

LA MOUSSON AFRICAINE DANS UN MODELE DE CIRCULATION GENERALE QUASI-PARFAIT

Benjamin POHL^{1,2} et Hervé DOUVILLE²

¹ *Centre de Recherches de Climatologie, CNRS / université de Bourgogne,
6 boulevard Gabriel, 21000 Dijon, FRANCE*

² *CNRM / GMGEC / UDC, Météo-France,
42 avenue Gaspard Coriolis, 31057 Toulouse Cedex 01, FRANCE*

Résumé : Le modèle de circulation générale ARPEGE-Climat du CNRM présente des biais secs relativement marqués en Afrique de l'Ouest pendant la mousson, même lorsqu'il est forcé par des températures de surface marine observées. Les précipitations sahéliennes restent très inférieures aux observations, en lien avec un flux de mousson de basse troposphère trop faible sur la bande guinéenne et l'océan Atlantique équatorial.

On propose ici de guider le modèle ARPEGE-Climat vers les réanalyses ERA-40 en dehors d'une fenêtre comprenant l'Afrique de l'Ouest et le proche Atlantique (technique dite de nudging en point de grille).

Ce protocole nous permet de:

- (i) analyser l'origine régionale ou de large échelle des biais du modèle sur l'Afrique;
- (ii) séparer l'influence des paramètres locaux et de large échelle dans la variabilité spatio-temporelle du système de mousson, à la fois à des pas de temps interannuels et intrasaisonniers;
- (iii) réaliser des expériences de sensibilité aux conditions de surface (humidité du sol, températures de surface marine) pour quantifier l'importance des forçages continentaux et océaniques régionaux sur la variabilité de la mousson.

1. Introduction

La plupart des modèles de circulation générale (MCG) actuels peinent à simuler de manière réaliste la mousson ouest-africaine (MOA). Leurs biais les plus récurrents concernent aussi bien les précipitations associées que les éléments caractéristiques du système de mousson lui-même, tels que le flux de mousson, le jet africain d'est (JAE) ou le jet tropical d'est (JTE). Le modèle ARPEGE-Climat du CNRM, de ce point de vue, se comporte comme la plupart des modèles actuels, avec en particulier des biais secs très prononcés sur l'Afrique de l'Ouest en été, associés à une trop faible pénétration du flux de mousson sur le continent.

Dans le cadre conjoint du programme AMMA et de l'ANR IRCAAM, nous proposons dans ce travail de guider le modèle ARPEGE-Climat vers les réanalyses ERA40 en dehors de l'Afrique de l'Ouest (technique dite de guidage en points de grille ou grid-point nudging, Jung et al. 2008, Bielli et al. 2009), et analyser les conséquences sur la mousson simulée. Ces expériences peuvent permettre d'estimer dans quelle mesure une simulation "parfaite" du climat global (c'est-à-dire, une simulation aussi bonne que les réanalyses ERA40 le permettent) pourrait permettre d'améliorer, régionalement, la simulation du système de mousson sur l'Afrique en été boréal. Le protocole utilisé offre en outre la possibilité (i) d'étudier dans quelle mesure les biais du modèle ont une origine locale ou s'insèrent dans des biais de plus large échelle ; (ii) de séparer la variabilité régionale et de large échelle de la MOA, à la fois aux pas de temps interannuel et intrasaisonnier ; (iii) de réaliser des expériences de sensibilité régionales, par exemple aux conditions de surface, tout en s'assurant d'une circulation globale réaliste.

2. Données utilisées et protocole expérimental

Toutes les intégrations sont réalisées à partir de la version 4 du modèle ARPEGE-Climat, lui-même dérivé du modèle de prévision numérique ARPEGE/IFS développé conjointement par le Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT) et Météo-France. Le modèle est utilisé dans sa configuration standard (troncature T63, grille gaussienne réduite de 128 x 64 points de grille, 31 niveaux verticaux).

Le protocole de guidage est identique à celui proposé par Bielli et al. (2009). Les données réanalysées six horaires du CEPMMT (ERA40, Uppala et al. 2005) sont utilisées comme la référence vers laquelle l'atmosphère du modèle est relaxée. Le guidage est appliqué à chaque pas de temps du modèle t_{step} (avec $t_{step} = 30$ minutes) sur les composantes zonale et méridienne du vent, la température, l'humidité spécifique et la pression de surface. Ceci est effectué en rajoutant un terme de rappel $-\lambda(y-y_{ref})$ dans les équations pronostiques du modèle, où y est la solution du modèle et y_{ref} les champs de référence vers lesquels il est guidé ; $\lambda = t_{step}/e_{time}$ est l'intensité du guidage avec e_{time} le pas de temps de relaxation (fixé ici à 5 heures pour U et V, i.e. $\lambda = 0.1$, contre 12 heures pour les autres variables, correspondant à i.e. $\lambda = 0.04$). Le guidage est également plus faible dans les 3 niveaux les plus bas et les 5 niveaux les plus hauts du modèle pour laisser ce dernier s'ajuster au guidage et / ou à des champs de surface perturbés (par exemple, les températures de surface marine, TSM, ou l'humidité du sol).

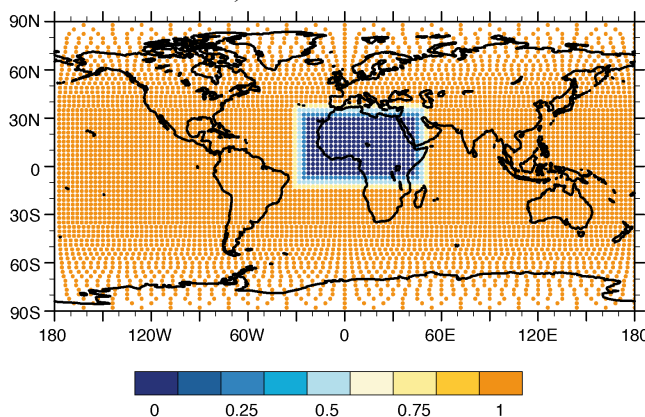


Figure 1. Masque de guidage en dehors de l'Afrique de l'Ouest ("domaine A" : 10S 32N, 30W 50E) avec zone de transition de 5° entre un guidage complet (1) et le domaine libre (0).

Bien que ARPEGE-Climat soit un modèle spectral, le guidage est ici effectué sur un domaine 3D prescrit ("domaine A"), et donc sur la grille gaussienne réduite, via une transformée spectrale inverse (Figure 1). Une zone tampon de 5° est ménagée pour passer de manière progressive du domaine libre au domaine guidé.

Le jeu d'expériences réalisé est présenté dans le Tableau 1. L'expérience de contrôle CtCl est une intégration pluri-annuelle (1971-2000) forcée par les TSM climatologiques mensuelles d'ERA40, après un spin-up de deux ans. Une autre intégration, CtIV, est forcée par les TSM observées (incluant leur variabilité

interannuelle). Elles seront tour à tour utilisées pour caractériser l'état de base du modèle, en l'absence de guidage. Toutes les expériences guidées consistent en ensembles de 30 été boréaux initiés le 15 mai de chaque année par les champs issus de CtCl ; les données sont archivées du 1^{er} juin au 30 septembre (saison JJAS), soit après un spin-up de 15 jours. A_IVIV et A_IVCI sont deux intégrations pluri-annuelles simulant les 30 saisons JJAS de 1971 à 2000, respectivement forcées par des champs de TSM observés et climatologiques. Elles permettent d'analyser de possibles améliorations dans les biais régionaux du modèle, et d'analyser la variabilité interannuelle de la MOA. La reproductibilité des résultats obtenus reste toutefois incertaine, puisqu'une seule réalisation est conduite dans chacun des cas. Des ensembles de 30 membres sont donc ensuite réalisés pour une saison donnée servant d'étude de cas, évitant ainsi des temps de calcul excessifs. L'année 1994 a été retenue car il s'agit de la saison la plus arrosée sur le Sahel, selon les estimations de pluies GPCP, sur la période 1971-2000 (e.g., Bielli et al. 2009 : leur Figure 10).

1971-2000	CtIV [CtIV]	CtCI [CtCI]	A_IVIV [NAfNuIV]		A_IVCI [NAfNuCI]	
SST	Obs.	Clim.	Obs.		Clim.	
Nudging	No		Yes			
Nudging Domain	-		Outside 10S 32N 30W 50E			
Soil Wetness	Interactive					
1994	Ct94	CtNS94	A_9494	A_94CI	A_NS9494	A_NS94CI
SST	1994		1994	Clim.	1994	Clim.
Nudging	No		Yes			
Nudging Domain	-		Outside 10S 32N 30W 50E			
Soil Wetness	Inter-active	Nudged GSWP-2	Interactive		Nudged GSWP-2	

Tableau 1. Expériences réalisées, cf. texte pour plus de détails.

Ct94 est un ensemble de 30 membres forcé par les TSM mensuelles observées de 1994, sans guidage. A_9494 et A_94CI sont des ensembles guidés vers les réanalyses et forcés respectivement par les champs de TSM observés et climatologiques. Les expériences "NS" ont été spécifiquement conçues pour traiter de l'influence de l'humidité du sol et seront discutées plus en détail dans la section 3.5.

3. Résultats

3.1 Etat moyen

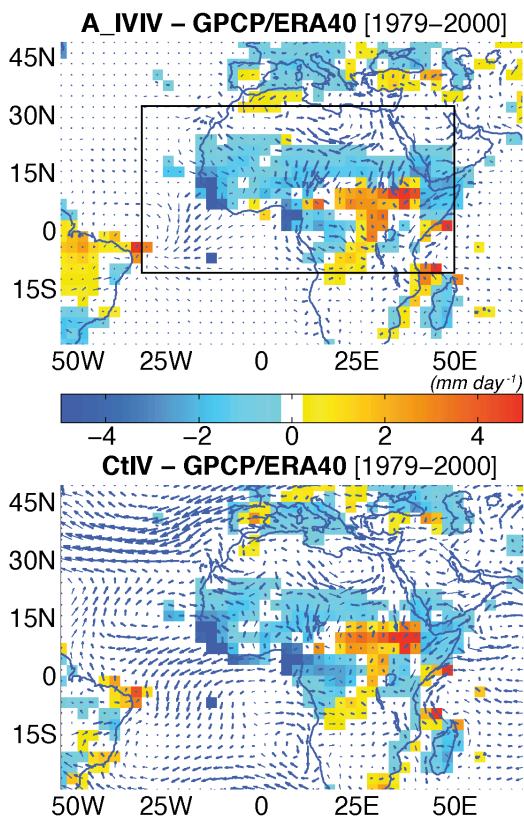


Figure 2. Couleurs : biais des cumuls précipités (mm/jour) par rapport aux données GPCP, période 1979-2000. Vecteurs : biais des vents à 925hPa par rapport à ERA40, même période. Les biais non significatifs (95%) ne sont pas représentés. Rectangle noir : masque de guidage.

La Figure 2 présente les biais de précipitations et de vent dans les basses couches pour l'expérience guidée A_IVIV et l'expérience libre CtIV. Une lecture graphique suffit à montrer que les forts biais secs sur l'Afrique de l'Ouest ne sont pas corrigés par un guidage quasi-global, suggérant une origine avant tout régionale de ces biais. Le même constat s'applique aux cumuls pluviométriques trop élevés sur les Hautes Terres d'Afrique de l'Est et le pourtour de la cuvette congolaise. De même, le flux de mousson trop faible sur l'Atlantique tropical observé dans CtIV tend à résister très fortement au guidage dans A_IVIV.

La Figure 3 cherche à détailler l'origine de ces biais dans la pluviométrie en examinant les flux d'humidité intégrés verticalement sur la colonne d'air ainsi que la divergence d'humidité.

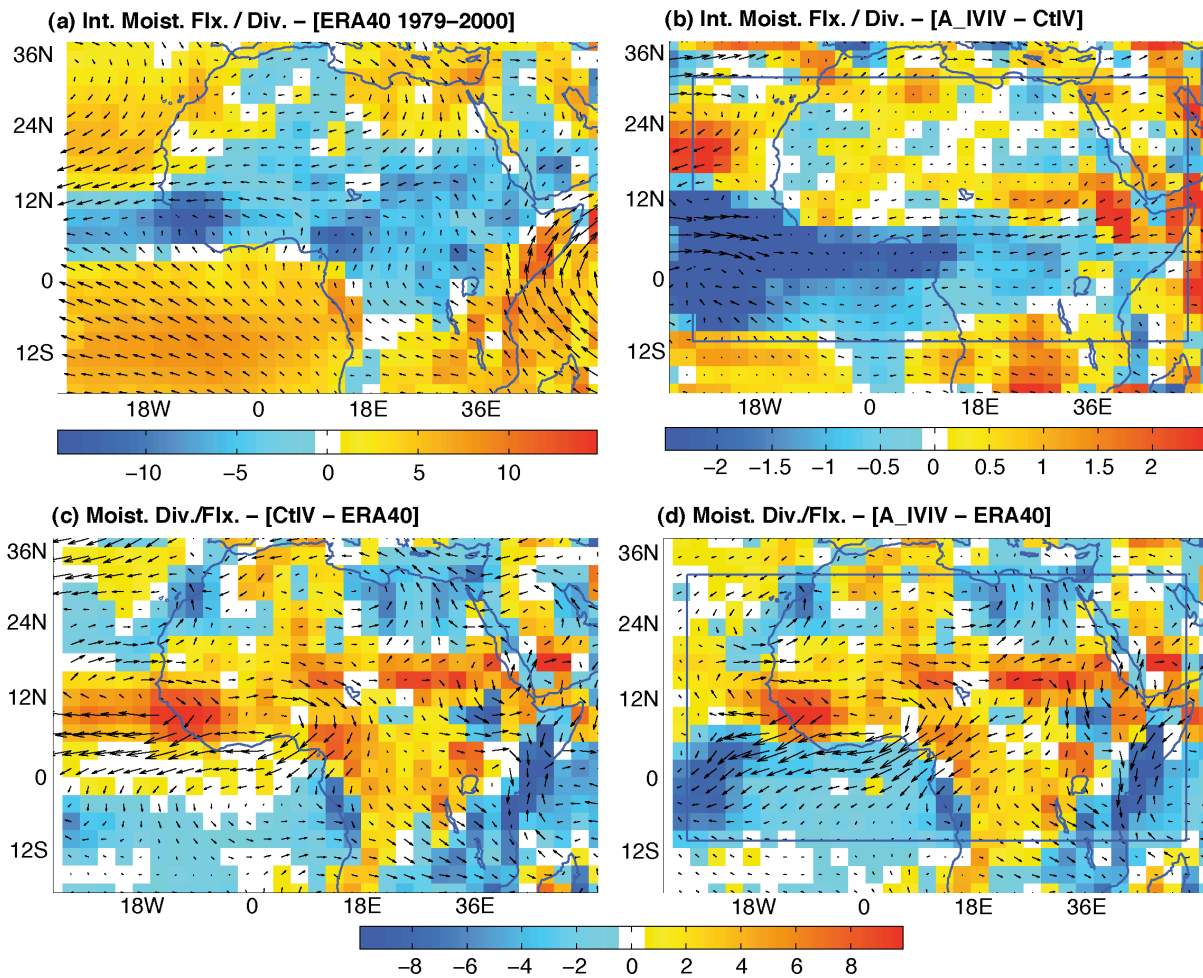


Figure 3. (a) Vecteurs : flux d'humidité moyens (1979-2000) selon ERA40. Couleurs : divergence d'humidité moyenne. (b) Différences des flux d'humidité et de la divergence d'humidité entre les expériences A_IVIV et CtIV. Toutes les différences montrées sont significatives au seuil de 95%. (c) Biais de l'expérience CtIV par rapport à ERA40. Tous les biais représentés sont significatifs au seuil de 95%. (d) Comme (c) mais pour A_IVIV.

Comme la faiblesse du flux de mousson le laissait présager, les flux d'humidité provenant de l'Atlantique tropical pénètrent trop peu sur l'Afrique de l'Ouest. Symétriquement, les flux d'humidité provenant du bassin méditerranéen (Rowell 2003, Fontaine et al. 2009) sont également trop faibles. En conséquence, la convergence d'humidité sur le Sahel est très largement déficitaire, expliquant les biais secs observés sur la Figure 2. Cet état de fait n'est pas modifié par un guidage quasi-global, confirmant leur caractère fondamentalement régional.

3.2 Variabilité interannuelle et intrasaisonnière

La Figure 4 aborde brièvement la variabilité interannuelle observée et simulée. Deux indicateurs de la MOA sont retenus ici : un indice WAMI (West African Monsoon Index, Fontaine et al. 1995, correspondant à la différence entre le vent zonal à 850 et 200hPa moyenné spatialement sur le domaine 3N 13N, 20W 20E) et un indice pluviométrique sahélien (moyenne des précipitations sur le domaine 10N 20N, 20W 20E). Ils permettent de rendre compte du volet dynamique et pluviométrique de la MOA, respectivement.

Les résultats concernant le WAMI indiquent : (i) que dans les expériences libres, des champs de TSM observés sont nécessaires à une simulation approximative de la variabilité interannuelle de la MOA ; (ii) que le guidage apporte ici une plus-value considérable, le

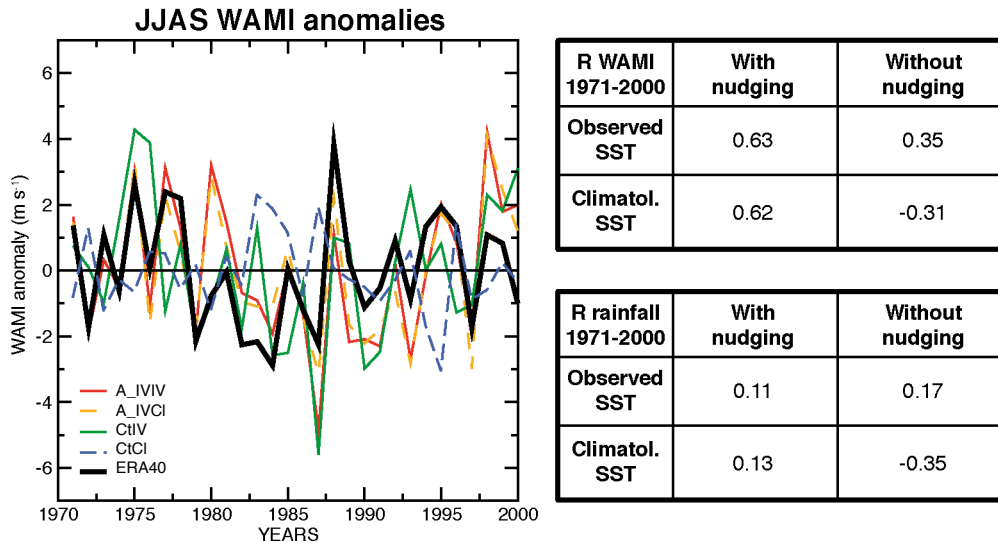


Figure 4. Gauche : variabilité interannuelle de l'indice WAMI observé et simulé (cf. texte pour définition). Droite, tableau du haut : corrélations interannuelles entre l'indice WAMI simulé et observé pour les expériences CtIV, CtCI, A_IVIV et A_IVCI. Tableau du bas : idem mais pour les précipitations sahéliennes.

coefficient de corrélation passant de 0.35 à plus de 0.6 sur la période 1971-2000. La variabilité interannuelle de la MOA, dans ses aspects dynamiques, s'insèrent de ce fait dans un contexte de plus large échelle et n'est pas une caractéristique uniquement intrinsèque au système de mousson lui-même. Les mêmes analyses appliquées aux pluies sahéliennes simulées révèlent des coefficients de corrélation nettement plus faibles, n'atteignent jamais la significativité statistique. Cela tend à indiquer que la paramétrisation des pluies (notamment convectives) dans ARPEGE-Climat est insuffisante, une dynamique réaliste ne parvenant pas à induire des pluies réalistes. Ce constat prévalait déjà sur la Figure 1, les biais de pluie de l'expérience A_IVIV étant significatifs même au sein du domaine relaxé.

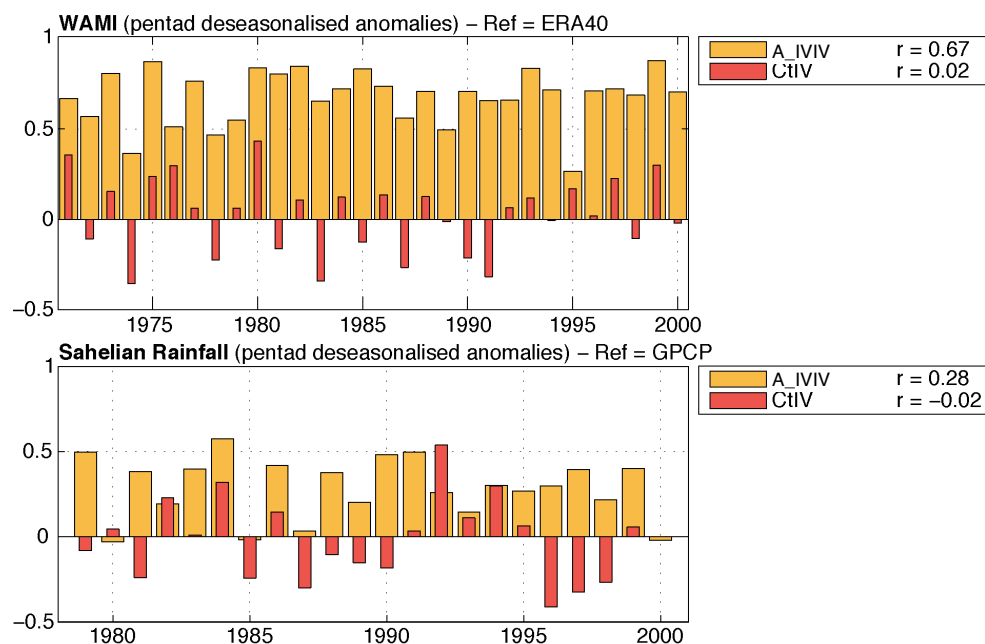


Figure 5. Haut : pour chaque année (1971-2000) corrélations intrasaisonniers entre l'indice WAMI pentadaire désaisonné observé (ERA40) et simulé (CtIV et A_IVIV). Les corrélations moyennes sur 30 ans sont indiquées dans la légende. Bas : idem mais pour les précipitations sahéliennes observées (GPCP) et simulées, période 1979-2000.

La **Figure 5** étend ces analyses au pas de temps intrasaisonnier. L'apport du guidage semble ici relativement évident sur la dynamique intrasaisonnaire de la MOA, le coefficient de corrélation moyen entre l'indice WAMI observé et simulé passant de 0.02 pour CtIV à 0.67 pour A_IVIV. Ces chiffres moyens cachent une certaine variabilité interannuelle, mais A_IVIV présente une chronique intrasaisonnaire significativement corrélée à celle obtenue *via* ERA40 28 années sur 30, contre seulement une année pour CtIV. Une nouvelle fois le gain semble moins important pour la pluviométrie ($\bar{r} = -0.02$ pour CtIV, contre 0.28 pour A_IVIV). Si les résultats concernant CtIV ne sont guère surprenants (le modèle étant complètement libre de reproduire sa propre haute fréquence, sans rappel vers la chronologie observée), les corrélations obtenues avec A_IVIV permettent toutefois de conclure qu'une partie non négligeable de la variabilité intrasaisonnaire de la MOA s'insère dans une variabilité atmosphérique de large échelle, qui dépasse donc la seule Afrique de l'Ouest. Cette conclusion semble plus robuste en ce qui concerne l'aspect dynamique de la mousson. Pour les précipitations les incertitudes sont plus grandes, en raison des difficultés du modèle à simuler un champ de pluie réaliste.

3.3 Simulation des anomalies de 1994

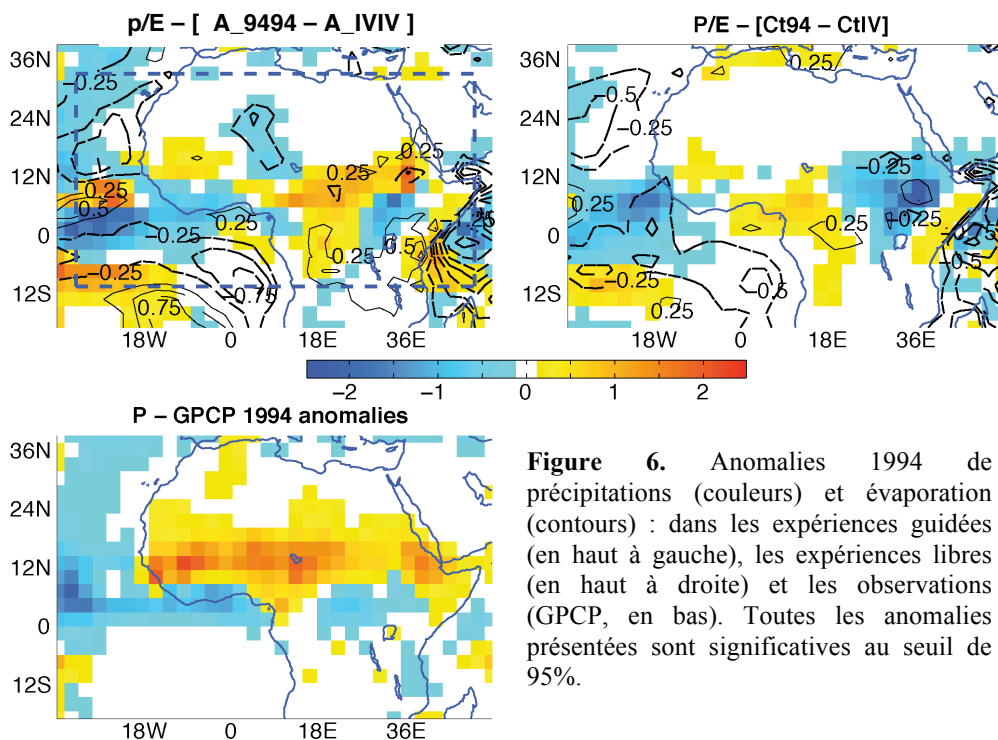


Figure 6. Anomalies 1994 de précipitations (couleurs) et évaporation (contours) : dans les expériences guidées (en haut à gauche), les expériences libres (en haut à droite) et les observations (GPCP, en bas). Toutes les anomalies présentées sont significatives au seuil de 95%.

Les résultats de la Section 3.2 dépendent d'une intégration pluri-annuelle unique, qui ne permet pas de quantifier leur reproductibilité. Afin de limiter les temps de calcul et la masse de données générées, des études de cas ciblées permettront de réaliser des expériences d'ensemble comportant 30 membres, dans le but d'analyser leur convergence et la variabilité interne du modèle. La **Figure 6** présente les anomalies pluviométriques de 1994. Les tests de Student, utilisés pour estimer leur significativité, sont donc appliqués aux 30 membres des ensembles A_9494 et Ct94, comparés aux 30 années des expériences A_IVIV et CtIV qui représentent la climatologie du modèle, en configuration guidée ou libre.

Si des anomalies humides sont bien enregistrées sur le centre et l'est de la ceinture sahélienne, le modèle ne parvient pas à simuler l'intensité et l'étendue spatiale des anomalies de pluies estimées par GPCP. Les déficiences concernent tout particulièrement l'Afrique de l'Ouest (à l'ouest du Lac Tchad). Le guidage semble apporter bien peu pour corriger ces biais secs.

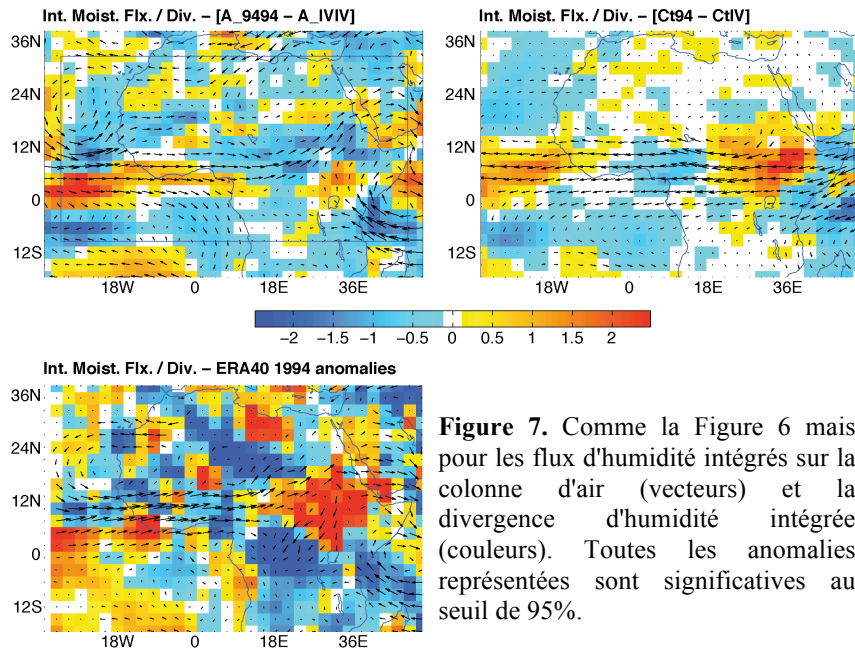


Figure 7. Comme la Figure 6 mais pour les flux d'humidité intégrés sur la colonne d'air (vecteurs) et la divergence d'humidité intégrée (couleurs). Toutes les anomalies représentées sont significatives au seuil de 95%.

La Figure 7 présente les anomalies de 1994 dans les flux d'humidité intégrés verticalement, et dans la divergence de ces flux. Les réanalyses présentent de fortes anomalies zonales d'ouest aux latitudes soudano-sahéliennes et guinéennes, favorisant des anomalies de convergence (divergence) sur l'ouest (l'est) du Sahel. Si la divergence présente certains points communs avec ERA40 dans les expériences libres, elles résultent en revanche de flux d'humidité irréalistes décrivant des anomalies d'est en 1994. Le guidage permet d'obtenir des anomalies de signe correct dans les flux d'humidité, favorisant effectivement des anomalies de convergence sur l'Afrique de l'Ouest. Les anomalies de divergence sur l'Afrique de l'Est restent en revanche trop faibles. En bref, le guidage autorise une fois de plus une dynamique atmosphérique régionale plus réaliste sur l'Afrique de l'Ouest, sans contribuer fortement à améliorer la retranscription du champ de pluie.

3.4 Variabilité interne

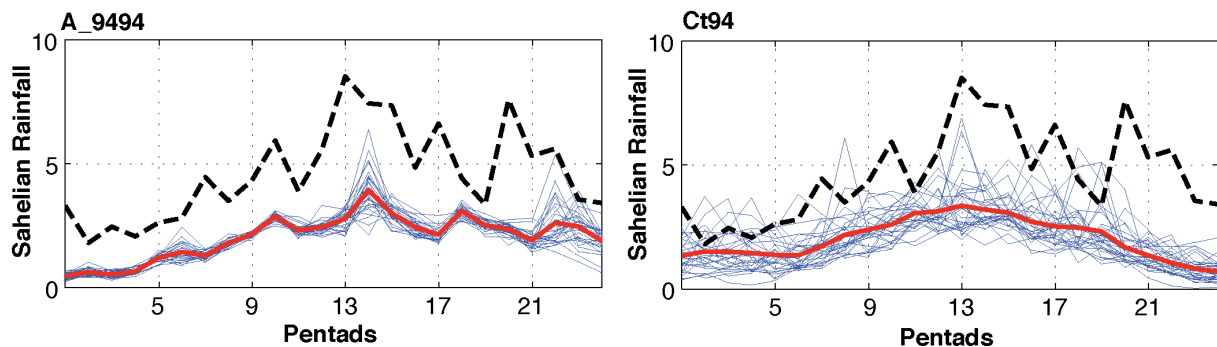


Figure 8. Précipitations sahéniennes pentadaires (mm/jour ; gauche : A_9494, droite : Ct94), JJAS 1994. Courbe noire pointillée : estimations GPCP. Courbes bleues : membres des expériences d'ensemble. Courbe rouge : moyenne d'ensemble.

La Figure 8 montre la dispersion des 30 membres des expériences Ct94 et A_9494 en termes de pluviométrie sahénienne. La sous-estimation générale des cumuls précipités apparaît nettement, dans les deux expériences. Dans Ct94 la variabilité haute fréquence est aléatoire d'un membre à l'autre, sans phasage précis, aboutissant à une moyenne d'ensemble très lissée. Le guidage permet de contraindre dans une certaine mesure les membres à varier en phase,

aboutissant à la simulation de phases humides et de phases sèches bien identifiées. La variabilité interne, bien que fortement réduite, reste cependant non négligeable –en particulier à certaines périodes clés de la saison pluvieuse. C'est le cas par exemple pendant les pentades # 6, 22 à 24, et surtout 14. Il est également remarquable qu'à l'échelle pentadaire, la variabilité interne du système se traduit par des cumuls précipités variant fortement entre les membres lors des pentades citées ci-dessus, et non dans un décalage temporel des pics de pluie.

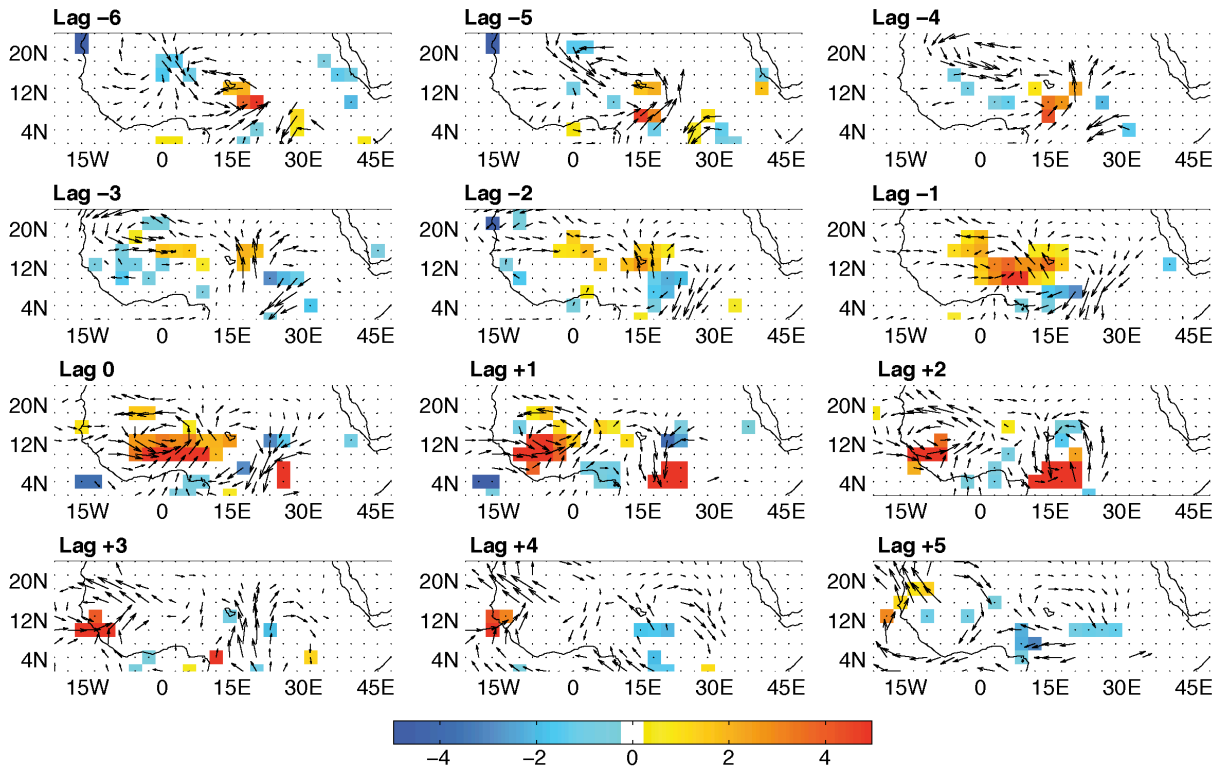


Figure 9. Analyse composite laggée opposant les 5 membres les plus humides et les 5 membres les plus secs de l'expérience A_9494 pendant le pic de pluie de la pentade # 14 (cf. Figure 8). Les lags sont exprimés en jours. Couleurs : différence dans les pluies (mm/jour). Vecteurs : différences dans le vent à 850hPa (m/s). Toutes les différences montrées sont significatives au seuil de 95%.

La Figure 9 apporte un élément d'explication concernant les causes de ces épisodes où les membres divergent fortement. Les 5 membres les plus secs et les 5 membres les plus humides sur le Sahel durant la pentade # 14 sont d'abord isolés, puis une analyse composite laggée portant sur les pluies et le vent à 850hPa est ensuite effectuée. Les lags varient de -6 à +5 jours avant / après le jour central de la pentade # 14.

En lag 0, le champ de pluie montre par construction des cumuls significativement différents entre les composites sèches et humides : la région principalement concernée est le Sahel central et ouest, sur une extension d'environ 25° en longitude et 5° en latitude. A la verticale de cette même région, les membres les plus humides présentent des vents ayant une composante cyclonique significativement plus développée que les membres secs. L'analyse des composites laggées révèle que cette structure dans les vents et la pluie se propage d'est en ouest au cours du temps. Elle se développe dès le lag -3 à l'est du Lac Tchad et disparaît au lag +3 sur le Sénégal.

L'extension spatiale, la vitesse et le sens de propagation, et la durée de vie de ces structures est compatible avec une onde d'est africaine. Des résultats qualitativement identiques sont obtenus pour les autres pics pluvieux montrant une forte dispersion des membres. On suggère donc que la variabilité interne du système, sur l'Afrique de l'Ouest, atteint des maxima liés à la simulation des ondes d'est. Les membres les plus secs (humides) simulent des ondes d'est plus

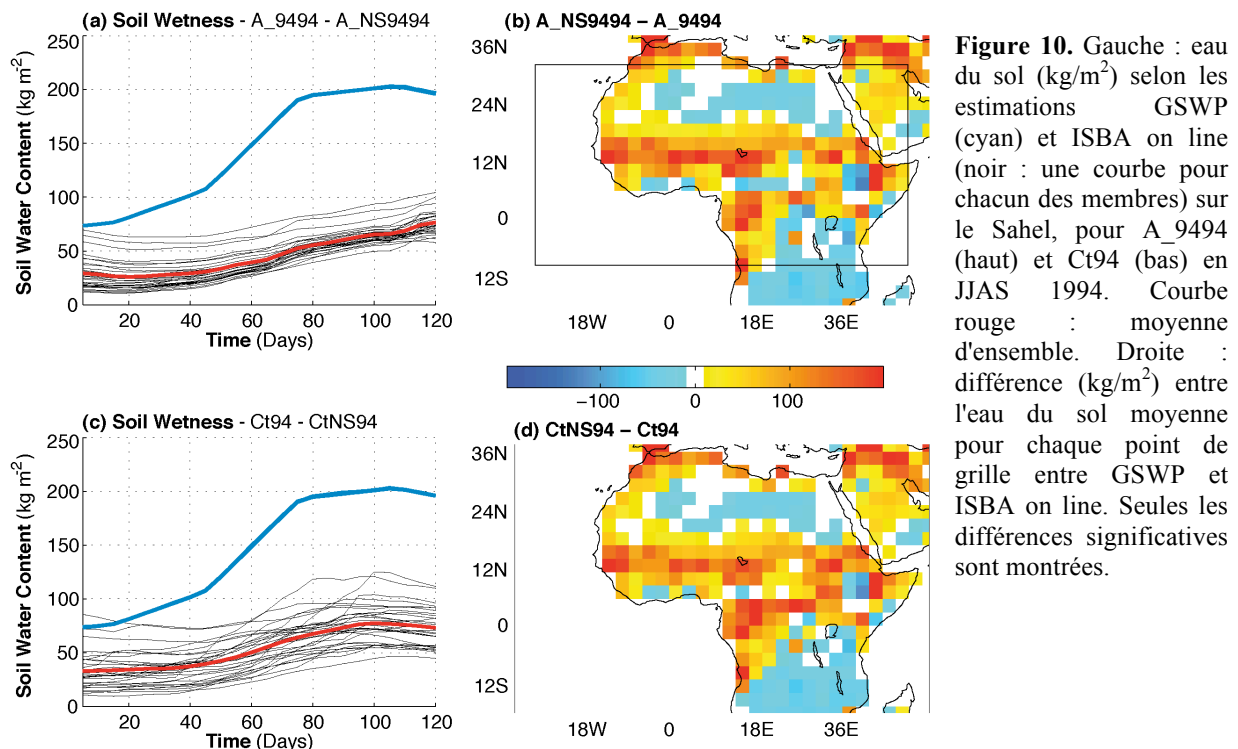
faibles (fortes). Ces résultats suggèrent (i) que les facteurs déterminant l'intensité des ondes d'est sont avant tout régionaux ; (ii) étant donné le très bon phasage de ces ondes, qui surviennent toutes simultanément mais avec des intensités différentes, les éléments responsables de leur genèse semblent au contraire gouvernés en partie par la large échelle. Des analyses additionnelles (non montrées) suggèrent que l'intensité et l'extension longitudinale du JAE pourraient jouer un rôle clé.

3.5 Sensibilité de la MOA à l'humidité du sol

En comparaison des techniques de modélisation climatique régionale, l'apport des techniques de guidage quasi-globales appliquées à des MCG réside dans la possibilité d'effectuer des expériences de sensibilité, par exemple aux conditions de surface. Le calcul effectué à l'échelle globale et les coefficients de relaxation plus faibles dans les niveaux inférieurs et supérieurs permet au modèle de s'ajuster et de fournir un climat physiquement cohérent. Les inconvénients résident dans la résolution horizontale relativement faible (2.8° environ dans notre cas), et dans une physique et une paramétrisation moins complètes.

Une illustration des possibilités offertes est fournie par les Figures 10 et 11. Dans le but d'examiner dans quelle mesure les biais du modèle sont liés à de mauvais états de surface, le modèle de surface ISBA est ici guidé vers les données GSWP-2 (Dirmeyer et al. 1999), correspondant à l'intégration off line de 12 modèles de surface forcés par des champs atmosphériques fournis par les réanalyses NCEP-DOE AMIP-II et des données de pluie GPCC, sur la période 1986-1995. Les données utilisées ici comme solution de référence pour l'eau du sol sont celles calculées par ISBA dans le cadre de GSWP-2 : ISBA est donc guidé vers sa propre solution, obtenue lors d'intégrations off-line conduites par des champs de forçages plus réalistes. Deux expériences d'ensemble de 30 membres, A_NS9494 et CtNS94, sont réalisées sur la saison JJAS 1994, et comparées aux expériences A_9494 et Ct94 pour lesquelles l'eau du sol est calculée par ISBA couplé à ARPEGE.

La Figure 10 montre les aspects spatiaux et temporels de la perturbation introduite par l'eau du sol GSWP-2. En fin de saison des pluies, sur le Sahel, l'utilisation des données GSWP-2 revient à multiplier par 250% l'eau du sol. Le guidage d'ISBA supprime en outre toute variabilité inter-membre. Spatialement, le Sahel et la cuvette congolaise sont les deux régions



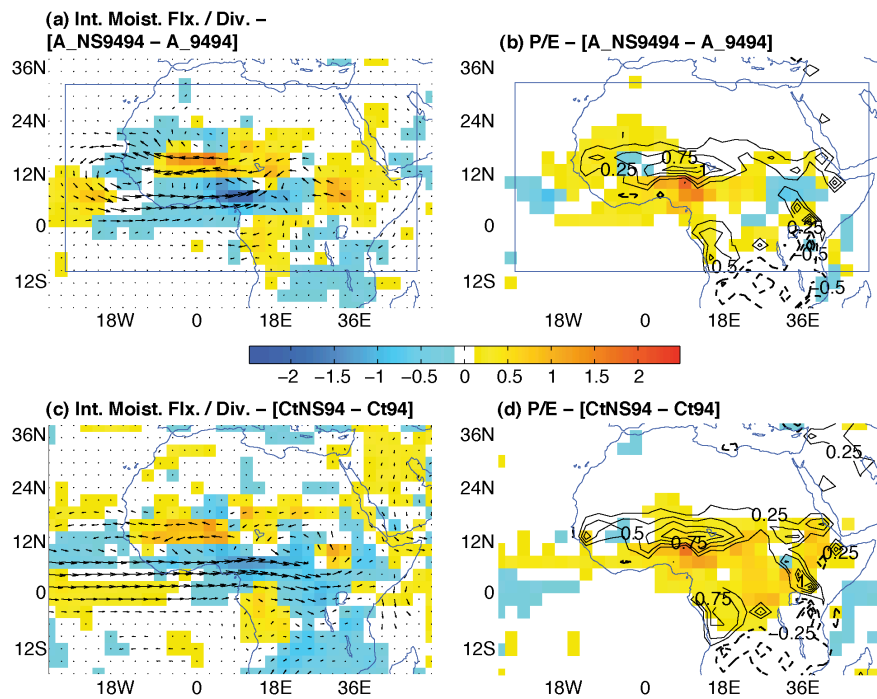


Figure 11. Gauche : différence dans les flux d'humidité intégrés sur la colonne d'air (vecteurs) et divergence d'humidité intégrée (couleurs) entre expériences conduites avec ISBA interactif et ISBA guidé, et pour les expériences avec guidage atmosphérique (haut) et les expériences libres (bas). Seules les différences significatives au seuil de 95% sont montrées. Droite : idem mais pour les précipitations (couleurs) et l'évaporation (contours). L'équidistance des courbes est de 0.25 mm/jour.

où l'apport d'eau est le plus important.

La Figure 11 présente les conséquences de la correction des biais d'eau du sol sur les champs atmosphériques. Le champ d'évaporation répond localement très fortement tandis que la réponse des pluies est plus diffuse spatialement. Les cumuls pluviométriques sont significativement supérieurs dans les expériences ayant recours à l'eau du sol GSWP-2, en raison principalement d'un recyclage local plus important. Bien que le couplage entre pluie et eau du sol soit supprimé ce type d'intégrations, les résultats obtenus suggèrent que les états de surface pourraient jouer un rôle fondamental dans l'explication des biais d'ARPEGE-Climat sur l'Afrique de l'Ouest.

Conclusion

Les apports du guidage en points de grille sont incontestables pour imposer au modèle, sur son domaine libre, une partie la variabilité intrasaisonnière et interannuelle observée. Ils sont beaucoup plus limités pour contribuer à corriger ses biais régionaux. Des intégrations réalisées avec une eau du sol plus réaliste permettent toutefois d'isoler les champs de surface comme fondamentaux pour expliquer les cumuls pluviométriques trop faibles sur l'Afrique de l'Ouest. L'utilisation de données d'albédo MODIS fournies par la NASA est donc envisagée pour estimer le poids des variables de surface dans les biais d'ARPEGE-Climat sur l'Afrique.

Bibliographie

Bielli S, Douville H, Pohl B (2009) Understanding the West African monsoon variability and its remote effects: an illustration of the grid point nudging methodology. *Clim Dyn*, published on line. doi:10.1007/s00382-009-0667-8

Dirmeyer PA, Dolman AJ, Sato N (1999) The Global Soil Wetness Project : a pilot project for global land surface modeling and validation. *Bull Am Meteor Soc* 80:851-878

Fontaine B, Janicot S, Moron V (1995) Rainfall anomaly patterns and wind field signals over West Africa in August (1958-1989). *J Clim* 8:1503-1508

Fontaine B et al. (2009) Impacts of warm and cold situations in the Mediterranean basin on the West African monsoon: observed connection patterns (1979-2006) and climate simulations. *Clim Dyn*, published on line

Jung T, Palmer T, Rodwell M, Serrar S (2008) Diagnosing forecast error using relaxation experiments. *ECMWF Newsletter* 116:24-34

Rowell DP (2003) The Impact of Mediterranean SSTs on the Sahelian Rainfall Season. *J Clim* 16:849-862

Uppala SM, et al (2005) The ERA-40 re-analysis. *Q J R Meteor Soc* 131:2961-3012