

## Table des matières

Résumé .....	4
Abstract .....	5
Remerciements .....	6
Liste des figures .....	9
Liste des tableaux.....	10
Sigles et acronymes .....	11
Introduction .....	12
I. Contexte et objectifs.....	13
1. Le Sénégal : climat, saisons.....	13
2. Population, agriculture.....	14
3. Changement climatique .....	14
i. Observations de changement climatique.....	14
ii. Changement climatique futur et impacts sur les rendements .....	15
iii. Utilisation des modèles .....	15
4. Objectifs et problématique .....	16
II. Matériel et méthode .....	17
1. Construction des scénarios climatiques futurs .....	17
i. "Representative Concentration Pathways" (RCP) .....	17
ii. Modèles de climat et genèse des situations climatiques .....	17
iii. Variables analysées et traitement des données .....	18
iv. Construction des scénarios.....	20
2. Paramétrage du modèle CELSIUS .....	21
i. Présentation du modèle .....	21
ii. Paramétrage du modèle CELSIUS .....	25
3. Analyse de l'impact du changement climatique sur les rendements .....	27
iii. Systèmes de culture et itinéraires techniques.....	27
III. Résultats.....	28
1. Scénarios climatiques .....	28
i. Ensemble des modèles .....	28
ii. Sous-ensemble de modèles contrastés .....	29
iii. Comparaison des moyennes observées/simulées .....	30

iv.	Taux de CO2 atmosphérique.....	30
v.	Scenarios retenus .....	31
2.	Paramétrage de CELSIUS.....	32
i.	Paramètres retenus .....	32
ii.	LAI et stocks hydrique.....	32
iii.	Biomasse et rendements.....	33
3.	Expérimentation virtuelle.....	35
i.	Rendements simulés et écarts à l'historique à fertilisation constante.....	35
ii.	Écarts à l'historique avec augmentation de la fertilisation .....	37
IV.	Discussion.....	39
1.	Résultats commentés .....	39
i.	Écarts à l'historique à fertilisation constante .....	39
ii.	Écarts à l'historique avec augmentation de la fertilisation .....	40
iii.	Scénarios climatiques.....	41
2.	Retour sur la méthode.....	41
i.	Fiabilité des modèles de climat.....	41
ii.	Paramétrage et performances du modèle .....	43
3.	Perspectives.....	43
i.	Fertilisation et intensification écologique.....	43
ii.	De nouveaux cultivars adaptés au changement climatique ?.....	44
iii.	Le modèle CELSIUS .....	45
iv.	Modélisation climatique .....	46
v.	Vers des ensembles de modèles agronomiques ? .....	47
	Conclusion.....	49
	Références bibliographiques.....	51
	Annexes .....	55

## Liste des figures

<b>Figure 1</b> - Carte des isohyètes du Sénégal actualisée à 2008 (période 1981-2010).....	13
<b>Figure 2</b> - Evolution annuelle de la température minimale, maximale et des précipitations à Bambey.....	13
<b>Figure 3</b> - Variabilité interannuelle des précipitations enregistrées à la station de Bambey.....	14
<b>Figure 4</b> - Evolution de la population au Sénégal et part des actifs agricoles.....	14
<b>Figure 5</b> - Schéma conceptuel du modèle CELSIUS.....	21
<b>Figure 6</b> - Schéma de la croissance du LAI simulée par le modèle CELSIUS .....	23
<b>Figure 7</b> - Moyennes mensuelles des anomalies de températures minimales et maximales prédites par l'ensemble des modèles climatiques, pour les 4 scénarios futurs.....	28
<b>Figure 8</b> - Moyennes mensuelles des anomalies de précipitations prédites par les modèles climatiques, pour les 4 scénarios futurs.....	28
<b>Figure 9</b> - Moyennes mensuelles des anomalies de précipitations prédites par les modèle MIROC-ESM et MIROC-ESM-CHEM, pour les 4 scénarios futurs. ....	30
<b>Figure 10</b> - Précipitations historiques observées et simulées (1971-2000). ....	30
<b>Figure 11</b> - Tendances des concentrations de gaz à effet de serre à 2100.. ....	30
<b>Figure 12</b> -Comparaison du LAI et du stock hydrique simulés avec les valeurs observées pour le mil Souna III irrigué .....	32
<b>Figure 13</b> - Comparaison du LAI et du stock hydrique simulés avec les valeurs observées pour l'arachide 73-33.....	32
<b>Figure 14</b> -Comparaison du LAI et du stock hydrique simulés avec les valeurs observées pour le mil Souna III pluvial strict .....	33
<b>Figure 15</b> - Comparaison de la biomasse totale simulée et observée pour le mil.....	33
<b>Figure 16</b> - Comparaison du rendement grain simulé et observé pour le mil. ....	33
<b>Figure 17</b> - Comparaison de la biomasse totale simulée et observée pour l'arachide.....	34
<b>Figure 18</b> - Comparaison du rendement grain simulé et observé pour l'arachide .....	34
<b>Figure 19</b> - Distributions de rendements biomasse totale et grain simulés pour le mil.....	35
<b>Figure 20</b> - Ecart de rendements par rapport au scénario historique pour chaque scénario climatique futur à niveau de fertilisation égal entre futur et historique .....	35
<b>Figure 21</b> - Durée des cycles de la levée à la récolte du mil pour chaque scénario climatique....	36
<b>Figure 22</b> - Ecart de rendements par rapport au scénario historique pour chaque scénario climatique futur, à niveau de fertilisation égal entre futur et historique. ....	36
<b>Figure 23</b> - Ecart de rendements simulé entre les scénarios futurs fertilisés F1, F2 et F3 et le scénario historique fertilisé F0. ....	37
<b>Figure 24</b> - Ecart de rendements simulé entre les scénarios futurs fertilisés F1, F2 et F3 et le scénario historique fertilisé F0 .....	38

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b> - Résumé des situations climatiques étudiées. CC : Changement Climatique.....	18
<b>Tableau 2</b> – Stades de développement utilisés dans le modèle CELSIUS.....	22
<b>Tableau 3</b> - Principales caractéristiques des cultivars utilisés pour le paramétrage du modèle CELSIUS.....	25
<b>Tableau 4</b> - Etapes du calage du modèle et jeux de données utilisés correspondants.....	26
<b>Tableau 5</b> - Scénarios climatiques retenus et explications correspondantes.....	31
<b>Tableau 6</b> - Paramètres des cultivars dans le modèle CELSIUS.....	32
<b>Tableau 7</b> - Indicateurs de performance du modèle CELSIUS pour les variables rendement biomasse et rendement grain.....	34

## Sigles et acronymes

**CELSIUS** : CEreal and Legume crops Simulator Under changing Sahelian environment

**CIRAD** : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

**CIRED** : Centre International de Recherche sur L'Environnement et le Développement

**CMIP** : Coupled Model Intercomparison Project

**ESCAPE** : Environmental and Social Changes in Africa: Past, present and futureE

**ESPACE** : ESTimation de la Production Agricole en fonction du Climat et de l'Environnement

**FAO** : Food and Agriculture Organization of the United Nations

**GCM** : Global Climatic Model

**GIEC** : Groupe International d'Experts sur le Climat

**IPSL** : Institut Pierre-Simon Laplace

**ISRA** : Institut Sénégalais de Recherche Agricole

**JAS** : Jour Après Semis

**LOCEAN** : Laboratoire d'Océanographie et de Climatologie par Expérimentation et Approche Numérique

**MO** : Matière Organique

**PMRC** : Programme Mondial de Recherche sur le Climat

**PNB** : Produit National Brut

**PYE** : Potential Yield Estimator

**RCM** : Regional Climatic Model

**RCP** : Representative Common Pathway

**RU** : Réserve Utile

**SARRA** : Système d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatiques

**SCV** : Semis sous Couvert Végétal

**STICS** : Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standard

**TACSY** : Tropical Annual Cropping Systems

**TCS** : Technique Culturelle Simplifiée

**VBA** : Visual Basic for Applications

**Y<sub>obs</sub>** : Rendement réel réalisé par les agriculteurs

**Y<sub>p</sub>** : Rendement potentiel permis par le rayonnement, la température de l'air et le taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique

**Y<sub>w</sub>** : Rendement permis par le rayonnement, la température de l'air, le taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique et les précipitations

**Y<sub>wn</sub>** : Rendement permis par le rayonnement, la température de l'air, le taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique, les précipitations et l'azote

## Introduction

L'agriculture du Sénégal est caractérisée par de petites exploitations familiales dont l'accès aux intrants (engrais, pesticides, machines agricoles...) est très limité par les faibles revenus des paysans et la faible accessibilité du marché des produits et intrants agricoles et des instruments financiers (crédit, assurance). La majorité des cultures sont des cultures pluviales, et l'agriculture est très dépendante des aléas climatiques, notamment du niveau de la ressource en eau et de sa variabilité (pendant la saison des pluies, et d'une année à l'autre). La vulnérabilité de l'agriculture par rapport au climat soulève la question de l'avenir de cette agriculture face au changement climatique, et de la caractérisation de ce changement.

Alors que l'augmentation des températures semble être une tendance forte appuyée par plusieurs travaux (Lobell & Field 2007; Sultan et al. 2013; Asseng et al. 2013; Eyshi Rezaei et al. 2014; Sultan et al. 2014), l'évolution du régime des précipitations est encore très incertaine, et les prédictions dépendent beaucoup des modèles climatiques utilisés pour les projections futures. Pour anticiper ce changement climatique, limiter ses éventuels impacts négatifs sur l'agriculture et accompagner les agriculteurs dans leur adaptation aux changements, il est important de pouvoir quantifier les impacts de scénarios de changement climatique sur les rendements des cultures et le revenu des paysans. Le recours à la modélisation, à l'aide de modèles de climat et de modèles de culture, est une méthode permettant ce type d'évaluation.

Nombre d'études s'intéressent au rendement limité par l'eau (ie rendement permis par le rayonnement, la température de l'air, le taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique et les précipitations (Van Ittersum et al. 2013)) des céréales en Afrique de l'Ouest et à son évolution sous climats futurs, et peu envisagent l'évolution des pratiques agricoles, notamment l'amélioration de l'accès aux intrants pour les agriculteurs. De même, le facteur économique est souvent omis dans ce type d'étude (trésorerie de l'exploitation, prix des intrants et des productions, subventions/crédits...) bien qu'il soit déterminant dans l'évolution des exploitations et des pratiques.

Le projet ESCAPE1 a pour objectif "d'évaluer la vulnérabilité des sociétés rurales en Afrique Subsaharienne face aux changements climatiques et environnementaux, et explorer des scénarios d'adaptation pour réduire cette vulnérabilité". Un groupe de travail (France-Sénégal, CIRAD/CIRED/ISRA) s'intéresse à la modélisation bioéconomique des exploitations agricoles sénégalaises afin d'évaluer différents scénarios d'évolution des systèmes de culture et les risques économiques associés à ces scénarios. Le modèle a déjà permis une analyse satisfaisante aux échelles du système de culture et du système d'exploitation sous climat actuel, mais n'a pas traité la question du changement climatique.

La présente étude s'intègre dans le projet ESCAPE, et s'intéresse donc à caractériser le changement climatique au Sénégal à l'aide de modèles de climat, proposer des scénarios de climats futurs et quantifier si possible les impacts de ces changements sur les rendements limités par l'eau et l'azote ( $Y_{wn}$ ) du mil et de l'arachide.

---

1 <https://skyros.locean-ipsl.upmc.fr/~ESCAPE/>

# I. Contexte et objectifs

## 1. Le Sénégal : climat, saisons

Le Sénégal est un pays d'Afrique de l'Ouest situé sur la côte pacifique du continent, entre la Mauritanie, le Mali, la Guinée et la Guinée-Bissau. Un gradient climatique selon un axe Nord-Sud illustre la variabilité spatiale de l'abondance des précipitations dans le pays. Le nord du Sénégal est sous climat sahélien (moins de 300-400 mm de pluies par an), l'intérieur du pays est caractérisé par les deux domaines climatiques sahélo-soudanien (400-700 mm/an) et soudanien (700-1000 mm/an), le sud est quant à lui sous climat soudano-guinéen et sub-guinéen avec des précipitations allant de 1000 mm à 1250 mm par an environ. Deux saisons se distinguent au long de l'année : la saison sèche marquée principalement par une absence de précipitations dans la majeure partie du pays, et la saison des pluies ou hivernage (Juin-Octobre) caractérisée par l'arrivée de la mousson africaine (Muller et al. 2010; Salack et al. 2011).

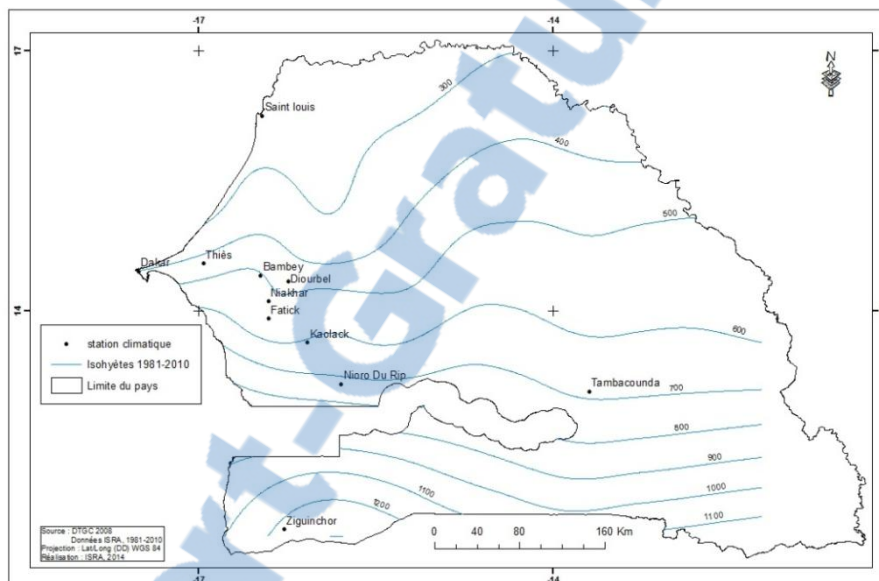


Figure 1 - Carte des isohyètes du Sénégal actualisée à 2008 (période 1981-2010). Les valeurs indiquent les précipitations annuelles. Source : ISRA, 2014.

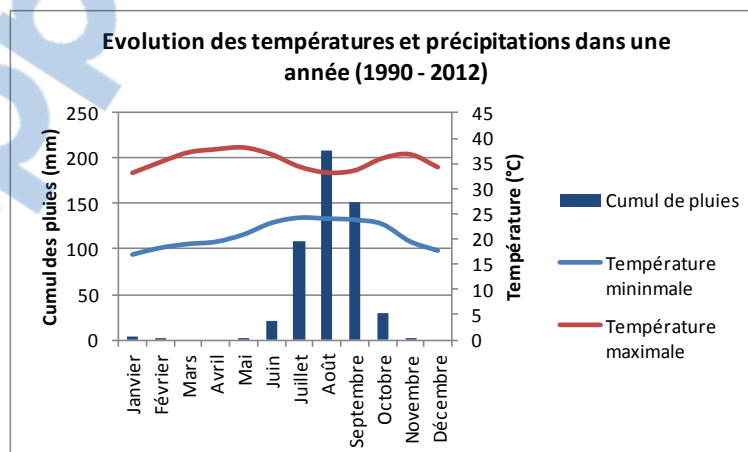


Figure 2 - Evolution annuelle de la température minimale, maximale et des précipitations à Bamby (Sénégal).

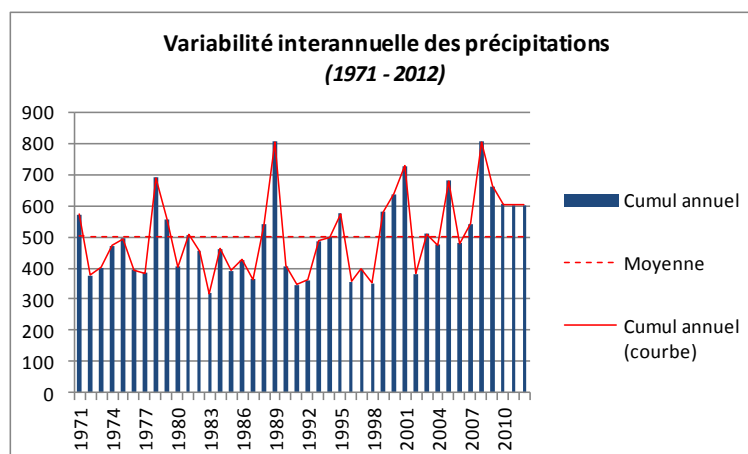


Figure 3 - Variabilité interannuelle des précipitations enregistrées à la station de Bambeï (Sénégal).

La saison des pluies a lieu entre les mois d'avril et octobre selon les régions, avec un pic de précipitations atteint au mois d'août (figure 2). La variabilité interannuelle des pluies est élevée, avec des cumuls annuels pouvant varier du simple au double selon les années (figure 3).

## 2. Population, agriculture

Evolution de la population et de la population active							
	Taille [Millions]				Annual growth rate [%]		
	1999	2004	2009	2014	1999-2004	2004-2009	2009-2014
Population totale	9.62	10.97	12.59	14.55	2,66	2,79	2,94
Population active	4.02	4.64	5.46	6.55	2,91	3,31	3,71
Population active agricole	2.97	3.36	3.86	4.51	2,5	2,81	3,16
Population rurale	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

Source: FAOSTAT, FAO of the UN, Accessed on January 24, 2014. <http://faostat.fao.org/site/550/default.aspx#ancor>

Figure 4 - Evolution de la population au Sénégal et part des actifs agricoles.

L'agriculture est un secteur économique très important au Sénégal, puisqu'elle emploie près de 70 % des actifs du pays et la valeur ajoutée agricole représente 20 % du PNB. En revanche, les travailleurs agricoles restent pauvres avec seulement 270 \$ de valeur ajoutée annuelle produite par actif agricole, et près de la moitié (47 %) de la population est en dessous du seuil de pauvreté nationale (FAO 2014; Banque Mondiale 2011). Les exploitations sénégalaises sont essentiellement des exploitations familiales de petite taille (0.8 ha par actif agricole en 2012), non mécanisées et très peu consommatrices d'engrais (consommation moyenne de 8 kg/ha d'engrais minéraux en 2012) (FAO 2014). L'essentiel de l'agriculture sénégalaise est une agriculture pluviale, dépendant très fortement des conditions climatiques et de leur variabilité (Ndiaye 2007). Les trois principales productions (quantité) du pays sont la canne à sucre, l'arachide (gousses) et le mil, respectivement. En valeur, l'arachide est la première production du pays. La canne et l'arachide sont essentiellement des productions de rente, la production de mil est quant à elle destinée à l'alimentation de la population (Ndiaye 2007).

## 3. Changement climatique

### i. Observations de changement climatique

Les conclusions quant au changement climatique (CC) au Sahel, notamment concernant le régime des pluies, n'ont pas toujours été en accord entre elles selon les études. Si la rupture climatique entre une période humide (1950-1969) et la sécheresse constatée depuis les années 1970 est



maintenant confirmée (Nicholson, Some, and Kone 2000; L'Hôte et al. 2002), certains débats ont cependant eu lieu quant au retour probable des pluies à partir des années 1990. L'Hôte et al. (2002), concluent que la sécheresse sahélienne n'est pas terminée, et qu'elle continue jusqu'à la fin de l'année 2000, ce que démentent Ozer et al. (2003), confirmé plus tard par Nicholson (2005), avec tout de même quelques réserves : Nicholson (2005) soulève la variabilité spatiale de ces changements, qui diffèrent selon la position latitudinale et longitudinale de la zone étudiée au Sahel, Ozer et al. (2003) précisent à l'époque que dix années de plus doivent s'écouler afin de pouvoir vérifier la significativité de ces changements.

Des études plus récentes confirment les hypothèses soulevées alors : Lebel and Ali (2009) montrent que l'est, le centre et l'ouest du Sahel n'évoluent pas de manière égale, avec un retour des pluies plus important à l'est et non significatif à l'ouest. Salack, Muller, and Gaye (2011) s'intéressent à la zone ouest du Sahel, et relèvent pour les régions soudaniennes et sahéliennes une tendance à la hausse de la quantité de pluie totale par an, accompagnée d'une augmentation en fréquence de courts épisodes de sécheresse extrême ainsi que d'épisodes pluvieux importants (inondations) rendant la saison des pluies plus incertaine et aléatoire. Ils notent également un retard d'une semaine des dates de semis « fructueuses » (c'est-à-dire suivies d'un cycle complet de culture) de la période 1970-2008 relativement à la période 1950-1969, accompagnée d'un raccourcissement de la saison favorable aux cultures.

## **ii. Changement climatique futur et impacts sur les rendements**

De récentes études étudient le changement climatique et ses effets probables sur les rendements potentiels des cultures au Sahel à l'aide de modèles climatiques ainsi que de modèles dynamiques de culture. Sultan et al. (2013, 2014) prédisent à travers ces simulations une tendance à la hausse des températures de +2.8°C (moyenne sur la période 2031-2060), un déficit de précipitations constaté dans l'ouest du Sahel en début de saison des pluies, et une tendance à la hausse des précipitations en fin d'hivernage. Les modèles de cultures utilisés par Sultan et al. (2013, 2014) (SARRA-H, APSIM) prédisent une baisse des rendements potentiels dans l'ensemble du Sahel, même lorsque les pluies augmentent. Cet effet est principalement dû à la hausse des températures raccourcissant le cycle des cultures, mieux supportée par les variétés photosensibles dont le cycle est moins perturbé par les hautes températures (Sultan et al. 2013). Une méta-analyse réalisée par Roudier et al. (2011) prévoit une baisse des rendements potentiels moyenne de 11 %, principalement due à la hausse des températures.

La fertilisation des cultures est également étudiée dans les simulations de changement climatique. Eyshi Rezaei et al. (2014) montrent à l'aide du modèle DSSAT que la combinaison d'une fertilisation minérale et organique (résidus de culture) permet de réaliser des rendements plus élevés dans tous les scénarios de changement climatique testés dans leur étude. Ils concluent sur le fait que l'interaction entre le climat et la disponibilité des éléments nutritifs devrait être considérée dans les analyses d'impact du CC sur les rendements des cultures. D'autres études par expérimentation virtuelle montrent que l'intensification augmente le risque pris par les agriculteurs, car la fertilisation (organique et/ou minérale) augmente la demande en eau des cultures, et les rend plus sensibles aux stress hydriques (Affholder 1995; Affholder 1997; Sultan et al. 2014).

## **iii. Utilisation des modèles**

En climatologie, le recours à la modélisation pour proposer des projections de changement climatique est aujourd'hui largement utilisé : c'est sur ce type d'analyse que le GIEC élabore ses rapports d'évaluation du changement climatique ainsi que ses recommandations aux décideurs (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Groupe de travail I) 2013). Les

projections réalisées à l'aide d'ensembles de modèles de climat globaux (GCMs) ont encore quelques difficultés pour reproduire correctement des climats locaux, mais l'amélioration des méthodes de réduction d'échelle et la création de modèles climatiques régionaux permettent aujourd'hui d'élaborer des prévisions plus fiables (Semenov & Stratonovitch 2010). Les prévisions par ensembles de modèles offrent une vision probabiliste de l'évolution du climat, car les prévisions de chaque modèle d'un ensemble sont considérées comme équiprobables, et la dispersion entre les modèles est considérée comme reflétant l'incertitude existante quant à la prévision de climats futurs (Semenov & Stratonovitch 2010).

La prospective en agronomie implique d'étudier de manière combinée le changement climatique, les changements et adaptations possibles des pratiques des agriculteurs, ainsi que les réponses des différentes espèces végétales dans divers systèmes de culture à ces changements. La grande complexité des interactions entre climat, pratiques, espèces/systèmes de culture fait de la modélisation un outil très intéressant pour les études d'impact du changement climatique sur les cultures (Hatfield et al. 2011; Eyshi Rezaei et al. 2014), car elle permet d'explorer une grande quantité de scénarios (climat/cultures/pratiques) en un temps restreint.

Les modèles de culture présentent cependant une grande diversité (structures, formalismes, simplifications de processus), et chaque modèle est susceptible de répondre différemment des autres à des changements de pratiques et de climat pour une même culture (Asseng et al. 2013). De récentes études ont privilégié une approche par ensembles de modèles, imitant ainsi les méthodes utilisées par les climatologues, afin de s'affranchir des erreurs propres à chaque modèle et considérer la dispersion des modèles de culture comme reflétant l'incertitude de la réponse des cultures aux changements (Asseng et al. 2013; Martre et al. 2014). D'autres auteurs conseillent plutôt le recours à des modèles *ad hoc* construits spécifiquement pour des problématiques et environnements particuliers, évitant ainsi d'inclure dans les ensembles des modèles de culture inappropriés (Sinclair & Seligman 1996; Affholder et al. 2012). De précédents travaux ont déjà été réalisés en climat Soudano-Sahélien à l'aide de modèles *ad hoc* pour des études centrées sur les rendements (Affholder et al. 2013), l'étude des interactions entre climat et pratiques agricoles (Affholder 1997; Traoré et al. 2011) ainsi que d'impact du changement climatique sur les rendements (Sultan et al. 2013; Eyshi Rezaei et al. 2014; Sultan et al. 2014). Le modèle CELSIUS utilisé dans la présente étude est également un modèle *ad hoc* conçu pour un environnement Soudano-Sahélien et intégrant des composantes de plusieurs des modèles utilisés dans les travaux cités ci-dessus, validés et publiés.

#### **4. Objectifs et problématique**

Les objectifs de cette étude sont de i) proposer des scénarios de changement climatique pour le Sénégal, ii) améliorer la simulation des rendements de l'arachide dans le modèle CELSIUS ainsi que la prise en compte de la nutrition azotée pour le mil et l'arachide, iii) proposer des scénarios d'évolution des systèmes de cultures et iv) évaluer l'impact du changement climatique sur les rendements du mil et de l'arachide pour différents scénarios. Ces objectifs permettront de répondre à la problématique suivante :

**Quelles pourraient être les conséquences du changement climatique sur les rendements du mil et de l'arachide au Sénégal ? Dans quelle mesure l'intensification des systèmes de culture permettrait de limiter les éventuels effets négatifs provoqués par le changement climatique ?**

## II. Matériel et méthode

### 1. Construction des scénarios climatiques futurs

Pour caractériser le changement climatique, évaluer les impacts anthropiques et quantifier leurs effets sur le climat présent et celui du futur, le recours à des simulations par des modèles climatiques globaux (*GCM*) est aujourd'hui très fréquent. Le Programme Mondial de Recherche sur le Climat (*PMRC*) a notamment mis en place le projet CMIP visant à caractériser le changement climatique par comparaison de résultats de modèles climatiques. Ce projet est en lien étroit avec le GIEC, et participe largement à l'élaboration des rapports d'évaluation du changement climatique réalisés par ce groupement d'experts. La construction des scénarios climatiques réalisée dans l'étude décrite par le présent rapport a mobilisé une approche similaire, par analyse des résultats de plusieurs modèles climatiques après simulations de climats futurs au Sénégal.

#### i. "Representative Concentration Pathways" (RCP)

Dans les études menées par le GIEC sur le changement climatique, 4 scénarios distincts sont testés, correspondant à des typologies d'émissions et concentrations de gaz à effet de serre et aérosols, de gaz chimiquement actifs, d'utilisation des terres et de la couverture terrestre jusqu'à 2100 (Van Vuuren et al. 2011; Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Groupe de travail I) 2013). Ces 4 scénarios d'émission correspondent à des forçages radiatifs<sup>2</sup> variés :

- RCP 2.6 : le forçage est faible et atteint un pic de  $3 \text{ W.m}^{-2}$  avant 2100, puis décroît jusqu'à la valeur de  $2,6 \text{ W.m}^{-2}$  en 2100. La concentration en  $\text{CO}_2$  équivalent atteint alors 475 ppm.
- RCP 4.5 : le forçage se stabilise à  $4,5 \text{ W.m}^{-2}$  après 2100, avec une concentration de 630 ppm (eq-  $\text{CO}_2$ ).
- RCP 6.0 : le forçage se stabilise à  $6 \text{ W.m}^{-2}$  après 2100, avec une concentration de 800 ppm (eq-  $\text{CO}_2$ ).
- RCP 8.5 : le forçage radiatif dépasse  $8,5 \text{ W.m}^{-2}$  en 2100 et l'augmentation se poursuit encore après cette période. La concentration en  $\text{CO}_2$  équivalent atteint 1313 ppm en 2100.

#### ii. Modèles de climat et genèse des situations climatiques

Un ensemble de plusieurs modèles climatiques a permis de générer les projections futures et les simulations historiques pour les variables climatiques étudiées. Il s'agit des sorties de simulations des modèles climatiques CMIP5 qui ont été produites par 20 groupes de modélisation climatique de part le monde en vue de contribuer au 5ème rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Groupe de travail I) 2013)<sup>3</sup>. Le nombre de modèles utilisés pour les projections futures (17 à 28) varie en fonction des scénarios et des variables. En effet, la capacité à réaliser des projections climatiques par RCP/série temporelle/variable diffère entre les modèles, et le format des données issues de certains modèles demandait un travail de manipulation informatique fastidieux qui n'a pas pu être réalisé dans le temps imparti pour le travail sur les données climatiques. La liste des modèles utilisés ainsi que des scénarios simulés pour chaque modèle est disponible en annexe 1.

Les données issues des modèles CMIP5 sont disponibles sur des grilles régulières d'environ 2 à 3 degrés carrés selon les modèles. Les variables utilisées pour générer les scénarios climatiques futurs sont au pas de temps mensuel. Une moyenne spatiale a été réalisée sur le Sénégal, puis sur

---

<sup>2</sup> Forçage radiatif : variation du flux de rayonnement résultant au sommet de l'atmosphère due à la variation d'un facteur (ex : concentration atmosphérique en  $\text{CO}_2$ ).

<sup>3</sup> Ces données sont disponibles publiquement sur le site <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>

une période historique (1971-2000) ainsi que deux périodes futures (2036-2065 et 2066-2095), afin de construire pour chaque modèle une année « type » considérée comme représentative des périodes historiques et futures. La manipulation des modèles CMIP5 et le calcul des moyennes climatiques ont été effectués par un spécialiste des données et modèles climatiques, Benjamin Sultan (UMR LOCEAN, IPSL).

En résumé, 5 situations climatiques ont été construites par croisement des 3 périodes temporelles décrites ci-dessus, et deux scénarios de changement climatique : RCP 2.6 et RCP 8.5. Le tableau 1 résume les différentes situations climatiques étudiées.

**Tableau 1 - Résumé des situations climatiques étudiées. CC : Changement Climatique.**

Période temporelle	Scénarios CC	Situation climatique	Plage de calcul des moyennes
Historique	Historique	Historique	1971-2000
Future centrée 2050	RCP 8.5	2050 RCP 8.5	2036-2065
	RCP 2.6	2050 RCP 2.6	
Future centrée 2080	RCP 8.5	2080 RCP 8.5	2066-2095
	RCP 2.6	2080 RCP 2.6	

### iii. Variables analysées et traitement des données

#### **Variabes climatiques**

Dans cette étude, 3 variables climatiques simulées par les modèles CMIP5 et considérées comme déterminantes dans la réponse des plantes au changement climatique (Hatfield et al. 2011) ont été prises en compte : précipitations, températures minimales et maximales.

#### **Calcul des anomalies<sup>4</sup>**

Pour chaque variable (précipitations, températures minimales et maximales), les écarts "futur-historique" ont été calculés afin d'obtenir les anomalies climatiques prévues par chacun des modèles pour les 4 situations climatiques futures. Les anomalies sont en valeurs absolues pour les températures (°C), et en relatif pour les précipitations (%).

#### **Analyse de variance (ANOVA)**

Une ANOVA à deux facteurs a été effectuée sur les anomalies prévues par l'ensemble des modèles pour les 4 situations climatiques futures afin d'observer i) l'effet des scénarios sur les variables et ii) la dispersion entre les modèles de climat. Cela a permis de remarquer les différences significatives entre scénarios futurs afin de mettre en évidence des tendances climatiques variées (ie scénario le plus pessimiste/optimiste, aggravation/atténuation du changement climatique en fonction du temps). La dispersion entre les modèles (ie erreurs standards sur les moyennes de précipitations et températures prédites par l'ensemble de modèles) à été comparée aux anomalies prédites par analyse graphique. Les analyses de variance ont été conduites pour chaque mois car les anomalies sont fortement susceptible de varier pendant l'année, en fonction de la saison (saison sèche, hivernage), notamment en termes de précipitations. Ne disposant pas de répétitions pour chaque "observation", le modèle d'analyse de la variance utilisé ici est un modèle additif où l'on suppose l'interaction modèle-scénario nulle :

<sup>4</sup> Ecart prédit par le(s) modèle(s) climatique(s) pour une variable (températures, précipitations...) entre deux périodes. *Synonyme : écart, delta.*

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk}$$

Avec  $Y_{ijk}$  la variable réponse (ici l'anomalie climatique),  $\mu$  l'espérance de la variable,  $\alpha_i$  l'effet du scénario  $i$ ,  $\beta_j$  l'effet du modèle  $j$ , et  $\varepsilon_{ijk}$  l'erreur résiduelle.

Les hypothèses de normalité des résidus et d'homoscédasticité ont été vérifiées.

### **Combinaisons de modèles**

Suite à l'observation des tendances prédites par l'ensemble des modèles de climat conservés dans cette étude, les anomalies ont été analysées pour chacun des modèles climatiques afin d'extraire un sous-ensemble de modèles se distinguant des autres par des prévisions de changement climatique fortement contrastées par rapport à la tendance générale.

### **Comparaison avec données historiques observées**

Enfin, les moyennes mensuelles historiques simulées de chaque modèle ont été comparées aux moyennes mensuelles historiques observées (annexe 2) afin d'extraire de l'ensemble des modèles un échantillon reproduisant relativement bien les variables étudiées sur la période passée. Les tendances climatiques ont ensuite été analysées pour cet échantillon afin d'observer d'éventuelles différences avec l'ensemble des modèles. Le calcul des moyennes observées s'est réalisé sur la même période historique que les données simulées (1971-2000).

### **Prise en compte du CO<sub>2</sub>**

Les taux de CO<sub>2</sub> pour les scénarios climatiques futurs ont été déterminés à partir des deux RCP retenus dans cette étude, grâce aux courbes d'évolution de la concentration atmosphérique présentées par Van Vuuren et al. (2011). Les valeurs retenues correspondent à la valeur de l'année centrale de chaque série climatique : 1986 pour la série historique, 2050 et 2080 pour les séries futures, respectivement. Cependant, l'effet isolé des variations de CO<sub>2</sub> atmosphérique et de leur impact les rendements n'a pas été étudié ici.

#### **iv. Construction des scénarios**

Les valeurs des anomalies mensuelles moyennes prédites par les modèles climatiques, retenues pour l'élaboration des scénarios futurs ont été appliquées aux données météorologiques journalières observées de la station de Bambey, sur une période de 30 années (1971-2000). Les données ont été fournies par l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie du Sénégal<sup>5</sup>, et sont identiques à celles utilisées par Reinares Martinez (2014) dans une précédente étude.

Pour chaque scénario, trois types de corrections ont été appliquées :

- Un scénario combinant les anomalies de précipitations et températures, appliquées aux données historiques.
- Un scénario où seules les anomalies de pluies ont été appliquées, les températures sont identiques à celles mesurées sur la station de Bambey de 1971 à 2000.
- Un scénario où seules les anomalies de températures (minimales et maximales) ont été appliquées, les pluies restant identiques à celles mesurées sur la station de Bambey de 1971 à 2000.

Ces corrections offrent la possibilité de séparer les effets des anomalies de pluie et de températures lors de l'analyse.

---

<sup>5</sup> <http://www.anacim.sn/>

## 2. Paramétrage du modèle CELSIUS

### i. Présentation du modèle

CELSIUS est un modèle dynamique de culture au pas de temps journalier, construit avec le logiciel Microsoft Access sous la forme d'une base de données et codé en VBA. Il s'agit d'un modèle *ad hoc* (Sinclair & Seligman 1996; Affholder et al. 2012) conçu spécifiquement pour simuler le rendement potentiel ( $Y_p$ ), le rendement limité par l'eau ( $Y_w$ ) et le rendement limité par l'eau et l'azote ( $Y_{wn}$ ) dans l'environnement Soudano Sahélien des cultures de maïs, mil, sorgho, riz, coton et arachide. Le modèle est en cours de construction pour l'étude des opportunités et contraintes de l'intensification écologique de l'agriculture de cette région, sous climats actuel et futur. Pour fonctionner il mobilise un ensemble de modules existants dans d'autres modèles validés et documentés (Adam et al. 2013), permettant de limiter la complexité du modèle et faciliter son paramétrage (Passioura 1996). Son implémentation dans le logiciel Microsoft Access permet de le prendre facilement en main, sans grande nécessité de connaissances informatiques poussées.

CELSIUS est construit à partir du modèle PYE (Affholder et al. 2013), agrémenté de quelques améliorations comme la prise en compte du ruissellement (Albergel et al. 1991), le retard d'émergence des plantes en cas d'humidité du sol insuffisante et la destruction précoce de la culture en cas de sécheresse pendant la phase juvénile (Affholder 1997), ainsi que la prise en compte de la disponibilité en azote dans les sols (Poeydebat et al. 2013).

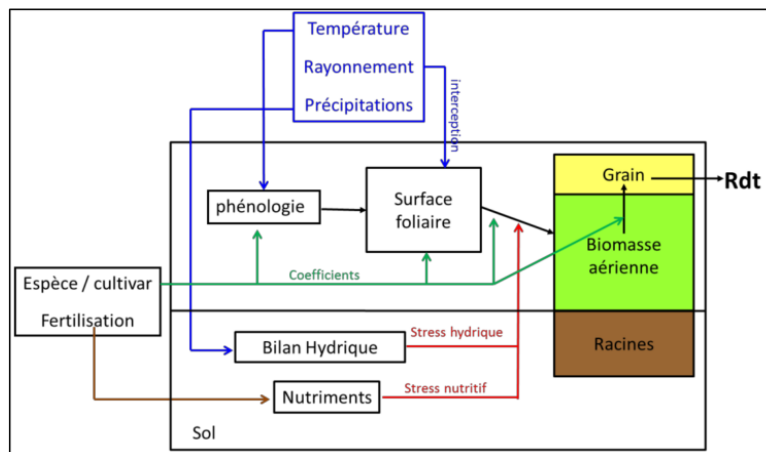


Figure 5 - Schéma conceptuel du modèle CELSIUS proposé par Poeydebat et al. (2013)

### Bilan hydrique

Le module de bilan hydrique est inspiré du modèle SARRA (Forest & Clopes 1994) et utilise une approche de type RU

$$Stock_j = Stock_{j-1} + Précipitations_j - Esol_j - Tr_j \quad (1)$$

Avec  $Stock_j$  le stock d'eau du sol en mm au jour  $j$ ,  $Esol_j$  l'évaporation du sol du jour  $j$  et  $Tr_j$  la transpiration de (des) la culture(s) au jour  $j$ . L'évaporation potentielle est calculée comme le produit de l'ETP et d'une fraction de rayonnement non intercepté par la culture :

$$E0sol = ETO \times Kc \times e^{-\delta \times LAI} \quad (2)$$

Avec  $ETO$  l'évapotranspiration potentielle Penman-Monteith,  $Kc$  le coefficient cultural fonction du LAI (Brisson et al. 1998) et  $\delta$  un coefficient d'extinction de l'ETP par la culture.

L'évaporation du sol est calculée par :

$$Esol = E0sol \times CHS \quad (3)$$

Avec *CHS* la contrainte hydrique de surface :

$$CHS = \frac{AWs}{AWC \times Zsurf \times SeuilEvap} \text{ si } \frac{AWs}{AWC \times Zsurf} < SeuilEvap \quad (4)$$

$$CHS = 1 \text{ si } \frac{AWs}{AWC \times Zsurf} > SeuilEvap \quad (5)$$

Avec *AWs* la quantité d'eau disponible dans la couche de surface de profondeur *Zsurf*, *AWC* la capacité de stockage du sol et *SeuilEvap* un paramètre permettant de régler l'effet de *self-mulching*<sup>6</sup> du sol.

La transpiration potentielle est obtenue par différence entre évapotranspiration et évaporation potentielles de la culture (Affholder 1997), et la transpiration *Tr* est obtenue par le produit de la transpiration potentielle et d'une contrainte hydrique *WStress* liée à l'assèchement de la couche explorée par les racines :

$$Tr = Tr0 \times WStress \quad (6)$$

$$WStress = 1 \text{ si } FTSW > 0.7 \quad (7)$$

$$WStress = \frac{FTSW}{0.7} \text{ si } FTSW < 0.7 \quad (8)$$

### **Phénologie et LAI**

Le développement de la culture est simulé par une approche "temps thermique", où 5 stades phénologiques sont définis (cf tableau 2) :

**Tableau 2 - Stades de développement utilisés dans le modèle CELSIUS**

N°stade	Période représentée par le stade phénologique
1	Levée jusqu'au début de croissance rapide du LAI
2	Début de croissance rapide du LAI jusqu'au LAI maximal
3	LAI maximal jusqu'au début de remplissage des grains
4	Début de remplissage des grains jusqu'au l'initiation de la sénescence
5	Début de sénescence jusqu'à maturité, récolte

Chaque stade est atteint lorsque le modèle atteint le cumul de degrés-jours correspondant. Entre les stades 1 et 3 le LAI est simulé selon une fonction de temps thermique issue du modèle STICS (Brisson et al. 1998) :

$$dLAI_{i,j} = \frac{dLAI_{max_i}}{(1 + \exp^{5.5 \times (2.2 - ULAI)})} \times \Delta t_{dens} \times TurFac_j \times CompFac_{i,j} \quad (9)$$

Où  $dLAI_{i,j}$  est l'incrément de LAI pour la culture *i* au jour *j*,  $dLAI_{max_i}$  est l'incrément journalier maximal pour la culture *i*, *ULAI* un indice de développement foliaire valant 1 à l'émergence et 3 quand le LAI est maximal,  $Hu_{i,j}$  correspond au temps thermique de la culture *i* au jour *j* (°C.jour), *DeltaIdens* une fonction de réduction du LAI par la densité lorsque celle-ci dépasse une certaine valeur, *TurFac<sub>j</sub>* le facteur de réduction du LAI par le stress hydrique calculé le jour *j*. *CompFac* est un

<sup>6</sup> Self-mulching : lorsque la couche de sol de surface se dessèche, l'évaporation des couches inférieures est arrêtée.



facteur de compétition pour la lumière de la culture  $i$  au jour  $j$ , mais n'est pas activé dans la version actuelle de CELSIUS.

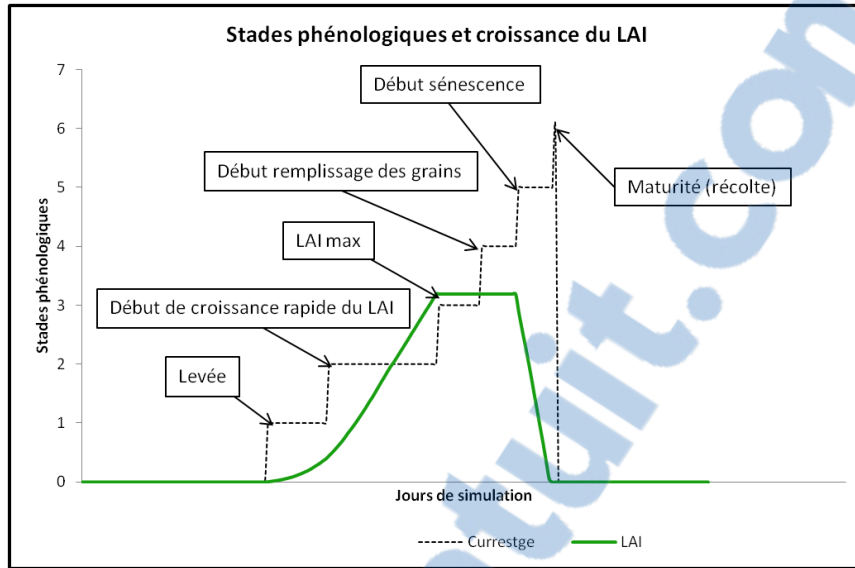


Figure 6 - Schéma de la croissance du LAI simulée par le modèle CELSIUS. *Currestge* : stade phénologique. Source : Léo Garcia

Le semis et la levée peuvent être déclenchés automatiquement. Le semis automatique est déclenché à partir d'un seuil correspondant à un cumul de pluie infiltrée de 10 mm. Le déclenchement de la levée est régi par un cumul de temps thermique seuil ainsi qu'un paramètre de contrainte hydrique lié à l'eau infiltrée et stockée dans la couche d'épaisseur  $Z_{graine}$  concernée par la germination.

### **Biomasse et rendement**

Le module de croissance est celui du modèle STICS, et fonctionne par incrément de biomasse quotidienne selon l'équation :

$$dBiom_{i,j} = CO2fact_i \times WSfact_j \times (Ebmax_i \times Raint_{i,j} - 0.0815 \times Raint_{i,j}^2) \times \frac{Ftemp_j}{100} \quad (10)$$

Avec  $dBiom_j$  l'incrément de biomasse de la culture  $i$  au jour  $j$  (t),  $CO2fact_i$  le facteur d'augmentation par le  $CO_2$  de la conversion du rayonnement en biomasse de la culture  $i$ ,  $WSfact_j$  un indice de stress (compris entre 0 et 1) correspondant au minimum entre l'indice de stress hydrique du jour  $j$  ( $WSfactH_j$ ) et l'indice de stress azoté ( $WSfactN$ , saisonnier),  $Ebmax_i$  le coefficient maximal de conversion du rayonnement en biomasse ( $gMS.MJ^{-1}$ ),  $Raint_{i,j}$  le rayonnement photosynthétiquement actif intercepté par la culture  $i$  au jour  $j$  (MJ) calculé par la loi de Beer-Lambert, et  $Ftemp$  une fonction de  $T_{cmin}$ ,  $T_{cmax}$  et  $T_{copt}$  définissant l'action de la température sur l'accumulation de biomasse aérienne par la culture :

$$Ftemp_j = 0 \text{ si } T_j < T_{cmin} \text{ ou } T_j > T_{cmax} \text{ et } Ftemp = 1 \text{ si } T_j = T_{copt} \quad (11)$$

$$Ftemp_j = 1 - \frac{(T_j - T_{copt})}{(T_{cmin} - T_{copt})} \text{ si } T_{cmin} < T_j < T_{copt} \quad (12)$$

$$Ftemp_j = 1 - \frac{(T_j - T_{copt})}{(T_{cmax} - T_{copt})} \text{ si } T_{copt} < T_j < T_{cmax} \quad (13)$$

Avec  $T_j$  la température moyenne du jour  $j$ ,  $T_{cmin}$ ,  $T_{cmax}$  et  $T_{copt}$  les températures minimale, maximale et optimale de croissance, respectivement.

Le rendement est fonction de l'indice de récolte  $IR$ , qui croît à partir de la phase de remplissage des grains selon la fonction :

$$IR_i = Vitircarb_i \times (J - Jdrp + 1) \quad (14)$$

$$IR_i = \max (IR_i, IRmax_i) \quad (15)$$

Avec  $Vitircarb$  un paramètre propre au cultivar,  $J$  le jour de la simulation,  $Jdrp$  le jour de début de remplissage des grains,  $IRmax_i$  l'indice de récolte maximal du cultivar  $i$ .

Le rendement est ainsi calculé selon l'équation :

$$Grain_{i,j} = \min \left( Biom_{i,j} \times IR_i, \frac{P1grmax_i \times Ngrain_i}{100} \right) \quad (16)$$

Où  $Grain_{i,j}$  correspond au rendement grain de la culture  $i$  au jour  $j$  (t),  $Biom_{i,j}$  la biomasse totale au jour  $j$ ,  $P1grmax$  le poids d'un grain maximal défini pour le cultivar  $i$  (g), et  $Ngrain_i$  le nombre total de grain mis en place par la plante.

$$Ngrain_i = Cgrain_i \times Vitmoy_i + CgrainVO_i \quad (17)$$

Avec  $Vitmoy$  la vitesse moyenne de croissance pendant la phase de détermination du nombre de grains ( $g \cdot m^{-2} \cdot j^{-1}$ ),  $Cgrain$  et  $CgrainVO$  des paramètres de calibration du modèle pour le cultivar  $i$ .

### **Stress azoté**

La prise en compte de la disponibilité de l'azote dans le sol se fait par le calcul d'un indice de satisfaction des besoins nutritifs  $NRF$  (Nitrogen Reducing Factor) selon un bilan saisonnier.

$$NRF = \frac{[(TauxMin \times Norg) + Kmo \times ApportMO + ApportMin + Nsymb_i] \times Kp}{Ncritique_i} \quad (18)$$

Avec  $TauxMin$  le taux annuel de minéralisation nette de l'azote (2 % d'après Pieri, 1989),  $Norg$  est l'azote organique dans les 30 premiers centimètres du sol ( $kgN \cdot ha^{-1}$ ),  $Kmo$  un coefficient de minéralisation de la matière organique exogène apportée  $ApportMO$ ,  $ApportMin$  la quantité d'azote minéral apportée ( $kg \cdot ha^{-1}$ ),  $Nsymb$  la quantité d'azote fixé par les bactéries symbiotiques dans le cas de fabacées ( $kg \cdot ha^{-1}$ ),  $Ncritique_i$  les besoins azotés de la culture  $i$  et  $Kp$  un coefficient de perte.

## ii. Paramétrage du modèle CELSIUS

### Espèces et cultivars

#### *Arachide*

Des travaux précédents ont déjà permis de paramétrer le modèle CELSIUS pour l'arachide (Poeydebat et al. 2013), cependant les auteurs ont reconnu qu'il n'était pas suffisant. Cette présente étude a tenté d'améliorer le précédent paramétrage pour certains des paramètres du modèle. Le travail s'est concentré sur deux cultivars, présentés dans le tableau 3.

#### *Mil*

C'est le cultivar de mil *Souna III* qui a été paramétré pour cette étude. Le modèle PYE (Affholder et al. 2013) permet déjà de simuler le rendement  $Y_w$  pour ce cultivar : les principaux paramètres utilisés dans le modèle PYE ont été remobilisés dans le cas présent. Des paramètres relatifs à la nutrition azotée ont été ajoutés et estimés pour le modèle CELSIUS afin de simuler le rendement  $Y_{wn}$ . Le cultivar est présenté dans le tableau 3.

**Tableau 3 - Principales caractéristiques des cultivars utilisés pour le paramétrage du modèle CELSIUS. Ara : arachide. Sources : B.Muller (communication personnelle), Ministère de la Coopération et du Développement (1991), Kouakou et al. (2013).**

Espèce Cultivar	Zone de culture	Cycle (jours)	Type	Port	Autres caractéristiques
<i>Ara</i> 55-437	Centre et nord du bassin arachidier	90-100	Spanish	Erigé	Resistance sécheresse, non dormant, petites graines
<i>Ara</i> 73-33	Régions de Kaolack, Kaffrine, partie sud de Fatick	100-115	Virginia	Erigé	Résistance sécheresse, usage confiserie, dormance 1 mois, peu de paille
<i>Mil</i> Souna III	Sénégal	90	Souna	-	Variété synthétique recommandée au Sénégal, très peu photosensible

### Sélection des parcelles

Deux types de parcelles ont été sélectionnés pour le paramétrage du modèle : des parcelles d'essais des stations expérimentales de Bambey et Niore (ISRA), ainsi qu'un réseau de parcelles paysannes suivies. Les parcelles d'essais ont été mises en place et suivies par François Affholder (voir Affholder 1997; Affholder 1995) de 1989 à 1991, ainsi que par Omar Diouf, chercheur de l'ISRA, de 1996 à 1999, dont les données (non publiées) ont été regroupées par Bertrand Muller. Les essais disposent de différents niveaux de fertilisation (contrôle du stress nutritif) et irrigation (essais irrigués/pluviaux ou irrigués en contre-saison afin de maîtriser le stress hydrique). Les parcelles des stations étaient équipées de tubes à neutrons pour les suivis de stock hydriques, et des mesures de LAI ont été réalisées durant les essais avec des méthodes variées (planimétrie optique feuille à feuille notamment). Les suivis en milieu paysan ont été mis en place pour le projet ESPACE (Affholder & Diagne 1991) et comportent des mesures de rendement grain, rendement biomasse, nombre de grains, et observations de stades phénologiques.

### Etapes du paramétrage

Les données utilisées pour le paramétrage du modèle sont issues de la base de données TACSY et sont constituées d'observations de suivis en milieu paysan ainsi que de données d'essais en station. Cette base de données recense des observations issues d'essais réalisés dans divers pays tropicaux (Sénégal, Mali, Madagascar, Vietnam, Brésil, Laos) sur des cultures annuelles. La base de données

est conçue sous Microsoft Access, ce qui facilite son utilisation couplée avec les modèles PYE et CELSIUS notamment. Différents jeux de données ont été utilisés selon les paramètres à ajuster et en fonction de la disponibilité des données nécessaires à chaque étape du paramétrage. Les différents jeux de données et les étapes du paramétrage sont résumés dans le tableau 4.

### **Paramétrage des rendements $Y_w$ et $Y_{wn}$**

#### *Arachide*

Le modèle a tout d'abord été paramétré pour simuler les rendements  $Y_w$  permis par le rayonnement, la température et les précipitations. Les paramètres du LAI, de croissance en biomasse et d'élaboration du rendement ont été calés par itération, afin que la courbe de rendements simulés enveloppe les points de rendements observés (voir annexe 5), définissant le meilleur des rendements observé comme le rendement  $Y_w$ .

Les paramètres du bilan minéral ont ensuite été ajustés afin que le rendement  $Y_{wn}$ , permis par le rayonnement, la température, les précipitations et l'azote, représente au mieux les données observées. Ne disposant que de peu de données pour réaliser le paramétrage de l'arachide, une validation sur des données indépendantes de celles du calage n'a pu être réalisée.

#### *Mil*

Le calage des paramètres liés à la nutrition azotée et à la sensibilité aux stress nutritifs a été réalisé sur des parcelles d'essais en station (10 parcelles) pour lesquelles on suppose que seule l'eau limite les rendements (parcelles maintenues à  $Y_w$ ). Les résultats du paramétrage (voir III-2) ont été obtenus sur un jeu de données varié (43 parcelles) utilisé pour valider le calage du mil.

**Tableau 4 - Etapes du calage du modèle et jeux de données utilisés correspondants.**

<b>Jeux de données utilisés pour le paramétrage</b>	<b>Etapes et paramètres concernés (ordre chronologique)</b>
Données de sols nus, observations de suivi hydrique	Calage du bilan hydrique, paramètres $Z_{surf}$ et $seuilevap$ (calcul de l'évaporation du sol)
Observations de stades phénologiques	Calage des constantes thermiques de développement des plantes
Observations de LAI et stock hydrique sous diverses conditions de stress hydrique/minéral et densités de semis variées	Calage des paramètres du LAI ( $k_{max}$ , $dlaimax$ , $sensisen$ ), ajustement de constantes thermiques, calage du bilan hydrique sous LAI connu
Observations de biomasse/grain sous diverses conditions de stress hydrique et azoté	Calage des paramètres de croissance potentielle des plantes ( $Eb_{max}$ , $k$ ), estimation des paramètres d'élaboration du rendement ( $C_{grain}$ , $C_{grainV0}$ , $P1gr_{max}$ , $Ngr_{max}$ , $Vitircarb$ ), calage des paramètres des bilans minéraux et leur impact sur la croissance/l'élaboration du rendement ( $N_{critique}/Kp$ , $N_{symb}$ )

### **3. Analyse de l'impact du changement climatique sur les rendements**

#### **iii. Systèmes de culture et itinéraires techniques**

##### **Variétés**

Les données disponibles pour le paramétrage des cultivars d'arachide 55-437 et 73-33 n'ont pas permis d'obtenir un résultat satisfaisant lors de la comparaison entre données observées et données simulées (biomasse et/ou rendement grain) pour la simulations des rendements  $Y_{wn}$ . En conséquence, l'expérimentation virtuelle a été réalisée pour le mil Souna III uniquement.

##### **Fertilisation**

4 niveaux de fertilisation ont été choisis afin d'obtenir des rendements atteignant 25% (F0), 50% (F1), 75% (F2) et 100% (F3) du rendement permis par le rayonnement et la température ( $Y_p$ ), tout stress hydrique étant désactivé pour le réglage des niveaux de fertilisation. Dans le cas du mil, ces niveaux correspondent à des quantités d'azote de 18.5, 34.5, 48 et 83 kgN.ha<sup>-1</sup> respectivement. Le modèle ne faisant pas de différence entre fertilisation minérale et organique (excepté un coefficient de minéralisation pour les MO exogènes), seule une fertilisation minérale a été considérée dans les simulations.

##### **Sols**

Deux types de sols ont été utilisés dans les simulations, correspondant à deux niveaux de RU "extrêmes" dans la zone d'étude : 80 mm.m<sup>-1</sup> et 120 mm.m<sup>-1</sup>. Les autres caractéristiques sont communes aux deux sols : une épaisseur soumise à l'évaporation de 22 cm, une profondeur de 2 m et un stock d'azote de 12 kg/ha, correspondant au niveau le plus faible répertorié dans la base de données de suivis paysans. Ce choix permet de s'assurer que la source principale d'azote est la fertilisation, et que le contraste entre les 4 niveaux de fertilisation soit perceptible dans les simulations. Le stock d'azote des sols n'a pas été réglé à 0 pour la cohérence avec les données observées sur le terrain. Le ruissellement a été désactivé pour l'expérimentation virtuelle.

##### **Dates de semis/levée**

Le mil étant généralement semé en sec, le semis a été réglé au jour 150 de l'année, correspondant à la semaine précédent le démarrage de la saison des pluies du scénario climatique le plus précoce en termes de précipitations. Il a été considéré que les semences restaient au champ jusqu'aux premières pluies même dans les scénarios tardifs (elles ne sont pas consommées par les oiseaux ou autres ravageurs). La levée automatique a été activée, avec un seuil de déclenchement de 100°C.jours (paramétrage du modèle PYE).

##### **Densités**

Les densités de semis ont été réglées à des valeurs correspondant aux densités pratiquées à la station expérimentale de Bambey : 14.8 plantes.m<sup>-2</sup> pour l'arachide, et 1.23 plantes.m<sup>-2</sup> pour le mil.

### III. Résultats

#### 1. Scénarios climatiques

##### i. Ensemble des modèles

Les anomalies prédites par les modèles sont représentées dans les figures 7 et 8. La période représentée est située entre le mois d'avril et le mois de novembre car cette fenêtre correspond à la période actuelle d'hivernage élargie afin de constater d'éventuels décalages de saisonnalité. De plus, pour les mois de décembre, janvier, février et mars, certaines valeurs d'anomalies sont aberrantes. Ces mois se situent en saison sèche et les modèles prédisent parfois des quantités de pluie infinitésimales pour cette période : la baisse ou augmentation des précipitations journalières prédites par les modèles climatiques, même infime<sup>7</sup>, s'est traduite par une anomalie relative de l'ordre de plusieurs milliers de pourcents, ce qui fausse l'analyse et la représentation des changements.

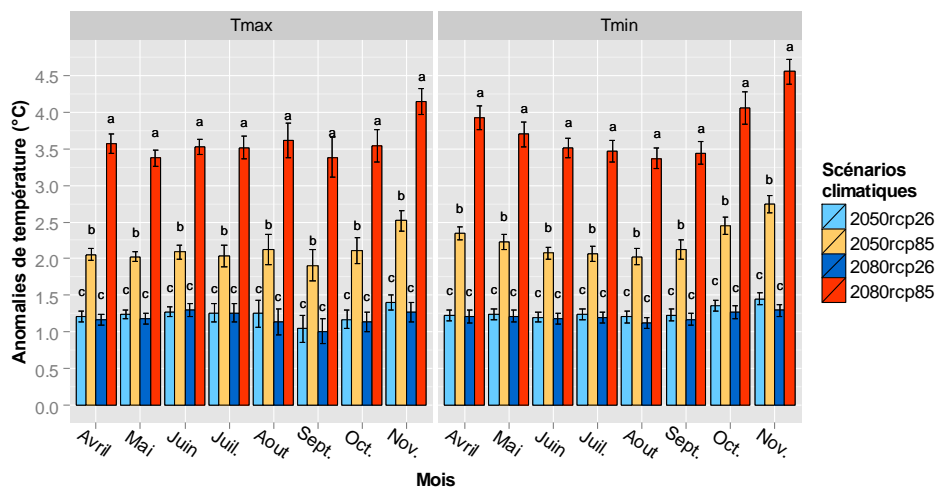


Figure 7 - Moyennes mensuelles des anomalies de températures minimales (Tmin) et maximales (Tmax) prédites par l'ensemble des modèles climatiques, pour les 4 scénarios futurs.

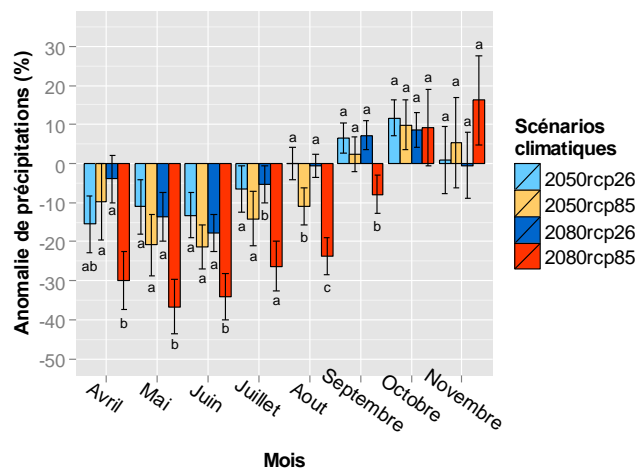


Figure 8 - Moyennes mensuelles des anomalies de précipitations prédites par les modèles climatiques, pour les 4 scénarios futurs : centrés 2050 RCP 2.6 et 8.5, centrés 2080 RCP 2.6 et 8.5

<sup>7</sup> Exemple : le modèle simule des précipitations historiques de l'ordre de  $10^{-8}$  mm/j, et des précipitations futures de l'ordre de  $10^{-4}$  mm/j : l'anomalie calculée est de l'ordre de  $10^6$  %

## **Températures**

La variabilité des prédictions de températures, ie l'incertitude due à la dispersion des modèles entre eux (figure 7, erreurs standards), est relativement faible pour chaque scénario et mois de l'année comparée aux variations de températures prédites. On observe pour le scénario RCP 2.6 une augmentation générale des températures minimales et maximales de 1 à 1,5 °C, identique pour la projection moyen-terme (2050rcp26) et long-terme (2080rcp26). En revanche, le scénario RCP 8.5 suggère une augmentation des températures prédites par les modèles plus importante, qui s'aggrave avec le temps : elles augmentent de 2 à 2,5 °C pour la période centrée sur 2050 (2050rcp85) et de 3 à 4 °C pour la période centrée sur 2080 (2080rcp85), parfois même au-delà de 4 °C.

## **Précipitations**

Les tendances prédites par les modèles sont ici plus variées. On observe tout d'abord une forte variabilité dans les prédictions, due à la dispersion des prédictions des différents modèles (mesurée ici par l'erreur standard). Contrairement aux prévisions de températures les anomalies de précipitations sont plus hétérogènes et il est difficile de dégager des tendances futures robustes. La variation prédite pour certains scénarios/mois et parfois inférieure à la dispersion des modèles, notamment pour les scénarios 2050rcp26, 2050rcp85 et 2080rcp26. Pour le scénario 2080rcp85 (le plus pessimiste), les variations prédites par l'ensemble des modèles sont supérieures à la variabilité entre les modèles, excepté pour les mois de septembre, octobre et novembre. On observe peu de différences significatives entre les scénarios, sauf pour le scénario 2080rcp85, qui est le seul possédant des anomalies significativement différentes des autres pour certains mois (mai à septembre). Les anomalies sont alors de l'ordre de -10 % à -35 % pendant cette période. On observe tout de même une tendance générale à la baisse des précipitations entre avril et août, et une augmentation de septembre à novembre (excepté pour le scénario 2080rcp85).

### **ii. Sous-ensemble de modèles contrastés**

Les modèles de climat projettent tous des augmentations de température de même ordre de grandeur (cf figure 7, la variabilité de chaque projection est très faible). Seules les anomalies de précipitations ont été analysées afin de trouver des projections contrastées par rapport à la tendance générale décrite ci-dessus. Deux modèles se distinguent de l'ensemble : MIROC-ESM et MIROC-ESM-CHEM. En effet ces deux modèles sont les seuls à prévoir systématiquement une augmentation des précipitations pour tous les scénarios, dans la période correspondant à l'hivernage élargi. Les anomalies simulées par ces modèles sont représentées sur la figure 9. Les erreurs standard ne sont pas représentées car les seules données disponibles pour cette analyse sont les 12 moyennes mensuelles brutes de chaque variable (températures minimale, maximale et précipitations journalières).

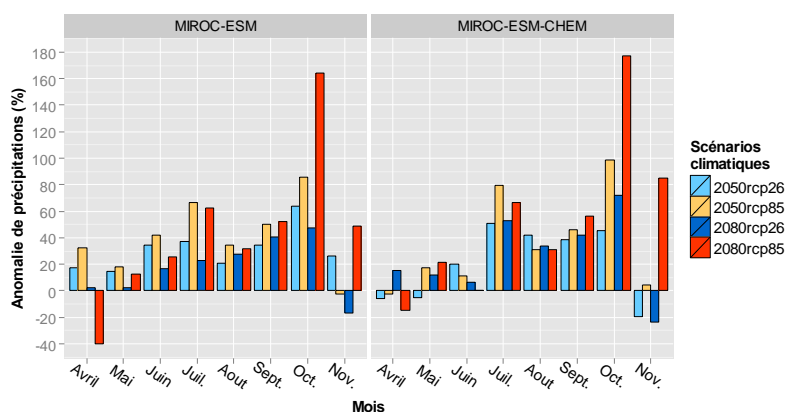


Figure 9 - Moyennes mensuelles des anomalies de précipitations prédites par les modèles MIROC-ESM et MIROC-ESM-CHEM, pour les 4 scénarios futurs.

### iii. Comparaison des moyennes observées/simulées

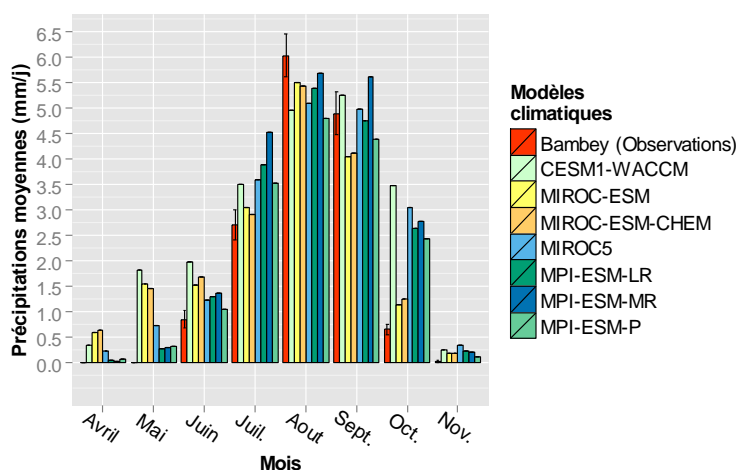


Figure 10 - Précipitations historiques observées et simulées (1971-2000). Comparaison des moyennes mensuelles des précipitations enregistrées à la station de Bambey et les valeurs simulées par un échantillon constitué des 7 modèles restituant le mieux les précipitations observées.

Parmi les 7 modèles les plus fidèles aux données observées, on remarquera la présence des deux modèles MIROC-ESM et MIROC-ESM-CHEM évoqués plus haut. Bien qu'ils surestiment les précipitations pour les mois d'avril et mai, ils restituent le mieux les valeurs sur l'ensemble de la période d'hivernage (juin-novembre).

### iv. Taux de CO<sub>2</sub> atmosphérique

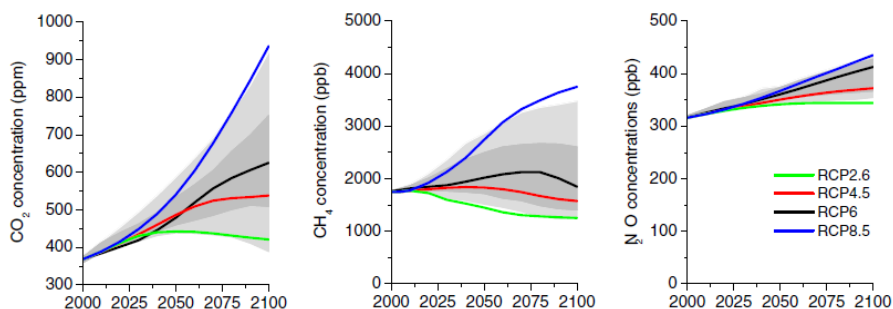


Figure 11 - Tendances des concentrations de gaz à effet de serre. Les zones grises indiquent le 98e et le 90e percentile (gris clair/gris foncé) déterminés dans une étude récente (Clarke et al. 2009). Source : Van Vuuren et al. (2011).



Les concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub> retenues pour cette étude sont les suivantes :

- 350 ppm pour les scénarios historiques
- 450 ppm pour les scénarios futurs "RCP 2.6"
- 550 ppm pour le scénario futur "RCP 8.5" centré sur 2050
- 750 ppm pour le scénario futur "RCP8.5" centré sur 2080

#### v. Scénarios retenus

Les scénarios retenus pour l'expérimentation virtuelle sont décrits dans le tableau 5. Un sous-ensemble de modèles climatiques constitué par les modèles MIROC-ESM et MIROC-ESM-CHEM (ensemble MIR) a été choisi pour représenter les projections contrastées par rapport aux projections de l'ensemble des modèles (ensemble TM) en termes de précipitations. Ce sous-ensemble MIR représente également bien les valeurs de précipitations historiques observées. Le choix des scénarios s'est fait en référence aux prévisions de températures : un seul scénario pour le RCP 2.6 (pas de différence entre les deux périodes futures, ie 2050 et 2080), et deux scénarios pour le RCP 8.5 car les variations évoluent d'une période future à l'autre. Les 6 scénarios sont décrits dans le tableau 5.

Pour chaque scénario, les anomalies moyennes de température minimale, maximale et de précipitation prédits par les ensembles de modèles correspondants (ie. ensemble TM et ensemble MIR) ont été appliquées aux variables historiques comme décrit en II-1). L'annexe 3 présente les caractéristiques de ces scénarios climatiques en termes de températures et précipitations lorsque les anomalies de précipitations et températures ont été appliquées de manière combinée.

**Tableau 5 - Scénarios climatiques retenus et explications correspondantes. Les projections basées sur le RCP 2.6 n'étant pas différentes entre les deux périodes futures ("2050" et "2080"), un seul scénario a été retenu pour ce RCP. TM : "Tous les Modèles" ; MIR : "modèles MIROC".**

Scénarios climatiques	Explication
RCP 2.6 TM	Projections établies par l'ensemble des modèles climatiques pour le RCP 2.6.
RCP 2.6 MIR	Projections établies par les modèles MIROC-ESM et MIROC-ESM-CHEM pour le RCP 2.6.
RCP 8.5 2050 TM	Projections établies par l'ensemble des modèles climatiques pour le RCP 8.5 sur la période centrée sur 2050
RCP 8.5 2050 MIR	Projections établies par les modèles MIROC-ESM et MIROC-ESM-CHEM pour le RCP 8.5 sur la période centrée sur 2050
RCP 8.5 2080 TM	Projections établies par l'ensemble des modèles climatiques pour le RCP 8.5 sur la période centrée sur 2080
RCP 8.5 2080 MIR	Projections établies par les modèles MIROC-ESM et MIROC-ESM-CHEM pour le RCP 8.5 sur la période centrée sur 2080

## 2. Paramétrage de CELSIUS

### i. Paramètres retenus

Tableau 6 - Paramètres des cultivars dans le modèle CELSIUS.  $K_{max}$  : coefficient cultural;  $k$  : coefficient d'extinction du rayonnement;  $N_{grmax}$  : nombre de grains maximal par plante.

	Mil Souana III	Arachide 73-33	Arachide 55-437
$dlaimax$	0.0099	0.00092	0.00092
$K_{max}$	1.7	1.3	1.3
$E_{bmax}$	3.4	1.75	1.75
$k$	0.65	0.6	0.6
$C_{grain}$	3571	47	47
$C_{grainV0}$	-3571	-118	-43
$P1_{grmax}$	0.0073	0.82	0.78
$N_{grmax}$	40000	25	23
$Vitircarb$	0.0092	0.0038	0.0038
$(N_{critique}/K_p)$	95	80	non calé
$N_{symb}$	-	24	non calé

Les données disponibles pour le paramétrage du cultivar 55-437 étaient insuffisantes pour caler les rendements biomasse et grain, ainsi que les paramètres de nutrition azotée.

### ii. LAI et stocks hydrique

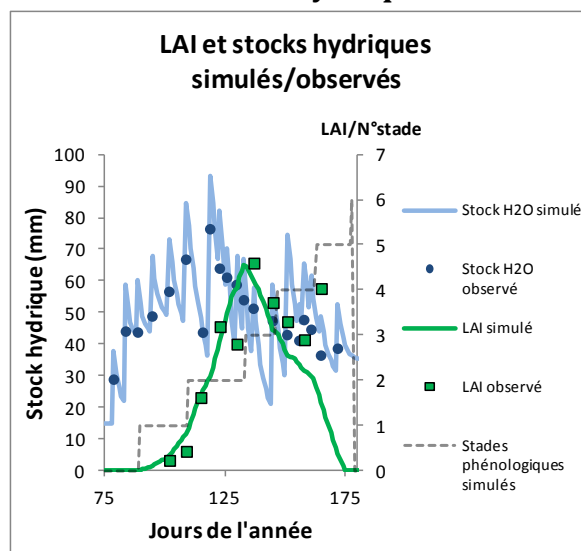


Figure 12 - Comparaison du LAI et du stock hydrique simulés avec les valeurs observées pour le mil Souana III. Mil irrigué tout au long du cycle afin de maintenir la plante à l'ETM. Fertilisation: 150 kg/ha d'engrais à la levée (NPK 14-7-7) + 100 kg/ha d'urée au démarrage + 100 kg/ha d'urée à la montaison

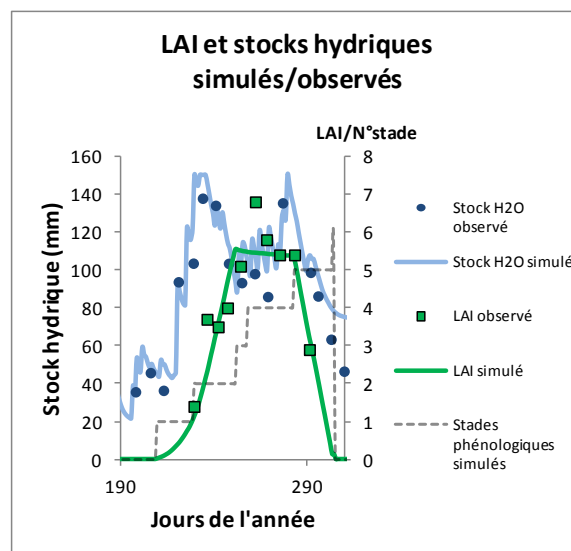


Figure 13 - Comparaison du LAI et du stock hydrique simulés avec les valeurs observées pour l'arachide 73-33. Arachide irrigué et fertilisé à 15kg/ha d'azote, 32 kg/ha de phosphore et potassium.

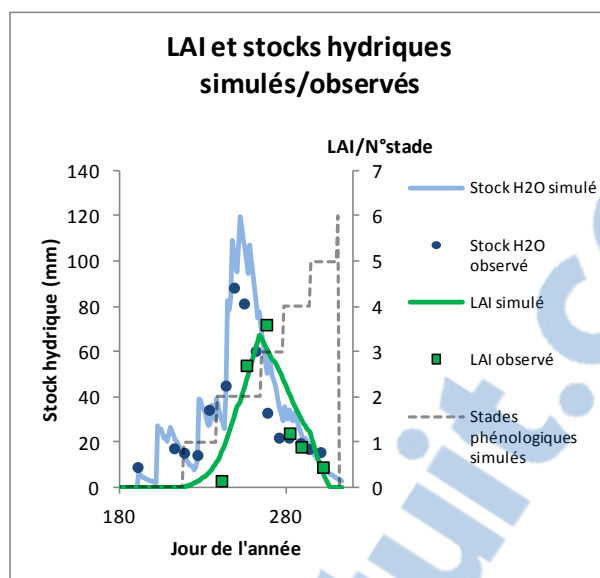


Figure 14 - Comparaison du LAI et du stock hydrique simulés avec les valeurs observées pour le mil Souna III. Mil pluvial strict, fertilisé à 25% de la fumure minérale vulgarisée (150kg/ha d'engrais 10-21-21).

L'annexe 4 présente d'autres figures illustrant le calage du LAI et stock hydrique.

Pour les deux espèces le modèle restitue bien les valeurs de stock hydrique et de LAI lors de la croissance puis de la sénescence de la plante.

### iii. Biomasse et rendements

#### Mil

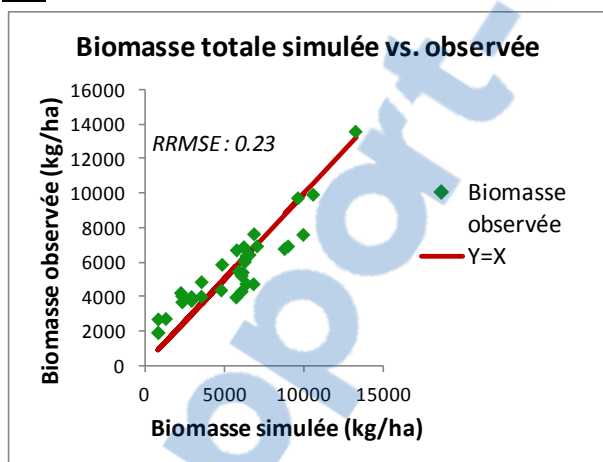


Figure 15 - Comparaison de la biomasse totale simulée avec les valeurs observées pour le mil.

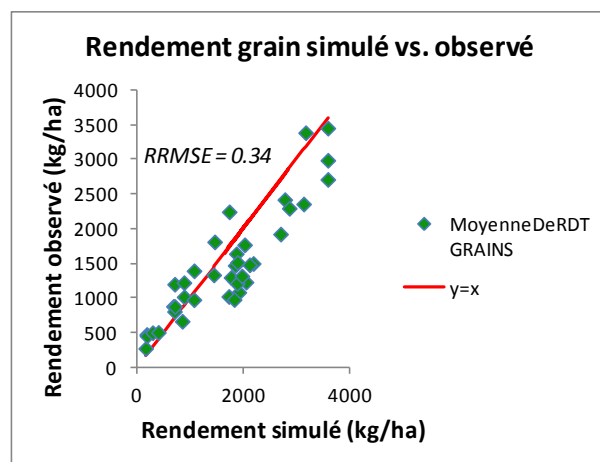


Figure 16 - Comparaison du rendement grain simulé avec les valeurs observées pour le mil.

Le modèle restitue bien les valeurs de biomasse totale (RRMSE = 23 %), en revanche il semble moins performant en ce qui concerne le rendement grain (RRMSE = 34 %). On remarque cependant que les rendements "extrêmes" sont bien restitués par le modèle. De manière générale le modèle surestime les rendements grain (cf biais tableau 7) et très légèrement les rendements biomasse. L'efficacité est de 71 % pour la biomasse et 60 % pour le grain (tableau 7).

## Arachide

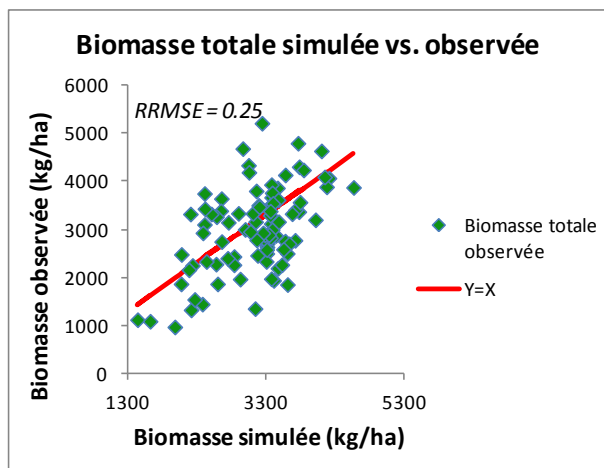


Figure 17 - Comparaison de la biomasse totale simulée avec les valeurs observées pour l'arachide

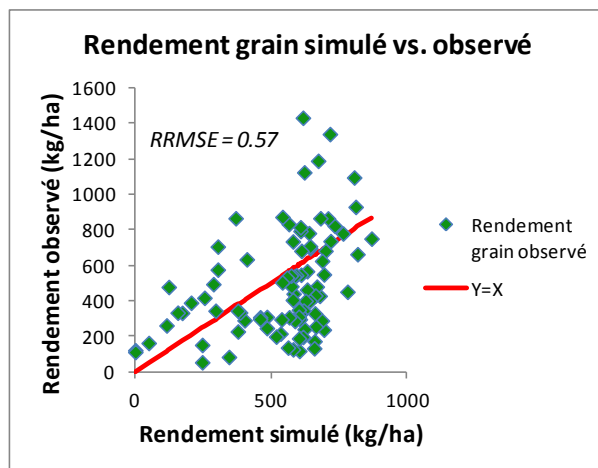


Figure 18 - Comparaison du rendement grain simulé avec les valeurs observées pour l'arachide

On observe des résultats similaires pour l'arachide : la biomasse est bien restituée par le modèle (RRMSE=25 %), en revanche les simulations ne restituent le rendement grain qu'avec une RRMSE de 57 %. Le modèle a légèrement tendance à la surestimation (cf tableau 7), en revanche l'efficacité n'est que de 23 % pour la biomasse et 8 % pour le grain, ce qui est très faible.

Tableau 7 - Indicateurs de performance du modèle CELSIUS pour les variables rendement biomasse (*Rdt Biomasse*) et rendement grain (*Rdt Grain*)

	Mil			Arachide		
	RMSE	Biais	Efficacité	RMSE	Biais	Efficacité
Rdt Biomasse	1271	-49	0.71	760	-142	0.23
Rdt Grain	491	-226	0.60	276	-53	0.08

### 3. Expérimentation virtuelle

#### i. Rendements simulés et écarts à l'historique à fertilisation constante

##### Combinaison des effets "pluie" et "températures" sur les rendements

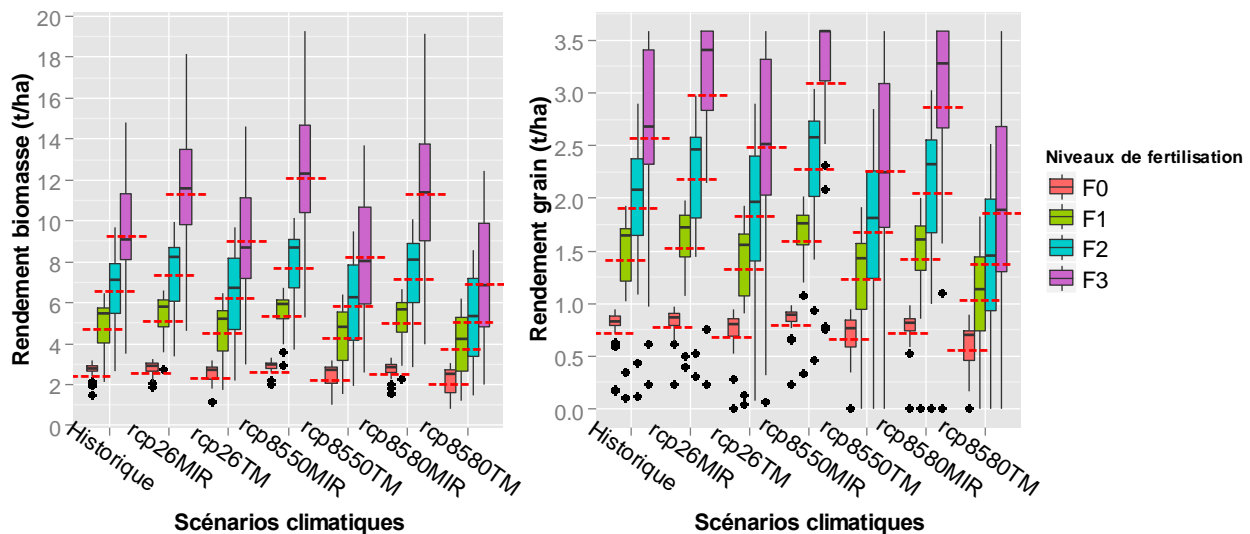


Figure 19 - Distributions de rendements biomasse totale et grain simulés pour le mil. Chaque "boxplot" représente la distribution des rendements simulés sur 30 années pour chaque scénario et niveau de fertilisation. La RU du sol est de 120 mm/m. F0, F1, F2, F3 : niveaux de fertilisation décrits dans le paragraphe II-4-ii.

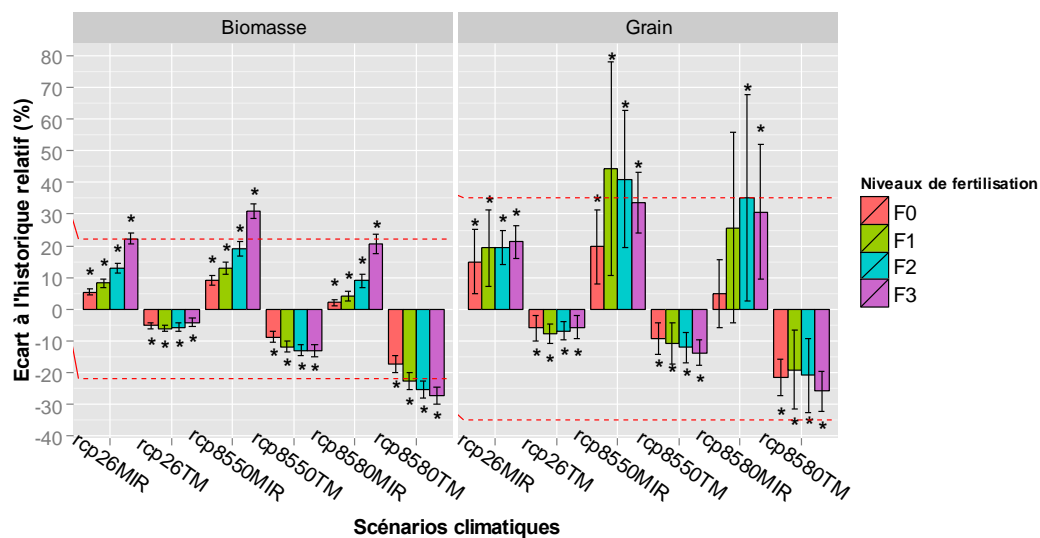
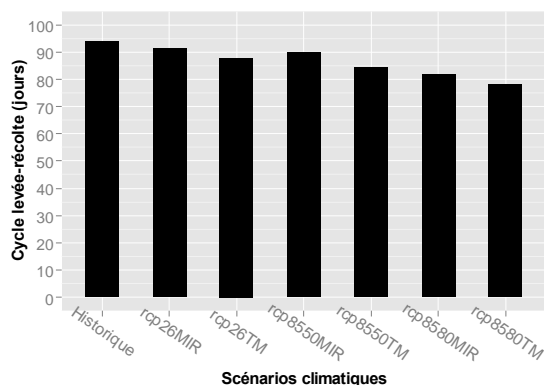


Figure 20 - Ecarts de rendements par rapport au scénario historique pour chaque scénario climatique futur à niveau de fertilisation égal entre futur et historique (RU=120mm/m). Les erreurs standard sont représentées pour chacune des moyennes, les pointillés indiquent la RRMSE du modèle pour les rendements biomasse et grain. Les étoiles indiquent que la série de rendements simulés correspondante est significativement différente de la série de rendements simulés historiques ( $\alpha=0.05$ ).

Pour chaque scénario, on observe des rendements ( $Y_{wn}$ ) croissants avec le niveau de fertilisation, quel que soit le scénario climatique (figure 19). Pour les projections de l'ensemble des modèles ("TM", ie scénarios rcp26TM, rcp8550TM et rcp8580TM), les rendements (biomasse et grain) moyens futurs sont significativement inférieurs aux rendements historiques ( $\alpha=0.05$ ) à niveau de fertilisation constant, et les écarts sont croissants entre ces trois scénarios, respectivement (figure 20). Les simulations réalisées avec les projections des modèles MIROC ("MIR") montrent des rendements (biomasse et grain) significativement supérieurs aux rendements simulés historiques pour les scénarios rcp26MIR et rcp8550MIR, l'écart de rendement grain n'est significatif que pour les deux modalités les plus fertilisées pour le scénario rcp8580MIR. La moyenne des rendements

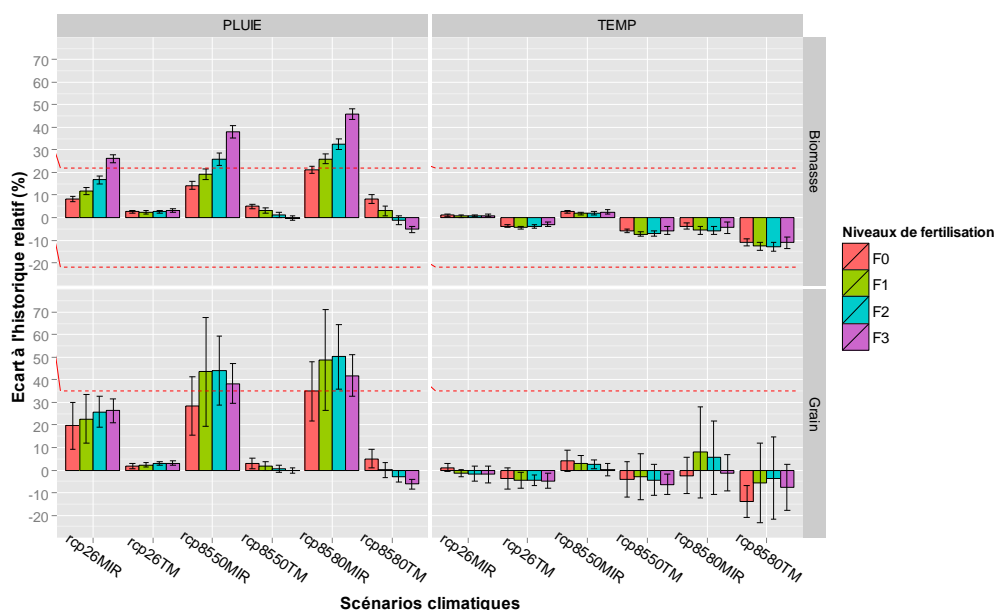
(biomasse et grain) simulés pour le scénario rcp8580MIR est inférieure à celle du scénario rcp8550MIR. La variabilité interannuelle des rendements simulés augmente de pair avec le niveau de fertilisation (figure 19), cette variabilité est plus importante dans les scénarios futurs TM que celle des simulations historiques pour le rendement grain. La valeur des écarts prédits pour chaque scénario climatique est systématiquement inférieure à la RRMSE du modèle pour la biomasse et le grain, à l'exception de la biomasse des scénarios rcp8550MIR-F3 et rcp8580TM-F2/F3.



**Figure 21 - Durée des cycles de la levée à la récolte du mil pour chaque scénario climatique.**

Les cycles de culture tendent à raccourcir avec l'augmentation des températures. L'effet augmente avec le temps (plus la période est lointaine plus le cycle est court) et le RCP (le RCP 2.6 prévoit des augmentations de températures plus faibles que le RCP 8.5). Les cycles sont légèrement plus longs dans les scénarios MIR par rapport aux scénarios TM pour chaque combinaison RCP/période.

### Distinction des effets "pluie" et "températures" sur les rendements



**Figure 22 - Ecarts de rendements par rapport au scénario historique pour chaque scénario climatique futur, à niveau de fertilisation égal entre futur et historique (RU=120mm/m). L'effet de la variation de pluie est représenté dans la colonne de gauche, l'effet de la variation de température dans la colonne de droite (corrections appliquées séparément aux scénarios futurs). Les pointillés rouges représentent la RRMSE du modèle.**

## Pluie

Les écarts sont légèrement positifs dans les scénarios rcp26TM (tous niveaux de fertilisation), rcp8550TM (F0 et F1) et rcp8580TM (F0 et F1). Pour la modalité F3, les rendements simulés décroissent légèrement dans le scénario rcp8580TM. L'effet pluie est plus important pour les scénarios MIR : les écarts moyens de rendement sont compris entre +10 % et +45 % pour la biomasse, +20 % à +50 % pour le grain, selon la fertilisation. Tous les écarts de rendement prédits par les scénarios TM restent cependant très faibles et leur valeur est inférieure à la valeur de RRMSE du modèle. Les scénarios rcp26MIR (biomasse), rcp8550MIR et rcp8580MIR pour les niveaux de fertilisation F3, F2/F3 et F1/F2/F3 respectivement ont des valeurs supérieures à l'erreur du modèle. Les simulations avec une RU de 80mm/m présentent des écarts à l'historique plus importants et plus variables (annexe 6).

## Température

Pour les scénarios TM les écarts de rendement biomasse prédits sont négatifs et s'aggravent entre les scénarios rcp26TM, rcp8550TM et rcp8580TM respectivement. L'effet température montre des écarts très faiblement positifs pour les scénarios rcp26MIR et rcp8550MIR, et l'écart est négatif pour le scénario rcp8580MIR. Les écarts de rendement grain sont sujets à de telles erreurs standards qu'il est difficile de pouvoir observer des tendances contrastées entre les scénarios.

### ii. Écarts à l'historique avec augmentation de la fertilisation

#### Combinaison des effets "pluie", "températures" et "fertilisation"

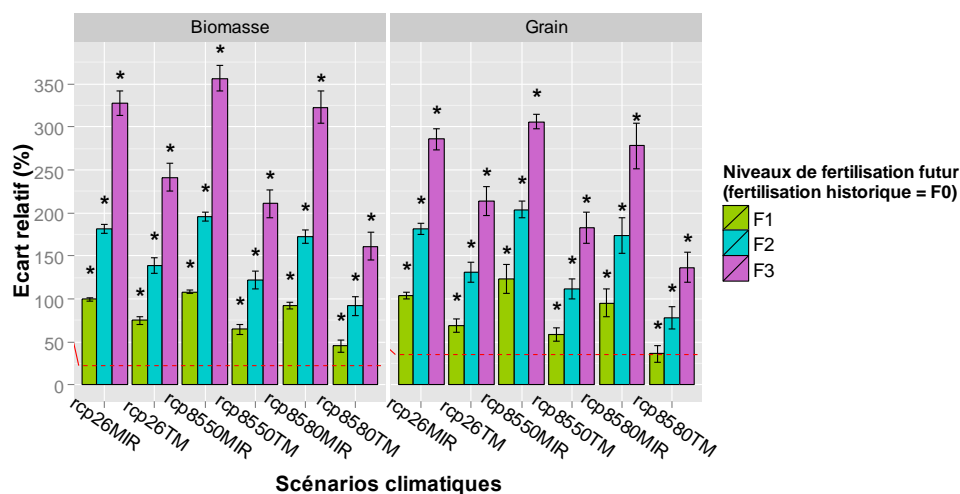


Figure 23 - Ecart de rendements simulé entre les scénarios futurs fertilisés F1, F2 et F3 et le scénario historique fertilisé F0 (RU=120mm/m). Les erreurs standard sont représentées pour chacune des moyennes, les pointillés indiquent la RRMSE du modèle pour les rendements biomasse et grain. Les étoiles indiquent que la série de rendements simulés correspondante est significativement différente de la série de rendements simulés historique ( $\alpha=0.05$ ).

Les écarts de rendement moyen prédits lorsque la fertilisation est plus élevée dans les scénarios futurs sont systématiquement positifs. Pour les scénarios MIR, l'écart augmente entre les scénarios rcp26MIR et rcp8550MIR, puis décroît pour le scénario rcp8580MIR. Les écarts de rendements simulés (biomasse et grain) décroissent entre les scénarios rcp26TM, rcp8550TM et rcp8580TM respectivement, mais la valeur la plus faible reste de l'ordre de 34 % pour le scénario rcp8580TM-F1. Excepté ce dernier scénario, toutes les valeurs des écarts sont supérieures à la valeur de la RRMSE du modèle.

## Effets des interactions "pluie x fertilisation" et "températures x fertilisation"

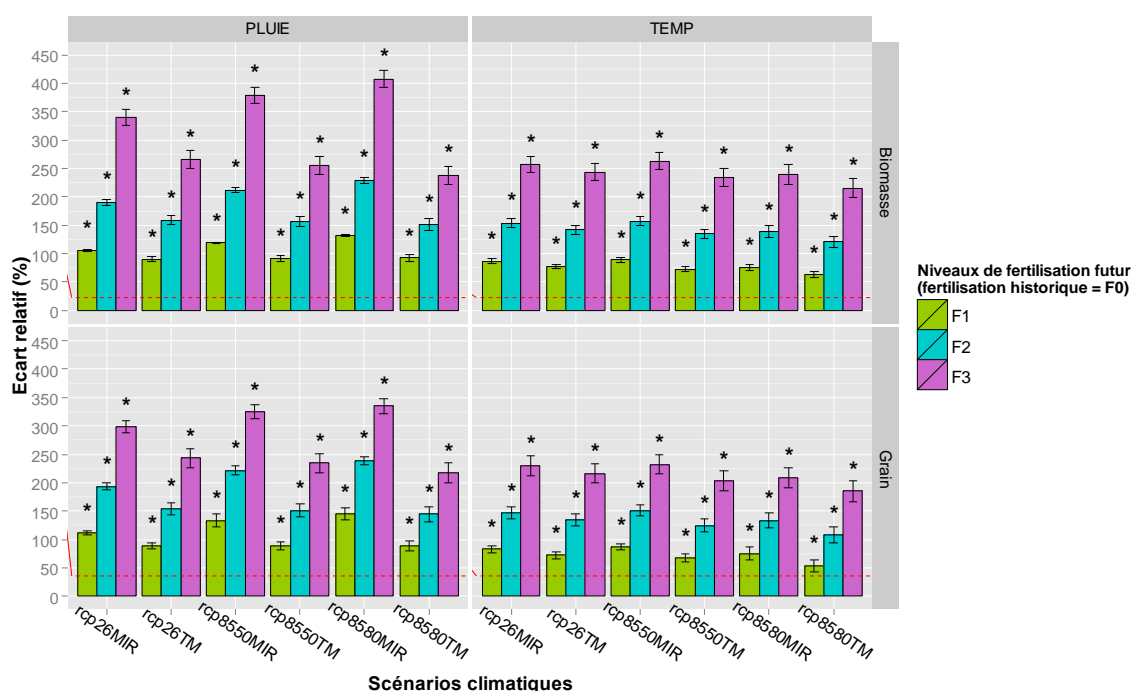


Figure 24 - Ecarts de rendements simulés entre les scénarios futurs fertilisés F1, F2 et F3 et le scénario historique fertilisé F0 (RU=120mm/m). Les erreurs standard sont représentées pour chacune des moyennes, les pointillés indiquent la RRMSE du modèle pour les rendements biomasse et grain. Les étoiles indiquent que la série de rendements simulés correspondante est significativement différente de la série de rendements simulés historique ( $\alpha=0.05$ ). L'effet de la variation de pluie est représenté dans la colonne de gauche, l'effet de la variation de température dans la colonne de droite (corrections appliquées séparément aux scénarios futurs).

### Pluie

L'écart de rendement biomasse et grain est le plus élevé pour les scénarios MIR, et croissant entre rcp26MIR, rcp8550MIR et rcp8580MIR respectivement. Les écarts prédits dans le scénario rcp8580MIR sont nettement plus élevés qu'avec la combinaison des effets pluie et températures. Les écarts sont non significativement différents entre les scénarios TM pour tous les niveaux de fertilisation.

### Températures

Les erreurs standards ne nous permettent pas de différencier les scénarios MIR et TM pour les écarts de rendements dus aux températures. Les écarts de rendement biomasse et grain sont identiques d'un scénario climatique à l'autre pour chaque niveau de fertilisation. Les écarts de rendement sont cependant plus faibles avec l'effet des températures seul, par rapport à l'effet pluie, et ce pour tous les scénarios et niveaux de fertilisation.



## IV. Discussion

### 1. Résultats commentés

#### i. Écarts à l'historique à fertilisation constante

##### **Rendements**

La distribution des rendements par scénario climatiques et niveau de fertilisation est représentée figure 19. Dans chaque scénario, l'augmentation du niveau de fertilisation entraîne systématiquement une augmentation des rendements moyens biomasse et grain, ce qui est cohérent avec de précédents travaux sur le sujet (Ministère de la Coopération et du Développement 1991; Affholder 1994).

Pour les scénarios TM, on observe systématiquement une baisse des rendements provoquée par la raréfaction des ressources pluviométriques et l'augmentation des températures (figure 20). Les écarts sont croissants entre les scénarios ce qui traduit bien l'effet du RCP et de la période temporelle ou les conditions climatiques s'aggravent avec le temps pour le RCP 8.5. Cependant, seul les rendements biomasse pour le scénario rcp8580TM montrent un écart significatif en comparaison avec l'erreur moyenne du modèle (RRMSE=0.23), il est donc difficile d'avancer des conclusions robustes pour les autres scénarios et le rendement grain. Les scénarios MIR témoignent quant à eux d'une augmentation systématique des rendements biomasse due à l'augmentation des pluies, mais les écarts prédits sont inférieurs à la RRMSE du modèle excepté pour le scénario rcp8550MIR-F3. Les écarts de rendement biomasse pour le scénario rcp8580MIR sont significativement inférieurs à ceux du scénario rcp8550MIR. Bien que l'augmentation des précipitations soit plus importante dans le scénario centré sur 2080, l'augmentation des températures provoque la baisse du taux de croissance du LAI lorsque la température excède un optimum ainsi que le raccourcissement des cycles de culture (figure 21), et par conséquent une croissance en biomasse plus faible (Hatfield et al. 2011) qui contrebalance le bénéfice lié à l'alimentation hydrique. Les écarts de rendements grain sont plus variables et parfois non significatifs, la formation et le remplissage des grains pouvant souffrir de mauvaises conditions climatiques pour un niveau de biomasse satisfaisant avant floraison.

##### **Variabilité des rendements**

La variabilité interannuelle des rendements biomasse et grain augmente avec le niveau de fertilisation pour chaque scénario et semble liée à l'alimentation hydrique des cultures : dans les scénarios MIR la variabilité des rendements grain est plus faible lorsque les pluies sont plus importantes. Affholder (1995, 1997) démontre qu'il existe un risque lié à l'intensification en agriculture pluviale dans un milieu semi-aride, car le gain de biomasse provoqué par la fertilisation génère une surconsommation des ressources hydriques par les cultures, pouvant épuiser plus rapidement les réserves si un épisode de sécheresse intervient. On remarque en parallèle que la variabilité interannuelle du rendement grain dans les scénarios TM est plus élevée que dans le scénario historique, avec l'accroissement du nombre de rendements nuls, et d'autant plus que le niveau de fertilisation est élevé. Il existe un risque à l'intensification de la fertilisation en contexte de changement climatique, lorsque les ressources pluvieuses se raréfient. La variabilité interannuelle des rendements biomasse dans les scénarios futurs ne semble pas augmenter par rapport à celle simulée dans le scénario historique.

## **Effets "pluie" et "températures"**

### *Pluie*

Les écarts légèrement positifs pour les rendements biomasse dans les scénarios TM sont probablement dus à la "fertilisation" induite par l'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, la baisse de précipitations n'étant visiblement pas suffisante pour provoquer la baisse des rendements (Lobell & Field 2007). L'effet est le plus fort pour les scénarios MIR, et le seul significatif au vu de la RRMSE du modèle : à température égale, l'augmentation de la ressource pluviométrique permet d'augmenter la croissance en biomasse. L'hypothèse d'un risque associé à l'intensification évoqué plus haut est confirmée ici par la modalité F3 du scénario rcp8580TM montrant un écart de biomasse négatif, ainsi que par l'incrément de rendement grain dans les scénarios MIR, soumis à une plus forte variabilité.

### *Températures*

Dans les scénarios TM, l'effet des températures est plus négatif que celui de la pluie pour le rendement biomasse, et la tendance à la baisse de rendements s'aggrave avec le RCP 8.5 et le long-terme car le réchauffement est d'autant plus fort (figure 24). L'inversion des écarts de rendement pour le scénario rcp8580MIR est probablement due à la forte hausse des températures, qui n'est pas suffisante dans les deux autres scénarios MIR pour provoquer à elle seule une baisse des rendements. Les écarts de rendement figure 24, plus faibles avec effet température qu'avec effet pluie, suggèrent également que l'effet des températures est le plus fort, comme précédemment remarqué par Lobell & Field (2007) et Roudier et al. (2011). Les erreurs standards sur les moyennes des écarts de rendements grain ne permettent pas d'observer des tendances.

## **ii. Ecarts à l'historique avec augmentation de la fertilisation**

Les écarts de rendement -figure 23- sont systématiquement positifs quel que soit le scénario climatique futur lorsque l'on augmente le niveau de fertilisation par rapport à un niveau historique très faible, similaire aux pratiques actuelles. L'effet négatif du changement climatique se perçoit dans les scénarios TM car l'écart de rendement (biomasse et grain) décroît du RCP 2.6 au RCP 8.5, ainsi qu'entre les périodes "2050" et "2080". Pour les scénarios MIR, l'écart de rendement augmente avec le niveau de précipitations, mais l'effet des températures pour le scénario rcp8580MIR contrebalance cet effet (cf plus haut). Cette hypothèse est confirmée figure 24, où le scénario rcp8580MIR montre un rendement encore croissant lorsque l'effet des températures est absent.

On ne distingue pas de différences entre les scénarios TM et MIR pour l'effet des températures, car les deux ensembles de modèles prédisent des augmentations du même ordre de grandeur. Concernant l'effet pluie, l'écart décroît (significatif pour les modalités F2 et F3) entre les scénarios rcp26TM, rcp8550TM et rcp8580TM car la ressource en eau se raréfie et les cultures sont fertilisées.

L'augmentation des niveaux de fertilisation, même lorsqu'elle est faible (F1) produit une augmentation des rendements  $Y_{wn}$  et ce dans un contexte de changement climatique et de dégradation des conditions climatiques notamment. Les écarts prédits sont tous supérieurs à l'erreur du modèle, pour la biomasse comme pour le grain. Les études présentées dans la plupart des publications analysent l'impact du changement climatique sur les rendements  $Y_w$ , pourtant très éloignés des rendements réels obtenus par les agriculteurs, et la perspective d'évolution de l'accès aux intrants pour les agriculteurs n'est pas souvent étudiée (Roudier et al. 2011; Sultan et al. 2013; Sultan et al. 2014). La simulation des rendements  $Y_{wn}$  dans cette étude permet de simuler des

rendements moins éloignés de la réalité du terrain, et une possible évolution des systèmes de culture a été prise en compte.

### **iii. Scénarios climatiques**

Il est important de rappeler ici que le fait d'ignorer l'erreur moyenne de chaque modèle climatique utilisé dans l'étude ne permet pas de considérer que leurs projections individuelles sont robustes. Le fait d'utiliser des projections moyennes à partir d'ensembles constitués de plusieurs modèles permet de s'affranchir de ces erreurs individuelles, en considérant qu'elles se compensent d'un modèle à l'autre (Martre et al. 2014). Cependant, les ensembles de modèles peuvent se tromper, y compris lorsque tous les modèles simulent les mêmes tendances. Les erreurs standards liées aux moyennes des anomalies de températures sont très faibles dans cette étude (figure 7), les modèles semblent tous s'accorder sur l'augmentation des températures dans les scénarios futurs. Les anomalies sont en revanche différentes d'un scénario (RCP/période future) à l'autre : le RCP 2.6 montre les anomalies les plus faibles et qui se stabilisent dans le temps (+1-1,5 °C), le RCP 8.5 fait état d'une augmentation plus forte sur la période centrée sur 2050 (+2-2,5 °C), qui s'aggrave avec le temps (+3 à +4,5 °C selon le mois pour la période centrée sur 2080).

Concernant les pluies, les tendances peuvent correspondre à la prévision d'un décalage de la saison des pluies, avec une baisse des précipitations en début d'hivernage et une augmentation plus tardive, comme remarqué par Sultan et al. (2014). Les anomalies de précipitation prédites par les modèles de climat témoignent d'une plus forte variabilité entre les projections (dispersion entre les modèles) comparé aux prédictions de températures (cf erreurs standards sur les moyennes figure 8). Les phénomènes climatiques liés aux précipitations semblent plus difficile à prévoir par les modèles.

## **2. Retour sur la méthode**

### **i. Fiabilité des modèles de climat**

L'élaboration des scénarios climatiques futurs a été réalisée à l'aide de moyennes directement fournies par Benjamin Sultan (UM LOCEAN, IPSL). La RRMSE des modèles climatiques utilisés pour les projections ainsi que les intervalles de confiance pour les variables historiques simulées par ces modèles ne sont pas connus dans cette étude. Il serait intéressant d'obtenir ces informations afin de juger de la confiance à accorder aux modèles climatiques.

En comparant les simulations de précipitations réalisées sur la période historique avec les données observées dans les stations météorologiques sur la même période (annexe 2), on remarque que plusieurs de ces modèles élaborent des prévisions erronées et parfois très éloignées des valeurs observées, ce qui pose encore une fois la question de la confiance à accorder à ce type de prévisions. Afin de pouvoir élaborer des scénarios probables, une stratégie commune dans les études d'impact du changement climatique consiste à considérer un ensemble composé d'un grand nombre de modèles climatiques (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Groupe de travail I) 2013). La moyenne des projections est utilisée plutôt que les projections des modèles isolés, en calculant et analysant également les erreurs standards et/ou intervalles de confiance sur ces moyennes. La variabilité des projections entre les modèles représente alors le niveau d'incertitude sur la prédiction du changement climatique (Semenov & Stratonovitch 2010). Cependant, une telle stratégie peut être questionnée, notamment car l'incertitude sur les prévisions dépend pour beaucoup de l'ensemble de modèles utilisé. Les aléas climatiques dépendent de phénomènes physiques comme la convection (déplacement vertical des particules selon des gradients de températures) ou l'advection des masses d'air, de la chaleur ou de la vapeur d'eau par

exemple (déplacement horizontal), et ces phénomènes sont pris en compte de manière différente d'un modèle à l'autre (B.Sultan, communication personnelle). Lorsque les formalismes d'un ou plusieurs modèles de climat utilisé(s) pour calculer ces moyennes ne sont pas adaptés à la région d'étude, ou si certains phénomènes physiques déterminants sont négligés dans le fonctionnement du modèle climatique, pourquoi les inclure dans l'analyse et la moyenne ? La performance de certains modèles dépend également de la méthode permettant de régler la fenêtre géographique sur laquelle les calculs sont effectués (B.Sultan (communication personnelle), Asseng et al. (2013), Semenov & Stratonovitch (2010)). La fenêtre "Sénégal" utilisée ici n'est probablement pas adaptée à tous les modèles de l'ensemble, qui possèdent probablement des niveaux de résolution spatiale variés (Semenov & Stratonovitch 2010). Enfin, la modélisation par ensembles de modèles reflète relativement mal l'erreur de chaque modèle : les erreurs standards représentées correspondent à la variabilité des projections entre les modèles (cf figures 7 et 8), et l'erreur individuelle des modèles est souvent masquée par cette approche, ce qui peut être gênant pour avoir une idée du niveau de confiance à accorder aux modèles et leurs prédictions. Il serait donc intéressant d'analyser les formalismes des modèles climatiques avant l'expérimentation virtuelle afin de n'utiliser que des modèles *ad hoc* pour représenter le climat de la zone d'étude.

Une méthode souvent utilisée dans des études d'impact du changement climatique sur les rendements des cultures (Reinares Martinez 2014; Sultan et al. 2014; Sultan et al. 2013) consiste à utiliser directement les projections climatiques établies par les modèles pour les périodes historiques et futures, et de i) réaliser des simulations de rendement pour chaque projection, ii) calculer la moyenne des rendements simulés, et iii) calculer les écarts "rendement futur-rendement historique" ensuite. Or il est possible d'observer, avant de simuler des rendements à l'aide d'un modèle de culture, qu'un ou plusieurs modèle(s) climatique(s) simule des variables historiques très erronées (voir plus haut). Réaliser des simulations de cultures basées sur les projections de ce(s) modèle(s) climatiques n'a alors pas de sens pour le scénario historique, et la prise en compte de la valeur du rendement issu de cette simulation peut fausser l'étude d'impact. Dans cette étude, les écarts "futur-historique" moyens prédits par les modèles de climat pour les températures et précipitations ont été calculés avant de réaliser l'expérimentation virtuelle sous CELSIUS, puis appliqués aux données historiques enregistrées en station afin de créer des scénarios climatiques plus robustes et réalistes *a priori*.

La variabilité climatique interannuelle n'a pas été modifiée dans les scénarios futurs, mais n'est cependant pas absente dans les simulations : elle correspond à celle des observations historiques entre 1971 et 2000 à la station de Bambey, les variables *pluie*, *tmax* et *tmin* ont été corrigées par les anomalies prédites par les modèles de climat (les conditions climatiques sont parfois plus extrêmes). Il aurait été intéressant d'étudier l'évolution de la variabilité climatique (occurrence de vagues de chaleur, inondations, courtes sécheresses ponctuelles...) pour évaluer les impacts du changement climatique sur les rendements. Cependant, aucune étude ne permet de penser que les modèles de climat actuels permettent de telles projections (Sultan et al. 2013). De plus, les anomalies permettant de corriger les données climatiques historiques sont des moyennes calculées pour chaque ensemble de modèles considéré (ie TM et MIROC) : l'information sur la variabilité des projections entre les modèles n'a pas été conservée. Cette variabilité est relativement faible pour les températures (figure 7), mais est plus importante pour les précipitations (figure 8). La seule variabilité conservée dans l'étude correspond à la variabilité interannuelle des séries de données climatiques observées (historiques, voir plus haut) ainsi que les variations des prédictions d'un scénario à l'autre.

Enfin, les anomalies utilisées pour la genèse des scénarios climatiques futurs ont été calculés au pas de temps mensuel et appliqués aux variables historiques au pas de temps journalier : il serait plus pertinent de ne travailler qu'avec des données journalières, afin de mieux représenter la variabilité climatique (sécheresses ponctuelles et vagues de chaleur notamment). Semenov & Stratonovitch (2010) soulignent cependant la difficulté des modèles climatiques globaux à reproduire des variables telles que les précipitations et températures au pas de temps journalier (résolution spatiale relativement grossière). L'effet des vagues de chaleur ne peut pas être étudié par cette méthode (voir début du paragraphe), mais la séparation des températures minimales et maximales offre néanmoins la possibilité d'analyser séparément leurs effets respectifs, concernant parfois des processus distincts (hautes températures vs développement, formation/destruction des grains, températures minimales vs respiration carbonée (Lobell & Field 2007)). L'analyse séparée de l'effet des températures minimales ou maximales n'a cependant pas été réalisée dans cette étude et pourrait permettre de détailler plus finement les conséquences du CC sur les rendements.

## **ii. Paramétrage et performances du modèle**

### **Paramétrage**

Le calage des paramètres liés au bilan hydrique et à la formation du LAI est satisfaisant (voir figures 12, 13 et 14 et annexe 4). Certains points de LAI sont cependant mal simulés par le modèle : dans le cas du mil il peut parfois s'agir d'erreurs de mesures sur le terrain, comme figure 12, ou la dernière mesure de LAI est supérieure aux trois précédentes bien que le LAI ne croisse plus une fois le processus de sénescence commencé. Les autres erreurs sont dues à l'imprécision du modèle, mais les valeurs simulées sont proches des observations. Pour l'arachide, le stock hydrique est surestimé en fin de cycle car le modèle simule une sénescence jusqu'à un LAI nul. La surestimation du stock hydrique en fin de cycle peut ainsi conduire à une sous-estimation du stress hydrique et une surestimation du rendement grain. En situation réelle, la plante transpire jusqu'à la récolte car son feuillage n'est pas entièrement réduit par la sénescence, ce qui pourrait être amélioré dans le modèle pour mieux simuler le rendement.

### **Performance du modèle**

Les objectifs de ce travail consistaient en l'étude du changement climatique au Sénégal et ses effets sur les rendements du mil et de l'arachide. Tous les objectifs n'ont pas pu être atteints : les RRMSE pour les rendements du mil (biomasse et grains) sont assez faibles, et ont permis de réaliser l'expérimentation virtuelle pour cette espèce. Cependant, cette valeur de RRMSE est à comparer systématiquement avec les résultats, car toute variation inférieure à cette erreur pourrait être due au modèle lui-même et non aux modalités de l'expérimentation. Concernant l'arachide, le paramétrage n'a pas été satisfaisant pour simuler des rendements grain et réaliser l'expérimentation virtuelle pour cette espèce. La simulation de la biomasse totale montre de meilleurs résultats (RRMSE = 25 %), mais le grain étant compris dans le calcul de cette biomasse, nous avons préféré ne pas prendre en compte cette espèce dans l'analyse étant données les imprécisions du modèle CELSIUS à ce stade de sa construction.

## **3. Perspectives**

### **i. Fertilisation et intensification écologique**

Cette étude a montré qu'à niveaux de fertilisation constants, le changement climatique présentait un risque de diminution des rendements du mil dans les scénarios futurs, lorsque les précipitations diminuaient. Cependant, les quantités de fertilisants utilisés dans les cultures sénégalaises sont

actuellement très faibles, de même que le niveau de développement de l'agriculture plus généralement (Poeydebat et al. 2013; FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) 2014). Le pays est fortement susceptible de se développer d'ici 2050 et 2080, et d'offrir à ses agriculteurs plus de moyens de production. Dans ce cas, la présente étude suggère que les rendements du mil sont plutôt susceptibles d'augmenter, et de manière considérable. Il ne s'agit pas ici de promouvoir une utilisation abusive d'intrants chimiques, conduisant aux désastres environnementaux constatés dans des pays aujourd'hui plus développés, mais de constater qu'une légère augmentation de leur utilisation permettrait d'augmenter les rendements des paysans, et leur permettre d'accéder à des revenus plus décents. Dans le cas du mil, le modèle a été paramétré dans le scénario le plus fertilisé avec une utilisation de 83 kgN.ha<sup>-1</sup> : cette quantité reste encore bien inférieure aux quantités moyennes utilisées dans un pays comme la France (FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) 2014), et les risques écologiques (lixiviation notamment) liés à ce niveau de fertilisation semblent limités. Une fois leurs moyens de production améliorés, les paysans seraient alors plus facilement capables d'expérimenter et mettre en place des techniques agroécologiques (mulching, associations de cultures, SCV...) quitte à diminuer leurs rendements dans des phases transitoires, ce que la plupart ne peuvent se permettre aujourd'hui (Rusinamhodzi et al. 2011; Affholder et al. 2014).

Enfin, l'augmentation de la variabilité des rendements avec l'intensification des systèmes de culture (Affholder 1995; Affholder 1997) pose la question du risque économique pris par les agriculteurs à adopter de nouvelles pratiques. L'accès à l'éducation, à une alimentation saine et équilibrée, aux loisirs, étant permis par le revenu de la famille, il est indispensable d'étudier l'ensemble des composantes économiques déterminant le revenu net des exploitants agricoles : les rendements, mais également les prix des productions et leur volatilité sur le marché, l'accès aux intrants (prix et disponibilité), les politiques de soutien financier (subventions, (micro)crédits)...la modélisation à l'échelle des exploitations et/ou systèmes alimentaires est donc nécessaire pour quantifier l'impact du changement climatique sur l'évolution des revenus des agriculteurs, et de leurs conditions de vie plus largement.

## **ii. De nouveaux cultivars adaptés au changement climatique ?**

L'expérience virtuelle a permis de suggérer que la diminution de la durée du cycle du mil, due à la hausse des températures dans les scénarios futurs, pouvait être une des causes de la baisse des rendements. Ce constat est également établi dans de récentes études sur le sujet (Hatfield et al. 2011; Roudier et al. 2011; Sultan et al. 2013; Sultan et al. 2014). Deux possibilités d'amélioration végétale semblent permettre de contrer l'effet négatif des températures sur le développement des plantes : l'allongement des cycles des variétés, et la réintroduction de la photosensibilité chez les variétés. L'allongement des cycles des cultivars permettrait de compenser un raccourcissement du cycle induit par la hausse des températures (Michel Vaksman, communication personnelle), et ainsi de maintenir une production de biomasse permettant d'éviter la baisse des rendements. Cependant, la forte variabilité climatique à laquelle est sujet le Sénégal, notamment en terme de pluviométrie et de démarrage de la saison des pluies (Marteau et al. 2011), pose la question de la plasticité phénotypique des variétés utilisées. En effet, une saison des pluies et un semis précoces présentent le risque d'une maturation trop précoce des grains (mils, sorghos), sujets alors à des moisissures ou attaques d'oiseaux, tandis qu'un semis tardif présente un risque de stress hydriques trop importants en phase de maturation des grains (Traoré et al. 2001; Kouressy et al. 2008; Vaksman et al. 2008; M.Vaksman communication personnelle). Le caractère de photosensibilité, éliminé par la sélection de cultivars modernes à cycles courts (Vaksman et al. 1996; Traoré et al. 2001; M. Kouressy et al. 2008) permet cette plasticité phénotypique, en synchronisant la floraison

avec la fin de la saison des pluies (date de floraison à environ 20 jours avant la fin des pluies) (Mamoutou Kouressy et al. 2008; Vaksman et al. 2008, M.Vaksman communication personnelle). Dans des simulations de changement climatique et d'augmentation des températures, Sultan et al. (2013), montrent que la production de biomasse est moins affectée chez les variétés traditionnelles photosensibles par rapport aux cultivars modernes. Ces deux caractères (cycles plus longs et photosensibilité) devraient ainsi être travaillés par les sélectionneurs afin de proposer aux paysans des variétés performantes capables de s'adapter au changement climatique dans le futur (températures et variabilité).

### iii. Le modèle CELSIUS

Les données issues des essais en station en conditions contrôlées (fertilisation, irrigation, désherbage, traitements) n'étaient pas assez nombreuses pour disposer de données fiables pour le paramétrage du modèle (variables manquantes, faible nombre d'années dans les données de TACSU). Les résultats du calage de l'arachide présentés dans cette étude ont été obtenus grâce à des données de milieu paysan relevées par différents expérimentateurs, et pose la question de la confiance à accorder aux paramètres utilisés lors du calage : pas de mesure des réserves utiles ou profondeurs de sol au champ, distinction des grains sains destinés à la vente ou grains totaux absente dans les mesures (rendements, comptages), imprécisions quant aux interventions culturales, possible réduction des rendements dues à des facteurs non relevés sur le terrain (maladies, attaques fongiques sur les grains...). Les mesures de nombre de grains sur des années climatiques variées sont pourtant déterminantes pour caler les paramètres de formation du nombre de grain ( $C_{grain}$  et  $C_{grainV0}$  en fonction de  $Vit_{moy}$ , équation n°17), et le modèle est très sensible à la variation de ces paramètres. L'arachide est la première production (en valeur) du pays (FAO 2014), source principale de revenu pour les agriculteurs (Ndiaye 2007; Service Economique Regional pour l'Afrique de l'Ouest 2013) et son rôle est important dans les rotations pour son effet fertilisant (engrais chimiques coûteux) : l'évaluation de l'impact du changement climatiques pour cette culture implique d'obtenir plus de données issues de stations expérimentales (où les rendements obtenus sont plus susceptibles de s'approcher des rendements  $Y_w$  et  $Y_{wn}$ ) et sur une large gamme d'années (conditions climatiques variées), afin de paramétrer correctement le modèle.

Certains formalismes utilisés dans le modèle pour l'élaboration du rendement sont également à améliorer. Le modèle sépare les phases de détermination du nombre de grains et de remplissage des grains : dans le cas des plantes à développement indéterminé comme l'arachide, il est très probable que la formation de nombre de grains se poursuive parallèlement au remplissage des premiers grains formés. A la récolte, certains grains peuvent avoir été formés sans que le remplissage ne se soit terminé, et cela n'est pas simulé par CELSIUS. Un paramètre du modèle,  $Nbj_{grain}$ , correspond au nombre de jours avant début de remplissage pendant lesquels le nombre de grains se forme : cette durée est donc indépendante du temps thermique d'après le modèle, ce qui n'est pas cohérent avec les autres formalismes de développement (stades phénologiques) et pose problème dans la prise en compte de l'impact de la température sur les rendements.

Actuellement, l'hivernage est assez homogène quant à la répartition des précipitations le long de la saison, cependant les observations de Salack et al. (2011) témoignent de l'augmentation de l'occurrence d'événements climatiques extrêmes et ponctuels en Afrique de l'Ouest comme les sécheresses ponctuelles ou vagues de chaleur, et la probable augmentation de la variabilité climatique future est souvent évoquée comme un facteur climatique déterminant pour les rendements dans les études publiées (Sultan et al. 2013; Eyshi Rezaei et al. 2014). Le paramétrage du rendement  $Y_{wn}$  pour l'arachide a montré que le modèle restituait mal les très faibles rendements

en cas de forte sécheresse (cf nuage de point en dessous de la droite  $Y=X$  figure 18). La réponse du modèle de culture à des événements de vagues de chaleur ou sécheresses ponctuelles pourrait être améliorée par une meilleure prise en compte de l'incidence de ces événements climatiques sur les rendements.

La nutrition azotée pour les fabacées fait également partie d'un des points d'amélioration du modèle. Le bilan minéral est réalisé sur l'ensemble de la saison, et non au pas de temps journalier, et le paramètre  $N_{symb}$  indiquant la quantité d'azote fixée par la symbiose bactérienne sur l'ensemble de la saison doit être renseigné en amont des simulations. La fixation biologique de  $N_2$  dépend de l'humidité du sol et donc des précipitations, de la teneur en azote minéral du sol, le taux d'azote provenant de la fixation pouvant varier de 70 % en année humide à moins de 45 % en année sèche (Wetselaar & Ganry 1982). Définir une valeur fixe et unique pour l'azote symbiotique avant de réaliser les simulations risque de mal représenter l'effet de stress hydriques sur l'efficacité de la fixation symbiotique. Une amélioration consisterait à modifier la prise en compte de la fertilité azotée par un calcul journalier de l'azote fourni par la fixation de  $N_2$ , en modulant cette variable en fonction de l'humidité du sol et du stock en azote minéral du sol. D'autre part, des simulations réalisées sur l'arachide ont suggéré que la culture répondait bien aux apports d'engrais chimiques "NPK". Une analyse de variance réalisée avec les données de la station de Bambey a pourtant montré que la plante ne répondait pas aux différentes doses de fertilisation apportée dans les essais (annexe 8), ce qui questionne une fois de plus la pertinence d'un bilan saisonnier pour simuler la nutrition azotée de cette espèce. La minéralisation de la matière organique ou la dissolution des granulés de fertilisants de synthèse étant également dépendants des conditions hydriques, tout le bilan azoté pourrait être pris en compte au pas de temps journalier dans une perspective d'amélioration du modèle.

D'autres perfectionnements pourraient être réalisés pour améliorer les performances de CELSIUS. Pour évaluer l'effet de pratiques agroécologiques (ex : mulching) la prise en compte de la lixiviation des nitrates, susceptible d'augmenter lorsqu'on augmente l'infiltration de l'eau dans les sols, pourrait être ajoutée. Il faudrait également améliorer les formalismes de CELSIUS et notamment la formation du nombre de grains pour les plantes indéterminées, et faire en sorte qu'une sécheresse ponctuelle bloque cette formation. Il est important également de prendre en compte l'effet direct des hautes températures sur la phase reproductive de la plante (Hatfield et al. 2011). La viabilité du pollen et la fécondation peuvent aussi être perturbés par des hautes températures, et le modèle n'est actuellement pas conçu pour simuler ces processus, pourtant déterminants pour le mil (allogame) dans un contexte de réchauffement climatique. L'arrêt de la formation des grains ou la destruction des grains post-formation par des hautes températures sont des processus qu'il serait pertinent d'intégrer au modèle pour l'étude du changement climatique.

#### **iv. Modélisation climatique**

Une solution instinctive pour n'utiliser que des modèles climatiques adaptés à la zone d'étude consisterait à n'utiliser que des modèles proches des observations sur une période historique. Il serait intéressant de calculer les anomalies prédites par l'ensemble des 7 modèles les plus proches des observations historiques (cf partie III.1.ii) afin de créer un scénario spécifique. Cela permettrait d'analyser les anomalies climatiques prédites par un ensemble de modèles fiables sur la période historique, incluant un nombre plus élevé de modèles (par rapport à l'ensemble MIR) afin de limiter les erreurs individuelles potentielles et favoriser les compensations éventuelles entre modèles. Ceci n'a pas été fait dans cette étude, mais des modèles contrastés par rapport à la tendance générale (MIROC) ont été sélectionnés, et la comparaison des moyennes avec les



observations en station a montré qu'ils étaient également les plus proches des observations sur la période historique. Parallèlement aux comparaisons de moyennes, il serait pertinent de comparer la variabilité interannuelle observée (cf erreurs standard sur la moyenne, figure 10) avec la variabilité interannuelle simulée par chaque modèle afin de juger la qualité d'un modèle pour restituer un climat historique.

Cependant il est important de garder à l'esprit que la fidélité d'un modèle par rapport à des projections climatiques historiques n'engage en rien sa capacité à réaliser des projections futures fiables (Asseng et al. (2013), B.Sultan, communication personnelle). De même, une grande quantité de modèles prédisant une même tendance ne signifie pas qu'elle est vraie (ils peuvent tous omettre un phénomène physique déterminant pour la zone géographique étudiée). Cela pose la question de la méthode d'évaluation de la qualité d'un modèle ou ensemble climatique et sa capacité à prédire de la manière la plus réaliste possible un climat futur. L'utilisation d'ensembles de modèles semble être la solution jugée la moins risquée par les climatologues pour réaliser de telles projections (compensations entre modèles), en considérant la variabilité des prédictions entre les modèles comme reflétant l'incertitude sur le climat futur.

Afin de conserver la variabilité entre les prédictions des modèles de climat utilisés dans cette étude, la méthode des anomalies utilisée dans cette étude pourrait être réalisée pour chaque modèle individuellement. Les scénarios futurs (RCP-période) seraient ainsi prédits par chacun des modèles climatiques, et la variabilité entre les modèles serait alors conservée.

Enfin, il serait important, avant de réaliser des simulations climatiques, d'analyser le(s) modèle(s) de culture dans le détail afin de mettre en évidence les processus auxquels il(s) est(sont) le plus sensible(s) et les variables climatiques fortement liées à ces processus. Cela permettrait de sélectionner uniquement des modèles climatiques capables de bien restituer ces variables dans des scénarios de climats futurs, améliorer la réponse du(des) modèle(s) de culture à ces climats et ainsi affiner l'étude d'impacts du changement climatique sur les cultures. De même, il est possible, connaissant les variables climatiques bien simulées par un ou plusieurs modèles de climat, de choisir un ou plusieurs modèles de culture dont les formalismes traduisent bien les variations de ces variables météorologiques.

#### **v. Vers des ensembles de modèles agronomiques ?**

Dans cette étude, des ensembles de modèles ont été utilisés pour l'élaboration des scénarios climatiques, mais un unique modèle de culture a permis de réaliser les simulations de culture. Une tendance relativement récente consiste à réaliser des simulations de culture à l'aide d'ensembles de modèles (Asseng et al. 2013). Les auteurs de ce type d'étude montrent que ces ensembles peuvent parfois restituer de meilleures estimations que les modèles individuels (Martre et al. 2014). Une telle analyse pourrait être envisagée dans le cadre de cette étude, afin de comparer les résultats issus des deux méthodes de simulation et observer si les résultats et leur robustesse diffèrent, néanmoins ce type d'approche présente quelques limites qu'il serait intéressant de discuter.

Les ensembles utilisés dans de récentes études (Asseng et al. 2013; Martre et al. 2014) contiennent des modèles conçus pour des environnements pédoclimatiques très variés : cela questionne la pertinence d'utiliser un modèle de culture dans un environnement pour lequel il n'a pas été conçu, et tout particulièrement pour des conditions climatiques relativement extrêmes et très variables (environnement sahélien par exemple). Asseng et al. (2013) démontrent que la dispersion entre les modèles de culture est plus faible lorsque l'ensemble utilisé est réduit aux modèles les plus performants dans un environnement donné. Une autre question concerne les processus simulés par chacun des modèles des ensembles : quid de la pertinence de l'utilisation d'un ensemble de

modèles dans une étude, si certains des modèles omettent des processus clé pour cette étude ? Cette question est importante pour les études d'impacts du changement climatique sur l'agriculture, car l'anticipation du changement implique d'explorer le plus finement possible les processus affectés dans le développement des cultures et l'élaboration des rendements, pour être en mesure de proposer des adaptations. Pour les études de changement climatique et d'adaptation des pratiques, Martre et al. (2014) soulignent l'importance d'améliorer les modèles de culture pour les processus intermédiaires menant au rendement, ce qui tend vers une vision relativement mécaniste et générique de la modélisation de culture. D'autres auteurs conseillent l'utilisation de modèles *ad hoc* conçus en fonction des objectifs de chaque étude (Sinclair & Seligman 1996; Affholder et al. 2012), et remettent en question cette vision mécaniste de la modélisation agronomique.

Il est difficile d'imaginer que tous les concepteurs de modèles de culture investissent le temps et l'argent pour construire des modèles génériques et performants dans tout type d'environnement en vue d'utilisations par ensembles de modèles. La conception de modèles adaptés, conçus spécifiquement pour un faible nombre de cultures, et performant dans un type d'environnement propre à chacun, reste peut-être encore la meilleure solution pour étudier les impacts du changement climatique et les adaptations possibles, à condition d'investir suffisamment dans le travail de paramétrage de ces modèles.

## Conclusion

L'étude du climat à l'aide d'ensembles de modèles climatiques est une méthode similaire à celle employée par le GIEC lors de l'élaboration de ses rapports d'évaluation sur le changement climatique. Les erreurs de prédiction propres à chaque modèle de climat utilisé dans cette étude n'ont pas été prises en considération (information non disponible), c'est la variabilité des prédictions entre les modèles qui a été représentée. La méthode ayant permis de générer des scénarios climatiques futurs semble moins risquée que celle utilisant des climats directement projetés modèle par modèle, car elle évite de réaliser des simulations de cultures avec des climats historiques erronés. Cette méthode a permis ici de suggérer des tendances climatiques plausibles à partir de données météorologiques observées. Les projections liées aux augmentations de température dans des scénarios futurs sont homogènes entre les modèles de climat (+1 °C à +4 °C selon les scénarios). En revanche l'incertitude est plus grande quant aux prévisions de précipitations, qui reste le phénomène le plus variable et le plus difficile à prévoir par les modèles de climat.

Le paramétrage du modèle pour étudier l'impact du changement climatique sur les rendements biomasse et grain a été satisfaisant pour le mil, comme le témoignent les indicateurs de performance du modèle. En revanche, il existe encore trop d'incertitudes autour du paramétrage de l'arachide et des données ayant servi à le réaliser. Cela souligne l'importance de réunir une plus grande quantité de données de qualité pour réaliser un bon paramétrage pour cette culture, principale source de revenu des agriculteurs sénégalais et première production en valeur du pays. D'autres travaux sont nécessaires afin de poursuivre la construction du modèle CELSIUS et le rendre capable d'envisager des scénarios d'intensification agroécologique dans les simulations (mulching, TCS, associations d'espèces...).

A niveaux de fertilisation égaux entre période historique et future, la combinaison de l'augmentation des températures et de la raréfaction des précipitations suggère une tendance à la baisse des rendements (biomasse et grain) du mil. La température a la plus grande responsabilité dans ce constat. Lorsque les pluies augmentent, l'effet est inverse et les rendements simulés  $Y_{wn}$  futurs sont supérieurs aux valeurs historiques simulées. Cependant, les variations de rendement prédites par le modèle sont souvent de même ordre de grandeur que l'erreur moyenne du modèle de culture, ce qui rend ces conclusions peu robustes, d'autant que l'on ne prend pas ici en compte l'erreur inhérente aux modèles de climat qui augmenterait l'erreur totale des modèles "couplés". Lorsque la fertilisation est plus forte dans les scénarios futurs, les rendements simulés  $Y_{wn}$  du mil (biomasse et grain) augmentent systématiquement, et les variations prédites sont largement supérieures à l'erreur moyenne du modèle dans la grande majorité des cas. En l'état actuel des capacités prédictives des modèles de climat et de culture, les variations de rendement qui pourraient résulter du changement climatique, positives ou négatives, sont très inférieures aux variations positives de rendement qui pourraient résulter du recours à la fertilisation (organique ou minérale).

La variabilité interannuelle des rendements augmente également avec la fertilisation et dans les scénarios futurs. Cependant, la variabilité climatique absolue (variabilité interannuelle des précipitations, fréquence et ampleur d'événements climatiques extrêmes...) n'a pas été modifiée dans les scénarios futurs (voir discussion). L'incapacité à pouvoir juger de la véracité d'une projection future d'un modèle climatique, et la complexité des processus physiques régissant le climat et de leurs interactions rendent les modèles climatiques très incertains pour prédire des changements pour la variabilité

climatique absolue dans une zone géographique : l'analyse de l'évolution du risque lié à l'intensification des systèmes de culture reste donc un exercice difficile et délicat.

Des travaux supplémentaires devraient être menés afin d'affiner l'analyse du risque économique encouru par les paysans à l'adoption de changements de pratiques (adaptation au changement climatique, limitation des impacts environnementaux, intensification agroécologique). Cela permettrait de proposer des politiques offrant aux agriculteurs les moyens de réaliser ces changements, notamment via la facilitation de l'accès aux intrants, dont le coût rend leur utilisation impossible pour certains aujourd'hui.

## Références bibliographiques

- Adam, M. et al., 2013. A systematic approach for re-assembly of crop models: An example to simulate pea growth from wheat growth. *Ecological Modelling*, 250, pp.258–268.
- Affholder, F. et al., 2012. Ad hoc modeling in agronomy: What have we learned in the last 15 years? *Agronomy Journal*, 104(3), pp.735–748.
- Affholder, F., 1995. Effect of organic matter input on the water balance and yield of millet under tropical dryland condition. *Field Crops Research*, 41(2), pp.109–121.
- Affholder, F., 1997. Empirically modelling the interaction between intensification and climatic risk in semiarid regions. *Field Crops Research*, 52, pp.79–93.
- Affholder, F., 1994. Influence de la fertilisation et du contrôle de l'enherbement sur la réponse des rendements du mil pluvial à un indice hydrique synthétique. In F.-N. Reyniers & L. Netoyo, eds. *Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale. Vers une gestion des flux hydriques par les systèmes de culture*. pp. 191–203.
- Affholder, F. et al., 2013. The yield gap of major food crops in family agriculture in the tropics: Assessment and analysis through field surveys and modelling. *Field Crops Research*, 143, pp.106–118.
- Affholder, F. & Diagne, M., 1991. Le projet "ESPACE" au Sénégal. Une double démarche: recherche et diagnostic au service de la prévision des récoltes. *Info R3S (Réseau de Recherche sur la Résistance à la Sécheresse)*, 3, pp.13–14.
- Affholder, F., Parrot, L. & Jagoret, P., 2014. Acquis et perspectives de l'intensification écologique. In J.-M. Sourisseau, ed. *Agricultures familiales et mondes à venir*. Editions Quae, pp. 303–316.
- Albergel, J., Perez, P. & Vaksman, M., 1991. Amélioration des modèles du bilan hydrique sur une parcelle par la prise en considération des états de surface. In M. V. K. Sivakumar et al., eds. *Soil water balance in the sudano-sahelian zone*. pp. 483–496.
- Asseng, S. et al., 2013. Uncertainty in simulating wheat yields under climate change. *Nature Climate Change*, 3(9), pp.627–632.
- Banque Mondiale, 2011. Base de données de la Banque Mondiale.
- Brisson, N. et al., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18, pp.311–346.
- Clarke, L. et al., 2009. International climate policy architectures: Overview of the EMF 22 International Scenarios. *Energy Economics*, 31(SUPPL. 2), pp.S64–S81.
- Eyshi Rezaei, E. et al., 2014. Combined impacts of climate and nutrient fertilization on yields of pearl millet in Niger. *European Journal of Agronomy*, 55, pp.77–88.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 2014. FAO Statistical Database.

- Forest, F. & Clopes, A., 1994. Contribution à l'explication de la variabilité du rendement d'une culture de maïs plus ou moins intensifiée à l'aide d'un modèle de bilan hydrique amélioré. In F.-N. Reyniers & L. Netoyo, eds. *Bilan hydrique agricole et sécheresse en Afrique tropicale. Vers une gestion des flux hydriques par les systèmes de culture*. pp. 3–15.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Groupe de travail I), 2013. Changement climatique 2013 Les éléments scientifiques. In GIEC, ed. *Cinquième rapport d'évaluation du changement climatique*. pp. 1–222.
- Hatfield, J.L. et al., 2011. Climate impacts on Agriculture: Implications for Crop Production. *Agronomy Journal*, 103(2), pp.351–370.
- Van Ittersum, M.K. et al., 2013. Yield gap analysis with local to global relevance-A review. *Field Crops Research*, 143, pp.4–17.
- Kouakou, P. et al., 2013. Étude et prise en compte en modélisation de l'effet de la latitude sur la réponse à la photopériode chez divers géotypes de mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) du Sénégal. *Journal of Applied Biosciences*, 67, pp.5289 – 5301.
- Kouressy, M. et al., 2008. Adaptation des sorghos du Mali à la variabilité climatique. *Cahiers Agricultures*, 17(2), pp.95–100.
- Kouressy, M. et al., 2008. Potential contribution of dwarf and leaf longevity traits to yield improvement in photoperiod sensitive sorghum. *European Journal of Agronomy*, 28(3), pp.195–209.
- L'Hôte, Y. et al., 2002. Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues. *Hydrological Sciences Journal*, 47(4), pp.563–572.
- Lebel, T. & Ali, A., 2009. Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007). *Journal of Hydrology*, 375(1-2), pp.52–64.
- Lobell, D.B. & Field, C.B., 2007. Global scale climate–crop yield relationships and the impacts of recent warming. *Environmental Research Letters*, 2(014002), pp.1–7.
- Marteau, R. et al., 2011. The onset of the rainy season and farmers' sowing strategy for pearl millet cultivation in Southwest Niger. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(10), pp.1356–1369.
- Martre, P. et al., 2014. Multimodel ensembles of wheat growth: many models are better than one. *Global change biology*, 21, pp.911–925.
- Ministère de la Coopération et du Développement, 1991. *Mémento de l'agronome* 4th ed., Paris, France: Ministère de la Coopération et du Développement, pp.674-880.
- Muller, B. et al., 2010. *L'assurance agricole : un outil potentiel d'appui au développement en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne*, Colloque "Agir en situation d'incertitude" (Session 4), Montpellier, France, pp.1-17.
- Ndiaye, M., 2007. *Senegal, agricultural situation, country report (Global Agriculture Information Network - USDA Foreign Agricultural Service)*, GAIN Report, 15p.

- Nicholson, S., 2005. On the question of the “recovery” of the rains in the West African Sahel. *Journal of Arid Environments*, 63(3), pp.615–641.
- Nicholson, S.E., Some, B. & Kone, B., 2000. An analysis of recent rainfall conditions in West Africa, including the rainy seasons of the 1997 El Nino and the 1998 La Nina years. *Journal of Climate*, 13(14), pp.2628–2640.
- Ozer, P. et al., 2003. DISCUSSION of “Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues” The Sahelian drought may have ended during the 1990s. *Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques*, 48(3), pp.489–492.
- Passioura, J.B., 1996. Simulation Models: Science, Snake Oil, Education, or Engineering? *Agronomy Journal*, 88, pp.690–694.
- Pieri, C., 1989. *Fertilité des terres de savanes: bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara* Ministère de la Coopération et du Développement & CIRAD, eds., pp.1-444.
- Poeydebat, C. et al., 2013. *Simulation du rendement des cultures et modélisation bioéconomique pour la représentation des choix techniques des agriculteurs du bassin arachidier au Sénégal*, ANR ESCAPE Livrable 4.4, pp.1-71.
- Reinares Martinez, I., 2014. *Vulnerability and adaptation of farming systems of Sahel facing climatic change*, Mémoire master OACOS, Université Pierre et Marie Curie, pp.1-35.
- Roudier, P. et al., 2011. The impact of future climate change on West African crop yields: What does the recent literature say? *Global Environmental Change*, 21(3), pp.1073–1083.
- Rusinamhodzi, L. et al., 2011. A meta-analysis of long-term effects of conservation agriculture on maize grain yield under rain-fed conditions. *Agronomy for Sustainable Development*, 31(4), pp.657–673.
- Salack, S., Muller, B. & Gaye, a. T., 2011. Rain-based factors of high agricultural impacts over Senegal. Part I: Integration of local to sub-regional trends and variability. *Theoretical and Applied Climatology*, 106(1-2), pp.1–22.
- Semenov, M. a. & Stratonovitch, P., 2010. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research*, 41(1), pp.1–14.
- Service Economique Regional pour l’Afrique de l’Ouest, 2013. *Agriculture et Elevage au Sénégal*, Dakar. Publication des services économiques, pp.1-3.
- Sinclair, T.R. & Seligman, N.G., 1996. Crop Modeling: From Infancy to Maturity. *Agronomy Journal*, 88, pp.698–704.
- Sultan, B. et al., 2013. Assessing climate change impacts on sorghum and millet yields in the Sudanian and Sahelian savannas of West Africa. *Environmental Research Letters*, 8(014040), pp.1–9.
- Sultan, B. et al., 2014. Robust features of future climate change impacts on sorghum yields in West Africa. *Environmental Research Letters*, 9(104006), pp.1–13.

- Traoré, S.B. et al., 2001. Adaptation à la sécheresse des écotypes locaux de sorghos du Mali. *Science et changements planétaires/Sécheresse*, 11(4), pp.227–237.
- Traoré, S.B. et al., 2011. Characterizing and modeling the diversity of cropping situations under climatic constraints in West Africa. *Atmospheric Science Letters*, 12(1), pp.89–95.
- Vaksmann, M. et al., 2008. Utilisation de la diversité génétique des sorghos locaux du Mali. *Cahiers Agricultures*, 17(2), pp.140–145.
- Vaksmann, M., Traoré, S.B. & Niangado, O., 1996. Le photopériodisme des sorghos africains. *Agriculture et développement*, (9), pp.13–18.
- Van Vuuren, D.P. et al., 2011. The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109(1), pp.5–31.
- Wetselaar, R. & Ganry, F., 1982. Nitrogen balance in tropical agrosystems. In Y. R. Dommergues & H. G. Diem, eds. *Micobiology of tropical soils and plant productivity*. Martinus Nijhoff and W. Junk, pp. 1–35.



## Annexes

<u>Annexe 1 : Liste des modèles climatiques</u> .....	56
<u>Annexe 2 : Comparaison des précipitations simulées et observées</u> .....	57
<u>Annexe 3 : Caractérisation des scénarios climatiques futurs (précipitations et températures)</u>	58
<u>Annexe 4 : Paramétrage du LAI et stocks hydriques (autres résultats)</u> .....	59
<u>Annexe 5 : Calage des paramètres de formation du nombre de grain et rendement grain/biomasse (autres résultats)</u> .....	60
<u>Annexe 6 : Résultats Mil Souna III, RU=80 mm/m</u> .....	61
<u>Annexe 7 : Tables des p-values (test de Wilcoxon)</u> .....	64
<u>Annexe 8 : ANOVA - réponse de l'arachide à la fertilisation</u> .....	66
<u>Annexe 9 : Paramètres du modèle CELSIUS pour les espèces (table "PlanteSpecies")</u> .....	68
<u>Annexe 10 : Paramètres du modèle CELSIUS pour les cultivars (table "Cultivars")</u> .....	69

### **Annexe 1 : Liste des modèles climatiques**

Tableau 8 - Modèles climatiques utilisés pour le calcul des anomalies climatiques et scénarios/variables projetées par les modèles.

Modèles	2050 - RCP 2.6			2080 - RCP 2.6			2050 - RCP 8.5			2080 - RCP 8.5		
	Pluie	Tmax	Tmin	Pluie	Tmax	Tmin	Pluie	Tmax	Tmin	Pluie	Tmax	Tmin
ACCESS1-0							X	X	X	X	X	X
ACCESS1-3							X			X		
bcc-csm1-1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
bcc-csm1-1-m	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
BNU-ESM	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
CanESM2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
CCSM4	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
CESM1-BGC							X	X	X	X	X	X
CESM1-CAM5	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
CNRM-CM5				X	X	X				X	X	X
CSIRO-Mk3-6-0	X			X			X			X		
FGOALS-s2	X			X			X			X		
FIO-ESM	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
GISS-E2-H				X	X	X				X	X	X
GISS-E2-H-CC										X	X	X
HadGEM2-AO	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
IPSL-CM5A-LR	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
IPSL-CM5A-MR	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
IPSL-CM5B-LR							X	X	X	X	X	X
MIROC5	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
MIROC-ESM	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
MIROC-ESM-CHEM	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
MPI-ESM-LR	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
MPI-ESM-MR	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
MRI-CGCM3	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
MRI-ESM1							X	X	X	X	X	X
NorESM1-M	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
NorESM1-ME				X						X		
<b>Total (nombre de modèles/scénario)</b>	<b>19</b>	<b>17</b>	<b>17</b>	<b>22</b>	<b>19</b>	<b>19</b>	<b>24</b>	<b>21</b>	<b>21</b>	<b>28</b>	<b>24</b>	<b>24</b>

**Annexe 2 : Comparaison des précipitations simulées et observées**

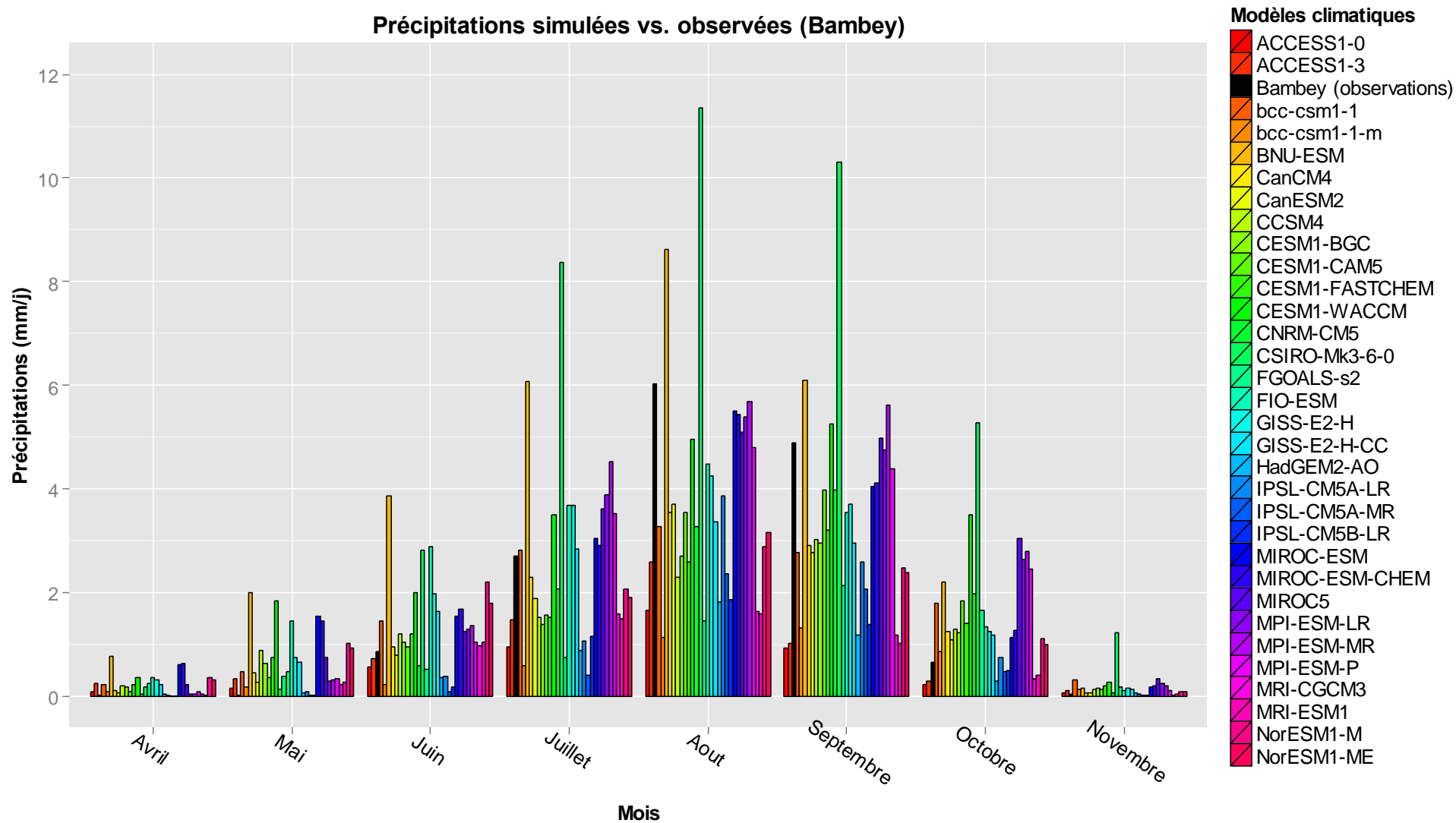


Figure 25 - Comparaison des précipitations simulées et observées (Bamby) pour la période 1971-2000

**Annexe 3 : Caractérisation des scénarios climatiques futurs (précipitations et températures)**

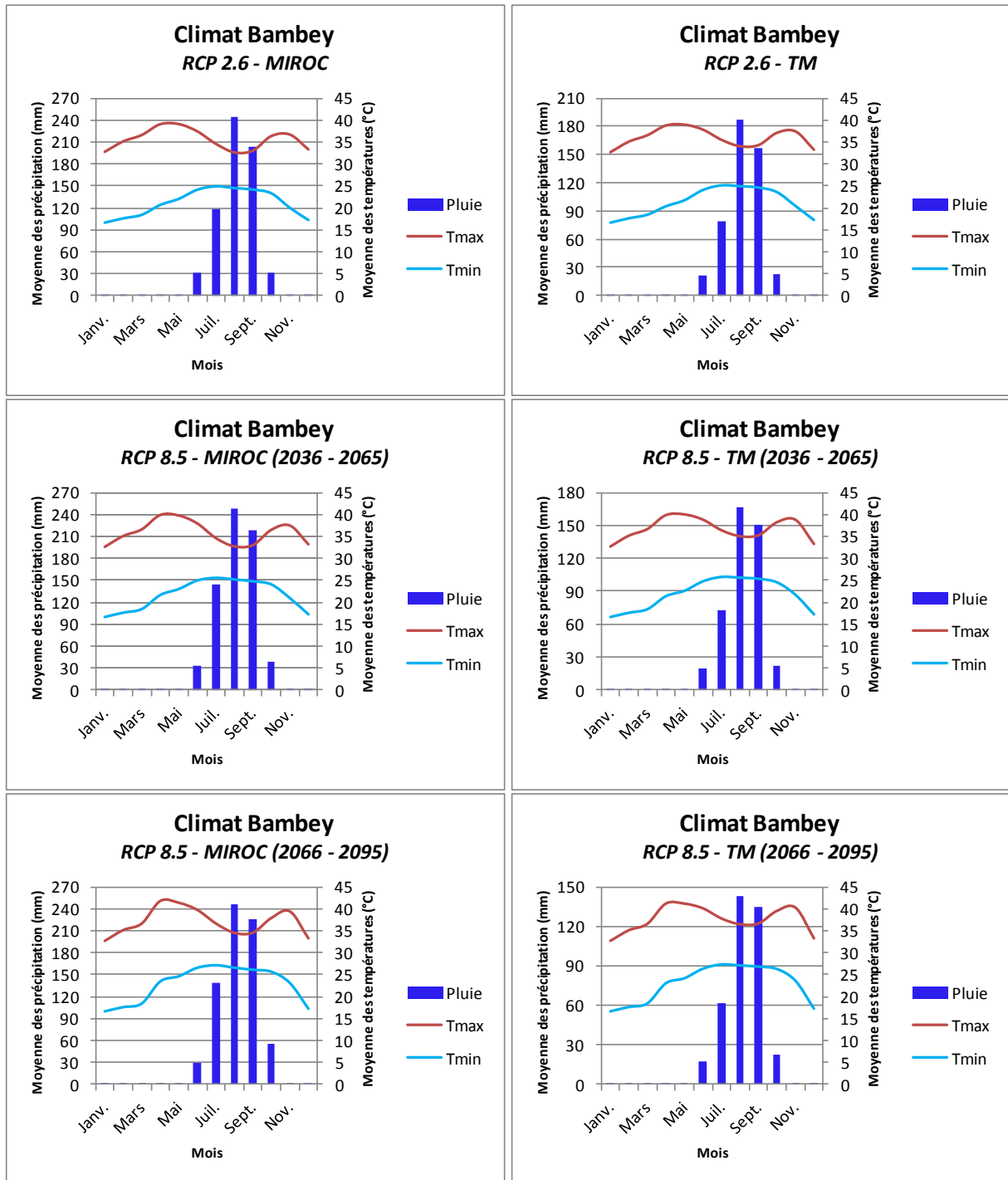


Figure 26 - Caractéristiques des scénarios climatiques retenus pour l'expérimentation virtuelle en termes de précipitations, températures maximales et températures minimales. Les valeurs représentées ci-dessus correspondent à des moyennes calculées sur une période de trente ans pour chaque scénario. Comme expliqué dans les résultats de l'étude, la différenciation entre les périodes "2036-2065" et "2066-2095" n'a pas été faite pour les scénarios RCP 2.6.

**Annexe 4 : Paramétrage du LAI et stocks hydriques (autres résultats)**

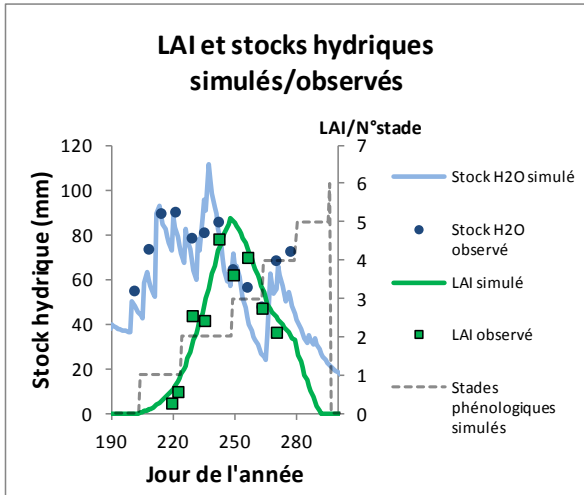


Figure 27 –LAI et stock hydrique simulés et observés du mil Souna III. Irrigation de complément pendant la phase végétative.

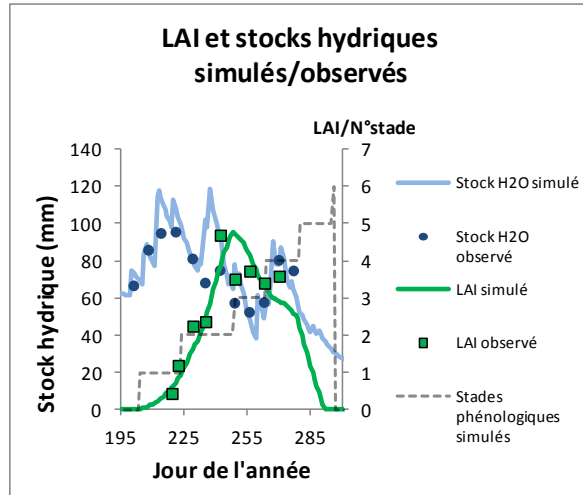


Figure 28 – LAI et stock hydrique simulés et observés du mil Souna III. Irrigation de complément pendant la phase de formation des grains.

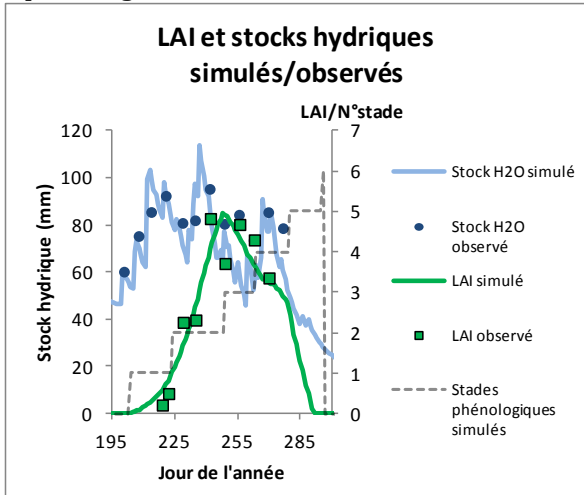


Figure 29 - LAI et stock hydrique simulés et observés du mil Souna III. Irrigation de complément pendant le cycle, mil maintenu à l'ETM.

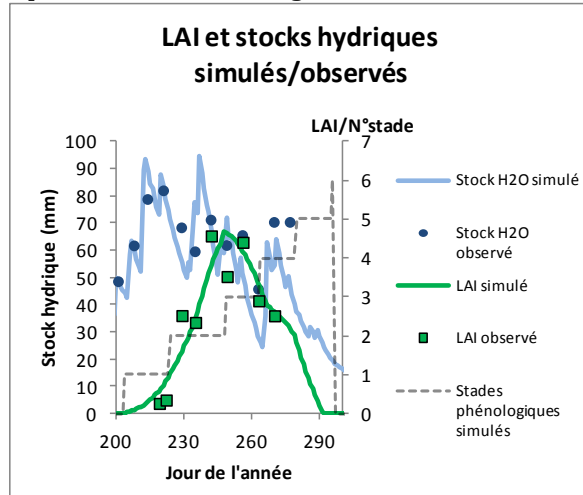


Figure 30 - LAI et stock hydrique simulés et observés du mil Souna III. Irrigation de complément pendant la phase épiaison-floraison.

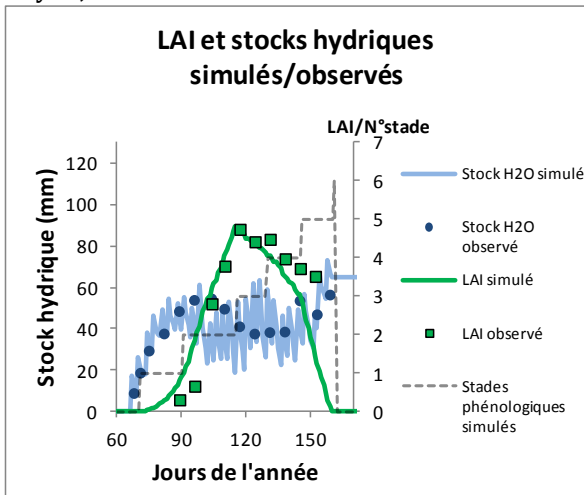


Figure 31 - LAI et stock hydrique simulés et observés du mil Souna III. Irrigation de complément pendant le cycle, mil maintenu à l'ETM.

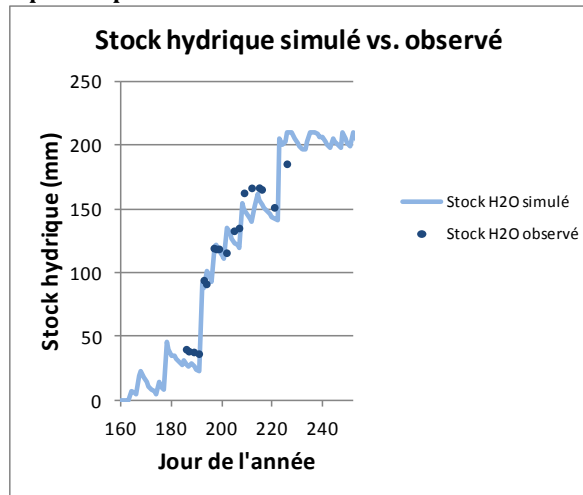


Figure 32 – Stock hydrique simulé et observé sur sol nu.

Tous les essais ont reçu 50 kg/ha d'urée à 13 JAS et 31 JAS

**Annexe 5 : Calage des paramètres de formation du nombre de grain et rendement grain/biomasse (autres résultats)**

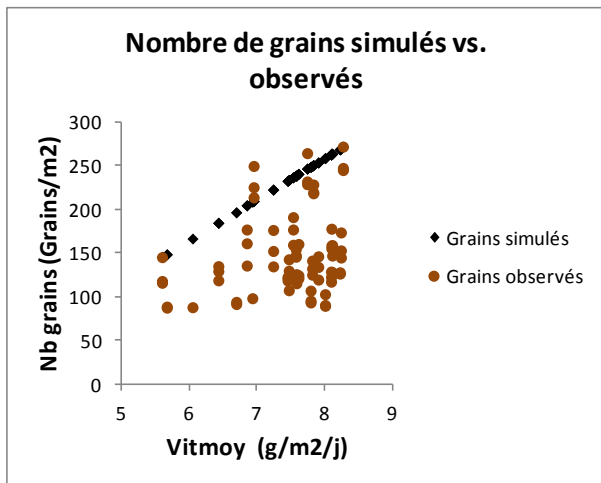


Figure 33 - Calage des paramètres de formation du nombre de grains ( $C_{grain}$ ,  $C_{grainV0}$ ) pour l'arachide 73-33.

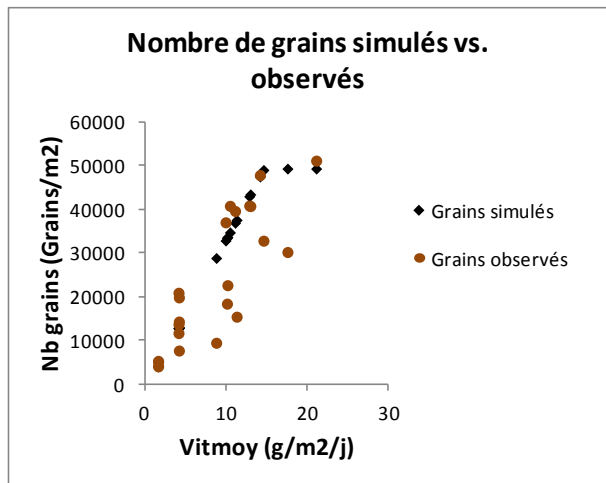


Figure 34 - Calage des paramètres de formation du nombre de grains ( $C_{grain}$ ,  $C_{grainV0}$ ) pour le mil Souna III.

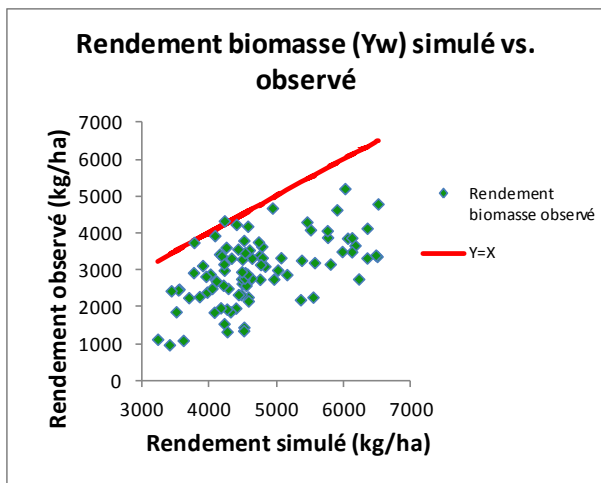


Figure 35 - Calage des paramètres de rendement biomasse  $Y_w$  ( $E_{bmax}$ ,  $k$ ) pour l'arachide 73-33

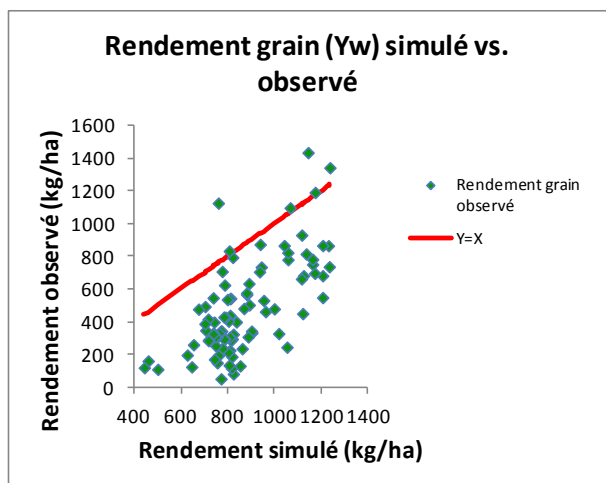


Figure 36 - Calage de la vitesse de croissance de l'indice de récolte ( $Vitircarb$ ) pour l'élaboration du rendement grain  $Y_w$  pour l'arachide 73-33

**Annexe 6 : Résultats Mil Souna III, RU=80 mm/m**

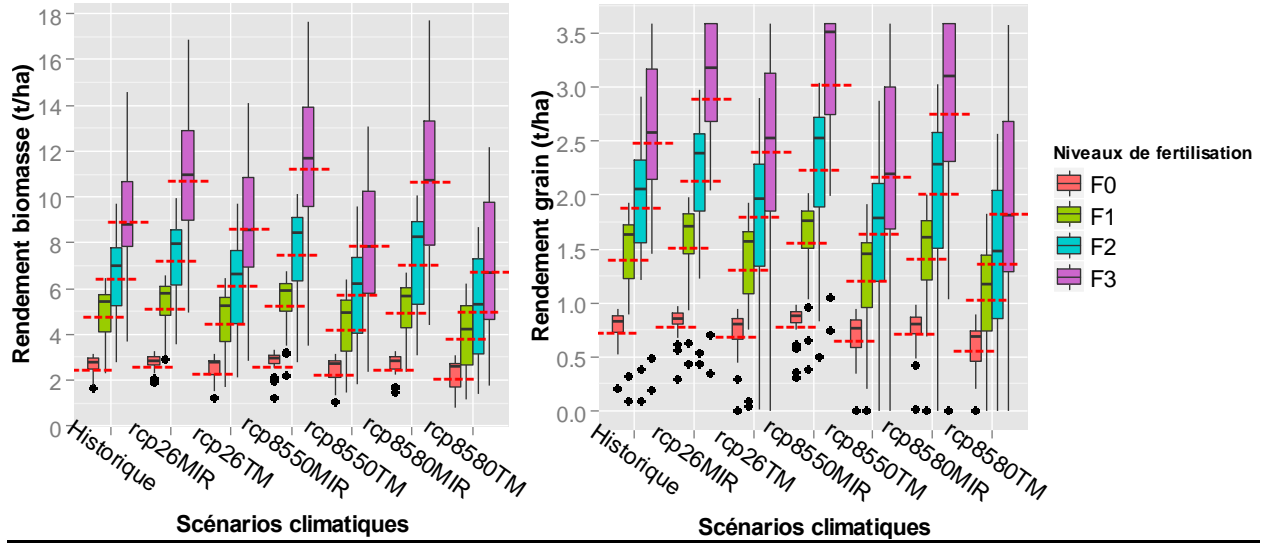


Figure 37 - Distributions de rendements biomasse totale et grain simulés pour le mil. Chaque "boxplot" représente la distribution des rendements simulés sur 30 années pour chaque scénario et niveau de fertilisation. La RU du sol est de 80 mm/m. F0, F1, F2, F3 : niveaux de fertilisation décrits dans le paragraphe II-4-ii.

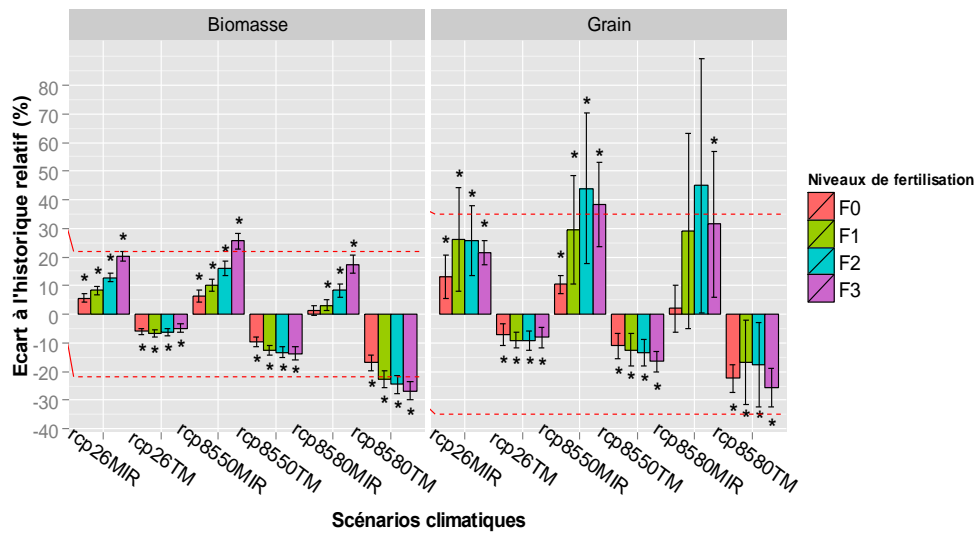


Figure 38 - Ecarts de rendements par rapport au scénario historique pour chaque scénario climatique futur à niveau de fertilisation égal entre futur et historique (RU=80mm/m). Les erreurs standard sont représentées pour chacune des moyennes, les pointillés indiquent la RRMSE du modèle pour les rendements biomasse et grain. Les étoiles indiquent que la série de rendements simulés correspondante est significativement différente de la série de rendements simulés historique ( $\alpha=0.05$ ).

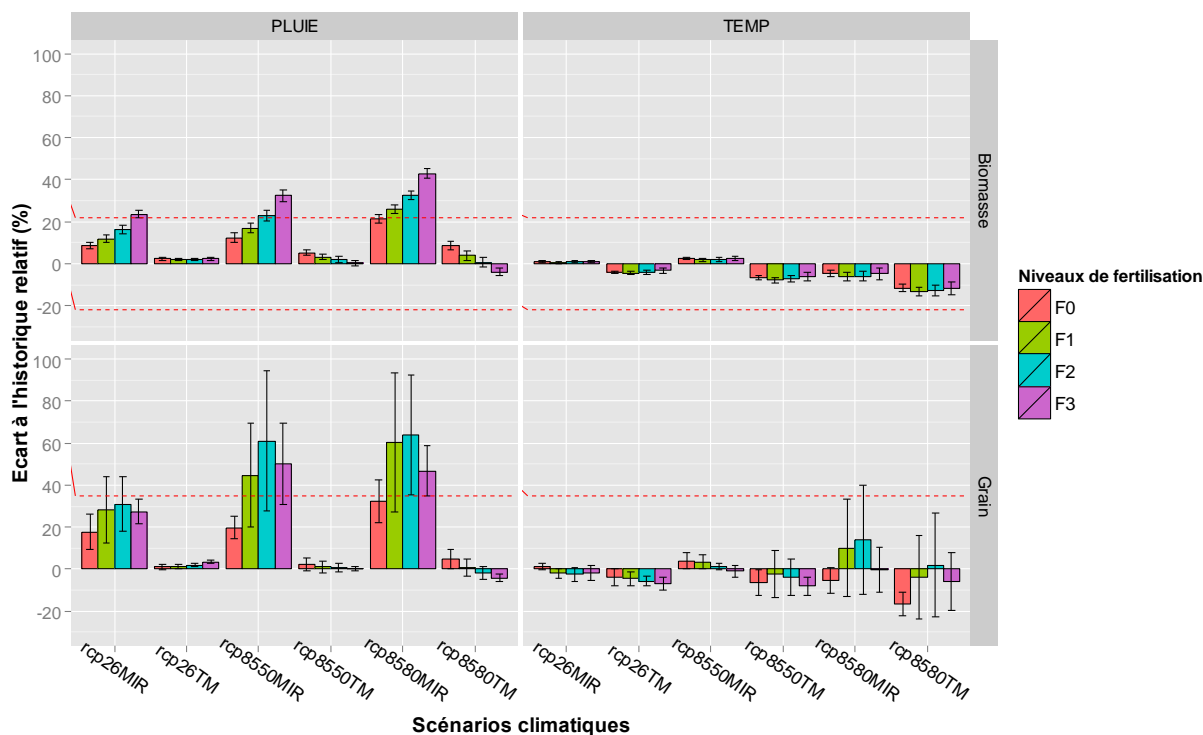


Figure 39 - Ecart de rendements par rapport au scénario historique pour chaque scénario climatique futur, à niveau de fertilisation égal entre futur et historique (RU=120mm/m). L'effet de la variation de pluie est représenté dans la colonne de gauche, l'effet de la variation de température dans la colonne de droite (corrections appliquées séparément aux scénarios futurs). Les pointillés rouges représentent la RRMSE du modèle.

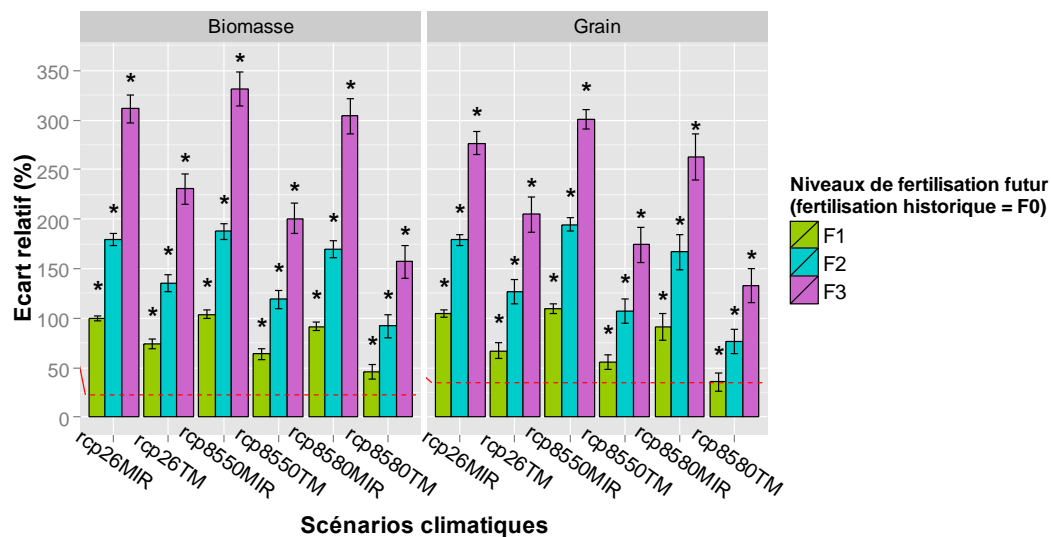


Figure 40 - Ecart de rendements simulé entre les scénarios futurs fertilisés F1, F2 et F3 et le scénario historique fertilisé F0 (RU=80mm/m). Les erreurs standard sont représentées pour chacune des moyennes, les pointillés indiquent la RRMSE du modèle pour les rendements biomasse et grain. Les étoiles indiquent que la série de rendements simulés correspondante est significativement différente de la série de rendements simulés historique ( $\alpha=0.05$ ).



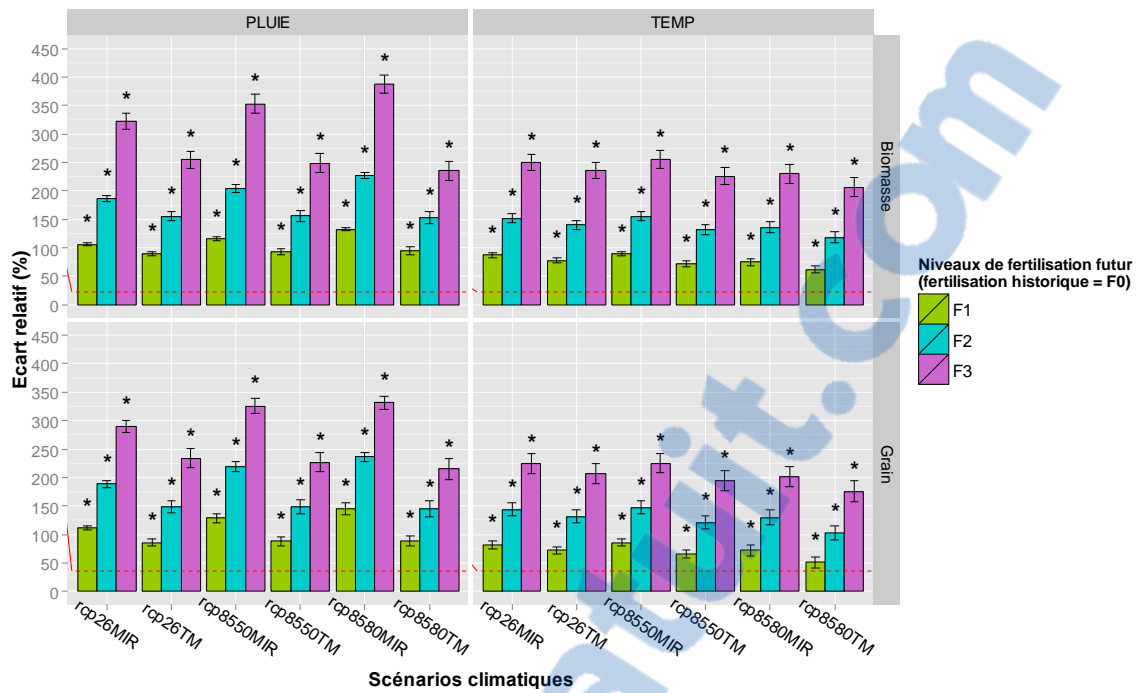


Figure 41 - Ecart de rendements simulé entre les scénarios futurs fertilisés F1, F2 et F3 et le scénario historique fertilisé F0 (RU=80mm/m). Les erreurs standard sont représentées pour chacune des moyennes, les pointillés indiquent la RRMSE du modèle pour les rendements biomasse et grain. Les étoiles indiquent que la série de rendements simulés correspondante est significativement différente de la série de rendements simulés historique ( $\alpha=0.05$ ). L'effet de la variation de pluie est représenté dans la colonne de gauche, l'effet de la variation de température dans la colonne de droite (corrections appliquées séparément aux scénarios futurs).

## Annexe 7 : Tables des p-values (test de Wilcoxon)

Tableau 9 - P-values générées par le test de Wilcoxon, par comparaison de chaque série de rendements simulés futurs (biomasse et grain) avec la série de rendements simulés pour le scénario historique. La RU des simulations est de 120 mm/m. Température : les scénarios climatiques ont été générés en ne corrigeant que les températures minimales et maximales ; Pluie : les scénarios climatiques ont été générés en ne corrigeant que les précipitations. En rouge, les p-values supérieures à  $\alpha=0.05$ .

Scenarios	Température				Pluie				
	F0	F1	F2	F3	F0	F1	F2	F3	
rcp26MIR	1.23E-02	4.49E-02	2.98E-02	2.63E-02	1.77E-06	1.82E-06	1.82E-06	1.86E-09	Biomasse
rcp26TM	2.76E-01	3.82E-01	5.29E-01	5.56E-01	4.18E-04	2.13E-04	2.17E-04	9.08E-05	
rcp8550MIR	1.73E-04	3.72E-03	5.31E-03	3.73E-03	1.80E-06	1.82E-06	1.86E-09	1.82E-06	
rcp8550TM	3.31E-06	2.23E-06	2.16E-05	1.64E-02	9.60E-05	3.05E-03	5.19E-02	8.53E-01	
rcp8580MIR	8.40E-02	1.17E-02	3.08E-02	4.22E-01	1.75E-06	1.82E-06	1.82E-06	1.86E-09	
rcp8580TM	1.82E-06	2.02E-06	2.55E-07	2.03E-03	2.50E-04	4.21E-02	8.53E-01	1.65E-03	
rcp26MIR	3.39E-02	1.17E-01	3.78E-02	1.78E-01	1.69E-06	1.80E-06	1.82E-06	1.31E-05	Grain
rcp26TM	2.09E-01	3.18E-01	5.56E-01	5.02E-01	3.68E-04	8.87E-05	1.67E-04	2.03E-04	
rcp8550MIR	2.21E-03	1.53E-02	5.31E-03	2.24E-01	1.70E-06	1.82E-06	1.82E-06	1.31E-05	
rcp8550TM	4.00E-05	3.39E-05	3.73E-04	8.36E-03	7.39E-04	4.43E-03	7.02E-02	5.45E-01	
rcp8580MIR	1.14E-03	5.82E-04	1.52E-02	4.09E-02	1.69E-06	1.81E-06	1.82E-06	1.31E-05	
rcp8580TM	3.23E-05	2.97E-05	3.72E-05	1.43E-03	1.30E-03	1.05E-01	7.62E-01	4.09E-03	

Tableau 10 – P-values générées par le test de Wilcoxon, par comparaison de chaque série de rendements simulés futurs (biomasse et grain) avec la série de rendements simulés pour le scénario historique. La RU des simulations est de 120 mm/m. Température : les scénarios climatiques ont été générés en ne corrigeant que les températures minimales et maximales ; Pluie : les scénarios climatiques ont été générés en ne corrigeant que les précipitations. En rouge, les p-values supérieures à  $\alpha=0.05$ .

Scenarios	Température				Pluie				
	F0	F1	F2	F3	F0	F1	F2	F3	
rcp26MIR	9.89E-03	3.32E-02	2.90E-02	3.08E-02	1.99E-06	1.82E-06	1.82E-06	1.86E-09	Biomasse
rcp26TM	1.85E-01	4.16E-01	5.65E-01	6.41E-01	1.69E-04	5.81E-04	2.67E-04	1.68E-04	
rcp8550MIR	2.93E-04	4.11E-03	7.05E-03	3.49E-03	1.70E-05	2.02E-06	2.02E-06	2.02E-06	
rcp8550TM	3.32E-06	5.74E-06	4.18E-04	2.85E-02	1.23E-04	2.86E-03	4.17E-02	3.93E-01	
rcp8580MIR	4.60E-02	2.85E-02	7.52E-02	3.18E-01	1.80E-06	1.82E-06	1.82E-06	1.86E-09	
rcp8580TM	1.80E-06	2.61E-08	1.20E-04	2.56E-03	1.96E-04	2.77E-02	4.34E-01	4.72E-02	
rcp26MIR	4.91E-02	1.64E-01	4.23E-02	7.95E-02	2.35E-06	1.82E-06	1.82E-06	8.80E-06	Grain
rcp26TM	1.84E-01	3.55E-01	6.12E-01	5.56E-01	5.22E-04	1.92E-04	2.11E-04	1.45E-04	
rcp8550MIR	1.21E-03	1.54E-02	9.44E-03	6.01E-02	1.72E-06	1.82E-06	1.82E-06	8.79E-06	
rcp8550TM	4.04E-05	3.10E-05	4.52E-04	6.38E-03	9.06E-04	2.21E-03	5.98E-02	1.57E-01	
rcp8580MIR	1.20E-03	1.54E-03	2.70E-02	4.75E-02	1.63E-06	1.82E-06	1.82E-06	8.80E-06	
rcp8580TM	3.09E-05	2.71E-05	4.25E-05	1.37E-03	5.96E-04	4.54E-02	7.10E-01	4.11E-02	

## Annexe 8 : ANOVA – réponse de l'arachide à la fertilisation

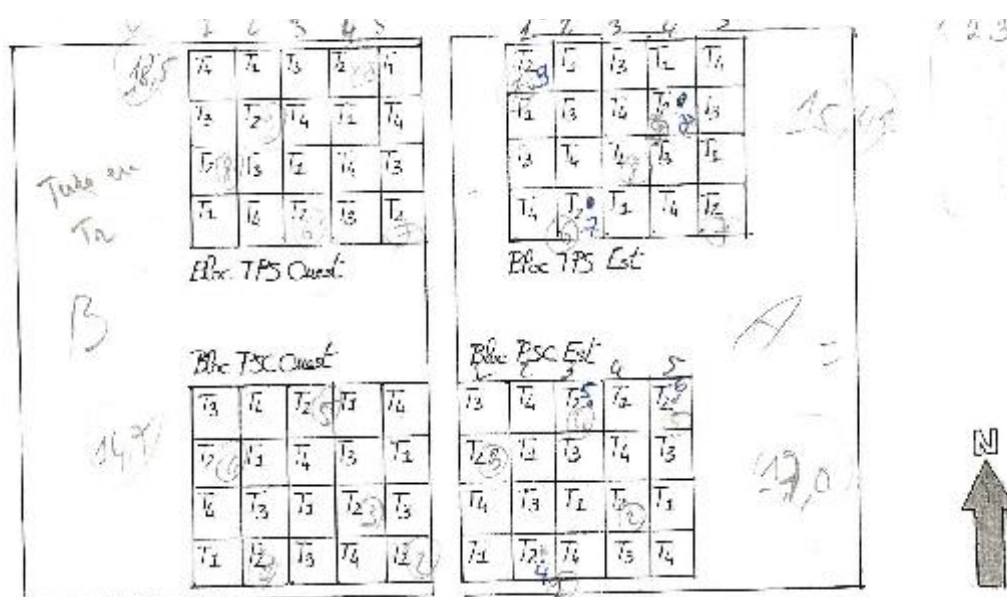


Figure 42 - Dispositif expérimental de la Sole C. La rotation arachide-mil est réalisée chaque année entre les blocs ouest et est du dispositif. TPS : Témoin Pluvial Strict sans compost; PSC : Pluvial strict avec compost.

Les données utilisées pour l'analyse de variance sont issues des années 1989 et 1991 où l'arachide est semée sur le bloc ouest uniquement. Le dispositif ne permet pas de tester l'effet de la fertilisation organique (compost vs témoin) car il n'est pas randomisé pour cette modalité. L'effet de la fertilisation minérale est testé sur les blocs TPS et PSC séparément.

### Bloc PSC :

#### Analysis of Variance Table

Response: RDTGRAINS

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
idTraitFertMin	3	1921	640	0.0991	0.9600
annee	1	5316010	5316010	822.3169	<2e-16 ***
idTraitFertMin:annee	3	25064	8355	1.2924	0.2939
Residuals	32	206870	6465		

---

Signif. codes: 0 '\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

### Bloc TPS :

#### Analysis of Variance Table

Response: RDTGRAINS

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
idTraitFertMin	3	65239	21746	1.0610	0.3793
annee	1	2601652	2601652	126.9377	1.133e-12 ***
idTraitFertMin:annee	3	32847	10949	0.5342	0.6622

```
Residuals          32  655856  20496
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Les résultats de l'analyse de variance ne permettent de discerner un effet significatif de la fertilisation minérale sur les rendements grain de l'arachide, seul l'effet "année" est remarquable (1989 humide, 1991 très sèche). L'analyse par année ne permet également pas de remarquer un effet de la fertilisation minérale.

## Annexe 9 : Paramètres du modèle CELSIUS pour les espèces (table "PlanteSpecies")

Tableaux 11et 12 – Paramètres des espèces végétales simulées par CELSIUS

codeplante	CodePspecies	tdmin	tdmax	tcmin	tcmax	tcopt	dldmax	lairecmax	ebmax	extin	kmax	DeltaRacMax	Zracmax	tcold	Ndiecold	Nbjgrain	CTIveee	Tger
mil	1	11	47	11	45	30	0.0099	0	2.9	0.65	1.25	0.2	200	5	10	25	100	8
mais	11	6	28	8	42	25	0.00207	0	4	0.7	1.17	0.1	180	5	20	15	100	8
mil	12	11	47	11	45	30	0.0099	0	3.4	0.65	1.7	0.2	180	5	10	15	100	8
rizpGD	13	9	40	10	42	29	4.25E-05	0	2.6	0.5	1.12	0.1	150	9	5	30	100	8
mais	14	6	28	8	42	25	0.0022	0	4	0.7	1.11	0.25	180	8	5	15	100	8
sorgho	16	11	47	11	45	30	0.005	0	2.9	0.65	1.25	0.2	150	5	10	25	100	8
Coton	17	6	28	8	42	25	0.002	0	4	0.7	1.15	0.1	180	5	20	35	100	8
ara	2	10	45	10	45	32	0.00092	2	1.75	0.6	1.3	0.27	170	8	4	25	85	7
maSen	3	6	28	8	42	25	0.002	0	4	0.7	1.15	0.1	180	5	20	35	100	8
millMA	4	11	47	11	45	30	0.0099	0	2.9	0.65	1.25	0.2	200	5	10	25	100	8
maSenInt	5	6	28	8	42	25	0.002	0	4	0.7	1.15	0.1	180	5	20	15	100	8
w1	6	10	45	10	45	30	0.0009	2	2.5	0.7	1.2	0.1	150	5	10	0	60	8
rizpB22	7	11	40	11	42	29	0.00019	0	2.6	0.5	1.2	0.15	100	9	5	30	70	10

codeplante	SensiSen	NJFletri	Zgraine	Nsymb	NCvEmax	NCvEmin	alphaN	PCvEmax	PCvEmin	alphaP	KCvEmax	KCvEmin	alphaK	Nsymbjour	SeuilTurg	SeuilWS	alphaCo2
mil	0.2	4	15	0	300	0.5	0	300	50	0.5	300	50	0.5	0	0.25	0.35	1.1
mais	0.2	1	15	0	300	50	0	300	50	0.5	300	50	0.5	0	0.25	0.35	1.1
mil	2	20	15	0	300	50	0	300	50	0.5	300	50	0.5	0	0.25	0.25	1.1
rizpGD	0.2	1	15	0	300	50	0	300	50	0.5	300	50	0.5	0	0.25	0.35	1.1
mais	0.2	1	15	0	300	50	0	300	50	0.5	300	50	0.5	0	0.25	0.35	1.1
sorgho	0.8	1	15	0	300	50	0	300	50	0.5	300	50	0.5	0	0.25	0.35	1.1
Coton	0.2	1	20	0	300	50	0.5	300	50	0.5	300	50	0.5	0	0.25	0.35	1.1
ara	0.3	1	20	24	300	50	0	300	50	0.5	300	50	0.5	1	0.25	0.35	1.2
maSen	0.2	1	20	0	300	50	0.5	300	50	0.5	300	50	0.5	0	0.25	0.35	1.1
millMA	0.2	4	15	0	300	50	0.5	300	50	0.5	300	50	0.5	0	0.25	0.35	1.1
maSenInt	0.2	1	20	0	300	50	0.5	300	50	0.5	300	50	0.5	0	0.25	0.35	1.1
w1	0	4	10	0	300	50	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0.35	1.1
rizpB22	0	100	5	0	300	50	0.5	300	50	0.5	300	50	0.5	0	0.25	0.35	1.41

## Annexe 10 : Paramètres du modèle CELSIUS pour les cultivars (table "Cultivars")

Tableau 123 – Paramètres des cultivars simulés par CELSIUS

codeplante	CodePSpecies	NumCultivar	IdCultivar	CodCultivar	NbStadesPheno	SensPhot	STrsChoc	MOPP	adens	bdens	laicomp	Vitircarb	IRmax	P1grainMax	Ngrmax	IFertMax	Cgrain	Cgrainv0
mil	1	1	1.1	milSouna III	5	0	0	0	-1	2	1	0.0092	0.3	0.01	60000	150	1300	2000
mil	1	2	1.2	milIBV-8004	5	0	0	0	-1	2	1	0.0092	0.5	0.009	41000	150	1300	2000
mil	1	3	1.3	milLocal	5	0	0	0	-1	2	1	0.0092	0.75	0.009	41000	150	1300	2000
sorgho	16	1	16.1	sorghoB	5	0	0	0	-1	2	1	0.0092	0.3	0.01	60000	150	1300	2000
ara	2	1	2.1	ara28-206	5	0	0	0	-1	7	1	0.0035	0.55	0.86	80	389	32	200
ara	2	2	2.2	ara55-437	5	0	0	0	-1	17	1	0.0038	0.8	0.78	23	389	47	-43
ara	2	3	2.3	ara73-30	5	0	0	0	-1	8	1	0.004	0.62	0.56	52	389	32	200
ara	2	4	2.4	ara73-33	5	0	0	0	-1	15	1	0.0038	0.8	0.82	25	80	47	-118
ara	2	5	2.5	araLocal	5	0	0	0	-1	15	1	0.004	0.54	0.56	52	389	32	200
maSen	3	1	3.1	Noor96	5	0	0	0	-1	6.2	1	0.007	0.5	0.299	800	150	31	100
milIMA	4	1	4.1	milhypothetique	5	0	0	0	-0.5	2	1	0.015	0.5	0.01	60000	180	1875	2000
maSenInt	5	2	5.1	maisintensif	5	0	0	0	-1	6.2	1	0.01	0.5	0.299	800	180	76	674
maSenInt	5	3	5.2	mais intensif Nioro	5	0	0	0	-1	6.2	1	0.01	0.5	0.299	800	180	76	674
rizP	7	7	7.1	RPAlaotra	5	0	0	0	-0.5	100	1	0.0174	0.56	0.034	4500	150	855	-1775
mais	14	15	Bioseed 9698	15	5	0	0	0	-0.8	4.3	1	0.0161	0.56	0.36	900	150	76	674
mais	11		BR106	5	5	0	0	0	-0.8	4.3	0	0.0156	0.56	0.342	900	150	76	674
mais	14	26	CP901	26	5	0	0	0	-0.8	4.3	1	0.0161	0.56	0.36	900	150	76	674
mais	14	28	locale	28	5	0	0	0	-0.8	4.3	1	0.0161	0.56	0.36	900	150	76	674
rizP	13	3	RPGLuant	3	5	0	0	0	-0.5	100	1	0.0174	0.56	0.034	4500	150	855	-1775
mais	14	23	Song_Hong	23	5	0	0	0	-0.8	4.3	1	0.0161	0.56	0.36	900	150	76	674
mil	12	5	SOU	1	5	1	10	12.75	-1	2	1	0.0092	0.3	0.0073	40000	95	3571	-3571