

Les impacts du changement climatique sur les rendements agricoles en Afrique de l'Ouest

*Benjamin SULTAN,
Philippe ROUDIER,
Seydou TRAORÉ*

Introduction

Le climat a une influence très forte sur l'agriculture, qui est considérée comme l'activité humaine la plus dépendante des variations climatiques (ORAM, 1989 ; HANSEN, 2002). Les impacts du climat sur l'agriculture varient d'une région du globe à une autre avec des conséquences socio-économiques particulièrement importantes dans les pays en développement des latitudes tropicales. En effet, ces pays connaissent une grande variabilité climatique, comme le régime de mousson en Inde et en Afrique de l'Ouest ou encore l'influence des événements El Niño sur le continent américain (CHALLINOR *et al.*, 2003), et dans bien des cas leur pauvreté endémique augmente le risque et la gravité des catastrophes naturelles (PNUD, 2004).

Les populations rurales de l'Afrique subsaharienne sont particulièrement exposées aux aléas climatiques dans la mesure où elles sont étroitement dépendantes de l'agriculture pluviale, qui représente près de 93 % des terres cultivées. Rappelons en effet que 80 % des céréales consommées en Afrique subsaharienne proviennent de cette production traditionnelle et que le secteur agricole emploie 70 % de la totalité de la main-d'œuvre (FAO, 2003), représentant entre 15 et 20 % du PIB. Outre cette dépendance, la croissance rapide de ces populations et leur pauvreté, ne leur permettant pas un accès aux adaptations technologiques (mécanisation, engrais, irrigation), constituent des facteurs aggravant les impacts socio-économiques du climat (PNUD, 2004). En effet, les faibles moyens de l'agriculture pluviale pour anticiper et enrayer les effets

des fluctuations climatiques s'illustrent par une corrélation forte entre la productivité agricole et la pluviométrie avec des conséquences sur la sécurité alimentaire. Depuis les années 1970, les plus grandes famines ayant nécessité un recours à l'aide alimentaire internationale (1974, 1984-1985, 1992 et 2002) sont entièrement ou en partie dues aux variations du climat (DILLEY *et al.*, 2005). Dans ce contexte, *être capable de mieux comprendre et d'anticiper les fluctuations climatiques et leurs conséquences sur l'agriculture* constitue donc un enjeu majeur en termes de développement et de sécurité alimentaire en Afrique subsaharienne.

Si l'Afrique subsaharienne est aujourd'hui fréquemment confrontée à l'insécurité alimentaire, qu'en sera-t-il dans le futur ? Un regard rétrospectif sur l'évolution de ces dernières années donne une image assez pessimiste pour le futur. En effet, en dépit d'une hausse de la production alimentaire, le très fort accroissement de la population a entraîné une augmentation du taux de pauvreté et de malnutrition en Afrique plus rapidement que n'importe où dans le monde, avec un indice de production agricole par habitant bien plus bas que dans d'autres continents. Or, si l'on tient compte des projections des besoins alimentaires à l'horizon 2050, au moment où selon les Nations unies la planète aura atteint le maximum de sa population, l'effort en termes d'accroissement de la production alimentaire devrait être extrêmement élevé : entre 2000 et 2050, l'Afrique devrait, selon COLLOMB (1999), plus que quintupler sa production ! Le futur de cette région dépend donc de la capacité du secteur agricole à relever le défi de nourrir sa population qui croît rapidement. Or, ce défi sera d'autant plus difficile à relever que le changement climatique est aujourd'hui à l'œuvre et ne sera certainement pas sans conséquences sur l'agriculture en Afrique comme ailleurs. Les 4^e et 5^e rapports du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat – AR4 et AR5 Giec), publiés respectivement en 2007 et en 2014, ont en effet alerté la communauté internationale d'une augmentation de la température partout dans le monde, ainsi que d'une probable augmentation de la fréquence et de l'intensité des aléas météorologiques majeurs comme les sécheresses, citant l'Afrique comme le continent le plus vulnérable aux changements climatiques (IPCC, 2014). Il n'y a pas de doute qu'une modification de l'intensité et/ou du régime des précipitations affectera les systèmes agricoles et pastoraux en Afrique subsaharienne (CGIAR, 2009). L'agriculture irriguée, comme la culture du riz qui joue un rôle important pour nourrir la population urbaine en Afrique, sera également affectée pas seulement à cause d'une possible modification de la disponibilité en eau, mais à cause de l'augmentation des températures qui peut entraîner des pertes conséquentes de rendements (DINGKUHN, 1995 ; DINGKUHN et MIEZAN, 1995 ; DINGKUHN *et al.*, 1995). Il apparaît donc crucial de pouvoir *fournir une image plus précise de l'évolution attendue du potentiel de production agricole en Afrique subsaharienne dans le contexte du réchauffement climatique*. Cependant, cette tâche reste encore difficile à réaliser du fait des fortes incertitudes sur les projections régionales du changement climatique, dans la réponse des plantes aux changements environnementaux (pluie, températures, concentration de CO₂ dans l'atmosphère), dans le couplage des modèles agronomiques et climatiques et dans la façon dont les systèmes agricoles vont s'adapter progressivement aux changements environnementaux (CHALLINOR *et al.*, 2007). L'objectif de ce qui suit

est : 1) de faire un bilan objectif de la littérature sur les effets du changement climatique sur l'agriculture en Afrique de l'Ouest ; 2) de comprendre les déterminants de cette réponse.

Construire des scénarios de rendement dans le futur

La littérature concernant les impacts du changement climatique sur l'agriculture en Afrique, et ailleurs dans le monde, montre une méthodologie caractéristique décrite par la figure 1. Ainsi, quantifier les variations de rendements des cultures dues aux changements climatiques requiert les principales étapes suivantes.

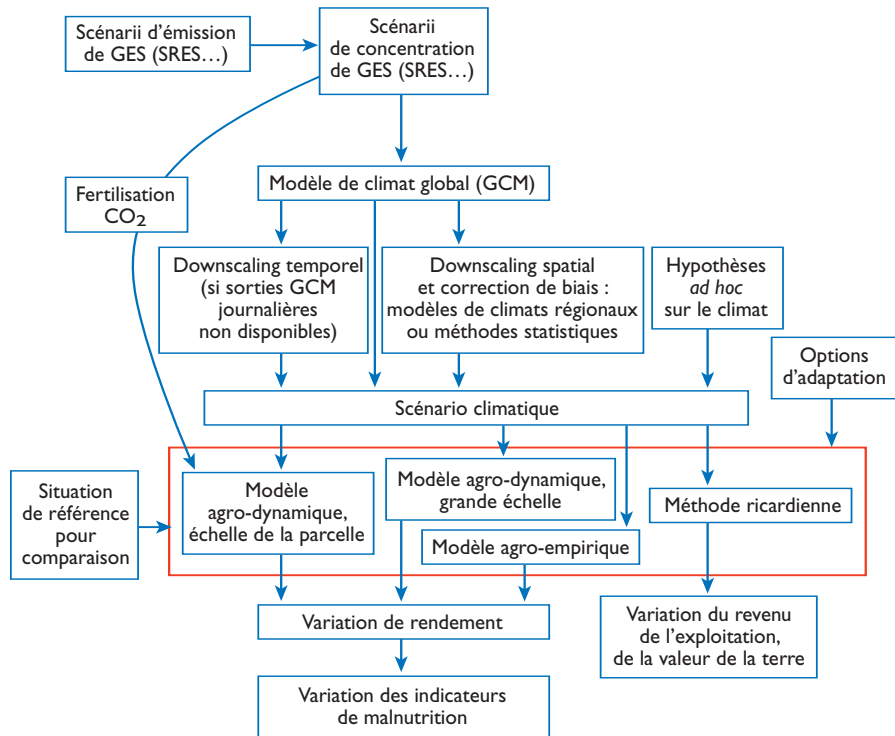


Figure 1.
Résumé de la méthode de travail
des études d'impacts du changement climatique sur les rendements.
Source : extrait de ROUDIER (2012).

Générer le climat futur

Afin de pouvoir quantifier l'impact du changement climatique sur une variable donnée, il est tout d'abord nécessaire de définir des scénarii décrivant l'évolution future des variables météorologiques. La manière la plus simple est de créer un scénario uniforme (e.g. + 10 % de pluie, + 2 °C pour les températures) et d'appliquer ce changement à des données climatiques observées représentant la période de référence (BEN MOHAMED *et al.*, 2002 ; SALACK, 2006 ; VANDUIVENBOODEN *et al.*, 2002). Cependant, il est clair que cette méthode, bien que permettant de faire des analyses de sensibilité intéressantes, repose sur des hypothèses fortes sur le climat futur et ne conserve pas forcément la cohérence entre les variables climatiques. Une approche aux fondements scientifiques plus solides existe, *via* l'utilisation de modèles de climat globaux (GCM). Comme on l'a vu dans le chapitre 3 (ce volume), les GCM donnent une grande variété de réponses selon le scénario d'émission ou le modèle utilisé. Ainsi, pour échantillonner une partie de l'incertitude dans les projections climatiques, la majorité des études publiées utilisent plusieurs GCM et/ou plusieurs scénarii (e.g. SCHLENKER et LOBELL, 2010).

Modéliser les cultures

Pour quantifier les liens entre le climat et l'agriculture, un prérequis est de construire un modèle qui permet de transcrire l'information climatique (températures et/ou précipitations, par exemple) en termes de variables agronomiques (rendements agricoles, biomasse). Ce type de modèle est particulièrement utile pour synthétiser les connaissances existantes sur les relations climat/plante, explorer des hypothèses de changements de climat ou de pratiques agricoles, identifier des variables clés sur lesquelles la recherche doit mettre l'accent et construire des scénarios pour le futur. Deux approches distinctes sont généralement employées : la première se fonde sur des modèles agronomiques statistiques et la seconde sur des modèles mécanistes, les deux cherchant à estimer la productivité agricole en réponse au climat. Les modèles agricoles empiriques sont fondés sur une relation statistique dérivée de données observées et liant les rendements agricoles, à un endroit donné, à des variables climatiques. Bien qu'une telle relation soit relativement facile à établir, calibrer et valider un modèle statistique robuste demande de longues séries de données (climat et rendements). Cette relation revêt cependant un avantage notable, puisqu'elle peut être établie directement à grande échelle (e.g. nationale) en utilisant des données climatiques agrégées spatialement, afin de prédire les rendements sur de vastes régions. Cette approche est notamment utilisée par LOBELL *et al.* (2008) et SCHLENKER et LOBELL (2010) qui considèrent que cela permet une évaluation simple des futurs impacts climatiques à une échelle pertinente pour informer les décideurs.

L'autre approche est la modélisation « mécaniste » ou « dynamique », fondée sur des équations représentant les processus physiologiques de la croissance des cultures (assimilation du carbone et des nutriments, transpiration...) et de leur développement en réponse au climat (e.g. apparition des organes successifs, phase végétative et

reproductive...). Étant donné que cette approche permet en théorie de saisir les effets intrasaisonniers et non linéaires du climat sur les cultures, la plupart des études d'impact en agriculture utilisent un modèle mécaniste (ROUDIER *et al.*, 2011). Cependant, tous les modèles de ce type n'ont pas la même approche physiologique et n'atteignent pas le même niveau de détail. En particulier, l'effet positif sur la photosynthèse d'une concentration atmosphérique élevée en CO₂ (TUBIELLO *et al.*, 2007 a et 2007 b) n'est pas pris en compte dans tous les modèles mécanistes (e.g. SALACK, 2006). De plus, ces modèles nécessitent de nombreux paramètres et sont de ce fait utilisés à l'échelle de la parcelle où ces données sont disponibles et peuvent être considérées comme homogènes : ils ne fournissent pas directement d'information sur les impacts climatiques à plus large échelle.

Il faut noter qu'une troisième approche, l'analyse ricardienne (MENDELSON *et al.*, 1994) est également utilisée pour estimer l'impact du changement climatique sur l'agriculture en Afrique de l'Ouest (e.g. KURUKULASURIYA et MENDELSON, 2008 ; MOLUA, 2009). Cette approche se concentre sur le revenu net des exploitations agricoles au lieu des rendements agricoles et, à la différence de la plupart des études d'impact, prend en compte les stratégies d'adaptation. L'approche ricardienne procède globalement en plusieurs grandes étapes : 1) la collecte d'informations socio-économiques concernant les exploitations agricoles ; 2) le calcul du revenu net de l'exploitation grâce à ces informations ; 3) la mise en place d'une régression entre le revenu net calculé et différentes variables comme le climat, le sol et un ensemble de variables économiques ; 4) l'utilisation du lien établi entre revenu et climat pour projeter l'impact du climat futur. Notons qu'à la différence des approches empiriques, les régressions effectuées ici ne sont que pour une année : il s'agit donc d'une étude de la variabilité spatiale.

Relier les GCM et les modèles de culture

La combinaison d'un GCM avec un modèle agronomique soulève plusieurs problèmes. Premièrement, les GCM présentent le plus souvent des biais significatifs dans leurs simulations du climat, notamment pour les cumuls et distributions régionaux de précipitation : la part des petites pluies (< 10 mm/jour) dans le cumul total et leur fréquence sont surestimées, alors que c'est l'inverse (sous-estimation) pour les grosses pluies (> 20 mm/jour ; RANDALL *et al.*, 2007 ; DAI, 2006). Ainsi, certaines études d'impact qui donnent des résultats localisés requièrent normalement un certain niveau de correction de biais. La méthode de correction la plus simple est la méthode des anomalies. Pour un GCM donné, une anomalie moyenne annuelle calculée entre le futur et le climat actuel simulé est ajoutée à un jeu de données actuelles observées (voir par exemple MÜLLER *et al.*, 2010). Deuxièmement, la combinaison d'un GCM et d'un modèle déterministe est plus complexe qu'un couplage simple de deux modèles à cause de la différence entre leurs échelles respectives. En effet, les GCM produisent typiquement des projections climatiques sur des mailles de 2° de côté et, alors que les modèles statistiques peuvent être directement calibrés pour utiliser en entrée des informations agrégées de ce type, les modèles mécanistes requièrent des données à une échelle plus fine. Il faut donc généralement effectuer une étape de

descente d'échelle (*downscaling* en anglais), de l'échelle globale du GCM à l'échelle locale du modèle agronomique. On définit en général deux types de descente d'échelle (qui peuvent parfois être combinés) :

– la descente d'échelle statistique, dans laquelle des relations empiriques entre la circulation atmosphérique de méso-échelle et le climat local sont utilisées pour créer des séries temporelles réalistes de variables climatiques locales. Cette méthode inclut les générateurs de temps stochastiques, les régressions (linéaires ou non), la méthode des types de temps. ZORITA et VON STORCH (1999), MÜLLER *et al.* (2010) utilisent par exemple un générateur de temps stochastique pour passer de variables climatiques mensuelles à un pas de temps horaire ;

– la descente d'échelle dynamique, qui utilise des modèles de climat régionaux, à une résolution fine (environ 10-50 km), imbriqués dans le GCM (PAETH *et al.*, 2011).

Récemment, le besoin de modélisation agronomique pour des études sur le changement climatique a mené au développement de modèles mécanistes à une échelle globale. Ces modèles sont créés et calibrés pour fonctionner directement à une échelle compatible avec les sorties des GCM, ce qui permet d'éviter l'étape de descente d'échelle. Certains modèles sont développés pour être indépendants des modèles d'impact, alors que d'autres le sont comme parties de modèles de végétation globaux, où ils servent pour les terres cultivées (DE NOBLET-DUCOUDRÉ *et al.*, 2004 ; BONDEAU *et al.*, 2007 ; BERG *et al.*, 2011). Ils peuvent ainsi au besoin être utilisés pour des études d'impact du climat.

Adaptation au changement climatique

Certaines études sur les impacts du changement climatique prennent en compte l'adaptation des systèmes de culture ou des populations. Selon CHUKU et OKOYE (2009), les options d'adaptation disponibles en agriculture pour faire face au changement climatique peuvent être classées en quatre grandes catégories : 1) la gestion des revenus/actifs ; 2) les assurances et programmes gouvernementaux ; 3) les pratiques de production des exploitations ; 4) le développement technologique. Cette même étude souligne également que ces catégories sont caractérisées par l'échelle (locale, nationale) et le type d'agents impliqués. De nombreuses options d'adaptation sont déjà utilisées à l'échelle locale par les agriculteurs sahéliens. Ce sont généralement des pratiques de production (e.g. gestion de l'eau, sélection de certaines variétés, fertilisation), mais aussi des techniques de gestion des revenus (e.g. diversification des revenus, migrations). On voit ainsi qu'il peut être nécessaire de considérer l'adaptation dans ce type d'études, si on veut éviter une surestimation de l'impact du changement climatique sur les rendements agricoles. Cependant, dans la plupart des études sur l'Afrique de l'Ouest, l'adaptation n'est pas explicitement prise en compte. Dans certaines études (e.g. MÜLLER *et al.*, 2010), la date de semis change chaque année, mais reste fondée globalement sur la même technique de semis : cette attitude est donc plus une adaptation à la variabilité interannuelle du climat qu'au changement climatique. TINGEM et RIVINGTON (2009) simulent quant à eux le rendement de certaines cultures avec et sans adaptation. Ils considèrent de nouvelles dates de semis et d'hypothétiques variétés améliorées. Les pertes de rendements futures sont ainsi

clairement limitées. Dans le même ordre d'idée, BUTT *et al.* (2005) présentent leurs résultats conjointement sans adaptation et avec un ensemble d'options d'adaptation théorique : options économiques, mélange de cultures et variétés résistantes à la chaleur. Là aussi, ces options augmentent clairement les rendements futurs. Enfin, les études ricardiennes considèrent une adaptation totale. Cependant, il n'est pas possible de détailler dans les résultats quelles options sont utilisées et l'impact des changements climatiques sans adaptation. De plus, cette méthode ne prend pas en compte les coûts de transition et surestime donc les bénéfices de l'adaptation.

Une baisse des rendements agricoles sous l'effet du changement climatique

Il existe de nombreux articles et rapports faisant état de projections futures des rendements en Afrique subsaharienne en réponse aux changements environnementaux (CHALLINOR *et al.*, 2007). Cependant, ces documents portent tous sur un pays ou un groupe de pays en particulier, mettent l'accent sur une culture ou sur une variété spécifique et utilisent des méthodologies différentes (modèle empirique ou mécaniste pour simuler les rendements, différentes méthodes de régionalisation, différents modèles ou scénarios climatiques, prise en compte de l'effet du CO₂). Il est donc assez difficile de se faire une idée d'ensemble de l'impact du changement climatique sur l'agriculture en Afrique et surtout des incertitudes dont sont assorties ces projections. ROUDIER *et al.* (2011) ont procédé à une méta-analyse des résultats de la littérature en compilant les résultats issus de 16 publications récentes sur le sujet pour constituer une base de données de rendement pour le futur. La figure 2a montre que le signe du changement relatif de rendement entre le présent et le futur est dans la plupart des cas négatif avec une baisse des rendements de l'ordre de 10 % par rapport au présent. Ce chiffre est néanmoins assorti d'une incertitude forte, puisque les distributions des réponses sont très étalées et varient de - 40 % à + 80 % selon les cas. La prise en compte de la concentration atmosphérique en CO₂, qui a un effet fertilisant sur la plante quoique encore mal compris et mal représenté par les modèles (LONG *et al.*, 2006 ; TUBIELLO *et al.*, 2007 b ; AINSWORTH *et al.*, 2008), a un effet d'atténuation sur l'effet négatif du changement climatique, bien que les impacts combinés des changements environnementaux (climat et CO₂) restent globalement négatifs.

Il est également intéressant de constater que, même si la dispersion des résultats issus de l'utilisation de modèles mécanistes est plus forte (ce qui est logique, car ces modèles sont moins contraints que les modèles statistiques), le signe du changement de rendement qu'ils prévoient est le même que pour les modèles empiriques (fig. 2b). L'amplitude des impacts du changement climatique sur les rendements semble modulée par l'intensité du forçage radiatif. Autrement dit, plus la concentration de

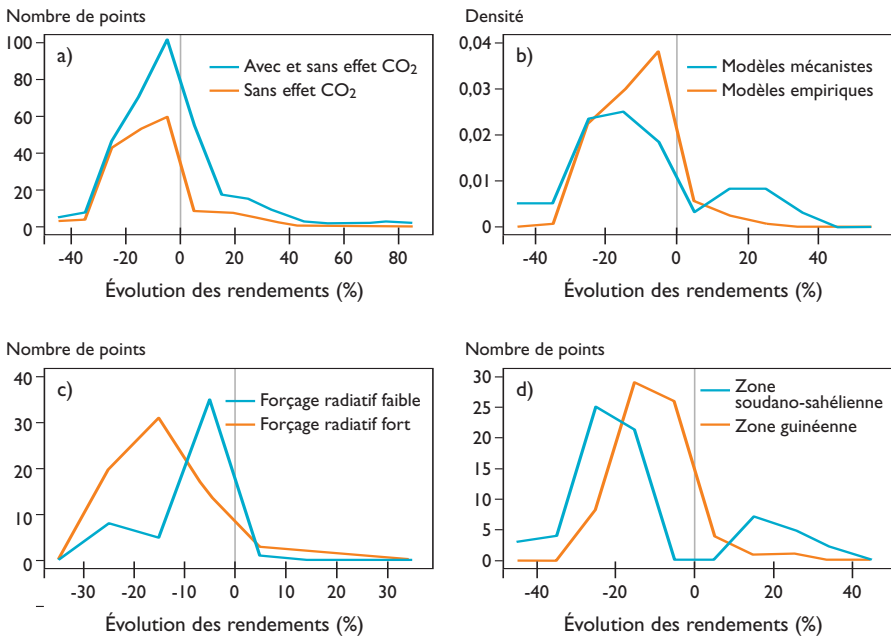


Figure 2.

- (a) Distribution des changements relatifs de rendement en Afrique de l'Ouest entre le présent et le futur pour 16 études récemment publiées (en bleu). En orange, la même distribution, mais uniquement pour les études ne considérant pas l'effet du CO₂ sur la plante.
- (b) Comme (a), mais en distinguant les résultats basés sur des modèles mécanistes (en bleu) de ceux basés sur les modèles empiriques (en orange).
- (c) Comme (a), mais en distinguant les résultats selon que le forçage radiatif est faible (bleu) ou fort (orange).
- (d) Comme (a), mais en comparant les résultats sur les pays soudano-sahéliens (en bleu) avec ceux sur les pays guinéens (en orange).

Source : extrait de ROUDIER (2012).

dans l'atmosphère considérée dans ces études est élevée (horizons temporels lointains, scénarios économiques avec de fortes émissions comme A2), plus l'impact négatif attendu sur les rendements est fort (fig. 2c). Cette constatation donne un sens particulièrement important à la prise en compte de la réduction des émissions de par les mesures d'atténuation qui peuvent limiter les impacts sur l'agriculture en Afrique de l'Ouest. Enfin, la figure 2d montre un impact différentiel du changement climatique selon la région de l'Afrique de l'Ouest ; les pays sahéliers étant plus durement touchés que les pays guinéens. Cette méta-analyse a été étendue à un ensemble plus grand de publications (52 articles) pour mettre en évidence l'impact attendu du changement climatique sur les rendements de 8 cultures majeures en Afrique et en Asie (KNOX *et al.*, 2012). Les auteurs montrent une baisse des rendements agricoles de 8 % à l'horizon 2050 pour les deux régions. En Afrique, les rendements agricoles vont baisser de 17 % pour le blé, 5 % pour le maïs, 15 % pour le sorgho et de 10 % pour

le mil. En raison du nombre limité d'études, mais aussi de résultats contradictoires, KNOX *et al.* (2012) n'ont pas pu mettre en évidence une réponse aussi claire et robuste pour les cultures du riz, du manioc et de la canne à sucre.

L'influence respective des changements de températures et de précipitations dans les scénarios de rendement

On peut maintenant s'intéresser aux variables climatiques responsables de cet impact négatif dans les études existantes et en particulier au rôle respectif des températures et des précipitations. Les changements de températures et de précipitations sont tous les deux des déterminants majeurs dans les tendances récentes observées sur la production agricole en Afrique subsaharienne. À la fois l'augmentation des températures, mais surtout la diminution des précipitations ont conduit à des déficits de production depuis les années 1970 (BARRIOS *et al.*, 2008). Si les effets des précipitations ont été dominants dans l'histoire récente, comme l'illustre l'exemple de la relation forte entre pluviométrie et productivité du mil au Niger, il peut en être tout à fait différemment dans le futur. En effet, SCHLENKER et LOBELL (2010) montrent que l'augmentation de température prévue par les modèles est bien plus forte que celle des précipitations qui est généralement plus petite que l'écart-type historique. De plus, les auteurs montrent à partir d'une modélisation empirique de la relation climat-rendement que l'impact marginal du changement d'un écart-type des pluies est inférieur à celui d'un changement d'un écart-type des températures dans le futur. Même si les pluies ne changeaient pas dans le futur, le rendement diminuerait d'environ 15 %, du fait de l'augmentation des températures qui réduit la longueur des cycles de culture et augmente le stress hydrique à travers une évaporation accrue. D'après SCHLENKER et LOBELL (2010), les changements de précipitations ont quand même un impact, mais moindre comparé à celui des températures. Selon que la pluie augmente ou diminue dans le futur, l'impact sur le rendement pourrait être amplifié d'un facteur deux – respectivement - 10 % et - 21 %, si l'on considère le changement médian. Ce résultat est cohérent avec celui de SALACK (2006) qui montre que pour une variété de mil, un réchauffement (+1,5 °C) aura inévitablement des effets négatifs sur le rendement, même si ces effets peuvent être atténués par une augmentation des précipitations.

Une autre façon d'appréhender les effets respectifs du réchauffement et des variations de précipitations sur le rendement agricole est proposée par SULTAN *et al.* (2013). Les auteurs ont réalisé un ensemble de simulations du modèle SARRA-H (DINGKUHN *et al.*, 2003) pour plusieurs variétés de mil et de sorgho sur un jeu de

35 stations météorologiques couvrant 9 pays en Afrique de l'Ouest sur la période 1971-1990. Les auteurs ont ensuite, selon la méthode des deltas, surimposé de manière incrémentale aux stations météorologiques locales des anomalies de températures allant de 0 °C à + 6 °C selon un pas de 1 °C et/ou des anomalies de précipitations relatives allant de - 20 % à + 20 % selon un pas de 10 %. Des simulations du modèle SARRA-H ont alors été effectuées pour quantifier la réponse en rendement de ces anomalies de températures et/ou de précipitations (fig. 3).

On observe que l'impact négatif sur les rendements simulés provoqué par une augmentation de la température de 2 °C sur l'Afrique peut être compensé par une hausse de 20 % des pluies. En revanche, lorsque le réchauffement dépasse 3 °C, on observe un déficit dans le rendement simulé, quelle que soit l'anomalie de pluies considérée (dans l'intervalle de variation - 20 % à + 20 % que l'on a jugé réaliste en nous basant sur les projections futures minimales et maximales des modèles

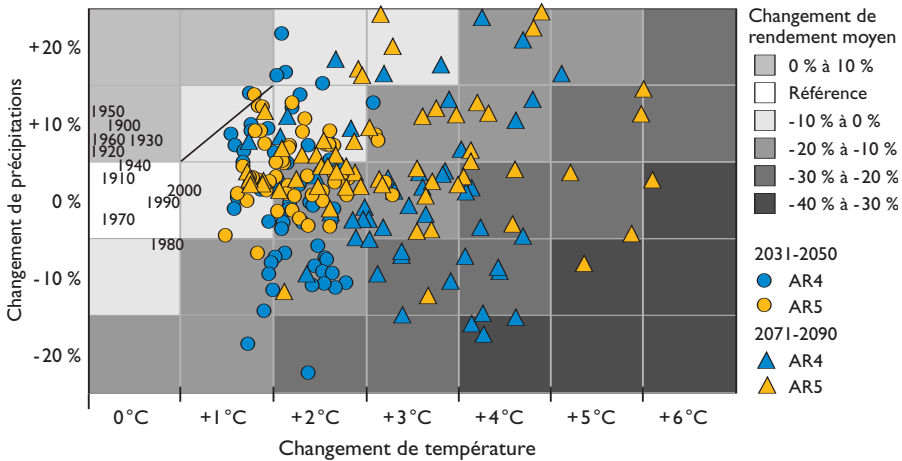


Figure 3.

L'effet des changements de températures et de précipitations sur le rendement moyen. Changement relatif de rendement (%) par rapport à la période de référence 1961-1990 pour 7 scénarios de températures (abscisses) et 5 scénarios de pluies (ordonnées).

Les résultats sont montrés en moyenne pour 35 stations d'Afrique de l'Ouest et 6 variétés de sorgho et de mil.

Les triangles et cercles bleus représentent les changements futurs projetés par plusieurs GCM de CMIP3 (AR4 sur la figure) et trois scénarios du Giec (B1, A1B, A2) respectivement pour les périodes 2071-2090 et 2031-2050.

Les projections des modèles de CMIP5 (AR5 sur la figure) et de trois scénarios rcp (4.5, 6.0 et 8.5) sont représentées par des triangles et des cercles orange.

Les anomalies de températures et de précipitations observées depuis le début du siècle à partir des données CRU sont aussi projetées par décades

(« 1940 » sur le graphique signifie l'anomalie 1941-1950 par rapport à 1961-1990).

Tous les changements de rendements sont significatifs au niveau de confiance 5%, sauf la case marquée d'une diagonale.

Source : IPCC (2014)

CMIP3 et CMIP5 sur la région). Lorsqu'on projette maintenant la réponse en température et précipitations de l'ensemble des simulations CMIP3 et CMIP5 (tous les modèles et scénarios sont confondus sur le graphique), on observe que ces projections sur la période 2030-2050 correspondent à une gamme de réponse en rendement qui varie entre - 10 % et + 10 % avec une majorité d'impact négatif à nul (entre - 10 % et 0). En revanche, toutes les projections futures sur la période 2070-2090, quel que soit le modèle et/ou le scénario, correspondent à une gamme de réponse en rendement qui diminue faiblement (entre - 10 % et 0) à fortement (jusqu'à - 40 %). Les variations de réponses de rendement dans le futur sont largement dominées par l'effet de la température dont le réchauffement atteint jusqu'à + 4 °C dans les projections des modèles CMIP3 et CMIP5 en Afrique, confirmant ainsi les résultats de BERG *et al.* (2013) et SCHLENKER et LOBELL (2010). Il est intéressant de constater que ces variations en températures et précipitations projetées par les modèles et leur impact sur le rendement sont très différentes de ce que l'on a pu observer au cours du siècle. En effet, la figure 4 montre que les anomalies climatiques passées se distribuent selon un axe vertical dans le graphique (ce sont les anomalies de précipitations qui caractérisent les variations d'une décennie à l'autre), tandis que les projections futures s'étalent largement selon un axe horizontal (ce sont les variations de températures qui discriminent les projections). Les projections des décennies passées et futures et leur réponse en termes de rendement sont ainsi très distinctes dans le graphique, ce qui montre que le changement climatique et ses conséquences, tels qu'ils sont projetés par les modèles CMIP3 et CMIP5, vont être quelque chose de totalement nouveau, qui ne ressemble en rien à ce que l'Afrique a connu depuis le début du xx^e siècle. Ce résultat souligne ainsi l'ampleur du défi que sera (qu'est) l'adaptation au changement climatique : comment s'adapter à un monde inconnu (et de surcroît incertain) ?

Un contraste entre l'ouest et le centre du Sahel dans les scénarios de rendement

L'incertitude sur le devenir des précipitations en Afrique de l'Ouest est également un facteur très limitant pour affiner les projections futures de rendement en réponse aux changements environnementaux. En effet, il n'y a pas de consensus entre les modèles de climat quant à l'impact du réchauffement climatique sur les pluies au Sahel (COOK et VIZY, 2006 ; DRUYAN, 2010), certains modèles faisant état d'une possible aridification, d'autres d'une augmentation des pluies dans le futur. Néanmoins, quelques études récentes (BIASUTTI, 2013 ; MONERIE *et al.*, 2013, 2012 ; PATRICOLA et COOK, 2010 ; BIASUTTI et SOBEL, 2009) ont trouvé un signal robuste entre les différents modèles du CMIP3 et CMIP5 qui atteste d'un retard de la

mousson à l'ouest du Sahel et d'une augmentation des pluies à la fin de l'hivernage au centre du Sahel. Cette opposition entre l'ouest et le centre du Sahel en termes d'évolution des pluies ne se retrouve pas pour les températures qui montrent au contraire un réchauffement selon un gradient latitudinal avec les régions au nord du Sahel qui se réchauffent davantage que celles du Sud. L'augmentation des températures au milieu du XXI^e siècle, pouvant dépasser +3 °C dans certaines localités, est si importante qu'il n'existera bientôt aucun analogue du climat africain dans l'histoire récente (BATTISTI et NAYLOR, 2009). Quantifier l'impact de ce décalage dans la saisonnalité de la mousson, qui se surimpose à l'effet négatif du réchauffement sur les cultures (SULTAN *et al.*, 2013 ; ROUDIER *et al.*, 2011), peut se révéler particulièrement important pour l'identification de variétés de cultures (précoces ou tardives) ou de pratiques (retarder ou avancer les semis) à même de limiter les impacts du changement climatique.

La figure 4 montre la réponse des rendements du sorgho au changement climatique simulée par deux modèles agronomiques SARRA-H et APSIM (SULTAN *et al.*, 2014). On note que le changement climatique entraîne environ 12 % de pertes de rendement du sorgho au milieu du XXI^e siècle sur l'ensemble du Sahel, ce qui est très cohérent avec les valeurs que l'on trouve dans la littérature (ROUDIER *et al.*, 2011). Cependant, cet impact est très différent entre l'ouest et le centre du Sahel. En effet, à l'ouest du Sahel les pertes de rendement sont particulièrement importantes (autour de 19 %) en raison de la combinaison entre le réchauffement et la baisse des

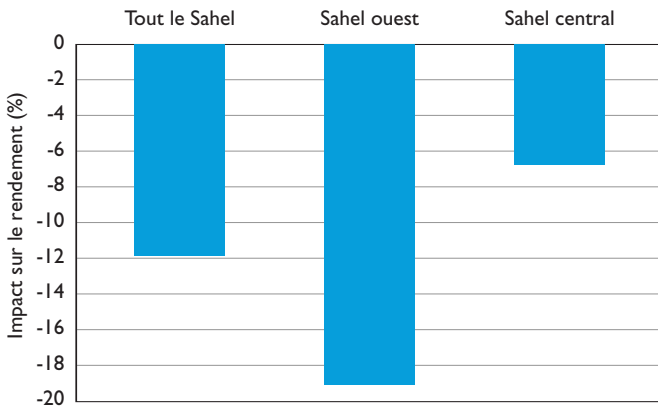


Figure 4.

Réponse simulée du rendement du sorgho au changement climatique.

Changement relatif (%) de rendement moyen du sorgho entre les périodes 2031-2060 et 1961-1990 sous le scénario rcp8.5.

Les résultats sont montrés en moyenne pour 9 GCM, deux modèles de cultures et trois variétés de sorgho.

Les réponses sont calculées sur 13 stations réparties au Sahel (gauche), pour 6 stations à l'ouest du Sahel (milieu)

et pour 6 stations au centre du Sahel (droite).

Source : d'après SULTAN *et al.* (2014).

précipitations au début de la saison des pluies. Au centre du Sahel, la température et la précipitation agissent dans un sens opposé : le réchauffement entraîne des pertes de rendement, tandis que la hausse des pluies à la fin de la saison est favorable à la culture du sorgho. Néanmoins malgré une hausse des pluies, c'est l'augmentation des températures qui domine dans le signe des impacts du changement climatique au centre du Sahel, puisqu'on observe des pertes de rendement autour de 7 % au milieu du XXI^e siècle. La comparaison entre la réponse du rendement du sorgho au changement climatique sous les deux scénarios de fertilisation montre qu'une augmentation de l'apport d'intrants rend la culture plus vulnérable aux changements de températures et de précipitations avec des pertes de rendement plus importantes lorsqu'on ajoute plus d'intrants. Ce résultat est cohérent avec de nombreuses études qui montrent que le risque climatique augmente avec l'intensification (voir par exemple AFFHOLDER, 1997).

Conclusions

Anticiper les fluctuations et les changements climatiques est d'une importance primordiale pour l'agriculture en Afrique soudano-sahélienne. La quantification des impacts agronomiques du changement climatique nécessite la mise en place d'une méthodologie souvent complexe avec des outils tirés de l'économie (scénarios d'émission, modèles de décision des ménages agricoles), de la science du climat (modèles et projections climatiques), de l'agronomie (modèles agronomiques) et de la statistique (régionalisation et correction de biais), ayant chacun leur part d'erreur et leurs limites. Malgré ces incertitudes, il a pu être montré une baisse plausible de la productivité des céréales dans le futur sous l'effet du réchauffement climatique. Cette baisse des rendements est particulièrement marquée dans l'ouest du Sahel où se combinent les effets d'une baisse des pluies et d'une hausse des températures à l'horizon 2050. Néanmoins, le défi à relever ne réside donc pas tant dans l'estimation déterministe et vraisemblablement inatteignable de l'évolution future des rendements, mais dans la quantification, la hiérarchisation et la réduction des incertitudes associées aux projections des impacts du changement climatique. Le cadre des nouveaux projets internationaux d'intercomparaison de méthodes de régionalisation (Cordex : Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) et d'intercomparaison des modèles agronomiques (AGMIP : Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project) marquera très certainement un tournant vers une meilleure prise en compte de cette incertitude à travers des études coordonnées dédiées aux impacts du climat sur l'agriculture qui étaient jusqu'alors menées de manière très isolée et fragmentée. Cependant, il ne faut pas attendre plus de certitudes pour d'ores et déjà réfléchir à des mesures d'adaptation qui soient à la fois scientifiquement pertinentes et socialement acceptables, le climat d'aujourd'hui ayant déjà un impact sur les ressources des populations rurales. Néanmoins, l'étude des vulnérabilités et de l'adaptation aux changements environnementaux nécessite

un dialogue entre les sciences biophysiques (climat, hydrologie, agronomie) et les sciences humaines (démographie, histoire, anthropologie, économie). Cette approche pluridisciplinaire est cruciale, lorsqu'on aborde la problématique de l'adaptation aux changements environnementaux où la réponse des sociétés est enchâssée dans des transformations sociales globales et où la variable climatique est loin d'être le seul et unique facteur de la vulnérabilité des sociétés sahéliennes.

Références

- AFFHOLDER F., 1997**
Empirically modeling the interaction between intensification and climatic risk in semi-arid regions.
Field Crops Research, 52 : 79-93.
- AINSWORTH E. A., LEAKEY A. D. B., ORT D. R., LONG S. P., 2008**
FACE-ing the facts: inconsistencies and interdependence among field, chamber and modeling studies of elevated [CO₂] impacts on crop yield and food supply.
New Phytologist, 179 : 5-9.
- BARRIOS S., OUATTARA B., STROBL E., 2008**
The impact of climatic change on agricultural production: Is it different for Africa?
Food Policy, 33 : 287-298.
- BATTISTI D., NAYLOR R. L., 2009**
Historical Warnings of Future Food Insecurity with Unprecedented Seasonal Heat.
Science, 323 (5911) : 240.
doi:DOI: 10.1126/science.1164363
- BEN MOHAMED A., VANDUIVENBOODEN N., ABDOUSALLAM S., 2002**
Impact of climate change on agricultural production in the Sahel – Part 1. Methodological approach and case study for millet in Niger.
Climatic Change, 54 : 327-348.
- BERG A., SULTAN B., DE NOBLET N., 2011**
Including Tropical Croplands in a Terrestrial Biosphere Model: Application to West Africa.
Climatic Change, 104 (3-4) : 755-782.
- BERG A., DE NOBLET-DUCOUDRÉ N., SULTAN B., LENGAINÉ M., GUMBERTEAU M., 2013**
Projections of climate change impacts on potential crop productivity over tropical regions.
Agric. For. Meteorol., 170 : 89-102, ISSN 0168-1923, 0.1016/j.agrformet.2011.12.003
- BIASUTTI M., 2013**
Forced Sahel rainfall trends in the CMIP5 archive.
J. Geophys. Res. Atmos., 118 : 1613-1623.
- BIASUTTI M., SOBEL A. H., 2009**
Delayed Sahel rainfall and global seasonal cycle in a warmer climate.
Geophysical Research Letters, 36 (23) : L23707.
- BONDEAU A., SMITH P. C., ZAEHLE S., SCHAPHOFF S., LUCHT W., CRAMER W., GERTEN D., LOTZE-CAMPEN H., MÜLLER C., REICHSTEIN M., SMITH B., 2007**
Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance.
Global Change Biology, 13 : 679-706.
- BUTT T., MCCARL B., ANGERER J., DYKE P., STUTH J., 2005**
The economic and food security implications of climate change in Mali.
Climatic Change, 68 : 355-378.
- CGIAR – Consultative Group on International Agricultural Research, 2009**
Climate, agriculture and food security: A strategy for change.
Alliance of the CGIAR Centers.

- CHALLINOR A. J., SLINGO J. M., WHEELER T. R., CRAUFURD P. Q., GRIMES D. I. F., 2003**
Toward a combined seasonal weather and crop productivity forecasting system: determination of the working spatial scale. *J. Appl. Meteorol.*, 42 : 175-192.
- CHALLINOR A., WHEELER T., GARFORTH C., CRAUFURD P., KASSAM A., 2007**
Assessing the vulnerability of food crop systems in Africa to climate change. *Climatic Change*, 83 : 381-399.
- CHUKU C., OKOYE C., 2009**
Increasing resilience and reducing vulnerability in sub-Saharan African agriculture: Strategies for risk coping and management. *African Journal of Agricultural Research*, 4 : 1524-1535.
- COLLOMB P., 1999**
Une voie étroite pour la sécurité alimentaire d'ici à 2050.
Paris, Economica, 197 p.
- COOK K., VIZY E., 2006**
Coupled Model Simulations of the West African Monsoon System: Twentieth- and Twenty-First-Century Simulations. *Journal of Climate*, 19 : 3681-3703.
- DAI A., 2006**
Precipitation Characteristics in Eighteen Coupled Climate Models. *Journal of Climate*, 19 : 4605-4630.
- DE NOBLET-DUCOUDRÉ N., GERVOIS S., CIAIS P., VIOVY N., BRISSON N., SEGUIN B., PERRIER A., 2004**
Coupling the Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer Scheme Orchidee to the agronomy model STICS to study the influence of croplands on the European carbon and water budgets. *Agronomie*, 24 : 397-407.
- DILLEY M., CHEN R. S., DEICHMANN U., LERNER-LAM A. L., ARNOLD M., 2005**
Natural disaster hotspots: a global risk analysis. *Disaster Risk Management Series*, 5, Washington, DC, The World Bank.
- DINGKUH M., 1995**
Climatic determinants of irrigated rice performance in the Sahel. 3. Characterizing environments by simulating crop phenology. *Agric. Syst.*, 48 : 435-456.
- DINGKUH M., MIEZAN K. M., 1995**
Climatic determinants of irrigated rice performance in the Sahel. II. Validation of photothermal constants and characterization of genotypes. *Agric. Syst.*, 48 : 411-434.
- DINGKUH M., SOW A., SAMB A., DIACK S., ASCH F., 1995**
Climatic determinants of irrigated rice performance in the Sahel. 1. Photothermal and micro-climatic responses of flowering. *Agric. Syst.*, 48 : 385-410.
- DINGKUH M., BARON C., BONNAL V., MARAUX F., SARR B., SULTAN B., CLOPES A., FOREST F., 2003**
« Decision support tools for rainfed crops in the Sahel at the plot and regional scale ». In Struif Bontkes T. E., Wopereis M. C. S. (eds) : *Decision support tools for smallholder agriculture in sub-Saharan Africa—a practical guide*, Wageningen The Netherlands, CTA : 127-139.
- DRUYAN L. M., 2010**
Studies of 21st-century precipitation trends over West Africa. *International Journal of Climatology*, 31 (10) : 1415-1424. DOI: 10.1002/joc.2180
- FAO, 2003**
The state of food insecurity in the world.
Rome, Food and Agricultural Organisation.
- HANSEN J. W., 2002**
Realizing the potential benefits of climate prediction to agriculture: issues, approaches, challenges. *Agricultural Systems*, 74 : 309-330.
- IPCC, 2014**
« Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects ». In Barros V. R., Field C. B., Dokken D. J., Mastrandrea M. D., Mach K. J., Bilir T. E., Chatterjee M., Ebi K. L., Estrada Y. O., Genova R. C., Girma B., Kissel E. S., Levy A. N., MacCracken S., Mastrandrea P. R., White L. L. (eds) : *Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 688 p.

**KNOX J., HESS T., DACCACHE A.,
WHEELER T., 2012**

Climate change impacts on crop productivity in Africa and South Asia.
Environ. Res. Lett., 7 : 1-8.

**KURUKULASURIYA P.,
MENDELSON R., 2008**

A Ricardian Analysis of the Impact of Climate Change on African Cropland.
African Journal of Agricultural and Resource Economics, 2 : 1-23.

**LOBELL D. B., BURKE M. B.,
TEBALDI C., MASTRANDREA M. D.,
FALCON W. P., NAYLOR R. L.,
2008**

Prioritizing Climate Change Adaptation Needs for Food Security in 2030.
Science, 319 : 607-610.

**LONG S. P., AINSWORTH E. A.,
LEAKEY A. D. B., MORGAN P. B.,
2006**

Food for thought: lower-than-expected crop yield stimulation with rising CO₂ concentrations.
Science, 312 : 1918-1921.

**MENDELSON R., NORDHAUS W. D.,
SHAW D., 1994**

The impact of global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis.
American Economic Review, 84 : 753-771.

MOLUA E. L., 2009

An empirical assessment of the impact of climate change on smallholder agriculture in Cameroon.
Global and Planetary Change, 67 : 205-208.

**MONERIE P.-A., FONTAINE B.,
ROUCOU P., 2012**

Expected future changes in the African monsoon between 2030 and 2070 using some CMIP3 and CMIP5 models under a medium-low RCP scenario.
J. Geophys. Res., 117 (16) : D16111, doi:10.1029/2012JD017510.

**MONERIE P.-A., ROUCOU P.,
FONTAINE B., 2013**

Mid-century effects of Climate Change on African monsoon dynamics using the A1B emission scenario.
Int. J. Climatol., 33 : 881-896. doi: 10.1002/joc.3476

**MÜLLER C., BONDEAU A., POPP A.,
WAHA K., FADER M., 2010**

Climate change impacts on agricultural yields.
Background note to the World Development Report, 11 p.

ORAM P. A., 1989

Sensitivity of agricultural production to climatic change, an update.
Climate and Food Security, IRRI, Manila, The Philippines : 25-44.

**Paeth H., Hall N. M. J.,
Gaertner M. A., Alonso M. D.,
Moumouni S., Polcher J., Ruti P. M.,
Fink A. H., Gosset M., Lebel T.,
Gaye A. T., Rowell D. P.,
Moufouma-Okia W., Jacob D.,
Rockel B., Giorgi F.,
Rummukainen M., 2011**

Progress in regional downscaling of west African precipitation.
Atmosph. Sci. Lett., 12 : 75-82. doi: 10.1002/asl.306

PATRICOLA C. M., COOK K. H., 2010

Northern African climate at the end of the twenty-first century: an integrated application of regional and global climate models.
Climate Dynamics, 35 : 193-212.

PNUD, 2004

Reducing disaster risk: a challenge for development.
UNDP global report, ed. M. Pelling.

**RANDALL D. A., WOOD R. A., BONY S.,
COLMAN R., FICHEFET T., FYFE J.,
KATTSOV V., PITMAN A., SHUKLA J.,
SRINIVASAN J., STOUFFER R. J., SUMI A.,
TAYLOR K. E., 2007**

« Climate models and their evaluation ». In Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M., Miller H. L. (eds) : *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*, Cambridge University Press.

ROUDIER P., 2012

Climat et agriculture en Afrique de l'Ouest : quantification de l'impact du changement climatique sur les rendements et évaluation de l'utilité des prévisions saisonnières.
Thèse de doctorat, Paris, EHESS, 189 p.

**ROUDIER P., SULTAN B.,
QUIRION P., BERG A., 2011**

The impact of future climate change on West African crop yields: What does the recent literature say? *Global Environ. Change*, 21 (3) : 1073-1083.

SALACK S., 2006

Impacts des changements climatiques sur la production du mil et du sorgho dans les sites pilotes du plateau central, de Tahoua et de Fagara. CILSS, 33 p.

SCHLENKER W., LOBELL D. B., 2010

Robust negative impacts of climate change on African agriculture. *Environmental Research Letters*, 5 : 1-8.

**SULTAN B., ROUDIER P., BARON C.,
QUIRION P., MULLER B., ALHASSANE A.,
CIAIS P., GUIMBERTEAU M., TRAORÉ S. B.,
DINGKUHN M., 2013**

Assessing climate change impacts on sorghum and millet yields in West Africa. *Environmental Research Letter*, 8 : 9 p., doi:10.1088/1748-9326/8/1/014040.

**SULTAN B., GUAN K., KOURESSY M.,
BIASUTTI M., PIANI C., HAMMER G. L.,
MCLEAN G., LOBELL D. B., 2014**

Robust features of future climate change impacts on sorghum yields in West Africa. *Environ. Res. Lett.*, 9 (10) : 1-13.

TINGEM M., RIVINGTON M., 2009

Adaptation for crop agriculture to climate change in Cameroon: Turning on the heat. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 14 : 153-168.

**TUBIELLO F. N., SOUSSANA J. F.,
HOWDEN M., 2007 a**

Crop and pasture response to climate change. *Proc. Nat. Americ. Soc.*, 104 : 19686-19690.

**TUBIELLO F. N., AMTHOR J. S., BOOTE K. J.,
DONATELLI M., EASTERLING W., FISCHER G.,
GIFFORD R. M., HOWDEN M., REILLY J.,
ROSENZWEIG C., 2007 b**

Crop response to elevated CO₂ and world food supply: A comment on "Food for Thought..." by Long *et al.* *Science*, 312 : 1918-1921, 2006. *European Journal of Agronomy*, 26 : 215-223.

**VANDUIVENBOODEN N., ABDOUSALLAM S.,
BEN MOHAMED A., 2002**

Impact of climate change on agricultural production in the Sahel – Part 2. Case study for groundnut and cowpea in Niger. *Climatic Change*, 54 : 349-368.

ZORITA E., VON STORCH H., 1999

The Analog Method as a Simple Statistical Downscaling Technique: Comparison with More Complicated Methods. *Journal of Climate*, 12 : 2474-2489.

Sultan Benjamin, Roudier P., Traoré S.

Les impacts du changement climatique sur les rendements agricoles en Afrique de l'Ouest.

In : Sultan Benjamin (ed.), Lalou Richard (ed.), Amadou Sanni M. (ed.), Oumarou A. (ed.), Soumaré M.A. (ed.). Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest.

Marseille : IRD, 2015, p. 209-225. (Synthèses). ISBN 978-2-7099-2146-6