondent à l'extrême sommet du cumulonimbus qui atteint parfois jusqu'à 12 km d'altitude. En considérant l'extension de la zone orageuse le long de la côte Ouest africaine, on note que sur l'ensemble de la région du Golfe de Guinée la forme caractéristique en V, bien visible à 00 UTC, qui est responsable de fortes pluies et surtout de cumuls importants du fait de leur stationnarité. Même si cette image présente plusieurs cellules orageuses, les précipitations sont maximales à la pointe du V située dans le Golfe de Guinée et visible sur les figures 4 et 5. Des systèmes en V sont souvent à l'origine des catastrophes, telles qu'au sud de la France les 12 et 13/11/1999 (Ducrocq *et al.*, 2003) ou le 3/12/2003 dans le golfe du Lion (Hontarrède *et al.*, 2004).

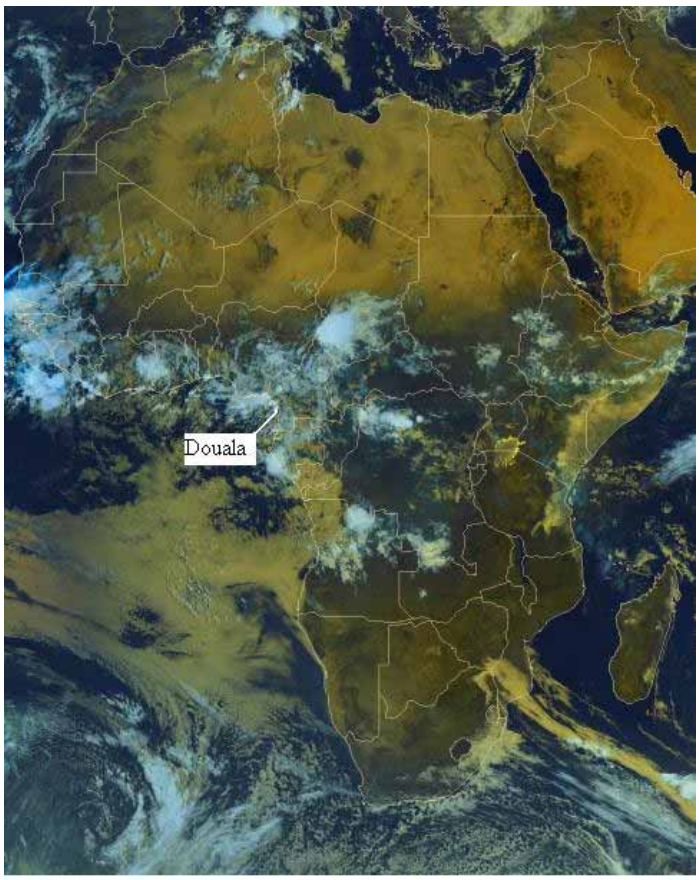


Figure 4 : Image Meteosat-8 tirée synergie de l'ACMAD le 05/05/2007 à 07:30 UTC. On peut noter que les nuages, bas et épais en blanc de forme caractéristique en V, couvrant la zone du Golfe de Guinée, peuvent donner de la pluie.
Figure 4 : *Meteosat-8 image obtained from synergy of ACMAD on the 5th of May 2007 at 07 :30 UTC. One can note that, the low and large clouds in white with a type form V, covering the zone of the Gulf of Guinea, can occasion the rain*

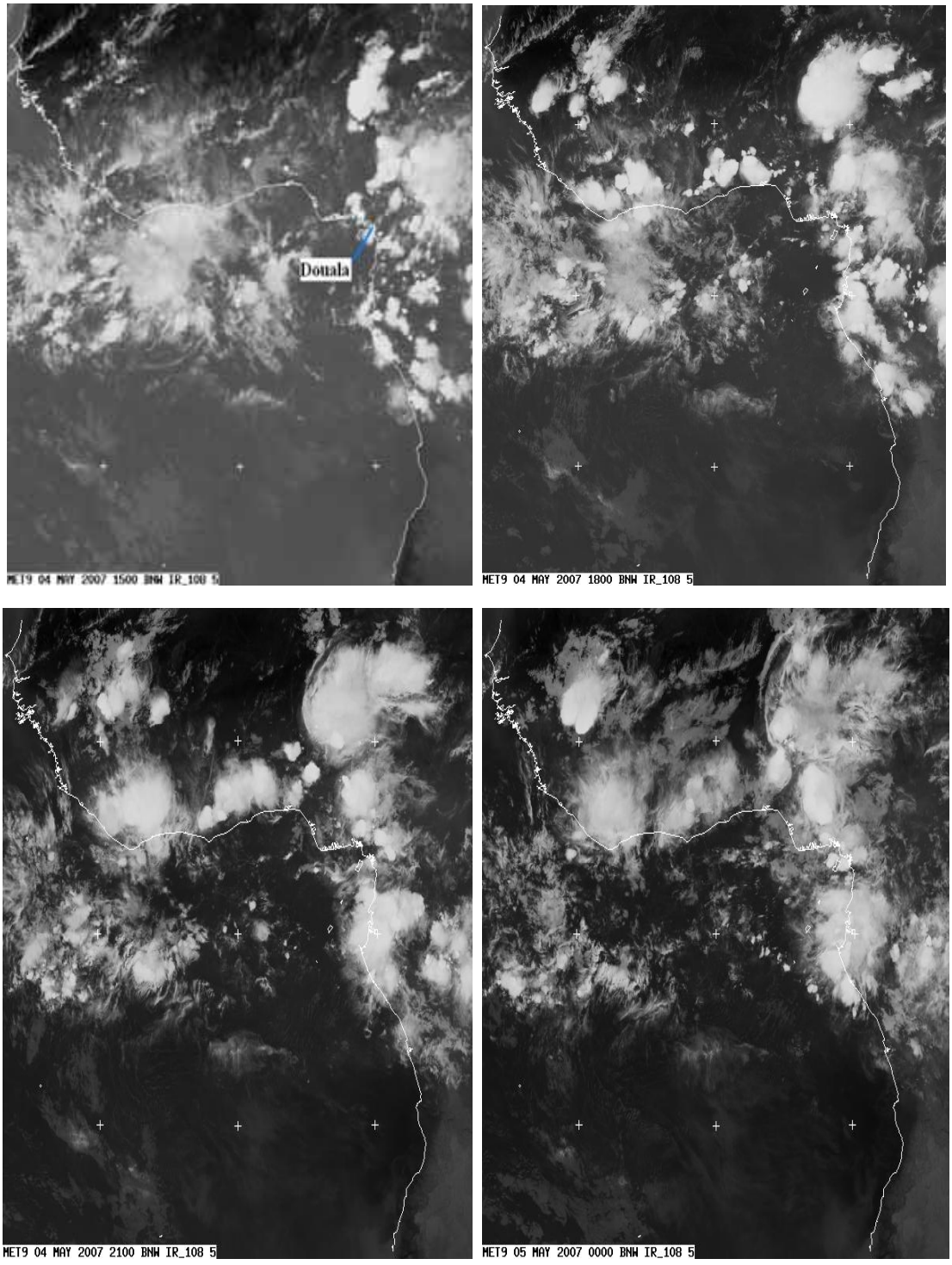


Figure 5 : Images Meteosat-9 sur la bande IR_108 de 15 UTC le 04/05/2007 à 00 UTC le 05/05/2007, toutes les trois heures. On peut noter que les nuages, bas et épais en blanc de forme caractéristique en V, couvrant la zone du Golfe de Guinée peuvent donner de la pluie.

Figure 5 :*Meteosat-9 image obtained from the IR_108 band from 15 UTC on the 4th of May to 00 UTC on the 5th of May 2007, every 3 hours. One can note that, the low and large clouds in white with a form of type V, covering the zone of the Gulf of Guinea, can occasion the rain.*

4.3. Analyse des caractéristiques de la circulation générale

La figure 6 présente les champs moyens issus des réanalyses de NCEP/NCAR, du vent et de l'altitude géopotentielle le 04 et le 05 mai 2007, à 18 UTC et 00 UTC respectivement, pour les niveaux 1000 et 300 hPa. Le 4 mai, à 1000 hPa (fig.6a), on observe une zone de haute pression associée à une circulation anticyclonique, couvrant la région Sud-Cameroun, le Gabon et le Congo, avec une inclinaison dans la direction sud-est. A 300 hPa (fig. 6b), entre les méridiens

10°O et 20°E, on remarque une configuration classique appelée situation en Ω (oméga), qui est une succession dans la direction SO-NE, alternant anticyclone-dépression-anticyclone En générale, ce type de circulation atmosphérique de grande échelle en Ω peut durer plusieurs jours (Ducrocq *et al.,* 2003). Quelques heures après, ces structures sont complètement désorganisées (figs. 6c,d) ce qui présage dans la région des conditions très favorables à un épisode perturbé.

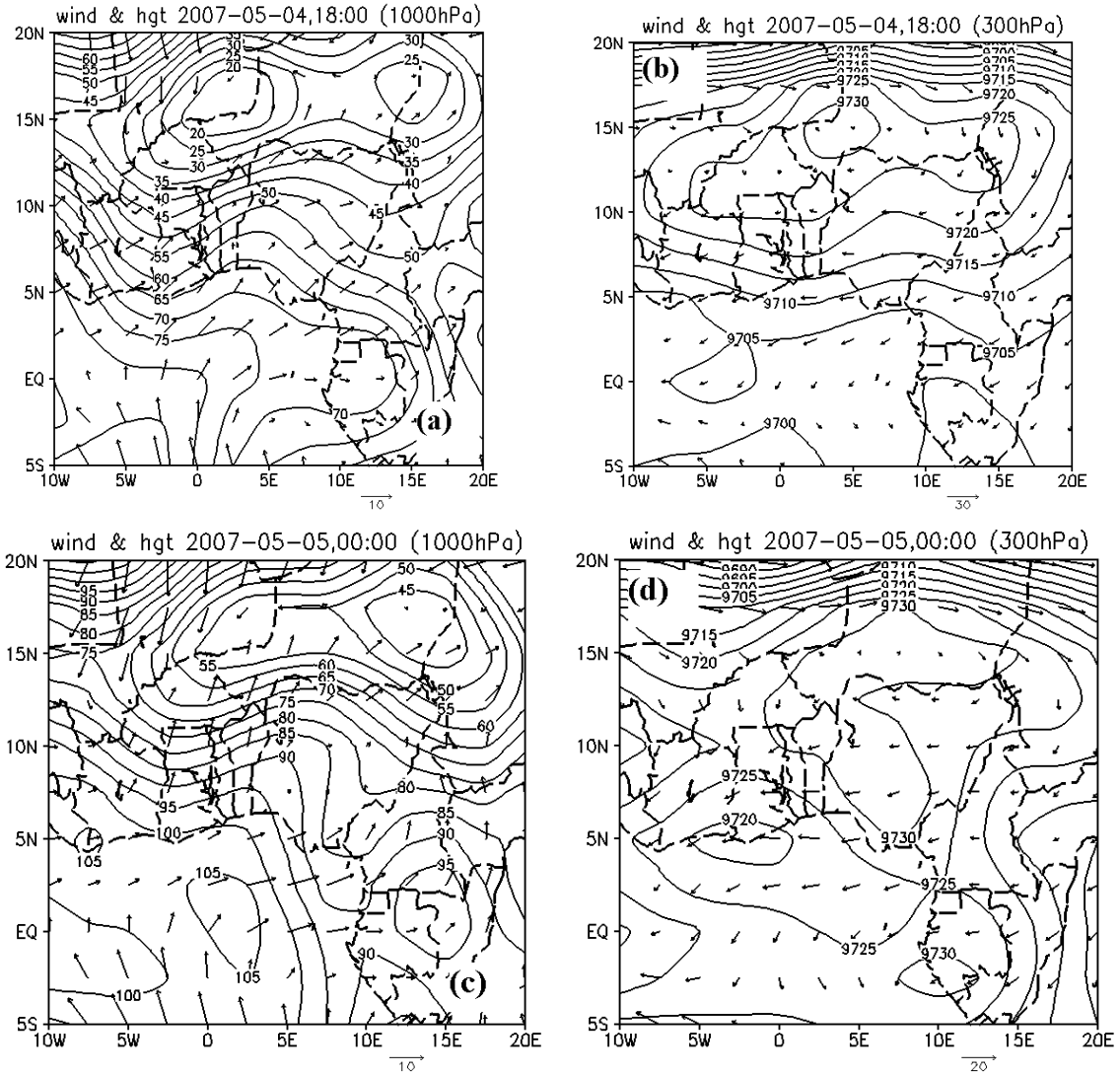


Figure 6 : Vent (en m/s) et géototentiel le 04/05/2007 à 18 UTC (a et b) et le 05/05/2007 à 00H UTC (c et d) respectivement à 1000 hPa (à intervalles de 10 mgp) et 300 hPa (à intervalles de 5 mgp). On peut noter la disparition de la structure en « Ω » entre 18H et 00H UTC à 300 hPa.

Figure 6 : *Wind eand geopotential on the 4th of May 2007 at 18 UTC (a and b) and on the 5th of May 2007 at 00 UTC (c and d) respectively at 1000 hPa and 300 hPa. One can note the disappearance of the structure in « Ω » between 18 and 00 UTC at 300 hPa.*

Le 05/05/2007 à 00 UTC, la circulation de mousson connaît un renforcement de vent d'environ 10m/s à 1000hPa. A 300hPa, on a un courant de vent d'est plus intense qui s'atténue progressivement lorsqu'il traverse le méridien de Greenwich. Ainsi durant cette période, la masse d'air qui couvre cette région est potentiellement instable. L'air est relativement chaud, saturé en bas au contact de la mer, et est surmonté d'air froid apporté par les vents d'altitude. Or la formation d'orage nécessite une impulsion qui imprimera aux basses couches le mouvement ascendant initial. Comme le montre les figures 7a et 7b, on a une ascendance de basses couches atmosphériques dans la région du Golfe de Guinée qui persiste jusqu'à 500 hPa. Ainsi, cette instabilité de la masse d'air s'amplifie pour renforcer l'orage avec un noyau qui se déplace légèrement de 8,5°E à 9°E (soit environ 55 km) entre ces deux niveaux de pression. Par ailleurs compte tenu de la circulation de mousson dans la basse couche de la mer vers le continent, le mouvement des masses d'air associées vers le continent, ou plus précisément l'advection atlantique par le Golfe de Guinée, donne lieu à la formation d'une dépression au niveau des couches moyennes de la troposphère vers 600 hPa sur le Cameroun. La présence de cette dépression implique des mouvements ascendants associés à une forte instabilité et conduit souvent à des précipitations massives et orageuses sur le Cameroun (Suchel, 1972).

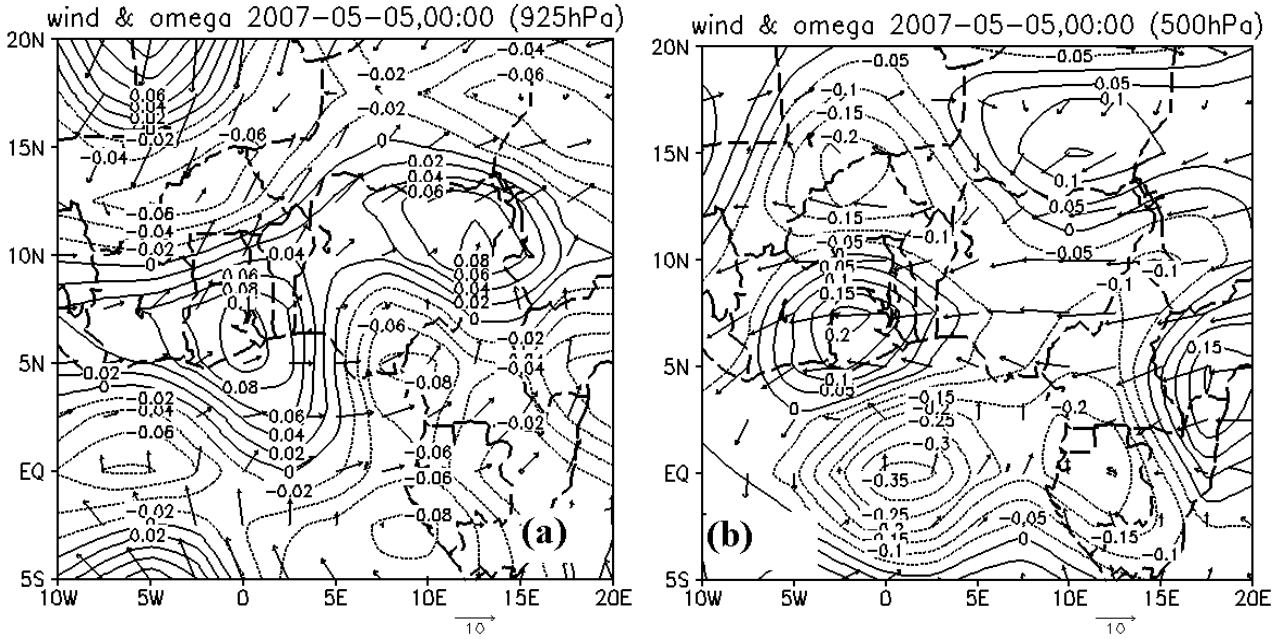


Figure 7 : Variations horizontales du vent et du mouvement vertical (en Pa/s) le 05/05/2007 à 00H UTC (a et b) respectivement à 925 hPa (à intervalles de $3x10^{-2}$ Pa/s) et 500 hPa (à intervalles de $5x10^{-2}$ Pa/s). Il y a persistance et intensification d'un mouvement ascendant dans la région du golfe de Guinée à cette date.

Figure 7 : *Variations of horizontal and vertical motions on the 5th of May at 00 UTC (a and b) respectively at 925 and 500 hPa. There are persistence and an intensification of an ascendance in the Gulf of Guinea region.*

4.4. Intensifications de la convection

La figure 8a montre une masse d'air chaude au niveau de l'Equateur qui se refroidit lorsqu'on se rapproche des côtes du golfe de Guinée avant de se réchauffer sur le continent. Cette variation aussi faible soit-elle bouleverse brusquement le temps dans cette région (Triplet et Roche, 1977). Nous avons une confirmation de cette assertion par les variations à 925 hPa de la vorticité et de la divergence horizontale (Figs.8b,c). Comme l'indique les figures 7 précédentes, dans la région du golfe de Guinée, on constate une ascendance qui résulte de la convergence horizontale en surface au-dessous d'une zone dépressionnaire (Fig.6c). La vorticité en surface présente de fortes valeurs négatives. Ceci indique qu'on a une advection thermique chaude qui tend à renforcer l'ascendance. Ainsi pour mettre en évidence les variations brusques des masses d'air qui conduisent aux phénomènes d'orage, nous avons analysé à partir des données de re-analyse NCEP/NCAR, la température potentielle (fig. 8a), la vorticité potentielle (fig. 8b) et la divergence horizontale (fig. 8c). Pour apprécier les ascendances et les subsidences subies à l'échelle aérologique par une parcelle d'air surplombant le site, nous avons étudié le comportement de la température potentielle. Cette méthode a été utilisée par Iribane et Godson (1973) et Yau et Rogers (1989). En définitive, il y a un ensemble de conditions météorologiques favorables à l'intensification de la convection.

5. PRÉVISION A POSTERIORI PAR LE MODÈLE ETA

La prévision numérique du temps a été développée comme l'un des outils pour tenter de prédire l'évolution du temps et en particulier les événements extrêmes. En effet, la prévision plusieurs heures à l'avance d'un événement permet de prendre des mesures adéquates pour éviter ou atténuer les dommages tels que les dégâts matériels et pertes en vies humaines.

5.1. Présentation du modèle ETA

Ce modèle a été initialement développé en Yougoslavie (Mesinger, 1984) puis aux Etats-Unis au NCEP (Rogers, 1995) où il est encore utilisé de façon opérationnelle. En zone tropicale, il a été utilisé sur l'Amérique notamment par Fennessy et Shukla (2000). Le schéma de convection de Kain-Fritsh (KF, 1993) est utilisé car ce schéma est un modèle de réajustement unidimensionnel basé sur la conservation du flux de masse. Le schéma de KF considère à la fois les mouvements ascendants et descendants dans une parcelle d'air, phénomène observable dans la région du golfe de guinée. Nous faisons une prévision apostéreori sur 48 heures à une résolution spatiale de 32 km. Le modèle est initialisé à 00h UTC le 04/05/2007 par les données NCEP du GFS (Global Forecasting System), qui fournit aussi les conditions aux limites du modèle ETA toutes les 6 heures. Les données de précipitations de TRMM sont utilisées pour vérifier les simulations du modèle ETA. Car il faut noter que la particularité du satellite TRMM résulte du fait qu'il est spécialement équipé pour la mesure des précipitations dans les tropiques et les sub-tropiques.

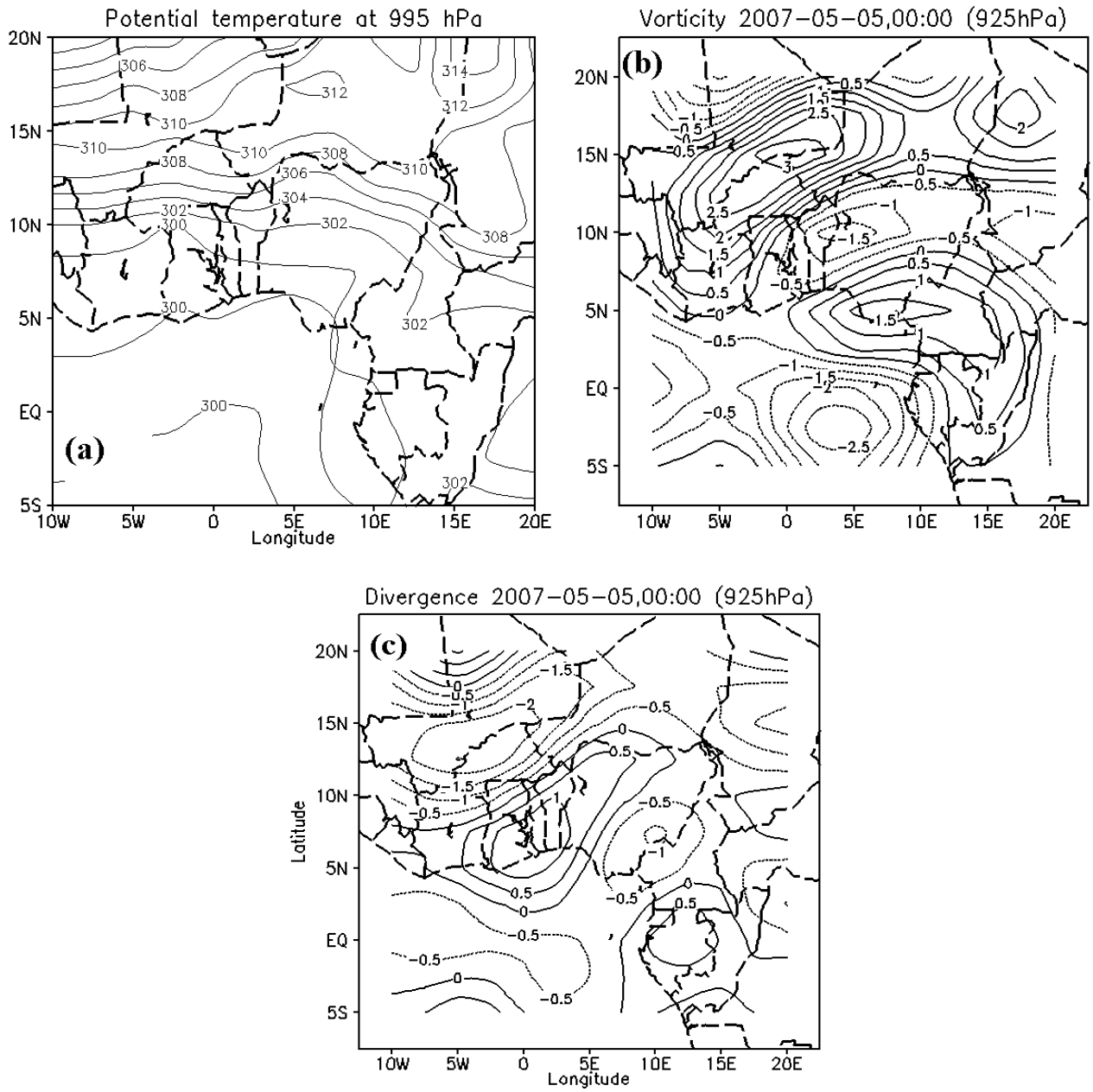


Figure 8 : Température potentielle en K (a) à 995 hPa, vorticité potentielle (b) et divergence horizontale (c) en $10^{-5}s^{-1}$ à 925 hPa le 05/05/2007 à 00H UTC. Ces graphes montrent qu'on a des forts mouvements verticaux ascendants dans la région du golfe de Guinée.
Figure 8 : *Potential temperature (a) at 995 hPa, potential vorticity (b) and horizontal divergence (c) at 925 hPa on the 5th of May 2007 at 00 UTC. The curves show ascendance of strong vertical motions in the Gulf of Guinea region.*

5.2. Prévision des caractéristiques de la circulation générale

La figure 9 présente une succession d'analyse du géopotentiel à 300 hPa issue du modèle ETA, par pas de 3 heures le 04/05/2007, à partir de 18H UTC superposée à la pression au niveau de la mer durant cette même période. Ainsi, nous pouvons faire un lien entre les champs en surface et dans la haute atmosphère. La haute pression en surface (entre 1012 et 1008 hPa) est permanente dans la région du golfe de guinée avant de décroître dans la direction nord-est sur le continent. On peut noter l'anticyclone en basse altitude autour du golfe de Guinée qui se renforce entre 18H UTC le 04/05/2007 et 00H UTC le 05/05/2007 sûrement à cause du flux d'ouest. On note aussi la persistance d'une dépression vers le nord du Lac Tchad qui s'accompagne d'un renforcement de la pression au niveau de la mer. En altitude, on observe plutôt un phénomène inverse durant la même période dû au flux d'est à ce niveau. Si la dépression dans la région du golfe de Guinée perdure, l'anticyclone se déplace d'abord moyennement entre 18H et 21H UTC et très rapidement entre 21H et 24H UTC vers l'ouest tout en restant autour dans la bande latitude 10°N-15°N. Cette situation permanente de haute pression en surface et de dépression en altitude dans la zone du golfe de Guinée est propice pour le développement d'une perturbation orageuse, propre à cette partie du globe.

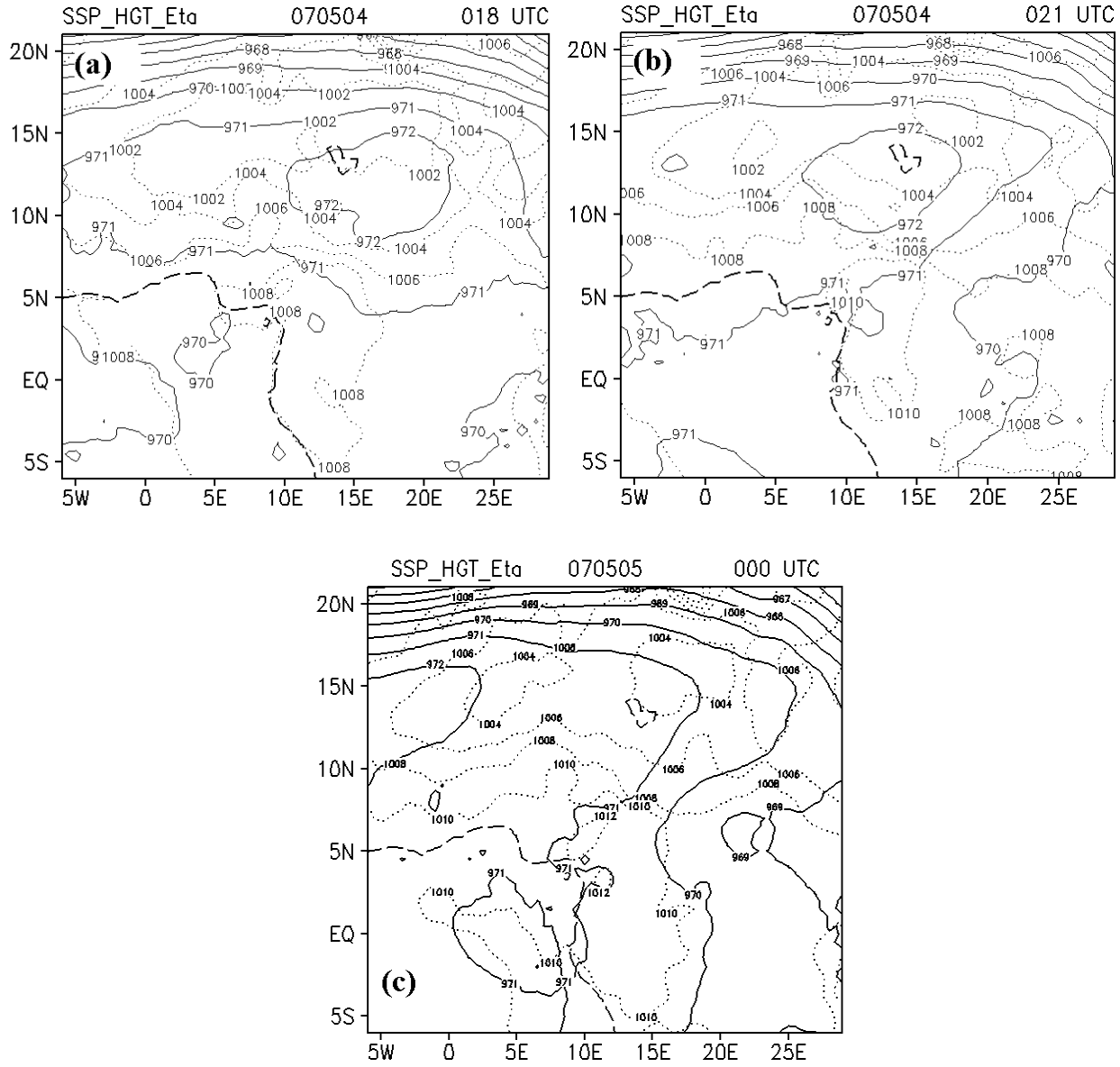


Figure 9 : Prévision du modèle ETA du 04/05/2007 à partir de 18H UTC, par pas de 3 heures, 18 (a), 21 (b) et 00 UTC (c) le 05/05/2007 du géopotentiel à 300 hPa à intervalles de 1 dam (en trait continu) superposé au champ de pression au niveau de la mer à intervalles de 2 hPa (en pointillé).

Figure 9 : *ETA model prediction on the 4th of May 2007 from 18 UTC, with an interval of 3 hours, 18 (a), 21 (b) and 00 UTC (c) on the 5th of May 2007 of wind and geopotential at 300 hPa (continuous line) superposed to the sea level pressure (discontinuous line).*

5.3. Prévision des précipitations et comparaison avec les données de TRMM

La figure 10 présente les précipitations totales au sol simulées par le modèle ETA. Nous observons une vaste zone de perturbation dans le golfe de guinée et sur l'ensemble des côtes Ouest africaine. Ces précipitations résulteraient des interactions complexes entre le continent et l'océan conduisant à une forte activité convective de la mousson dans cette région. Le modèle ETA réussit à détecter les précipitations autour de la zone d'intérêt entre 21H UTC du 04/05/2007 et 03H UTC le 05/05/2007. Or comme le montre les figures précédentes, cette zone équatoriale apparaît comme étant une région d'ascendance où les flux d'énergie thermique et latente convergent. Dans cette région, les basses couches de l'atmosphère reçoivent un maximum d'énergie par le flux de chaleur sensible et par l'évaporation. Ceci amène l'air à atteindre rapidement son niveau de condensation en s'élevant (évalué à Douala ce jour à 985 hPha). Cette condensation déclenche un phénomène de convection humide qui transforme l'énergie thermique et latente des basses couches en énergie potentielle pour les hautes couches. En période intense de la modulation de la mousson, on peut avoir sur plusieurs heures, les conditions réunies pour le développement d'un violent orage comme on pouvait le prévoir sur la figure 10. On peut aussi noter que ce modèle délimite bien la zone de précipitation avec cependant une sous-estimation de son extension dans la zone du golfe de guinée. Et comme l'indique les résultats obtenus de TRMM, le cumul de précipitation sur 3 heures pouvait aller jusqu'à 100 mm dans cette zone.

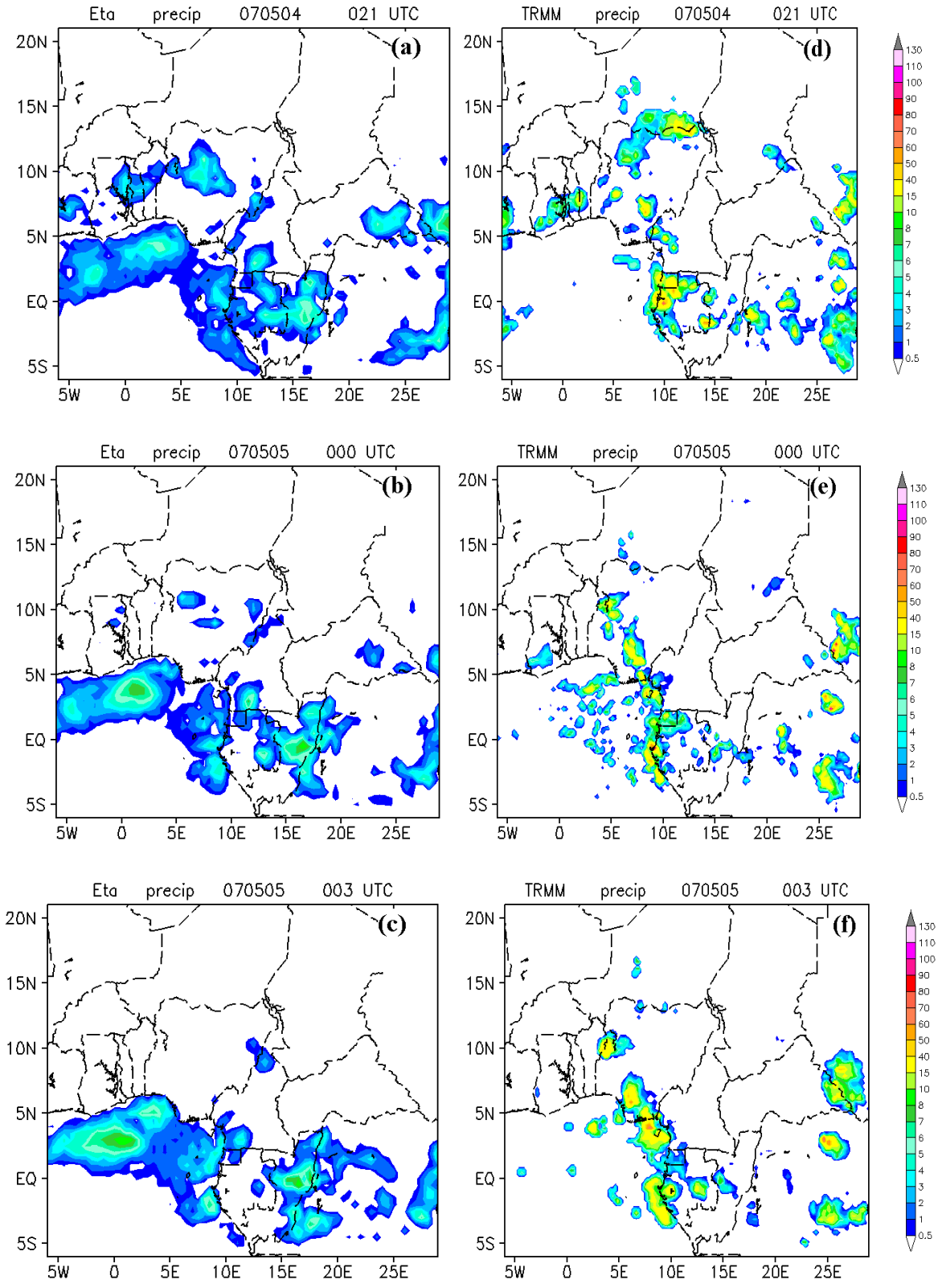


Figure 10 : Cumul sur 3 heures 18H-21H, 21H-24H le 04/05/2007 et de 00-03H le 05/05/2007 des précipitations simulées par ETA (à gauche) et issues de TRMM (à droite) autour de cette date fatidique. La région du golfe de Guinée était arrosée par des fortes précipitations durant toute cette nuit du 04 au 05/05/2007. On voit que le modèle ETA délimite bien la zone de précipitation avec cependant une sous-estimation de son intensité par rapport au TRMM.

Figure 10 : *Sum on 3 hours, 18-21, 21-24 UTC on the 4th of May 2007 and from 00-03 UTC on the 5th of May 2007 of the precipitations simulated by ETA model (left) and the precipitations of TRMM (right). There were strong rainfall in the Gulf Guinea region during the night of 4 to 5 of May 2007. ETA model delimits the zone of precipitation correctly but it seems to under estimate its intensity compared to the TRMM.*

6. CONCLUSION

Dans ce travail nous avons étudié les conditions météorologiques lors du crash du Boeing B745-800 de Kenya Airways dans la nuit du 4 au 5 mai 2007 à Douala au Cameroun, en considérant notamment les indices de convection, les images satellitaires, les champs moyens des paramètres météorologiques, les caractéristiques observées et simulées de la circulation générale.

Les indices de convection ont été calculés à partir des radiosondages réalisés à l'aéroport international de Douala. Pour tous les radiosondages du 03 au 06 mai 2007, toutes les valeurs de la CAPE sont positives et confirment une instabilité favorisant l'ascendance. L'indice K prend des valeurs très élevées, supérieures à 35, indiquant un fort risque d'orages avec plus de 80% de probabilité. Les valeurs trouvées pour l'indice de Showalter sont toutes inférieures à 2 attestant ainsi des risques élevés de tempêtes. En plus de ces indices de convection, sur toutes ces figures 4a, b et c, présentant les radiosondages sous forme de l'émagramme 761, on note aussi une forte instabilité thermodynamique entre le sol et 700 hPa avec des brusques changements de direction de vent qui occasionnent des mouvements tourbillonnaires très intenses. En définitive, la ville de Douala réunissait toutes les conditions météorologiques conduisant à la formation des orages et des foudres. Ces résultats sont aussi confirmés par les images satellitaires et les caractéristiques des la circulation générale dans la zone d'étude.

Le caractère particulièrement remarquable de l'évènement réside d'une part dans le fait qu'il intervient au mois de mai où l'activité convective est peu importante avec notamment de faibles cumuls des précipitations comparativement aux mois de juillet et août qui sont les plus pluvieux, et d'autre part dans le fait que le Crash a lieu à 6 kilomètres seulement de la piste de décollage. Mais Douala est caractérisée par des pluies intermittentes et le mois de mai s'avère être le début réel de la grande saison de pluie avec des averses qui peuvent aller jusqu'à 7 jours sans interruption. L'analyse de l'image satellitaire de ce jour du 05/05/2007 montre que Douala est une zone orageuse avec un système convectif particulier de type V. Les systèmes en V sont souvent à l'origine des catastrophes ou d'évènements extrêmes, tels qu'au sud de la France les 12 et 13/11/1999 (Ducrocq *et al.*, 2003) ou le 3/12/2003 dans le golfe du Lion (Hontarrède *et al.*, 2004).

En plus de l'analyse de l'image satellitaire, les conditions associées à l'intensification de la convection ont été confirmées par l'étude des champs de certains paramètres météorologiques dont notamment la température potentielle, la vorticité potentielle et la divergence horizontale. Sur le champ de température potentielle apparaît une masse d'air chaude au niveau de l'Equateur qui se refroidit lorsqu'on se rapproche des côtes du golfe de Guinée avant de se réchauffer sur le continent. Ceci est corrélé avec les variations à 925 hPa de la vorticité et de la divergence horizontale. Cette région du golfe de Guinée est marquée par une ascendance liée à une convergence horizontale en surface au-dessous d'une zone dépressionnaire. La vorticité en surface est caractérisée par de fortes valeurs négatives, en relation avec une advection thermique chaude qui tend à renforcer l'ascendance.

La prévision de l'événement par le modèle ETA a été faite. De manière générale, les modèles de prévisions opérationnels ont souvent sous-estimé les cumuls des précipitations. Le modèle ETA utilisé dans ce travail réussit à détecter les précipitations autour de la zone d'intérêt entre 21 UTC du 04/05/2007 et 03 UTC le 05/05/2007. On note aussi que ce modèle délimite bien la zone de précipitation avec cependant une sous-estimation de son extension dans la zone du golfe de guinée. Concernant la prévision des caractéristiques de la circulation générale, ce modèle fait apparaître une situation permanente de haute pression en surface et de dépression en altitude dans la zone du golfe de Guinée. Ceci est propice au développement d'une perturbation orageuse propre à cette partie du globe.

Finalement, nous avons montré que les conditions météorologiques étaient mauvaises cette nuit du crash. Mais il est rare qu'un accident aérien soit dû à une cause unique, la plupart des accidents étant la conséquence d'un enchaînement d'événements variés. L'examen des autres causes, notamment, l'erreur humaine et la défaillance de l'avion, permettrait de parvenir à une conclusion plus complète prenant en compte les autres contributions éventuelles.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier M Sébastien Freissinet, constructeur du site www.1001crash.com et du site www.dinosoria.com/climatique qui nous ont permis d'utiliser les informations tirées de leur site. Nos sincères remerciements à NCEP/NCAR, à la Division Technique de l'ASECNA de l'aéroport de Douala et à Météo France pour l'acquisition des images et les données.

RÉFÉRENCES

Anderson T., M.. Anderson, C. Jacobsson et S. Nilsson, 1989. "Thermodynamic index for forecasting thunderstorms in Southern Sweden", *Meteor. Mag*., 118,140, 141-146.

Charba J.P., 1979. "Two to six hour severe local storm probabilities : an operational forecasting system". *Mon. Wea. Rev* : 107, 269-281.

Colier C. G et R.B. E Lilley, 1994. “Forecasting thunderstorm initiation in North-West Europe using thermodaynaic indices, satellite and radar data”. *Met Apps*, 1, 75-84.

Deme A., P. de Félice et A.Viltard ,2005. « Prévision de la pluie à Dakar par le moyen d’indices ». *Sécheresse*, 16(3), 189-198.

Ducrocq V., G. Aullo et P. Santurette, 2003. « Les précipitations intenses et les inondations des 12 et 13 novembre 1999 sur le sud de la France », *La Météorologie*, 42, 18-27.

Fennessy M.J. and J. Shukla, 2000. “Seasonal prediction over North America with a regional model nested in a global model”. *J. of Climate*, 13, 2605-2627.

Freissinet S., 2007. 1001 Crash – Statistiques accidents aériens, http://www.1001crash.com, CNIL, n° 1141631c, 7 p.

Honterrède M., F. Baraer, N. Bourdette et V. Jacq, 2003. « Canicule et bord de mer ». *MetMar*, n°201, 20-22.

Iribarne J.V. and W.L. Godson, 1973. *Atmospheric Thermodynamics*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Hollande, 222 p.

Janicot, S. et Sultan, B., 2001. “Intra-seasonal modulation of convection in the West African monsoon”. *Gophys. Res. Lett*, 28, 523-526.

Kain, J.S. and J.M. Fritsch, 1993. “Convective parameterization for mesoscale model: The Kain-Fritsch scheme. The representation of cumulus convection in numerical models”. *Meteor. Monogr.*, 46, 165-170.

Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gaudin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K.C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, Roy Jenne and Denis Joseph, 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc*., 77, 437-471.

Mesinger, F., 1984. “A blocking technique for representation of mountains in atmospherics models”. *Rev. Meteor. Aeronaut.,* 44, 1995-2002.

Monkam D., 2002 : “Convective Available potential energy (CAPE) in Northern Africa and Tropical Atlantic and study of its connections with rainfall in Central and west Africa during summer 1985”. *Atmos Res*, 62, 125-147.

Peppler, R. A et J. P Lamb, 1989: “Tropopheric static stability and Central North American growing season rainfall”. *Mon. Wea. Rev*, 117, 1156-1180

Rogers, E., 1995: “The regional analysis system for the operational ETA model: Original 80 km configuration and recent changes”. *Wea. Forecasting*, 10, 810-825.

Sénési S et R. M Thépenier, 1997 : « Indices d’instabilité et occurrences d’orages : Le cas de l’Ile de France ». *La météorologie*, VIII^{e} Série, No. 19, 18-33.

Triplet J.P. et G. Roche, 1977: « Météorologie générale ». *Ecole Nationale de la Météorologie*. 2nd éd., 1977, 317 pages.

Suchel, J. B., 1972: *La répartition des pluies et les régimes pluviométriques au Cameroun. Université du Cameroun / Centre d’Etude et Géopgraphie Tropicale / Centre National de Recherche Scientifique*. Collection CEGET / CNRS - 3^{e} trimestre, n°4, 267 p.

Sultan, B. et Janicot, S., 2000 : “Abrupt shift of the ITCZ over West Africa and intra-seasonal variability”. *Gophys. Res. Lett*, 27, 3353-3356.

Sultan, B. et Janicot, S., 2004 : « La variabilité climatique en Afrique de l’Ouest aux échelles saisonnière et intra–saisonnière I : mise en place de la mousson et variabilité intra – saisonnière de la convection ». *Secheresse*, 15, 321-330.

Yau M.K. and R.R. Rogers, 1989 : *Short Course in Cloud Physics, Third Edition*, Butterworth-Heinemann, 304 pages.