

Modélisation des flux de carbone, d'énergie et d'eau entre l'atmosphère et des écosystèmes de steppe sahélienne avec un modèle de végétation global.

Pierre BRENDER^{1,2}

¹ LSCE/IPSL, CEA-CNRS-UVSQ. Gif sur Yvette, France.

² AgroParisTech, ENGREF. Paris, France.

E. Mougin (rapporteur), T. Lebel (rapporteur), J. Demarty (examineur), C. Kao (examineur), P. Hiernaux (examineur), J. Polcher (examineur), P. Ciais (directeur), C. Ottlé (directrice)



Plan de l'exposé

- 1 Introduction et problématique
- 2 Contribution au développement d'ORCHIDEE.
- 3 Le reverdissement du Sahel : la question de la place de la végétation dans les fluctuations des pluies au Sahel.
- 4 Conclusion générale et perspectives

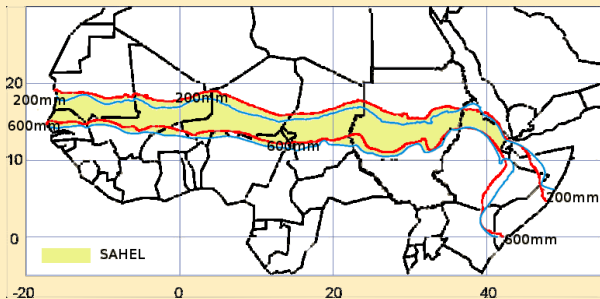


Plan de l'exposé

- 1 Introduction et problématique
 - Région d'étude
 - Etat de l'art de l'analyse de la couverture végétale dans la région
 - Objectif et stratégie
- 2 Contribution au développement d'ORCHIDEE.
- 3 Le reverdissement du Sahel : la question de la place de la végétation dans les fluctuations des pluies au Sahel.
- 4 Conclusion générale et perspectives

Le Sahel : région iconique de la problématique de la « désertification ».

Définition du Sahel



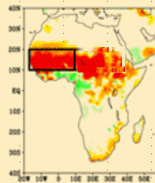
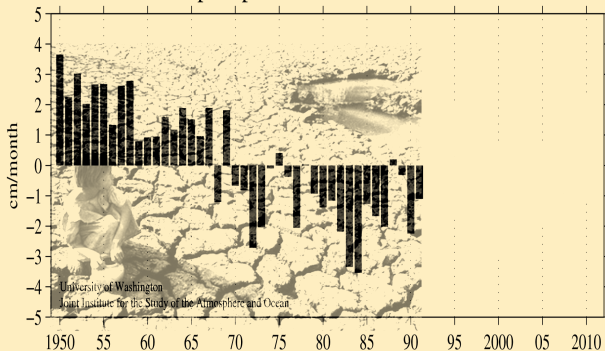
Forte variabilité du cumul annuel de pluie :

- aux échelles géologiques : [Gasse et al., 2000 ; Lezine et al., 1989].
- aux échelles pluri-décennales à pluri-centennales [Rasse et al., 1989 ; Shanahan et al., 2009].

Le Sahel : région iconique de la problématique de la « désertification ».

Création de la CCNUCD suite aux sécheresses des années 70-80

Sahel precipitation anomalies 1950-



June through October averages over 20–10N, 20W–10E. 1950–2011 climatology.
NOAA NCDC Global Historical Climatology Network data

Causes des chgts de pluie extrêmement débattues...

« Dégradation » constatée durant les décennies 1970-80 : une confrontation de deux schémas conceptuels.

H1 : cause externe principalement. « Giannini »

- évolution des SST explique une fraction importante des périodes prolongées d'anomalies sèches et humides [Giannini, 2008].
- les services écosystémiques pourraient être restaurés par la seule amélioration des pluies.

H2 : rôle majeur des changements d'usage des terres. « Charney »

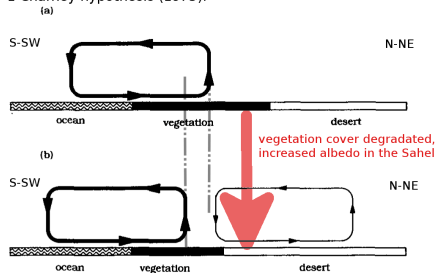
- usage des terres non soutenable (déforestation historique, expansion des cultures, nombre de têtes de bétail en croissance)
- services écosystémiques pouvant seulement être restaurés par des politiques de conservation des terres

« Les pluies viennent avec les arbres (?) »

anomalies de pluies expliquées par des chgts de couverture végétale, paradigme survalorisé lors de la création de l'UNCCD ?

- se base sur des exercices de modélisation prescrivant des changements non réalistes d'usage des terres [Govaerts, 2008].
- et sur des hypothèses mécanistiques discutables au moins en ce qui concerne l'hypothèse de Charney qui est largement citée (modèle « sec »).

1 Charney hypothesis (1975).



Suivi des évolutions de la couverture végétale

études de terrain

Gourma, Hombori, site 19.

- + : richesse information.
- - : difficulté de standardisation.
représentativité spatiale.
fréquence irrégulière.

télé-détection

NDVI : combinaison de réflectances $\frac{NIR-R}{NIR+R}$ fortement corrélée avec la couverture végétale.

GIMMS NDVI, 8km, 15j

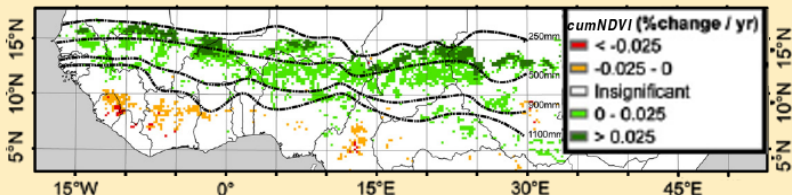
- + : disponibilité spatio-temporelle depuis 1982 (8km).
- - : mesure indirecte (perturbations bruit atm., arrière plan sol), dérivées.

Reverdissement du Sahel : changement des termes de la réflexion

« tendance » du NDVI

- période 1982-1999 : premier diagnostic de croissance du cumNDVI [Ekhlung et al., 2003] (AVHRR Pathfinder).
- des caractérisations plus robustes avec le post-traitement GIMMS [Tucker 2005, Heumann, 2007].

tendance de cumNDVI (1982-2005).

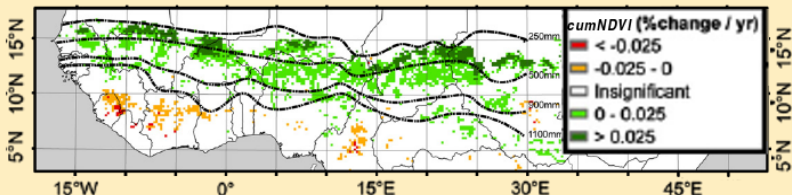


Reverdissement du Sahel : changement des termes de la réflexion

« tendance » du NDVI

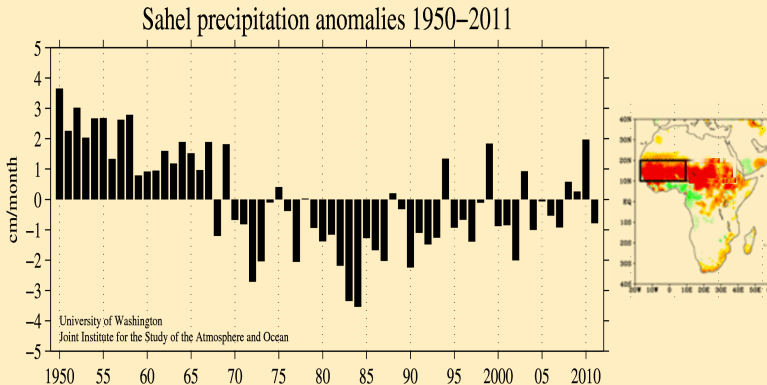
- période 1982-1999 : premier diagnostic de croissance du cumNDVI [Ekhlung et al., 2003] (AVHRR Pathfinder).
- des caractérisations plus robustes avec le post-traitement GIMMS [Tucker 2005, Heumann, 2007].

tendance de cumNDVI (1982-2005).



Pluies, principal déterminant des variations interannuelles

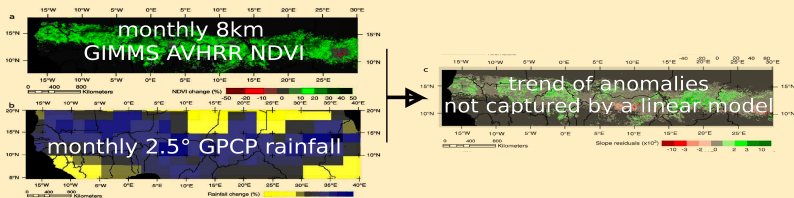
Retour à un régime des pluies intermédiaires durant les années 90-00



June through October averages over 20–10N, 20W–10E. 1950–2011 climatology.
NOAA NCDC Global Historical Climatology Network data

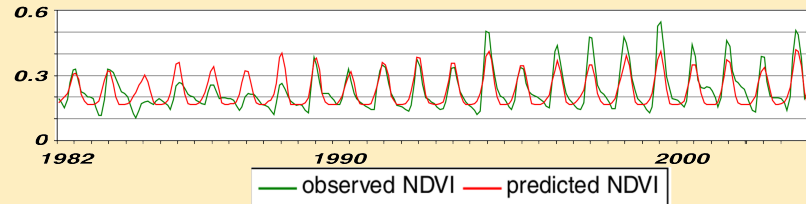
Etude de l'effet résiduel d'autres facteurs de contrôle

Herrmann et al., 2005. Hyp nulle : modèle linéaire des pluies à 2,5°
confrontation des jeux de données de pluie et de NDVI



Etude de l'effet résiduel d'autres facteurs de contrôle

Herrmann et al., 2005. Hyp nulle : modèle linéaire des pluies à 2,5°
*meilleur modèle linéaire du NDVI en fonction de moyennes
glissantes de GPCP (1982-2003; 14,3° N 1,3° O)*

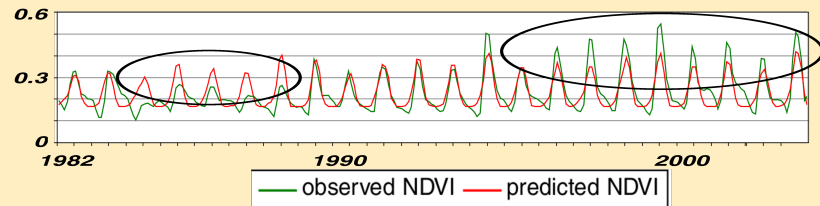


tendance des résidus

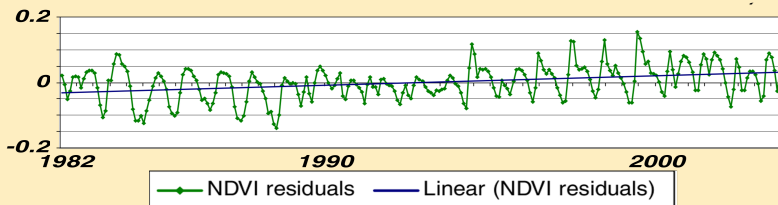


Etude de l'effet résiduel d'autres facteurs de contrôle

Herrmann et al., 2005. Hyp nulle : modèle linéaire des pluies à 2,5°
 meilleur modèle linéaire du NDVI en fonction de moyennes
 glissantes de GPCP (1982-2003; 14,3° N 1,3° O)

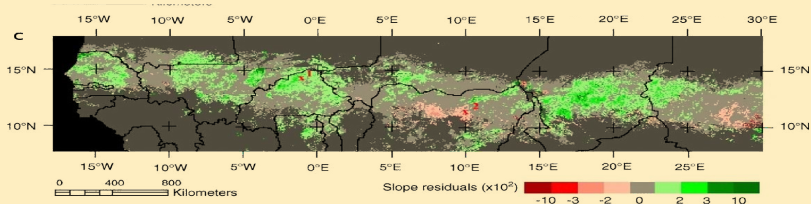


tendance des résidus



Etude de l'effet résiduel d'autres facteurs de contrôle

Herrmann et al., 2005. Hyp nulle : modèle linéaire des pluies à 2,5°
carte des tendances des résidus (1982-2003)

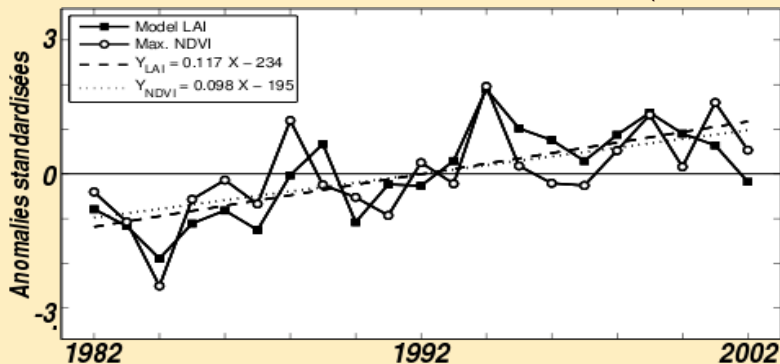


Olsson, 2005. 40 sites. Hyp nulle : modèle linéaire des pluies locales
pente régression Pathfinder NDVI vs pente régression des pluies locales

Etude de l'effet résiduel d'autres facteurs de contrôle

Hickler, 2005. Seaquist, 2009. Hypothèse nulle : modèle mécanistique (input : variables météorologiques, résol. $0,5^\circ$)

Anomalies standardisées du LAI simulé et du $NDVI_{max}$ (boîte Sahel).



- aucune corrélation par rangs significative entre les anomalies modèle-mesures et les jeux de données de changement de population, de pression agricole et de pâture.

Causes des chgts de pluie extrêmement débattues...

chgts de la tendance des précipitations durant les années 90-00.
Selon les familles d'hypothèses précédentes, soit :

H1 : cause externe principalement. « Giannini »

- évolution des SST explique une fraction importante des périodes prolongées d'anomalies sèches et humides [Giannini, 2008].
- reverdissement expliqué par la seule amélioration des pluies.

H2 : rôle majeur des changements d'usage des terres. « Charney »

- d'importants programmes de restauration des terres et d'amélioration de la collecte des eaux de pluie ont été lancés (plateau central au Burkina-Faso, le département de Maradi au Niger,...).
- d'étendue suffisante (selon les tenants de ces hypothèses) pour expliquer la différence constatée entre les décennies 70-80 et les décennies 90-00.

Etat de l'art et objectif du travail

durant les années 90-00, ré-augmentation des précipitations

l'effet des (changements de couvert végétal) → précipitations plus souvent considéré comme un facteur de renforcement des anomalies aux échelles pluriannuelles [Zeng et al., 1999 ; Wang et al., 2004,...] que comme cause première du retournement de tendance

une augmentation de l'indice foliaire

- dont il n'a pu être démontré qu'elle s'écartait significativement, à l'échelle régionale, de l'effet du climat.

Une question qui reste à clarifier, un des objectifs de cette thèse

L'effet des (changements de couvert végétaux) → pluies à reconsidérer ?

Une stratégie consistant à :

améliorer un modèle de surface faisant partie d'un modèle de climat

- travail centré sur l'amélioration du bilan hydrique du sol.
- objectif premier : amélioration de la représentation de la variabilité horaire (réponse aux événements pluvieux) et saisonnière des flux.

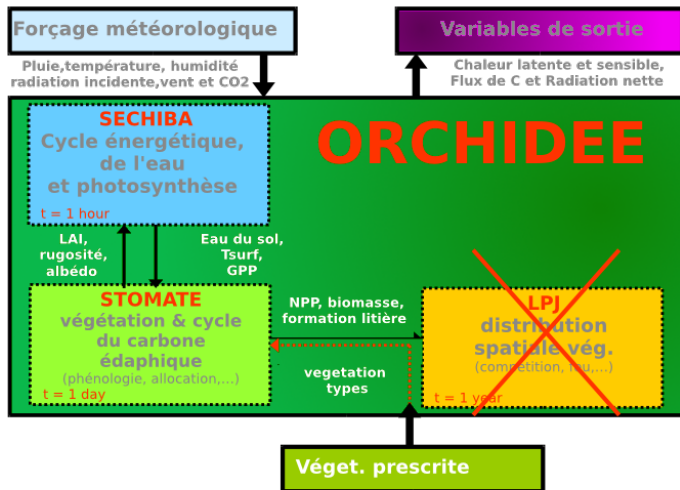
évaluer la capacité du modèle à représenter les évolutions de couverture végétale diagnostiquée par télédétection

évaluer l'impact d'un changement de couverture végétale dans des simulations CMIP5.

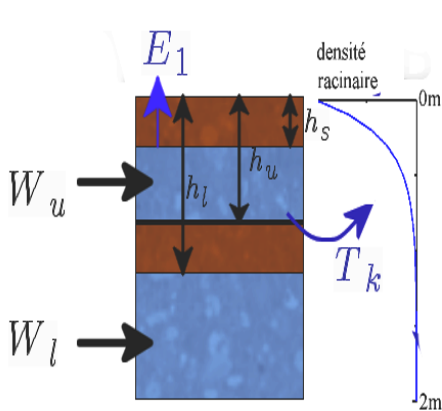
Plan de l'exposé

- 1 Introduction et problématique
 - Région d'étude
 - Etat de l'art de l'analyse de la couverture végétale dans la région
 - Objectif et stratégie
- 2 Contribution au développement d'ORCHIDEE.
- 3 Le reverdissement du Sahel : la question de la place de la végétation dans les fluctuations des pluies au Sahel.
- 4 Conclusion générale et perspectives

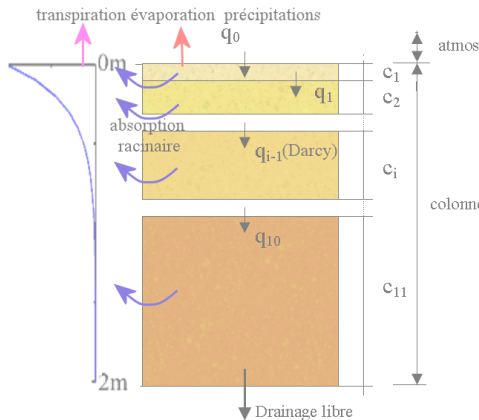
Description du modèle :



d'un schéma hydrologique conceptuel (Choisnel)...



- Réservoir édaphique rempli d'eau
- Sol sec au dessus du réservoir
- Délimitation entre les deux couches



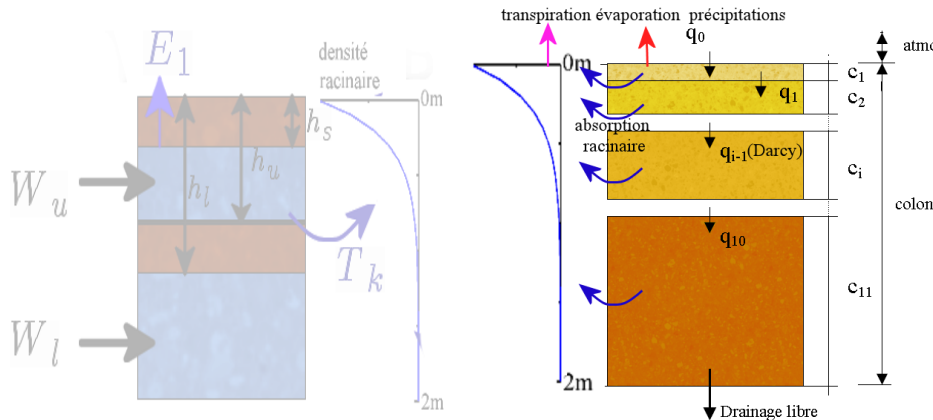
modèle de Mualem Van Genuchten
(de Rosnay et al., 1998) :

$$k(\Theta) = k_s \Theta^{\frac{1}{2}} (1 - (1 - \Theta^{\frac{1}{n}})^n)^2$$

$$\text{avec : } \Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

$$\Theta(h) = [1 + |\alpha h|^{1-n}]^{-n}$$

...à un schéma hydrologique à bases physiques (CWRR)



- Réservoir édaphique rempli d'eau
- Sol sec au dessus du réservoir
- Délimitation entre les deux couches

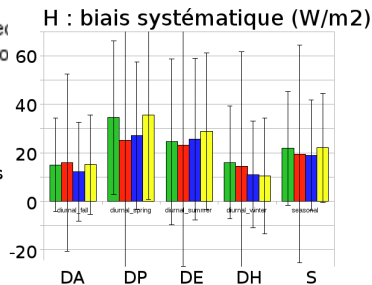
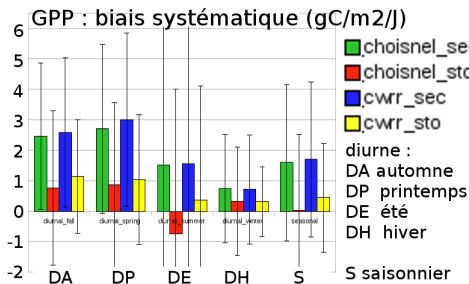
modèle de Mualem Van Genuchten
(de Rosnay et al., 1998) :

$$k(\Theta) = k_s \Theta^{\frac{1}{2}} (1 - (1 - \Theta^{\frac{1}{n}})^n)^2$$

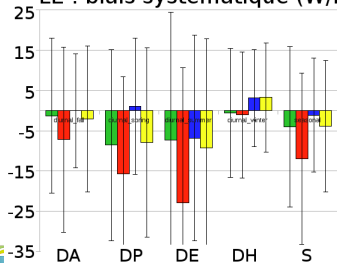
$$\text{avec : } \Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

$$\Theta(h) = [1 + |\alpha h|^{1-n}]^{-n}$$

Couplage STOMATE-CWRR : test sur un large ensemble de sites



LE : biais systématique (W/m2)



activation de CWRR

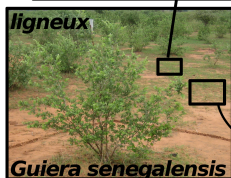
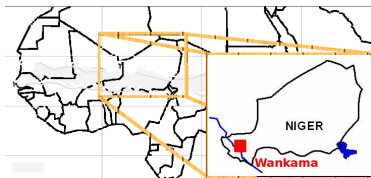
(sans ajustement spécifique)

- meilleure représentation de H et LE
- pas de dégradation de la GPP

Wankama, Niger. Jachère.

Mesures sur site utilisées

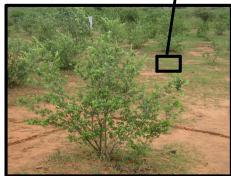
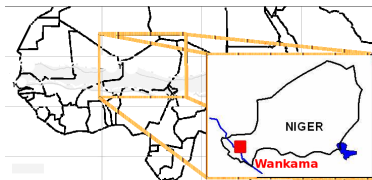
caractérisation de la végétation,
flux entre surface et atmosphère,
profil hydrique, . . .



Wankama, Niger. Jachère.

Mesures sur site utilisées

*caractérisation de la végétation,
flux entre surface et atmosphère,
profil hydrique,...*

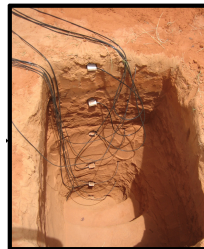
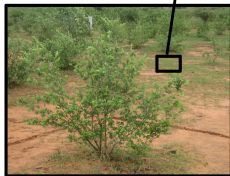


avec l'aimable autorisation de B. Cappelaere et al. (AMMA Niger).

Wankama, Niger. Jachère.

Mesures sur site utilisées

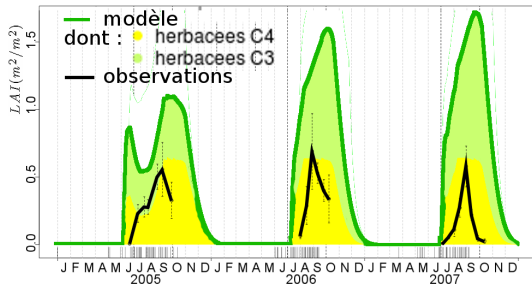
*caractérisation de la végétation,
flux entre surface et atmosphère,
profil hydrique,...*



avec l'aimable autorisation de B. Cappelaere et al. (AMMA Niger).

Wankama, simulation de l'indice foliaire

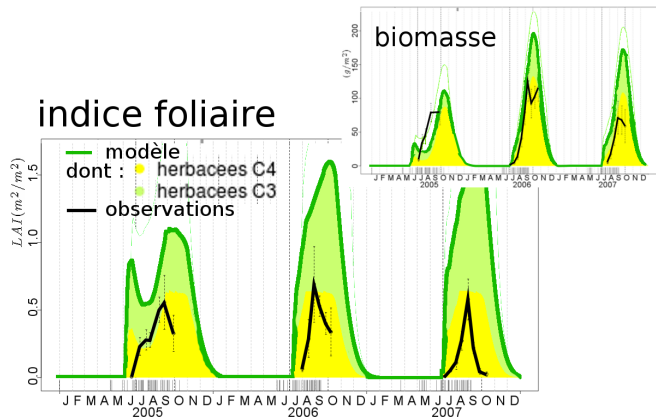
indice foliaire



Résultats d'une version ORCHIDEE standard :

- variabilité interannuelle du LAI_{max} mal représentée.
- translocation carbohydrates peu réaliste.
- feuillage persistant beaucoup trop longtemps.

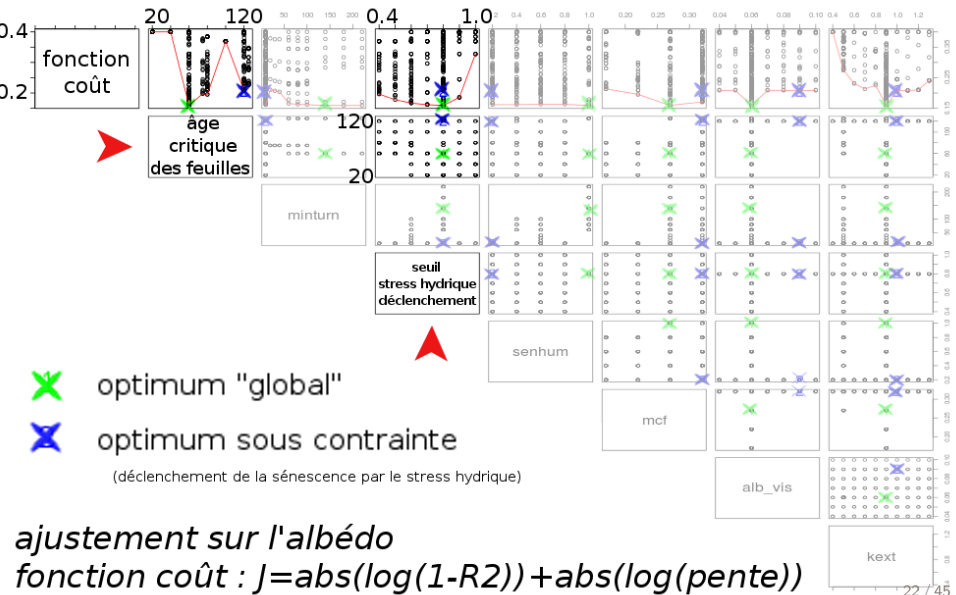
Wankama, simulation de l'indice foliaire



Résultats d'une version ORCHIDEE standard :

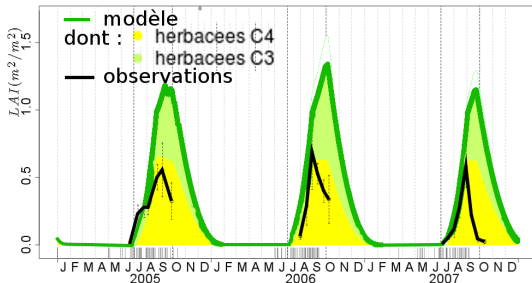
- variabilité interannuelle du LAI_{max} mal représentée.
- translocation carbohydrates peu réaliste.
- feuillage persistant beaucoup trop longtemps.

Wankama, optimisation des paramètres de phénologie



Wankama, « meilleur ajustement » de la phénologie

indice foliaire



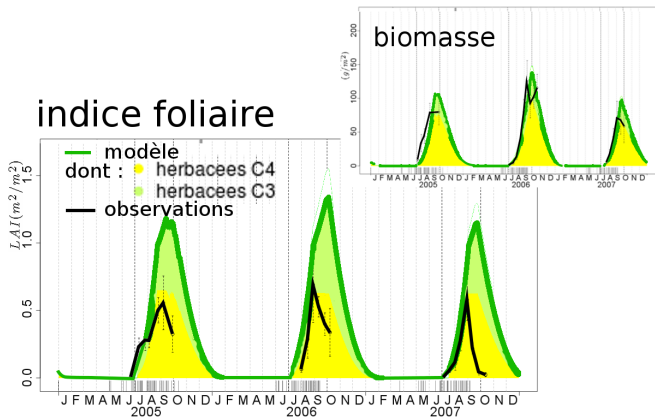
Sont améliorés :

- variabilité interan. LAI_{max}
- démarrage de la saison

Problèmes persistants :

- fin saison tjs trop tardive.
- représentativité des obs. de LAI ?

Wankama, « meilleur ajustement » de la phénologie



Sont améliorés :

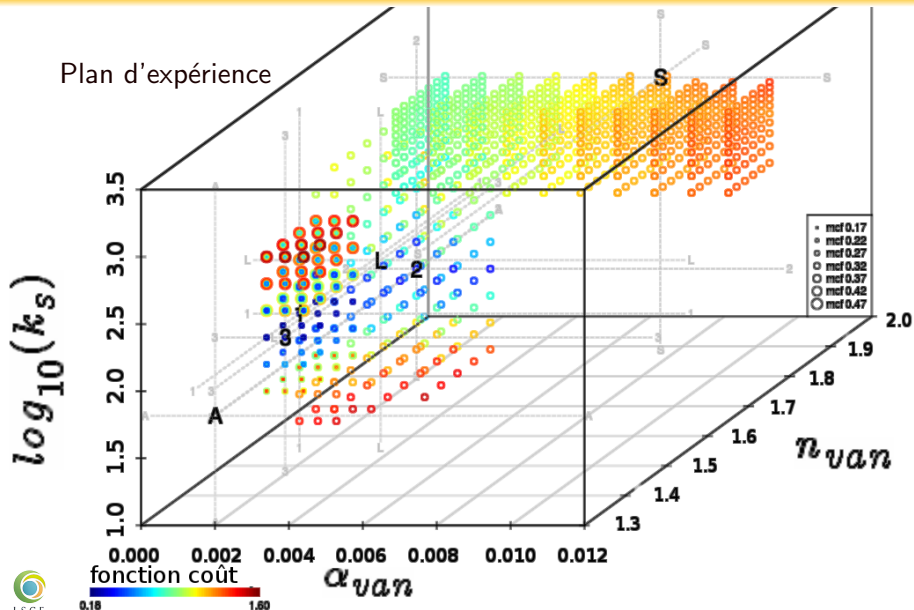
- variabilité interan. LAI_{max}
- démarrage de la saison

Problèmes persistants :

- fin saison tjs trop tardive.
- représentativité des obs. de LAI ?

Wankama, ajustement des paramètres de l'hydrologie du sol

Plan d'expérience



Wankama, ajustement des paramètres de l'hydrologie du sol

profondeur :

$$k_S=1100$$

$$\alpha_{van}=0.0079$$

$$n_{van}=1.87$$

$$MCS=0.41$$

$$k_S=100$$

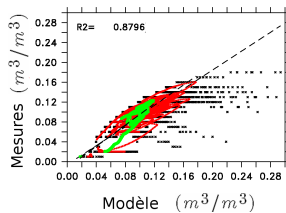
$$\alpha_{van}=0.0014$$

$$n_{van}=1.56$$

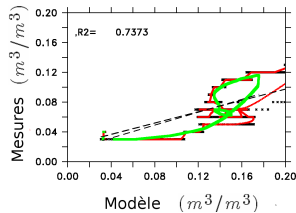
$$MCS=0.36$$

10cm

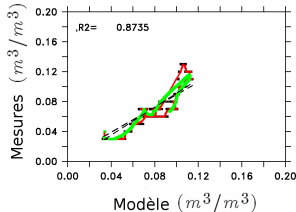
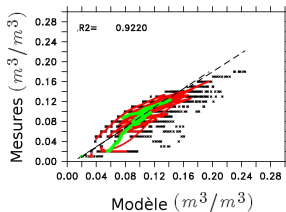
paramétrisation de sable (S)



50cm



paramétrisation ajustée (1)



Wankama, résultats du modèle

Versions du modèle confrontées :

- version « standard » AR5 (hydro Choisnel).
- hydrologie Choisnel + ajustements ($V_{C_{max}}$ + phéno).
- hydrologie CWRR + ajustements ($V_{C_{max}}$, phéno, hydro).

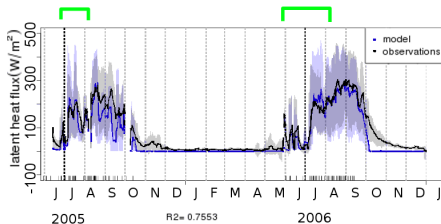
Observations utilisées

- flux de chaleur latente (LE).
- échange net de carbone de l'écosystème (NEE).

Wankama, représentation des flux hydriques

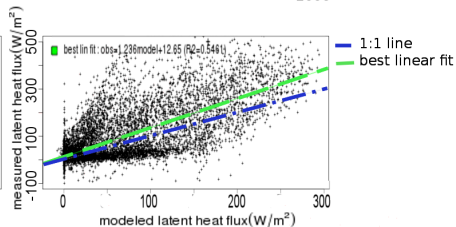
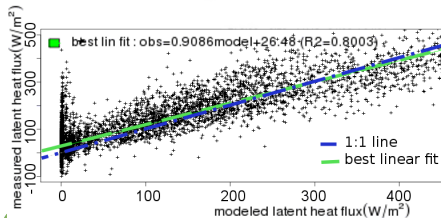
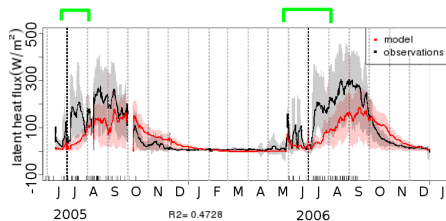
une amélioration
version CWRR ajustée

$$R^2 = 0.76 \text{ IQR} = 31 \text{ W/m}^2$$



version Choisel équivalente

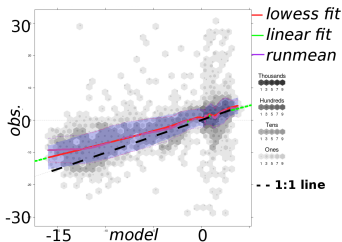
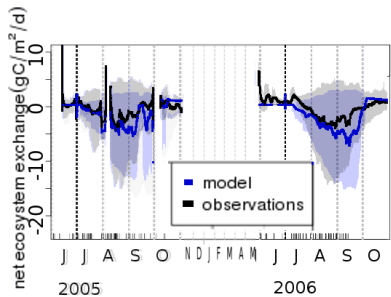
$$R^2 = 0.47 \text{ IQR} = 61 \text{ W/m}^2$$



Wankama, représentation du flux net de carbone

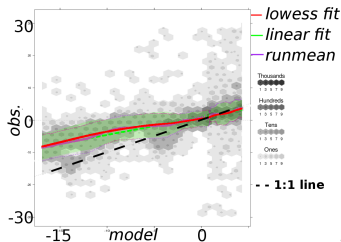
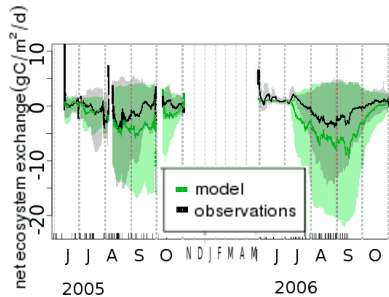
version CWRR ajustée

$R^2 = 0.46$ $IQR = 2.3 \text{gC}/\text{m}^2/\text{d}$



version Choisel standard (AR5)

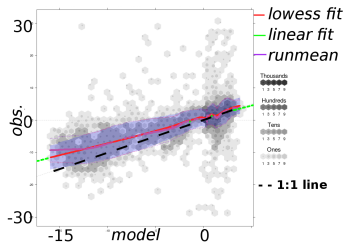
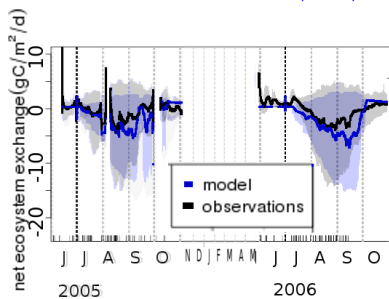
$R^2 = 0.02$ $IQR = 4.5 \text{gC}/\text{m}^2/\text{d}$



Wankama, représentation du flux net de carbone

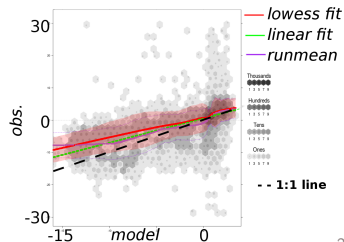
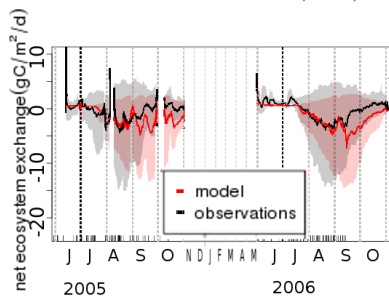
version CWRR ajustée

$R^2 = 0.46$ $IQR = 2.3 \text{gC}/\text{m}^2/\text{d}$



version Choisel équivalente

$R^2 = 0.34$ $IQR = 2.6 \text{gC}/\text{m}^2/\text{d}$



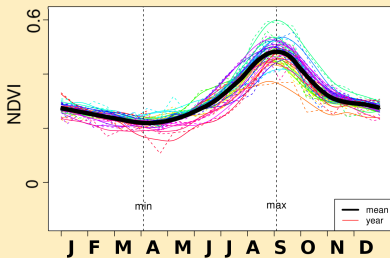
Evaluation régionale : modifications de phénologie

Matériel :

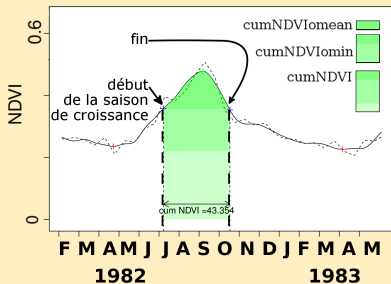
- forçage climatique CRUNCEP.
- modèle ORCHIDEE (trois configurations précédentes).
- NDVI GIMMS 3G (1982-2009, 8x8km², 15j.).

Méthode :

(0.75°E_13.25°N) GIMMS NDVI Annual Time Series

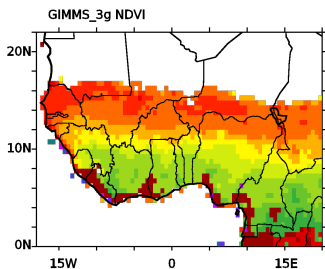


(0.75°E_13.25°N) 1982-83 GIMMS NDVI

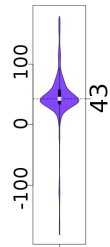
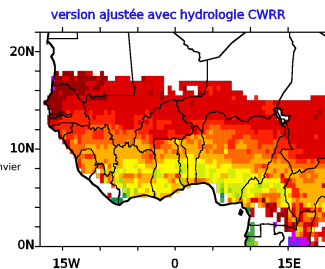


Evaluation régionale : représentation du début de la saison

A

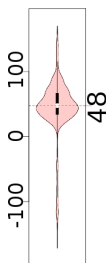
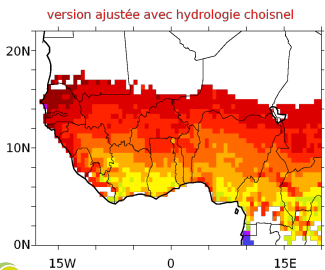


B



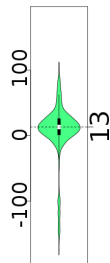
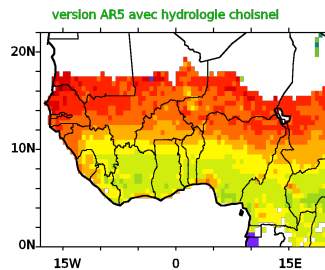
SOS ORC CWRR-GIMMS

C



SOS ORC Choi-GIMMS

D

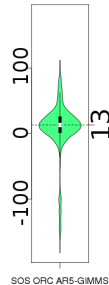
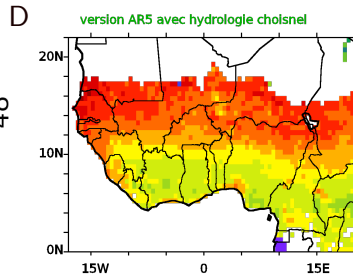
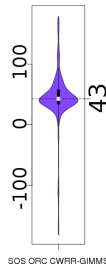
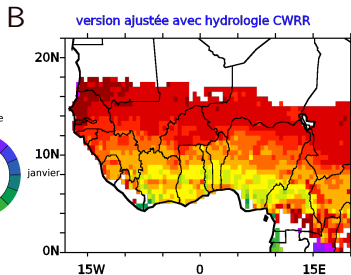
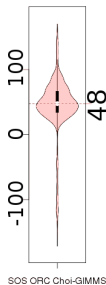
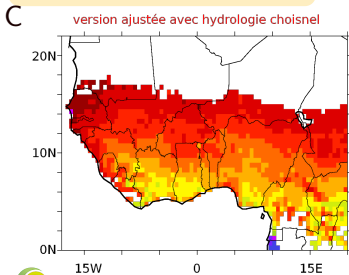


SOS ORC AR5-GIMMS

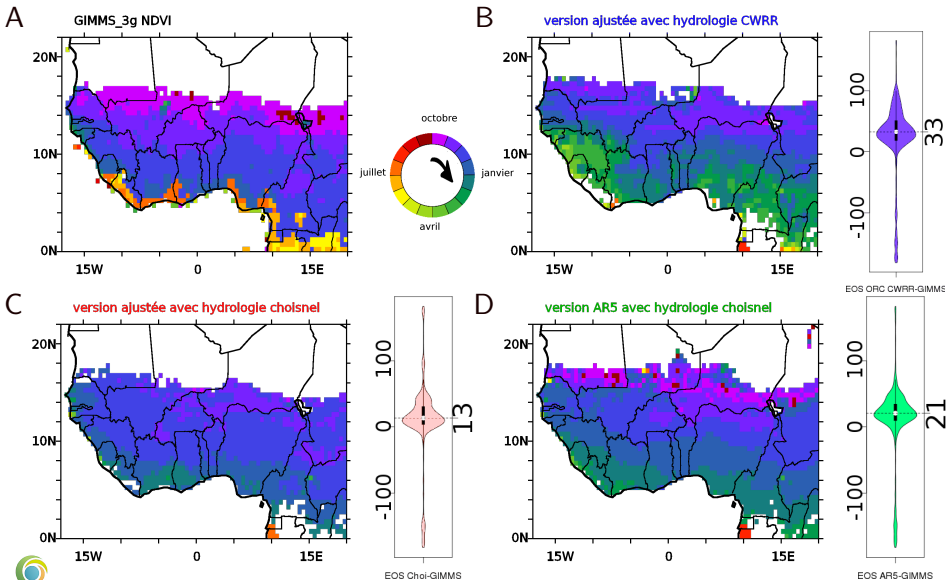
Evaluation régionale : représentation du début de la saison

renforcement du retard
du modèle par rapport
aux obs de NDVI

pas de travail sur les
lignes dont la phéno
débute avant les
pluies,...



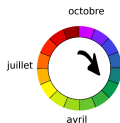
Evaluation régionale : représentation de la fin de la saison



Evaluation régionale : représentation de la fin de la saison

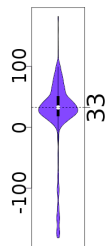
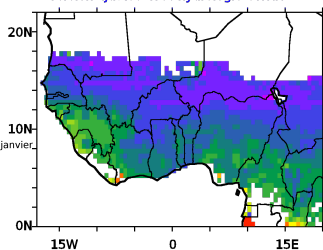
modèle de phénologie
très en retard en zone
soudano-guinéenne

pas de travail sur la
dynamique des feux,...



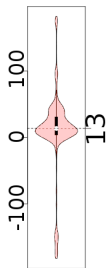
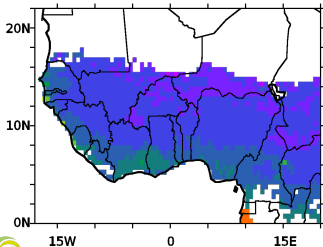
B

version ajustée avec hydrologie CWRR



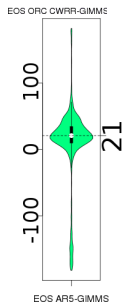
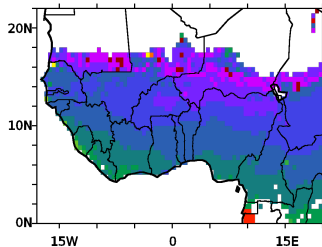
C

version ajustée avec hydrologie choisnel



D

version AR5 avec hydrologie choisnel



Limites du travail réalisé

1. Un travail non achevé

- **Manque de représentativité** : données limitées à 1-2 sites, 3 années, travail centré sur les herbacées
- **Des processus mal pris en compte** : photopériodisme, feux, . . .

2. Faible transitivity des réductions d'erreur entre bandes de fréq.

Des efforts centrés sur le réalisme de la réponse horaire



Amélioration variabilité de long terme éventuellement faible.

Réalisme de la réponse horaire et basse fréquence

Conclusion 2 issue d'une étude des erreurs systématiques du modèle de surface ORCHIDEE (Wang, Brender et al., EM, accepté).

Matériel

- base de données FLUXNET (météorologie et flux NEE, H, LE pour plus de 200 sites).

Méthode

- décomposition par bandes de fréquence des variables météo et des flux simulés/observés
- construction d'un modèle des biais systématiques sur un(e) période/ensemble de site/bande de fréquence donné(e).
- évaluation des capacités prédictives du modèle sur un domaine (spatial/temporel/fréquentiel) plus vaste.

Réalisme de la réponse horaire et basse fréquence

2. Faible transitivity des réductions d'erreur entre bandes de fréq.

Des efforts centrés sur le réalisme de la réponse horaire



Amélioration variabilité de long terme éventuellement faible.

Limites de cet argument :

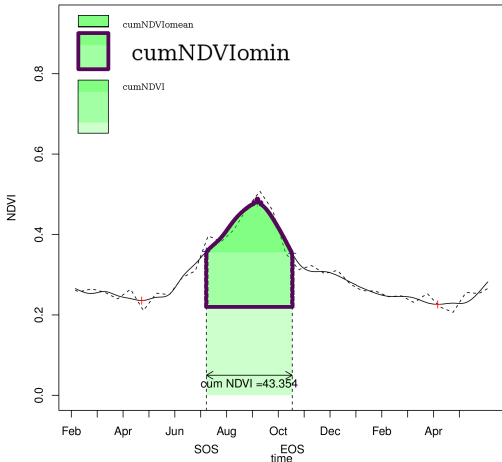
- conclusion valable avec un modèle des biais d'ORCHIDEE sans effet à retard en fonction de qqes variables météo.
- résultat obtenu avec ajustement d'échelle arbitraire (mais vérifié avec régressions multilinéaires).

Plan de l'exposé

- 1 Introduction et problématique
 - Région d'étude
 - Etat de l'art de l'analyse de la couverture végétale dans la région
 - Objectif et stratégie
- 2 Contribution au développement d'ORCHIDEE.
- 3 **Le reverdissement du Sahel : la question de la place de la végétation dans les fluctuations des pluies au Sahel.**
- 4 Conclusion générale et perspectives

Evaluation régionale : évolution de la couverture végétale

cruncep (0.75°E_13.25°N) AR5 GIMMS NDVI Time Series 1982 – 1983



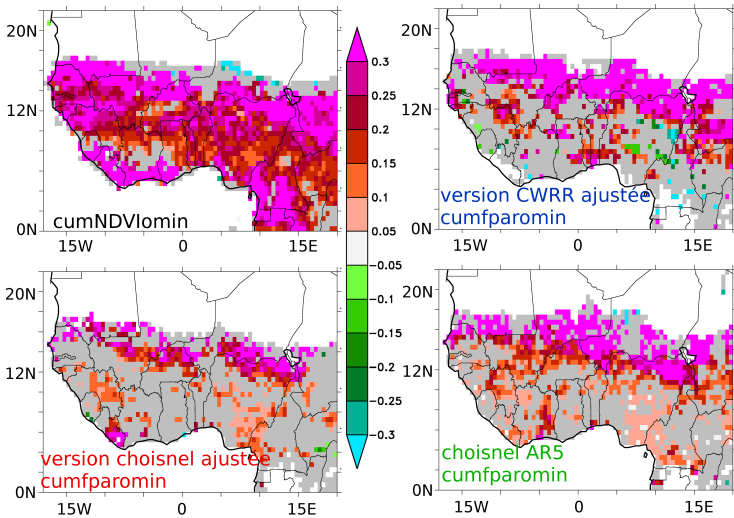
Matériel :

- forçage climatique CRUNCEP.
- modèle ORCHIDEE (trois config. précédentes).
- NDVI GIMMS 3G (1982-2009, 8x8km², 15j.).

Evaluation régionale : évolution de la couverture végétale

Tendances sur la période 1982-2009

grisés : pixels avec $\sigma_{interan.} > \text{pente} \times \text{durée}$



Evaluation régionale : évolution de la couverture végétale

Tendances sur la période 1982-2009

↗ NDVI sur presque toute l'Afrique de l'Ouest

- en moyenne :
- *contribution d'une dérive entre capteurs ?*

↗ fPAR surtout au Sahel

- à forçage donné (CRUNCEP) : signal assez consistant entre versions.

obs.-modèle(s) plus compatibles au Sahel que plus au Sud

- modèle ajusté spécifiquement dans cette zone et contrainte phénologique plus exclusivement climatique.
- variabilité interannuelle plus forte dans le modèle que dans les obs. *Des processus régularisants manquants ?*

Modèle couplé : impact des changements de couverture végétale.

Quantification : impact (chgts hist. usage des terres) → pluies

Travail de master de Souleymane Sy.

Matériel (base de donnée CMIP5)

- Modèle couplé de l'IPSL entre 1850 et 2005.
- forçages : soleil, volcans, ozone, aérosols, gaz à effets de serre, usage des terres.

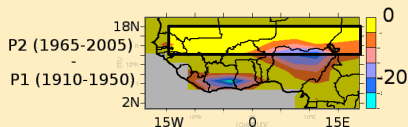
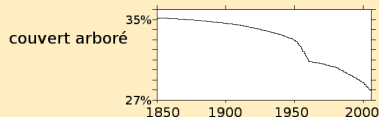
Méthode (pour s'affranchir de la variabilité interne du modèle)

Comparaison de :

- Simulations **avec (LU)** vs **sans (NoLU)** usage des terres hist.
- Périodes précédant (indice P1) et suivant (indice P2) une forte modif du LU.
- Constitution de composites sèches (S) et humides (H).

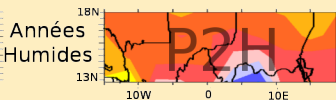
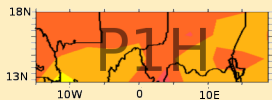
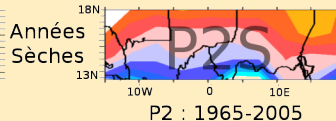
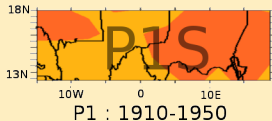
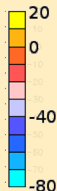
Modèle couplé : impact des changements de couverture végétale.

Evolution du couvert arboré



Impact sur les précipitations

LU-NoLU
mm/4mois



Modèle couplé : impact des changements de couverture végétale.

Résultat (*Travail de master de Souleymane Sy.*)

Fort impact d'une réduction du couvert arboré en zone soudano-guinéenne sur les pluies en zone soudano-sahélienne.

Un effet réaliste ?

- Potentielle surestimation de l'effet en zone sahélienne du fait de la hauteur de rugosité des arbres trop forte dans le modèle de surface.

Plan de l'exposé

- 1 Introduction et problématique
 - Région d'étude
 - Etat de l'art de l'analyse de la couverture végétale dans la région
 - Objectif et stratégie
- 2 Contribution au développement d'ORCHIDEE.
- 3 Le reverdissement du Sahel : la question de la place de la végétation dans les fluctuations des pluies au Sahel.
- 4 Conclusion générale et perspectives

Conclusions générales et perspectives.

Un travail de développement d'un modèle de surface global

une configuration originale d'ORCHIDEE

- schéma hydrologique à bases physiques et phénologie dynamique.

des travaux

- d'ajustement de paramètres hydriques et de phénologie.
- de développement de méthodes d'analyse de séries temporelles et d'évaluation de modèles.

Conclusions générales et perspectives.

Un travail de développement d'un modèle de surface continentale : portant sur des écosystèmes semi-arides pour lesquels la rétro-action de la surface continentale est susceptible d'être particulièrement importante.

Des résultats

- n'apportant pas de réponse directe à la question initiale sur les stocks de C de ces écosystèmes
- s'inscrivant dans un effort plus large.

Points à privilégier pour des études approfondies du bilan de C au Sahel ?

- fertilité qui limite fortement la croissance au cœur de la saison des pluies.
- variables permettant de donner une représentation intégrée de l'hétérogénéité spatiale

Merci.

Merci

à vous tous pour votre attention.

à toutes celles et ceux qui m'ont aidé à avancer dans mon travail.