

CHALEUR ET ORAGES DU CLIMAT SAHÉLIEN



Françoise Guichard

Fleur Couvreur, Dominique Bouniol, Amanda Gounou*, Nicolas Rochetin, Romain Roehrig, Jean-Philippe Lafore (CNRM, Toulouse)

Laurent Kergoat, Eric Mougin (GET, Toulouse)

Chris Taylor (CEH, Wallingford, UK)

Frédéric Hourdin, Catherine Rio (LMD/IPSL, Paris)

Crystèle Léauthaud (HSM, Montpellier)

Cheikh Dione**, Marie Lothon (LA, Lannemezan)

(*: Météo-France Toulouse; **: UCAD, Dakar, Sénégal)



PLAN

1) Introduction, quelques éléments du climat Sahélien

2) Interactions surface – atmosphère au Sahel

a. Bilan énergétique à la surface

Un bilan radiatif qui fait intervenir de manière étonnante une chronologie saisonnière de processus physiques distincts dans l'atmosphère et à la surface
Et fortement couplé à la température et à humidité de l'air à la surface

b. Initiation des orages et système convectifs sahéliens

Importance de l'état et des processus de surface pour le développement des systèmes convectifs jusqu'à des échelles très fines

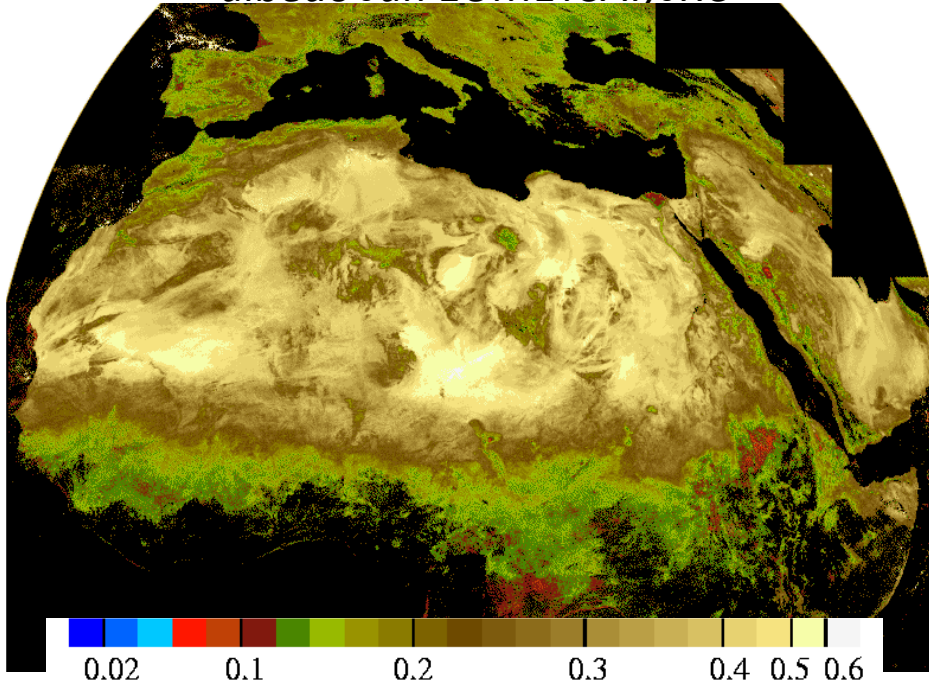
3) Evolutions climatiques passées

Focus sur le réchauffement observé au Sahel depuis 1950

4) Conclusions et Perspectives

Le Sahel: zone de transition entre la zone tropicale humide soudanienne et le désert du Sahara

albedo Jun EUMETSAT/JRC

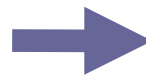


à la surface

végétation, albédo, précipitations...

dans l'atmosphère

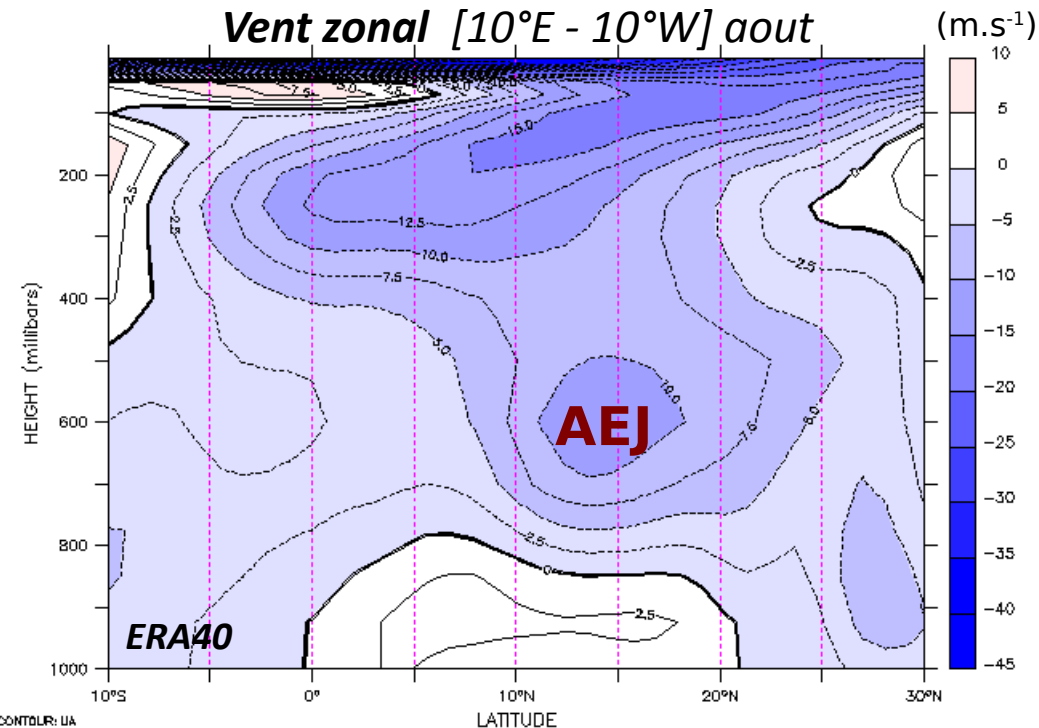
e.g. le jet d'est Africain présent pendant la mousson



Bande climatique semi-aride, 10-12°N à 18-20°N qui s'étend d'ouest sur le continent africain sous l'influence de la mousson

Dans une région où les **gradients latitudinaux** sont bien définis et forts

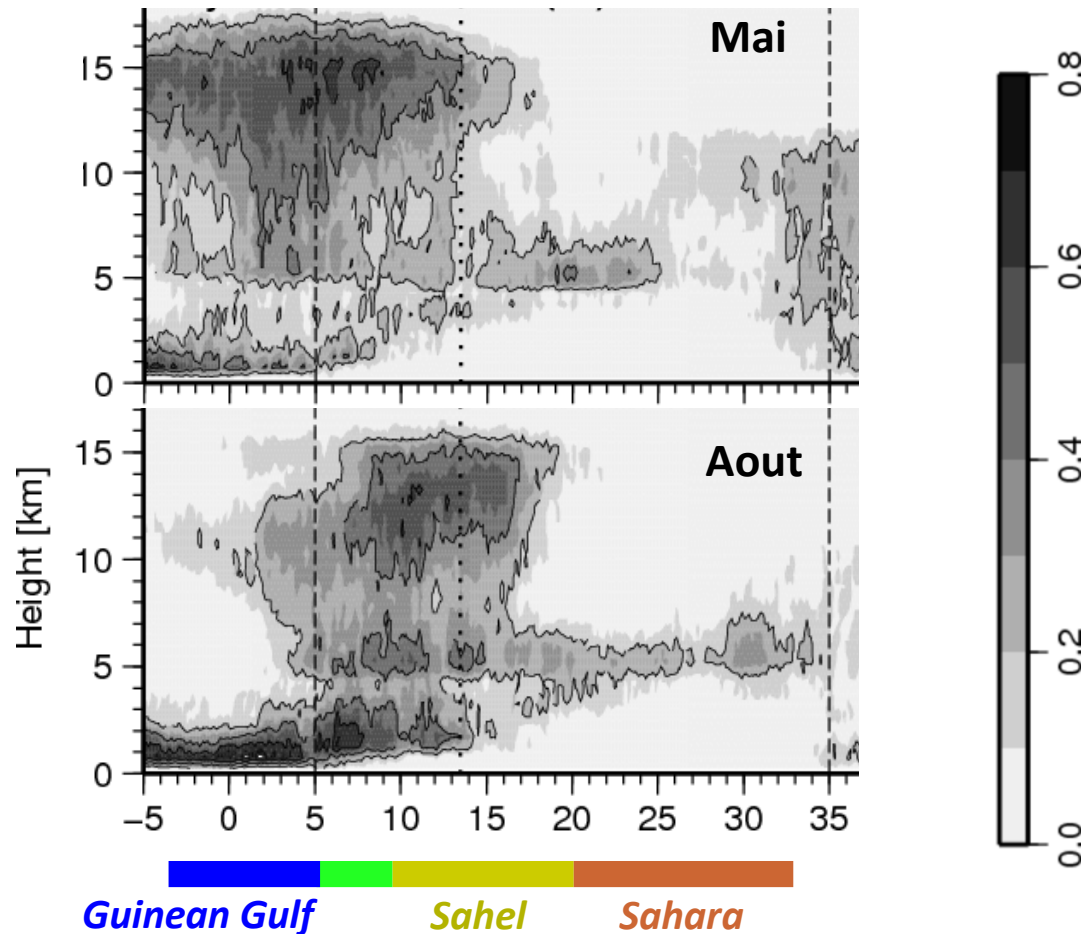
Vent zonal [10°E - 10°W] aout



gradient méridien de l'ennuagement

Fréquence d'occurrence des nuages fct (latitude, altitude)

CloudSat radar et CALIPSO lidar [10°E,10°W] en moyennes mensuelles pour for 2008



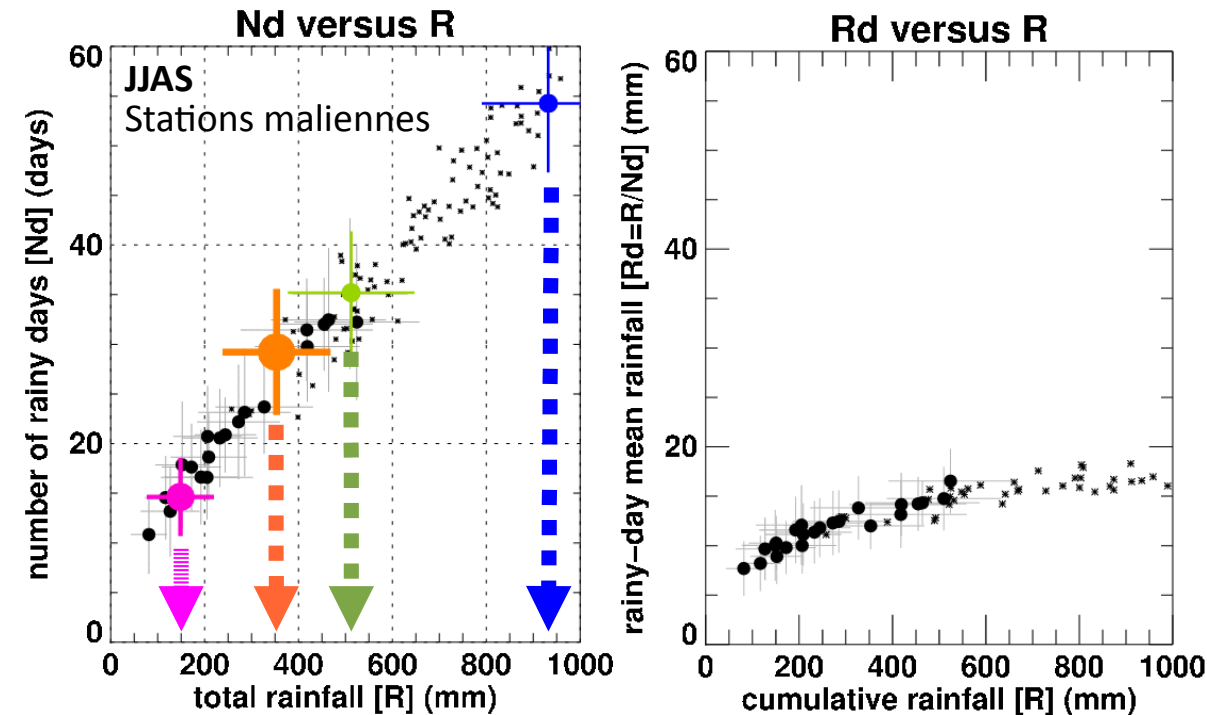
Des nuages qui accompagnent la progression saisonnière de la mousson
Avec un étagement structuré des nuages suivant la latitude
Et des nuages jusque sur le Sahara

Bouniol et al. (2012)

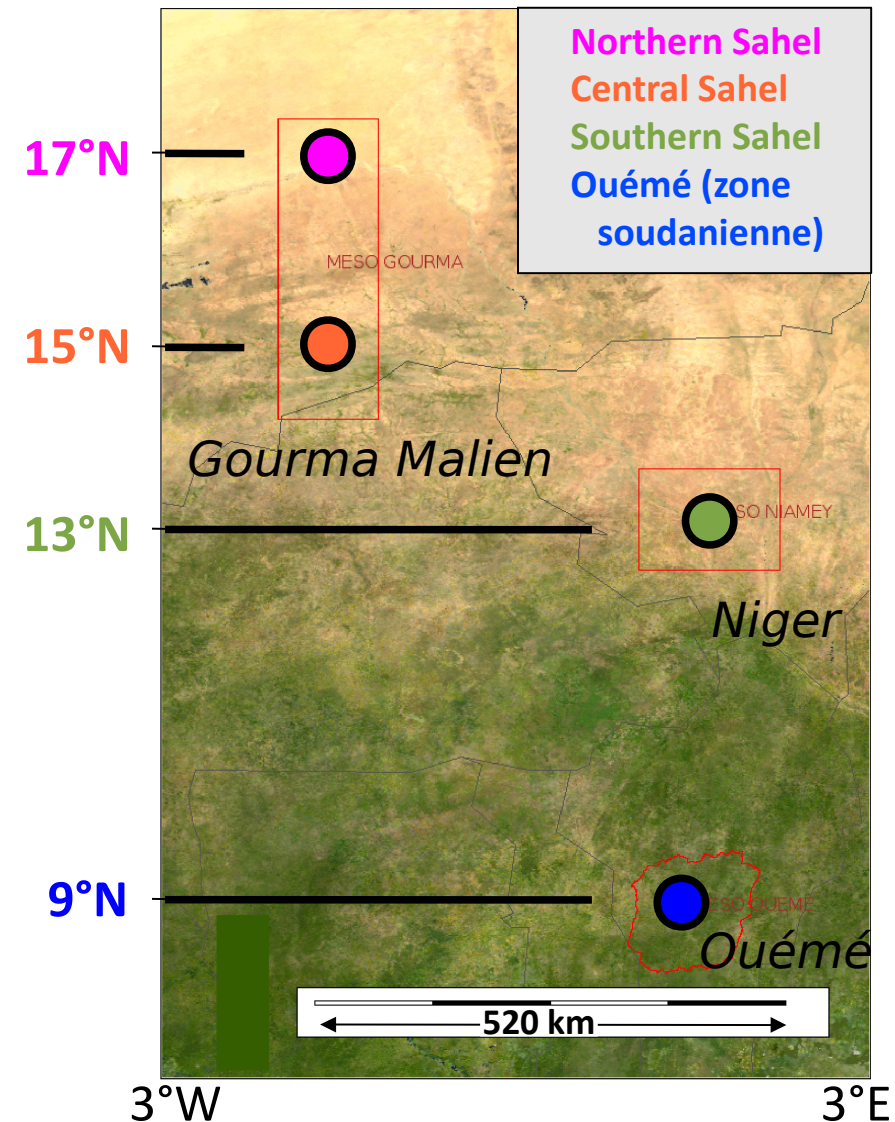
Gradient méridien des précipitations

Échantillonnage par les sites de l'observatoire
AMMA-CATCH

PRECIPITATION



Adapté de Frappart et al. (2008), résultats cohérents
avec Lebel et al. (1997), Le Barbé et al. (2002)



Importance du nombre d'évènements de pluie pour le cumul de précipitation de mousson

Précipitations et convection profonde au Sahel

très profonde, intense, soulèvement de poussières

On observe la formation de systèmes convectifs à mésoéchelle (~ 100 à quelques centaines de km) les Mesoscale Convective Systems (MCS) , e.g. lignes de grains

Les précipitations associées à ces MCSs correspondent à ~ 70-80% des précipitations totales (Mathon et al. 2002)



Hétérogénéité des précipitations jusqu'à des échelles de l'ordre de quelques dizaines de 10 km persistant jusqu'à l'échelle saisonnière (Taylor et Lebel 1998)

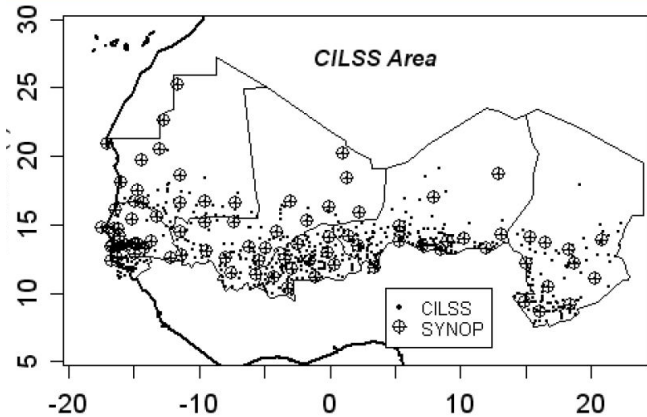
Fort cycle diurne des nuages et des précipitations (région continentale)



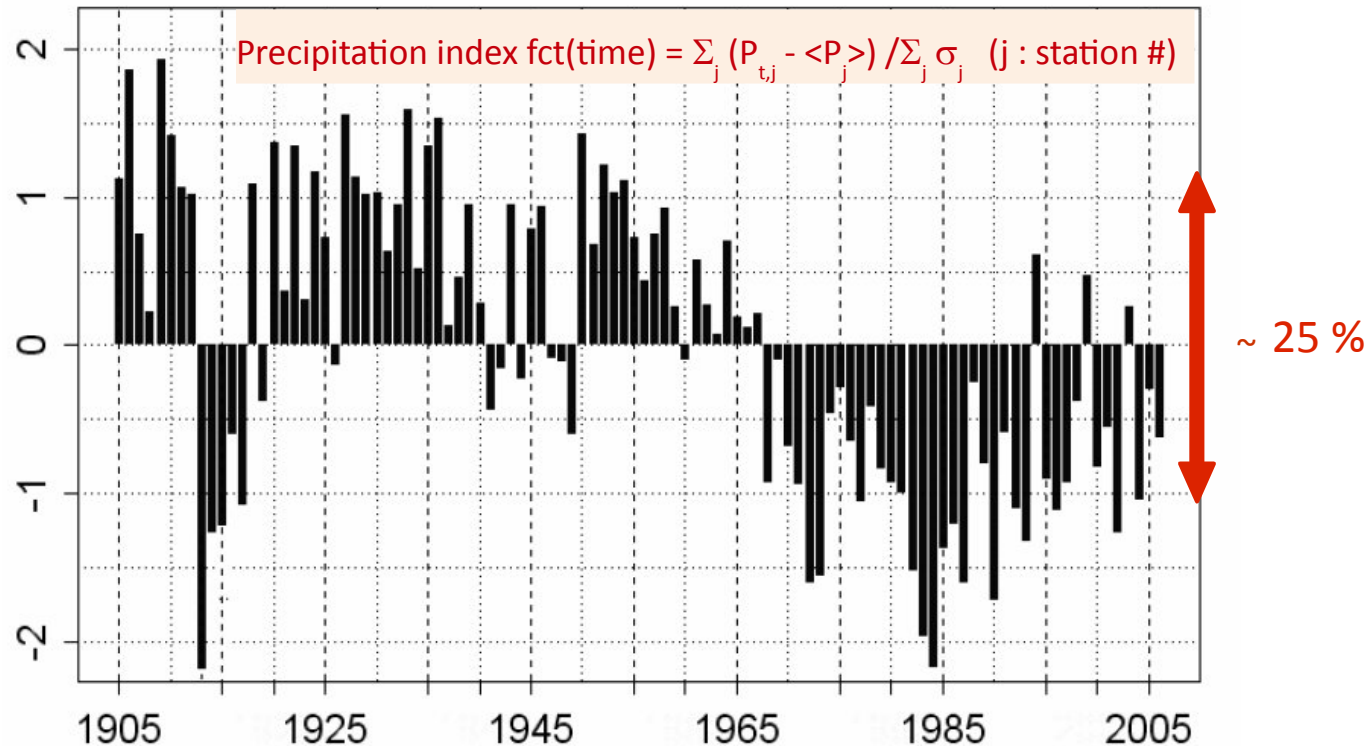
Variabilité multidécennale des précipitations fortes

« most dramatic example of multidecadal variability » (Hulmes 2001)

Dans un contexte Sahélien, où la pluie est un facteur critique (agriculture pluviale)



Ali and Lebel (2009)



Causes, mécanismes:

de nombreuses hypothèses, controverses, pas toutes complètement élucidées;

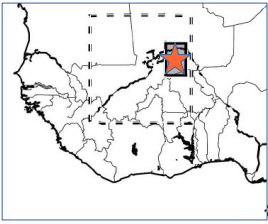
importance des effets régionaux de surface (dégradation/désertification)

(Charney 1975, Xue and Shkula 1993),

versus

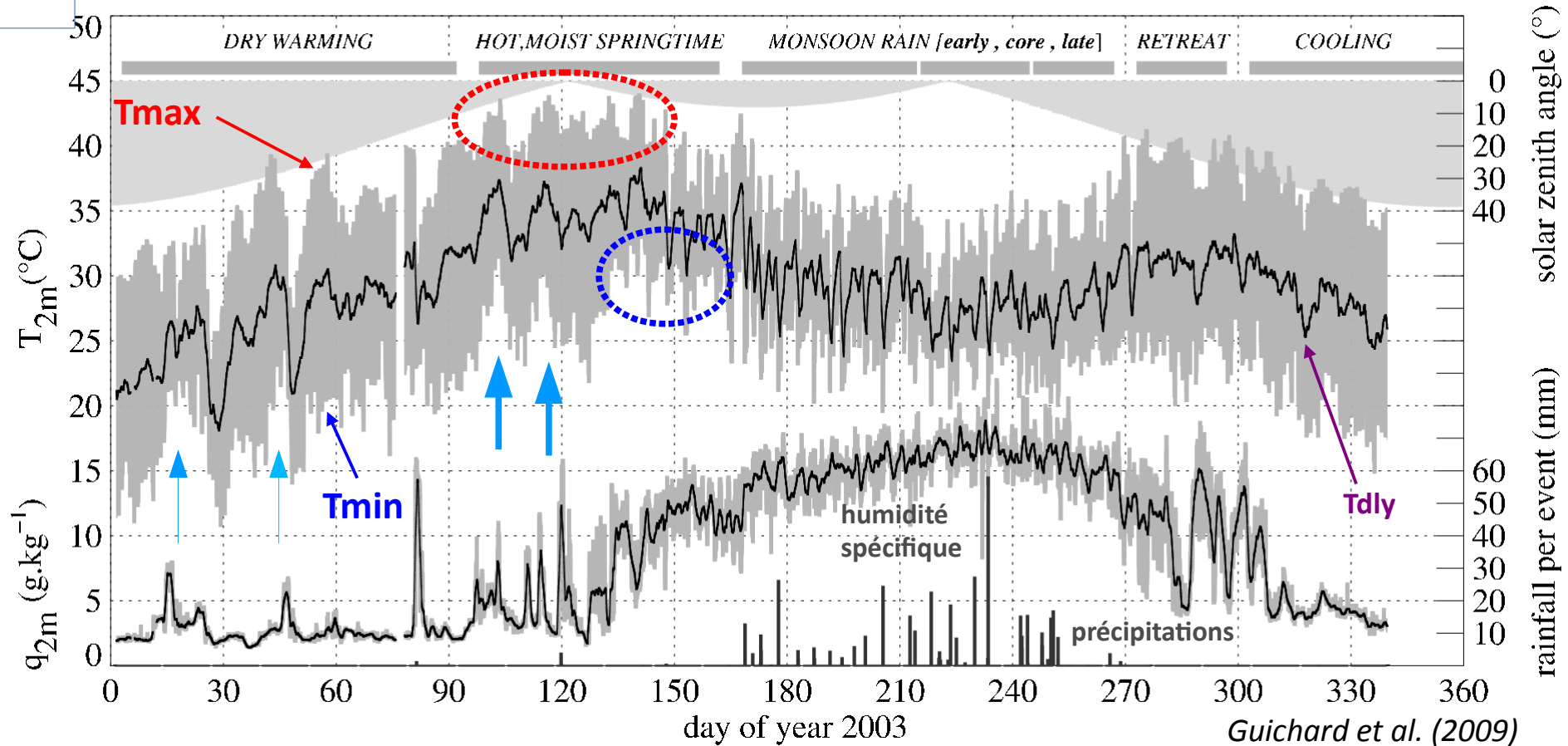
- influences -fortes à ces échelles multidécennales- de la variabilité océanique à plus grande échelle (Lamb 1978, Folland et al. 1986, Giannini 2003, 2008)

Température au Sahel : fluctuations annuelles et diurnes



site d'Agoufou, Mali
15°N, 1°W

station météo automatique, données à haute fréquence temporelle (15 min) sur ~ 10 ans Mougin et al. (2009)



Cycle annuel bimodal, amplitude $\sim 10^{\circ}\text{C}$ / Cycle diurne $\sim 15\text{-}20^{\circ}\text{C}$ quand l'air est sec

Maximum de température au printemps, ici en mai, un peu après l'arrivée du flux de mousson
forte réduction du Tmax-Tmin dès que l'air est humide (effet de serre) $\sim 40^{\circ}\text{C}$, $\sim 30^{\circ}\text{C}$

Minimum de température au moment du 2nd minimum de l'angle zénithal solaire
chutes brusques de T associées aux évènements de pluie

Humide de mai à octobre, mais des précipitations confinées à juin-septembre

Mousson, surface et basses couches atmosphériques

Le flux de mousson se développe dans les basses couches atmosphériques (quelques centaines de m à quelques km) qui sont fortement contrôlées par le bilan énergétique à la surface

La convection atmosphérique, par définition, trouve son origine dans les instabilités des basses couches de l'atmosphère

Les processus de surface sont depuis longtemps considérés comme des éléments majeurs de la mousson ouest africaine

*Charney (1975): désertification, albedo de surface $\nearrow$, diminution des précipitations
boucle de rétroaction basée sur les changements du bilan énergétique local à la surface*

*Gong & Eltahir (1996): importance des gradients méridionaux de la thermodynamique
des basses couches atmosphériques sur la circulation de mousson*

L'existence de nombreux mécanismes opérant à des échelles spatio-temporelles distinctes est envisageable (*paléo, interannuel, diurne, mésoéchelle...*), une difficulté majeure est d'identifier leur existence effective

Jusqu'à récemment, peu d'observations pour aborder ces questions ; approches de modélisation académiques, très utiles mais il est souvent délicat d'interpréter et d'évaluer les résultats obtenus de manière trop littérale, définitive.

Mousson, surface et basses couches atmosphériques

Charney et al. (JAS 1977)

Etude la la sensibilité des sécheresses en zone semi-arides à l'albedo de surface avec un modèle de climat: l'augmentation de l'albedo conduit à une diminution du rayonnement net à la surface et ainsi à une diminution des nuages convectifs et des précipitations

“There are two difficulties in applying our result to real situations. First, the changes in albedo were necessary hypothetical in the absence of reliable measurement of actual albedos and albedo changes. Second, although the numerical model compares favorably with others of like complexity, it was found to be too inaccurate in its simulation of the actual climates in some of the test areas to justify more than purely qualitative conclusions concerning real situations. For example, the simulated zonally averaged rainfall maximum over Africa for July was some 4° latitude too far north - ...”

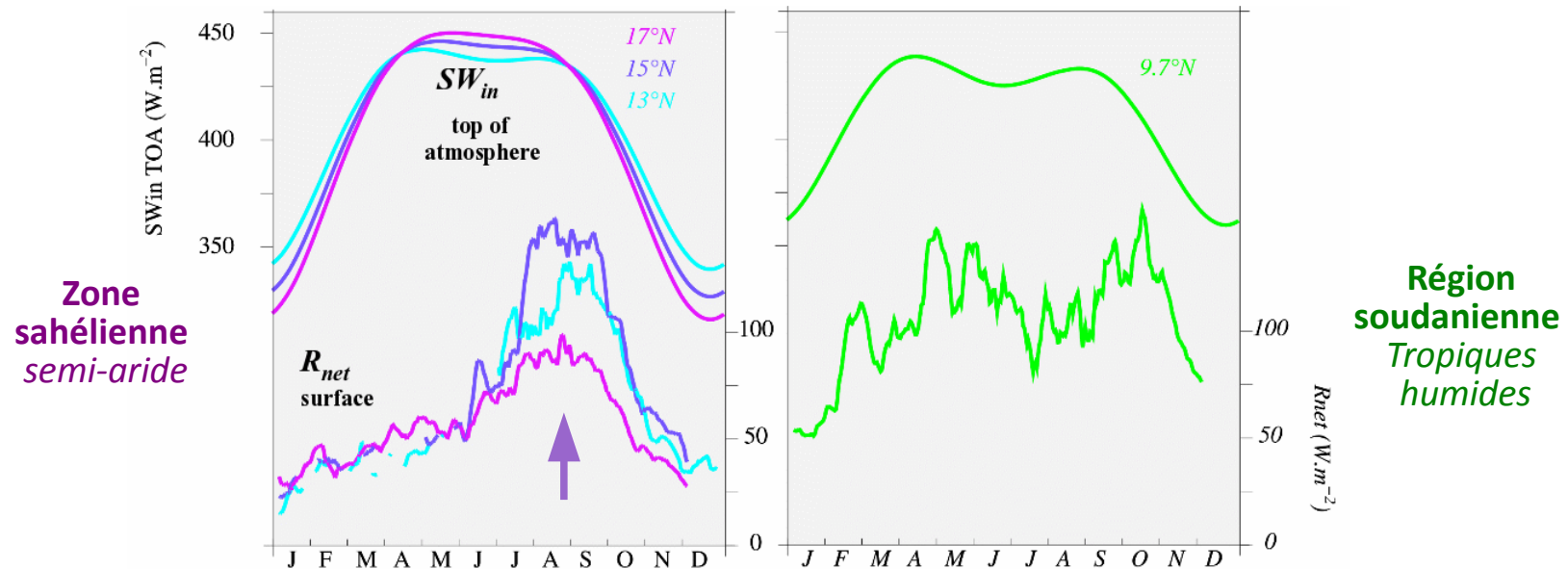
“... Although improvement in climate simulation can be expected to follow improvement in our understanding of the physics of the atmosphere and its mathematical treatment, considerable defects in the climate simulations can be expected to remain for some time to come.”

“.. the only way that biogeophysical feedback hypothesis ... can finally be confirmed or disproved is by study of actual observations.”

Les observations récentes - projet AMMA (Redelsperger et al. 2006), données satellites - permettent maintenant d'identifier de manière plus solide des mécanismes opérant effectivement au Sahel - et par suite aussi d'évaluer les modèles et de guider leurs développements.

2) Interactions surface-atmosphère

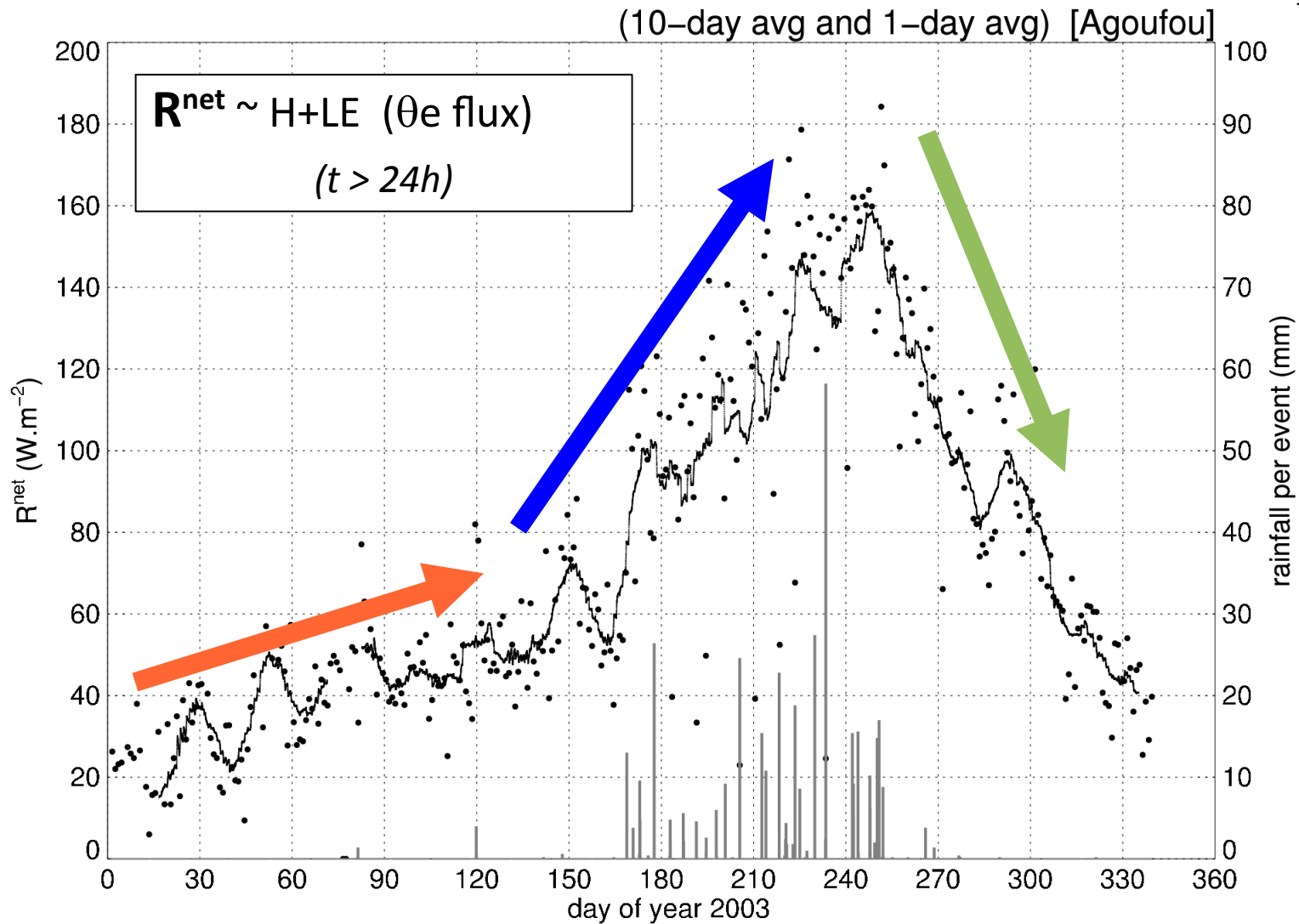
a. Comment se construit le cycle annuel du bilan énergétique à la surface aux échelles annuelles et interannuelles?



Malgré l'importance accordée à ce bilan, peu analysé et peu utilisé pour évaluer la modélisation jusqu'à ces dernières années

Au Sahel on observe une forte augmentation du rayonnement net à la surface (R^{net}) pendant la mousson

Site d'Agoufou
1.4°W, 15.3°W

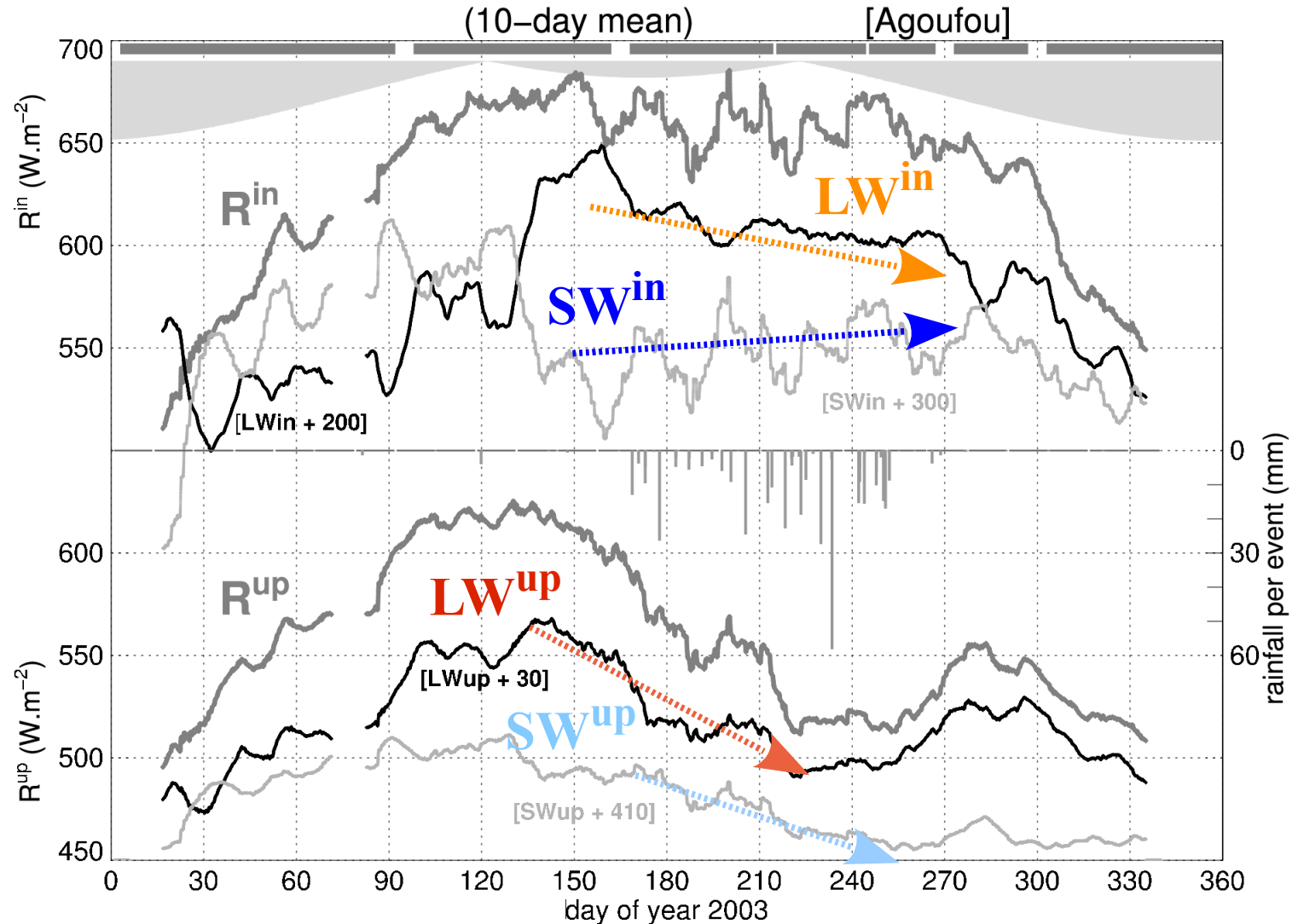


Ici 2003: bonne année de mousson (pluies fortes pour la zone, > 400 mm)

Guichard et al. (2009)

Composantes du flux radiatif net

$$R^{net} = (LW^{in} + SW^{in}) - (LW^{up} + SW^{up})$$



Forte variations de SW^{in} mais distinctes de celle de R^{net} , minimum en juin avant la pluie (poussières)
chute de l'albedo pendant la mousson (croissance de la végétation)

LW^{in} décroît de juin à sept. alors que q_v et RH augmentent et que les nuages sont + nombreux
peu intuitif, associé à un refroidissement de cette atmosphère continentale

Aucune des 4 composantes n'explique à elle seule l'augmentation de R^{net} pendant la mousson

De juin à septembre, l'augmentation de R^{net} est principalement pilotée par l'émission de la surface R^{up} (qui diminue)

$$R^{\text{net}} = R^{\text{in}} - R^{\text{up}}$$

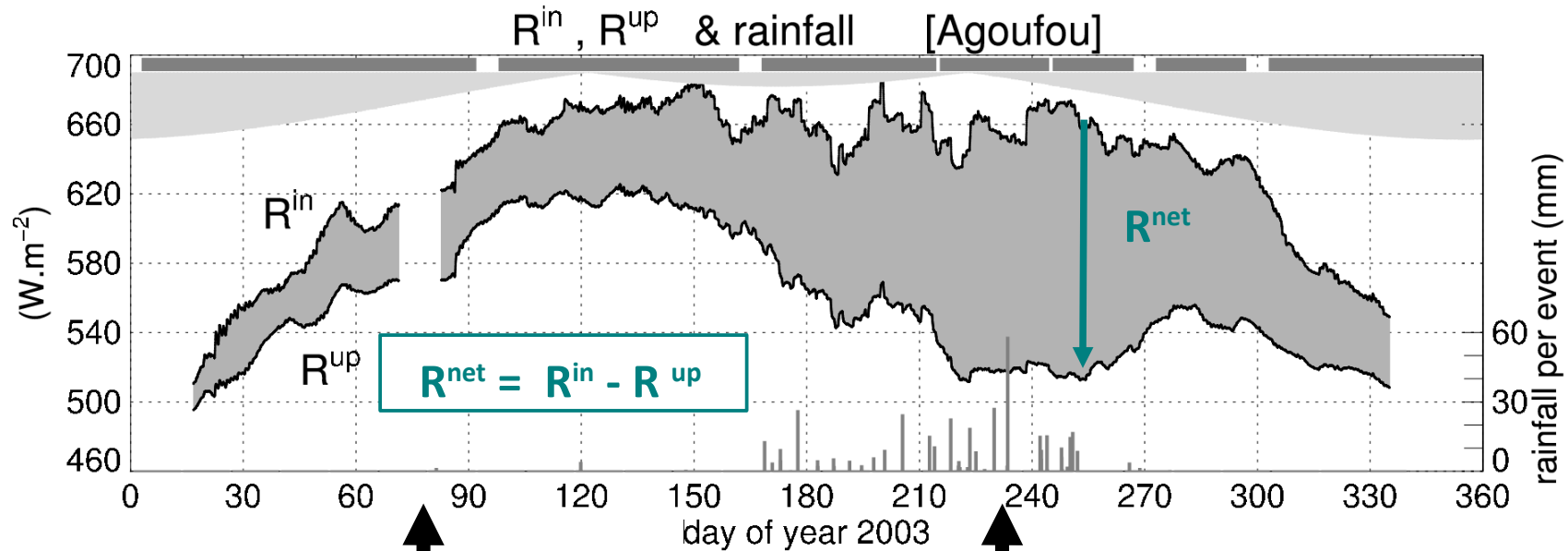


Photo V. Le Dantec



surface cooling

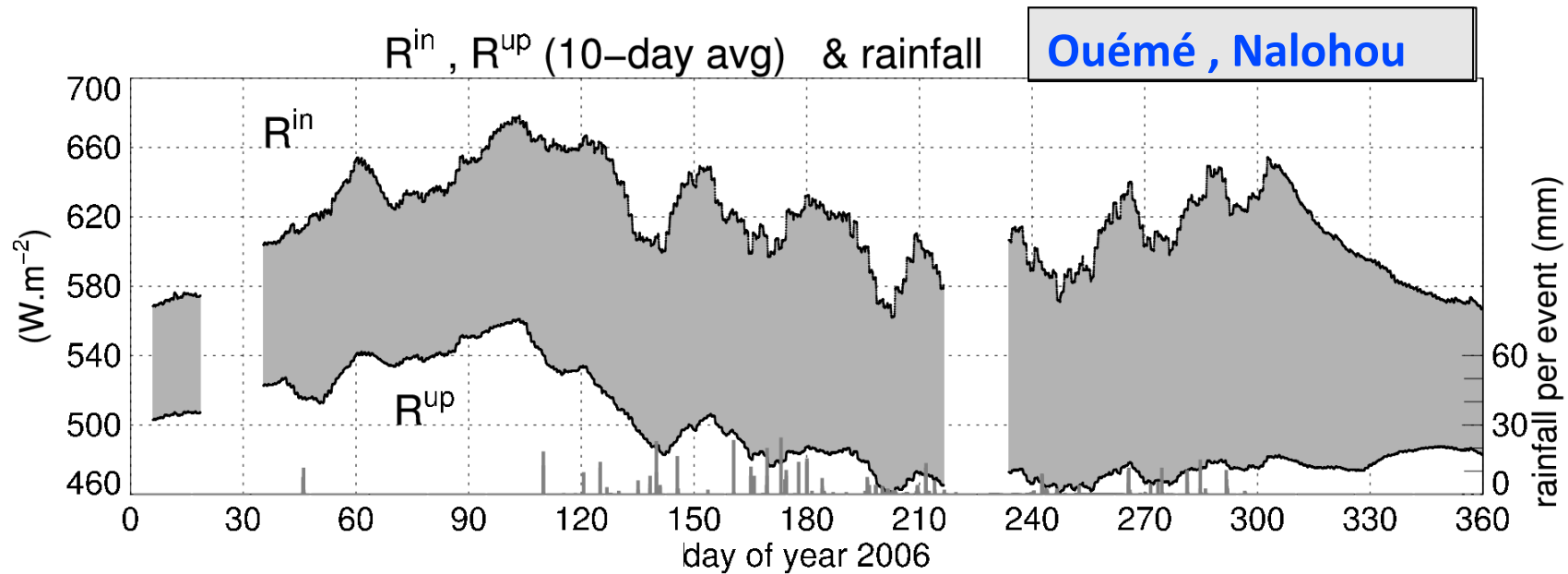
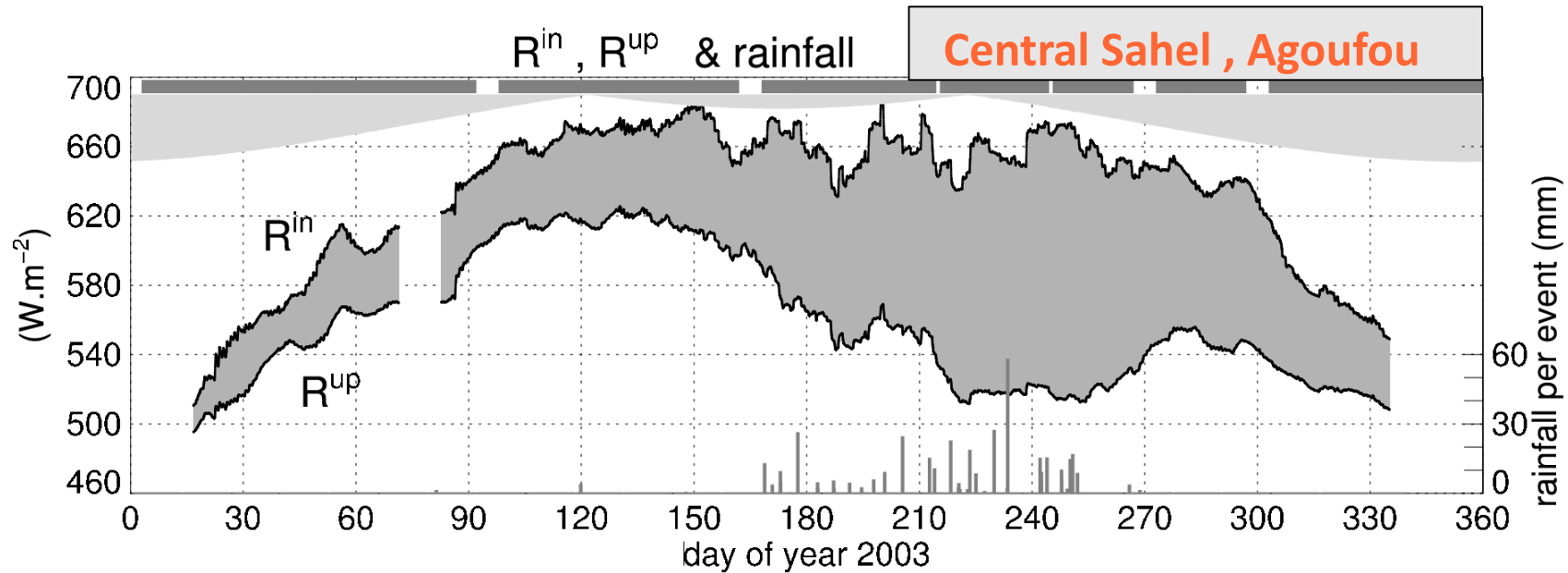
surface albedo
(vegetation, Samain
et al. JGR 2008)

R^{in} ne change pas significativement pendant la mousson, ça ne signifie pas que l'impact radiatif des nuages et des aérosols est négligeable (SW incident JA: effet $\sim 50 \text{ W/m}^2$, $\sim 25\%$)

Fortes similarités avec les sites sahéliens du Niger (Slingo et al. 2009, Ramier et al. 2009)

$$R^{\text{net}} = R^{\text{in}} - R^{\text{up}}$$

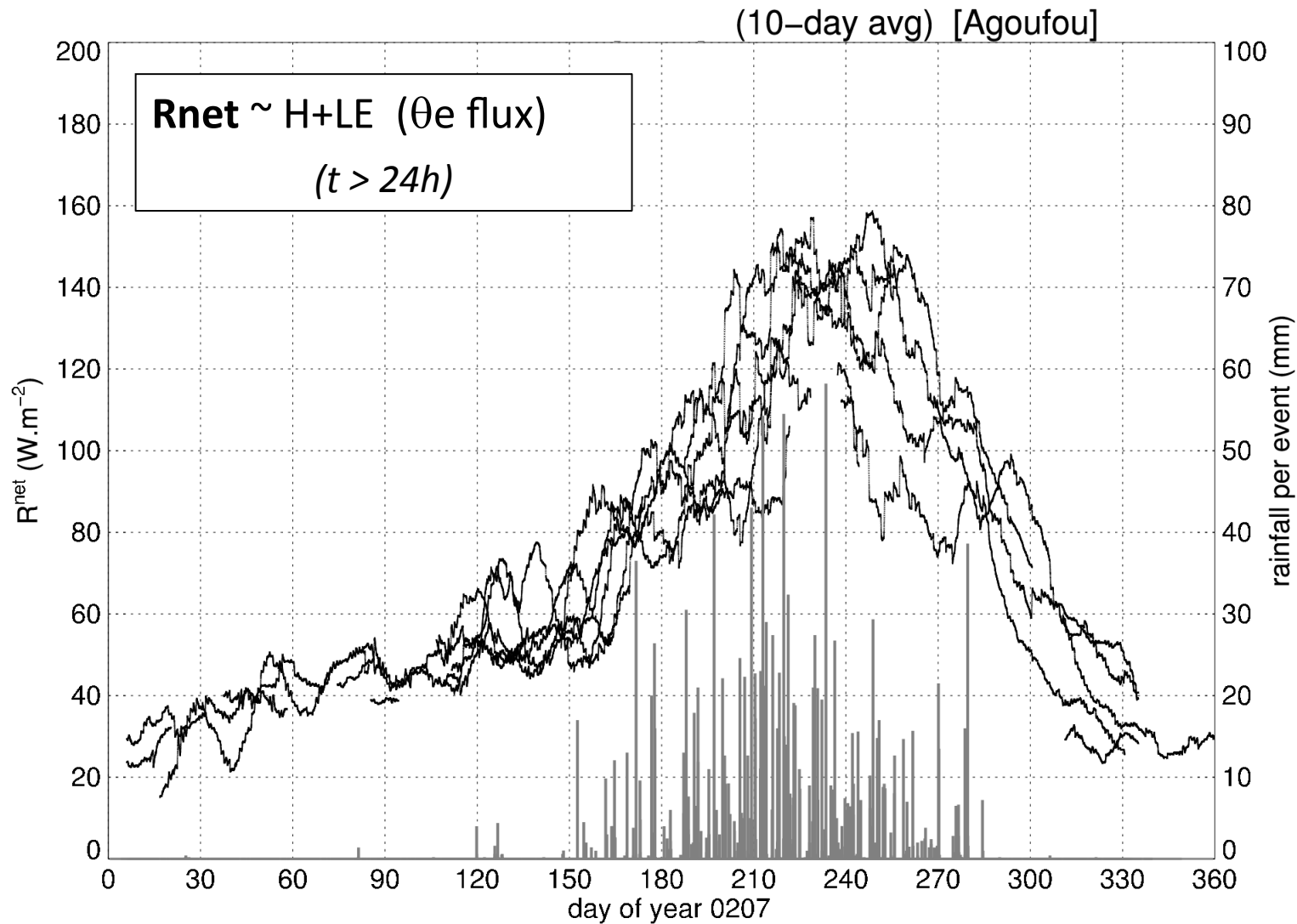
Une dynamique saisonnière distincte au Sahel et en zone soudanienne



*R_{in}, R_{up}
+ fortement
couplés*

*forçage radiatif
des nuages
plus important*

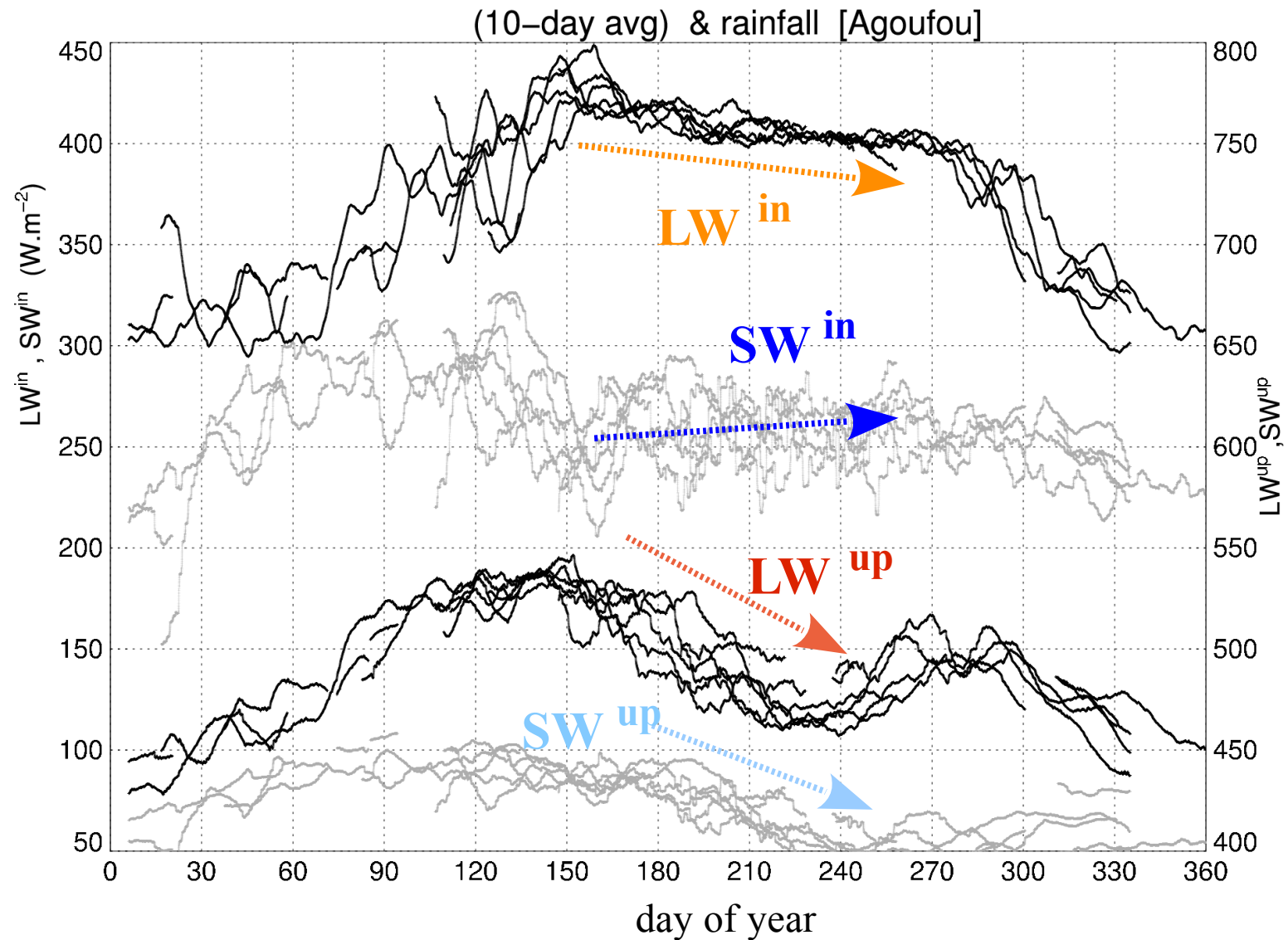
Fluctuations interannuelles de Rnet Au Sahel



Rnet augmente moins les années où les pluies sont moins abondantes ($\delta \sim 20\text{-}30 \text{ W.m}^{-2}$)

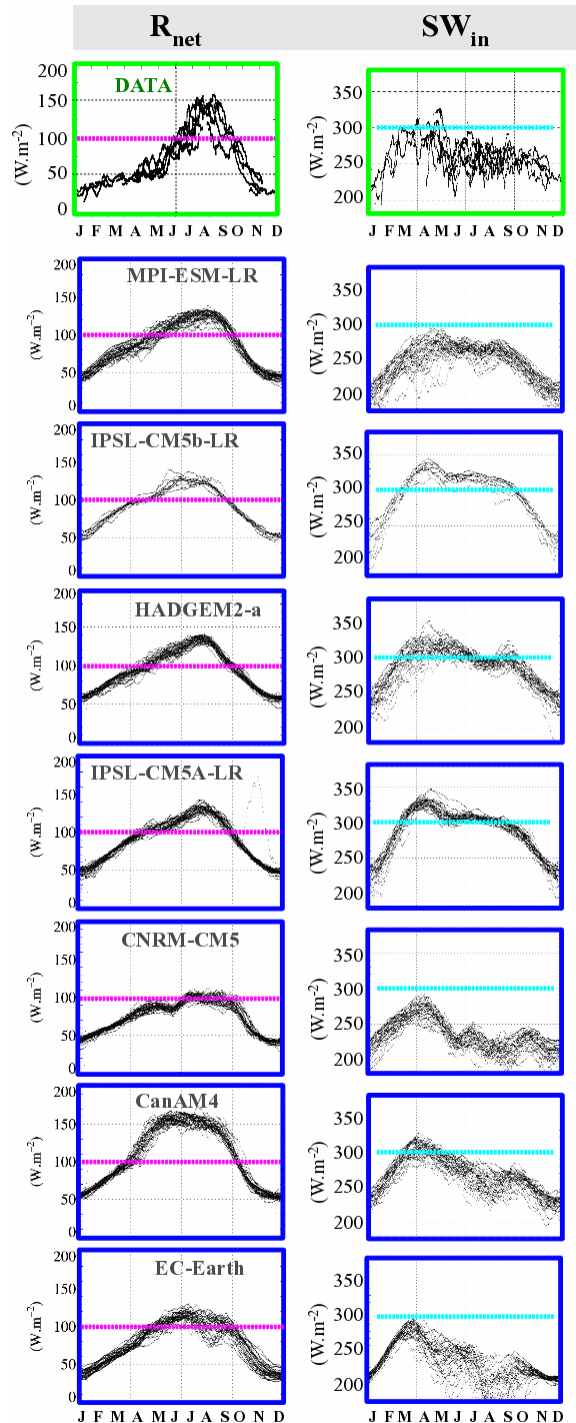
Fluctuations interannuelles des composantes de Rnet

$$R^{\text{net}} = (LW^{\text{in}} + SW^{\text{in}}) - (LW^{\text{up}} + SW^{\text{up}})$$



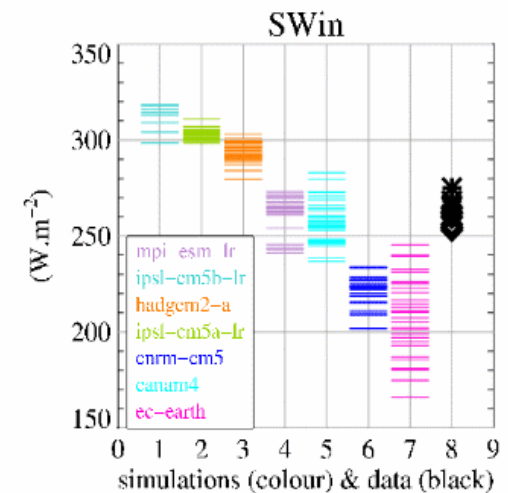
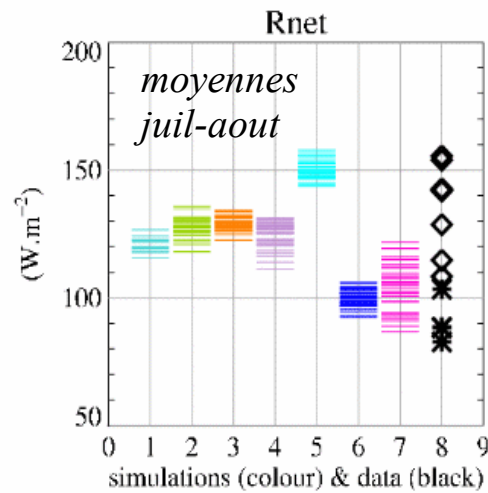
Une variabilité interannuelle dominée par les variations de LW^{up}

Modélisation climatique (simulations CMIP5)

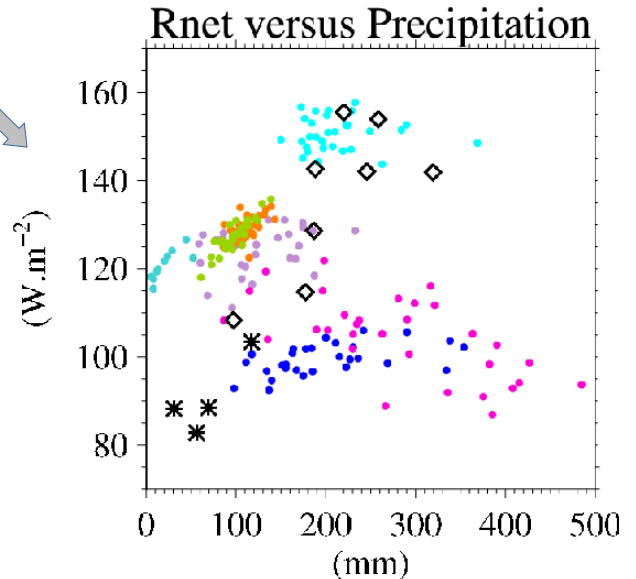


Des problèmes de structure de la dynamique annuelle

Simuler R_{net} semble plus “facile” que simuler SW_{in}
compensations d'erreurs

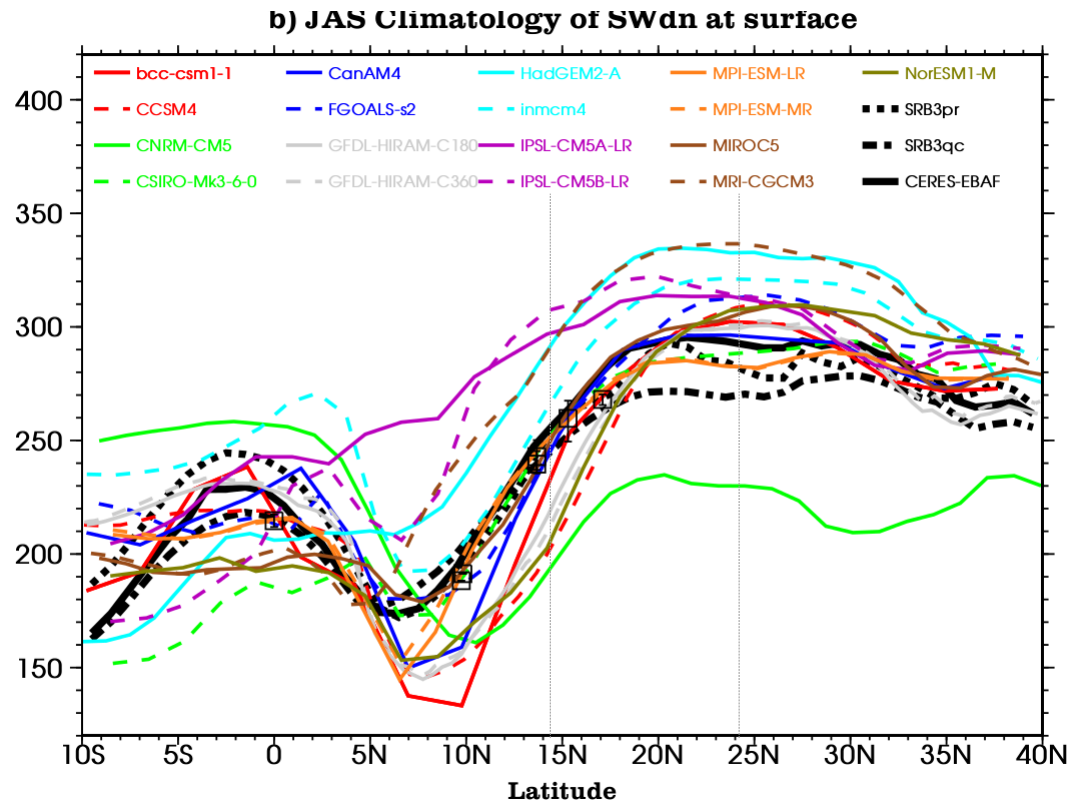


Un R_{net} correctement simulé ne garantit pas que les couplages (R_{net} , précipitation) observés soient correctement simulés



Modélisation climatique (simulations CMIP5)

A plus grande échelle spatiale



*Roehrig et al.
J. Climate 2013*

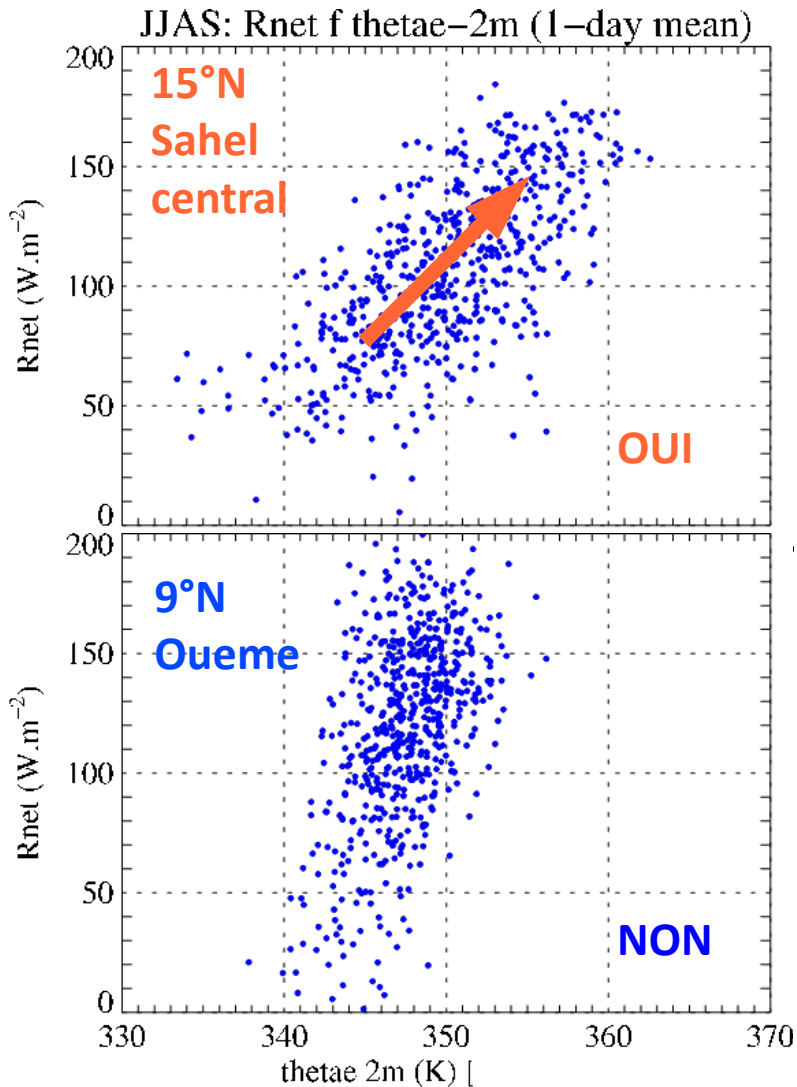
*Les biais du bilan énergétique
ne résultent pas simplement
de biais sur les précipitations
(plusieurs sources)*

Travail important côté modélisation (surface, nuages, aérosols, convection et précipitations) paraît indispensable pour améliorer les simulations climatiques actuelles, analyser la pertinence des couplages/mécanismes de rétroactions qu'ils fournissent

La poursuite de l'exploitation des observations et de l'analyse des couplages observés: jalons pour guider ce travail

$$R^{\text{net}} \sim H + LE \quad (\theta_e \text{ flux})$$

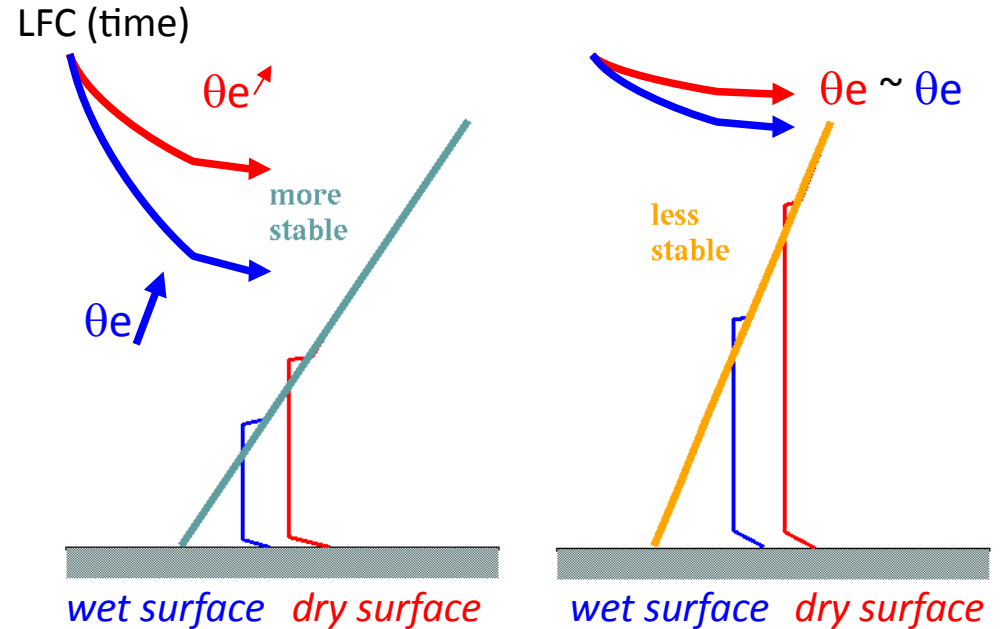
un couplage entre θ_e et R^{net} ?



Croissance diurne de la couche limite convective et initiation de convection profonde

considérations 1D (fct z)

Ek et Holtslag (2004), Findell et Eltahir (2003)



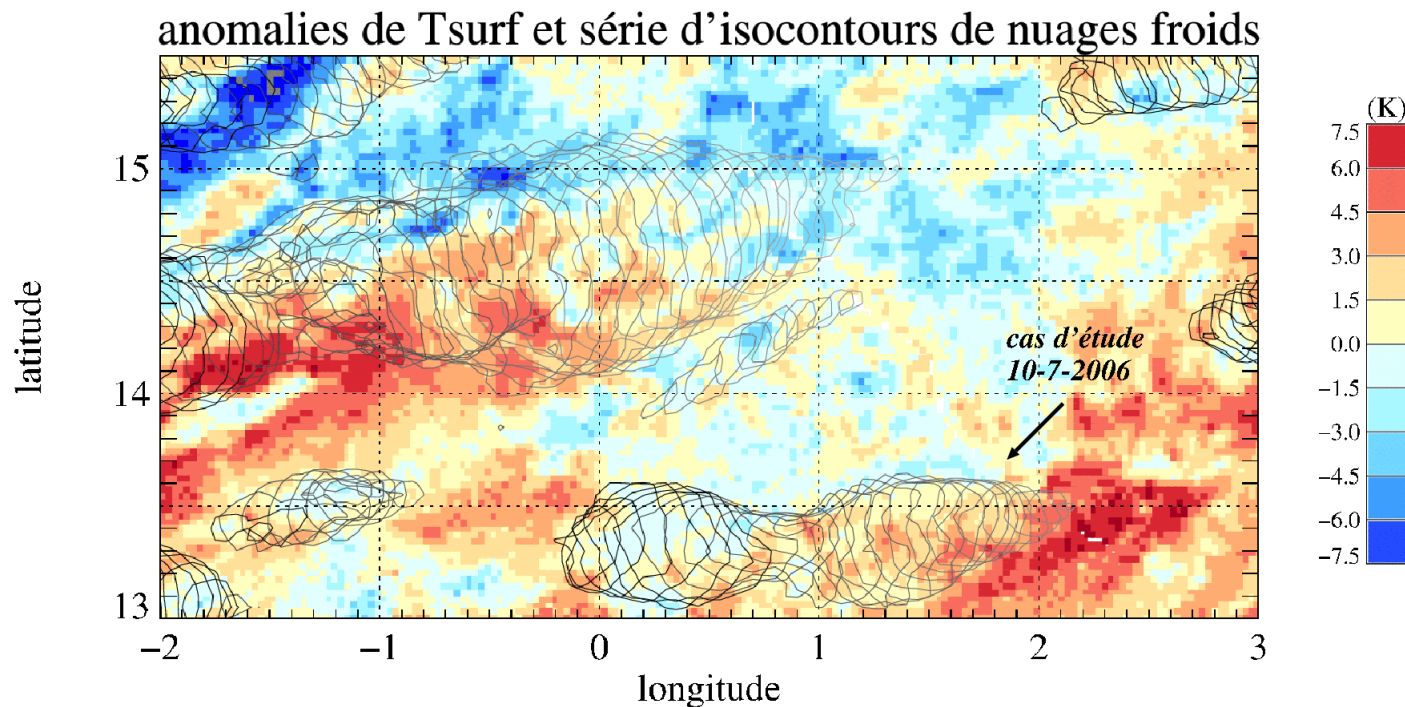
Proche d'un mécanisme type Charney, mais:

- opérant ici à l'échelle saisonnière, i.e. une convection facilitée lorsque les conditions atmosphériques sont + favorables, typiquement en 2^{de} partie de mousson
- faisant intervenir au moins autant le refroidissement de la surface que les changements d'albedo, et sans influence notable du flux LW incident

considérations 1D (fct z) ignorent les structures spatiales observées à la surface au Sahel, en particulier en 1^{ère} partie de mousson

2. Interactions surface – atmosphère au Sahel

b. interactions entre surface et initiation de MCSs sahéliens: quelle influence de l'humidité du sol et de ses fluctuations à mésoéchelle?



*Données satellitaires MSG: IRT 10.5 μ et Land Surface Temperature
Anomalies de température de surface: proxy pour l'humidité du sol*

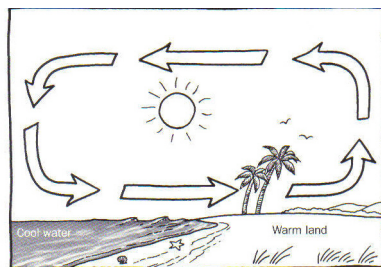
Peu de travaux analysant les observations, plus d'études utilisant la simulation modélisation - configurations et modèles très variés (Emori 1998, Bayda Roy et al. 2003, Gantner and Kalthoff 2010...)

L'évolution temporelle des flux de chaleur sensible et latente est fortement marquée par les événements précipitants

L'hétérogénéité des précipitations induit une hétérogénéité spatiale des flux de chaleur sensible de latente à mésoéchelle

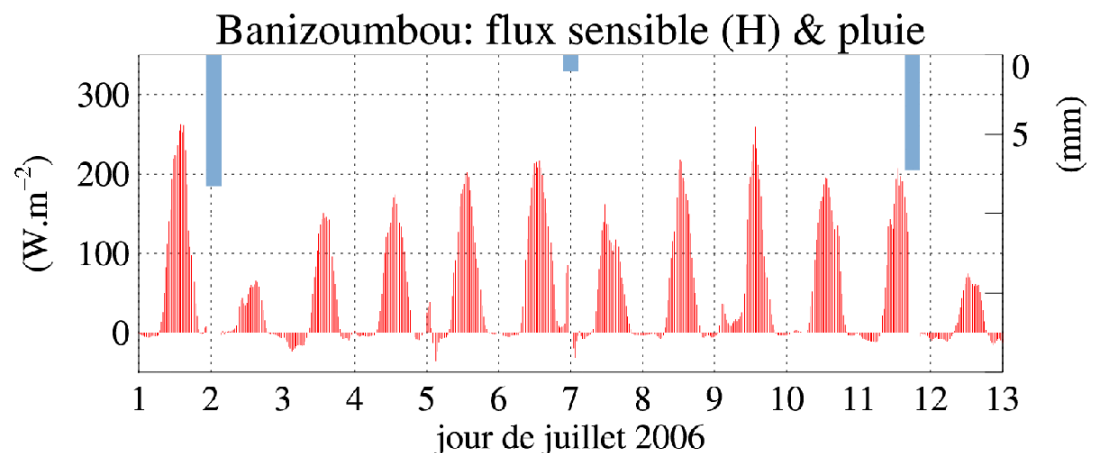
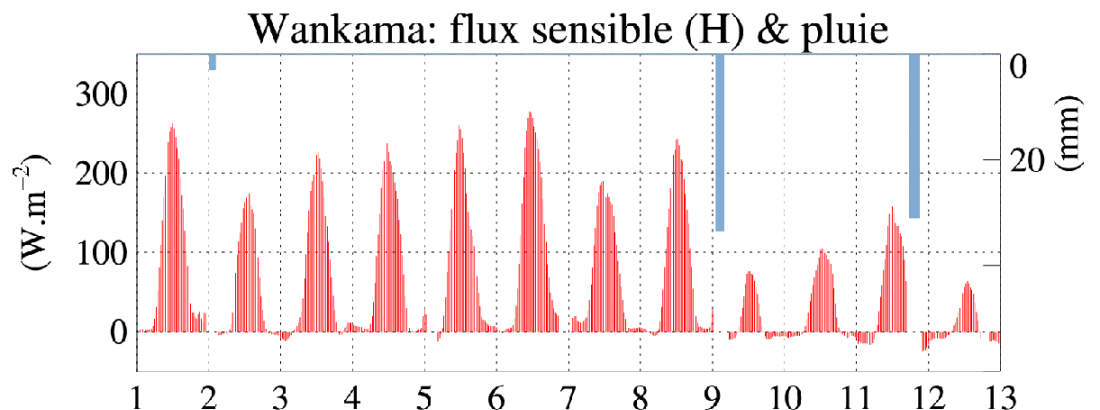
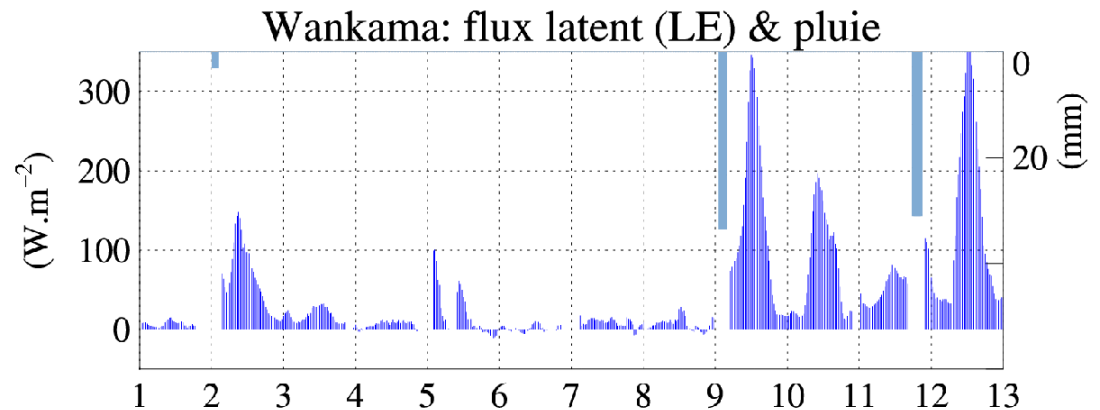
(ici: moins de 40 km entre Wankama et Banizoumbou)

Hétérogénéités de surface capables d'induire des circulations de brise dans les basses couches atmosphériques



Quelle influence de ces hétérogénéités sur l'initiation diurne de convection profonde?

AMMA-CATCH, sites du Niger près de Niamey



Influence de l'humidité du sol et de ses fluctuations à mésoéchelle sur l'initiation de convection profonde?

Analyse statistique avec des données satellitaires à haute fréquence spatiale et temporelle

Données MSG (15 min, 3 km x 3 km)

Systèmes convectifs : IRT 10.8 μm (taille > 5000 km²)
backtracking pour déterminer précisément le lieu d'initiation

Humidité du sol: anomalie de LST (LANDSAF) diurne
relative à une moyenne temporelle sur 21 jours

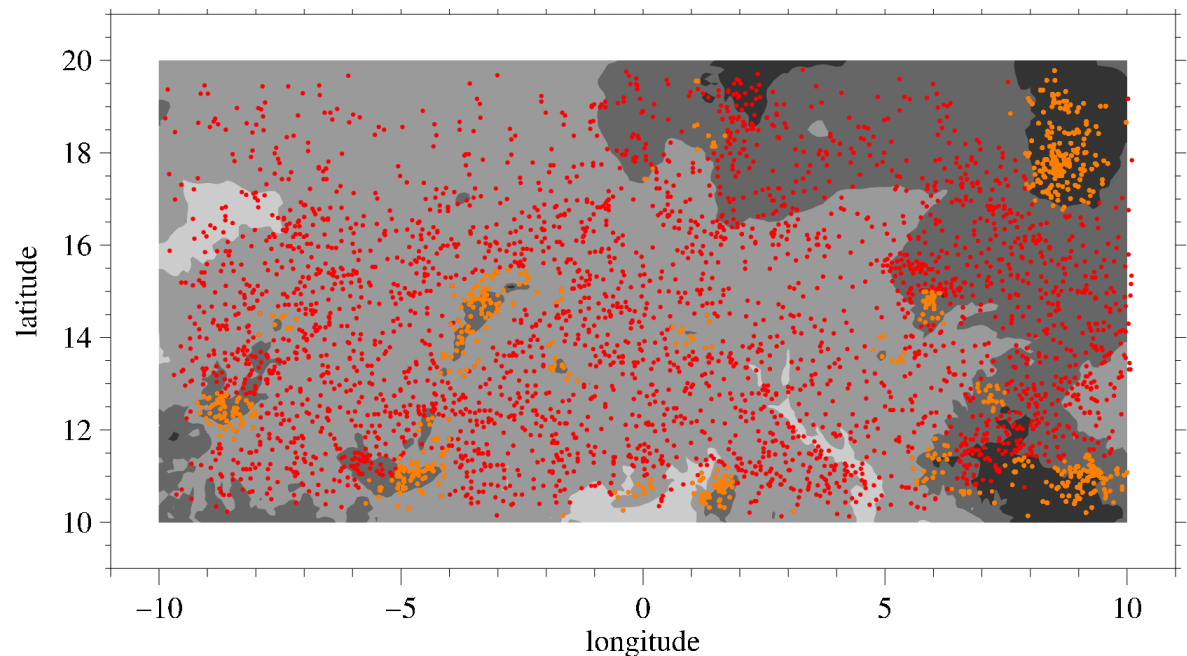
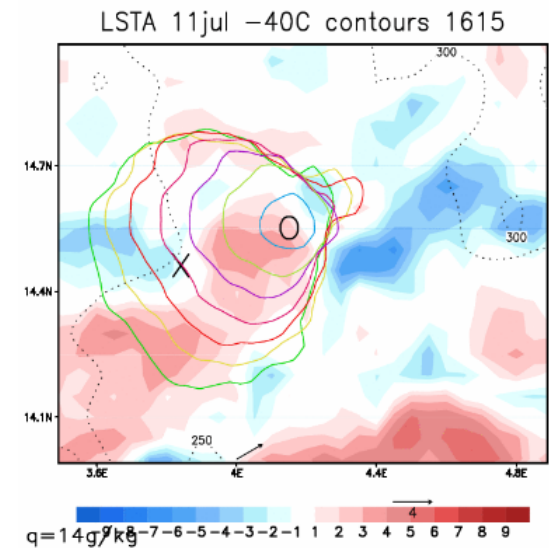
AMSR (40 km x 40 km, fréquence 12h)

Conditions atmosphériques: vent en basses couches et indices convectifs estimés à partir de l'analyse ECMWF (40 km x 40 km, fréquence 6h)

Documentation conjointe
MCS-surface
JJAS 2006-2010
(plus de 2000 cas)

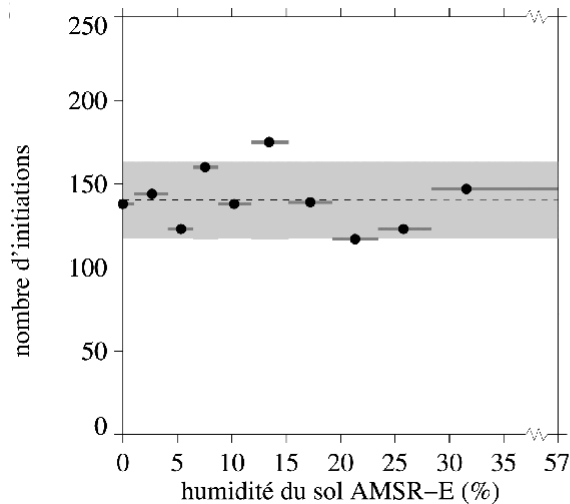
Région 10°W, 10°E – 10°N, 20°N

Elimination des cas faisant
intervenir des mécanismes
orographiques



Fréquence de déclenchement de convection profonde

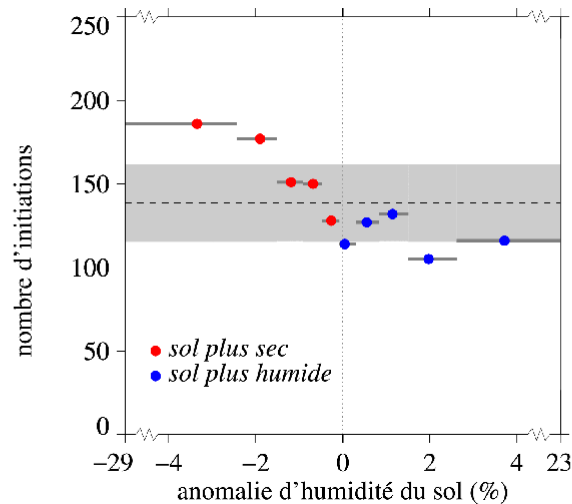
fct de l'humidité du sol (θ) locale
(pixels 40x40 km²)



peu sensible

Pas de distribution bimodale (1D)

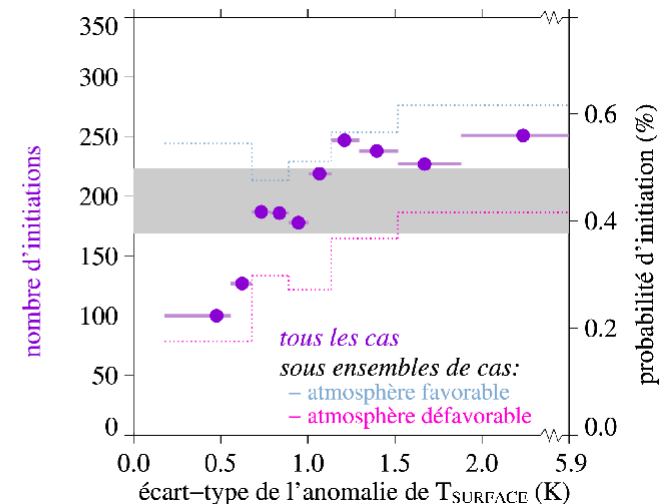
fct de θ' sur des pavés de
200 x 200 km² (pixels 40 x 40 km²)



sensible

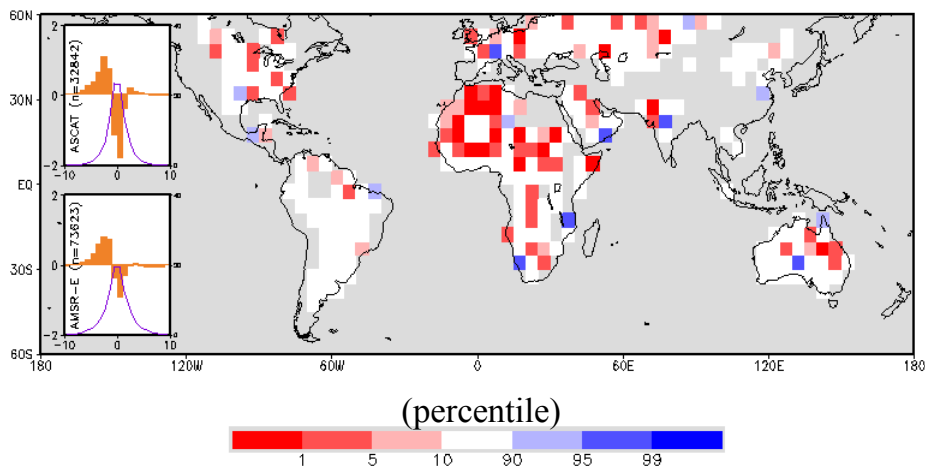
*Cohérent avec des études antérieures
et postérieures*

fct σ_{Ts} (proxy de θ) pavés de
40x40 km² (pixels 3x3 km²)



sensible

Mécanisme de brise impliqué?



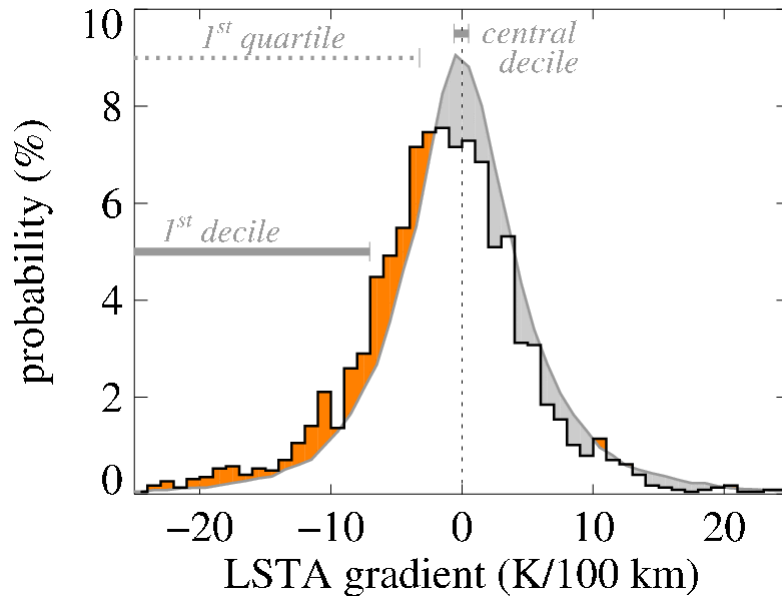
données et méthodes différentes

Taylor et al. (2011, 2012), Guichard et al. (2012)

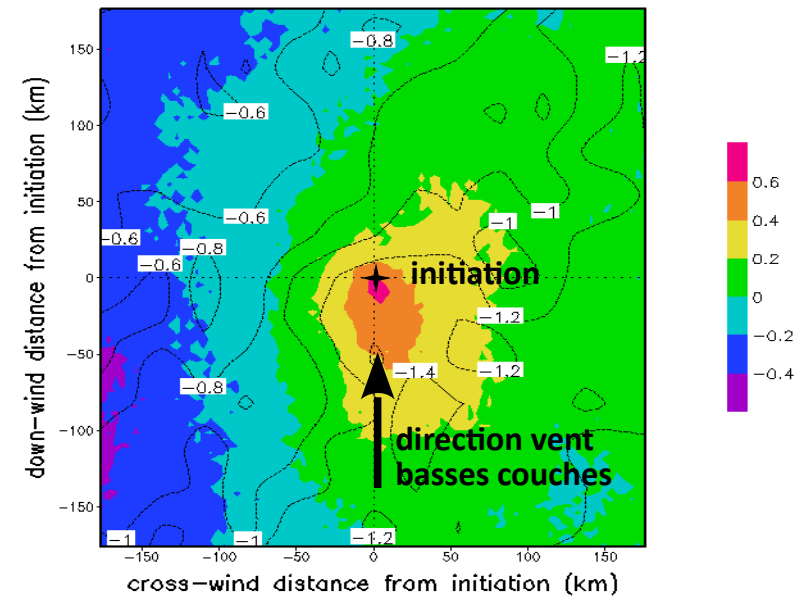
Fréquence de déclenchement de convection profonde

Mécanisme de brise impliqué? Travail sur les **gradients de LSTa** suivant la **direction du vent** et en **anomalie** par rapport aux gradients existants à 'proximité' (échantillonnage $2^\circ \times 4^\circ$)

Distribution des gradients

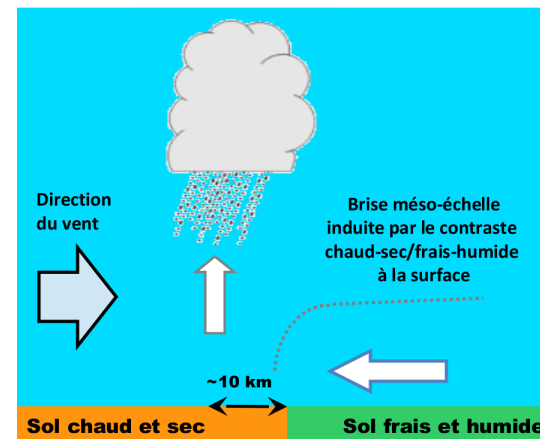


LSTa composite



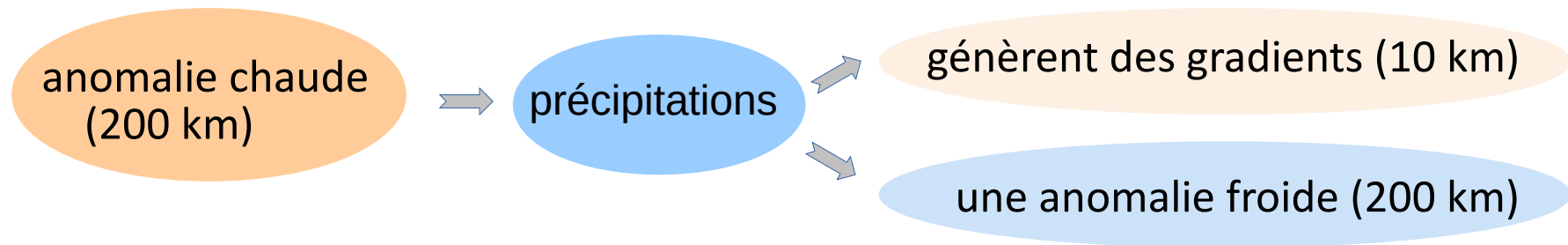
1er quartile (25%): **37% d'initiations**

Schéma conceptuel déduit des observations



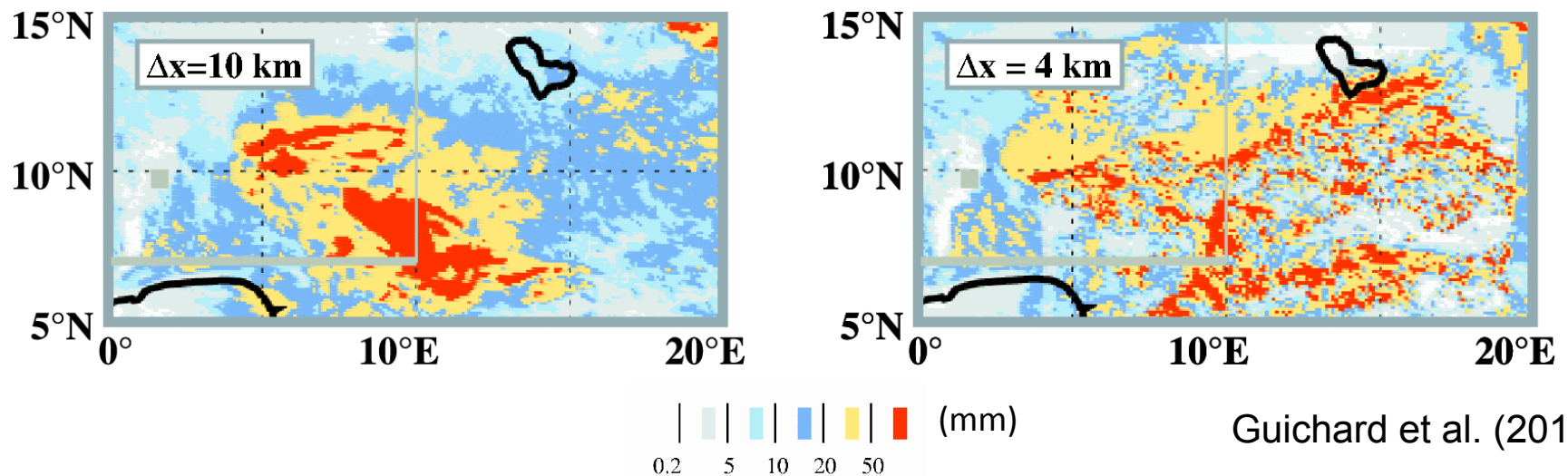
INITIATION DES SYSTEMES CONVECTIFS AU SAHEL et MODELISATION

Les observations indiquent des rétroactions complexes, avec des mécanismes différents opérant suivant les échelles



modélisation : quelle sensibilité des mécanismes d'initiation à la résolution spatiale?
aux paramétrisations (de la convection)?
pas de prise en compte des hétérogénéités de surface sous-maille dans les modèles

cumul de précipitations d'un système convectif simulé



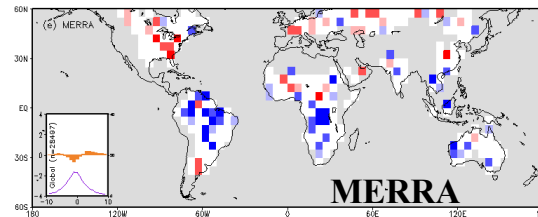
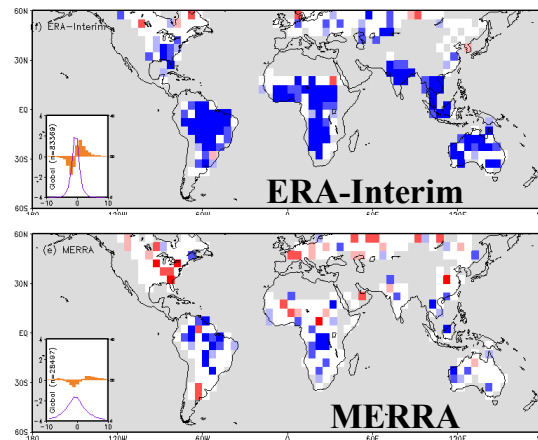
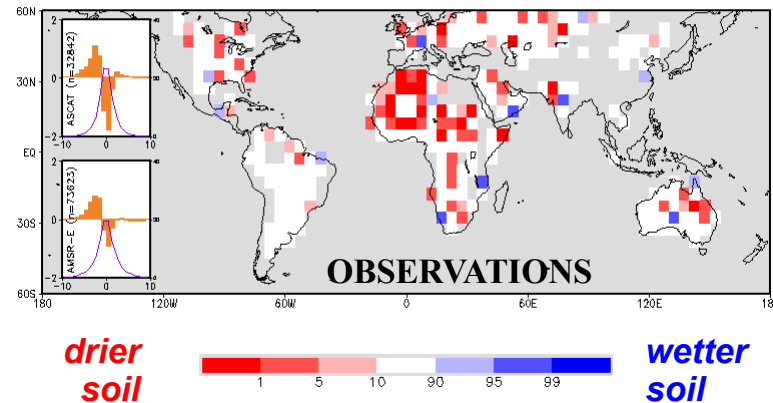
Guichard et al. (2010)

Sensibilité du développement de convection profonde aux hétérogénéités d'humidité du sol (échelles ~ 100-200 km): Données versus modèles

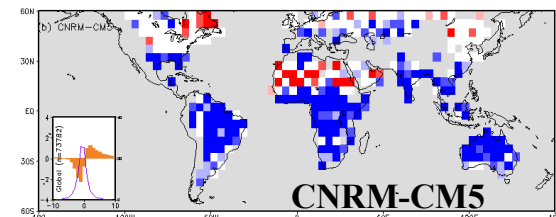
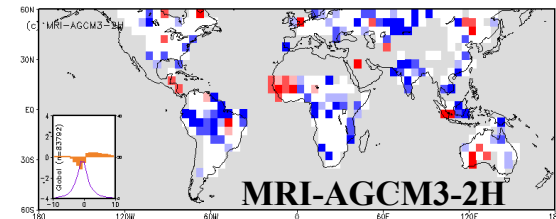
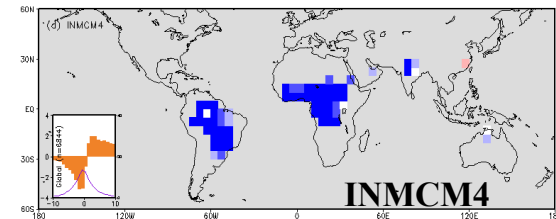
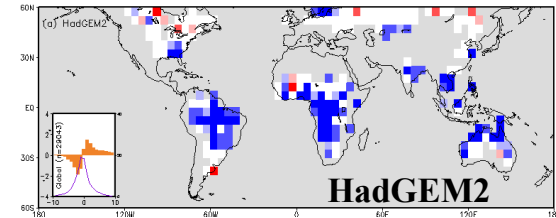
Evaluation
statistique

période ~ 10 ans

Données satellite ($dx \sim 0.25^\circ$)
AMSRE-e, ASCAT, TRMM, CMORPH, PERSIANN



CMIP5



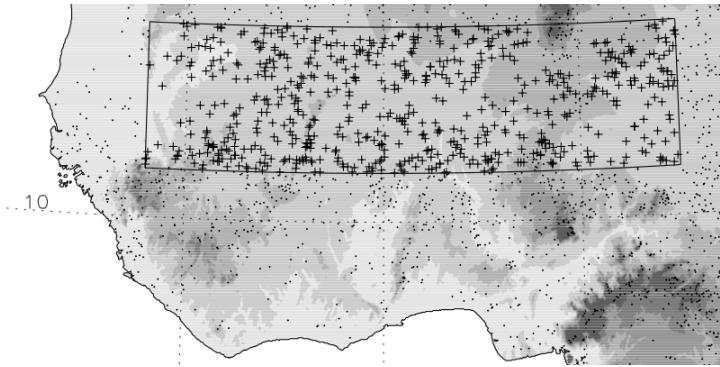
Taylor et al. (2012)

- Le déclenchement de convection est plus fréquemment
- observé sur sols plus secs
 - simulé sur sols plus humides (réanalyses & runs CMIP5)

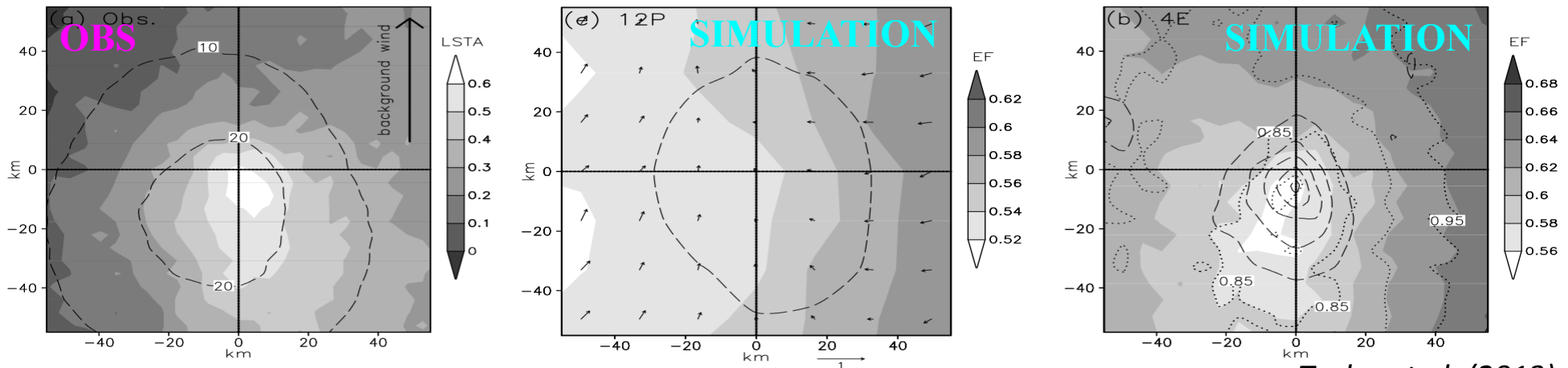
Sensibilité du développement de convection profonde aux hétérogénéités d'humidité du sol (échelles ~ 10-40 km): Données versus modèles

simulations régionales (simulations Cascade, UK - modèle type Mésoscale, AROME), réalisées sur l'Afrique de l'ouest pendant 40 jours durant la mousson

lieux d'initiation de convection (croix)



caractéristique de la surface du composite des initiations de convection profonde



Taylor et al. (2013)

Pour les simulations type 'convection permitting' (mailles ~ 5km x 5 km sans paramétrisation de convection profonde), les interactions surface-convection simulées sont au moins qualitativement cohérentes avec les observations

la paramétrisation de la convection tend à empêcher ces mécanismes d'opérer correctement dans les simulations ou elle est activée, ça reste vrai pour des simulations de mailles 12 km x 12 km

Sensibilité du développement de convection profonde aux hétérogénéités de surface (échelles ~ 10-200 km): perspectives

Compréhension plus poussée des mécanismes et de leur sensibilité:

- au vent en basses couches
- à la stabilité atmosphérique
- à l'activité turbulente dans la couche limite convective

Interactions circulation de brise et thermiques

- aux hétérogénéités de surface

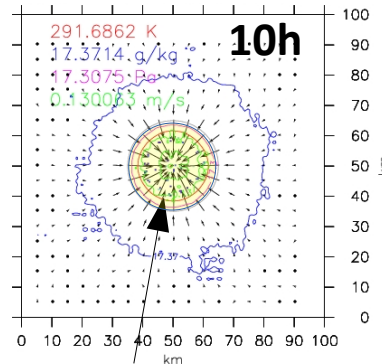
- intensité
- extension spatiale
- forme

*gradient sec/humide
bulle sèche...*

Réalisation et analyse de simulations LES
(maille < 1 km x 1 km)

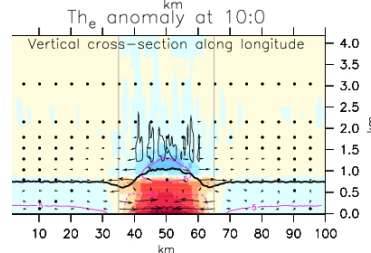
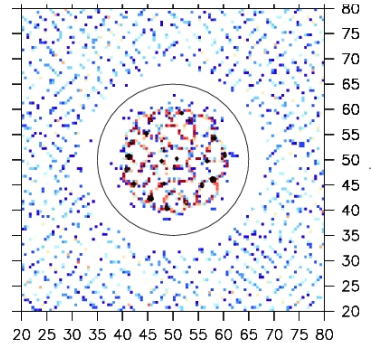
vent moyen = 0

circulation de brise



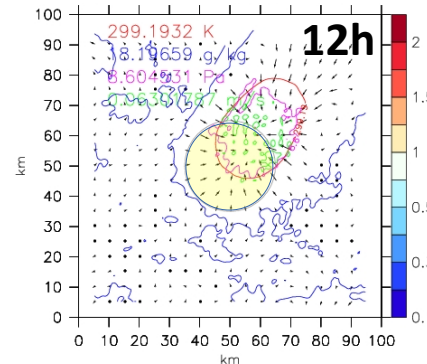
'bulle chaude':
H flux fort, LE + faible

vitesse verticale

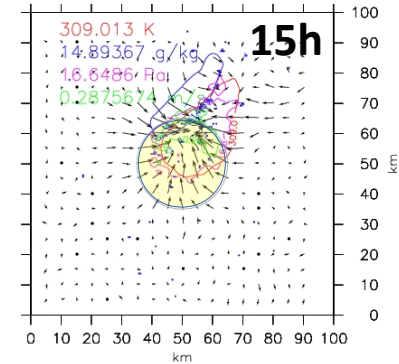


vent moyen non nul

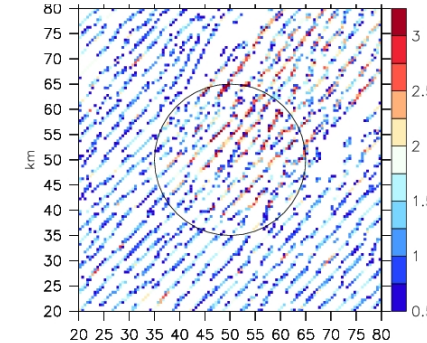
circulation de brise



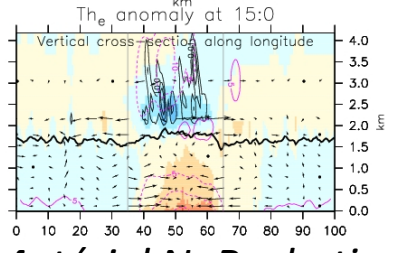
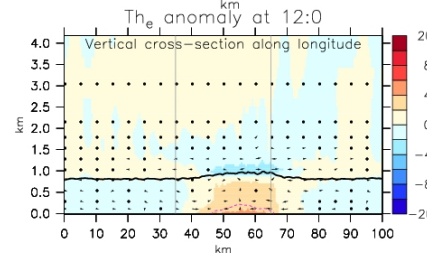
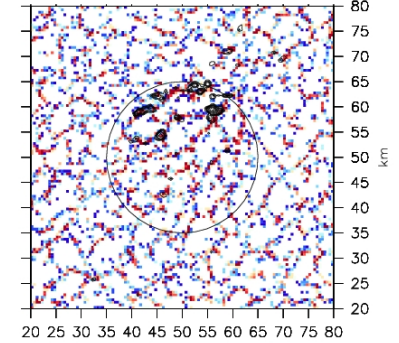
circulation de brise



vitesse verticale



vitesse verticale



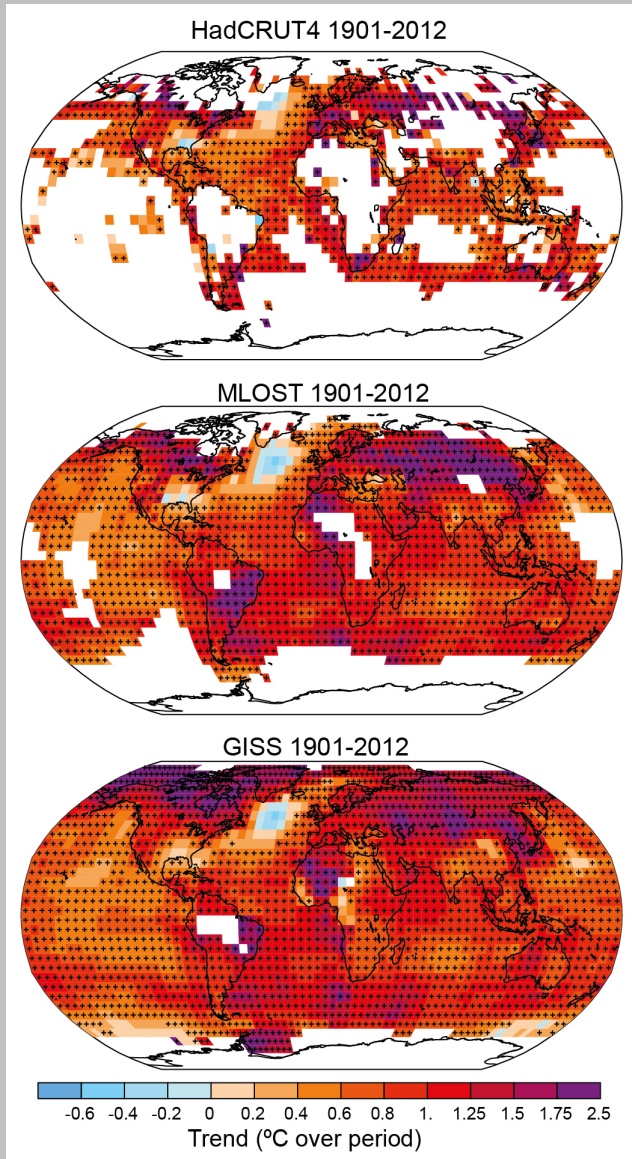
Matériel N. Rochetin

Fournir les éléments permettant de guider le développement de paramétrisations de ce phénomène dans les modèles utilisant une résolution spatiale plus lâche (modèles de climat)

3) réchauffement observé au Sahel depuis 1950

IPCC 2013

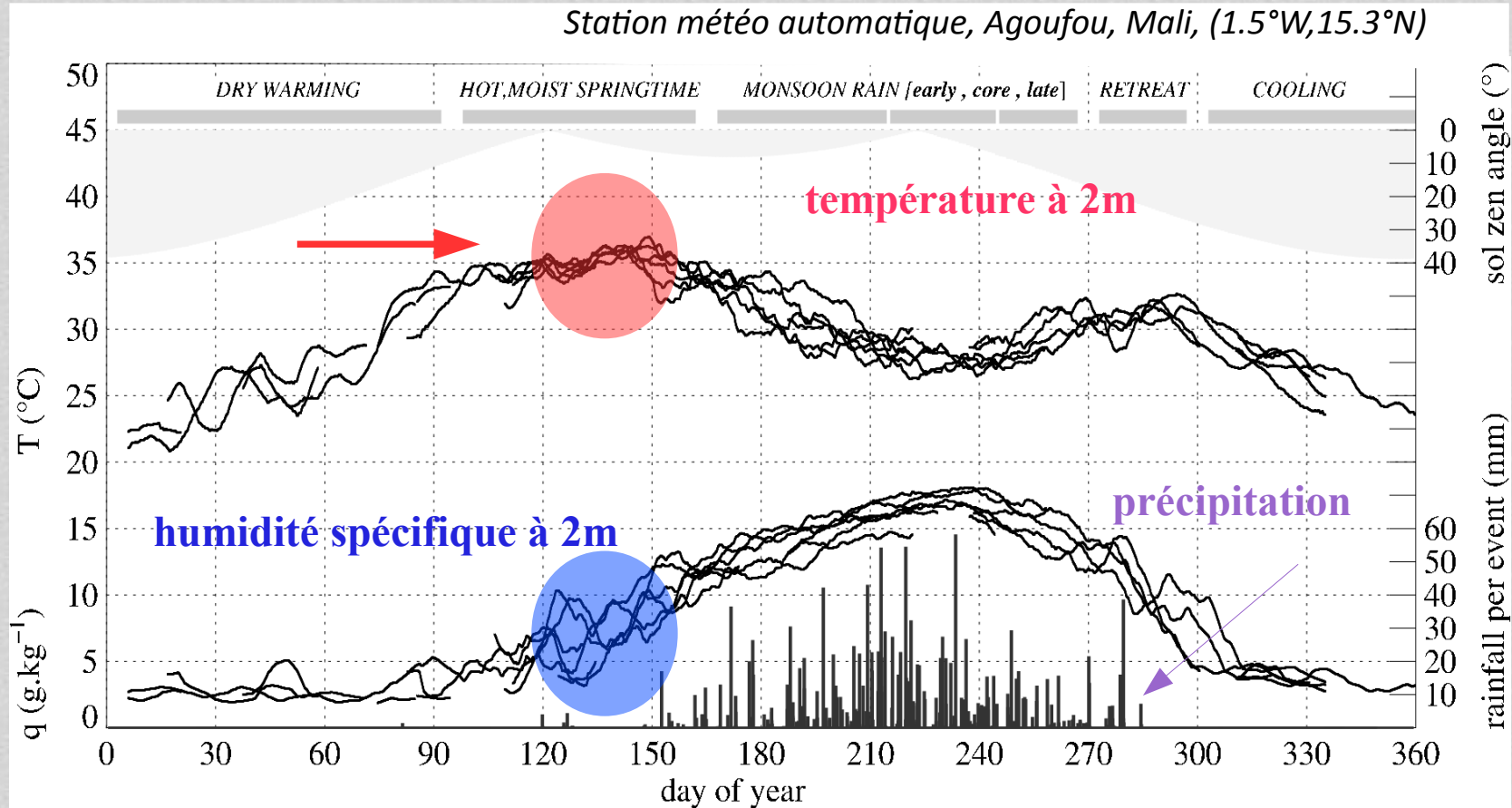
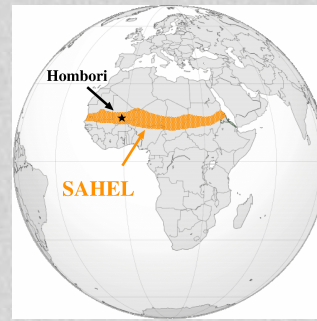
Plus de travaux sur les précipitations que sur la température au Sahel (Collins 2011, Fontaine et al. 2013)



- ⇒ 1950-2010
Quand?
hiver, été, printemps, automne
Le jour la nuit
- ⇒ Questionnements suscités
- ⇒ Performances des modèles
modèles de climat (CMIP5)
réanalyses météorologiques
- ⇒ Pour commencer: quelques
éléments de climatologie

Peu de données (zones blanches)
Afrique de l'Ouest: ~ 0.3 à 2.5 °C / 110 ans

Cycle annuel en zone Sahélienne



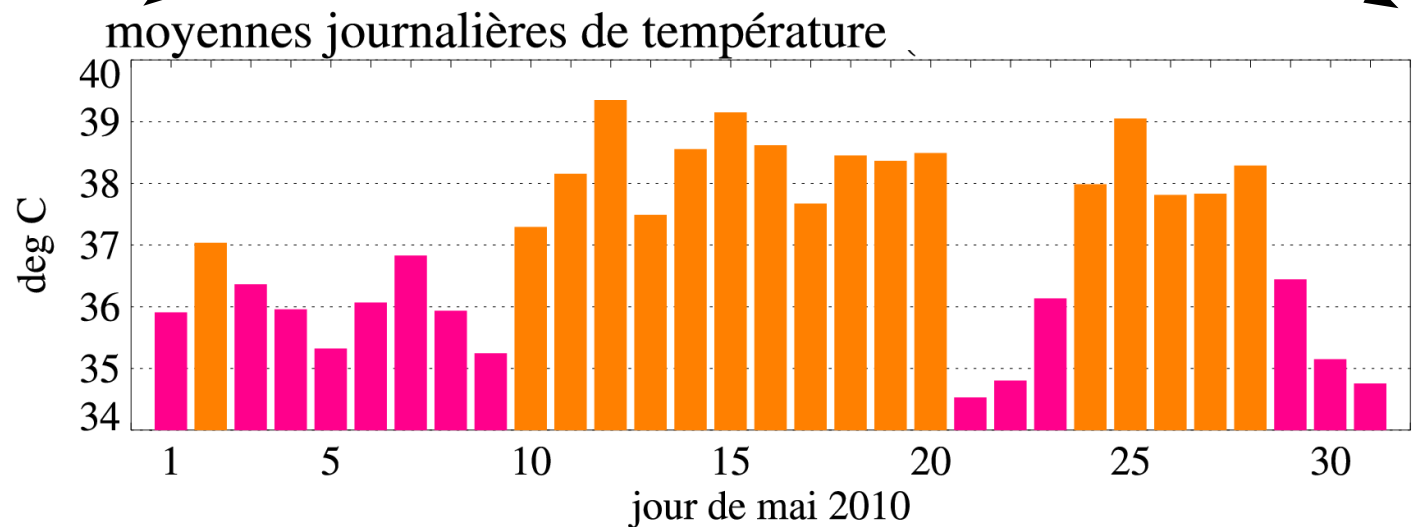
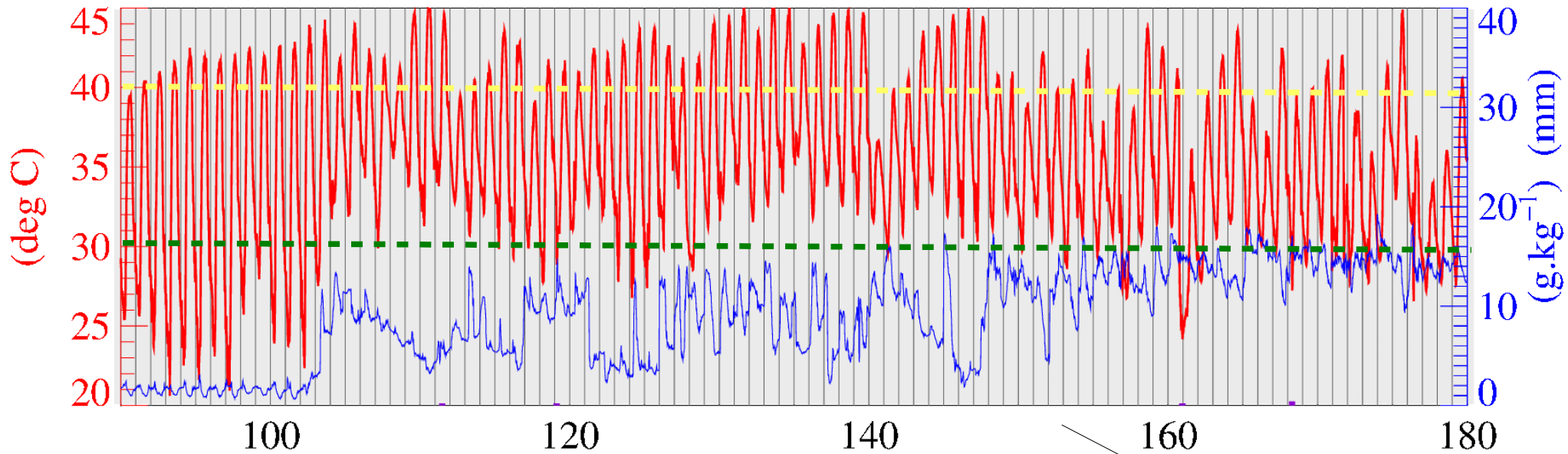
⇒ Temperatures très élevées au printemps (climatique)

~ **35°C moyenne mensuelle en mai**

un maximum qui dure longtemps (plusieurs semaines), ~ plateau

⇒ fluctuations d'une année à l'autre varient suivant la saison (échelle de quelques années)

Un exemple de série temporelle de la température à 2m au printemps à ce même site



Données, produits, modèles

Données **SYNOP**

*Stations météo: données **journalières** (min et max), ou toutes les 3 ou 6h*

=> des données de qualité variable suivant les stations (trous, ruptures évidentes à l'oeil)

=> station SYNOP d'Hombori au Mali (1.5°W, 15.3°N)

longue série, vérifiée, peu de trous, arrêtée en février 2012

station SYNOP de Niamey au Niger (Leauthaud et al.)

Estimations des **moyennes mensuelles** (GISS, BEST)

Produits '**grillés**', **moyennes mensuelles**, maille ~ 1° longitude x 1° longitude

=> CRU: 1901-2009, BEST, GHCN-CAMS...

Modèles

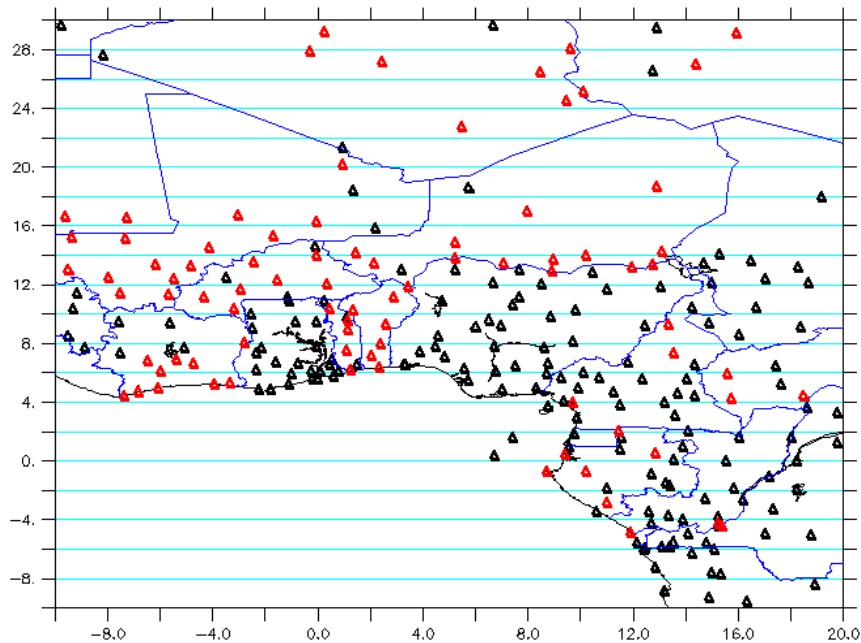
=> **reanalyses** météorologiques (*quasi les seuls produits à pas de temps journalier grillés*)

ERA 40: 1958-2002 / ERA-Interim, MERRA, NCEP2, NCEP-CSFR, all ~ 1979-2010

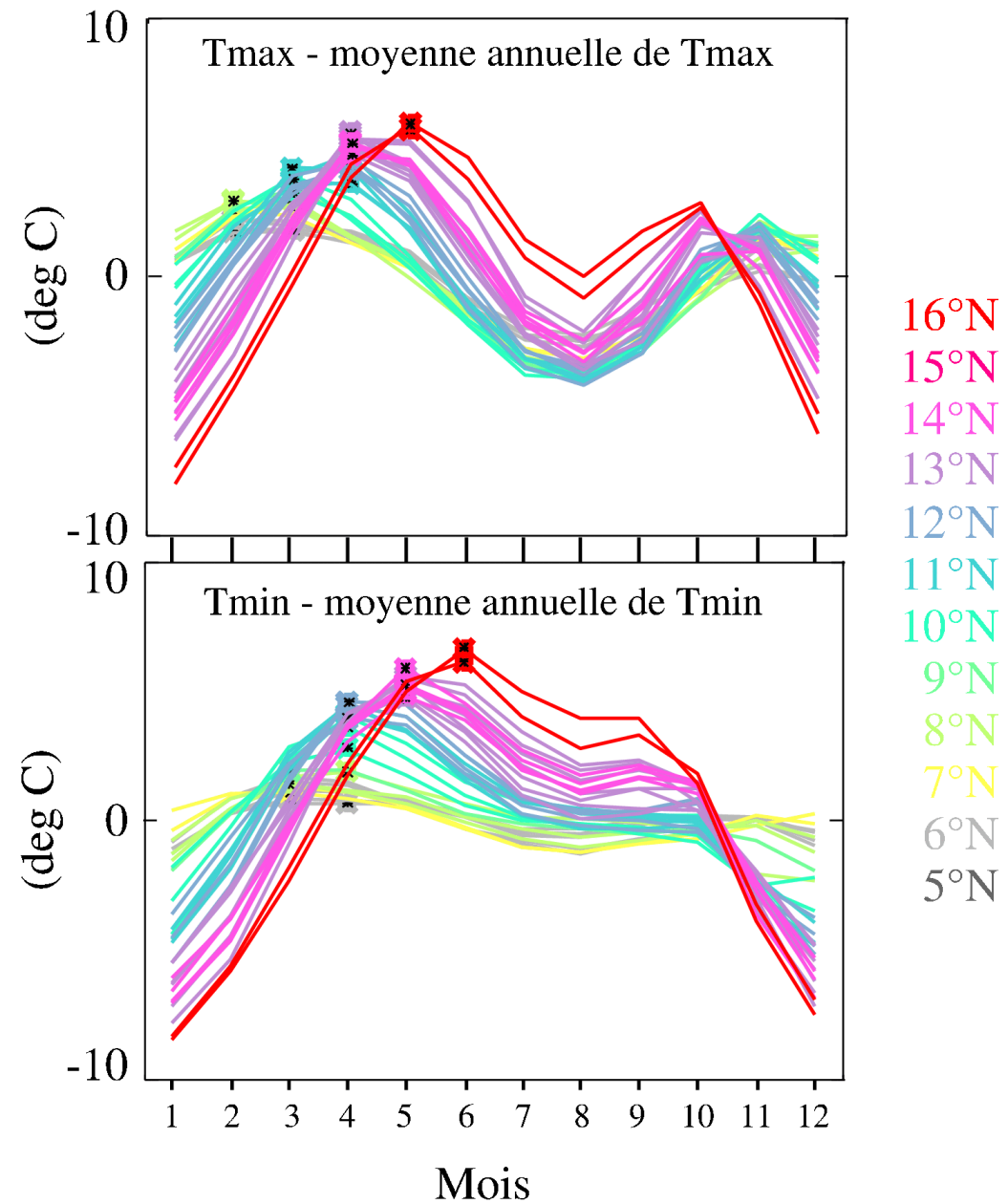
=> Modèles climatiques **CMIP5** (*simulations **amip**, **historical**, **historicalNat**, **piControl**; **cfSites***)

*Analyses sur des boîtes ('Sahel'..) ou pour des sites précis (points **cfSites**): modulations mais les conclusions restent proches*

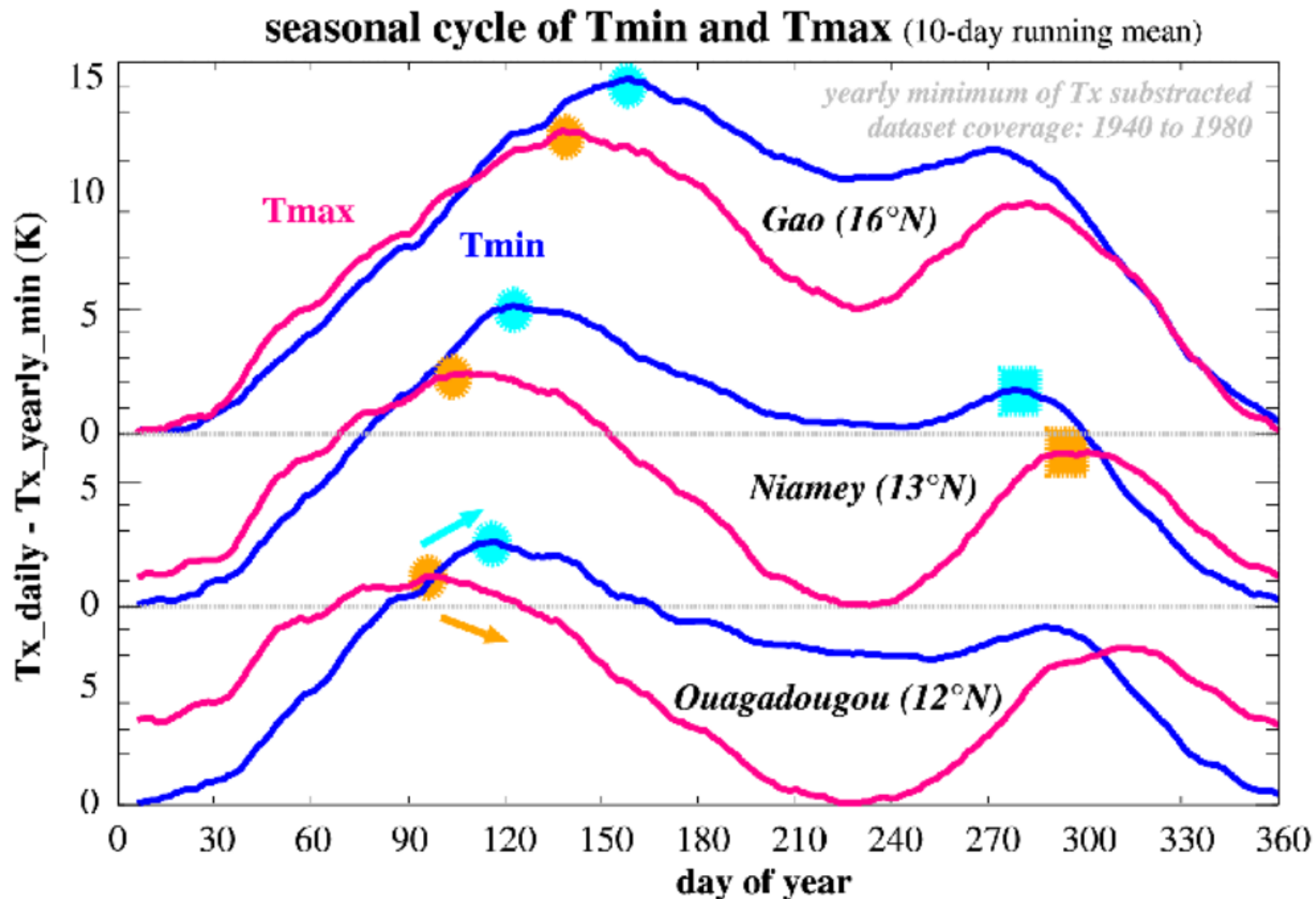
Données SYNOP



données sur ~ 25 ans ou plus [1980,2010]



=> cycles annuels de Tmin et Tmax distincts
=> décalage des extrêmes de Tmin et Tmax



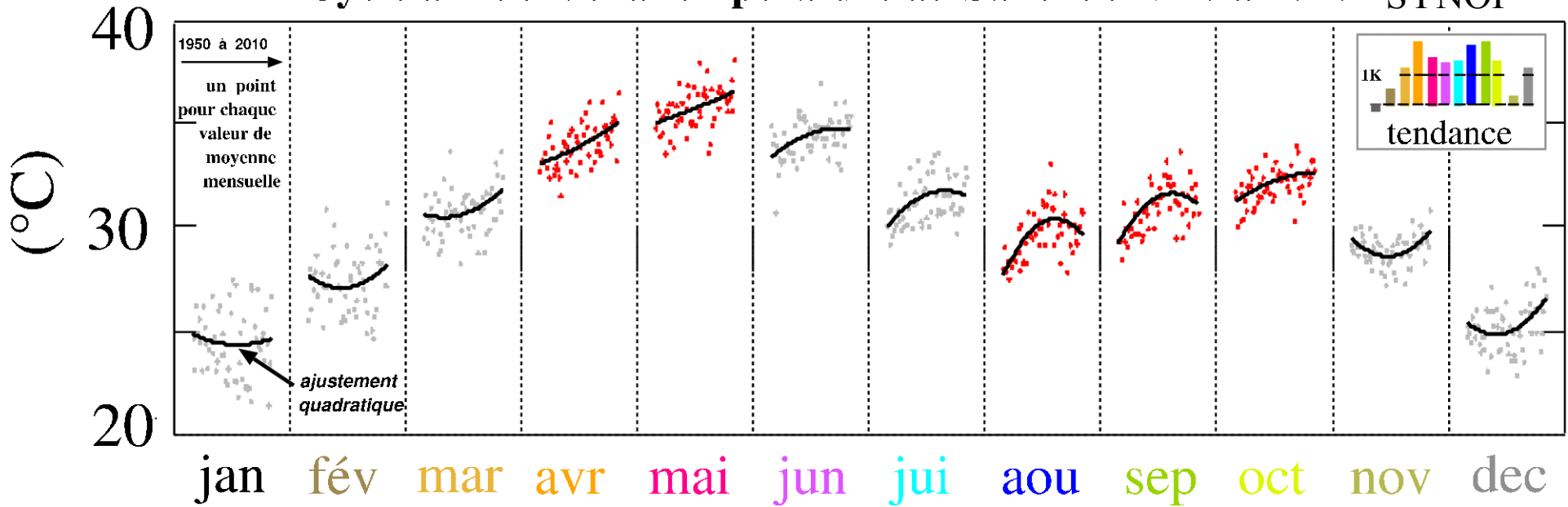
=> de fortes augmentations de T_{min} au printemps, lors des premières incursions du flux de mousson, avant les premières pluies

=> cycles annuels de T_{min} et T_{max} distincts conduisent à une longue durée du maximum printanier de la température journalière

Variations multidécennales

Cycle annuel de la température au Sahel de 1950 à 2010

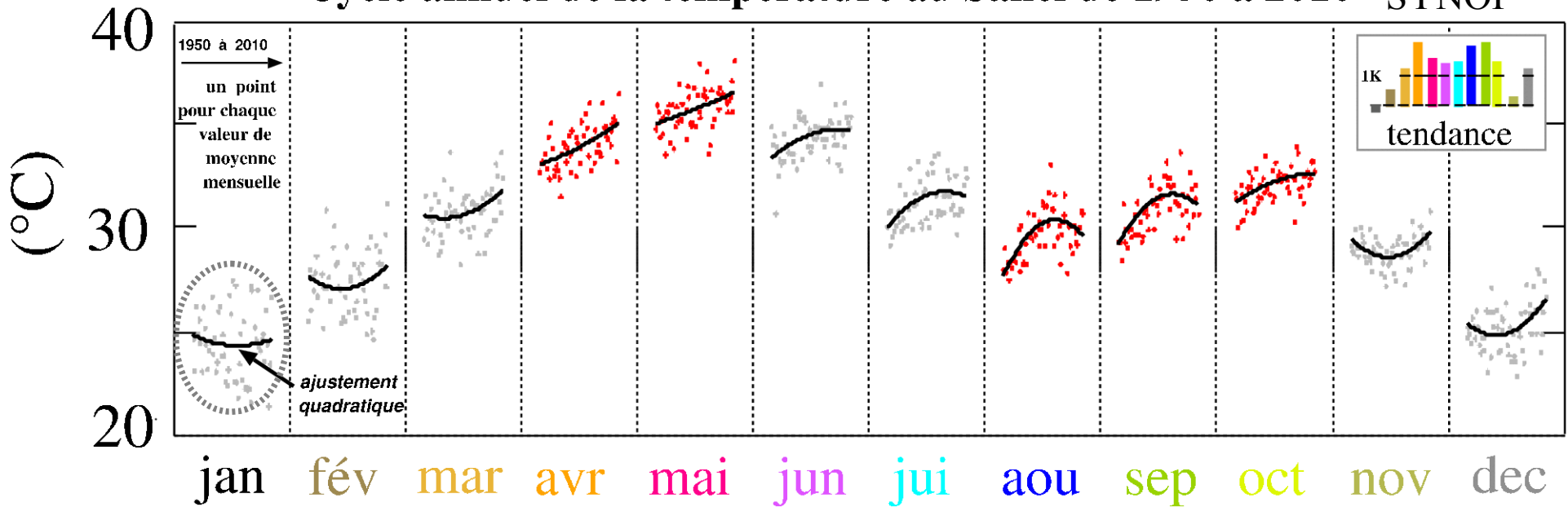
Hombori
SYNOP



Variations multidécennales

Cycle annuel de la température au Sahel de 1950 à 2010

Hombori
SYNOP

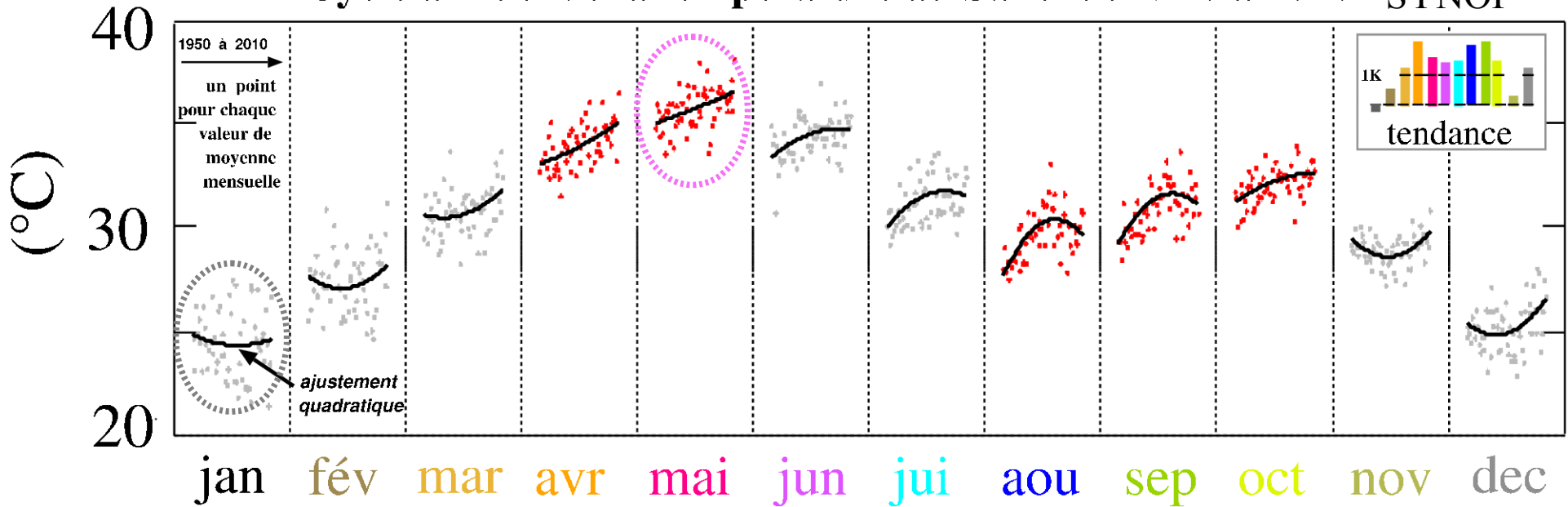


dominé par la
variabilité inter-
annuelle courte

Variations multidécennales

Cycle annuel de la température au Sahel de 1950 à 2010

Hombori
SYNOP



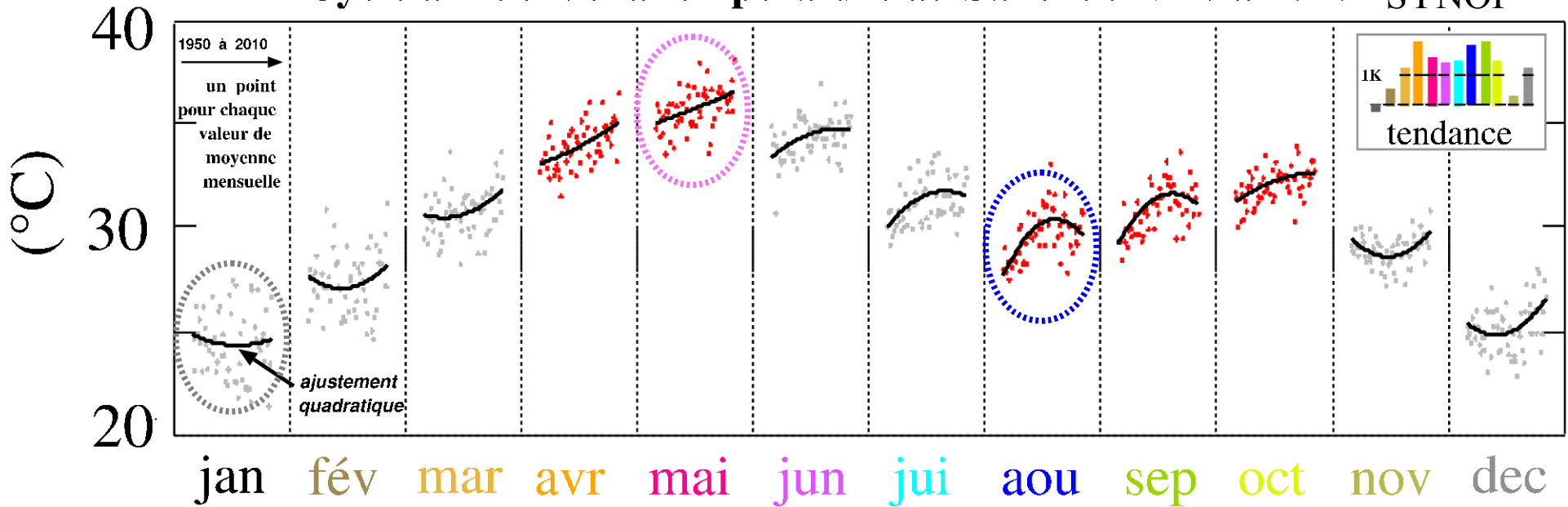
dominé par la
variabilité inter-
annuelle courte

Tendance
multidécennale
domine, forte!

Variations multidécennales

Cycle annuel de la température au Sahel de 1950 à 2010

Hombori
SYNOP



dominé par la
variabilité inter-
annuelle courte

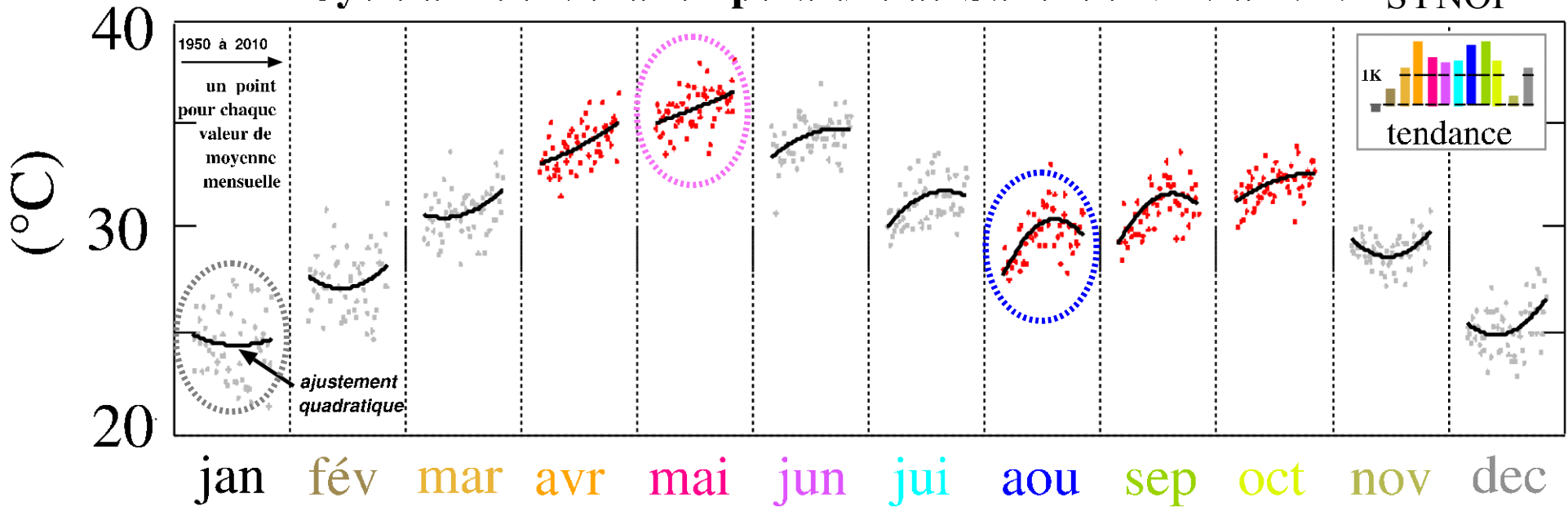
Tendance
multidécennale
domine, forte!

Couplage avec les précipitations

Variations multidécennales

Cycle annuel de la température au Sahel de 1950 à 2010

Hombori
SYNOP



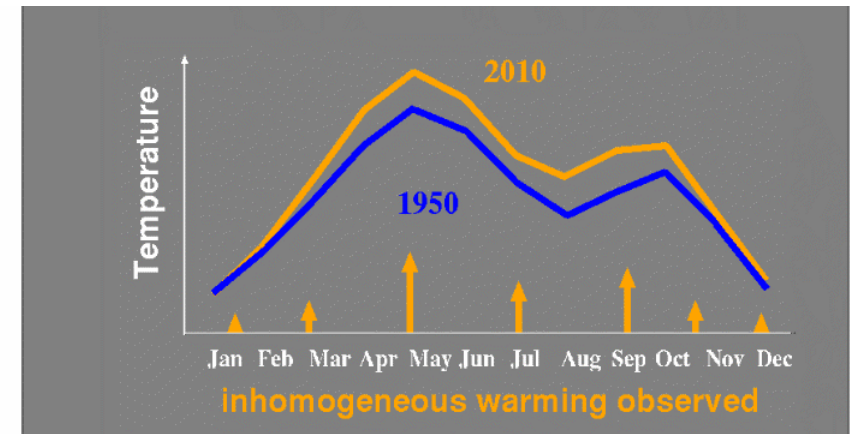
dominé par la
variabilité inter-
annuelle courte

Tendance
multidécennale
domine, forte!

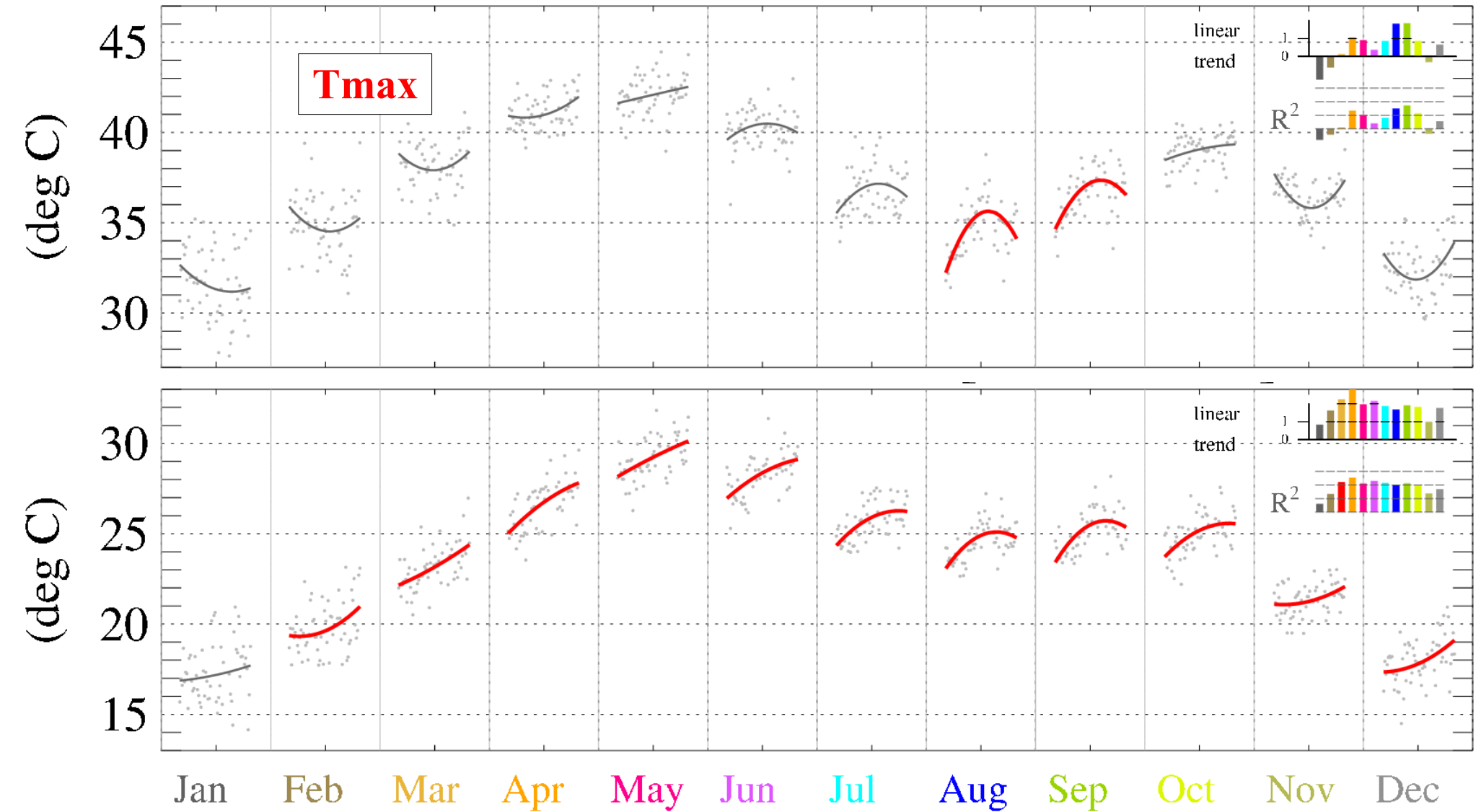
Couplage avec les précipitations

=> réchauffement non uniforme au cours
de l'année

(modification du cycle annuel)

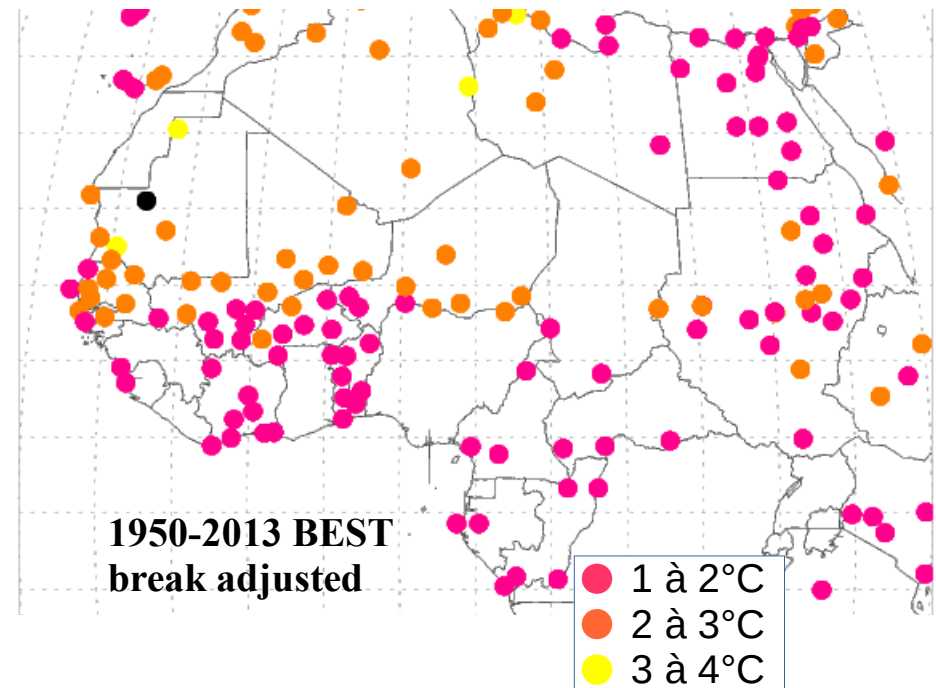
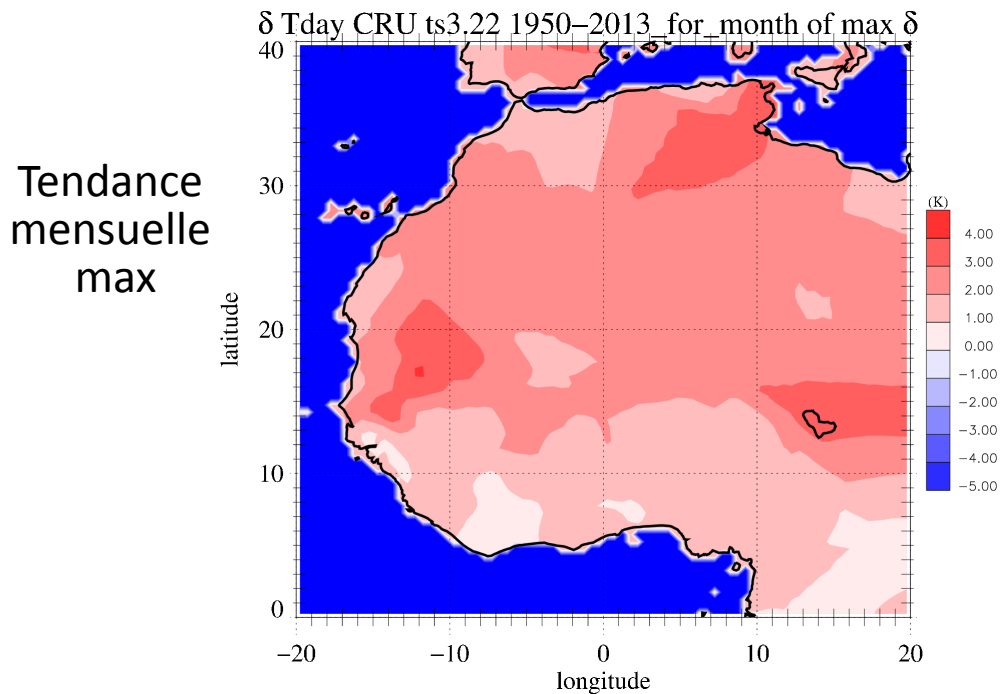
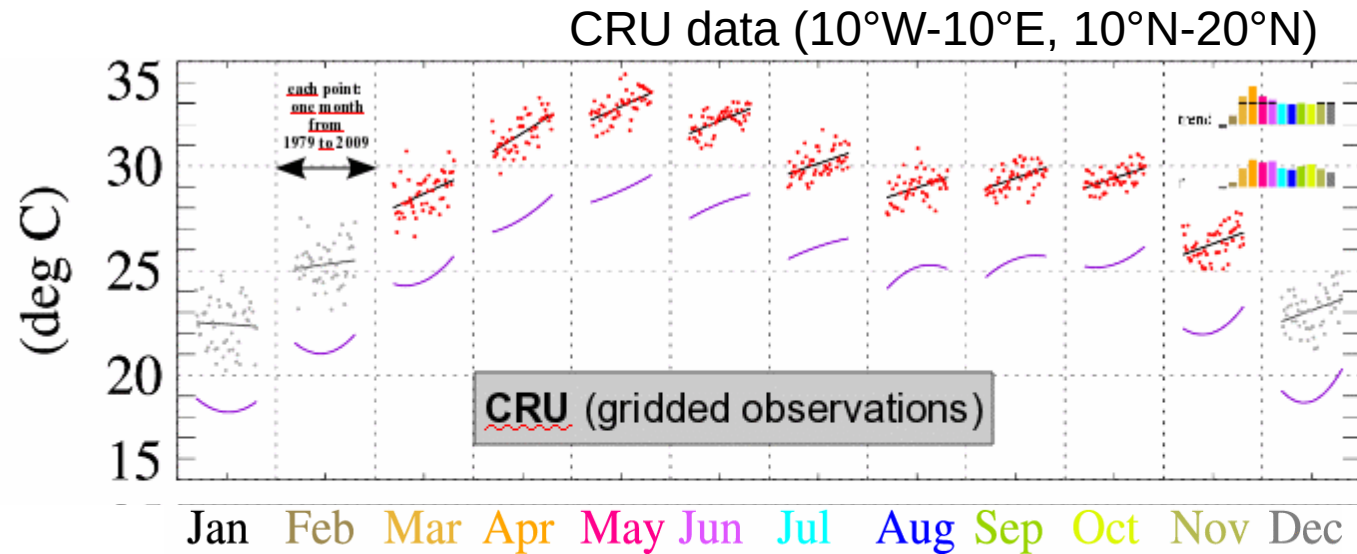


Hombori SYNOP data, 1950-2010



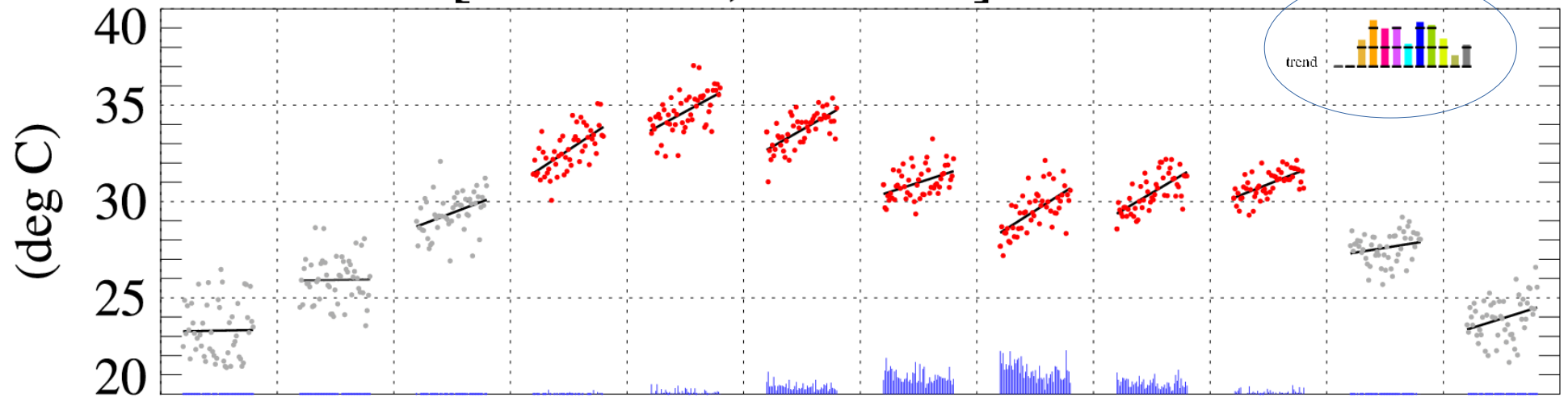
L'augmentation de température est plus importante la nuit

Variations multidécennales (1050 -2010)

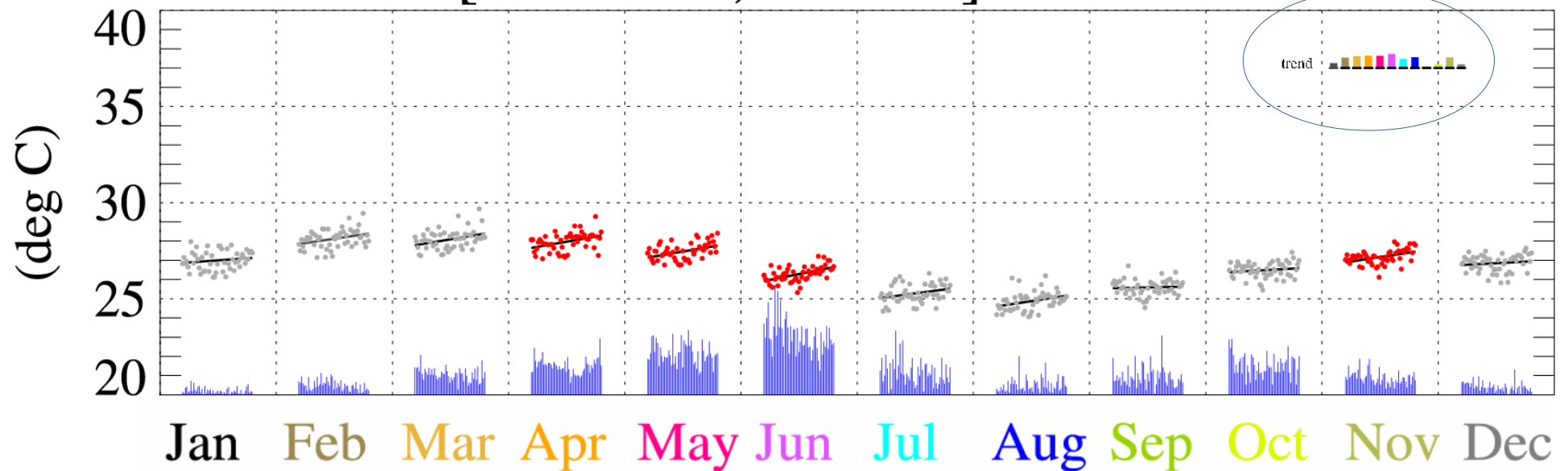


=> cohérence spatiale du réchauffement

[lon:−2.50,lat:15.25] Tair CRU

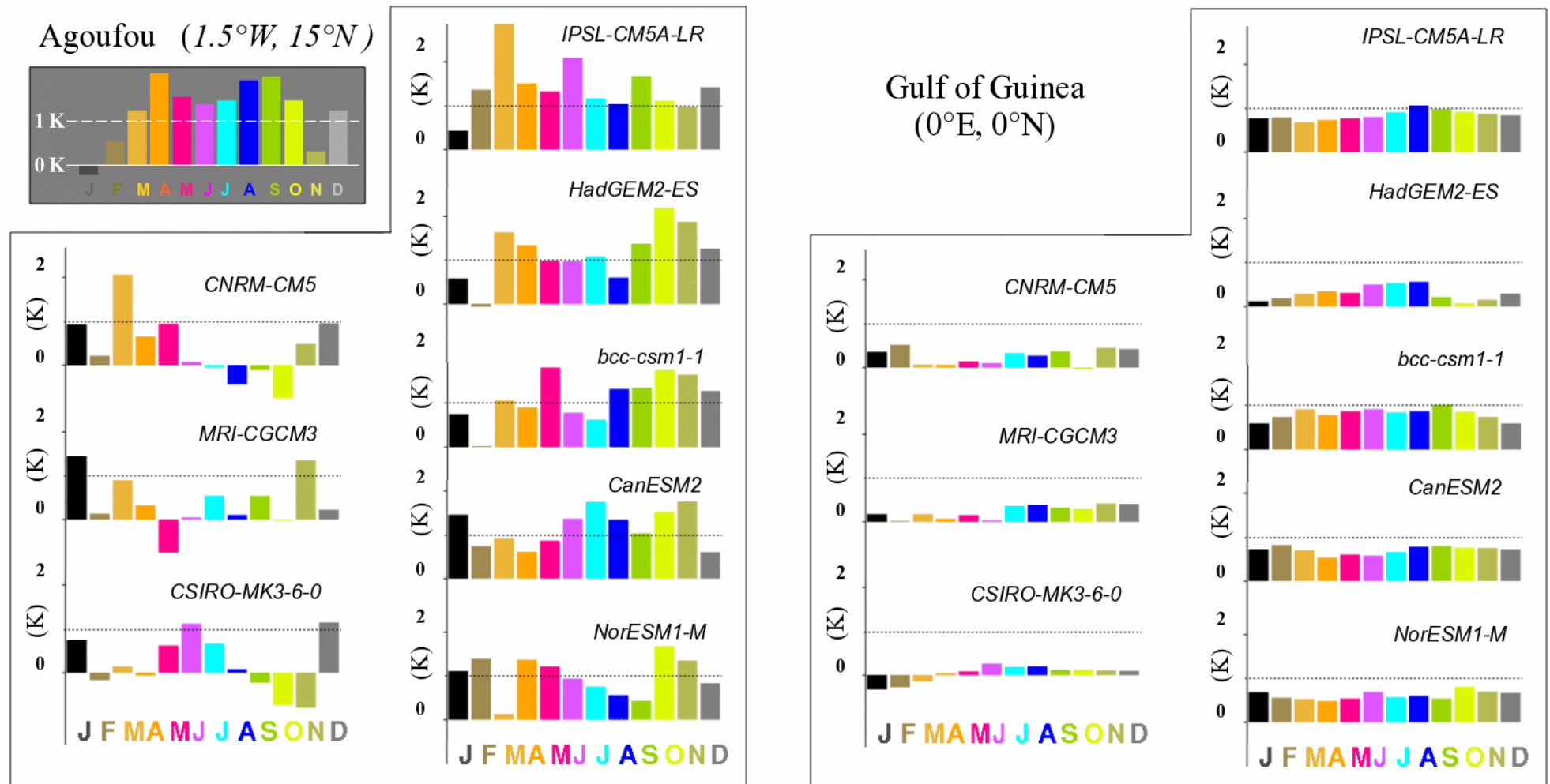


[lon:−2.50,lat: 5.25] Tair CRU



Réchauffement plus fort plus au nord, zone Soudanienne au Sahara

Modèles de climat, CMIP5 simulations historical, tendances 1950-2010 (cfSites)



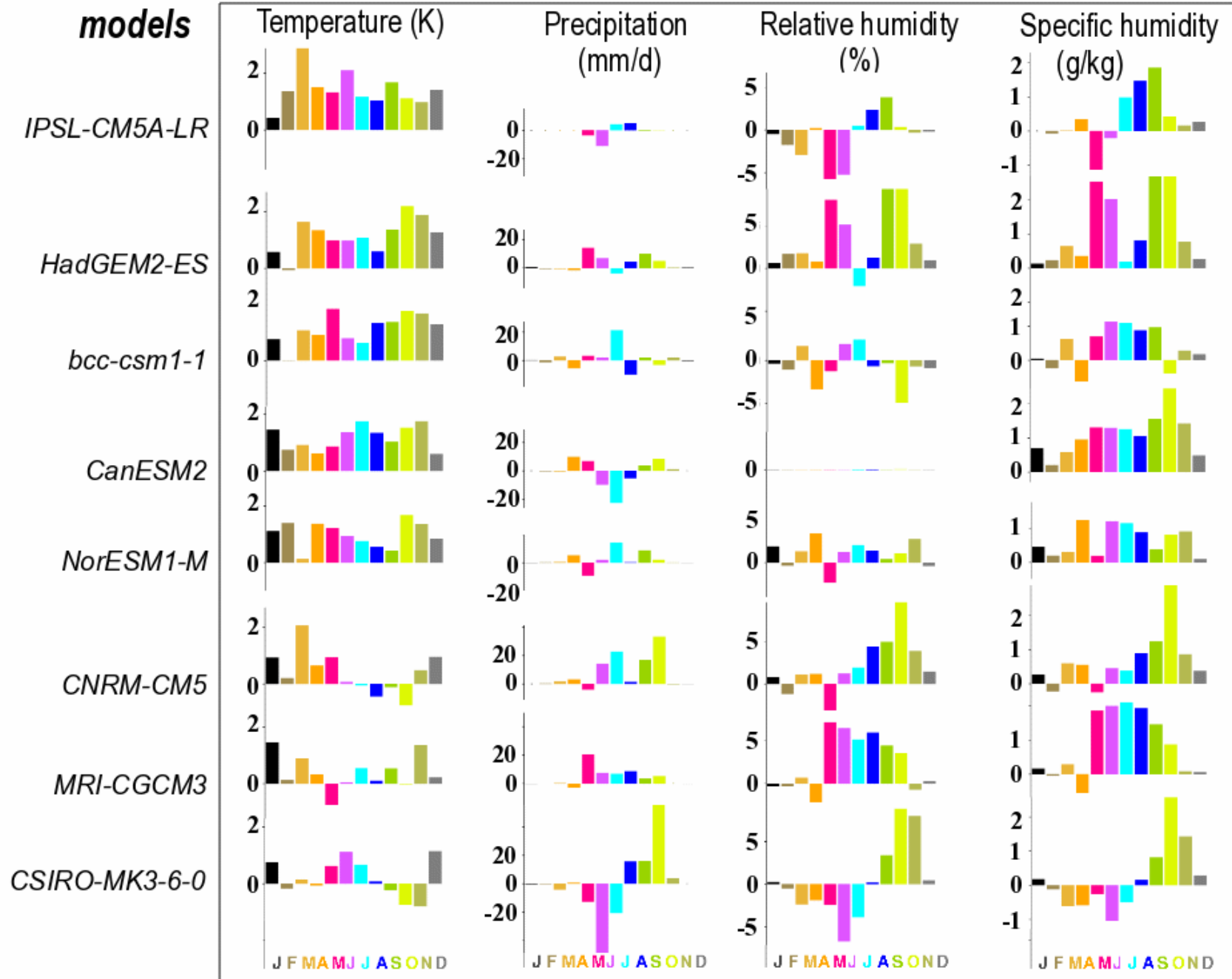
La température augmente généralement dans les modèles, mais de manière assez diverse
Avec des saisonnalités bien distinctes

Modèles de climat, CMIP5 simulations historical, tendances 1950-2010 (cfSites)

Les couplages entres tendances de température et d'humidité ne sont pas les mêmes d'un modèle à l'autre

Des tendances différentes de RH et qv au printemps

Les tendances de précipitations n'expliquent pas les tendances de température hors de la saison des pluies



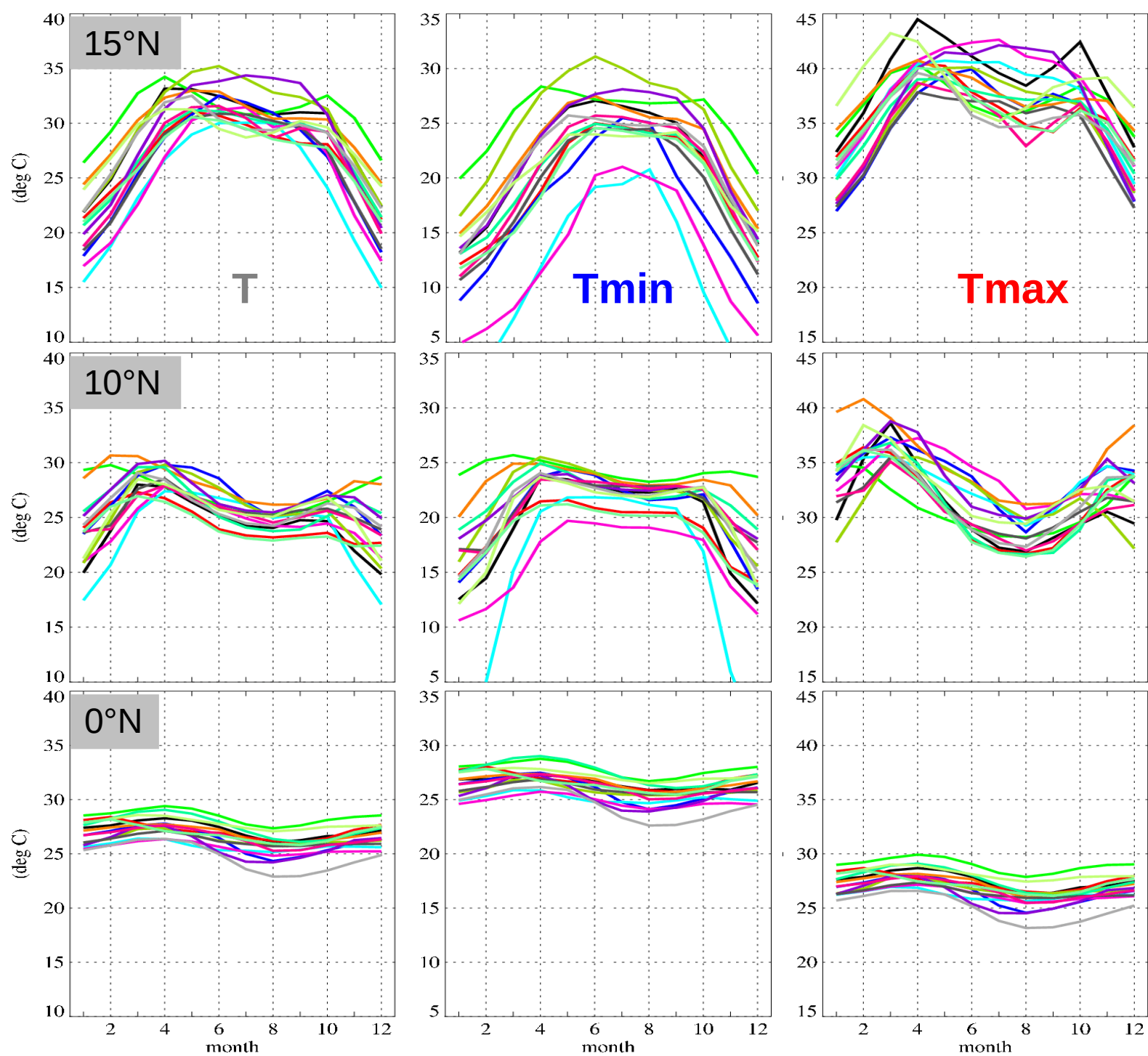
simulations climatiques CMIP5: cycle annuel de la température à 2m

Des différences entre modèles + fortes que la sensibilité au scénario considéré (amip, historical, picontrol...)

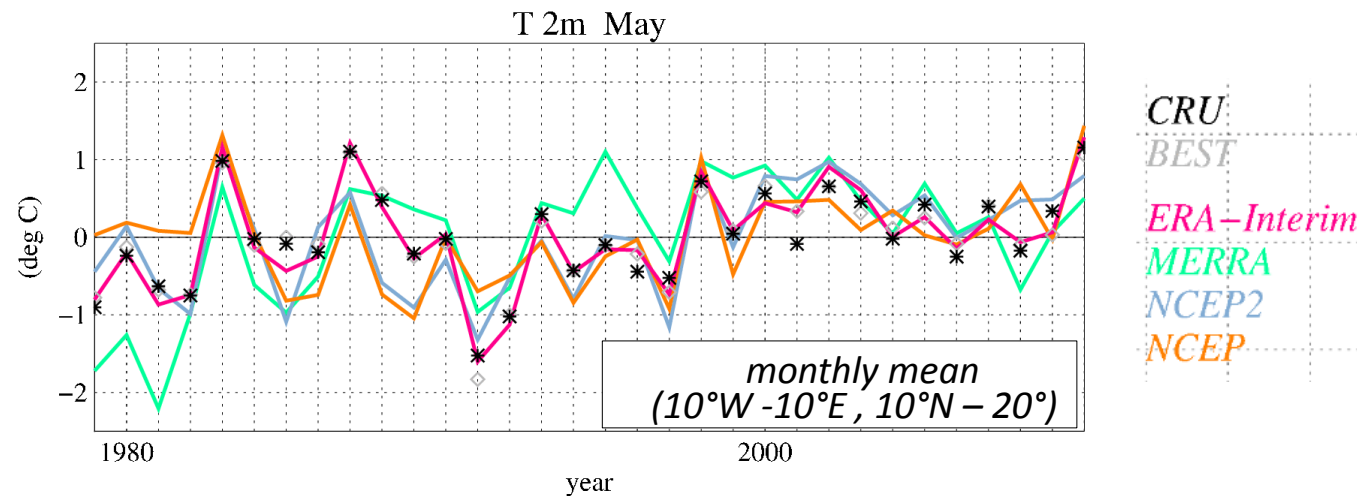
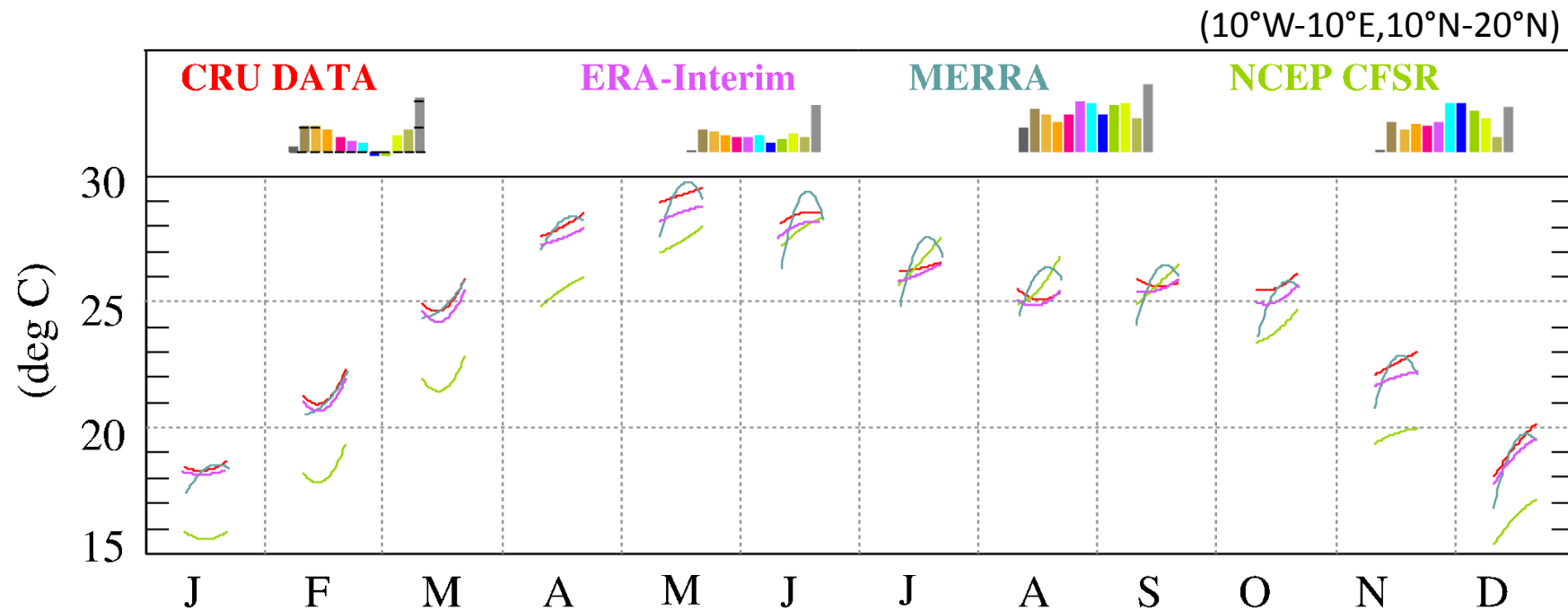
Plus de dispersion en zones semi-aride et aride

Plus de dispersion hors de la saison de mousson, en particulier pour Tmin

Il semble peu probable que ces biais n'exercent aucune influence sur les projections climatiques (Christensen et al. 2012)



Réanalyses météorologiques, fluctuations et tendances 1980-2010



Les réanalyses ECMWF sont les seules réanalyses en bon accord avec les produits obs 'grillés'

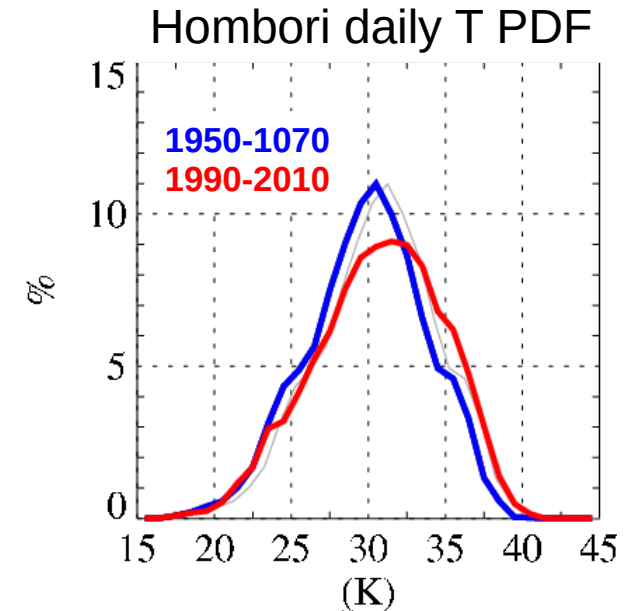
Quelles conséquences sur les études plus fines, e.g. identification extrêmes (vagues de chaleur)?
le choix de la réanalyse n'est certainement pas neutre

Résumé et Perspectives sur (3)

Les observations montrent un réchauffement important au Sahel depuis 60 ans

Ce réchauffement est :

- plus marqué la nuit que le jour
- maximum en avril-mai
- *saison sèche et froide ~ JFM, ND : pas de tendance nette (sec: peu de vapeur d'eau, et non pas peu pluvieux)*
- *Printemps ~ AMJ, mois les plus chauds: fort réchauffement*
- *Pendant la mousson ~ JAS: réchauffement plus modéré (corrélation forte pluie-température)*



Humidité: manque de cohérence des ≠ données/réanalyses (humidification versus assèchement: pas très clair) *impact radiatif de la vapeur d'eau accru au printemps?*

La modélisation de la température au Sahel est difficile

Questions

Quel impact du réchauffement printanier sur la mousson? la végétation?

Quels impact sociétaux, en particulier la santé...

Comment explique-t-on/comprend-t-on les vagues de chaleur d'avril-mai au Sahel?

Que peut-on dire sur leurs évolutions futures?

Conclusion générale et perspectives

Le Sahel est région du globe qui a connu des fluctuations climatiques particulièrement importantes au cours des dernières décennies (précipitations, température) avec des conséquences sociétales dramatiques (sècheresses des années 70 et 80).

Le climat y est façonné par les circulations de grande échelle (mousson, Harmattan), en interaction avec des processus bio-geo-physiques (convection atmosphérique, transfert radiatif, nuages, poussières, processus de surface) de manière complexe, sur une variété d'échelles spatio-temporelles.

Les modèles climatiques peinent à simuler précisément le climat sahélien, leurs projections pour le futur présentent aussi une grande dispersion.

C'est aussi un exercice difficile, et une évaluation renouvelée, plus précise, grâce à de nouvelles données (données in-situ comme satellitaires) et diagnostics observationnels.

L'exploitation de ces données permet de guider, faire progresser la modélisation, de revisiter la pertinence de mécanismes proposés dans la littérature, qui ne s'appliquent pas toujours.

Les observations indiquent une complexité du bilan énergétique à la surface différente de ce qui est souvent décrit dans la littérature passée sur le Sahel:

- *importance majeure des précipitations mais aussi des nuages en plus des poussières désertiques,*
- *importance de l'effet de serre de la vapeur d'eau avant la mousson plutôt que pendant,*
- *importance des interactions surface-convection à méso-échelle (jusqu'à présent ignorées)*

Elles (me) suggèrent que dans un tel système, en termes de modélisation climatique, il est nécessaire d'améliorer de manière cohérente un ensemble de processus physiques plutôt qu'un seul qui dominerait.

Conclusion générale et perspectives

De nombreuses questions pour le futur...

Quelques unes:

Une meilleure prise en compte des hétérogénéités de surface permettrait-elle d'améliorer la prévision météorologique? (modélisation de type “convection permitting”)

Quels sont les mécanismes expliquant l'augmentation récentes (1950-2015) des températures sahéliennes au printemps précisément?

Les modèles climatiques peuvent-ils fournir des informations (indirectes) sur cette question?

Quel rôle pour de la turbulence nocturne sur les fluctuations de température au printemps?
Avec quelle influence du flux de mousson et quelle importance de l'effet de serre de la vapeur d'eau en comparaison des nuages, des poussières désertiques, du CO₂?