

Mécanismes de soulèvement d'aérosols désertiques en Afrique de l'Ouest en saison de mousson

Soutenance de thèse

Diana BOU KARAM

Le 18/12/2008

Sous la direction de: Cyrille FLAMANT
Pierre FLAMANT

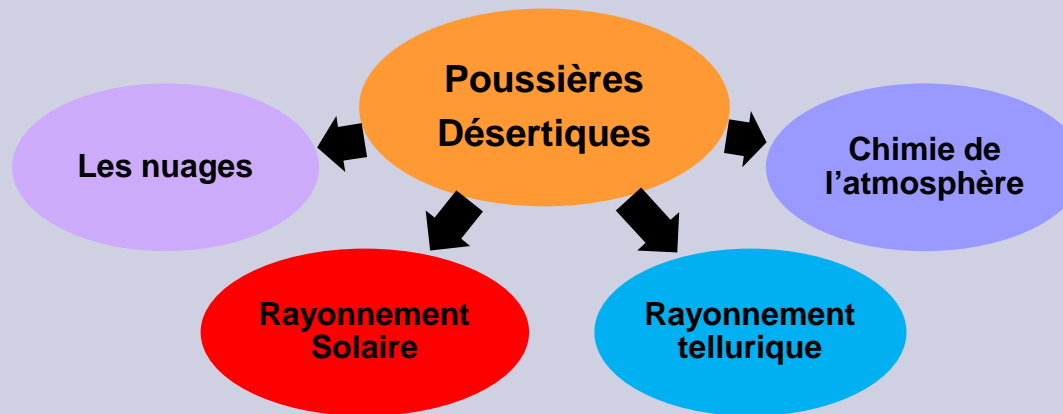


Pourquoi les aérosols désertiques?
Pourquoi l'Afrique de l'Ouest?
Pourquoi la saison de mousson?

Contexte général: Rôle des aérosols désertiques

Les aérosols désertiques ont:

- Impacts sur les cycles biogéochimiques des océans et des continents,
- Impact sur le bilan radiatif planétaire:



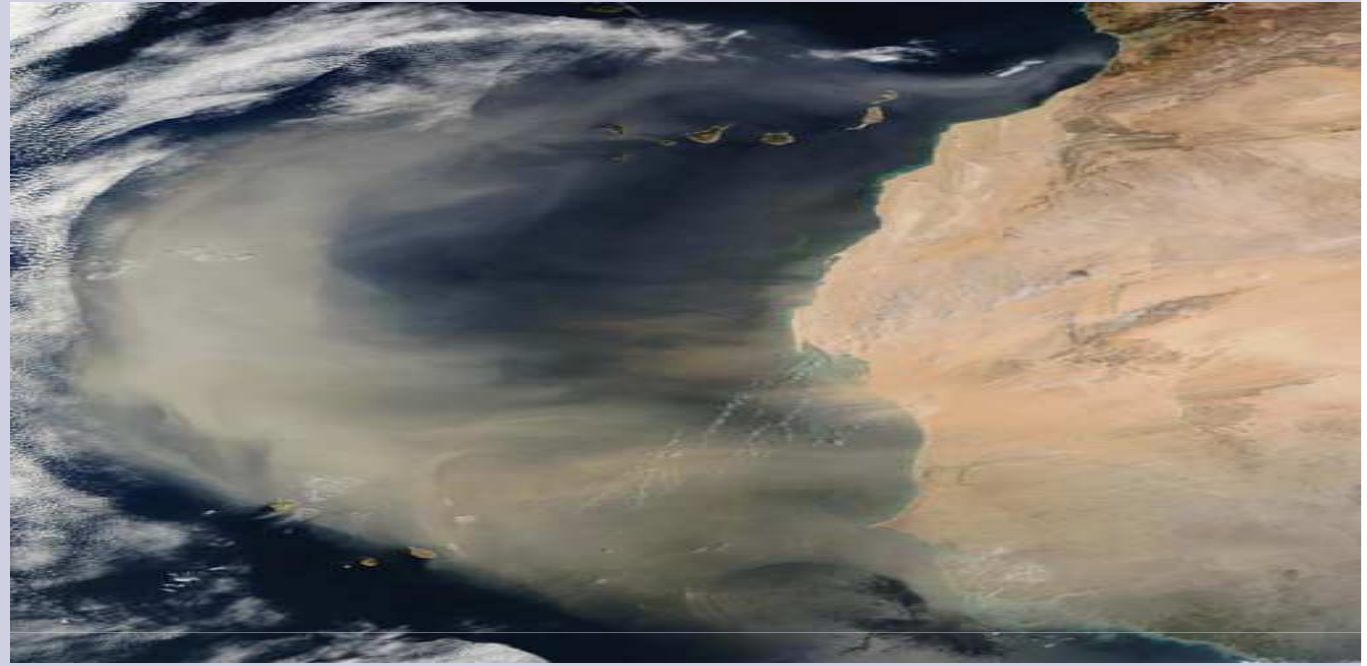
L'impact radiatif mal connu (Foster et al., 2007; GIEC, 2007):

- Les émissions:
 - ✓ sont **très variables** dans le temps et dans l'espace.
 - ✓ consistent en des **processus de fine échelle**.
- Le transport et la distribution spatiale sont **très variables** dans le temps et dans l'espace.

L'Afrique au nord de l'Equateur est:

➤ La **zone source principale** à l'échelle du globe.

➤ Contribue à **~50%** à la production mondiale en poussières désertiques estimée à 1000-2000 Tg/an (Laurent et al., 2008).



Contexte général: Impacts en Afrique de l'Ouest

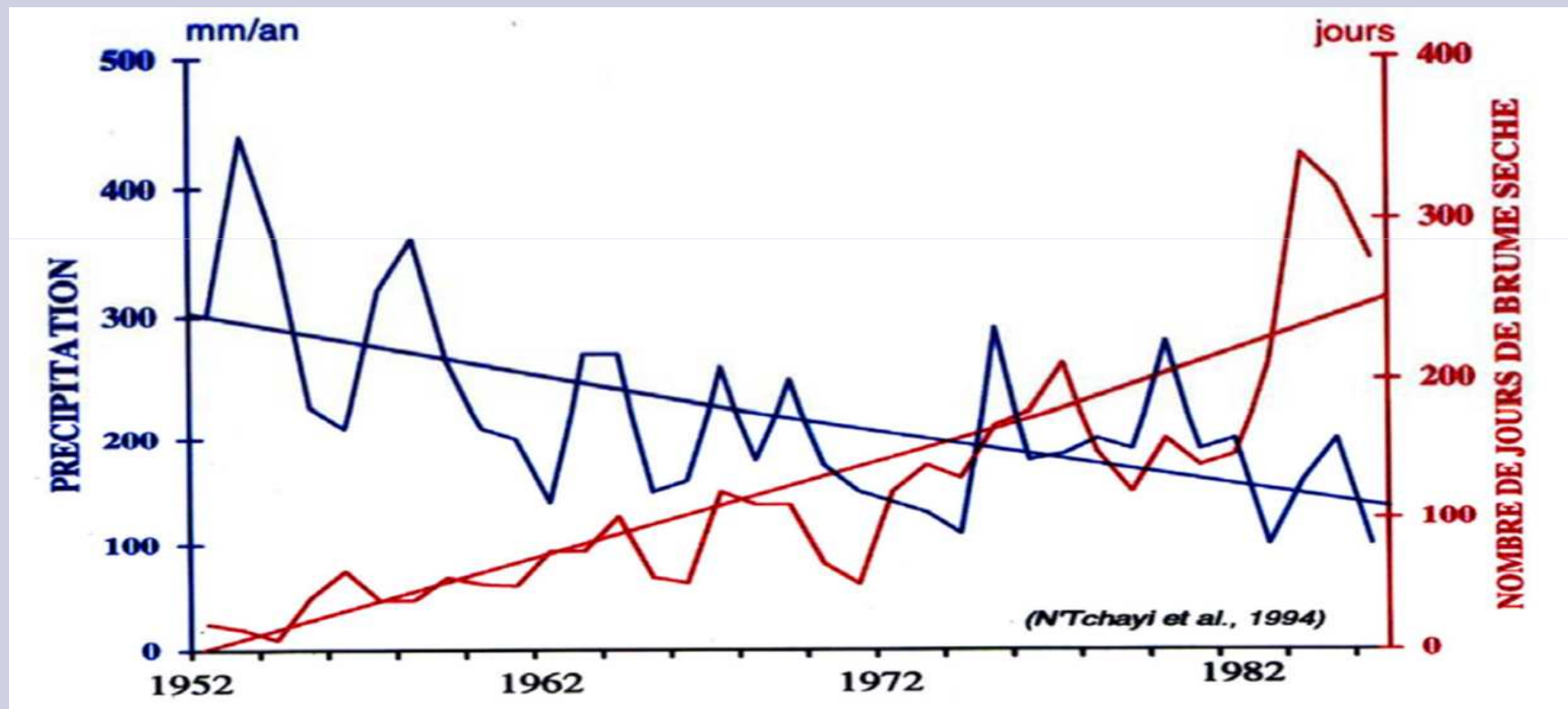
Impact radiatif des aérosols désertiques

???

Le climat en Afrique de l'Ouest

Système de mousson

Sécheresse en Afrique de l'Ouest durant les années 60s ↔ Augmentation de la charge en aérosols désertiques.

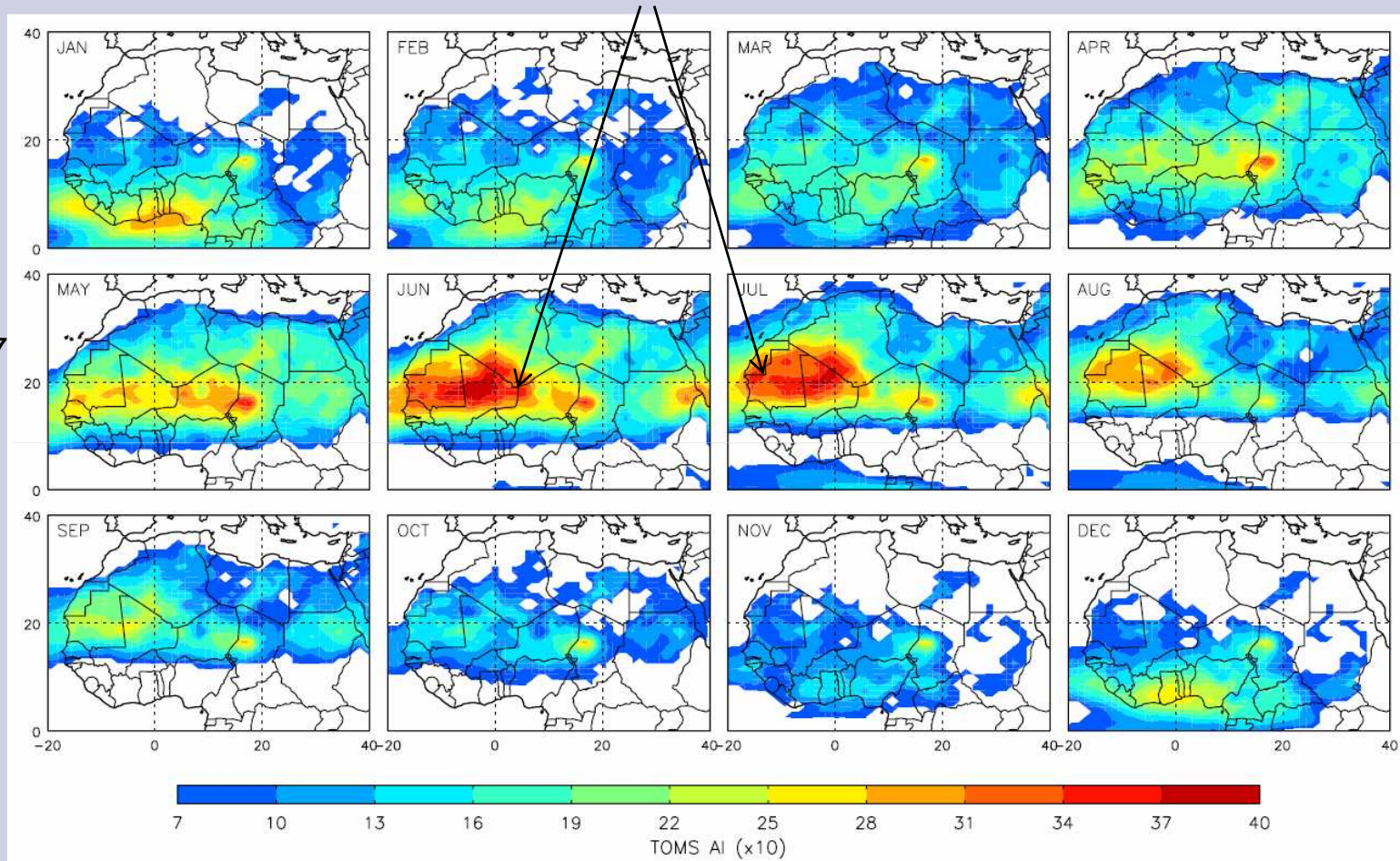


Les interactions aérosols désertiques/dynamique de la mousson en Afrique de l'Ouest??

→ Les facteurs météorologiques qui pilotent les soulèvements durant la saison de mousson.

En Afrique au nord de l'Equateur, les émissions d'aérosols minéraux présentent un cycle annuel bien marqué avec **un maximum d'émissions durant la saison de mousson.**

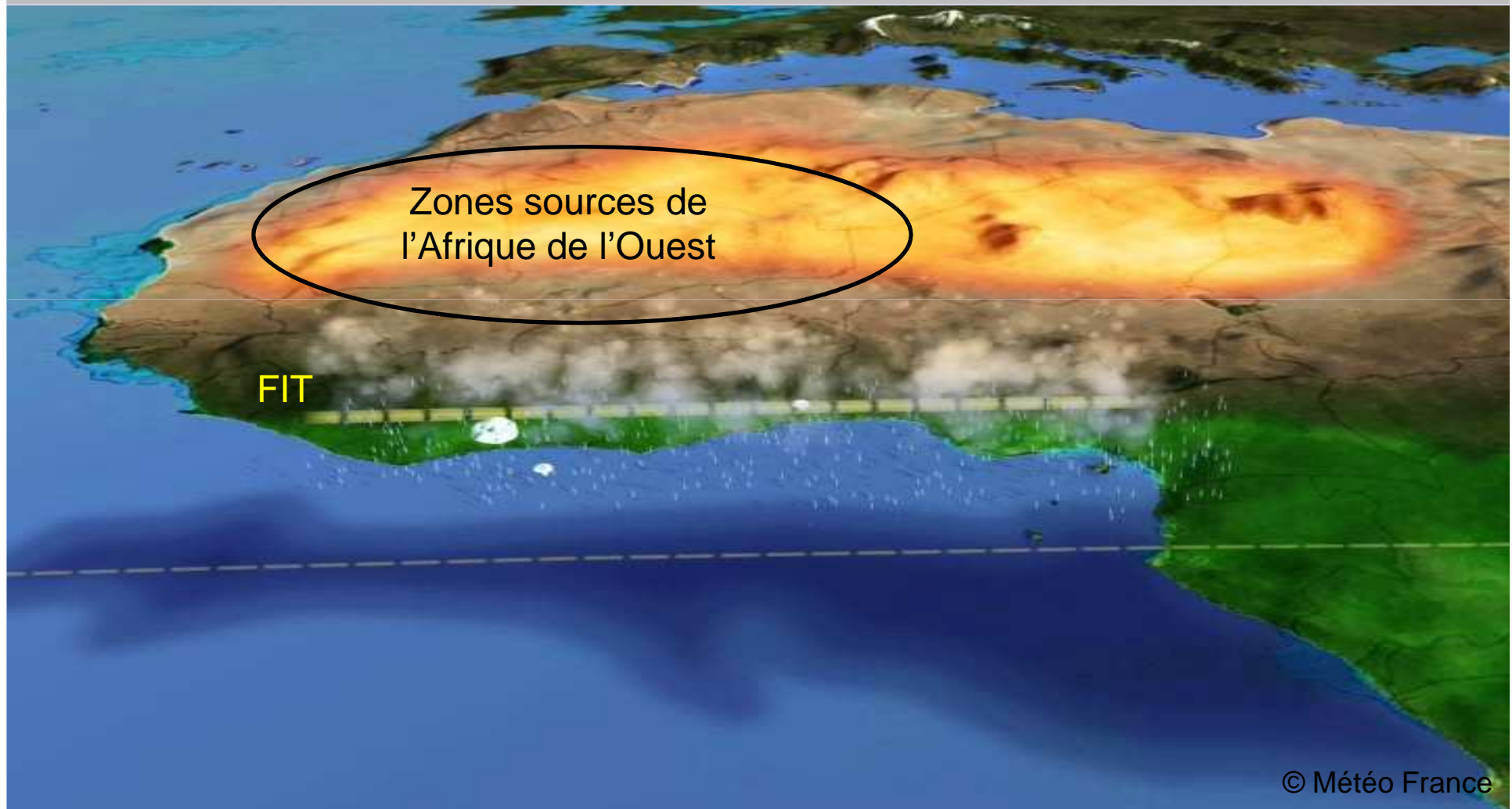
Engelstaedter
& Washington, 2007



Ce maximum correspond à **l'activation des zones sources situées en Afrique de l'Ouest** qui contrairement à des zones bien localisées comme Bodélé, **occupent une grande partie de l'Afrique de l'Ouest.**

L'activation des zones sources présentes en Afrique de l'Ouest (Engelstaedter & Washington, 2007):

- **Coïncidence** avec le déplacement annuel vers le nord du front intertropical (FIT),
- Liée à des événements de **forts vents à petite échelle (gustiness)**.



Cependant, la fréquence d'activation des zones sources en Afrique de l'Ouest reste **sousestimée de ~ 20%** par les modèles régionaux (e.g. Schepanski et al., 2009).

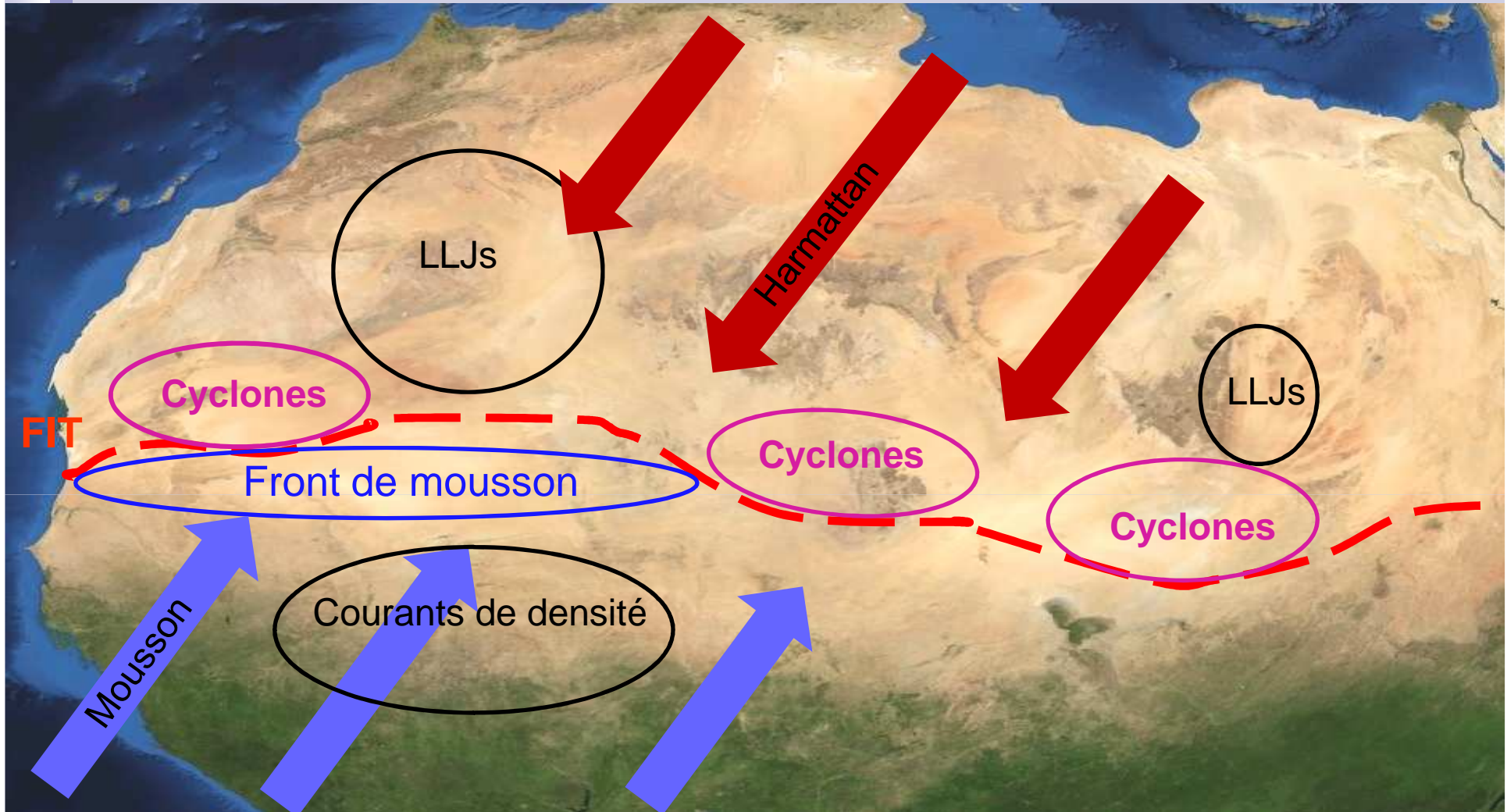
→ Ceci implique **un manque de connaissances** sur les mécanismes dynamiques impliqués dans les soulèvements en Afrique de l'Ouest durant la saison de mousson.

→ **Un manque de représentativité** de ces mécanismes dans les modèles régionaux.



✓ Besoin de comprendre **les processus à méso échelle** impliqués dans les soulèvements de poussières en Afrique de l'Ouest durant la saison de mousson,

✓ Besoin d'une meilleur représentation de ces mécanismes dans les modèles régionaux.

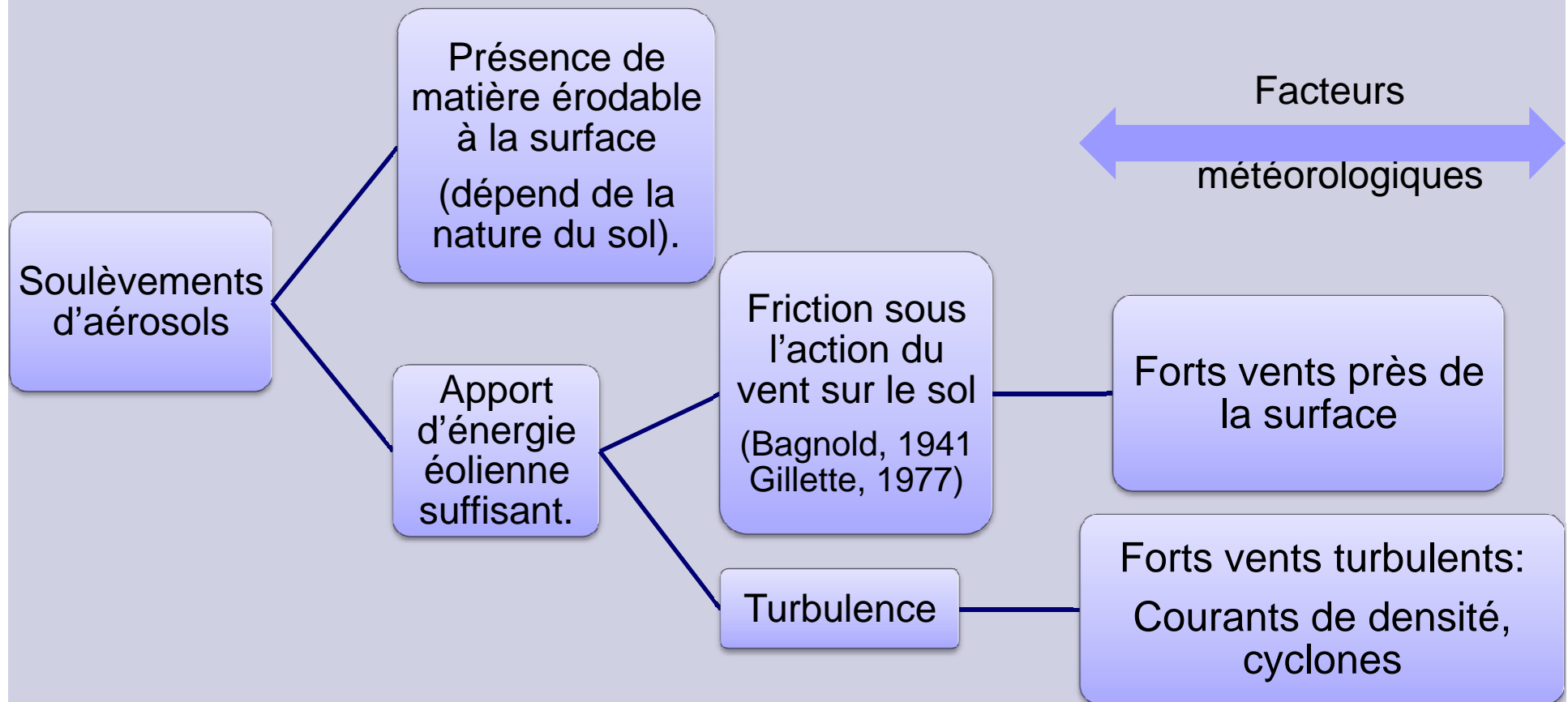


- ✓ Soulèvements d'aérosols associés au **front de mousson nocturne**,
- ✓ Soulèvements d'aérosols associés aux **cyclones sahéliens**.

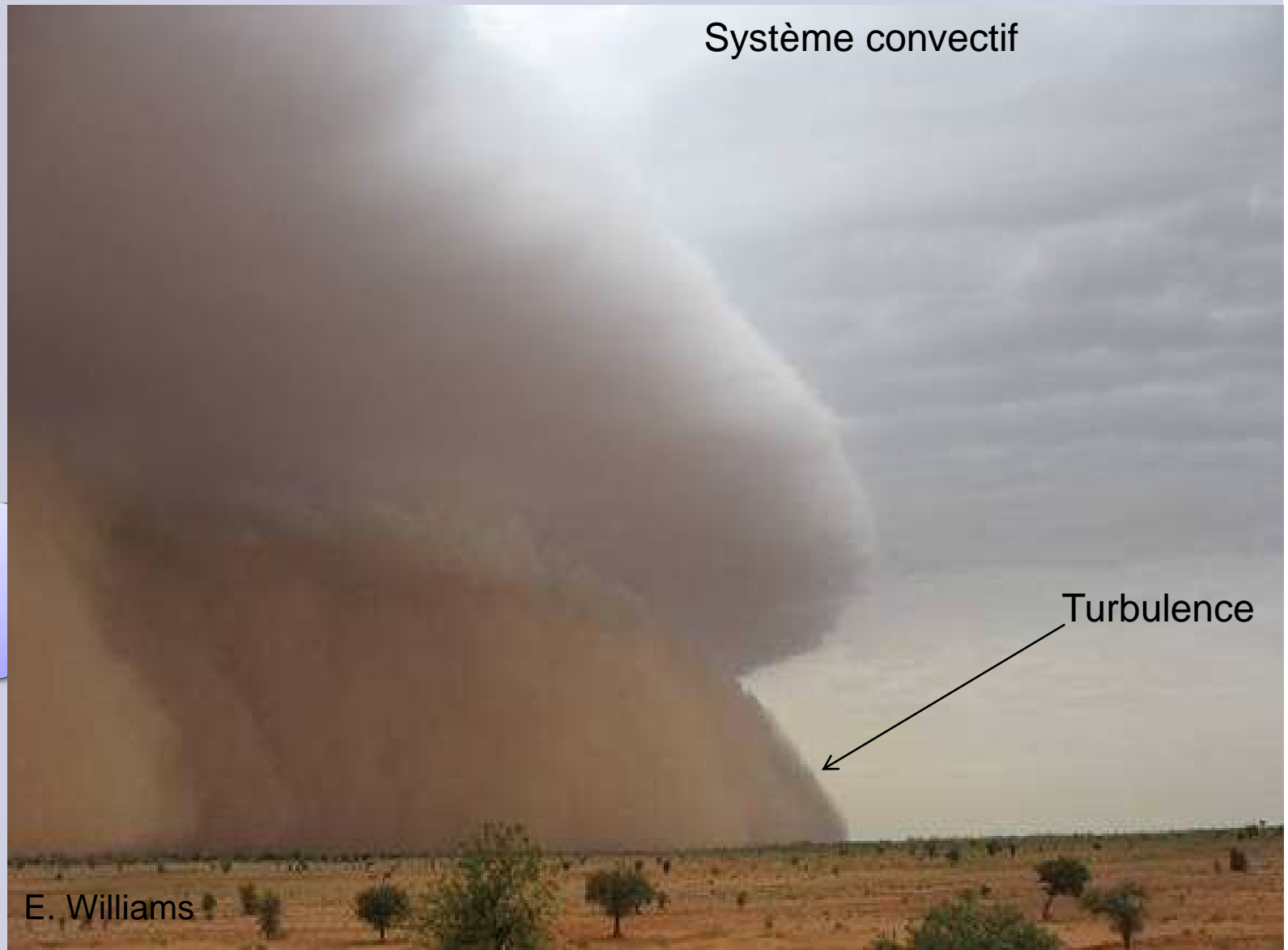
Comment les aérosols sont émis dans l'atmosphère?

Deux conditions:

- ✓ La présence de la matière érodable à la surface,
- ✓ Apport d'énergie éolienne suffisant pour vaincre les forces de cohésion interparticulaires.



Comment les aérosols sont émis dans l'atmosphère?



Systeme convectif

Soulèvements
d'aérosols

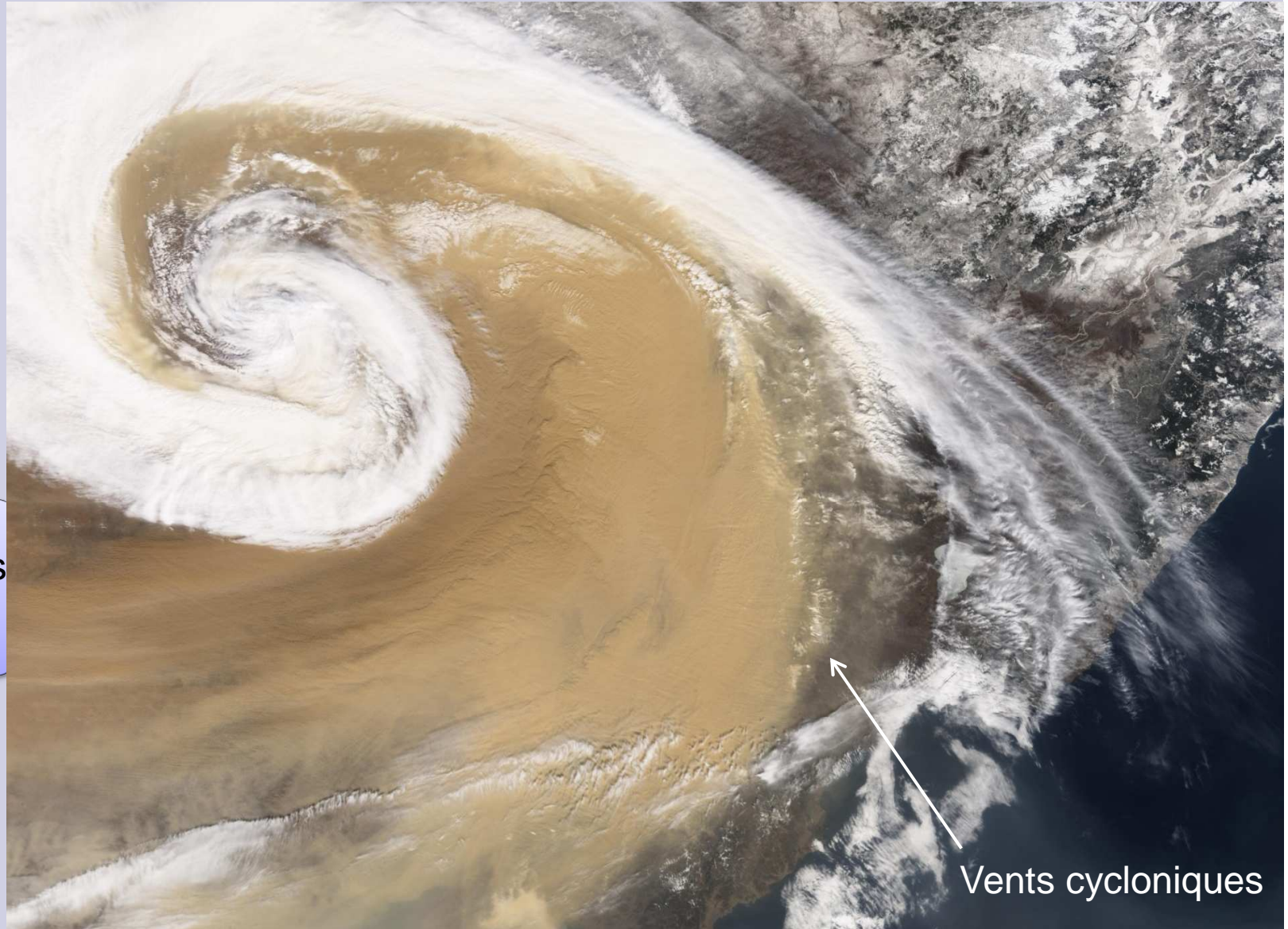
Turbulence

E. Williams

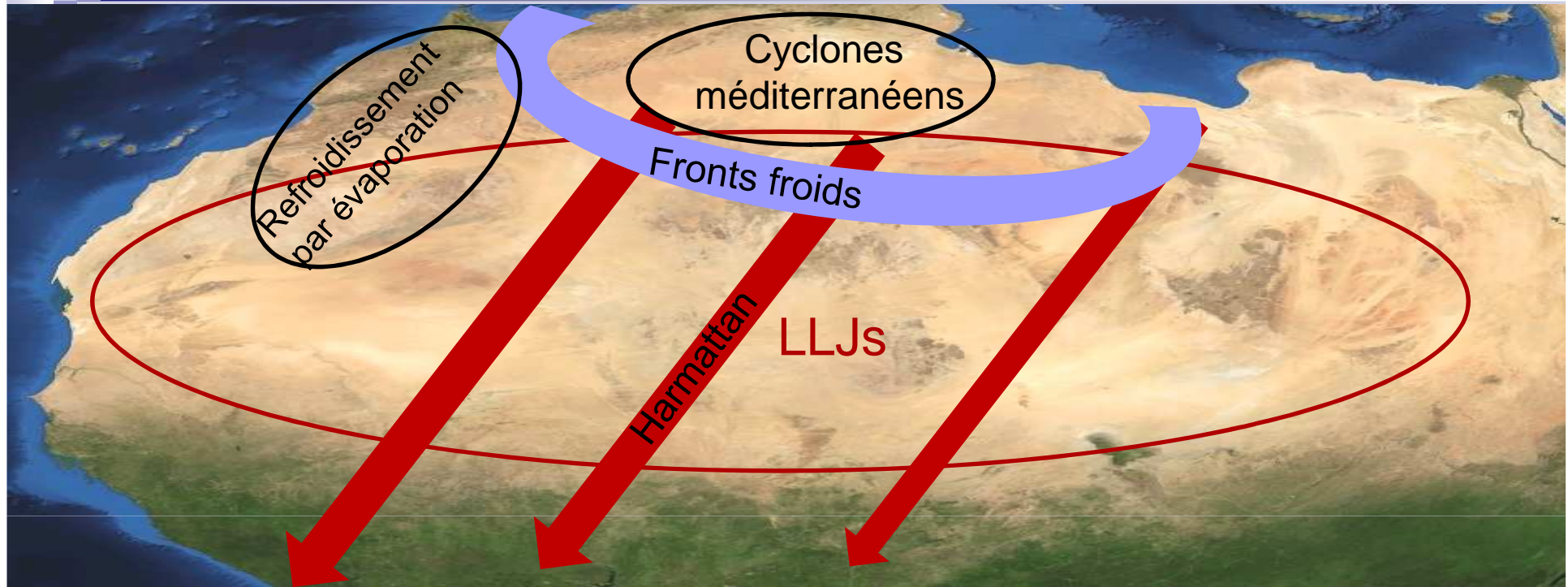
Courants de densité

Comment les aérosols sont émis dans l'atmosphère?

Soulèvements
d'aérosols



Vents cycloniques
cyclones

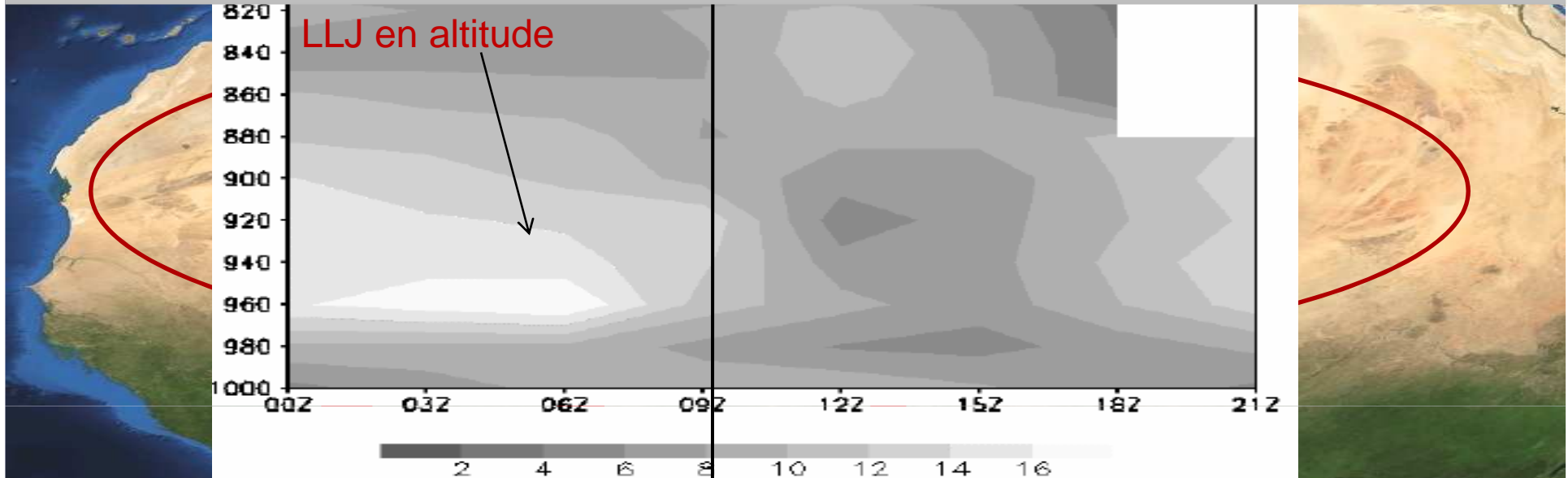


➤ Mécanismes connus ou compris depuis peu:

- 1- Soulèvements liés aux LLJs (Todd et al., 2007; Bouet et al., 2007).
- 2- Soulèvements liés au refroidissement par évaporation le long d'un nuage précipitant (Knippertz et al., 2007).
- 3- Soulèvements liés au passage de fronts froids (Knippertz et Fink, 2006; Tulet et al., 2008).
- 4- Soulèvements liés aux cyclones méditerranéens (Barkan et al., 2005).

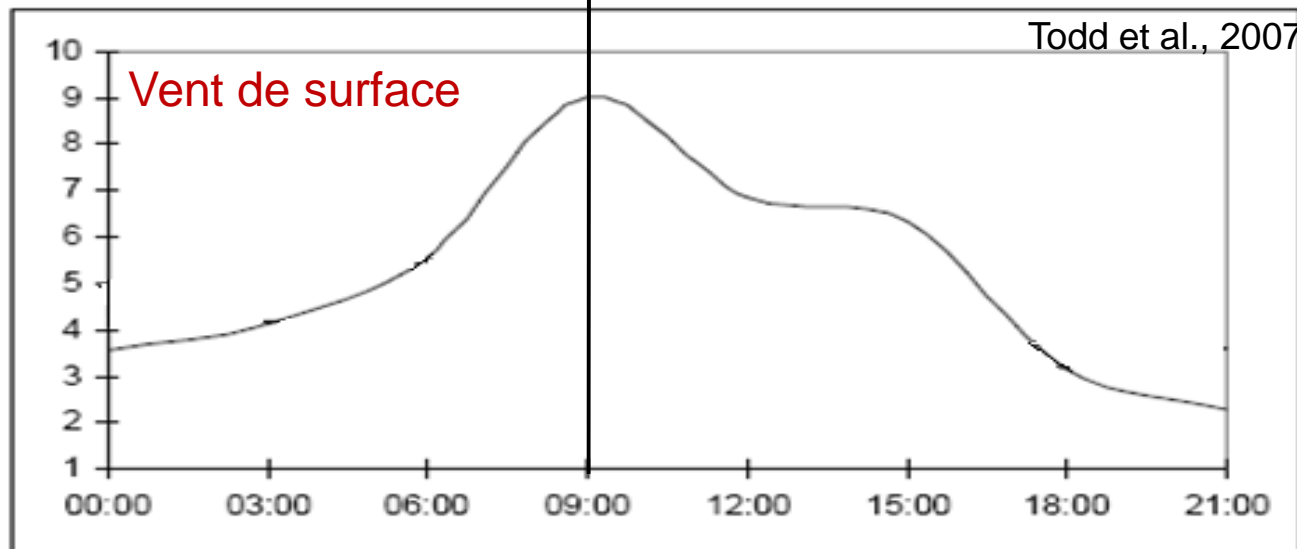
Etat des connaissances: Saison sèche

Levé du soleil → Chauffage au sol → Mélange turbulent → Fort vents initialement en altitude sont ramenés près de la surface

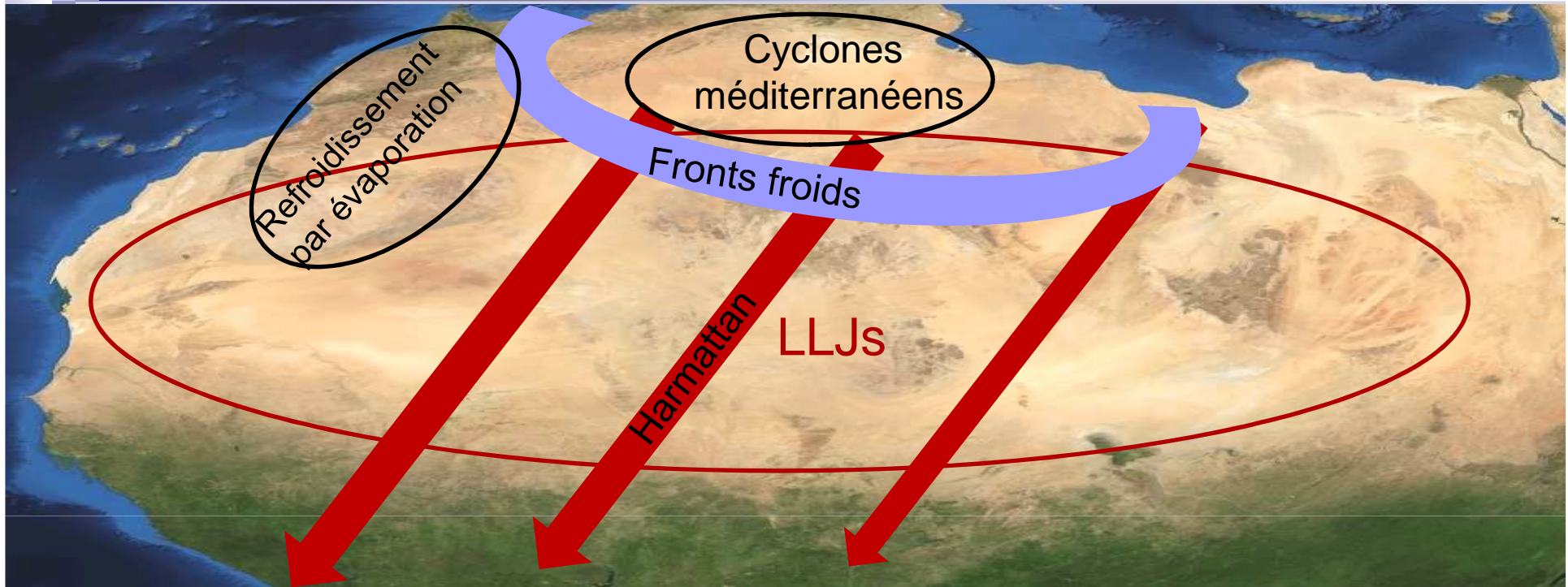


➤ Mécan

- 1- Soulèvement
- 2- Soulèvement et al., 2007).
- 3- Soulèvement
- 4- Soulèvement



ant (Knippertz
al., 2008).



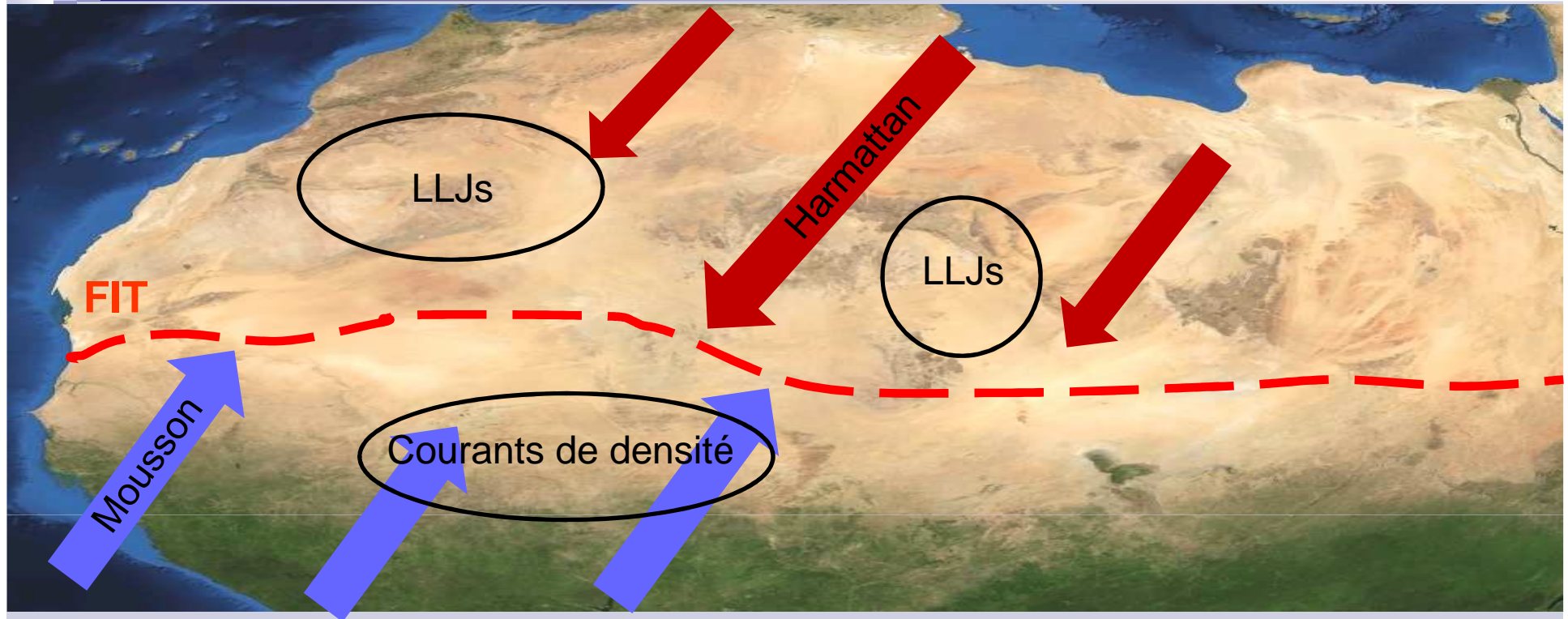
➤ Mécanismes connus ou compris depuis peu:

1- Soulèvements liés aux LLJs (Todd et al., 2007; Bouet et al., 2007).

2- Soulèvements liés au refroidissement par évaporation le long d'un nuage précipitant (Knippertz et al., 2007).

3- Soulèvements liés au passage de fronts froids (Knippertz et Fink, 2006; Tulet et al., 2008).

4- Soulèvements liés aux cyclones méditerranéens (Barkan et al., 2005).



➤ Mécanismes connus ou compris depuis peu:

1- Soulèvements liés aux LLJs (Knippertz, 2008; Schepanski et al., 2009).

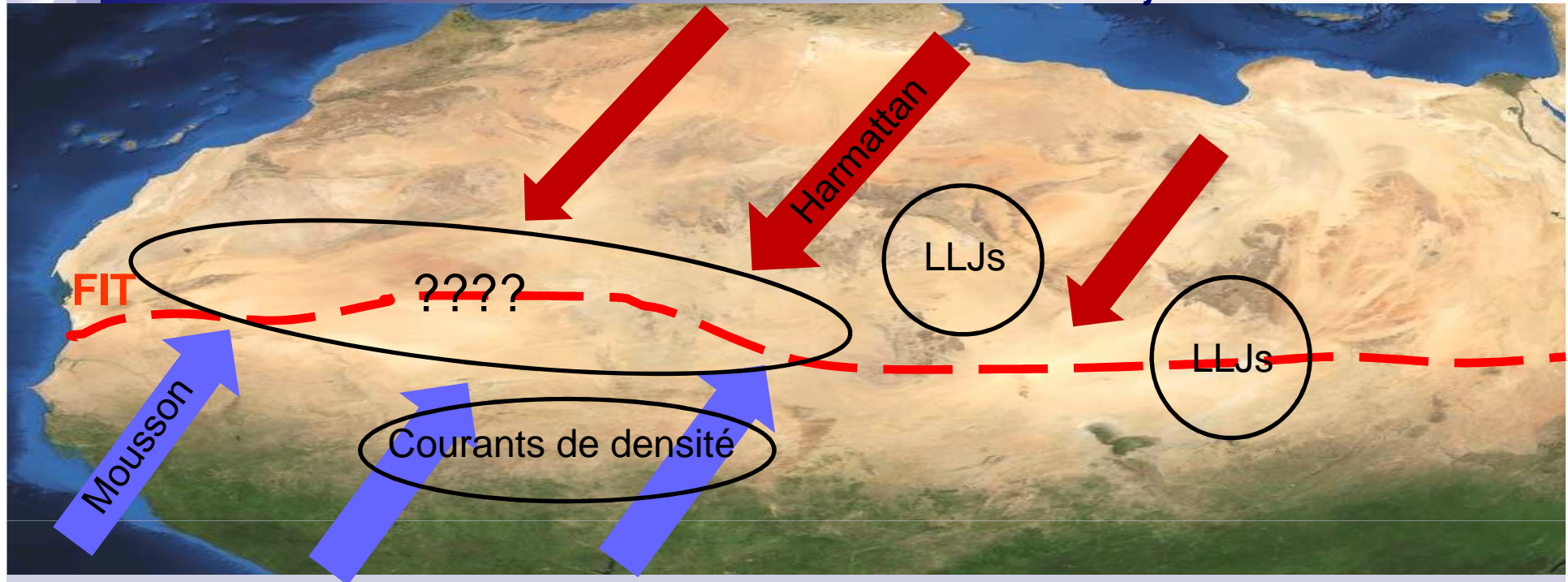
2- Soulèvements liés aux courants de densité émanants des systèmes convectifs (e.g. Formenti et al., 2007; Flamant et al., 2007).



1- S

Francoise Guichard & Laurent Kergoat © CNRS

2- Soulèvements liés aux courants de densité émanants des systèmes convectifs (e.g. Formenti et al., 2007; Flamant et al., 2007).



Quels sont les mécanismes qui pilotent les soulèvements en Afrique de l'Ouest région dans laquelle les soulèvements sont maximums en été??

- 1- **Identifier** des processus à méso échelle impliqués dans les soulèvements de poussières en Afrique de l'Ouest durant la saison de mousson,
- 2- **Simuler** les mécanismes identifiés à l'aide du modèle MesoNH,
- 3- **Quantifier** les soulèvements associés à chaque mécanisme.

1- Analyser des processus dynamiques à méso échelle à partir d'observations.

2- Approche couplée observations / modélisation en 3D:

- Valider la simulation avec les observations (et/ ou les analyses) disponibles,
- Etendre spatio-temporellement les observations dans le cas où la simulation est valide,
- Contraindre le modèle dans le cas contraire.



Cas d'étude possédant un maximum d'observations: **BoDEx 2005 et AMMA/SOP 2006.**

Cas d'étude	Observations	Analyses	Modélisation
BoDEx: 1-13 Mars 2005 (Todd et al., 2008)	Mesures sol: Chicha Spatiales: MODIS & OMI	ECMWF (CEP)	MesoNH + Code aérosols (Tulet et al., 2005) (Grini et al., 2006)
AMMA/SOP: ➤ 7 Juillet 2006 ➤ 1-13 Juillet 2006	Aéroportées: - 2 Lidars LEANDRE2 et WIND - Dropsondes Mesures sol: Banizoumbou & Niamey Spatiales: CALIPSO, SEVIRI, MODIS (Deep blue).		

→ **Un choix** de certains outils d'observations s'est imposé (parmi les nombreux moyens disponibles) avec la prise en compte de **3 facteurs essentiels**:

- 1- Observations à résolution spatiale et temporelle suffisantes pour cerner **le caractère sporadique** des émissions et du transport des aérosols désertiques.
- 2- Couverture spatiale et temporelle suffisantes pour l'étude de la zone visée et pour la **validation des simulations 3D**.
- 3- L'accès à la dimension verticale pour la caractérisation de **la distribution verticale** des panaches d'aérosols et de la dynamique de la couche limite.

- **Lidar Doppler aéroporté: WIND** (e.g. Werner et al., 2001, Reitebuch et al., 2001)
 - ✓ Opère avec un signal laser de 10.6 μm .

- **Lidar aéroporté: LEANDRE 2** (Bruneau et al., 2001)
 - ✓ La distribution verticale de l'équivalent de la concentration en aérosols désertiques près des zones sources,
 - ✓ La restitution du signal laser à 732nm rétrodiffusé par les cibles hydrophobes (Flamant et al., 2007).

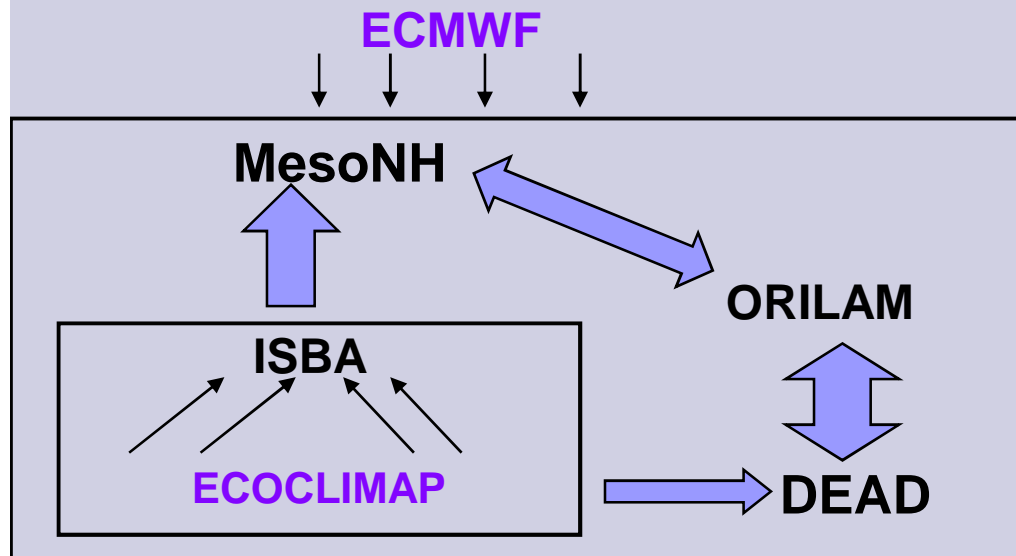
- **MSG-SEVIRI:**
 - ✓ Combinaison des températures de brillance dans les canaux IR: 10.8 μm , 12 μm et 8.7 μm → Les aérosols désertiques apparaissent en rose ou violet,
 - ✓ Importante résolution temporelle (1 image/15 min),
 - ✓ Couverture spatiale adaptée à l'étude de l'Afrique de l'Ouest.

- **CALIPSO:**
 - ✓ Lidar spatial à deux signaux laser 532nm et 1064nm,
 - ✓ Accès à la structure verticale des panaches d'aérosols.

- **MODIS (Deep blue):** Pour les épaisseurs optiques des aérosols désertiques au-dessus du désert (Hsu et al., 1999).

Le Model MesoNH:

- Développé conjointement par Météo France et le Laboratoire d'Aérodologie (Lafore et al., 1996),
- La production des aérosols désertiques:
 - **DEAD** ("Dust Entrainment And Deposition", Zender et al., 2003),
 - ✓ intégré dans MesoNH (Grini et al., 2006),
 - ✓ basé sur Marticorena et Bergametti, (1995).
- Les schémas d'advection et de déposition sèche et humide se font via le module **ORILAM** de MesoNH (Tulet et al., 2005).



MesoNH: Tous ses modules interagissent en ligne → Etudes d'impact radiatif.

- Initialiser le modèle MesoNH et caractériser l'écoulement à l'échelle synoptique
 - Les analyses du centre européen (ECMWF).

I- Introduction

II- Soulèvements associés au front de mousson:

- a- Caractéristiques thermodynamique de la couche limite dans la région du FIT
- b- Description du mécanisme identifié.

III- Simulation du mécanisme identifié:

- a- Evaluation de sa représentativité par le modèle MesoNH
- b- Quantification des soulèvements dans la région du FIT

IV- La formation de cyclones dans la région du FIT

- a- Description du mécanisme
- b- Implications sur les émissions d'aérosols désertiques
- c- Implications sur le transport vertical d'aérosols désertiques

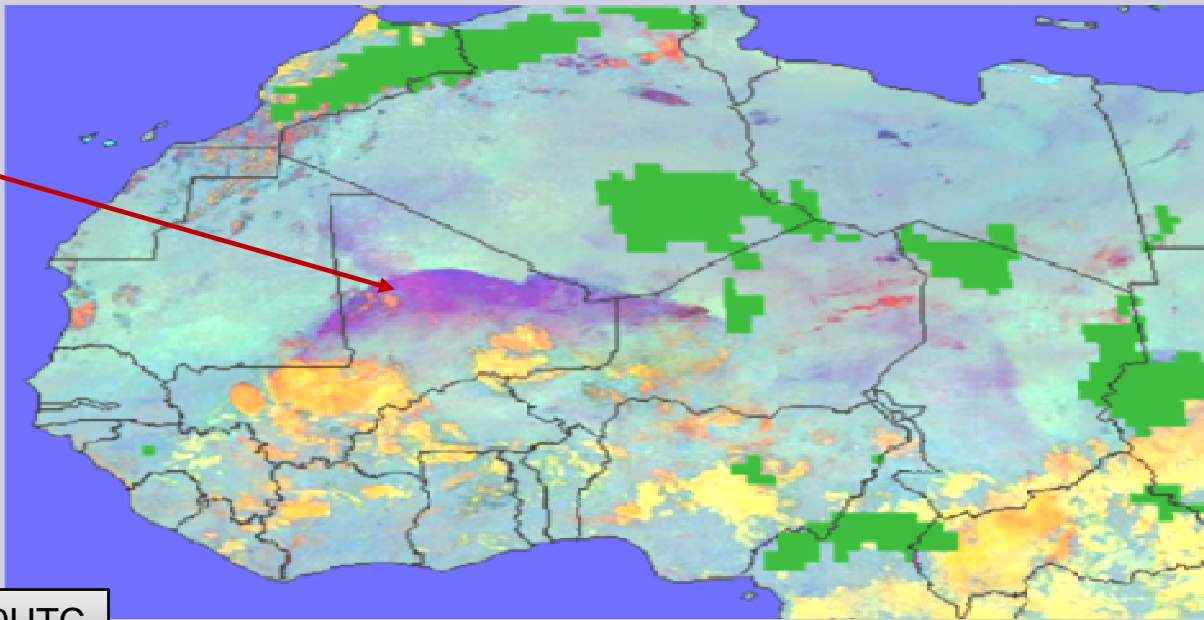
V- Conclusions

VI- Perspectives

VII- Remerciements

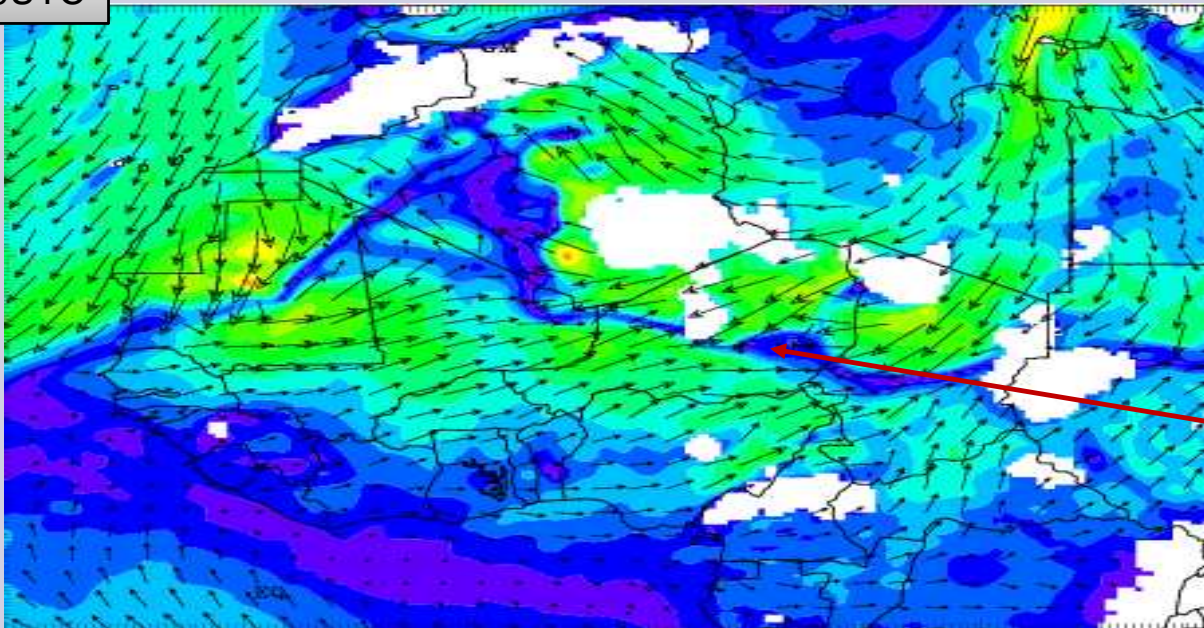
II- Soulèvements liés au front de mousson

Aérosols



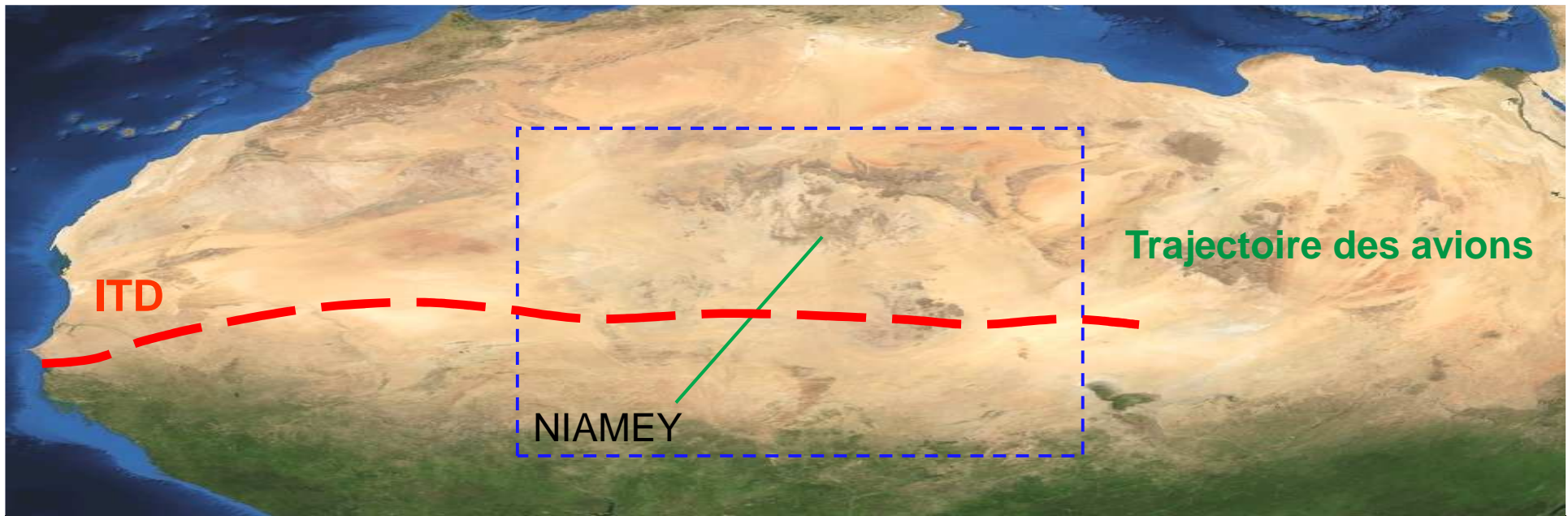
MSG-SEVIRI:
Image composite

10 Juillet 0600UTC



ECMWF:
Vitesse et direction
du vent à 925hPa

FIT



La mission du 7 Juillet 2006 durant la campagne AMMA /SOP2a1	SAFIRE Falcon 20	DLR Falcon 20
	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Lidar aéroporté LEANDRE 2 ➤ Système de dropsondes (AVAPS) 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Lidar Doppler aéroporté WIND



SAFIRE F20



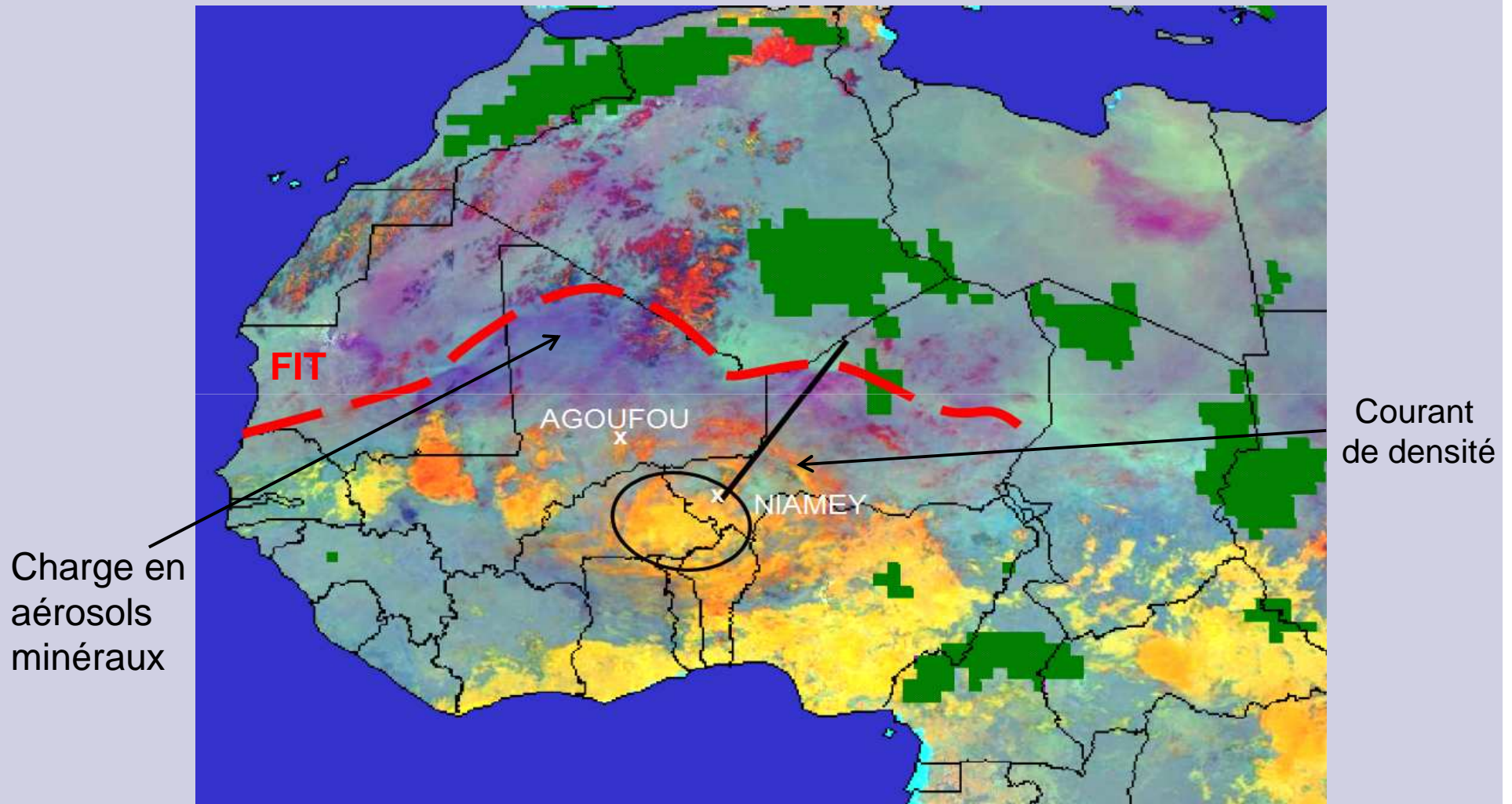
LEANDRE 2



Dropsonde operator

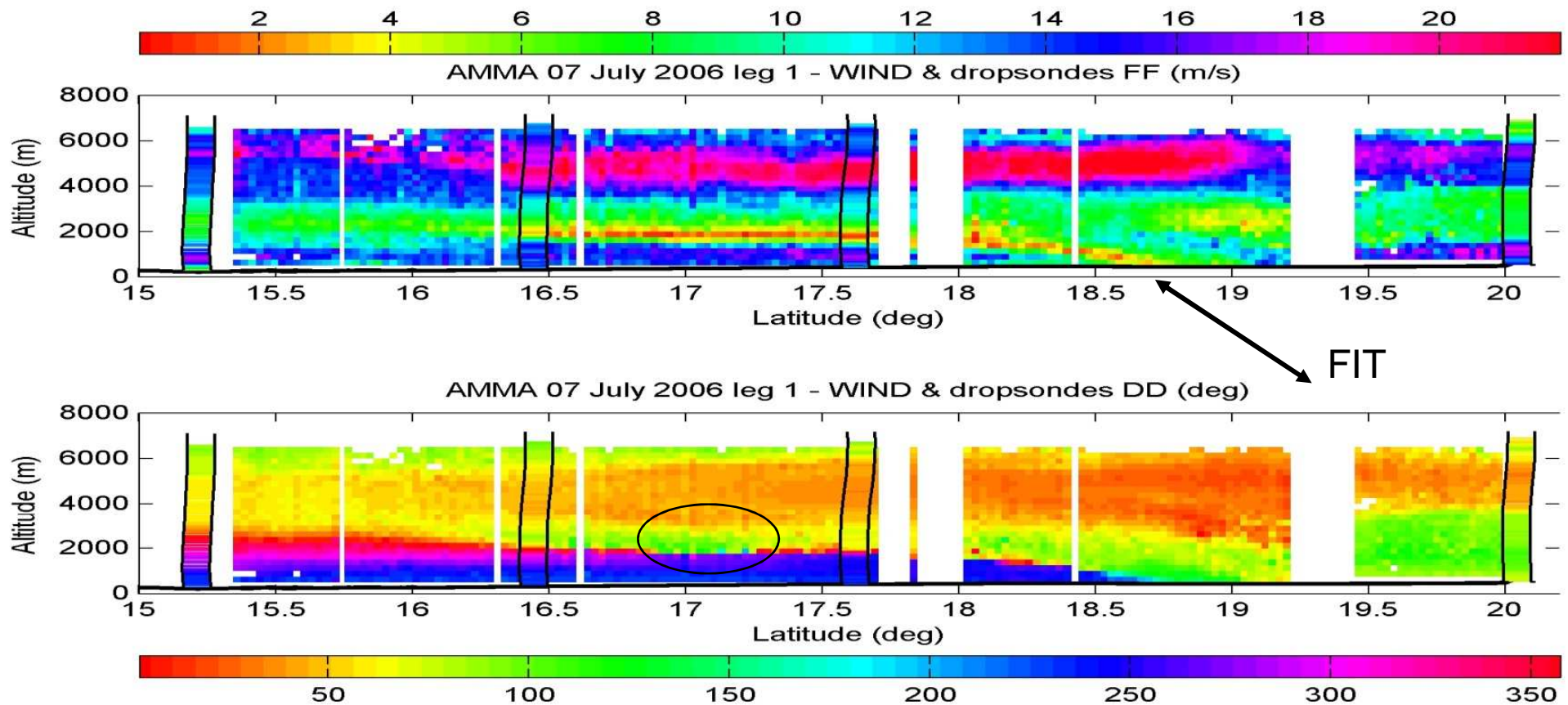
La charge en aérosols le 7 Juillet 2006

MSG-SEVIRI: Image composite sur laquelle les aérosols apparaissent en violet



Bou Karam et al., 2008

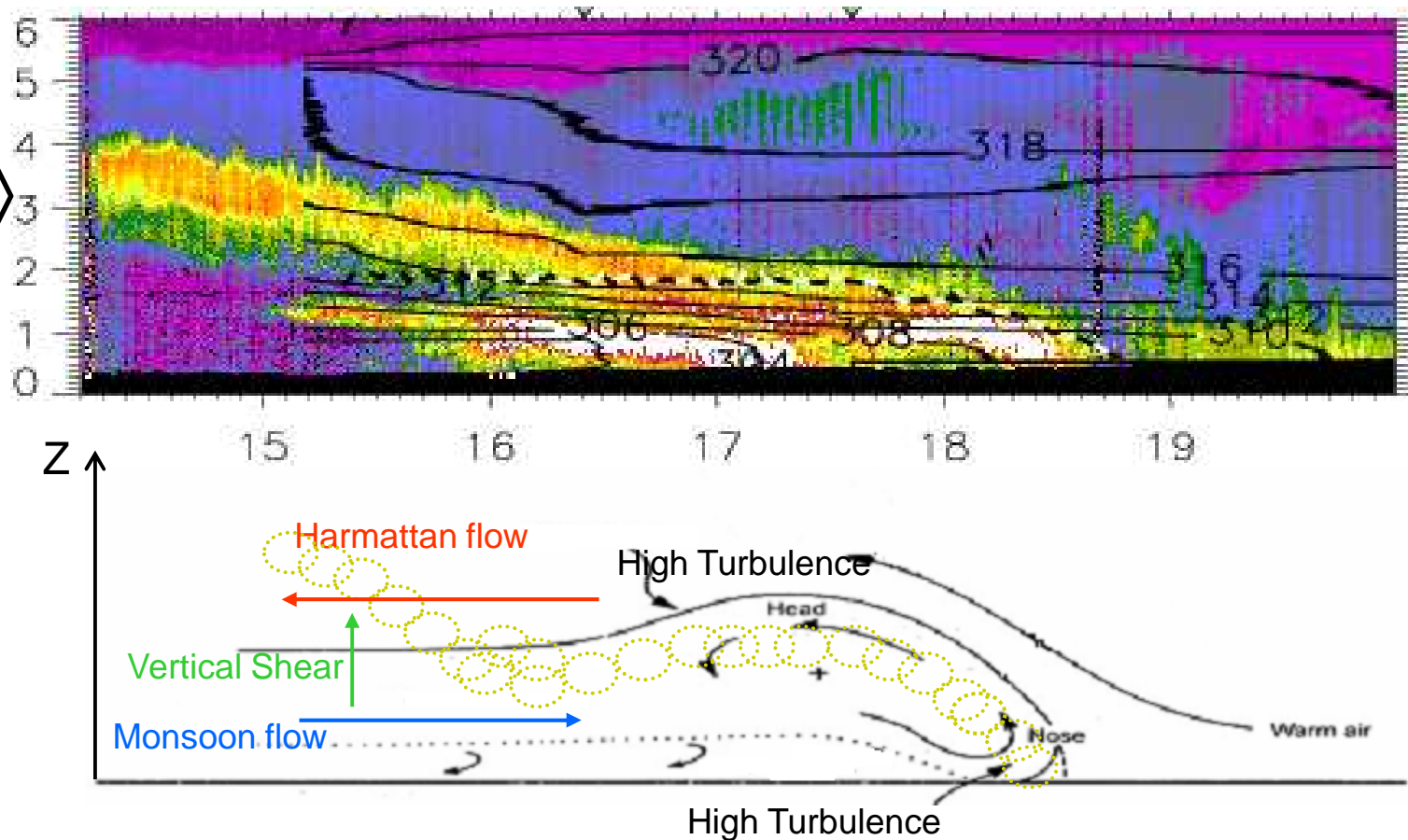
Mesures du Lidar Doppler WIND aéroporté



Flux de mousson durant la nuit / Caractéristiques d'un courant de densité	Valeurs théoriques (Koch et al., 1991)	Valeurs mesurées par le Lidar WIND et les dropsondes
Profondeur de la couche de mousson:	1480 m	1800 m
Vitesse de propagation du front:	9.8 m/s	10.5 m/s

Nota le fort cisaillement vertical entre les couches de mousson et d'Harmattan
 → Augmentation de la profondeur de la couche et de la vitesse de propagation

Forte
réflectivité
=
Contenu élevé
en aérosols

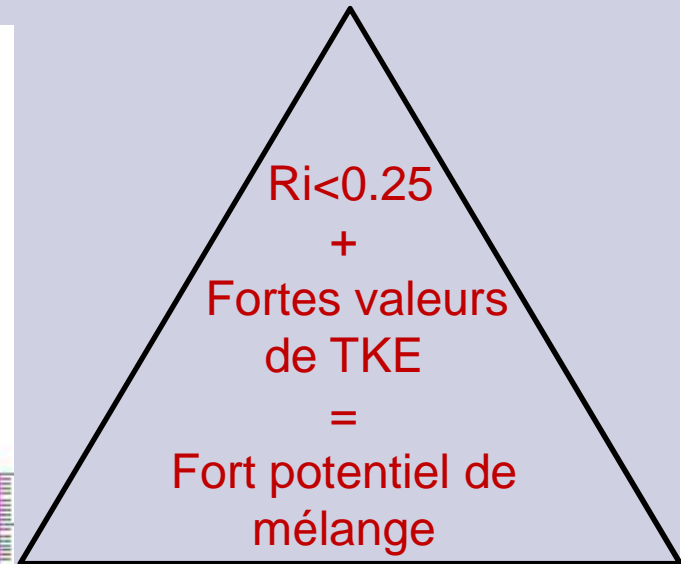
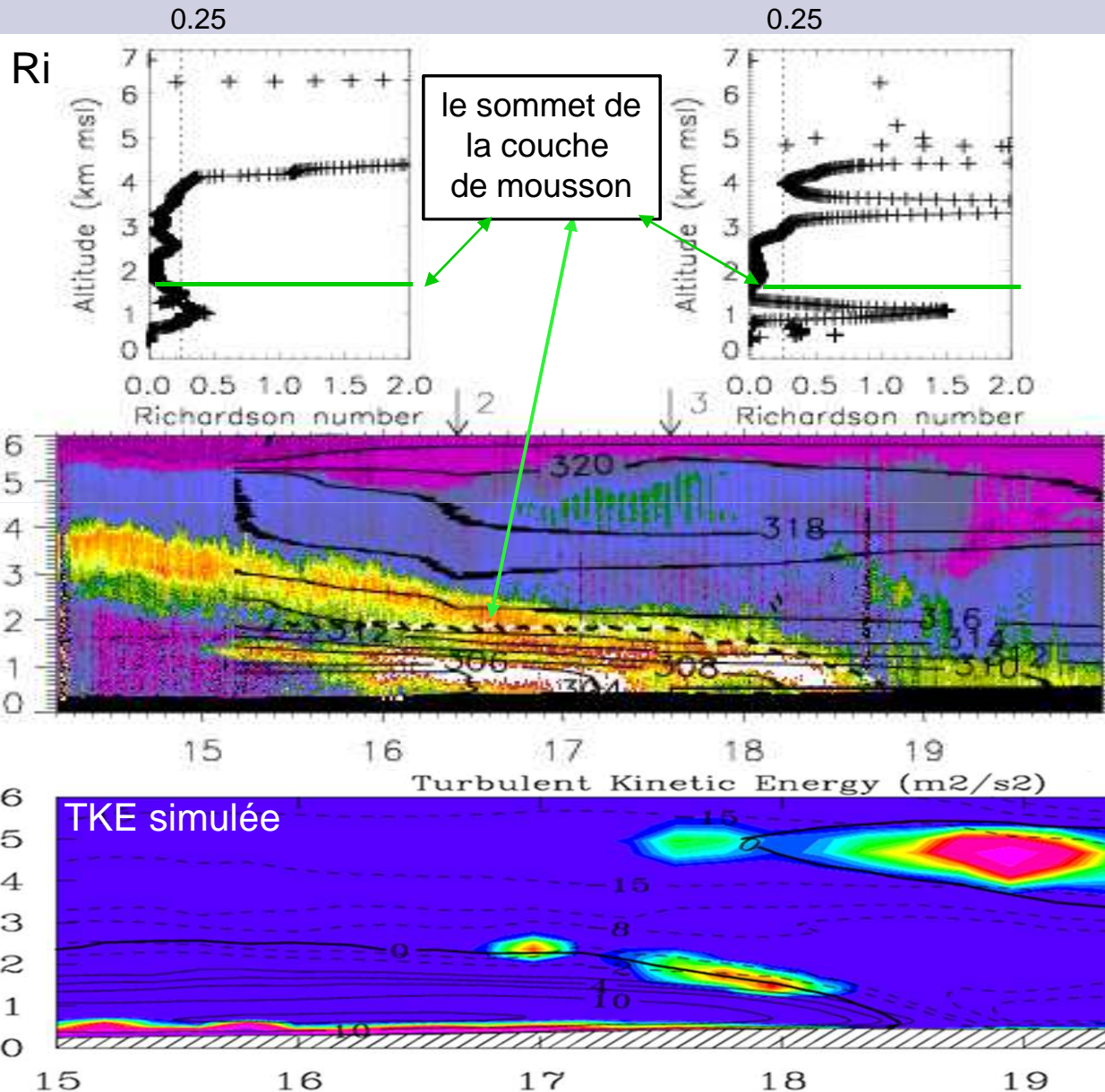


Mécanismes impliqués:

- Mobilisation des poussières dans la couche de mousson par des forts vents turbulents au niveau du nez de la mousson,
- Transport dans la couche de mousson par la circulation fermée,
- Transport vertical à travers les isentropes → Exportation des poussières hors de la couche de mousson et transport dans l'Harmattan.

Transport vertical à travers les isentropes

Profils du nombre de Richardson (Ri) calculés à partir des mesures dropsondes



Transport vertical des
aérosols à travers les
isentropes favorisé par la
turbulence générée par le
cisaillement vertical

I- Introduction

II- Soulèvements associés au front de mousson

- a- Caractéristiques thermodynamique de la couche limite dans la région de l'ITD
- b- Description du mécanisme identifié.

III- Simulation du mécanisme identifié

- a- Evaluation de sa représentativité par le modèle MesoNH
- b- Quantification des soulèvements dans la région de l'ITD

IV- La formation de cyclones dans la région de l'ITD

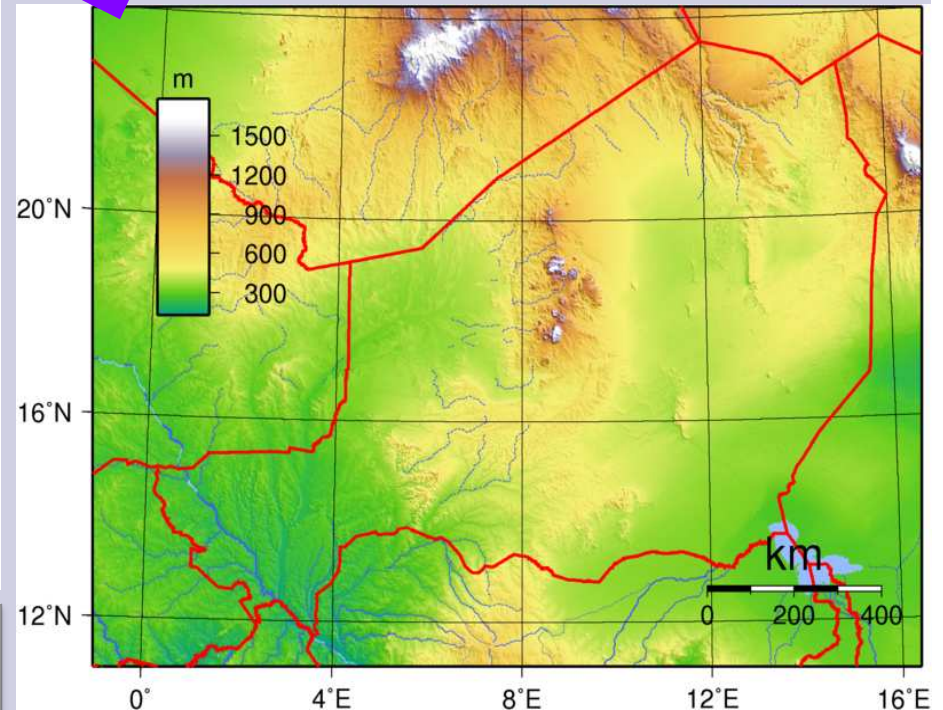
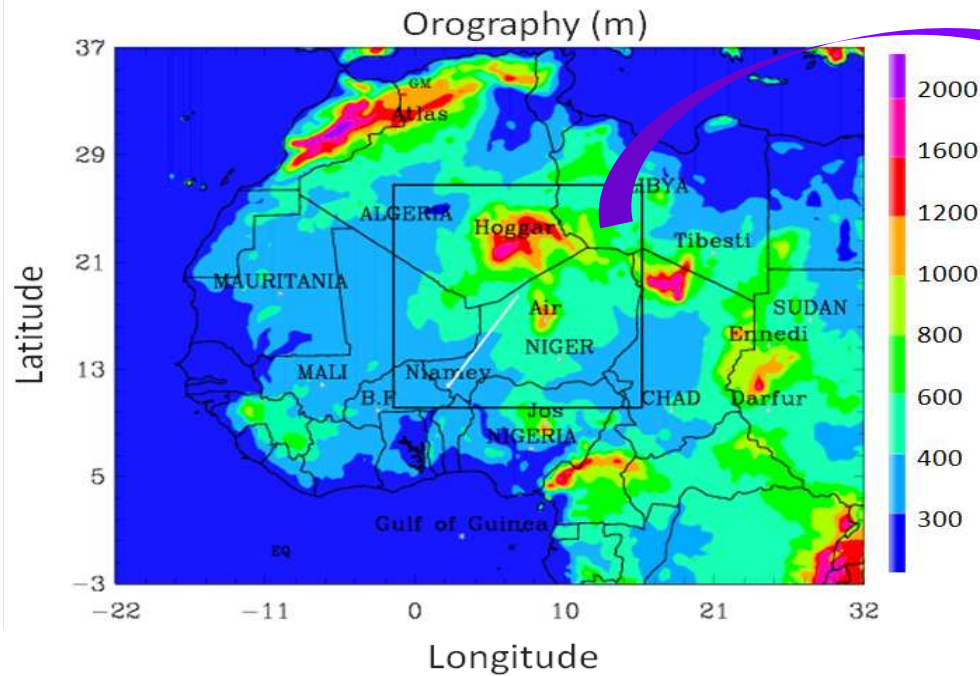
- a- Description du mécanisme
- b- Implications sur les émissions d'aérosols désertiques
- c- Implications sur le transport vertical d'aérosols désertiques

V- Conclusions

VI- Perspectives

VII- Remerciements

III- Simulation du mécanisme identifié



La simulation:

- Période simulée: 1-13 Juillet 2006

- 1 domaine centré à 7° E, 20° N:

Résolution horizontale: 20km 100x100 points
Résolution verticale: 62 niveaux, le premier à 30m.

- Conditions initiales: analyses ECMWF

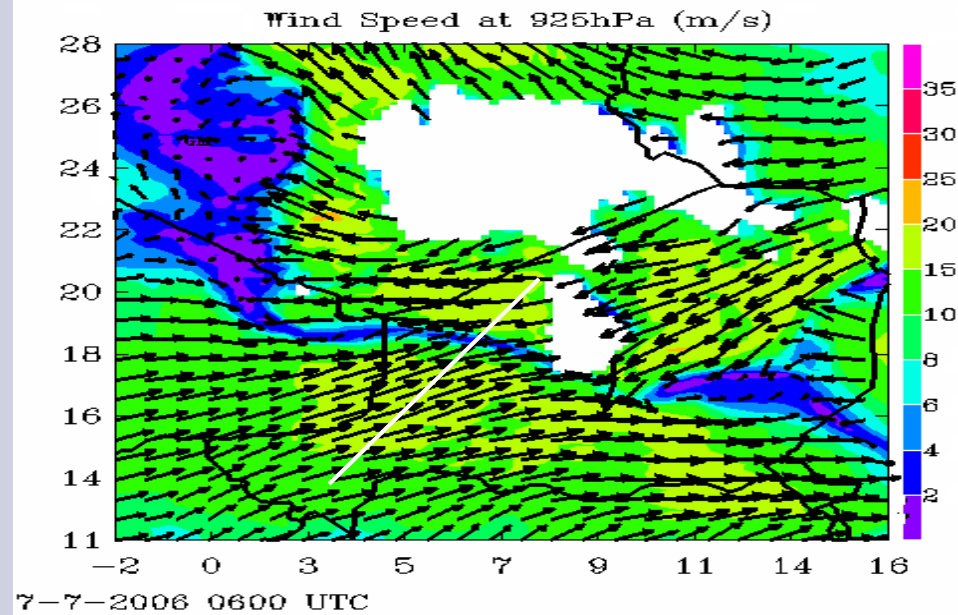
Validation de la simulation:

✓ Sur les 10 jours et

✓ D'une manière détaillée le 7 Juillet 2006

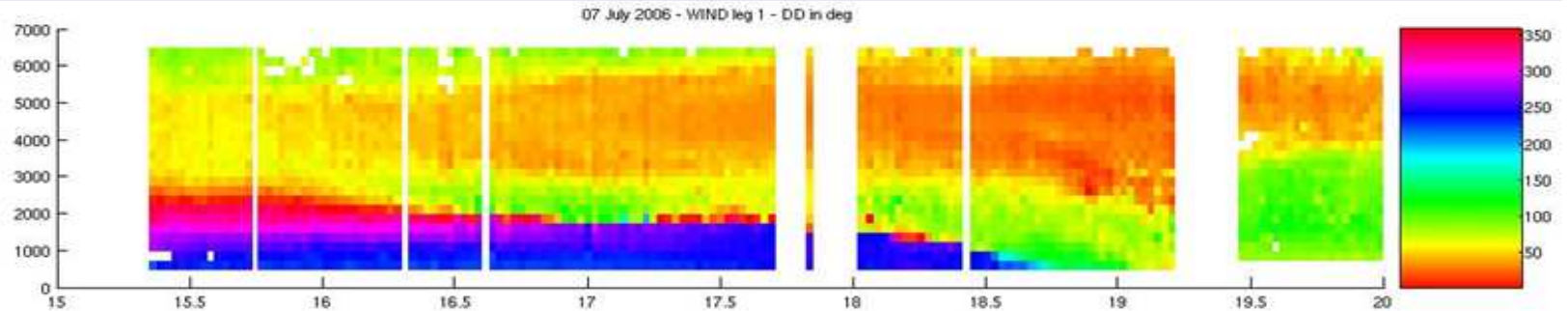
III. a - Validation de la simulation

Vitesse du vent simulée à 925hPa

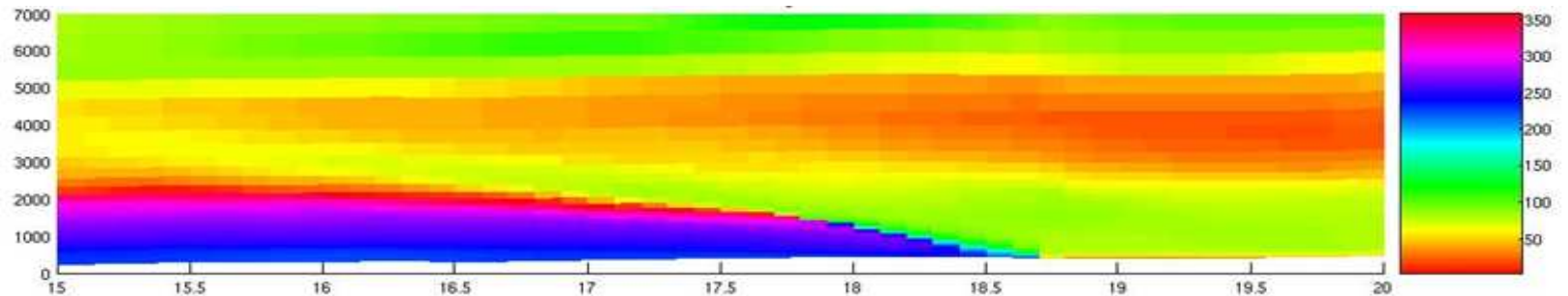


Direction du vent

Observations Lidar

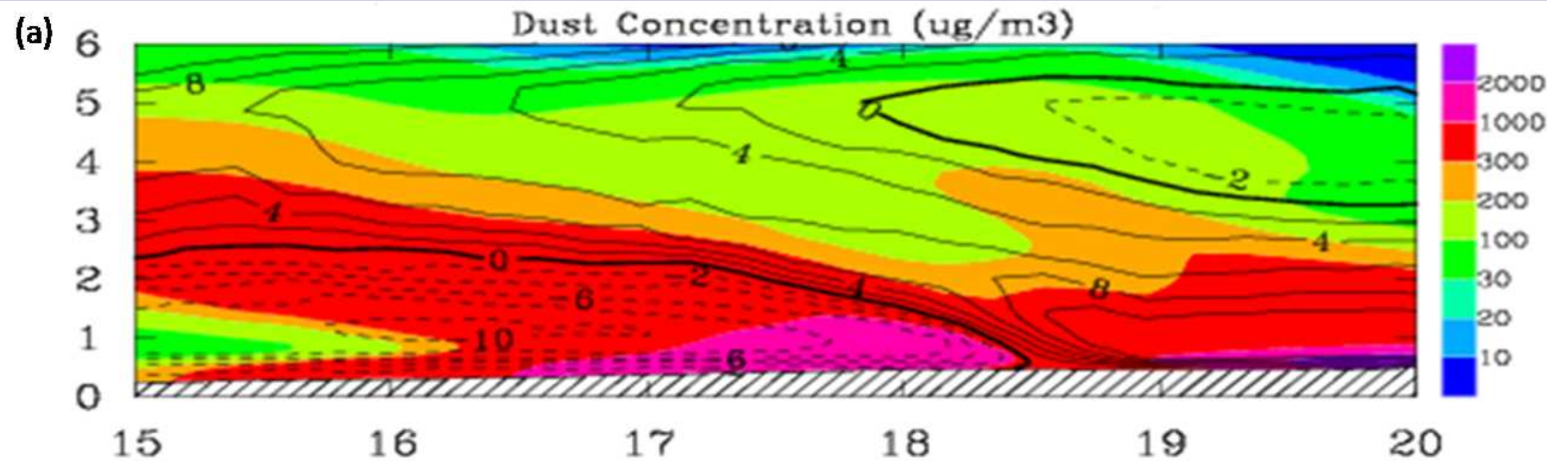


Simulation MesoNH

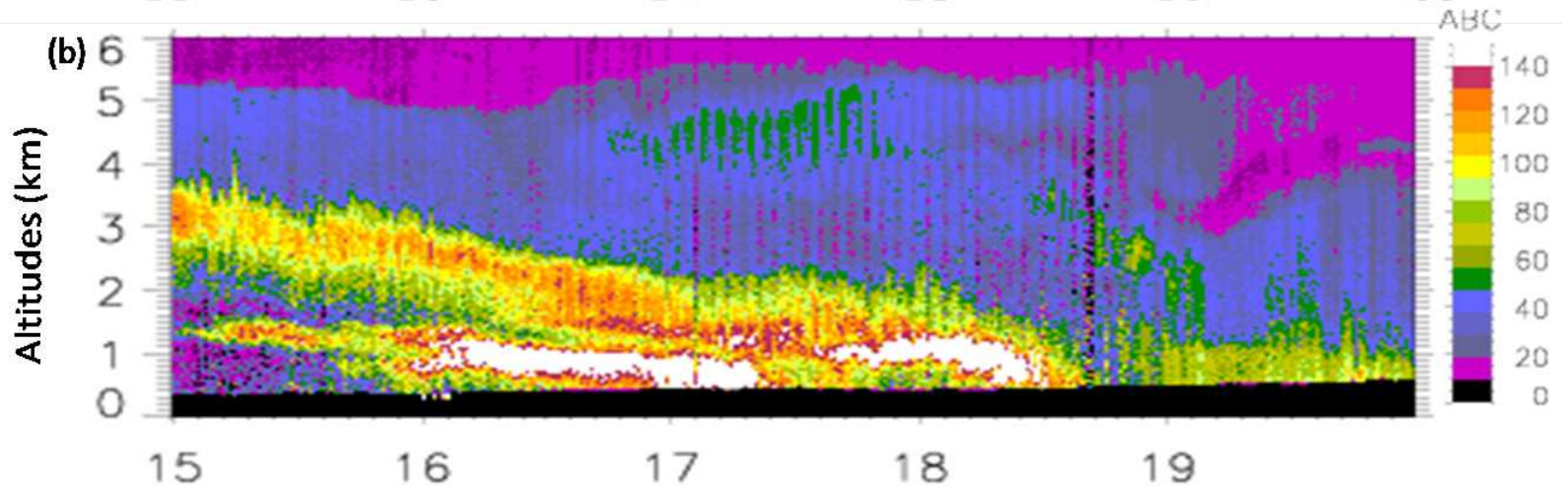


III. a- Validation de la simulation

Concentration
en aérosol
simulée par
MesoNH



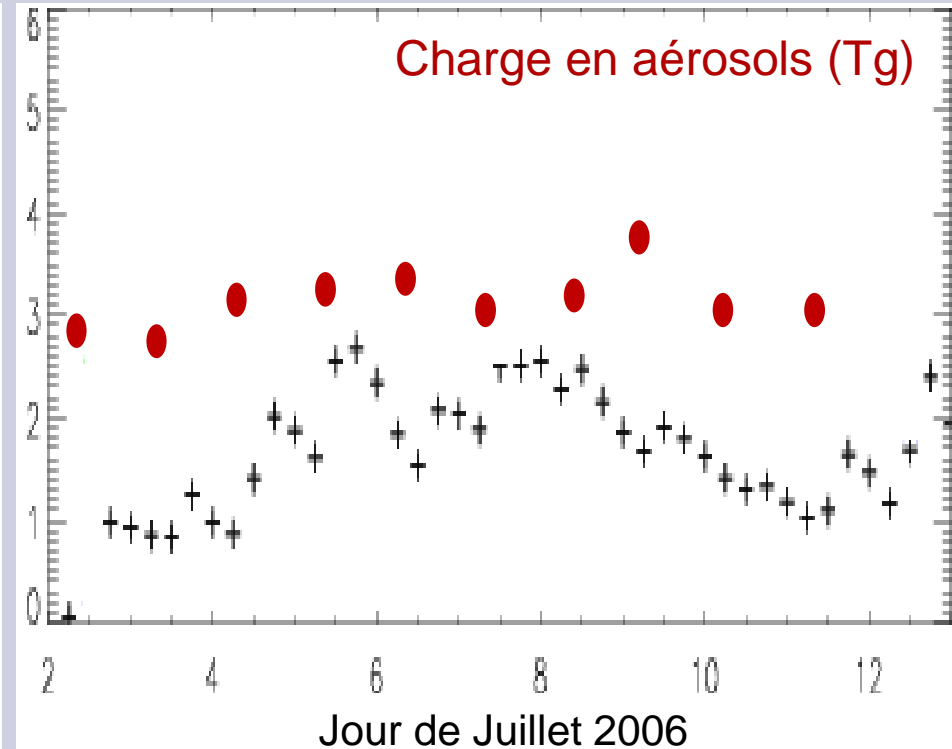
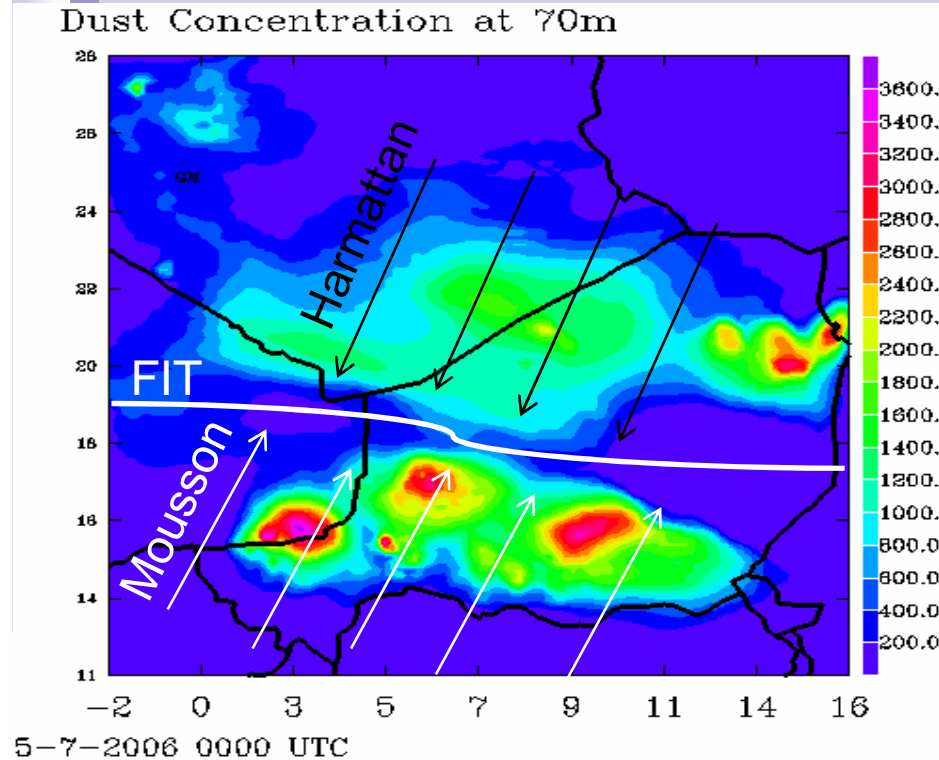
Observations
Lidar



Bou Karam et al., soumis au JGR

Latitude

III. b- Quantification des émissions



→ La charge journalière en aérosols dans le domaine étudié est de **3Tg**.

→ Celle associée uniquement au flux de mousson est de **0.7 Tg** en moyenne par jour

Charge en aérosols (Tg) dans le domaine étudié:

- Estimée à partir des AODs MODIS dans le Deep Blue utilisant la méthode de Koren et al., [2006]:

$M = 1.9 A \times S$ où $A = AOD$, $S =$ Surface du domaine.

- Simulée par MesoNH (+)

Bon à savoir:

- Les émissions dans la région de Bodélé sont estimées à 0.7 Tg/jour (Koren et al., 2006),
- Les émissions d'aérosols désertiques en Afrique = ~700 Tg/an (Laurent et al., 2008).

Etant donné que:

- 1- L'espace occupé par les zones sources en Afrique de l'Ouest est large,
- 2- Le front intertropical est présent au-dessus des zones sources Ouest Africaines durant **deux à trois mois par an**,
- 3- Le front intertropical est caractérisé par **un cycle diurne très marqué**: un passage par jour au-dessus des zones sources.



La fréquence d'occurrence de ce mécanisme est élevée → Sa contribution à l'activité totale en aérosols durant la saison de mousson est significative

→→ Important qu'il soit bien simulé dans les modèles dédiés à l'étude des aérosols minéraux.

I- Introduction

II- Soulèvements associés au front de mousson

- a- Caractéristiques thermodynamique de la couche limite dans la région de l'ITD
- b- Description du mécanisme identifié.

III- Simulation du mécanisme identifié

- a- Validation de la simulation
- b- Quantification des émissions

IV- La formation de cyclones dans la région du FIT

- a- Description du mécanisme
- b- Implications sur les émissions d'aérosols désertiques
- c- Implications sur le transport vertical d'aérosols désertiques

V- Conclusions

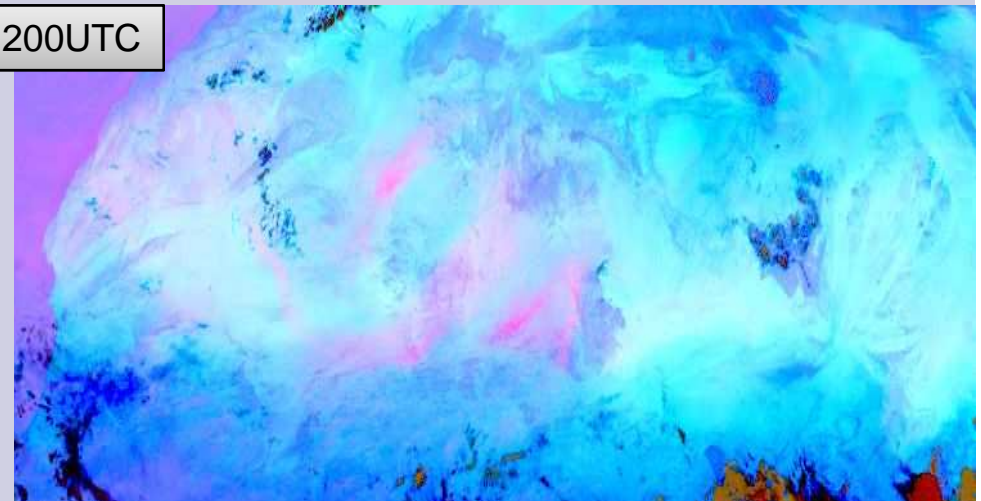
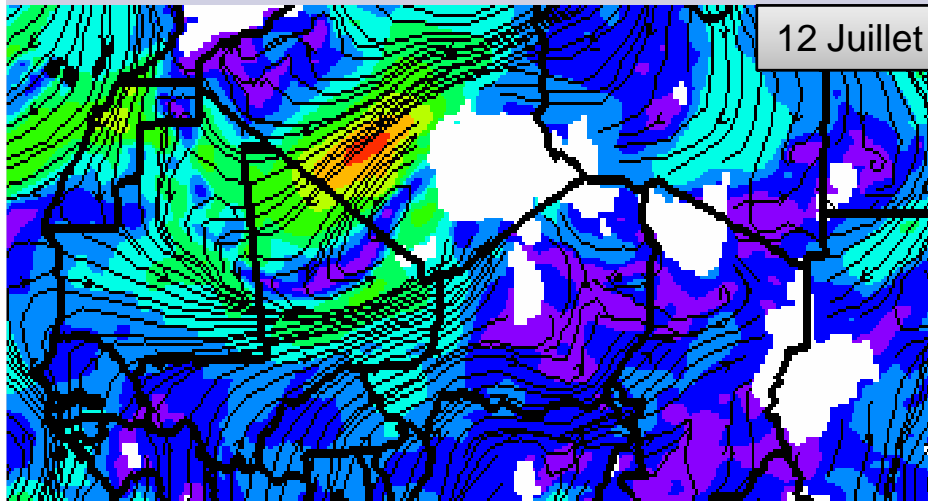
VI- Perspectives

VII- Remerciements

IV- La formation de cyclones dans la région du FIT

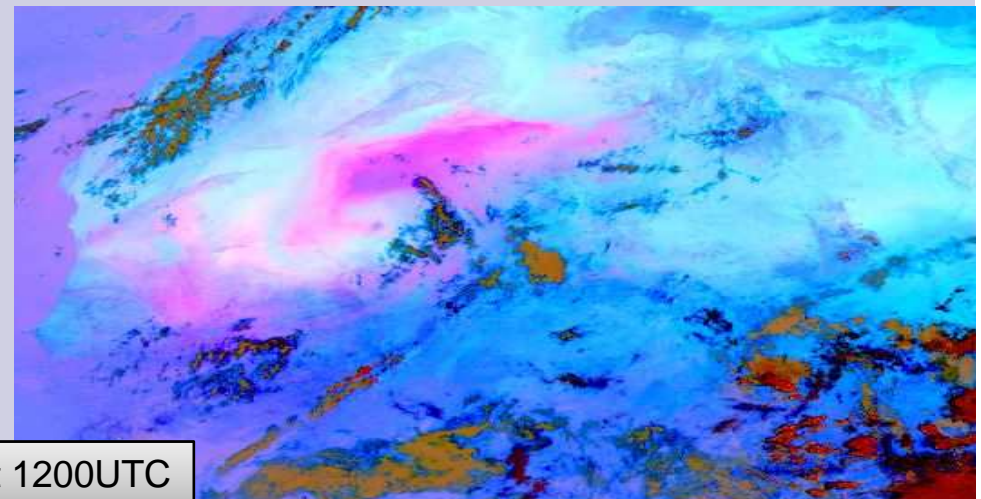
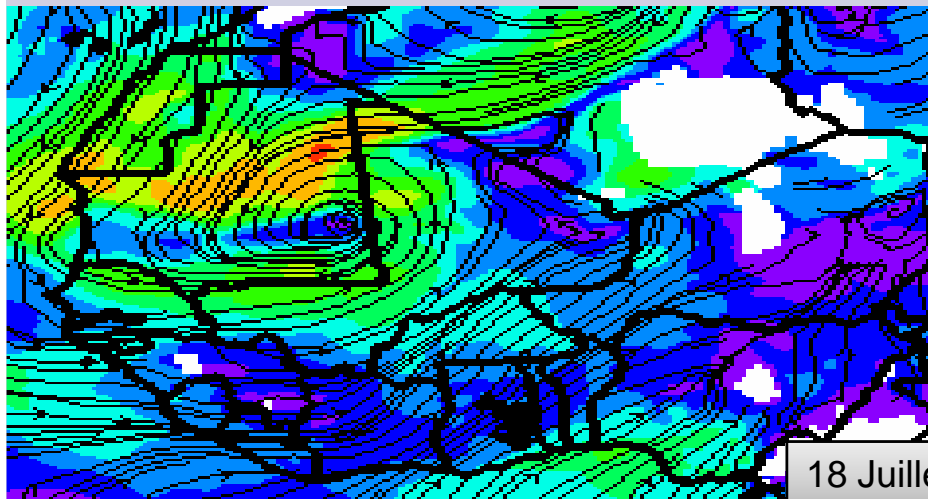
ECMWF

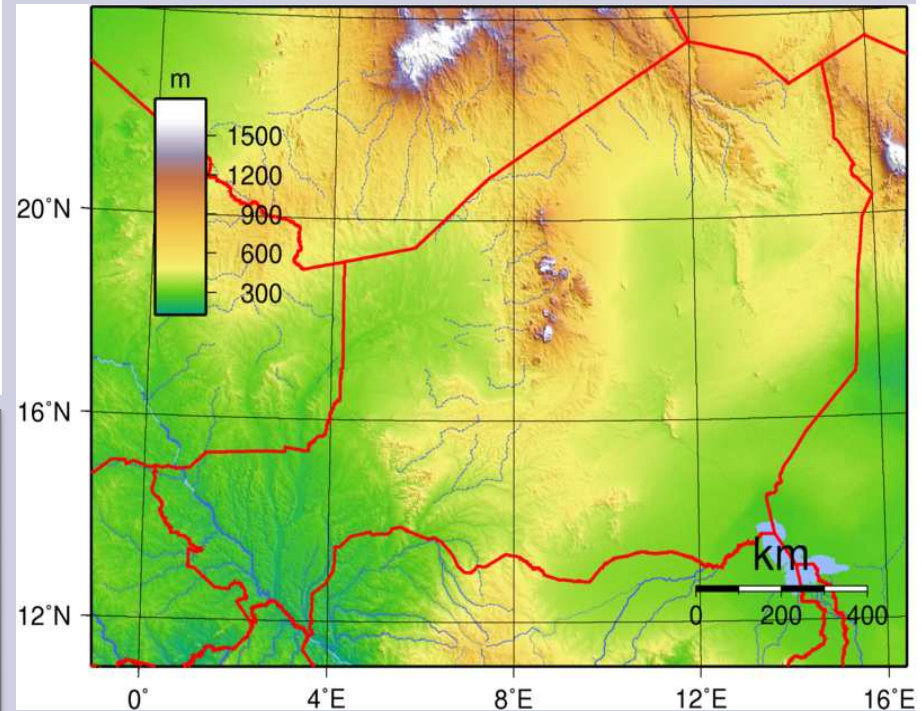
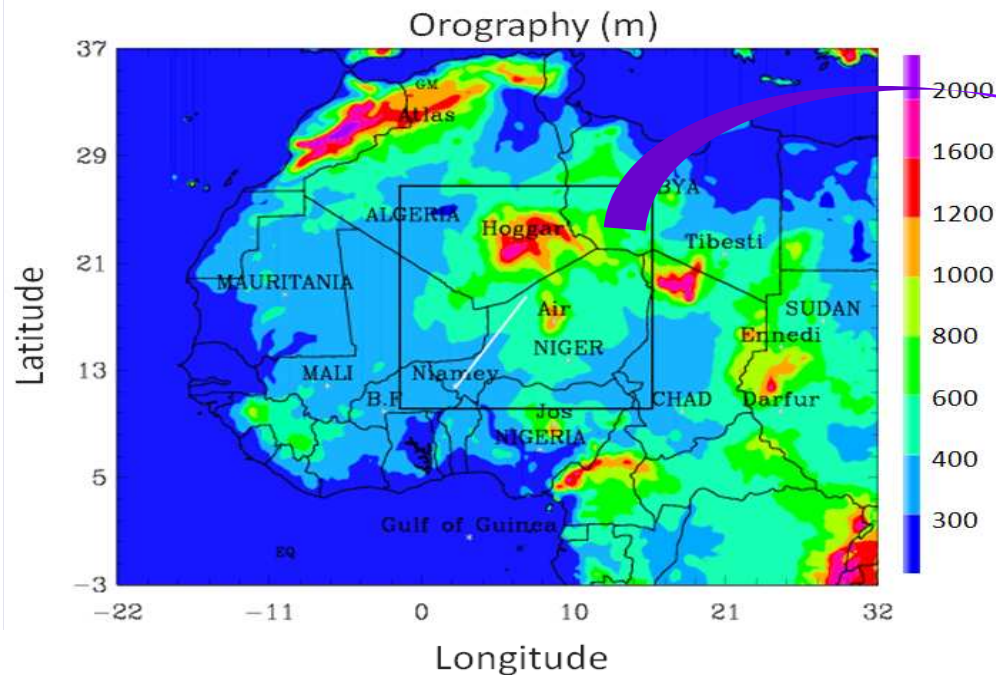
SEVIRI



Vitesse et direction du vent à 925 hPa

Images composites → Aérosols en rose



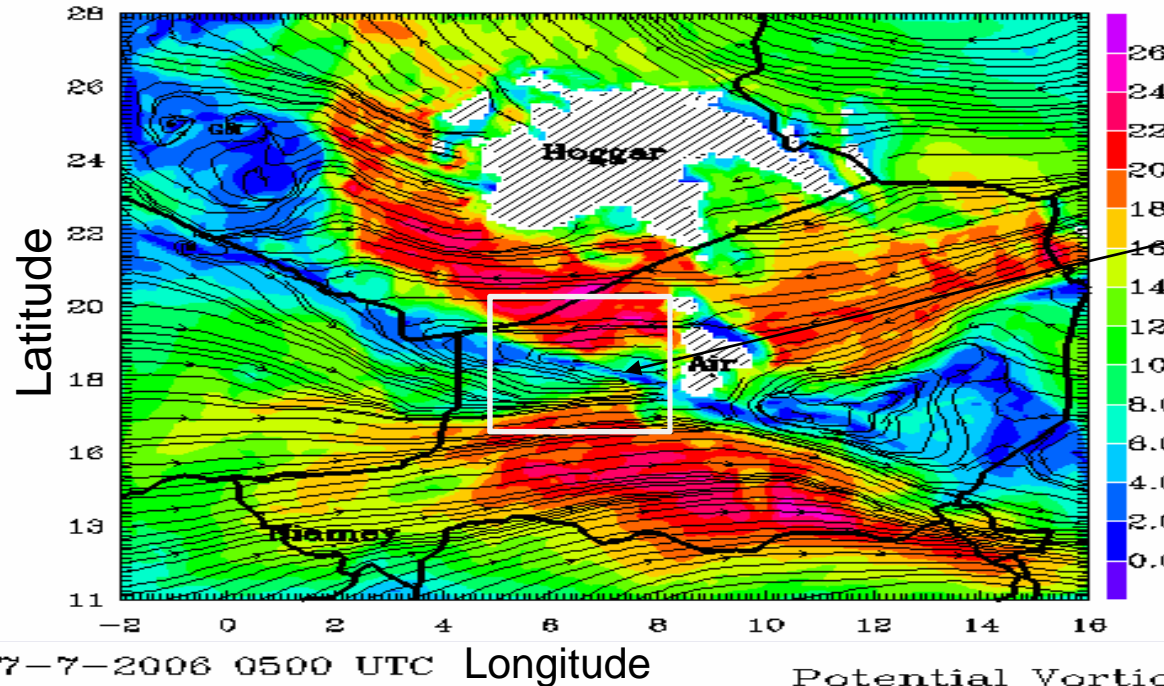


La simulation:

- Période simulée: 4-8 Juillet 2006
- 1 domaine centré à 7 E, 20 N:

Résolution horizontale: 10km 100x100 points
Résolution verticale: 72 niveaux, le premier à 10m.

IV.a- Mécanismes impliqués



Vitesse et direction
du vent à 1km

Fort cisaillement horizontal
de 50m/s au niveau du FIT

+

Formation de LLJs due au blocage
orographique des masses d'air en
provenance de la méditerranée.

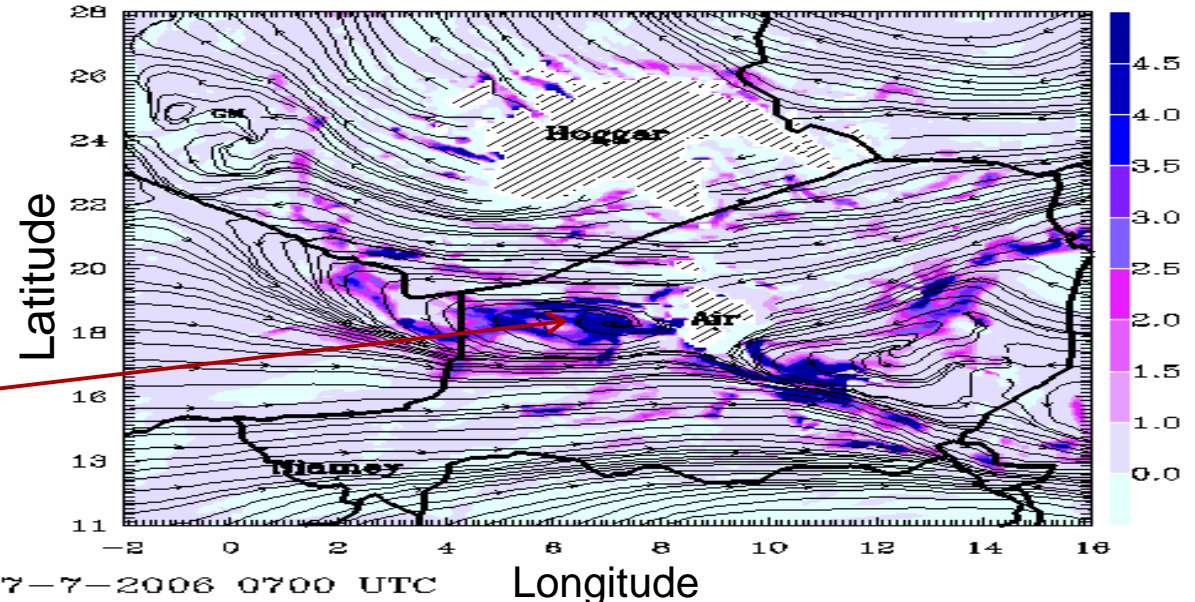


Cyclone caractérisé par:

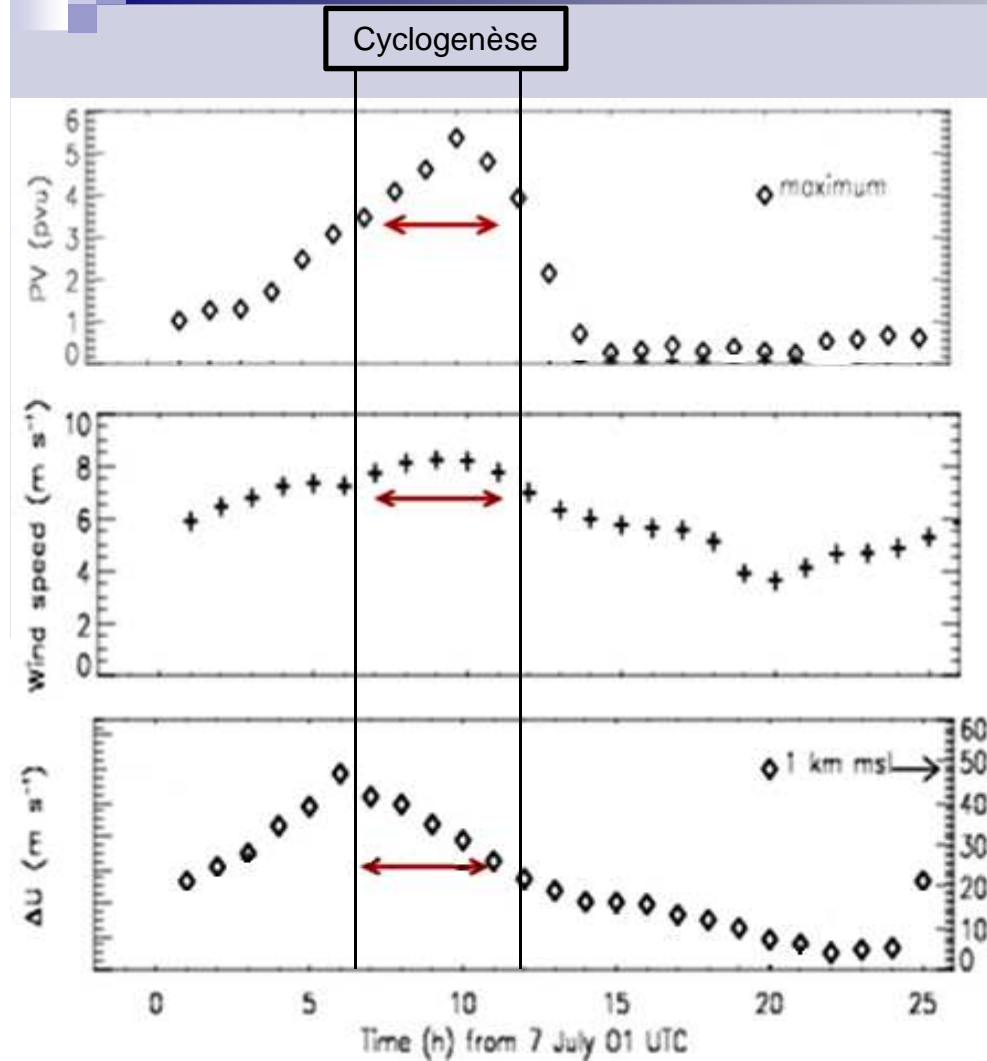
✓ Vorticité potentielle: 4.5 PVU

✓ Diamètre = ~200km

Potential Vorticity at 1km (PVU)



IV. a- Mécanismes impliqués



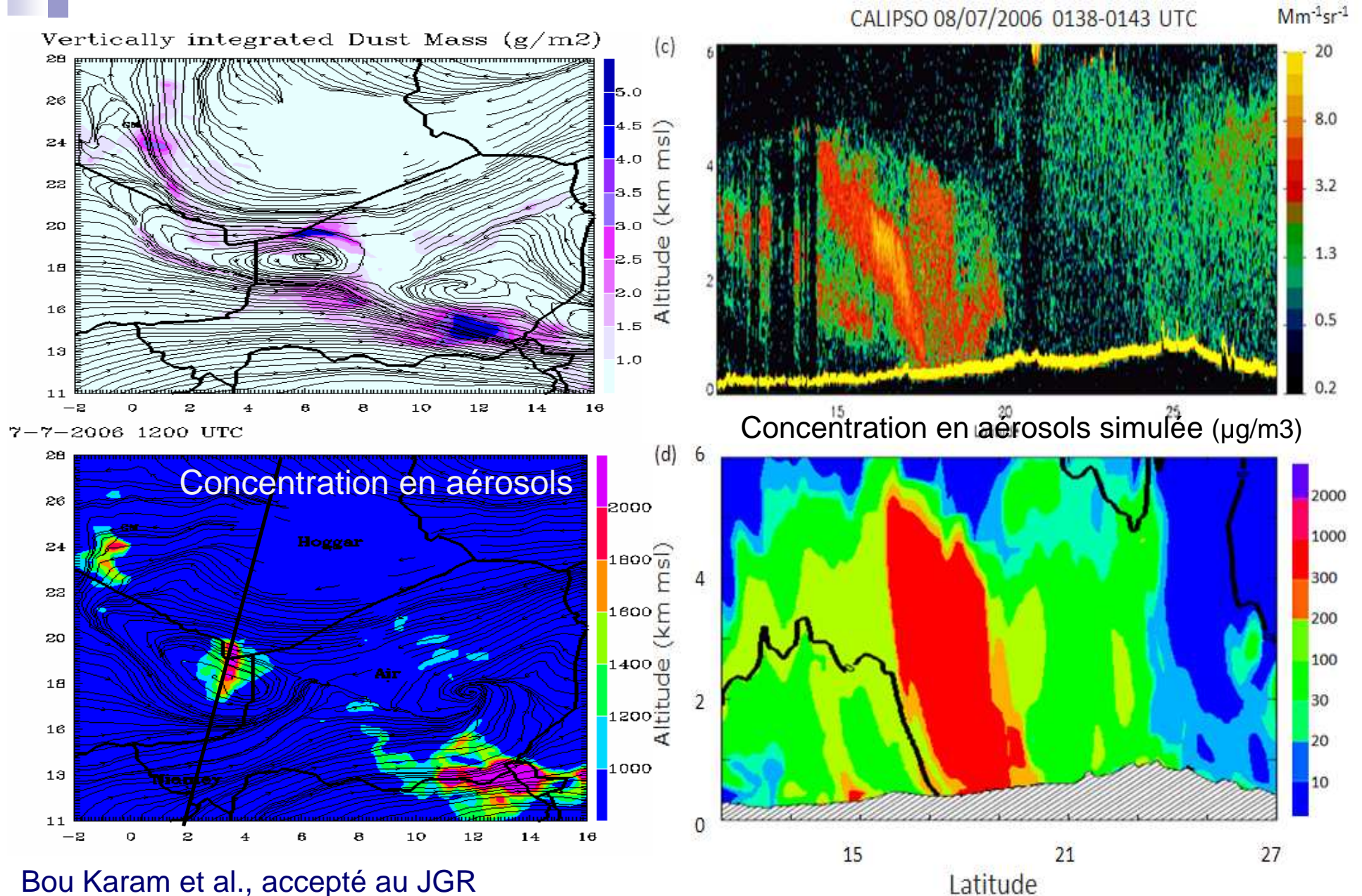
Rotation **initée en altitude** suivie d'un transfert de la quantité du mouvement près de la surface (mécaniquement).



Tornades



IV.c- Implications sur les émissions et le transport



Bou Karam et al., accepté au JGR

- La formation des cyclones **peut avoir lieu tout le long du front** même dans les régions sans présence de montagnes,
- Le nombre d'occurrence des cyclones est de l'ordre de **100 en 2 mois** (durant la saison de mousson 2006) d'après une inspection du champs de vent à 925hPa des analyses ECMWF.
- L'occurrence de forts vents près de la surface en relation avec la formation du cyclone **est indépendante du chauffage au sol** et peut même avoir lieu durant la nuit.



Impact important durant une saison complète de mousson du mécanisme identifié .

I- Introduction

II- Soulèvements associés au front de mousson

- a- Caractéristiques thermodynamique de la couche limite dans la région de l'ITD
- b- Description du mécanisme identifié.

III- Simulation du mécanisme identifié

- a- Evaluation de sa représentativité par le modèle MesoNH
- b- Quantification des soulèvements dans la région de l'ITD

IV- La formation de cyclones dans la région de l'ITD

- a- Description du mécanisme
- b- Implications sur les émissions d'aérosols désertiques
- c- Implications sur le transport vertical d'aérosols désertiques

V- Conclusions

VI- Perspectives

VII- Remerciements

La mise en évidence de:

- ✓ Deux nouveaux phénomènes météorologiques ayant lieu en Afrique de l'Ouest durant la saison de mousson,
- ✓ L'implication de ces deux phénomènes météorologiques sur les émissions d'aérosols minéraux en Afrique de l'Ouest durant la saison de mousson.

1- L'aspect courant de densité du flux de mousson nocturne (Bou Karam et al., 2008 et Bou Karam et al., soumis, JGR).



- Les forts vents turbulents associés aux flux de mousson nocturne, ayant les caractéristiques d'un courant de densité, provoquent des soulèvements d'aérosols désertiques au-dessus de l'Afrique de l'Ouest,
- Le modèle MesoNH a été capable de reproduire ce mécanisme d'une manière très satisfaisante,
- La charge en aérosols associée à ce phénomène a été estimée à **0.7 Tg** en moyenne/jour → Du même ordre que les émissions associées aux LLJs dans la région de Bodélé (Koren et al., 2006).

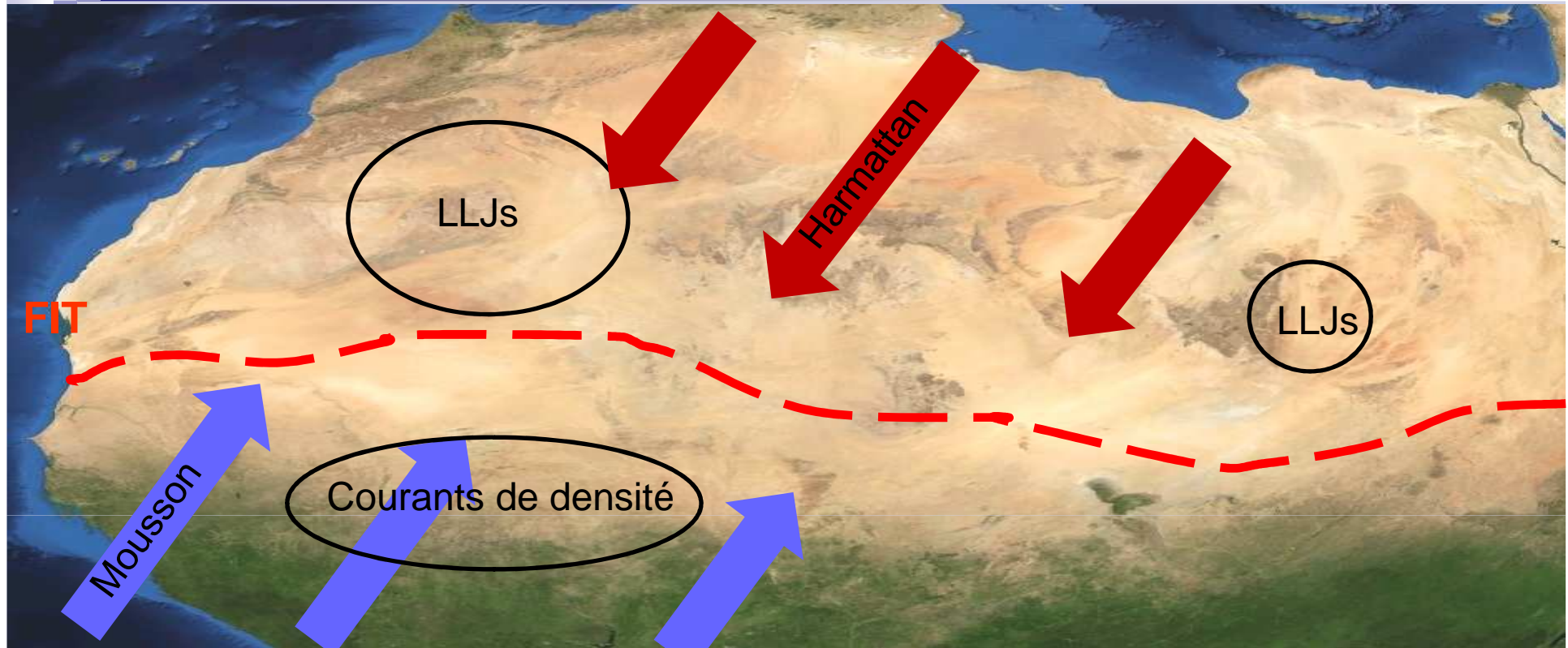
La mise en évidence de:

- ✓ Deux nouveaux phénomènes météorologiques ayant lieu en Afrique de l'Ouest durant la saison de mousson,
- ✓ L'implication de ces deux phénomènes météorologiques sur les émissions d'aérosols minéraux en Afrique de l'Ouest durant la saison de mousson.

2- La formation de cyclones dans la région du FIT en réponse au fort cisaillement dans les basses couches (Bou Karam et al., 2009).



- Les vitesses cycloniques près de la surface associés à la dynamique du cyclone provoquent des soulèvements d'aérosols au-dessus de l'Afrique de l'Ouest,
- Les fortes vitesses ascendantes associées aux cyclones favorisent un transport vertical des aérosols soulevés à des altitudes élevées permettant ainsi leur transport à grandes distances.
- Les émissions durant un évènement ont été estimés à **0.45 Tg** en moyenne → La moitié des émissions associées aux LLJs dans la région de Bodélé (Koren et al., 2006).



➤ Mécanismes connus ou compris depuis peu:

- 1- Soulèvements liés aux courants de densité émanants des systèmes convectifs (e.g. Flamant et al., 2007).
- 2- Soulèvements liés aux LLJs (Knippertz, 2008; Schepanski et al., 2009).



3 mécanismes de soulèvements de poussières ont été identifiés et/ou simulés:

- ✓ Liés au LLJs dans les régions arides au nord du FIT: [Todd et al., 2008](#)
- ✓ Liés au front de mousson dans la région du FIT: [Bou Karam et al., 2008](#) et [Bou Karam et al., soumis au JGR](#)
- ✓ Liés à la formation de cyclones dans la région du FIT: [Bou Karam et al., accepté, JGR](#)

Les résultats obtenus consolident ceux de l'étude climatologique par Engelstaedter & Washington, 2007.

I- Introduction

II- Soulèvements associés au front de mousson:

- a- Caractéristiques thermodynamique de la couche limite dans la région de l'ITD
- b- Description du mécanisme identifié.

III- Simulation du mécanisme identifié:

- a- Evaluation de sa représentativité par le modèle MesoNH
- b- Etude du cycle diurne des soulèvements dans la région de l'ITD
- c- Quantification des soulèvements dans la région de l'ITD

IV- La formation de cyclones dans la région de l'ITD

- a- Description du mécanisme
- b- Implications sur le soulèvement et le transport d'aérosols désertiques

V- Conclusions

VI- Perspectives

VII- Remerciements

Quelles informations nous manquent encore?



- La dépression thermique → un élément clé du système de mousson
- Manque d'observations à haute résolution dans cette région

Quels mécanismes pilotent **les soulèvements** et **le transport** des poussières dans la région de la dépression thermique??

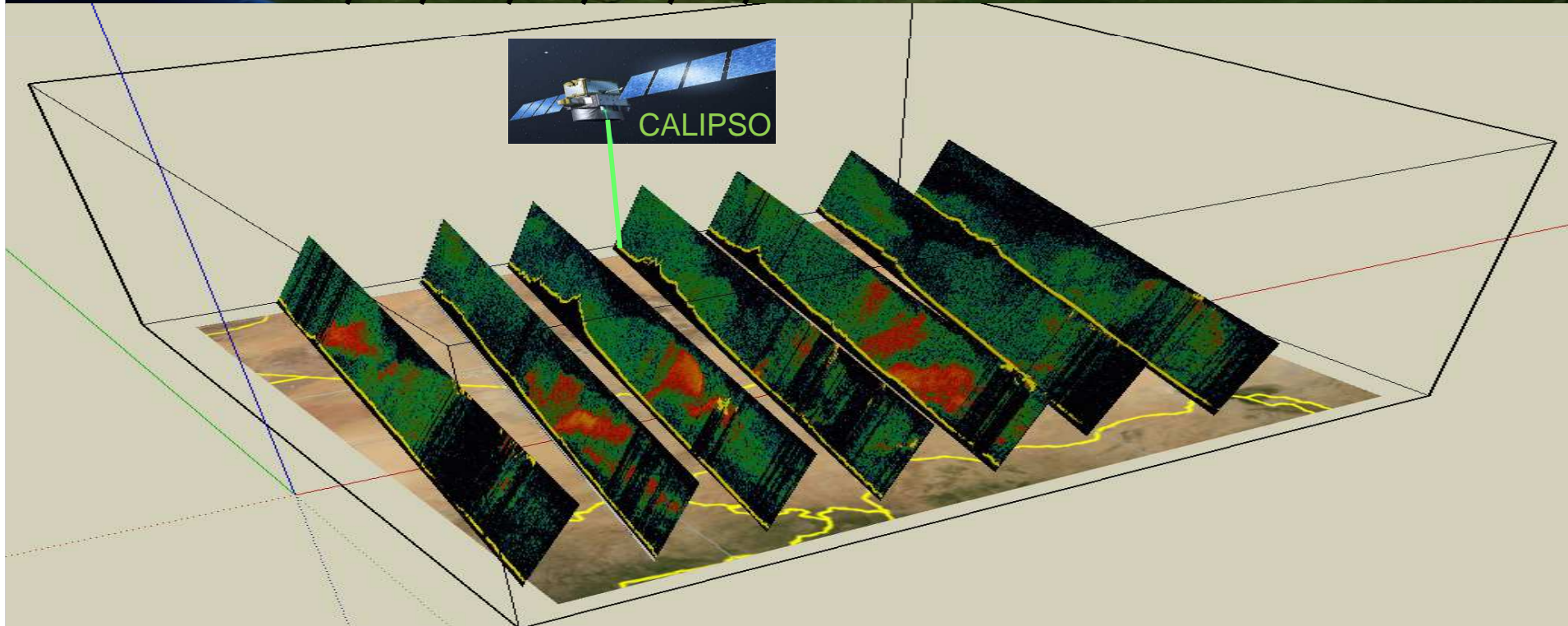
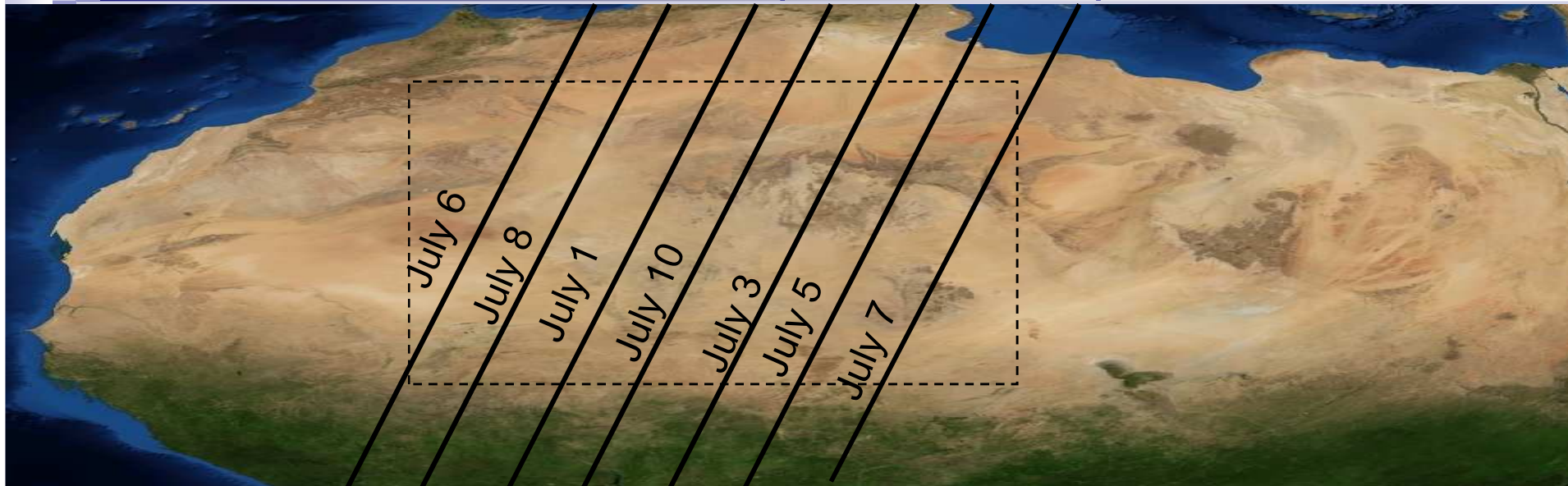
Quelle est **la dynamique des panaches d'aérosols** dans la région de la dépression thermique??

A moyen et court termes (Postdoc CNES en 2009 au LATMOS):

- ❖ Régionaliser les résultats obtenus en thèse pour des cas d'étude:
 - Etudier les soulèvements associés au front de mousson à l'échelle d'une saison de mousson et au dessus de l'Afrique de l'Ouest: [SEVIRI](#), [CALIPSO](#).
 - Etudier la fréquence d'occurrence des cyclones en Afrique de l'Ouest durant la saison de mousson: [ECMWF](#).

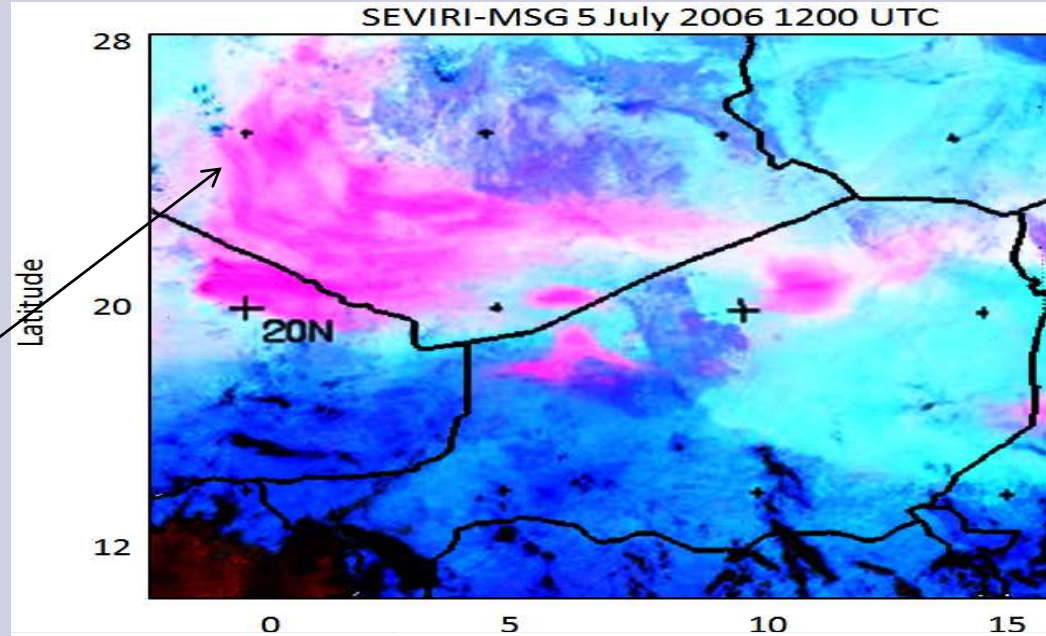
- ❖ Etudier les interactions dynamique/aérosols désertiques dans la région de la dépression thermique
 - Identifier les mécanismes de soulèvements de poussières associés à la dépression thermique: [CALIPSO](#) et [modélisation avec MesoNH](#).
 - Evaluer le forçage radiatif lié aux aérosols désertiques et son impact sur la dynamique de la dépression thermique et sur le système de mousson: [Modélisation avec MesoNH](#)

Couvertures spatiale et temporelle de CALIPSO

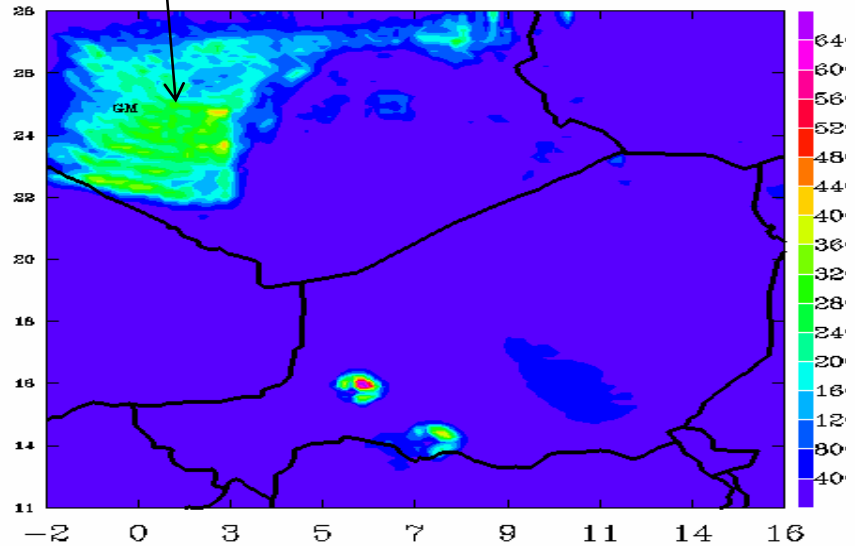


Quels sont les mécanismes à l'origine de ces structures??

Structures en bandes

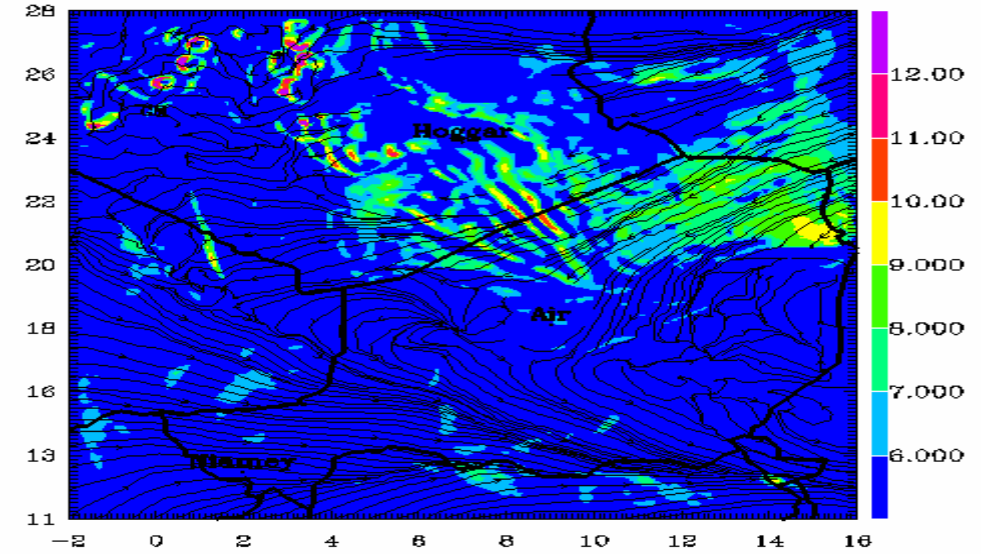


Dust Concentration at 70m



11-7-2006 1800 UTC

Wind Speed at 10m (m/s)



7-7-2006 1600 UTC

Remerciements

A mes directeurs de thèse: Cyrille Flamant et Pierre Flamant.

Aux membres du Jury: Béatrice Marticorena, Michel Cabane, Didier Tanré, Jean-Pierre Chaboureau, Pierre Tulet, Peter Knippertz, Martin Todd et Didier Renaut.

A: Jacques Pelon, Sophie Bastin, Cyndie Lemaitre, Juan Cuesta, Christophe Lavaysse, Patrick Chazette et à **tous les collègues du Service d'Aéronomie.**

Au niveau national:

Pierre Tulet, Alain Dabas, Odile Thouron et Suzanne Crumeyrolle (Météo France).
Jean-Pierre Chaboureau (Laboratoire d'Aérodynamique).
Béatrice Marticorena, Paola Formenti, Christel Bouet (LISA).
Didier Renaut (CNES).

Au niveau international:

Earle Williams, MIT, Cambridge.
Peter Knippertz, Université de Mayence, Allemagne.
Martin Todd, University College London, Angleterre.
Susanne Crewell et Bernhard Pospichal, Université de Cologne, Allemagne.
Oliver Reitebuch, DLR, Allemagne.
Amato Evan, Université de Wisconsin, Madison.
Sebastian Engelstaedter, Université de Cornell, New York.
Benoit Laurent, Leibniz Institute for Tropospheric Research, Allemagne.

A mes parents,
Et à vous!

Publications & communications

Publications dans des revues internationales à comité de lecture:

- ✓ Bou Karam D., C. Flamant, P. Knippertz, O. Reitebuch, J. Pelon, M. Chong, A. Dabas, (2008): Dust emissions over the Sahel associated with the West African Monsoon inter-tropical discontinuity region: a representative case study, *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 134: 621–634.
- ✓ Bou Karam D., C. Flamant, P. Tulet, M. C. Todd, J. Pelon and E. Williams (2009a): Dry cyclogenesis and dust mobilization in the Inter Tropical Discontinuity of the West African Monsoon: a case study, *accepted, JGR*.
- ✓ Bou Karam D., C. Flamant, P. Tulet, J-P. Chaboureau, A. Dabas, M. C. Todd (2009b): Estimate of Sahelian dust emissions in the Intertropical discontinuity region of the West African Monsoon, *submitted to JGR*.
- ✓ M.C. Todd, D. Bou Karam, C. Cavazos, C. Bouet, B. Heinold, G. Cautenet, P. Tulet, C. Perez, I. Tegen, and R. Washington (2008): Quantifying uncertainty in estimates of mineral dust flux: an inter-comparison of model performance over the Bodélé Depression, Northern Chad, *J. Geophys. Res.*, 113, D24107, 2008, doi:10.1029/2008JD010476.
- ✓ B. Pospichal, D. Bou Karam, S. Crewell, C. Flamant, A. Hünerbein, O. Bock, F. Saïd (2009): Diurnal cycle of the inter-tropical discontinuity over West Africa analysed by remote sensing and mesoscale modelling, *submitted to QJRMS*.
- ✓ Pelon, J., M. Mallet, A. Mariscal, P. Goloub, D. Tanré, D. Bou Karam, C. Flamant, J. Haywood, B. Pospichal, S. Victori (2008): Characterisation of biomass burning aerosol from microlidar observations at Djougou (Benin) during AMMA-SOP0/DABEX, *J. Geophys. Res.*, 113, D00C18, doi:10.1029/2008JD009976.

Communications dans des conférences internationales:

- ✓ 12 actes de conférences dont 5 présentations orales.