

**Impacts des changements climatiques sur l'économie (Produit Intérieur Brut et valeurs ajoutées sectorielles) et sur la productivité agricole au Burkina Faso**

Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation.

Sous la tutelle du Ministère de l'Environnement, de l'Economie Verte et du Changement Climatique du Burkina Faso

Novembre 2019

Mis en oeuvre par :

**giz** Deutsche Gesellschaft  
für Internationale  
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Mandaté par :

 Ministère fédéral  
de l'Environnement, de la Protection de la Nature  
et de la Sécurité nucléaire

de la République fédérale d'Allemagne

Sous la tutelle de :



En coopération avec :

CLIMATE  
ANALYTICS 

## AUTEURS

Jessie Ruth Schleypen

Fahad Saeed

Sidzabda Djibril Dayamba

Jean David O. Coulibaly

Sarah Ann Lise D'haen

Cette publication a été développée avec le support technique des équipes scientifiques de Climate Analytics, dans le cadre de la Composante 2, Activité II.3 du projet Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation dans les pays francophones les moins avancés d'Afrique subsaharienne (PAS-PNA).

Cette publication peut être reproduite en tout ou partie, sous quelque forme que ce soit, à des fins pédagogiques et non lucratives, sur autorisation spéciale de Climate Analytics, à condition que sa source soit mentionnée et référencée.

Cette publication ne peut être revendue ou utilisée à des fins commerciales sans autorisation écrite préalable de Climate Analytics.

Nous regrettons toutes erreurs ou omissions qui auraient été commises involontairement.

Ce document peut être cité sous le titre :

Schleypen J. R., Saeed F., Dayamba S. D., Coulibaly O. J. D., D'haen S., 2019. Impacts des changements climatiques sur l'économie (Produit Intérieur Brut et valeurs ajoutées sectorielles) et sur la productivité agricole au Burkina Faso. Report produced under the project "Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation dans les pays francophones les moins avancés d'Afrique subsaharienne", Climate Analytics gGmbH, Berlin.

Une copie numérique de ce rapport est disponible en ligne sur :  
[www.climateanalytics.org/publications](http://www.climateanalytics.org/publications).

Cette étude est financée dans le cadre du Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation dans les pays francophones les moins avancés d'Afrique subsaharienne, relevant de l'Initiative Internationale pour le Climat (IKI) soutenue par le Ministère fédéral de l'Environnement, de la Protection de la Nature et de la Sureté Nucléaire (BMU) en vertu d'une décision du Parlement de la République fédérale d'Allemagne, et mis en oeuvre par Climate Analytics et la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

## Table des matières

<b>1. Introduction .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1. Aperçu de la croissance économique et du développement au Burkina Faso .....</b>	<b>5</b>
1.1.1. Généralité .....	5
1.1.2. Les défis de l'agriculture .....	6
1.1.3. Les pratiques d'adaptation .....	7
1.1.4. Programmes et initiatives du gouvernement.....	9
<b>1.2. Le climat au Burkina Faso .....</b>	<b>10</b>
<b>1.3. Défis futurs en matière de développement .....</b>	<b>10</b>
<b>1.4. Objectif et contexte de l'étude .....</b>	<b>11</b>
<b>2. Les impacts macroéconomiques du changement climatique au Burkina Faso .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1. Description résumée de la méthodologie et des données utilisées.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2. Résultats et conclusions .....</b>	<b>12</b>
2.2.1. Sensibilité du PIB par habitant du Burkina Faso aux changements climatiques.....	12
2.2.2. Sensibilité de la valeur ajoutée brute (VAB) par secteur du Burkina Faso aux changements climatiques .....	13
2.2.3. Risque projeté des changements climatiques sur le PIB par habitant du Burkina Faso .....	15
<i>Encadré 1: Amendements reçus des experts nationaux sur l'étude macro-économique et la déclinaison dans l'étude sur les productions agricoles .....</i>	<i>16</i>
<b>3. Les impacts du changement climatique sur la productivité agricole au Burkina Faso – cas du maïs.....</b>	<b>17</b>
<b>3.1. Bref aperçu du contexte .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2. Méthodologie de l'étude de l'impact des changements climatiques sur la productivité agricole – cas du maïs.....</b>	<b>18</b>
3.2.1. Données agricoles.....	19
3.2.1.a. Les données sur le maïs .....	19
3.2.2. Données climatiques .....	21
3.2.2.a. Données climatiques historiques .....	21
3.2.2.a.1. Température moyenne de la saison de croissance.....	22
3.2.2.a.2. Précipitations moyennes de saison de culture .....	25
3.2.2.a.3. Fortes pluies .....	27
3.2.2.a.4. Sécheresse.....	28
3.2.2.b. Données de projection.....	31
3.2.3. Procédure d'estimation des impacts des changements climatiques sur la productivité .....	33
3.2.3.a. Inférence de réponse historique.....	34
3.2.3.b. Sélection du modèle .....	34
3.2.3.c. Les projections.....	34
<b>3.3. Résultats et conclusions .....</b>	<b>35</b>
3.3.1. Inférence historique: sensibilité de la productivité agricole aux changements climatiques.....	35
3.3.2. Projections : Impact des changements climatiques futurs sur la productivité agricole .....	36
3.3.2.a. Impact d'un changement dans les précipitations totales sur la productivité agricole .....	37
3.3.2.b. Impact d'une augmentation du nombre de jours où la température dépasse 35°C. ....	38
3.3.2.c. Impact des précipitations extrêmes sur la productivité agricole.....	39
<b>4. Annexe.....</b>	<b>40</b>
<b>4.1. Note méthodologique technique du modèle macroéconomique.....</b>	<b>40</b>
4.1.1. Données.....	40
4.1.2. Estimation du risque économique .....	41

Étape 1 : Inférence historique des effets .....	42
Étape 2 : Procédure d'estimation par randomisation-filtrage .....	44
Étape 3 : Prévisions .....	46
<b>4.2. Résultats pour le modèle macro-économique .....</b>	<b>47</b>
4.2.1. Analyse de régression par panel historique .....	47
4.2.2. Avec la randomisation de Monte Carlo .....	49
<b>4.3. Note méthodologique technique du modèle agricole .....</b>	<b>49</b>
4.3.1. Les bases de données pour le modèle agricole.....	49
4.3.1.a. Base de données agricoles .....	49
4.3.1.b. Base de données climatiques.....	49
4.3.1.c. Bases de données combinés et nombre total d'observations .....	50
4.3.2. Analyse des réponses historiques de la production agricole .....	51
4.3.3. Projections futures au niveau régional .....	53
<b>4.4. Résultats des régressions pour le modèle agricole.....</b>	<b>54</b>
<b>5. Références bibliographiques .....</b>	<b>56</b>

## Liste des figures

<b>Figure 1:</b> Contribution des différents secteurs à la croissance du PIB du Burkina Faso de 2000-2017 .....	5
<b>Figure 2:</b> Etendue et intensité de mise en oeuvre des pratiques d'adaptation en agriculture au Burkina Faso .....	8
<b>Figure 3:</b> Sensibilité de l'économie à l'échelle de l'Afrique aux écarts de température moyenne .....	14
<b>Figure 4:</b> Estimations spécifiques au Burkina Faso à partir de la randomisation de Monte Carlo des impacts du PIB par habitant (en pourcentage) pour chaque degré de variation de la température moyenne .....	14
<b>Figure 5:</b> Estimations spécifiques au Burkina Faso à partir de la randomisation de Monte Carlo des impacts sur le PIB par habitant (en pourcentage) pour chaque écart unitaire par rapport aux valeurs normales de l'IPN (-0,5 < IPN < 0,5) .....	15
<b>Figure 6:</b> Impact prévu sur le PIB par habitant selon deux scénarios de réchauffement : le scénario de faible réchauffement (RCP 2.6) et le scénario de réchauffement élevé (RCP 8.5) .....	16
<b>Figure 7:</b> Production moyenne et rendement moyen du maïs de 1991-2010 (en tonnes et tonnes/ha).....	20
<b>Figure 8:</b> Production et rendement du maïs irrigué et non irrigué .....	21
<b>Figure 9:</b> Température annuelle moyenne et variation de la température annuelle moyenne .....	22
<b>Figure 10:</b> Intervalles de température moyenne par zone climatique et nombre de jours dans ces intervalles.....	23
<b>Figure 11:</b> Intervalles de température maximale et nombre de jours dans ces intervalles....	24
<b>Figure 12:</b> Précipitations mensuelles moyennes .....	25
<b>Figure 13:</b> Précipitations totales moyennes .....	26
<b>Figure 14:</b> Présentation des valeurs moyennes de l'indice RX5 dans les régions du Burkina Faso (1998-2002 et 2008-2012) .....	27
<b>Figure 15:</b> Valeurs mensuelles du SPEI à différentes échelles de temps.....	29
<b>Figure 16:</b> Rendement du maïs par rapport à la température moyenne et maximale et la précipitation .....	30
<b>Figure 17:</b> Variation de la température moyenne dans les années 2050 par rapport à la période de référence .....	31
<b>Figure 18:</b> Variation des précipitations totales en 2050s par rapport à la période de référence .....	32
<b>Figure 19:</b> Évolution du RX5 en 2050s par rapport à la période de référence .....	32
<b>Figure 20:</b> Variation en mois de sécheresse sévère en 2050 par rapport à la période de référence .....	33
<b>Figure 21:</b> Variation en pourcentage du rendement du maïs en raison de la variation prévue des précipitations totales .....	37
<b>Figure 22:</b> Variation en pourcentage du rendement du maïs due à la variation prévue de la température moyenne au-dessus de 35°C .....	38

**Figure 23:** Pourcentage de changement en rendement de maïs dû au changement projeté de RX5..... 39

**Figure 24:** Analyse de régression par panel historique pour le PIB par habitant, et les 3 secteurs (agriculture, industrie et services) ..... 47

**Figure 25:** Réponse de la valeur ajoutée de l’agriculture à la déviation de la température par rapport à la moyenne historique (graphique de gauche) et par rapport aux extrêmes climatiques (graphique de droite)..... 49

## Liste des tableaux

**Tableau 1:** Degrés de sécheresse et d'humidité selon les valeurs SPEI..... 28

**Tableau 2:** Statistiques descriptives des données de l'EWEMBI et de la DGESS de 1984 à 2013 ..... 31

**Tableau 3:** Résumé des résultats des analyses pour les différents modèles testés..... 36

**Tableau 4:** Résultats de l’analyse pour le PIB par habitant et les valeurs ajoutées des 3 secteurs (agriculture, industrie, service) ..... 48

**Tableau 5:** Liste des modèles de circulation générale (GCM) et des modèles climatiques régionaux (RCM) utilisés ..... 50

**Tableau 6:** Régression de panel groupée..... 54

**Tableau 7:** Régression à effets fixes..... 55

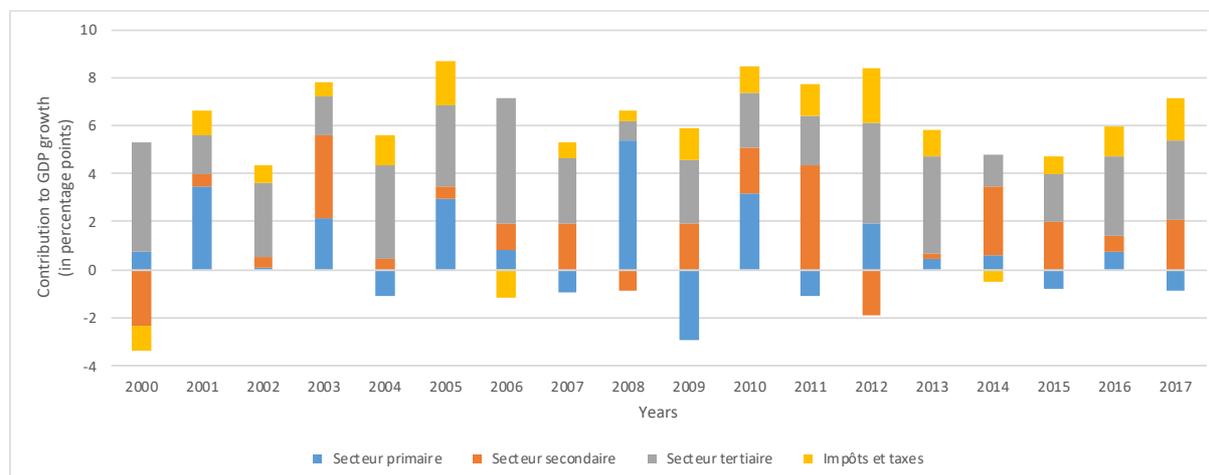
# 1. Introduction

## 1.1. Aperçu de la croissance économique et du développement au Burkina Faso

### 1.1.1. Généralité

Le Burkina Faso est un pays à faible revenu, sans accès à la mer, et dont la population croît à un taux moyen annuel de 3,1%. Son taux de croissance économique est en moyenne d'environ 6 % au cours de la dernière décennie<sup>1</sup>, avec la plus forte croissance dans l'agriculture vivrière, la production de coton et les activités minières (BAD, 2019). En termes de contribution à la croissance, le secteur des services a été, en moyenne, le plus grand contributeur, suivi du secteur de l'industrie, et enfin, du secteur agricole qui a même montré des contributions négatives pour les années 2004, 2007, 2009, 2011, 2015, et 2017 (Figure 1). Toutefois, en 2008, la contribution de l'agriculture a été le principal moteur de la croissance, en particulier avec de fortes hausses de la production de maïs, de sorgho et de mil, quoique non durables.

Figure 1: Contribution des différents secteurs à la croissance du PIB du Burkina Faso de 2000-2017



Source: Calculs faits par les auteurs en utilisant les comptes nationaux aux prix constant de 1999 XOF de l'INSD.

On estime que l'agriculture burkinabè a contribué à environ 28 % du PIB en 2017. Malgré une forte croissance économique entre 2008 et 2016, le pays reste l'un des plus pauvres au monde. L'indice de développement humain 2018<sup>2</sup> du PNUD classe le Burkina Faso au 183e rang sur 189 pays, avec 66,8 % des employés travaillant à moins de 3,10 dollars par jour, et seulement 4,0 % de la population active totale considérée comme qualifiée. 71,3% de la population totale vit en milieu rural, et seulement 0,8% d'entre elle, ont accès à l'électricité. Selon le rapport 2018<sup>3</sup> sur les ODD pour l'Afrique, 7 des 16 objectifs des ODD<sup>4</sup> applicables sont

<sup>1</sup> Sur la base des données de l'INSD

<sup>2</sup> Source: <http://hdr.undp.org/en/countries/profiles/BFA>. Consulté le 19 March 2019

<sup>3</sup> Source: <http://unsdsn.org/wp-content/uploads/2018/07/AFRICA-SDGS-2018-Complete-Report-WEB.pdf>

<sup>4</sup> ODDs 1-5, 7, et 9: Pas de pauvreté; Faim zero; Bonne santé et bien-être; Education de qualité; Egalité entre les sexes; Energie propre et d'un coût abordable; et industrie, innovation et infrastructure

considérés comme des défis majeurs pour le Burkina Faso, les progrès concernant l'ODD 1 sur la pauvreté allant dans la direction opposée.

A ces problèmes de développement s'ajoutent l'instabilité politique et les conflits ethniques qui freinent l'accélération de la croissance économique et du développement. Depuis 2016, il y a eu 200 attaques au Burkina Faso et le pays est confronté à une crise de déplacement interne. L'ONU estime à 1,2 million le nombre de personnes ayant besoin d'aide humanitaire, et environ 70 000 personnes ont été contraintes de fuir leur foyer au cours des deux premiers mois de 2019<sup>5</sup>. En avril 2019, plus de 148 000 personnes avaient été déplacées dans les communes de Djibo, Arbinda et Kelbo (province de Soum) et Barsalogho (province de Sanmatenga), et environ 25 000 réfugiés maliens résidaient au Sahel, selon le Haut-Commissariat des Nations Unies pour les réfugiés (HCR<sup>6</sup>). Ces attaques ont perturbé les moyens de subsistance des personnes déplacées et les ont rendues fortement dépendantes de l'aide humanitaire. Le pays, en particulier la région sahélienne, a subi au moins 80 attaques de groupes islamistes armés, qui ont fait de nombreux morts, déplacé des milliers de personnes et fermé des écoles (Human Rights Watch<sup>7</sup>). Les personnes déplacées à l'intérieur de leur propre pays risquent d'être plus exposées à l'insécurité alimentaire que les populations non déplacées, en raison de la perte de leurs moyens de subsistance et de l'adoption de mécanismes d'adaptation irréversibles qui réduisent de façon permanente les actifs tels que la vente de bétail ou la consommation de leurs propres cultures (ACAPS<sup>8</sup>).

### 1.1.2. Les défis de l'agriculture

L'économie repose encore fortement sur l'agriculture paysanne à petite échelle, avec environ 80 % de sa population active employée dans le secteur (Banque mondiale<sup>9</sup>), où les principales cultures vivrières sont le maïs, le sorgho et le mil et les principales cultures de rente sont le coton et l'arachide<sup>10</sup>. Avec un taux de croissance démographique élevé et un taux de productivité agricole relativement faible, le Burkina Faso est confronté aux problèmes de sécurité alimentaire et de pauvreté rurale<sup>11</sup>. Pour faire face à ce problème, les zones agricoles se sont rapidement étendues (augmentation de la pression humaine) constituant ainsi un défi pour la sauvegarde des zones protégées et la protection de l'environnement à l'avenir. En 2001, la superficie agricole irriguée ne représente que 0,13 % de la superficie agricole pluviale et n'a augmenté qu'à 0,3 % en 2014 (Knauer et al., 2017). Les conditions climatiques, en particulier dans le nord du pays, où les précipitations sont limitées et les températures élevées, ainsi que la dépendance à l'égard de l'agriculture pluviale et des sols pauvres

---

<sup>5</sup> Source: <https://www.aljazeera.com/programmes/insidestory/2019/03/violence-increasing-burkina-faso-190308174211600.html>. Consulté le 26 March 2019

<sup>6</sup> Source: FAO/GIEWS. Reference date 31.05.2019. Accessed on 09.07.2019. URL: <http://www.fao.org/giews/countrybrief/country.jsp?code=BFA>

<sup>7</sup> Source: <https://www.hrw.org/report/2018/05/21/day-we-fear-army-night-jihadists/abuses-armed-islamists-and-security-forces>

<sup>8</sup> Source: Burkina Faso conflict and displacement briefing note - 19 January 2019.

[https://www.acaps.org/sites/acaps/files/products/files/20190124acapsstartbriefingnoteburkinafasoviolenaceand\\_displacements.pdf](https://www.acaps.org/sites/acaps/files/products/files/20190124acapsstartbriefingnoteburkinafasoviolenaceand_displacements.pdf)

<sup>9</sup> Source: Country overview, accessed 26.03.2019. <http://www.worldbank.org/en/country/burkinafaso/overview>

<sup>10</sup> Source: Institut National de la Statistique et de la Démographie (INSD)

<sup>11</sup> Source: IFAD (2019). Burkina Faso: Evaluation de la stratégie et du programme de pays.

[https://www.ifad.org/documents/38714182/40810723/Burkina+ESPP+versionfinale\\_workshop.pdf/b6b4ced9-93fd-4794-b17d-010970a5d8fd](https://www.ifad.org/documents/38714182/40810723/Burkina+ESPP+versionfinale_workshop.pdf/b6b4ced9-93fd-4794-b17d-010970a5d8fd)

contribuent largement à la vulnérabilité du secteur aux chocs climatiques tels que les sécheresses qui réduisent la production agricole et augmentent les prix alimentaires, aggravant essentiellement l'insécurité alimentaire et la pauvreté. Les ressources limitées en terres et en eau ont également accéléré l'exode rural dans le pays (Atlas de l'USAID, 2017<sup>12</sup>).

L'état des sols du Burkina Faso s'est fortement dégradé dans les années 1960 et 1970 en raison des pressions démographiques croissantes et de l'augmentation des besoins alimentaires, qui ont conduit à l'utilisation abusive des terres agricoles et au surpâturage. La dégradation des terres, conjuguée à une série d'épisodes de sécheresse entre 1968-1973 et 1982-1984, a entraîné une grave insécurité alimentaire et un approvisionnement en eau insuffisant pour la population vulnérable croissante.

### 1.1.3. Les pratiques d'adaptation

Face à la dégradation des conditions, les agriculteurs ont commencé à adopter des techniques agricoles pour récupérer la qualité des sols et s'adapter à la faible disponibilité de l'eau : il s'agit entre autres du zaï, des cordons pierreux et des demi-lunes. Le zaï se réfère aux fosses de plantation utilisées pour réhabiliter les terres dures et stériles, qui ont été améliorées en agrandissant les fosses et en appliquant des déchets organiques pour augmenter la qualité (nutriments) du sol. Les cordons pierreux sont des lignes de pierres semi-perméables autour et à l'intérieur des champs, conçues pour retenir l'eau de pluie et augmenter l'humidité du sol, évitant ainsi le ruissellement et l'érosion du sol. Les demi-lunes sont des fossés semi-circulaires conçus pour contenir l'eau de pluie et irriguer les cultures plantées le long de leurs bords. L'application de ces pratiques a permis d'augmenter considérablement la productivité au Burkina Faso jusqu'à 500 % lorsqu'elles sont correctement appliquées (ODI, 2014<sup>13</sup> ; Banque mondiale, 2005<sup>14</sup>). Ouédraogo et al. (non publié) ont documenté l'étendue et l'intensité de la mise en œuvre de ces pratiques de conservation des sols et de l'eau et d'autres pratiques d'adaptation agricole dans les différentes régions du Burkina Faso (Figure 2).

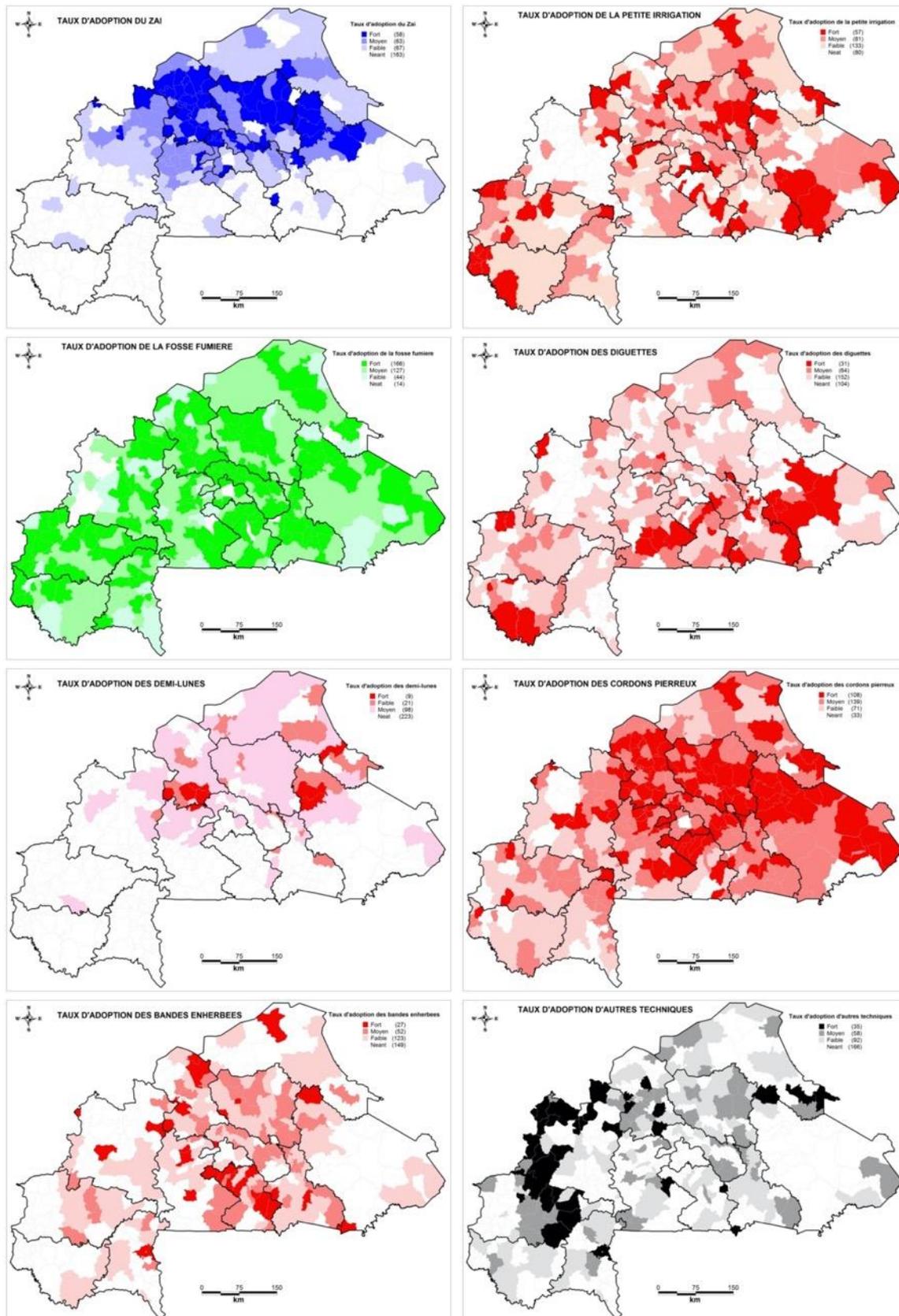
---

<sup>12</sup> Source: USAID Atlas August 2017, [https://www.climatelinks.org/sites/default/files/asset/document/20170807USAID%20ATLASFFP\\_BurkinaFaso.pdf](https://www.climatelinks.org/sites/default/files/asset/document/20170807USAID%20ATLASFFP_BurkinaFaso.pdf)

<sup>13</sup> Source: <https://www.odi.org/sites/odi.org.uk/files/odi-assets/publications-opinion-files/9154.pdf>

<sup>14</sup> Source: <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/10754/321840iknt80.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Figure 2: Etendue et intensité de mise en oeuvre des pratiques d'adaptation en agriculture au Burkina Faso



Source: Ouédraogo Issa et al., INERA/ICRISAT (non encore publié)

#### 1.1.4. Programmes et initiatives du gouvernement

Plusieurs programmes globaux du gouvernement ont été mis en œuvre pour améliorer l'agriculture au Burkina Faso : le Programme d'ajustement du secteur agricole (PASA) dans les années 1990, axé sur la libéralisation du commerce des produits agricoles, la privatisation des entreprises agro-industrielles et de toutes les entreprises agricoles contrôlées par l'État, et la suppression des subventions aux intrants agricoles ; la Stratégie de développement rural (SDR) en 2003 dans le cadre du Cadre stratégique pour la réduction de la pauvreté (CSLP) qui vise à accroître la productivité agricole et à assurer une gestion durable des ressources naturelles, entre autres, et le Programme national du secteur rural (PNSR) dans le cadre de la Stratégie pour la croissance accélérée et le développement durable (SCADD 2011-2015) qui vise 10.7 pour cent du taux de croissance annuel moyen du secteur agricole (FAO, 2013).<sup>15</sup>

Les politiques clés du gouvernement pour soutenir les agriculteurs de 2007 à 2012 vont de pair avec la résolution de l'insécurité alimentaire locale. Il s'agit notamment des subventions aux intrants (c'est-à-dire la distribution de semences améliorées et la subvention de la moitié du coût des engrais) pour les céréales, la constitution de stocks (c'est-à-dire l'achat de produits céréaliers au prix plancher garanti), le soutien des prix pour les producteurs de coton afin de garantir des revenus durables, l'augmentation des investissements et dépenses publiques dans les systèmes d'irrigation et la promotion de la petite irrigation, en garantissant un accès et un régime foncier rural équitable par la loi foncière rurale de 2009 et la réorganisation Agraire et Foncière de 2012 (FAO, 2013<sup>16</sup> and 2014<sup>17</sup>).

De nos jours, le Plan National de Développement Economique et Social (PNDES, 2016-2020) sert de cadre de référence aux actions de développement du Gouvernement. Il a pour objectif global de transformer structurellement l'économie burkinabè, pour une croissance forte, durable, résiliente, inclusive, créatrice d'emplois décents pour tous et induisant l'amélioration du bien-être social. Dans le secteur agricole, on peut citer entre autres, le Deuxième Programme National du Secteur Rural (PNSR II, 2016-2020) dont l'objectif global est d'assurer la sécurité alimentaire et nutritionnelle par le développement durable d'un secteur agrosylvo-pastoral, halieutique et faunique productif et résilient, davantage orienté vers le marché.

---

<sup>15</sup> FAO review of food and agricultural policies in Burkina Faso 2005-2011. Source: <http://www.fao.org/3/a-at460e.pdf>

<sup>16</sup> FAO review of food and agricultural policies in Burkina Faso 2005-2011. Source: <http://www.fao.org/3/a-at460e.pdf>

<sup>17</sup> Source: <http://www.fao.org/3/i3760e/i3760e.pdf>

## 1.2. Le climat au Burkina Faso

A l'intérieur des frontières politiques du Burkina Faso se trouvent trois zones climatiques différentes<sup>18</sup> : le climat chaud du désert au nord (sahélien), le climat chaud semi-aride au milieu (nord du Soudan) et le climat tropical des savanes au sud (sud du Soudan) (Kottek et al., 2006). C'est dans la zone du Sud-Soudan que les précipitations sont les plus abondantes parmi les trois zones, avec une moyenne de 900 à 1200 mm, et la saison des pluies dure six mois. La zone du nord du Soudan est la plus touchée par l'activité humaine et connaît une saison des pluies d'environ 4-5 mois, avec une pluviométrie totale moyenne de 800 à 900 mm. La zone sahélienne n'enregistre des précipitations que pendant 3 mois, avec une pluviométrie moyenne totale de 300 à 600 mm. La saison sèche s'étend d'octobre à mars et se caractérise par des vents violents soufflant du nord-est au sud-ouest. Enfin, la saison des pluies commence en mai ou juin et dure jusqu'en septembre (Ouedraogo et al., 2006).

Les projections climatiques futures anticipent un réchauffement supplémentaire et des événements climatiques plus extrêmes (GIEC, 2014). La région sahélienne, en particulier, qui est déjà très dégradée du point de vue de l'environnement, devrait voir sa température augmenter 1,5 fois plus que la moyenne mondiale (Forum des Nations Unies<sup>19</sup>). L'augmentation de la température d'ici la fin du siècle par rapport à la période préindustrielle est déjà estimée à environ 3,0-3,4°C si les politiques actuelles sont appliquées.<sup>20</sup>

## 1.3. Défis futurs en matière de développement

Les principaux défis du Burkina Faso sont sa vulnérabilité aux chocs climatiques et la volatilité des prix de ses principaux produits d'exportation, qui aggravent la pauvreté et l'insécurité alimentaire (World Bank<sup>21</sup> ; FAO). A court terme, la Banque Africaine de Développement<sup>22</sup> prévoit un léger ralentissement de la croissance économique du Burkina Faso en raison des troubles sociaux, de la détérioration des conditions de sécurité et de la volatilité des prix en fonction des précipitations pour des produits clés comme le pétrole, l'or et le coton.

Les principaux impacts du changement climatique sur l'agriculture sont la perte de récoltes et de productivité, la raréfaction de l'eau et la dégradation des terres, l'augmentation des épidémies de ravageurs et de maladies et l'augmentation des conflits autour des ressources naturelles (USAID, 2017).

Les sécheresses et les inondations dans cette région ont déjà considérablement perturbé les moyens d'existence, les revenus et la sécurité alimentaire des populations (Forum des Nations

---

<sup>18</sup> Les régions Sahel, Nord, et Centre-Nord appartiennent au climat désertique chaud; la Boucle du Mouhoun, Centre-Ouest, Centre-Sud, Centre, Plateau Central, Centre-Est et Est appartiennent au climat semi-aride chaud; et Cascade, Sud-Ouest et Haut-Bassin appartiennent au climat de savane tropicale.

<sup>19</sup> Source: <https://news.un.org/en/story/2018/11/1025671>. Consulté le 26 March 2019.

<sup>20</sup> Source: Climate Action Tracker. <https://climateactiontracker.org/global/temperatures/>. Consulté le 07 Nov 2019.

<sup>21</sup> <http://www.worldbank.org/en/country/burkinafaso/overview>. Accessed 19 March 2019.

<sup>22</sup> AfDB Outlook 2019 <https://www.afdb.org/fr/countries/west-africa/burkina-faso/burkina-faso-economic-outlook/>. Consulté le 26 March 2019.

Unies<sup>23</sup>). La pénurie de ressources qui en résulte peut entraîner de nouveaux déplacements de personnes, de nouveaux conflits et des crises humanitaires. Les secteurs à forte croissance du Burkina Faso - l'agriculture et l'exploitation minière - sont les deux secteurs les plus vulnérables au changement climatique, principalement en raison de la dépendance aux précipitations en tant qu'intrant agricole et source directe d'eau, ainsi que ses travailleurs qui sont les plus exposés à l'environnement, qui sont donc exposés à un risque élevé de productivité non optimale, ou même de maladies thermiques (par exemple, maladies cardiovasculaires, fatigue due à la chaleur, maladie mentale), du fait de la hausse des températures dépassant les capacités du corps humain.

#### 1.4. Objectif et contexte de l'étude

L'objectif de ce présent travail est de contribuer à la génération de connaissances sur l'impact des changements climatiques (notamment futurs) sur l'économie du Burkina Faso et ses secteurs pour permettre une meilleure préparation aux actions d'adaptation. Spécifiquement, cette étude a exploré l'impact des changements climatiques sur le PIB par habitant du Burkina Faso, d'une part, et l'impact des changements climatiques sur la productivité agricole (du maïs) dans les régions du Burkina Faso, d'autre part.

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la mise en œuvre du Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation (PAS-PNA) financé par le Ministère fédéral Allemand de l'Environnement, de la Protection de la Nature et la Sûreté Nucléaire (BMU), et mis en œuvre par la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) en collaboration avec Climate Analytics. Le projet PAS-PNA est sous-tutelle du Ministère de l'Environnement, de l'Economie Verte et du Changement Climatique (MEEVCC) du Burkina Faso.

Selon les Directives techniques du Groupe d'experts des pays les moins avancés (PMA), le processus des Plans Nationaux d'Adaptation (PNA) doit dorénavant reposer sur des connaissances scientifiques solides (CCNUCC, 2012). Ces connaissances scientifiques sont le focus de la composante 2 du projet PAS-PNA (mise en œuvre par Climate Analytics). La composante envisage d'évaluer et renforcer les bases et capacités scientifiques dans différents secteurs, pour faciliter d'avantage la planification et la programmation de mesures d'adaptation.

---

<sup>23</sup> Source: <https://news.un.org/en/story/2018/11/1025671>. Consulté le 26 March 2019

## 2. Les impacts macroéconomiques du changement climatique au Burkina Faso

### 2.1. Description résumée de la méthodologie et des données utilisées

Un modèle développé par Climate Analytics (Baarsch et al., 2019) pour évaluer les impacts dans les pays africains a été utilisé dans le cadre du projet d'Appui Scientifique aux Processus de Plans Nationaux d'Adaptation (PAS-PNA) au Burkina Faso. L'analyse qualitative est souvent difficile à réaliser en Afrique en raison de l'absence de données dans certains pays qui sont également susceptibles d'être fortement touchés par le changement climatique. Pour remédier au manque de points de données dans certains pays, le modèle macroéconomique dérive la réponse historique du PIB par habitant aux changements de température et de précipitations à partir d'une régression de panel à l'échelle subsaharienne, effectue une randomisation de Monte Carlo pour affiner les estimations au niveau national, puis applique ces coefficients nationaux spécifiques aux projections climatiques d'un ensemble de modèles de circulation générale (MCG) pour estimer les effets potentiels des températures et précipitations futures sur le PIB par habitant dans un pays donné (Burkina Faso, dans ce cas).

### 2.2. Résultats et conclusions

En utilisant les régressions par panel historique à l'échelle de l'Afrique subsaharienne (Figure 3), les résultats suivants ont été obtenus sur la sensibilité du PIB et des valeurs ajoutées brutes par secteurs aux changements climatiques.

#### 2.2.1. Sensibilité du PIB par habitant du Burkina Faso aux changements climatiques

- la réponse du PIB par habitant aux écarts de la température moyenne annuelle par rapport à la moyenne historique. L'impact estimé d'une augmentation de 1 degré de la température correspond à une réduction de 0,8 % du PIB par habitant. En raison de la non-linéarité de l'impact, une augmentation de 2 degrés de la température entraîne une augmentation exponentielle de l'impact estimé, soit une réduction de 7,4 % du PIB par habitant (Figure 4).
- la réponse du PIB par habitant à un changement d'une unité dans chacune des catégories de l'indice de précipitation normalisé (IPN) par rapport à la normale (valeurs de l'IPN comprises entre -0,5 et +0,5) : Aussi bien le déficit extrême en précipitations (IPN inférieur à - 1,5) que l'excédent extrême en précipitations (IPN supérieur à 1,5) suggèrent une réduction du PIB par habitant de 8,4 % et 9,6 % respectivement. Les conditions légèrement humides (IPN entre 1 et 1,5) ont un impact positif sur le PIB par habitant, ce qui implique que l'activité économique bénéficie d'une augmentation des précipitations. Cela peut être dû à la dépendance de l'économie globale à l'agriculture pluviale (Figure 5).
- l'incidence estimative sur le PIB par habitant des hausses de température projetées dans le scénario de faible réchauffement et dans le scénario de réchauffement élevé. Dans les années 2020, le PIB par habitant devrait être réduit de 3,1 % dans les deux

scénarios. Dans les années 2040, on estime que le scénario de réchauffement élevé (Profil Représentatif d'Évolution de la Concentration – PREC ou RCP 8.5) entraînera une réduction de 11,7 %, soit 8 points de pourcentage de moins que les estimations du scénario de faible réchauffement (PREC ou RCP 2.6) qui est une réduction de 3,7 %.

- En raison du désaccord entre les modèles climatiques quant à l'évolution future des précipitations, il n'a pas été possible d'établir des projections des impacts dus aux prévisions de précipitations.

### 2.2.2. Sensibilité de la valeur ajoutée brute (VAB) par secteur du Burkina Faso aux changements climatiques

- En appliquant la même équation à la valeur ajoutée brute (VAB) sectorielle des trois principaux secteurs économiques - agriculture, industrie et services - les résultats montrent que la température sous forme linéaire est statistiquement non significatif, alors que la forme quadratique n'est significatif que pour l'industrie et les services. L'impact calculé d'une augmentation de 1 degré de la température annuelle moyenne sur la VAB de l'industrie et des services est respectivement de -3,8% et -4,8%. Une augmentation de 2 degrés de la température se traduit par une incidence de -15,2 % et de -19,2 %, respectivement (Figure 4).
- Les secteurs réagissent différemment aux tranches de IPN : l'agriculture présente des réductions statistiquement significatives de la VAB dans des conditions extrêmes de sécheresse et d'humidité, les premiers ayant un impact plus important. Pour le secteur industriel, seules les conditions de sécheresse extrême ont un impact statistiquement significatif. Enfin, le secteur des services ne montre aucun impact statistiquement significatif pour aucune des tranches de l'IPN.

Figure 3: Sensibilité de l'économie à l'échelle de l'Afrique aux écarts de température moyenne

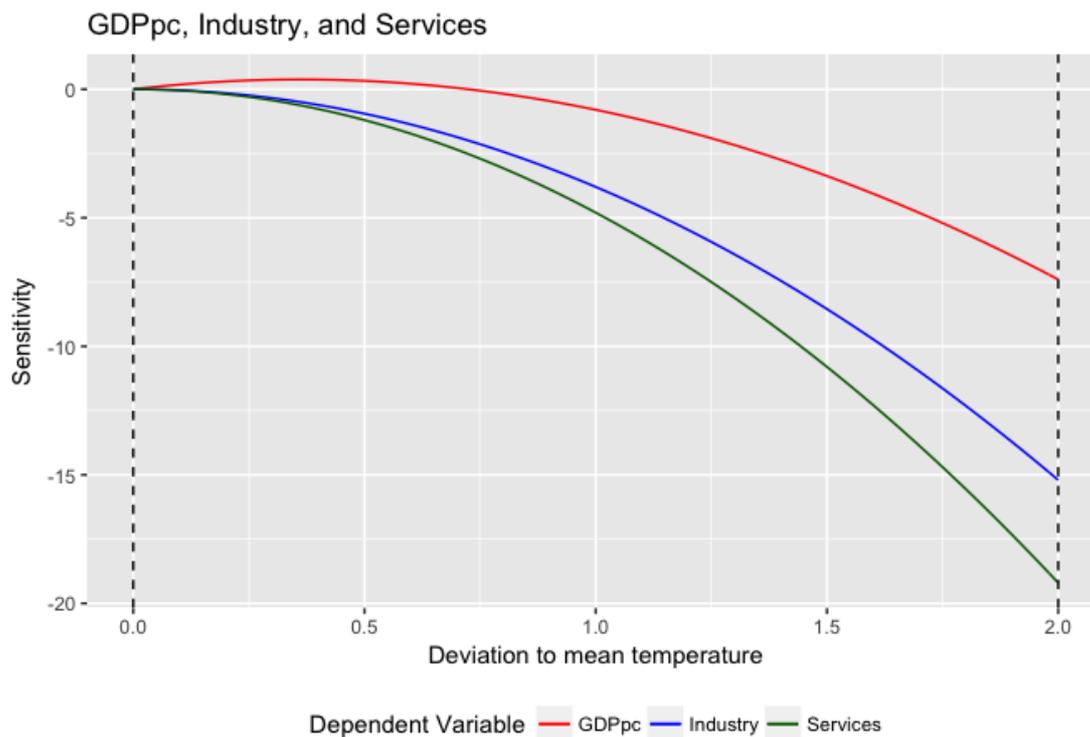


Figure 4: Estimations spécifiques au Burkina Faso à partir de la randomisation de Monte Carlo des impacts du PIB par habitant (en pourcentage) pour chaque degré de variation de la température moyenne

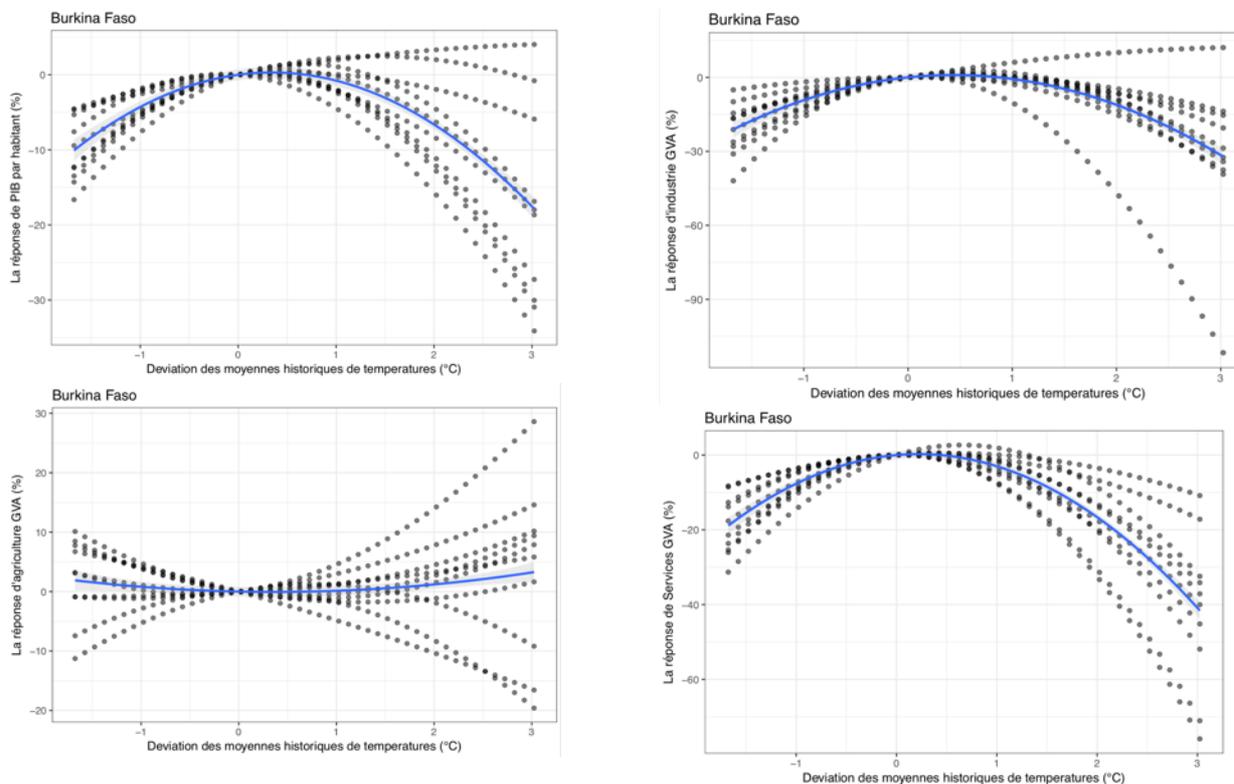
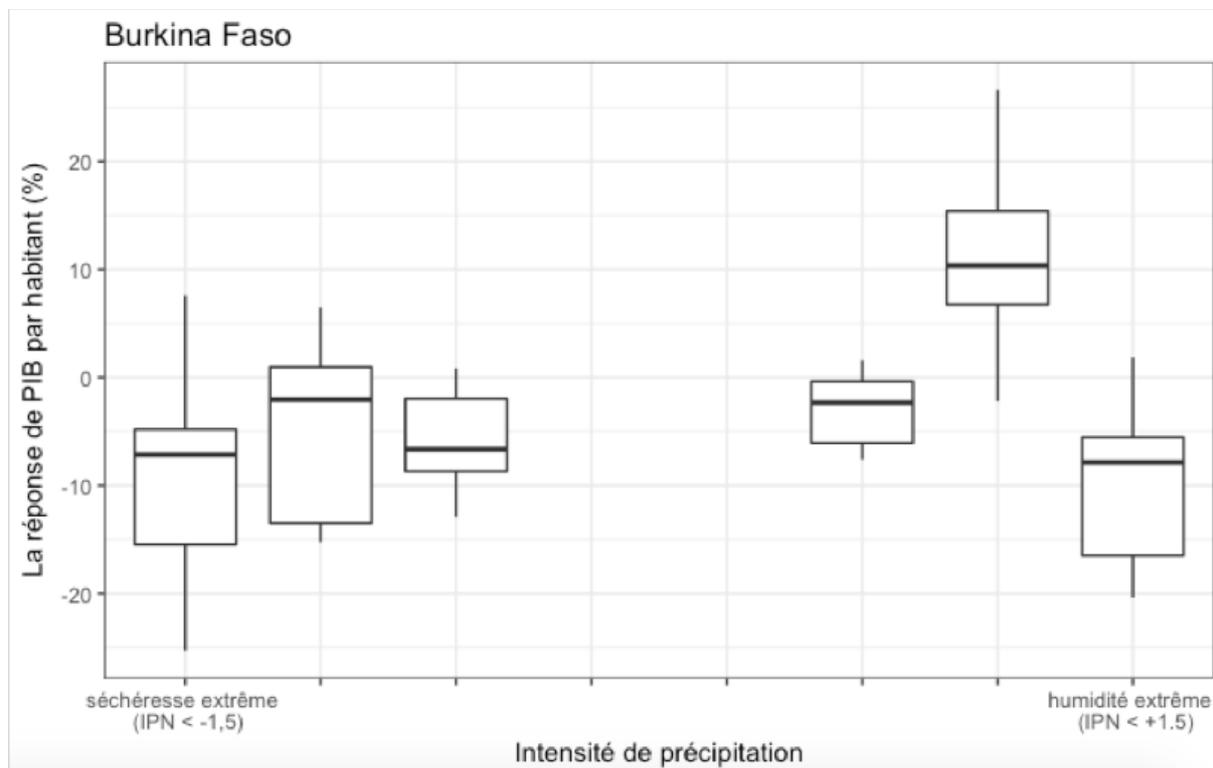


Figure 5: Estimations spécifiques au Burkina Faso à partir de la randomisation de Monte Carlo des impacts sur le PIB par habitant (en pourcentage) pour chaque écart unitaire par rapport aux valeurs normales de l'IPN ( $-0,5 < IPN < 0,5$ )

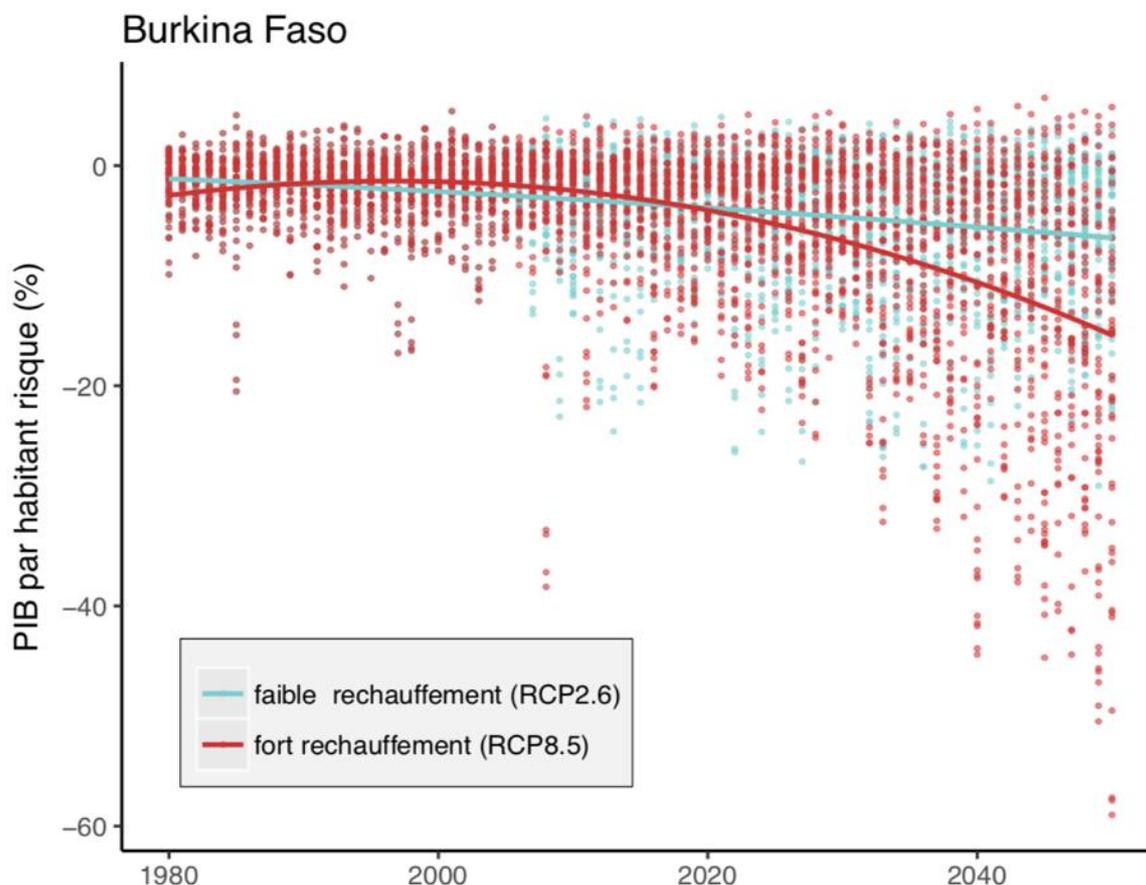


### 2.2.3. Risque projeté des changements climatiques sur le PIB par habitant du Burkina Faso

En utilisant les estimations spécifiques au pays (Burkina Faso) tirées de la régression par panel historique et de la randomisation de Monte-Carlo, ainsi que des projections climatiques provenant d'un ensemble de cinq modèles de circulation générale (MCG) quadrillés/maillés et corrigés des biais, on a estimé les projections d'impact pour une trajectoire menant à une température moyenne globale en surface de 0,3-1,7°C environ à la fin du siècle (PREC 2,6) et à un réchauffement plus marqué de 2,6-4,8°C environ d'ici la fin du siècle (PREC 8,5). Les résultats montrent que dans le scénario de réchauffement élevé, le PIB par habitant risque de diminuer de 15,6 %, contre une baisse d'environ 2,4 % dans le scénario de faible réchauffement en 2050<sup>24</sup> (Figure 6).

<sup>24</sup> La méthodologie et les résultats de l'étude ont récemment été publiés: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305750X1930347X>. Un site a été développé pour rendre disponibles au public les résultats de tous les pays, et est accessible sur le lien: [https://explorer.et0.co/en/ee110\\_en/](https://explorer.et0.co/en/ee110_en/).

Figure 6: Impact prévu sur le PIB par habitant selon deux scénarios de réchauffement : le scénario de faible réchauffement (RCP 2.6) et le scénario de réchauffement élevé (RCP 8.5)



**Encadré 1:** Amendements reçus des experts nationaux sur l'étude macro-économique et la déclinaison dans l'étude sur les productions agricoles

Les résultats du Modèle macroéconomique pour l'Afrique, appliqué au Burkina Faso, ont été présentés lors d'un premier atelier sur la vulnérabilité dans le cadre du projet PAS-PNA à Ouagadougou en octobre 2018. Les participants à l'atelier ont indiqué qu'un modèle calibré uniquement sur les données du Burkina Faso serait plus souhaitable. Cependant, les tentatives antérieures de Climate Analytics pour estimer le même modèle uniquement avec les données du Burkina Faso, au niveau pays, ont échoué et n'ont pas abouti à des résultats concluants. Bien que les participants aient exprimé la pertinence d'une telle étude, ils notent la nécessité d'un modèle spécifique au Burkina Faso qui inclut les caractéristiques suivantes :

- Une méthodologie co-développée et co-appropriée par les experts nationaux pour une utilisation future.
- L'utilisation de données d'origine locale provenant des services de statistique officiels
- Une étude sectorielle infranationale, dont les résultats peuvent être utilisés pour la planification du développement.

Sur la base de ces observations (et prenant en compte la disponibilité des données), il a été décidé de compléter l'étude macro-économique (utilisant le PIB par habitant) avec une évaluation de l'impact des changements climatiques sur le secteur de l'agriculture en prenant une culture spécifique (ici le maïs) en exemple. Cette partie du travail est présentée au point 3 suivant.

### 3. Les impacts du changement climatique sur la productivité agricole au Burkina Faso – cas du maïs

#### 3.1. Bref aperçu du contexte

Sur la base de l'intérêt général des participants au premier atelier sur les études de vulnérabilités du projet PAS-PNA et d'autres parties prenantes, un modèle économétrique axé sur les risques agricoles du changement climatique dans différentes régions du Burkina Faso a été jugé très utile pour le processus de planification du gouvernement.

La méthodologie décrite dans ce document est le résultat d'une combinaison de méthodes économétriques existantes trouvées dans des publications scientifiques récentes sur le changement climatique et l'agriculture en Afrique et au Burkina Faso ; et les échanges constants avec les économistes nationaux, les responsables gouvernementaux et les principales parties prenantes qui fournit deux atouts principaux : premièrement, que les résultats sont directement utilisables dans les processus de planification du pays ; et deuxièmement, que les informations et les données locales sont utilisées pour assurer que le modèle peut être transféré et maintenu par les économistes nationaux même après la fin du projet PAS-PNA. Les échanges se sont déroulés par courrier électronique, par des appels Skype et lors des réunions et ateliers organisés à Ouagadougou.

En raison des considérations régionales du modèle agricole et du changement de la variable dépendante, la plupart, sinon la totalité, des variables de contrôle initialement prises en compte dans le modèle macroéconomique pour l'Afrique ne seront plus applicables en raison de leur disponibilité uniquement au niveau national, ainsi que de leur relative non pertinence pour la production agricole.

#### Encadré 2: Le processus de co-développement

Le modèle économétrique agricole du Burkina Faso a été élaboré conjointement avec des chercheurs nationaux et les principales parties prenantes des ministères nationaux au cours des étapes suivantes du processus :

- Une première version provisoire de la méthodologie a été proposée par Climate Analytics
- Elle a été revue et amendée par un groupe d'experts économistes Burkinabè
- La méthodologie a ensuite été révisée par Climate Analytics
- Des données d'origine nationale ont ensuite été mobilisées pour alimenter le modèle
- D'autres informations pertinentes concernant les particularités des différentes régions ou cultures d'intérêt ont aussi été recherchées.
- La méthodologie révisée a ensuite été mise en œuvre suivi de la rédaction du présent rapport

### 3.2. Méthodologie de l'étude de l'impact des changements climatiques sur la productivité agricole – cas du maïs

La méthodologie s'inspire principalement de Schlenker & Roberts (2009) et Schlenker & Lobell (2010), dont les caractéristiques et les spécifications sont les plus proches de ce que nous voulons accomplir avec cette étude par rapport aux autres méthodes économétriques existantes<sup>25</sup>:

- l'étude des effets non linéaires de la température, en particulier sur le rendement des cultures<sup>26</sup> sous l'effet des changements climatiques, en ayant une fonction linéaire de la variable température (intervalles de 5 °C, de sorte que la température est représentée par le nombre de jours qui tombent dans l'intervalle [10 °C, 15 °C); [15°C, 20°C); [20°C, 25°C); [25°C, 30°C); [30°C, 35°C); [35°C, ∞°C)
- les cultures fortement irriguées ont été exclues afin d'éviter un problème de corrélation entre l'irrigation et les conditions météorologiques, ce qui pourrait biaiser les résultats. En outre, les données sur l'irrigation sont rares dans certaines régions d'Afrique (Schlenker & Lobell, 2010)
- la méthode a été mise au point à l'origine pour une étude infranationale des rendements des cultures aux États-Unis, et a donc été développée spécifiquement pour une zone enclavée
- l'inclusion d'un effet fixe du temps de forme quadratique pour inclure les possibilités de changement technologique exponentiel

Le modèle que nous avons utilisé, étudie l'impact des changements de température et des précipitations sur le rendement agricole, ainsi que les effets des événements extrêmes sur le rendement de cultures individuelles (dans ce cas, le maïs). Le Modèle examine les impacts infranationaux et se concentre donc entièrement sur un pays spécifique - dans ce cas, le Burkina Faso. L'étude a utilisé une régression de données par panel, avec la section transversale des 13 régions du Burkina Faso et la période de 1984 à 2017.

Le modèle élaboré conjointement contribue à la connaissance des impacts du changement climatique en répondant à un plus large éventail de questions à l'aide de divers indices et spécifications de données climatiques qui visent à répondre aux questions suivantes :

- Quel est l'impact des changements de température et des précipitations sur le rendement du maïs ?
- Quel est l'impact des événements extrêmes, comme la sécheresse et les précipitations extrêmes, sur le rendement du maïs ?
- Y a-t-il une différence d'impact lié au mois dans lequel la sécheresse survient ?

---

<sup>25</sup> On cite les exemples de Burke et al. (2015), Dell et al (2009, 2012), qui ont étudié les valeurs ajoutées brutes de l'agriculture (pas spécifique à une culture donnée) et d'autres secteurs, et ont déclaré la non-linéarité de la réponse économique au climat à travers une spécification polynomiale des variables climatiques (i.e., des termes linéaire et quadratique de la température et de la précipitation).

<sup>26</sup> Maïs, soja, et coton pour Schlenker & Roberts (2009); and maïs, sorgho, mil, arachides et manioc pour Schlenker & Lobell (2010)

### 3.2.1. Données agricoles

Les données sur le rendement des cultures (production par superficie récoltée) proviennent de la Direction générale des études et des statistiques sectorielles (DGESS) du Ministère de l'Agriculture et des Aménagements Hydro-agricoles (MAAH) et de l'Institut national de la statistique et de la démographie (INSD) et sont disponibles selon une fréquence annuelle pour les 13 régions pour la période 1984-2017. Les cultures comprennent le mil, le sorgho, le maïs, le riz, le niébé, le coton et l'arachide. Sur la base des suggestions reçues d'économistes nationaux de se concentrer sur les cultures clés - soit pour des raisons de sécurité alimentaire ou de génération de revenus - ainsi que des dialogues bilatéraux entre Climate Analytics et le Centre d'Études, de Documentation et de Recherche Économiques et Sociales (CEDRES), cette étude se concentre sur le maïs non irrigué.

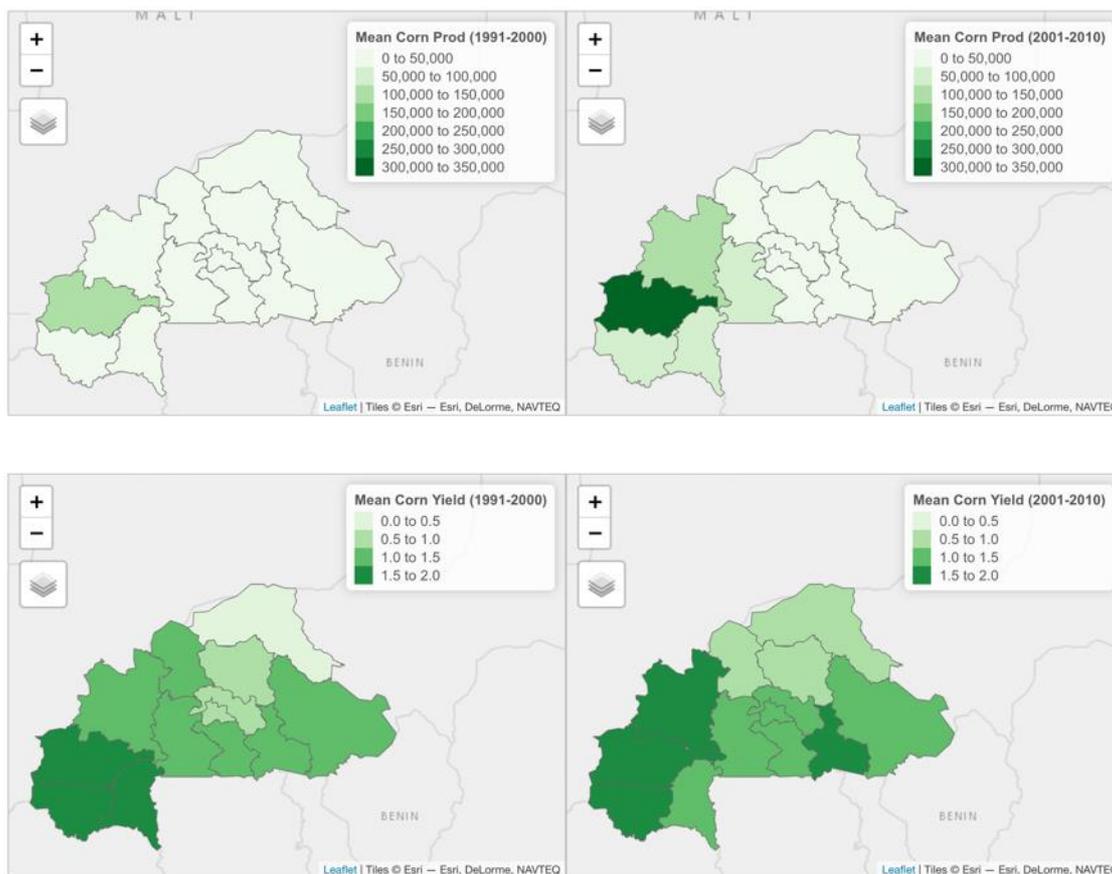
#### 3.2.1.a. Les données sur le maïs

Le maïs est généralement cultivé pendant les mois d'avril à novembre, avec des mois de semis d'avril à juin, des mois de croissance en juillet et des mois de récolte d'août à novembre<sup>27</sup>. La figure 7 montre que la production de maïs a augmenté de manière significative dans toutes les régions, la plus grande production ayant lieu dans les Hauts-Bassins, la Boucle du Mouhoun et les Cascades. Les rendements de la Boucle du Mouhoun et des Cascades ont légèrement augmenté entre les années 1990 et 2000, mais les Hauts-Bassins ont connu une baisse d'environ 0,13 tonne par hectare.

---

<sup>27</sup> Source: FAO/GIEWS. Reference date 31.05.2019. Accessed on 09.07.2019. URL: <http://www.fao.org/giews/countrybrief/country.jsp?code=BFA>

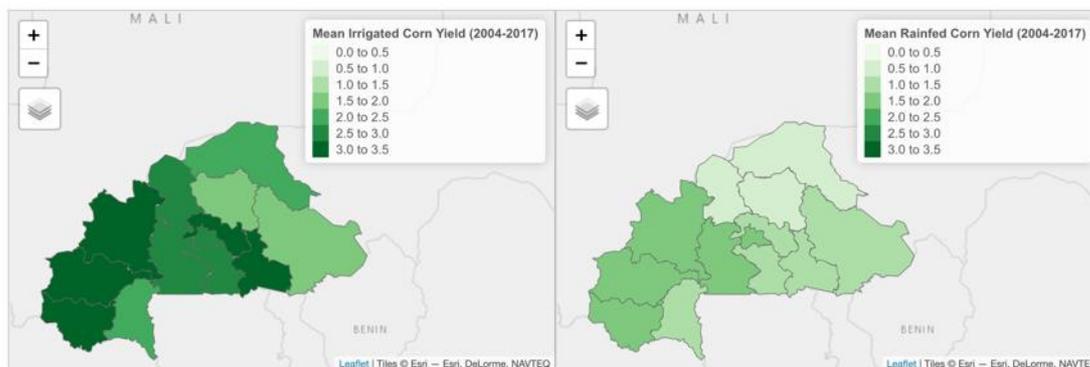
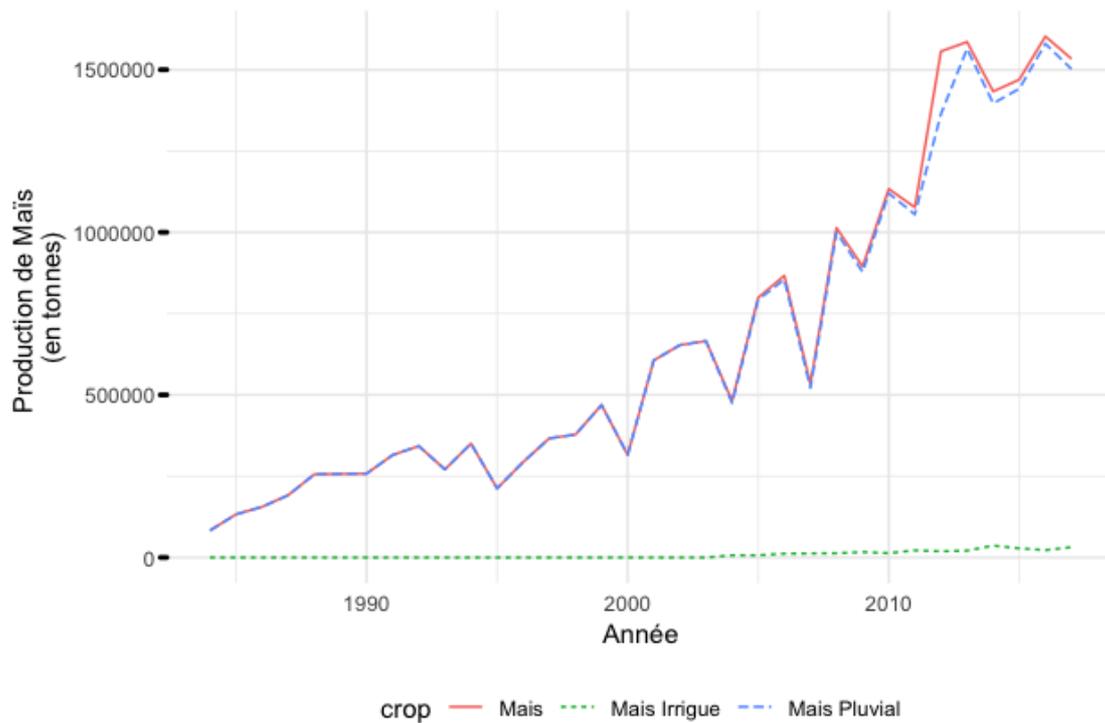
Figure 7: Production moyenne et rendement moyen du maïs de 1991-2010 (en tonnes et tonnes/ha)



Les cartes du haut montrent la production moyenne de maïs de 1991-2000 et 2001-2010, tandis que les cartes du bas montrent le rendement moyen pour les mêmes périodes. Source : Données DGESS/MAAH

Les taux de productivité plus élevés sont dus à l'augmentation de la production irriguée dans les régions au sud du pays, avec la Boucle du Mouhoun produisant en moyenne la plus grande quantité, soit environ 4 500 tonnes sur la période 2004-2017. L'irrigation du maïs n'a commencé qu'en 2004 selon les données de la DGESS/MAAH. Bien que la superficie récoltée augmente régulièrement depuis 2004, la part des terres irriguées par rapport aux terres non irriguées pour la production de maïs reste légèrement inférieure à 1% en 2017. La productivité du maïs irrigué est cependant beaucoup plus élevée que celle du maïs non irrigué. La figure 8 montre la différence de production et de rendement entre le maïs irrigué et le maïs non irrigué.

Figure 8: Production et rendement du maïs irrigué et non irrigué



### 3.2.2. Données climatiques

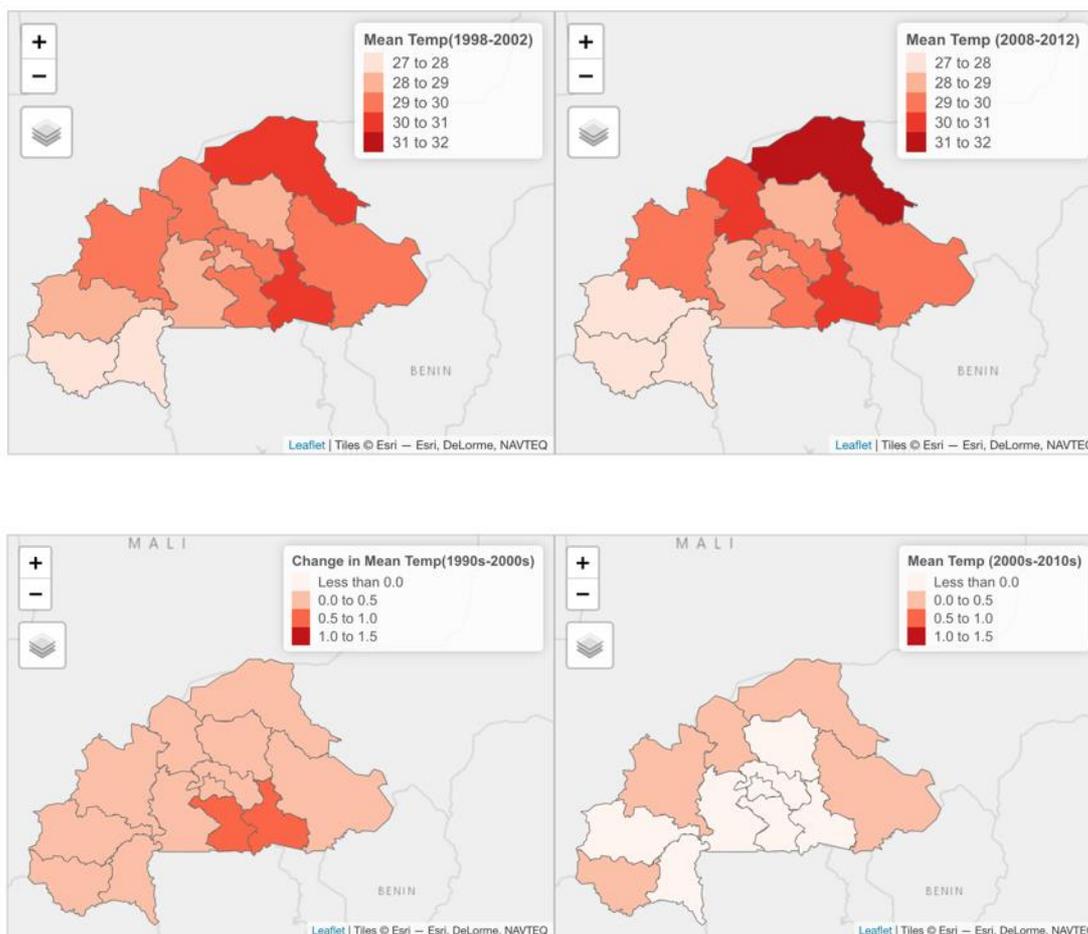
#### 3.2.2.a. Données climatiques historiques

Afin de faire correspondre étroitement les conditions météorologiques et la période critique pour les cultures spécifiques, les données climatiques incluses dans la régression ne comprendront que les données des mois de la période de culture (avril-novembre) en utilisant la température et les précipitations moyennes, les fortes pluies et la sécheresse enregistrées pour ces mois. Les informations sur la période de récolte ont également été consultées avec les partenaires nationaux.

### 3.2.2.a.1. Température moyenne de la saison de croissance

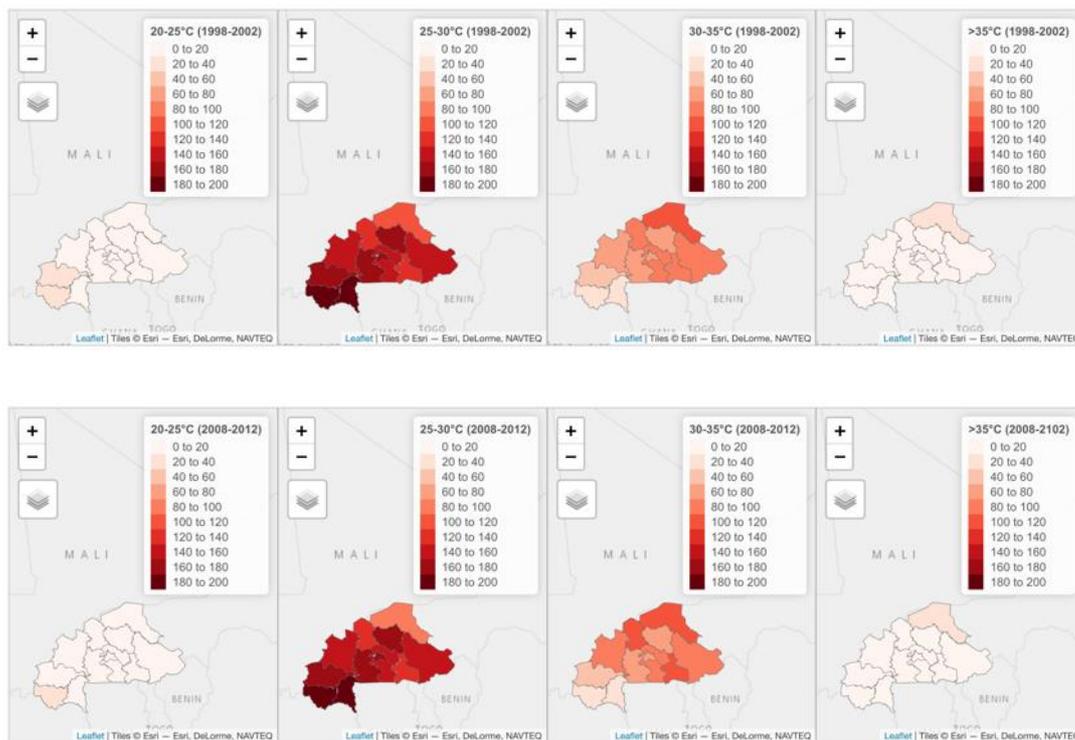
La température est disponible sur une fréquence journalière, mais afin de la faire correspondre à la fréquence annuelle des données agricoles, nous avons calculé la température annuelle moyenne, et des intervalles de température dans lesquels le nombre de jours avec la température moyenne se retrouvant dans la plage des cellules indiquées est compté (Figures 9-11).

Figure 9: Température annuelle moyenne et variation de la température annuelle moyenne



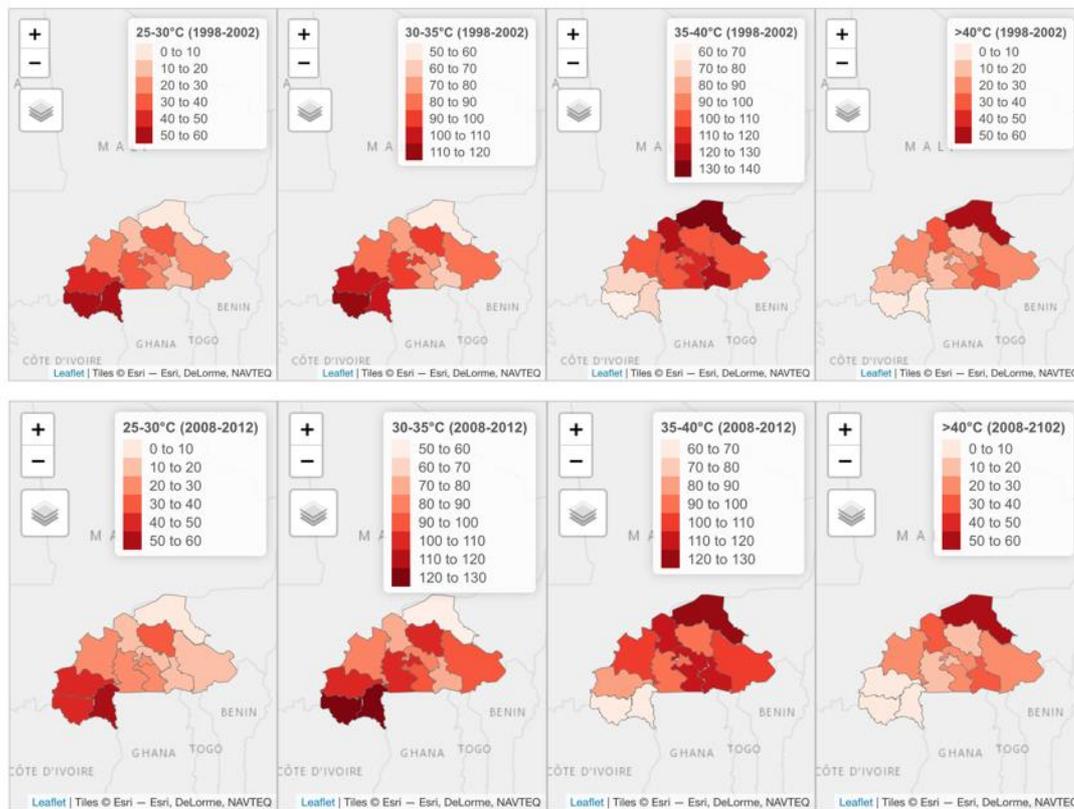
Les cartes du haut montrent la température moyenne sur cinq ans autour des années 2000 et 2010 (appelées 2000 et 2010, respectivement), tandis que les cartes du bas montrent le degré de changement des températures moyennes des années 1990 aux années 2000, et des années 2000 aux années 2010. Source : Données EWEMBI

Figure 10: Intervalles de température moyenne par zone climatique et nombre de jours dans ces intervalles



Cartes montrant le nombre de jours d'avril à novembre où la température moyenne se trouve dans la fourchette 20-25°C, 25-30°C, 30-35°C et au-dessus de 35°C dans les années 2000 (haut) et 2010 (bas). Source: Données EWEMBI

Figure 11: Intervalles de température maximale et nombre de jours dans ces intervalles

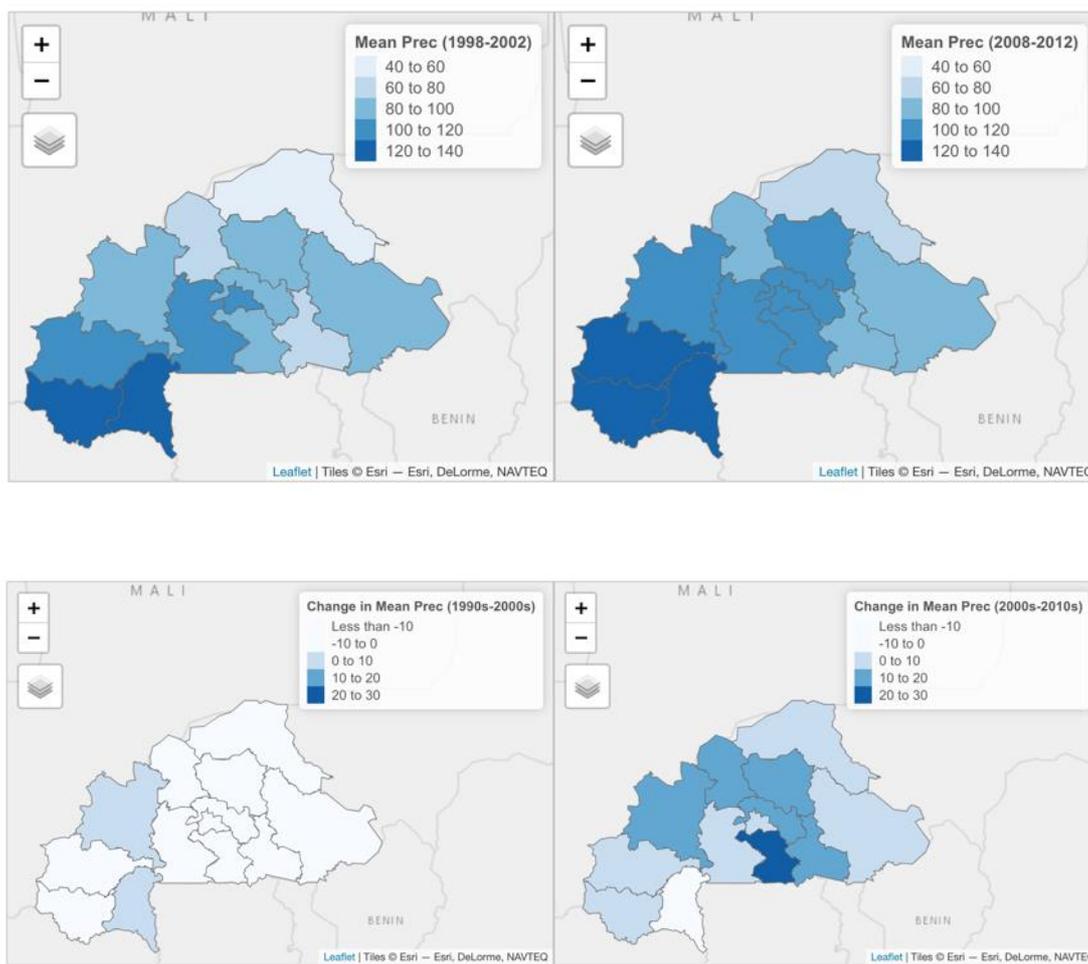


Cartes montrant le nombre de jours d'avril à novembre où la température maximale est comprise entre 25 et 30 °C, 30 et 35 °C, 35 et 40 °C et au-dessus de 40 °C dans les années 2000 (haut) et 2010 (bas). Source : Données EWEMBI

### 3.2.2.a.2. Précipitations moyennes de saison de culture

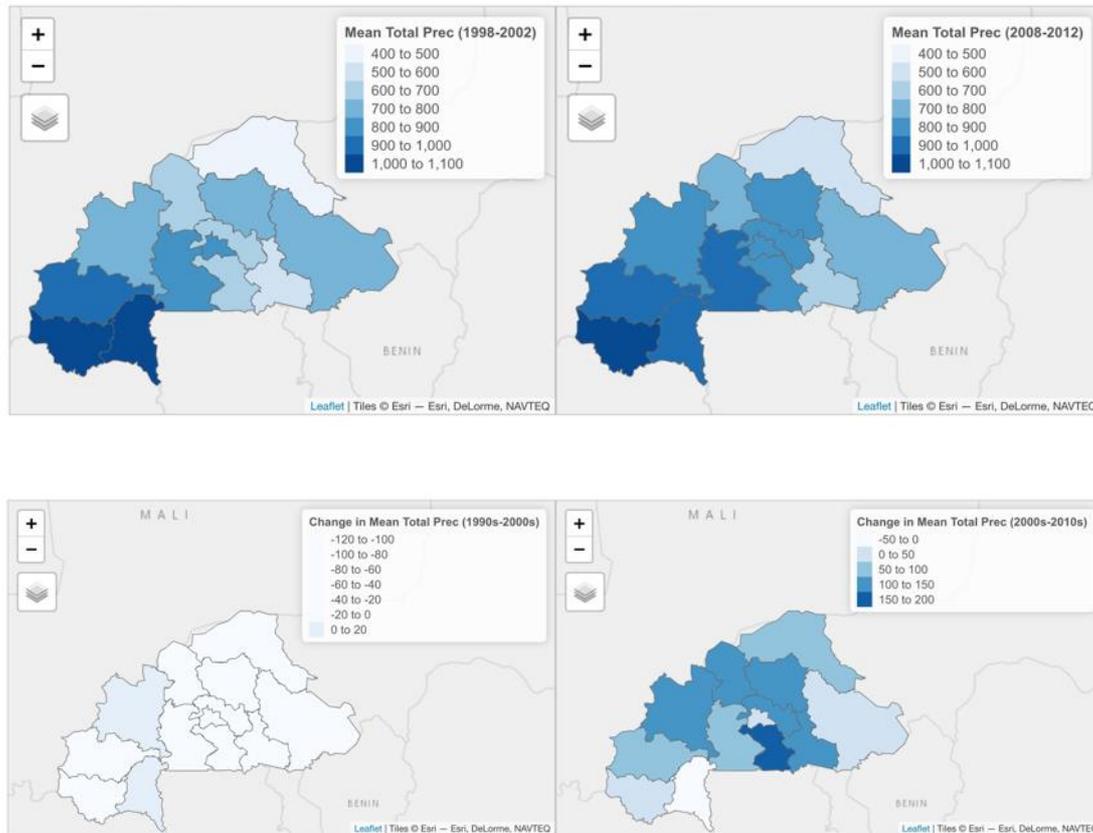
Les précipitations sont également disponibles quotidiennement, mais pour le présent rapport, nous considérons les précipitations mensuelles moyennes et les précipitations totales mesurées en millimètres pour les mois d'avril à novembre (Figures 12-13).

Figure 12: Précipitations mensuelles moyennes



Les cartes du haut montrent les précipitations mensuelles moyennes sur cinq ans pour les mois d'avril à novembre autour des années 2000 et 2010 (appelées respectivement 2000 et 2010), tandis que les cartes du bas montrent l'évolution des précipitations moyennes en millimètres entre les années 1990 et 2000, et entre les années 2000 et 2010. Source : Données EWEMBI

Figure 13: Précipitations totales moyennes

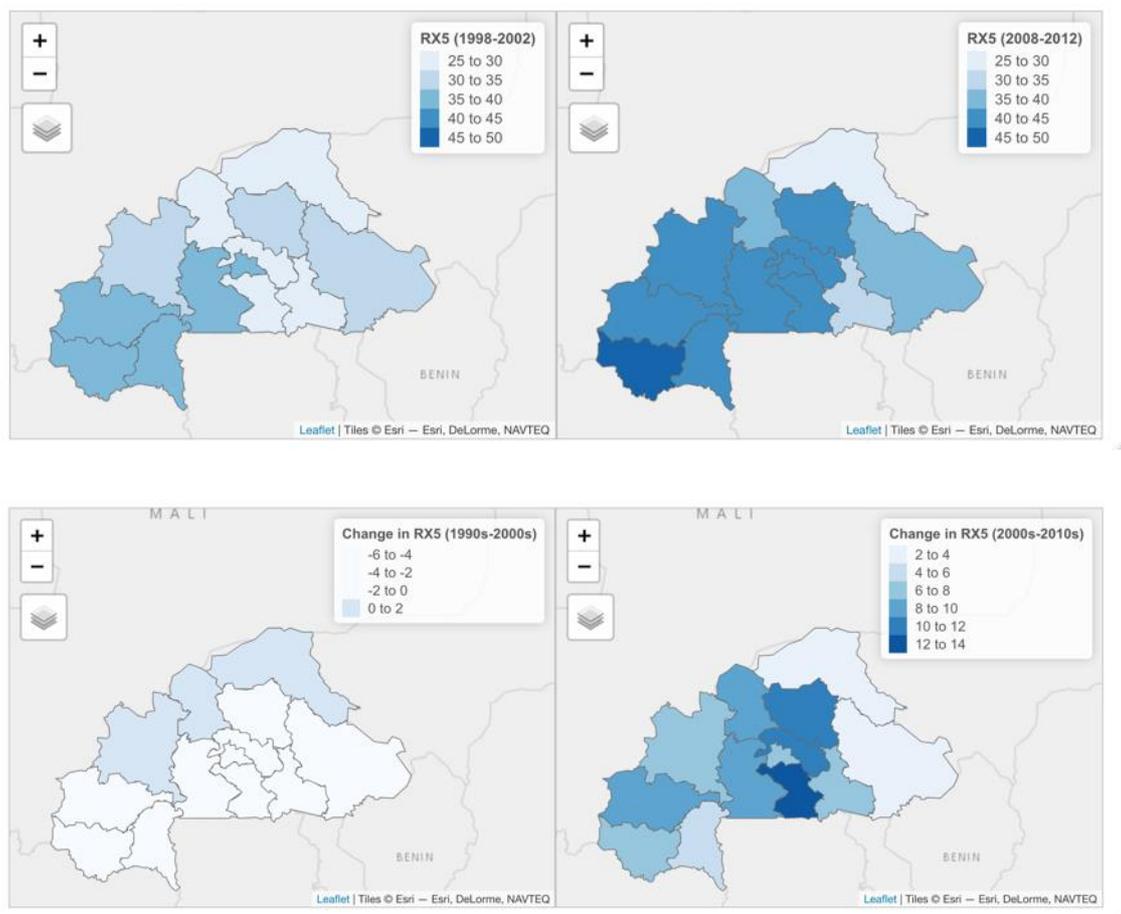


Les cartes du haut montrent les précipitations totales moyennes en cinq ans pour les mois d'avril à novembre autour des années 2000 et 2010 (appelées respectivement 2000 et 2010), tandis que les cartes du bas montrent l'évolution des précipitations moyennes en millimètres entre les années 1990 et 2000, et entre les années 2000 et 2010. Source : Données EWEMBI

### 3.2.2.a.3. Fortes pluies

Les pluies abondantes sont représentées par un indicateur de précipitations extrêmes appelé RX5, qui enregistre la plus grande quantité totale de précipitations pendant 5 jours consécutifs au cours d'une période définie (avril-novembre) (Figure 14).

Figure 14: Présentation des valeurs moyennes de l'indice RX5 dans les régions du Burkina Faso (1998-2002 et 2008-2012)



Les cartes du haut montrent le RX5 moyen (la plus grande quantité de précipitations en cinq jours consécutifs) en cinq ans pour les mois d'avril à novembre autour des années 2000 et 2010 (appelées respectivement 2000 et 2010), tandis que les cartes du bas montrent le changement du RX5 en millimètres entre les années 1990 et 2000, et les années 2000 à 2010. Source : Données EWEMBI

### 3.2.2.a.4. Sécheresse

L'Indice Normalisé des Précipitation-Evapotranspiration (SPEI) est un indice normalisé qui mesure la gravité de la sécheresse par son intensité et sa durée, identifie le début et la fin des périodes de sécheresse et est normalisé pour permettre une comparaison dans une vaste gamme de climats. Le principal avantage de l'indice SPEI par rapport à d'autres indices de sécheresse réside dans ses caractéristiques multi-échelles qui permettent d'identifier les différents types de sécheresse et les impacts du réchauffement climatique<sup>28</sup>. Le SPEI d'un mois (SPEI-1m) est utilisé pour représenter la sécheresse météorologique ; le SPEI de 3-6 mois (SPEI-3m, SPEI-6m) est utilisé pour représenter la sécheresse agricole, et des échelles de temps plus longues (par exemple, SPEI-6m, SPEI-12m) sont utilisées pour indiquer la sécheresse hydrologique et pour surveiller les ressources en eau de surface<sup>29</sup>.

Tableau 1: Degrés de sécheresse et d'humidité selon les valeurs SPEI

Catégories	Valeurs de SPEI
Extrêmement humide	[2.0, + ∞]
Sévèrement humide	[1.5, 2.0)
Modérément humide	[1.0, 1.5)
Légèrement humide	[0.5, 1.0)
Presque normal	(-0.5, 1.0]
Légèrement sec	(-1.0, -0.5]
Modérément sec	(-1.5, -1.0]
Sévèrement sec	(-2.0, -1.5]
Extrêmement sec	(- ∞, -2.0]

Source: Ye et al. (2019)<sup>30</sup>

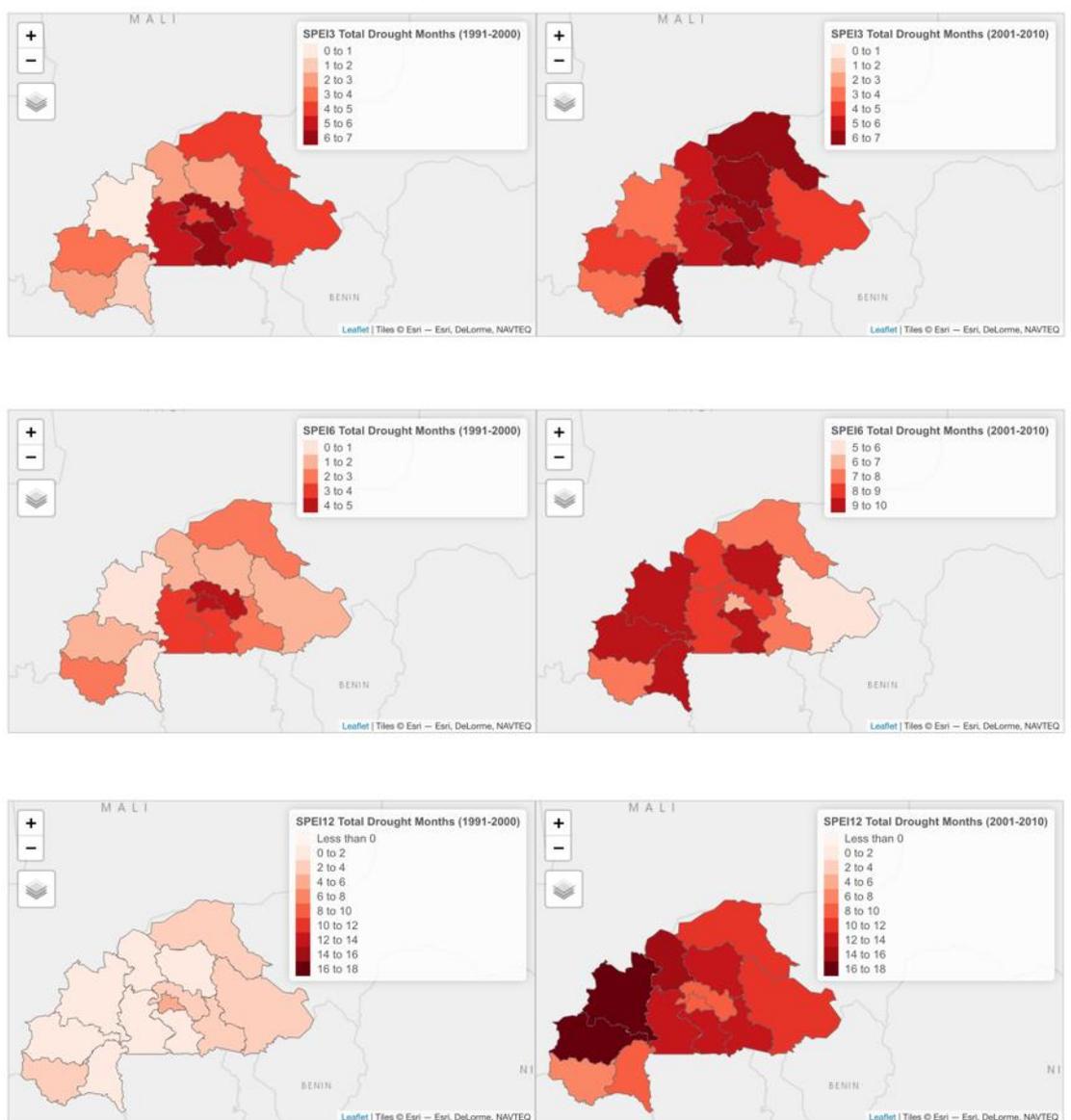
<sup>28</sup> Vicente-Serrano S.M., Santiago Beguería, Juan I. López-Moreno, (2010). A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index - SPEI. Journal of Climate 23: 1696-1718. [For the computation of the SPEI and more information, please refer to this link: <https://spei.csic.es/home.html#p7>]

<sup>29</sup> Ye et al. (2019). Spatio-temporal Analysis of Drought Indicated by SPEI over Northeastern China. <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/5/908>

<sup>30</sup> Ye et al. (2019). Spatio-temporal Analysis of Drought Indicated by SPEI over Northeastern China. <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/5/908>

Il y a deux principaux intérêts à examiner les sécheresses dans cette recherche : premièrement, quantifier l'impact de la sécheresse sur la productivité agricole, et deuxièmement, l'impact varie-t-il selon le mois où la sécheresse se produit. Pour répondre à la première question, nous comptons le nombre de mois de sécheresse sévère en utilisant des échelles de temps SPEI représentatives de la sécheresse agricole et hydrologique (SPEI-3, SPEI-6 et SPEI-12). Pour répondre à la deuxième question, nous créons une variable des régimes de sécheresse d'avril à novembre, en gardant à l'esprit les mois de semis (avril-juin), de croissance (juillet) et de récolte (août à novembre) (Tableau 1, Figure 15).

Figure 15: Valeurs mensuelles du SPEI à différentes échelles de temps



Nombre total de mois de sécheresse (valeur SPEI  $\leq -1,5$ ) pour les décennies 1991-2000 et 2001-2010 d'après SPEI 3 (en haut), SPEI 6 (au milieu) et SPEI 12 (en bas). Source : Données EWEBMI

La figure 16 et le Tableau 2 visualise les données de la variable dépendante (rendement du maïs) et des variables indépendantes (climatiques) ainsi que les relations entre elles.

Figure 16: Rendement du maïs par rapport à la température moyenne et maximale et la précipitation

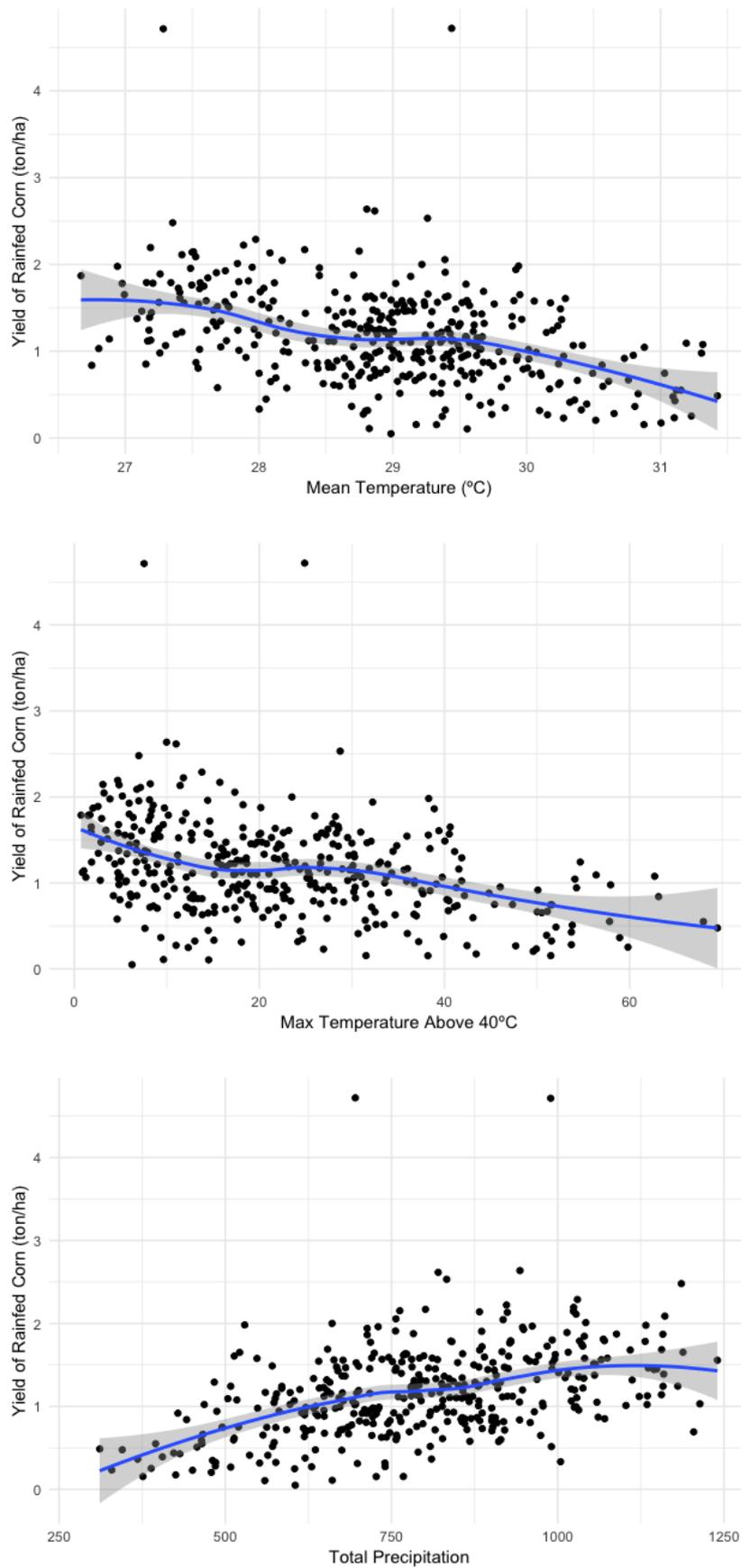


Tableau 2: Statistiques descriptives des données de l'EWEMBI et de la DGESS de 1984 à 2013

Variable	Min	Mean	Max
Température mensuelle (°C)	26.67	28.98	31.42
Précipitations mensuelles (mm)	35.37	99.12	155.02
Précipitations totales (mm)	282.99	792.92	1240.13
RX5d (mm)	12.57	35.43	62.65
SPEI-3 Sécheresse sévère (nombre de mois)	0	0.31	4
SPEI-6 Sécheresse sévère (nombre de mois)	0	0.37	6
SPEI-12 Sécheresse sévère (nombre de mois)	0	0.45	7
Production de maïs pluvial (tonnes)	17	42181	547454.3
Superficie de récolte du maïs pluvial (hectares)	49	27791.91	267587.6
Rendement en maïs pluvial (tonnes/hectare)	0.05	1.17	4.72

### 3.2.2.b. Données de projection

Les répercussions historiques estimées ont été projetées à l'avenir (2040-2060) à l'aide du scénario de réchauffement 4.5, qui est le scénario le plus proche de la trajectoire des contributions déterminées à l'échelle nationale (CDN) présenté. Afin de montrer une gamme de valeurs possibles, quatre modèles climatiques ont été utilisés : ECEARTH, HADGEM2, IPSL et MPIESM. Les figures ci-dessous montrent l'évolution du climat moyen projeté dans les années 2050 (2035-2064) par rapport au scénario de référence (1984-2013) (Figures 17-20).

Figure 17: Variation de la température moyenne dans les années 2050 par rapport à la période de référence

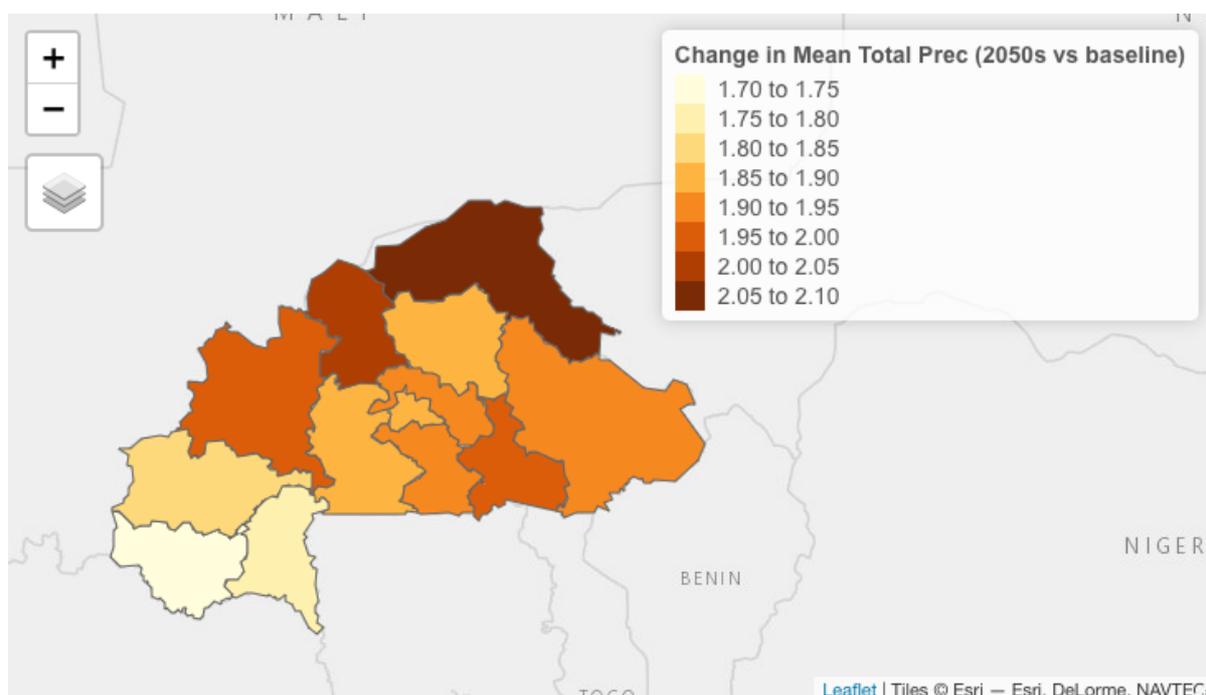


Figure 18: Variation des précipitations totales en 2050s par rapport à la période de référence

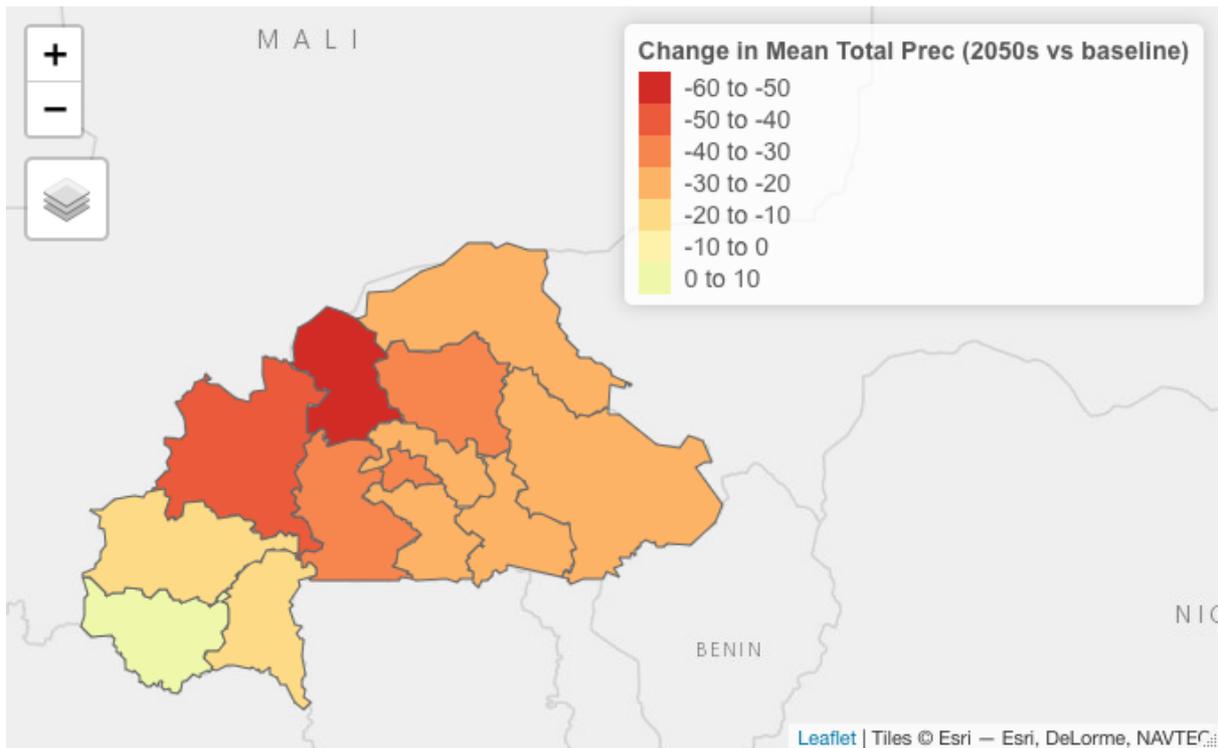


Figure 19: Évolution du RX5 en 2050s par rapport à la période de référence

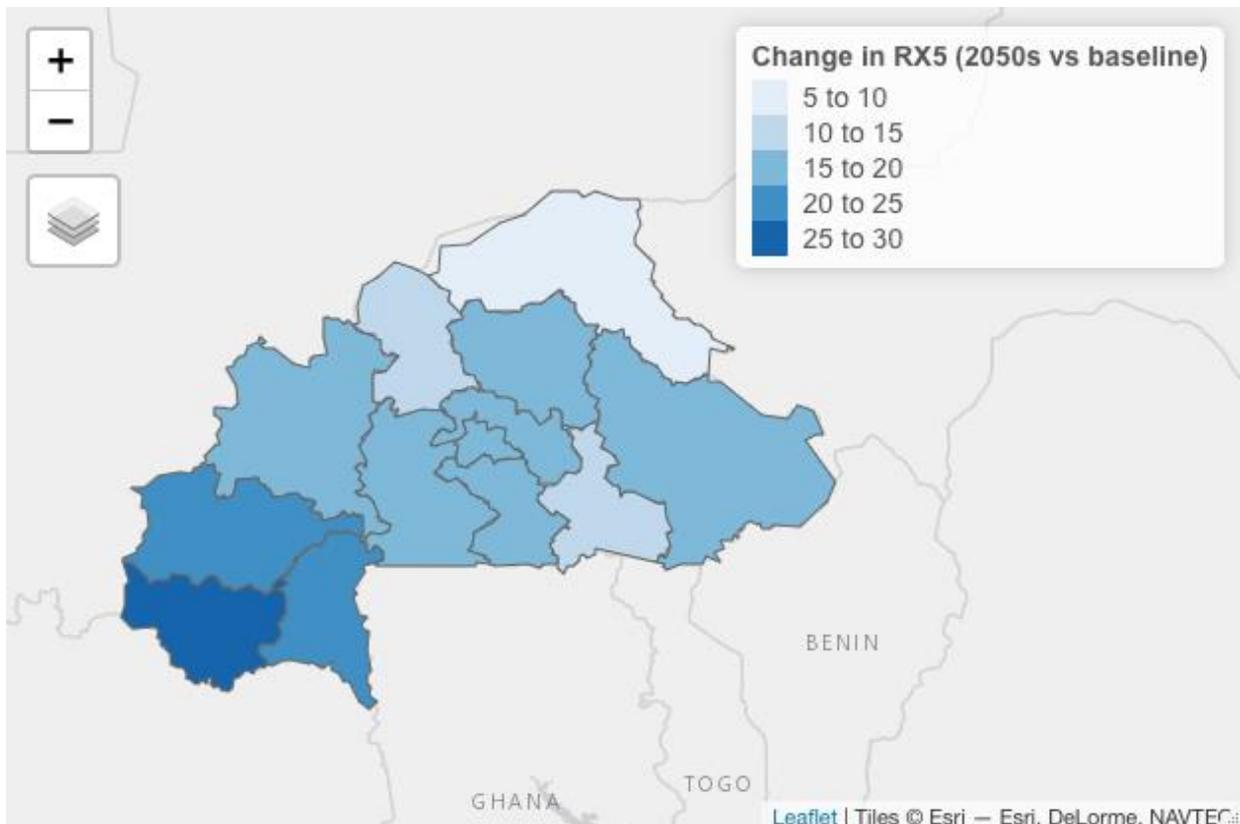
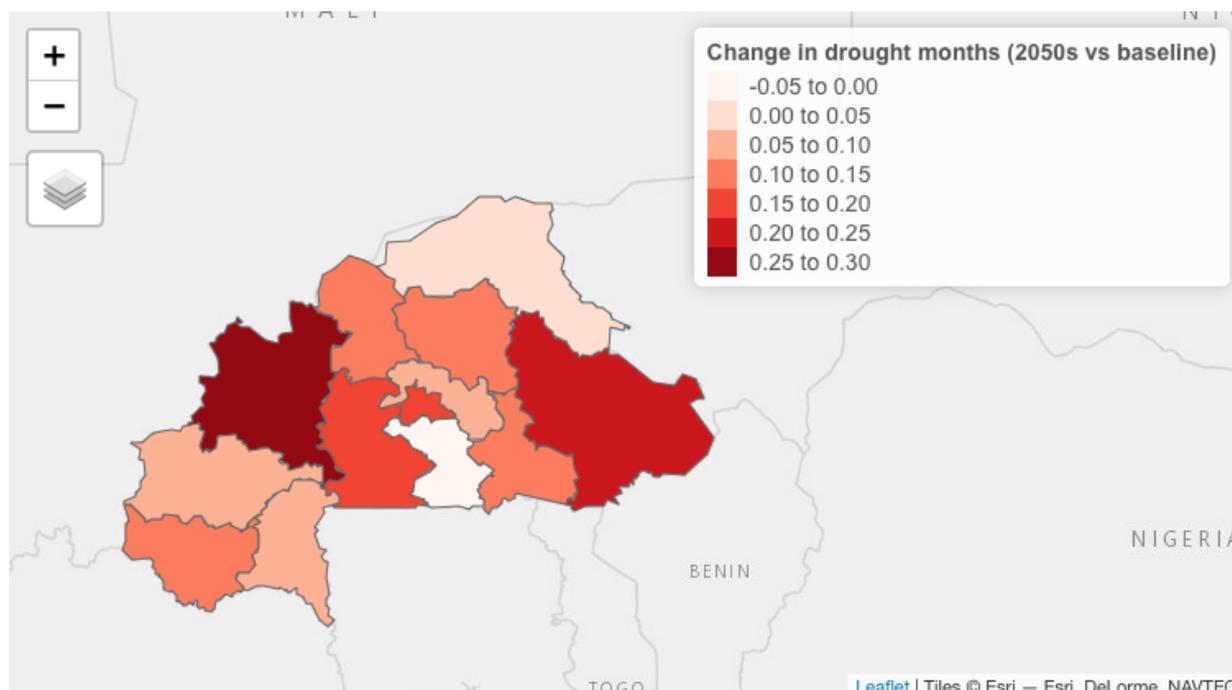


Figure 20: Variation en mois de sécheresse sévère en 2050 par rapport à la période de référence



### 3.2.3. Procédure d'estimation des impacts des changements climatiques sur la productivité

L'estimation des impacts sur la productivité agricole se fait en trois étapes principales :

- (1) L'estimation de la réponse historique de la production agricole à diverses spécifications des variables climatiques et socio-économiques, créant ainsi de multiples modèles pour la culture sélectionnée (ici le maïs) ;
- (2) la mise en œuvre d'un processus de sélection d'un modèle hors échantillon pour assurer la robustesse des résultats ; et
- (3) La projection de l'ampleur de la réduction future potentielle de la production agricole ou du risque agricole, en combinant les coefficients dérivés du meilleur modèle de l'étape (2) avec les variables climatiques projetées (Modèles Climatiques Régionaux - MCR).

Les modèles multiples pour la culture à l'étape (1) répondent à plusieurs besoins d'information qu'une seule spécification du climat ne sera pas en mesure de cerner. En maximisant l'opportunité d'avoir un modèle spécifique au pays et de nombreuses variables climatiques différentes à notre disposition, cette méthodologie va au-delà de l'étude de l'impact d'une augmentation d'un degré de la température moyenne ou d'une augmentation d'un mm des précipitations moyennes. En particulier, nous visons également à fournir des estimations des impacts des événements extrêmes (c.-à-d. les précipitations extrêmes et la sécheresse) et à répondre à des questions portant à la fois sur l'ampleur et le moment de leur occurrence, comme " quelle est la différence d'impact si une sécheresse survient au début ou à la fin de la période de culture (c.-à-d. pendant le semis, la croissance ou la récolte) " ?

### 3.2.3.a. Inférence de réponse historique

Bien que l'approche Ricardienne soit largement appliquée aux analyses de la production agricole, la méthode ne permet pas de désagréger les impacts pour des cultures spécifiques et a été remise en question en raison d'une faible identification causale, de problèmes de variables omises et de l'endogénéité potentielle des décisions d'utilisation des terres qui créent un biais pour les effets marginaux qui en résultent (Carter, 2018 ; Timmins, 2006). Nous suivons plutôt la forme fonctionnelle de Deschênes et Greenstone (2007) dans l'application d'un panel sur les rendements des cultures à effets fixes, qui pourrait contrôler de façon non paramétrique les facteurs spécifiques aux régions, invariables dans le temps et non observés, et qui traite aussi les problèmes des variables omises. L'inclusion des effets fixes régionaux contrôle pour toutes les caractéristiques régionales invariables dans le temps qui influent sur le rendement, tandis que les effets fixes de l'année permet de contrôler tous les chocs subis par toutes les régions au cours d'une année donnée.

### 3.2.3.b. Sélection du modèle

Une méthode de prédiction hors échantillon<sup>31</sup> était envisagée pour assurer la robustesse des résultats ; toutefois, étant donné le nombre limité d'observations, nous avons plutôt opté pour une prédiction en échantillon, appuyée par les résultats d'un test de F et du test  $R^2$  ajusté, et par le jugement personnel de l'auteur fondé sur la recherche qualitative et le caractère adéquat des données.

Le test de F sert à vérifier plusieurs hypothèses au sujet des paramètres du modèle et à comparer des modèles dont les spécifications varient en testant si un ensemble de variables prises ensemble dans un modèle n'a aucun effet sur la variable dépendante (Wooldridge, 2013). En tant que telle, l'hypothèse nulle du test est la suivante :

$$H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \dots \alpha_n = \beta_1 = \beta_2 = \delta_1 = \varphi_1 = 0$$

Le fait de ne pas pouvoir rejeter l'hypothèse nulle, malgré l'existence de paramètres individuels significatifs résultant d'un test de t, suggère qu'ensemble, les variables du modèle sont conjointement non significatives.

### 3.2.3.c. Les projections

Le risque d'une baisse de la production agricole pour une culture spécifique (le maïs) dans les années 2030 et 2040 due aux changements climatiques est calculé en appliquant les coefficients sectoriels climat-économie calculés à l'étape précédente aux projections futures des précipitations et des températures sous le scénario RCP 4.5 (~2°C) provenant des MCRs. Les résultats supposent qu'il n'y a pas de changement dans la réponse du rendement au climat

---

<sup>31</sup> Une prédiction hors échantillon comme dans Schlenker & Roberts (2009) et Auffhammer & Steinhilber (2010), où chaque modèle est estimé n fois, et où chaque répétition sélectionne au hasard un échantillon plus court de la série temporelle par rapport à l'échantillon complet. La robustesse est mesurée en utilisant la précision de chaque modèle n dans la prédiction du reste des années non incluses dans l'estimation, mais dont les données sont disponibles dans l'échantillon complet. Les modèles varieraient en fonction de différentes spécifications des variables climatiques (moyenne annuelle, pas à pas, polynomiale ou par morceau). La comparaison de la précision entre les modèles utilise l'erreur de prédiction quadratique moyenne (RMSE) et le test de t de Welch pour tester l'hypothèse nulle selon laquelle la RMSE dans les n répétitions sera la même pour toute comparaison de 2 modèles.

et excluent donc la possibilité d'un changement dans le taux d'adaptation au cours des prochaines années par rapport aux observations historiques.

### 3.3. Résultats et conclusions

#### 3.3.1. Inférence historique: sensibilité de la productivité agricole aux changements climatiques

Les résultats du modèle préféré (modèle 2 du tableau 3) montrent une réponse très robuste du rendement à la spécification non linéaire des précipitations totales. Sur la base de la relation quadratique, on estime que le rendement en maïs est maximisé lorsque les précipitations totales d'avril à novembre atteignent 1048,9 mm. Pour chaque différence de 1 mm par rapport à ce seuil, le rendement est réduit d'environ 0,51 %, tandis qu'une différence de 2 mm par rapport au seuil entraînera une réduction de 1 %. Les résultats sur la réponse du rendement du maïs aux différentes spécifications de température ont été moins robustes pour la température moyenne linéaire et non significatifs pour la forme quadratique. Cependant, les réponses à la température par tranche / intervalle étaient robustes, suggérant qu'une augmentation d'un jour de la température moyenne au-dessus de 35°C, par rapport à une température entre 20-25°C, entraînera une réduction de 1,3% du rendement. En termes de précipitations extrêmes qui pourraient éventuellement entraîner des inondations représentées par RX5, une augmentation d'un millimètre du RX5 entraîne une réduction de 1% du rendement en maïs.

Une autre spécification de régression avec des variables non climatiques (modèle 3 du tableau 3) montre qu'une augmentation d'une unité des semences améliorées entraîne une augmentation du rendement de 0,2 %. Bien que ce modèle ait le  $R^2$  ajusté le plus élevé, le nombre d'observations est fortement réduit dû au fait que la série temporelle sur les variables non climatiques est courte (de 2008 à 2017, et seules les données de 2008-2013 sont prises en compte lorsqu'elles sont associées aux données climatiques).

Enfin, le modèle qui inclut les événements extrêmes avec des mois de sécheresse séparés en périodes de semis, de croissance et de récolte, ainsi qu'une variable binaire et le nombre de mois d'occurrence, n'était pas robuste.

Le nombre limité d'observations, limitant ainsi les degrés de liberté, a conduit à une faible valeur de  $R^2$  ajustée et n'a pas permis d'appliquer un modèle à effets fixes plus strict, tel qu'un effet fixe région-année.

Tableau 3: Résumé des résultats des analyses pour les différents modèles testés

	1	2	3	4	5	6
Température moyenne	-1.992 (1.525)	-	0.094 (0.299)	-2.814 (2.070)	-	-1.029 (0.762)
Température moyenne (quadratique)	0.032 (0.026)	-	-	0.053 (0.035)	-	-
Température moyenne au dessus de 35 vs. 20-25°C	-	-0.013** (0.006)	-	-	-	-
Précipitation totale	0.005*** (0.001)	0.005*** (0.001)	0.007** (0.003)	0.005*** (0.001)	0.004*** (0.001)	0.006*** (0.003)
Précipitation totale (quadratique)	- 0.00000*** (0.00000)	- 0.00000*** (0.00000)	- 0.00000** (0.00000)	- 0.00000*** (0.00000)	- 0.00000*** (0.00000)	- 0.00000*** (0.00000)
Sécheresse	0.023 (0.065)	0.044 (0.064)	-	0.080 (0.080)	0.065 (0.082)	-
RX5	-0.008 (0.006)	-0.010* (0.006)	0.005 (0.013)	0.002 (0.007)	0.003 (0.007)	0.005 (0.014)
Population active	-	-	-0.00000 (0.00000)	-	-	-0.00000 (0.00000)
NPK	-	-	0.0003 (0.0003)	-	-	0.00002 (0.0004)
Semences améliorées	-	-	0.002* (0.001)	-	-	0.001 (0.001)
Région FX	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui
Année FX	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui
Observations	371	371	36	371	371	36
R <sup>2</sup> ajusté	0.362	0.375	0.526	0	0	0

Notes : Variable dépendante : ln (rendement du maïs pluvial), sauf pour le modèle 3, qui utilise tout le rendement total du maïs (irrigué et pluvial). \*, \*\*, \*\*\* indiquent des seuils de significativité de 10 %, 5 % et 1 %. Erreurs-standard entre parenthèses. Des constantes et autres indicateurs sont inclus, mais non rapportés. Les résultats complets de la régression se trouvent en annexe.

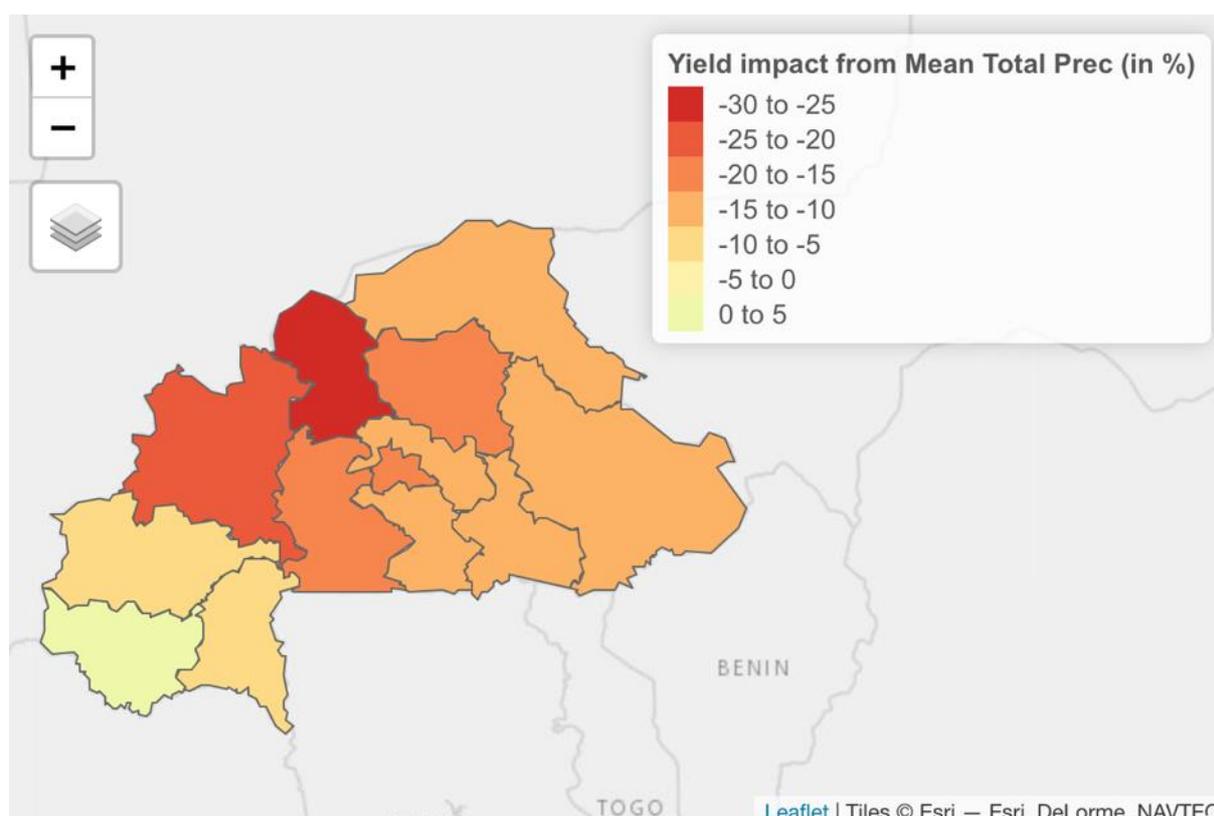
### 3.3.2. Projections : Impact des changements climatiques futurs sur la productivité agricole

Le calcul des impacts projetés a deux objectifs principaux : le premier est d'estimer l'ampleur du changement potentiel de rendement, déterminé par chacun des facteurs de stress climatique, considérant d'autres facteurs constants ; et le second est de fournir des informations qualitatives sur l'impact distributif du changement climatique, ce qui peut aider à établir les priorités et à soutenir les politiques.

### 3.3.2.a. Impact d'un changement dans les précipitations totales sur la productivité agricole

Selon les projections climatiques et les paramètres estimés, les régions qui seront les plus touchées par le changement des précipitations totales dans les années 2050 par rapport au scénario de référence, toutes choses étant égales par ailleurs, seront le Nord et la Boucle du Mouhoun avec des baisses de rendement de 27% et 24%. Viennent ensuite le Centre-Nord (-18 %), le Centre (-16 %), le Centre-Ouest (-16 %), l'Est (-15 %), le Sahel (-14 %), le Centre-Sud (-14 %), le Centre-Est (-13 %), le Plateau central (-11 %), le Sud-Ouest (-10 %) et les Hauts-Bassins (-8%). Seules les Cascades montrent un bénéfice des changements dans les précipitations totales (+0,6%) (Figure 21). Les résultats montrent que, avec l'insuffisance d'irrigation naturelle venant des précipitations, les régions qui auront probablement le plus grand impact, en particulier celles qui produisent une quantité importante de maïs destiné à la consommation, devraient bénéficier de mesures d'irrigation alternatives.

Figure 21: Variation en pourcentage du rendement du maïs en raison de la variation prévue des précipitations totales

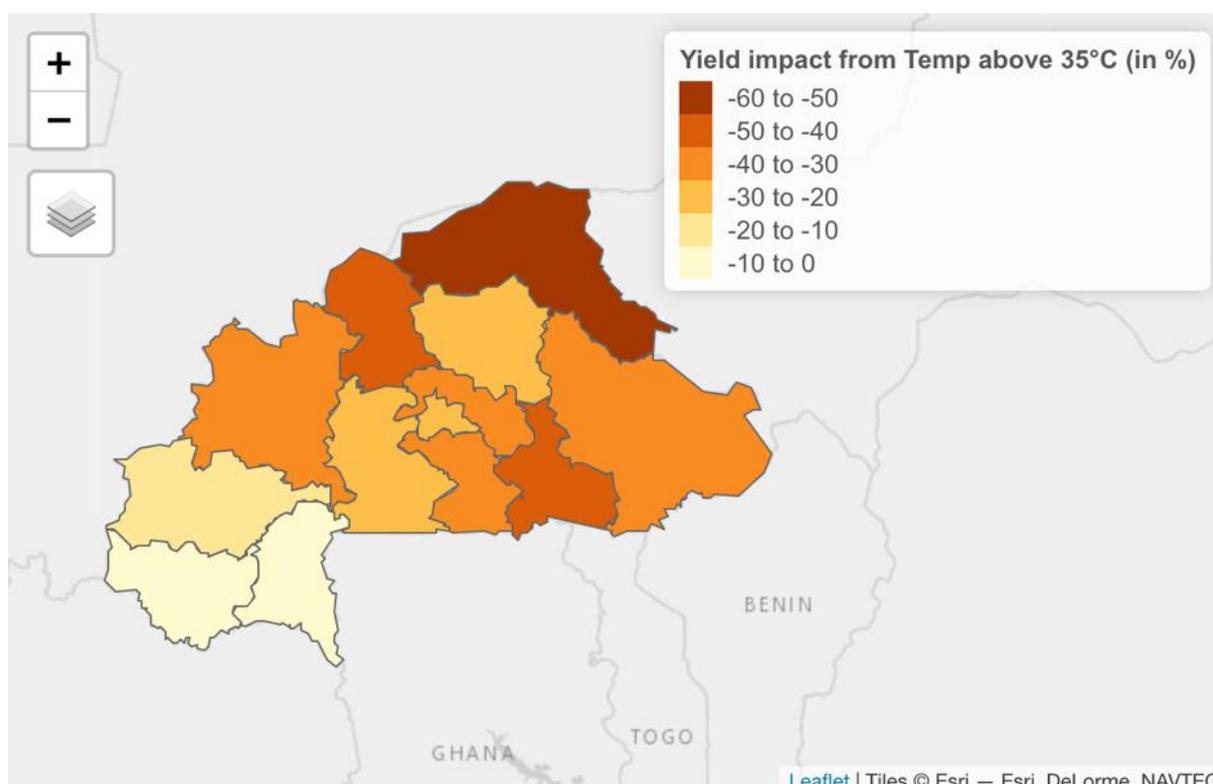


Notes : La variation des précipitations totales a été obtenue en prenant la différence entre la moyenne des précipitations totales projetées pour 30 ans autour de 2050 (2035-2064) de quatre ensembles différents de MCG-MCR et la période de référence (1984-2013).

### 3.3.2.b. Impact d'une augmentation du nombre de jours où la température dépasse 35°C.

L'impact sur le rendement produit par des périodes plus longues au-delà de 35°C en température pourrait être une perte de récolte due à une chaleur excessive, ou une perte de productivité humaine chez les agriculteurs – qui évitent de s'exposer pour protéger le corps des coups de chaleur, soit parce qu'ils contractent des maladies déjà graves dues à des températures extrêmes qui les empêchent de travailler. L'ampleur de l'impact est influencée par le réchauffement actuel que connaît la région (qui suggère que les régions subissent déjà des pertes à l'heure actuelle) et par le changement de température dans les années 2050 par rapport à la référence. On prévoit que toutes les régions subiront des pertes en raison d'une augmentation des températures supérieures à 35°C. Les résultats suggèrent que le Sahel, le Nord et le Centre-Est sont les plus touchés avec des baisses de rendement de 53 %, 45 % et 43 % dues aux changements de jours au-delà de 35°C dans les années 2050 par rapport à la référence, toutes choses étant égales par ailleurs. Viennent ensuite le Plateau Central (-35 %), le Centre-Sud (-34 %), l'Est (-33 %), la Boucle du Mouhoun (-33 %), le Centre-Ouest (-26 %), le Centre (-25 %), le Centre-Nord (-25 %), les Hauts-Bassins (-11 %), le Sud-ouest (-7%) et Cascades (-3%) (Figure 22).

Figure 22: Variation en pourcentage du rendement du maïs due à la variation prévue de la température moyenne au-dessus de 35°C

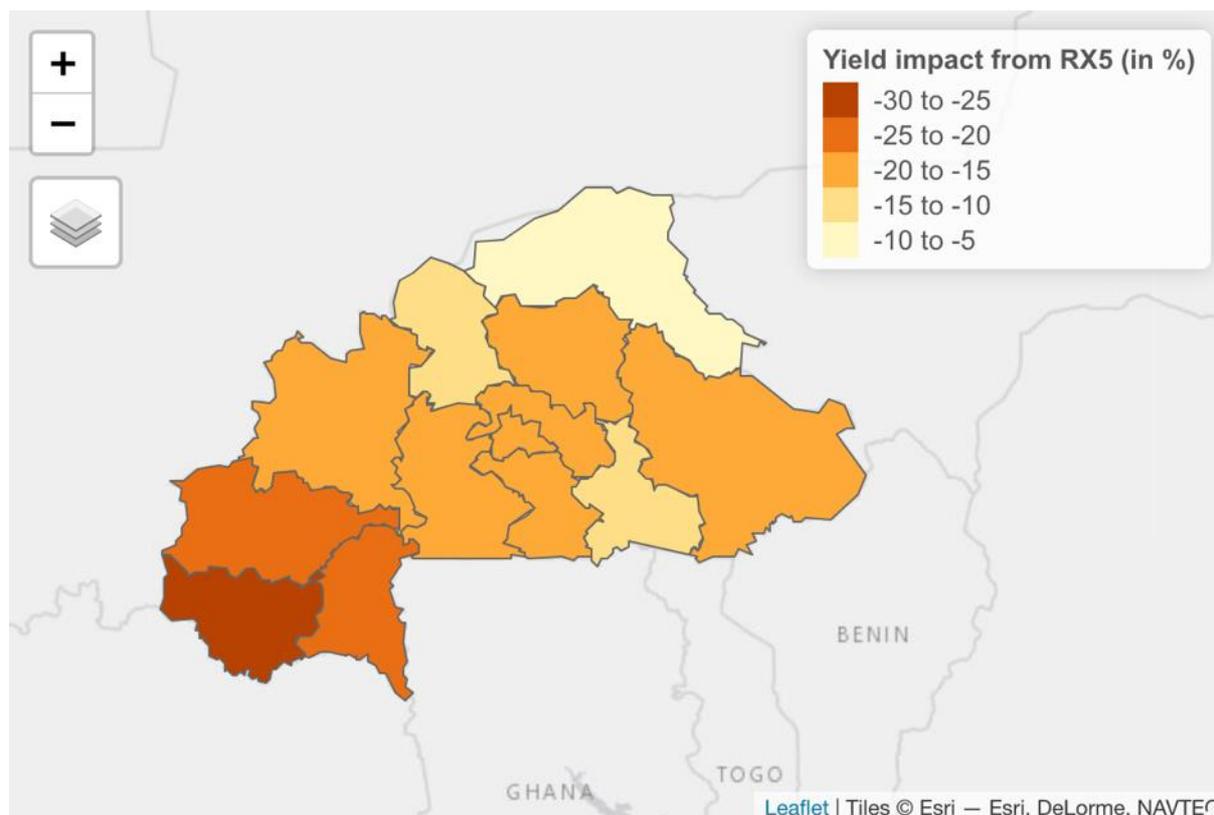


Notes : Le changement de température a été obtenu en prenant la différence de la température moyenne projetée au-dessus de 35°C pendant 30 ans autour de 2050 (2035-2064) à partir de quatre ensembles différents de MCG-MCR ; et la référence (1984-2013).

### 3.3.2.c. Impact des précipitations extrêmes sur la productivité agricole.

Les résultats suggèrent que la variation des précipitations extrêmes dans les années 2050 par rapport à la référence, telle que capturée par la variable RX5, aura le pire impact sur le rendement dans les Cascades (-27%), suivie du Sud-Ouest (-24%), Hauts-Bassins (-23%), Centre-Ouest (-19%), Centre (-19%), Centre-Nord (-18%), Est (-17%), Centre-Sud (-17%), Plateau Central (-17%), Boucle du Mouhoun (-16%), Centre-Est (-13%), Nord (-12%) et Sahel (-9%) (Figure 23).

Figure 23: Pourcentage de changement en rendement de maïs dû au changement projeté de RX5



Notes : La variation de RX5 a été obtenue en prenant la différence de la moyenne de RX5 projetée sur 30 ans autour de 2050 (2035-2064) à partir de quatre ensembles différents de MCG-MCR ; et la référence (1984-2013).

Les impacts projetés montrent que les différents facteurs de stress climatiques ont différents impacts sur les régions, de sorte que certaines régions subiront probablement des réductions de rendement plus importantes en raison des risques de précipitations extrêmes accrues (p. ex. Cascades, Sud-Ouest, Hauts-Bassins), avec une réduction des précipitations totales durant les mois de croissance, une combinaison de la réduction des précipitations et des températures plus élevées (p. ex. Nord, Boucle du Mouhoun, Centre-Nord, Centre, Centre-Ouest) ou le risque de températures extrêmes (p. ex. Sahel, Centre-Est, Plateau Central, Centre-Sud, Est). Sur la base de ces projections, des interventions d'adaptation appropriées pourraient être planifiées pour faire face à ces risques : prévention des inondations en cas de précipitations extrêmes, installations d'équipements d'irrigation alternative pour la réduction des précipitations et l'augmentation des températures, et enfin, abris (ombrage) pour les agriculteurs, ainsi que les cultures, pour prévenir les effets de la chaleur extrême.

## 4. Annexe

### 4.1. Note méthodologique technique du modèle macroéconomique

Le modèle économétrique décrit dans ce document estime les impacts historiques et futurs du changement climatique sur l'économie nationale des pays d'Afrique subsaharienne.

Les réponses historiques du PIB et de la valeur ajoutée brute sectorielle aux conditions climatiques et non climatiques ont été estimées pour la période 1960-2015 pour un panel d'Afrique subsaharienne en utilisant des données en ligne sur les Indicateurs de Développement Mondial de la Banque mondiale. L'écart annuel moyen de la température par rapport à la moyenne historique, sous forme quadratique, montrant la nature non linéaire de la réponse et les différentes anomalies de précipitations données par l'indice annuel de précipitation normalisé (IPN) sont utilisées comme variables climatiques. Des indicateurs socio-économiques, tels que les dépenses et la dette publiques, les flux nets d'aide publique au développement (APD), les remises Gouvernementales (remittances en Anglais), les prix du pétrole, l'indice d'ouverture commerciale et un indice du régime politique ont été utilisés comme variables de contrôle. Pour tenir compte de tout biais de variable omis, deux variables supplémentaires ont été incluses : les effets fixes invariables dans le temps propres au pays et les effets fixes par année.

Le modèle a été initialement élaboré pour un projet de trois ans avec le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), la Commission économique des Nations Unies pour l'Afrique (CEA) et la Banque africaine de développement (BAD), et a ensuite été utilisé dans un projet de la Banque mondiale pour appuyer la planification des investissements des pays membres de l'Association Internationale de Développement (AID).

#### 4.1.1. Données

Les données climatiques historiques (température et précipitations) proviennent des données de réanalyse du NCEP/NCAR<sup>32</sup>, tandis que les projections sont des moyennes de cinq modèles de circulation générale, à savoir GFDL, HadGEM, IPSL, MIROC et NorESM. Les données utilisées ont été re-quadrillées (maillées) de leur résolution native (2,5° x 2,5°) à une résolution spatiale de 0,5° x 0,5° pour les comparer aux données ISIMIP. La résolution temporelle utilisée est mensuelle.

L'Indice de Précipitation Normalisé (IPN) est classé dans les catégories suivantes :

Les valeurs IPN comprises entre -0,5 et 0,5 sont classées dans la catégorie " conditions normales ".

---

<sup>32</sup> <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>

Les valeurs IPN comprises entre -1,5 et -0,5 sont classées dans la catégorie " conditions sèches " .

Les valeurs IPN inférieures à -1,5 sont classées dans la catégorie "conditions très sèches". Inversement, les valeurs IPN comprises entre 0,5 et 1,5 sont classées dans la catégorie " conditions humides ", et les valeurs IPN supérieures à 1,5 sont classées dans la catégorie " conditions très humides " .

Les données socioéconomiques proviennent des Indicateurs du Développement Mondial de la Banque mondiale<sup>33</sup> et de l'Observatoire de la Compétitivité Durable<sup>34</sup>, pour les années 1960-2015.

#### 4.1.2. Estimation du risque économique

Le modèle macroéconomique tire sa méthodologie des publications existantes, dans lesquelles les principales caractéristiques suivantes ont été conservées :

- La non-linéarité de l'impact des changements climatiques sur l'économie en utilisant une forme polynomiale des variables climatiques comme variables indépendantes (Burke et al., 2015 ; Dell et al., 2012) (appliquée pour la variable de température) ; et une fonction par morceau où les données mensuelles sont groupées ou "mis en intervalles" en fonction du nombre de déviations standard d'une moyenne à long terme pour créer une fréquence annuelle des données sans perdre les informations journalières (Schlenker & Roberts, 2009) (appliquée pour l'Indice de Précipitation Normalisé ou IPN). La variable résultante pour chaque "intervalle" correspond à la part de cellule / grille dans la région ayant connu un IPN d'une plage spécifique (voir les catégories ci-dessus dans la section précédente 'Données').
- Utilisation d'un indice climatique prédéfini tenant compte de la variabilité climatique intra-annuelle et de l'exposition géographique (Brown et al., 2013)<sup>35</sup>.
- Régression par panel économétrique utilisant des données nationales, avec variables dépendantes retardées et variables de contrôle non climatiques (Dell et al., 2012).

L'estimation du risque économique futur lié au changement climatique comporte trois étapes principales :

- (1) En déduisant à partir du passé récent l'effet relatif des indicateurs climatiques et non climatiques sur l'économie globale (exprimé en PIB et PIB par habitant) et ses trois principaux secteurs (les valeurs ajoutées de l'agriculture, l'industrie et des services) pour le panel des pays d'Afrique subsaharienne.

---

<sup>33</sup> Source link: <https://databank.worldbank.org/data/source/world-development-indicators>

<sup>34</sup> Source pour l'indice polity2. Les données sont dans ce lien: <https://competitivite.ferdi.fr/en/indicators/polity2-polity-iv>

<sup>35</sup> Brown et al (2013) ont utilisé WASP (Weighted Anomaly Standardized Precipitation) au lieu de SPI (Standardized Precipitation Index), mais l'idée d'utiliser un indice pour la précipitation a été inspiré de leur écrit pour les raisons que cela preserve la variabilité spatiale et temporelle de la précipitation. Nous avons essayé d'utiliser WASP dans notre modèle macro-économique, mais SPI a donné le meilleur résultat.

L'estimation des réponses historiques à l'aide d'un panel ASS a pour but de maximiser le nombre d'observations (par rapport aux séries temporelles des pays pris individuellement). L'impact du changement climatique sur l'économie de certains pays africains dont les données sont incomplètes aurait autrement été très difficile à évaluer.

(2) Estimation par randomisation-filtrage

(3) Préviation des risques possibles induits par le changement climatique sur l'économie (agrégat et secteurs) d'un seul pays sub-Saharien spécifique (Burkina Faso), en utilisant les coefficients des différentes variables calculées à l'étape 1 (c'est-à-dire les coefficients historiques de ces variables) et les valeurs projetées des variables climatiques indépendantes.

### Étape 1 : Inférence historique des effets

Dans le modèle, l'exposition à la variabilité climatique est définie en pondérant les variables climatiques avec la densité de population, en partant de l'hypothèse que les zones plus densément peuplées produisent une production économique supérieure (Nordhaus, 2006). La vulnérabilité propre à chaque pays est fournie par le modèle de régression non linéaire, qui mesure la réponse de l'économie (PIB, PIB par habitant et valeur ajoutée sectorielle) à divers niveaux de précipitations et d'anomalies de température.

L'équation de régression et ses variables sont données dans le texte qui suit :

Équation A1 :

$$\ln(y_{it,s}) = \sum_{l=1}^n \beta_{rsl} (X_{it,l}) + \pi_{r,s,1} T_{it} + \pi_{r,s,2} T_{it}^2 + \gamma_{r,s} V_{it,s} + \phi_i + \tau_{it} + \varepsilon_{it}$$

▪  $\ln y_{it,s}$ : Les variables dépendantes d'intérêt pour le pays  $i$ , le temps  $t$  et le secteur  $s$  sont les suivantes:

- (1) **Le PIB par habitant** défini comme le produit intérieur brut divisé par la taille de la population de milieu d'année. Le PIB est la somme de la valeur ajoutée brute de tous les producteurs résidents de l'économie, plus toutes les taxes sur les produits et moins toutes les subventions non incluses dans la valeur des produits. Il est calculé sans déduction de l'amortissement des actifs fabriqués ou de l'épuisement et de la dégradation des ressources naturelles. Les données sont en dollars américains constants de 2010.
- (2) **Le PIB aux prix d'acquisition** est la somme de la valeur ajoutée brute de tous les producteurs résidents de l'économie, majorée des taxes sur les produits et moins les subventions non incluses dans la valeur des produits. Il est calculé sans déduction de l'amortissement des actifs fabriqués ou de l'épuisement et de la dégradation des ressources naturelles. Les données sont en dollars américains constants de 2010. Les chiffres en dollars du PIB sont convertis à partir des monnaies nationales en utilisant les taux de change officiels de 2010. Pour quelques pays où le taux de change officiel ne reflète pas le taux effectivement appliqué aux opérations de change effectives, un autre facteur de conversion est utilisé.

- (3) **La valeur ajoutée agricole** correspond aux divisions 1 à 5 de la Classification internationale type par industrie (CITI) et comprend la foresterie, la chasse et la pêche, ainsi que les productions agricoles et animales. La valeur ajoutée est la production nette d'un secteur après avoir additionné toutes les productions et soustrait les intrants intermédiaires. Il est calculé sans déduction de l'amortissement des actifs fabriqués ou de l'épuisement et de la dégradation des ressources naturelles. L'origine de la valeur ajoutée est déterminée par la CITI, révision 3 ou 4. Les données sont en dollars américains constants de 2010.
- (4) **La valeur ajoutée industrielle** correspond aux divisions 10-45 de la CITI et comprend la fabrication (divisions 15-37 de la CITI). Elle comprend la valeur ajoutée dans les secteurs de l'exploitation minière, de la fabrication (également considérée comme un sous-groupe distinct), de la construction, de l'électricité, de l'eau et du gaz. La valeur ajoutée est la production nette d'un secteur après avoir additionné toutes les productions et soustrait les intrants intermédiaires. Il est calculé sans déduction de l'amortissement des actifs fabriqués ou de l'épuisement et de la dégradation des ressources naturelles. L'origine de la valeur ajoutée est déterminée par la Classification internationale type par industrie (CITI), révision 3. Les données sont en dollars américains constants de 2010.
- (5) **La valeur ajoutée des services** correspond aux divisions 50-99 de la CITI. Elle comprend la valeur ajoutée dans le commerce de gros et de détail (y compris les hôtels et les restaurants), les transports et les services gouvernementaux, financiers, professionnels et personnels comme l'éducation, les soins de santé et les services immobiliers. Sont également inclus les frais bancaires imputés, les droits à l'importation et toutes les divergences statistiques relevées par les compileurs nationaux, ainsi que les divergences résultant du redimensionnement. La valeur ajoutée est la production nette d'un secteur après avoir additionné toutes les productions et soustrait les intrants intermédiaires. Il est calculé sans déduction de l'amortissement des actifs fabriqués ou de l'épuisement et de la dégradation des ressources naturelles. L'origine industrielle de la valeur ajoutée est déterminée par la Classification internationale type par industrie (CITI), révision 3 ou 4. Les données sont en dollars américains constants de 2010.
- $X_{it,t}$  est la tranche / intervalle d'intensité des précipitations (utilisant l'IPN)
  - $T_{it}^i$  est la déviation de la température moyenne annuelle par rapport à la moyenne historique
  - $V_{it,s}$  est un ensemble de variables de contrôle:
    - (1) les dépenses publiques,
    - (2) la dette publique,
    - (3) flux nets d'aide publique au développement (APD)
    - (4) Remises Gouvernementales (Remittances, en Anglais)
    - (5) prix du pétrole
    - (6) Indice d'ouverture des échanges

(7) indice du régime politique<sup>36</sup>

- $\phi_i$  est l'effet fixe invariant dans le temps d'un pays
- $\tau_{it}$  est la tendance temporelle non linéaire spécifique à la région

La régression par panel est effectuée uniquement pour les pays d'Afrique sub-Saharienne (ASS) et produirait un ensemble de coefficients pour tous les pays. La différence entre les valeurs estimées de la variable dépendante selon le modèle pour différents pays serait due à des valeurs variables des variables indépendantes et aux effets fixes invariables dans le temps propres à chaque pays. Cette méthode est conforme aux études globales existantes qui appliquent la même méthode à tous les pays du monde (voir Dell et al., 2014; Hsiang, 2016 pour un résumé des méthodes) ; mais elle est améliorée en limitant l'ensemble des pays à ceux qui sont susceptibles de présenter des caractéristiques communes.

Afin de mieux calibrer les coefficients à l'échelle de l'ASS et d'estimer le modèle le mieux adapté au niveau national, les coefficients climat-économie de l'ASS qui en résultent sont filtrés à l'aide d'une méthode de randomisation fondée sur la méthode de Monte Carlo, qui estime les meilleurs ensembles de valeurs pour les coefficients au niveau national en fonction des erreurs prédictives au niveau national. Chacun de ces ensembles de valeurs permet au modèle de reproduire avec plus de précision les fluctuations climatiques observées.

#### Étape 2 : Procédure d'estimation par randomisation-filtrage

Sur la base du modèle de régression détaillé ci-dessus, une estimation des coefficients par randomisation-filtrage est appliquée. Cette approche répond à deux objectifs principaux :

- 1- Considérant que les coefficients sont déduits à l'aide d'un panel continental, la méthode de randomisation-filtrage en échantillon permet d'estimer la sensibilité historique du climat (température et précipitations) à l'échelle nationale. Par conséquent, cette méthode déduit des coefficients qui représentent de façon optimale la variabilité historique macroéconomique compte tenu d'une fourchette de sensibilité aux précipitations et à la température, dans le but de prévoir les risques macroéconomiques futurs induits par les changements climatiques.
- 2- Projeter les risques climatiques futurs dans un cadre probabiliste, en n'utilisant pas seulement une valeur unique pour chacun des coefficients historiquement déduits mais aussi un ensemble de coefficients (ici 10) qui permettent au modèle de reproduire de

---

<sup>36</sup> Polity2 est une version révisée du score POLITY (régime politique) combiné. Cette variable est une version modifiée de la variable POLITY ajoutée pour faciliter l'utilisation de la mesure de régime POLITIQUE dans les analyses de series temporelles. Il modifie le score annuel combiné de POLITY en appliquant un simple traitement, pour convertir les instances de "scores d'autorité normalisés" (i.e., -66, -77, and -88) à des score polity conventionnel (i.e., dans la fourchette, -10 to +10).

Source: Observatoire de Compétitivité Durable. <https://competitivite.ferdi.fr/en/indicators/polity2-polity-iv>

façon optimale les conséquences historiques des précipitations et des températures, ainsi que les variables de contrôle sur les sorties macroéconomiques.

De plus, les erreurs-standard des coefficients inférées augmentent à mesure que l'indice de précipitations tend vers des valeurs extrêmes, en particulier vers des événements humides extrêmes/graves. Afin de sélectionner les ensembles de coefficients les plus appropriés pour la prévision, la technique de randomisation-filtrage suivante est appliquée, basée sur l'échantillon complet comme dans la méthode, également basée sur la régression par panel regroupé, développée par Mark & Sul, (2012). Une telle approche présente également l'avantage de rendre compte plus précisément de l'hétérogénéité des pays (Mark & Sul, 2012).

La régression (Equation A1) est effectuée pour un ensemble donné de pays. Après avoir vérifié que les coefficients inférés sont indépendants dans la matrice de covariance, un ensemble aléatoire de coefficients est généré à la suite d'un processus de génération de données basé sur une simulation de Monte Carlo, par exemple

Equation A2 : simulation de Monte Carlo des coefficients (la même chose s'applique aux coefficients suivants  $\pi_{i,s,1}$  et  $\pi_{i,s,2}$  aussi bien que  $\gamma$ )

$$\widetilde{\beta}_{s,l,l} \stackrel{iid}{\sim} N(\widehat{\beta}_{r,l}, se_{\beta_{r,l}})$$

Dans l'équation 2, la valeur moyenne et les erreurs-standard des coefficients sont utilisées pour produire un ensemble aléatoire normalement distribué de coefficients à l'intérieur de deux distributions de plage d'erreur-standard en utilisant une simulation de Monte Carlo. Pour chaque paramètre lié au climat (intensité de précipitations et température) ainsi que pour les paramètres socio-économiques (variables de contrôle), plusieurs milliers de coefficients définis de manière aléatoire sont générés (dans les réglages actuels du modèle, entre 100 et 200 000 individus sont générés). Chaque ensemble de coefficients est ensuite utilisé pour calculer la variable dépendante d'intérêt en utilisant à la fois des variables climatiques et des variables de contrôle, telles que

Equation A3 : Ensemble des valeurs calculées de  $\log(Y_{it})$  basées sur la simulation de Monte Carlo

$$\log(\widehat{Y}_{it}) = \sum_{l=1}^n \widetilde{\beta}_{s,l,l} (X_{it,l})^2 + \widetilde{\pi}_{l,s,1} T_{it} + \widetilde{\pi}_{l,s,2} T_{it}^3 + \widetilde{\gamma}_{l,s} V_{it,s} + \phi_i$$

Le filtrage de l'ensemble optimal de coefficients de prévision consiste à choisir un ensemble de dix ensembles pour lesquels l'erreur quadratique moyenne (RMSE) entre  $\log(\widehat{Y}_{it})$  et  $\log(Y_{it})$  est la plus faible. Les ensembles des coefficients  $\beta_{s,i,l,1 \rightarrow n}$  sont déduits au niveau des pays. Dans la situation actuelle, pour chacun des cinq pays et secteurs, entre 100 000 et 200 000 individus ont été simulés.

Les coefficients climat-économie (ou sensibilités) obtenus à partir de la régression par panel sont filtrés à l'aide d'une méthode de filtrage par randomisation basée sur la méthode de Monte Carlo, qui estime les ensembles "optimaux" des valeurs des coefficients au niveau national, chacun de ces ensembles permettant au modèle de reproduire, de la façon la plus précise possible, les fluctuations climatiques observées.

### Étape 3 : Prévisions

En utilisant les coefficients sectoriels climat-économie optimaux du filtrage de Monte Carlo, les risques économiques induits par le climat pour les années 2030 et 2040 sont calculés en utilisant l'exposition projetée aux anomalies de précipitations et de température d'un ensemble de cinq modèles de circulation générale (MCG)<sup>37</sup> avec correction de biais et maillés. Nous créons une gamme de résultats de réchauffement possibles en utilisant un scénario de faible réchauffement, soit un Profil Représentatif d'Evolution de la Concentration (PREC ou RCP en Anglais) de 2.6 ou d'environ 0,3 à 1,7 °C de variation de la température moyenne à la surface du globe d'ici la fin du siècle, et un scénario de réchauffement élevé (RCP 8.5 ou environ 2,6-4,8 °C de variation de température moyenne mondiale à la fin du siècle).<sup>38</sup>

L'hypothèse centrale de cette étape est que l'effet futur sur la production est défini par l'analogie climatique (Hallegatte et al., 2007), en d'autres termes, nous supposons qu'un événement d'intensité similaire dans la même région induit une fluctuation de même amplitude à tout moment donné. Bien que la vulnérabilité sectorielle propre à chaque pays soit supposée constante dans le temps, le modèle permet à la vulnérabilité de l'économie totale au changement climatique de varier dans le temps, avec des scénarios possibles de changements structurels.

---

<sup>37</sup> GFDL, HadGEM, IPSL, MIROC, NorESM

<sup>38</sup> See: [http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5\\_SPM\\_FINAL.pdf](http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf).

## 4.2. Résultats pour le modèle macro-économique

### 4.2.1. Analyse de régression par panel historique

Figure 24: Analyse de régression par panel historique pour le PIB par habitant, et les 3 secteurs (agriculture, industrie et services)

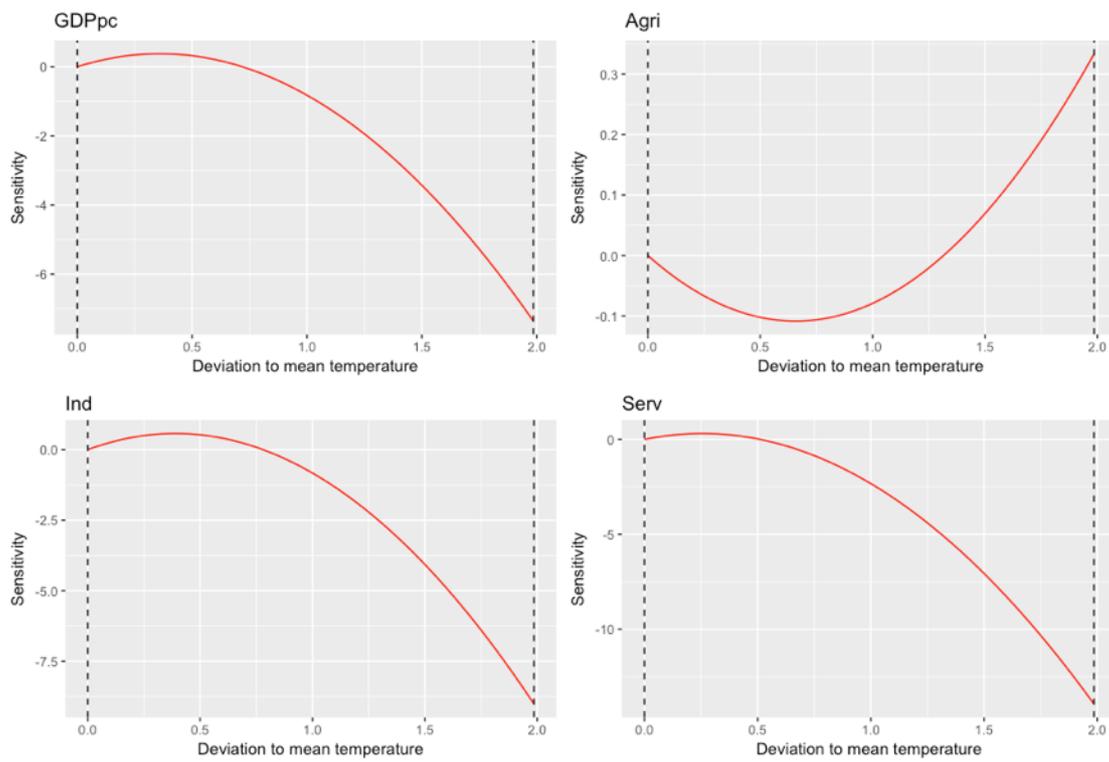


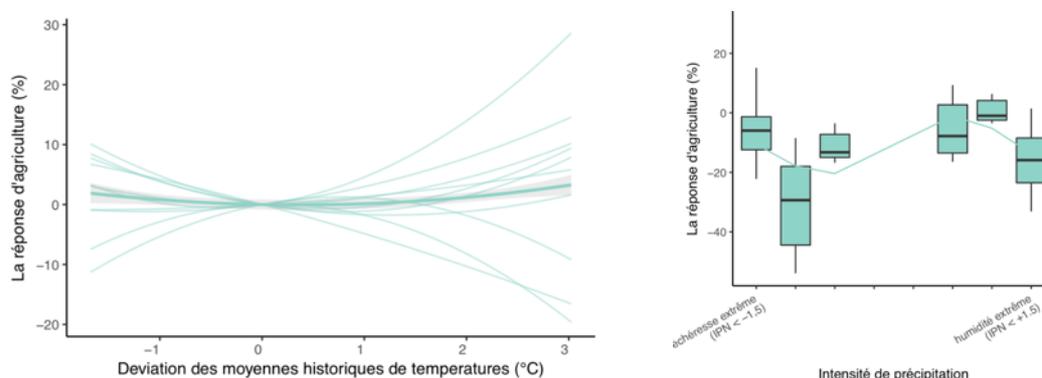
Tableau 4: Résultats de l'analyse pour le PIB par habitant et les valeurs ajoutées des 3 secteurs (agriculture, industrie, service)

	PIBph	Agriculture VAB	Industrie VAB	Services VAB
IPN < -1.5	-0.084** (0.036)	-0.048 (0.048)	-0.070 (0.063)	-0.090 (0.060)
- 1.5 < IPN < -1.0	-0.081* (0.047)	-0.324*** (0.062)	-0.216*** (0.081)	-0.066 (0.077)
- 1.0 < IPN < - 0.5	-0.055 (0.041)	-0.029 (0.055)	-0.132* (0.072)	-0.042 (0.069)
- 0.5 < IPN < 0.5	Variable éliminé			
0.5 < IPN < 1.0	-0.027 (0.041)	-0.106* (0.055)	-0.058 (0.072)	-0.078 (0.069)
1.0 < IPN < 1.5	0.093* (0.048)	0.036 (0.065)	0.114 (0.084)	0.079 (0.081)
1.5 < IPN	-0.096** (0.044)	-0.150** (0.061)	-0.105 (0.080)	-0.066 (0.076)
Température	0.021** (0.011)	-0.003 (0.014)	0.029 (0.019)	0.024 (0.018)
Température ^2	-0.029*** (0.010)	0.003 (0.013)	-0.038** (0.017)	-0.048*** (0.016)
Dépenses publiques (% PIB)	0.001** (0.001)	0.003*** (0.001)	-0.001 (0.001)	0.004*** (0.001)
Indice Polity2	-0.001 (0.001)	0.003*** (0.001)	-0.002** (0.001)	0.002** (0.001)
Dettes publiques (% PIB)	-0.017*** (0.005)	-0.009 (0.010)	-0.024* (0.013)	-0.034*** (0.013)
APD net reçu (% GNI)	0.004 (0.028)	0.065 (0.047)	-0.205*** (0.061)	-0.003 (0.059)
Remises Gouvernementales	-0.004*** (0.0004)	0.005*** (0.001)	-0.004*** (0.001)	-0.002** (0.001)
Prix du pétrole	-0.0001 (0.0002)	-0.0002 (0.0003)	-0.0005 (0.0004)	-0.0003 (0.0004)
Indice d'ouverture des échanges	0.0003** (0.0002)	-0.0004* (0.0002)	0.003*** (0.0003)	-0.0004 (0.0003)
Observations	910	885	885	885
R <sup>2</sup> ajusté	0.323	0.512	0.622	0.638
F	28.843***	57.959***	88.809***	95.027***

Note: \*p<0.1; \*\*p<0.05; \*\*\*p<0.01

#### 4.2.2. Avec la randomisation de Monte Carlo

Figure 25: Réponse de la valeur ajoutée de l'agriculture à la déviation de la température par rapport à la moyenne historique (graphique de gauche) et par rapport aux extrêmes climatiques (graphique de droite)



### 4.3. Note méthodologique technique du modèle agricole

#### 4.3.1. Les bases de données pour le modèle agricole

##### 4.3.1.a. Base de données agricoles

Dans le cadre de cette analyse quantitative, deux considérations principales doivent être prises en compte : (1) avoir une perspective infranationale sur les impacts et (2) avoir le plus grand nombre possible d'observations. Les deux bases de données fournies par la Direction Générale des Etudes et des Statistiques Sectorielles (DGESS) du Ministère de l'Agriculture et des Aménagements Hydro-agricoles du Burkina Faso et l'Institut National de la Statistique et de la Démographie (INSD) sont les suivants:

- (1) La valeur ajoutée brute des secteurs économiques, y compris l'agriculture, est disponible en prix courants et constants au niveau national avec une fréquence trimestrielle pour la période du 1er trimestre 1999 au 2ème trimestre 2018.
- (2) Le rendement (tonnes/ha) des principales cultures est disponible au niveau régional (13 régions) en fréquence annuelle pour les années 1984-2017.

La deuxième option répond aux deux considérations mentionnées ci-dessus.

##### 4.3.1.b. Base de données climatiques

Des données à haute résolution sont nécessaires pour les études à l'échelle nationale ou infranationale. Les données climatiques historiques pour cette étude proviennent de la base de données EWEMBI, qui est une base globale de données quadrillées / maillées 0,5°x0,5° avec correction de biais, produit à partir de plusieurs bases de données de réanalyse et d'observation (Lange, 2016). La base de données est disponible jusqu'en 2013. Pour l'aspect futur de l'analyse, les variables climatiques sont projetées pour un scénario de faible réchauffement (RCP 2.6, GIEC 2014) et un scénario de réchauffement élevé (RCP 8.5, GIEC

2014)<sup>39</sup> utilisant un ensemble de modèles climatiques régionaux (MCR), qui résultent d'une combinaison des simulations du Modèle de Circulation Générale (MCG) et des impacts locaux des changements des concentrations mondiales de gaz à effet de serre d'un MCR. La combinaison MCG-MCR des modèles utilisés pour cette étude est illustrée ci-dessous. Tous les résultats du modèle climatique sont corrigés des biais à l'aide d'une méthodologie de pointe de préservation des tendances (Saeed et al. 2018), qui assure la cohérence complète des projections du modèle avec l'ensemble des données historiques d'observation utilisées (EWEMBI).

Tableau 5: Liste des modèles de circulation générale (GCM) et des modèles climatiques régionaux (RCM) utilisés

GCM forcing	RCM
MPIESM	REMO
HADGEM2	CCLM4
ECEARTH	RACMO
IPSL	RCA

Source: Climate Analytics' RegioClim documentation.

[http://regioclim.climateanalytics.org/documentation#doc\\_data\\_source](http://regioclim.climateanalytics.org/documentation#doc_data_source)

Les données climatiques mentionnées ci-dessus fournissent des données quotidiennes, ce qui permet une agrégation plus souple de la fréquence annuelle pour correspondre aux données agricoles dans le modèle économétrique.

#### 4.3.1.c. Bases de données combinés et nombre total d'observations

Bien que les données climatiques fournissent un ensemble plus fréquent de points de données, il faut les faire correspondre à la fréquence des données agricoles ; par conséquent, les données sont reflétées avec des informations annuelles de 1995 à 2013.

En termes de résolution spatiale, bien que les données agricoles pour les 13 régions soient disponibles, la résolution de chacune est très petite pour les données climatiques. Dans de nombreux cas, chaque région n'occupe qu'une seule cellule de la grille, d'où une plus grande probabilité d'incertitude. Pour réduire cette incertitude sans perdre les principales différences climatiques du pays, nous avons regroupé les régions en trois grandes zones climatiques : Le Sahel, le Nord et le Centre-Nord font partie de la zone climatique désertique chaude ; la Boucle du Mouhoun, le Centre-Ouest, le Centre-Sud, le Centre, le Plateau Central, le Centre-Est et l'Est font partie de la zone climatique semi-aride chaude ; Cascade, le Sud-Ouest et le Haut-Bassin appartiennent à la zone climatique de savane tropicale (Kottek et al., 2006).

<sup>39</sup> Profile représentatif d'évolution de la concentration (PREC ou en Anglais RCP) 2.6 ou environ 0,3-1,7°C de changement dans la température moyenne de surface mondiale d'ici la fin du siècle, et un scénario de réchauffement élevé (RCP 8.5 ou environ 2,6-4,8°C de changement dans la température moyenne de surface mondiale d'ici la fin du siècle

#### 4.3.2. Analyse des réponses historiques de la production agricole

La vulnérabilité spécifique du pays ou la prédisposition à être affecté négativement (GIEC) est estimée par le modèle de régression non linéaire, qui mesure la réponse de la valeur ajoutée agricole à différents niveaux de précipitations et de température. Les données historiques sur les rendements agricoles sont disponibles sur une base annuelle pour les 13 régions de 1995 à 2017 et ont été regroupées selon les trois zones climatiques. Toutes les variables indépendantes à utiliser dans le modèle auront la même échelle régionale et temporelle.

Le modèle économétrique est décrit en détail par l'équation suivante:

$$\ln y_{it,s} = \beta C_{it} + \gamma Z_{it,s} + \mu_i + \theta_{it} + \epsilon_{it}$$

avec

- $\ln y_{it,s}$ : Le rendement de la culture  $s$ , en zone climatique  $i$ , au temps  $t$ . Le rendement agricole se réfère à la production en tonnes par hectare récolté.
- $C$  est un vecteur de variables climatiques qui comprend
  - $f(temp)$  est la fonction de la température qui nécessite deux spécifications principales : (1) la forme quadratique, et (2) en degrés-jours de croissance. Dans ce dernier cas, la température annuelle moyenne est regroupée dans des intervalles d'intensité, où chaque intervalle a une plage/amplitude de 5 °C, et la valeur de chaque intervalle est le nombre de jours pendant la période de culture où la température moyenne quotidienne se situe dans la plage. En utilisant cette méthode, les informations quotidiennes provenant des données climatiques ne sont pas diluées comme dans le cas d'une simple moyenne annuelle. Les données climatiques utilisées dans la régression n'incluront que les mois pertinents à la période de production / culture de la spéculation spécifique utilisée comme variable dépendante.
  - $prec$  est le vecteur des précipitations qui cerne les extrêmes : les sécheresses représentées par l'Indice Normalisé de Précipitation-Évapotranspiration (INPE ou SPEI, en Anglais) et les précipitations extrêmes représentées par RX5d.
- $Z$ , un ensemble de variables de contrôle non climatiques est guidé par des théories économiques de maximisation du profit et tiendrait compte des facteurs nécessaires à la production et de ceux qui affectent les jours de production.
  - Population active pratiquant l'agriculture (par culture)
  - Engrais
  - Utilisation de semences améliorées

L'impact de la disponibilité de l'eau sur la production non irriguée sera couvert par la variable des précipitations mentionnée ci-dessus.

- $\phi_i$  est l'effet fixe invariable dans le temps et spécifique à la zone climatique.
- $\tau_{it}$  est la tendance temporelle non linéaire spécifique à la zone climatique, qui inclut les changements technologiques.

Les spécifications de l'équation sont détaillées ci-dessous:

Équation 1

$$y_{it,s} = \beta C_{it} + \gamma Z_{it,s} + \mu_i + \theta_{it} + \epsilon_{it}$$

L'équation 1 est complétée par diverses spécifications météorologiques basées sur Schlenker et Lobell (2010), et par l'inclusion d'une tendance temporelle quadratique pour saisir un progrès technologique non linéaire.

Équation 2

$$y_{it,s} = f(C_{it}) + \gamma_1 t + \gamma_2 t^2 + \mu_i + \theta_{it} + \epsilon_{it}$$

Nous utilisons quatre spécifications différentes de  $f(C_{it})$  à la suite de Schlenker et Lobell (2010), et notre propre inclusion des événements météorologiques extrêmes :

1. Données météorologique moyenne de la saison de culture sous forme linéaire où  $\bar{h}$  et  $\bar{p}$  représentent la température et les précipitations moyennes pendant la campagne agricole.

$$f(C_{it}) = \alpha_1 \bar{h}_{it} + \beta_1 \bar{p}_{it}$$

2. Données météorologique moyenne de la saison de culture sous forme quadratique.

$$f(C_{it}) = \alpha_1 \bar{h}_{it} + \alpha_2 \bar{h}_{it}^2 + \beta_1 \bar{p}_{it} + \beta_2 \bar{p}_{it}^2$$

3. Température non paramétrique suivant la notion des agronomes selon laquelle la croissance du rendement en log est linéaire par morceau. Comparé au calcul des degrés-jours où la température journalière est regroupée entre deux variables - l'une "augmentant le rendement" et l'autre "diminuant le rendement" -, la création de plus de variables degrés-jours en constituant des catégories en intervalles de 5°C nous permet d'éviter la désignation d'un "point de rupture optimal" en température absolue, qui serait probablement différent dans les régions du Burkina Faso où les conditions climatiques varient, tout en maintenant l'idée de la relation linéaire par morceau avec le rendement en log. Nous comptons donc le nombre de températures moyennes journalières qui entrent dans les catégories suivantes : température < 10°C, [10°C, 15°C), [15°C, 20°C), [20°C, 25°C), [25°C, 30°C), [30°C, 35°C), température ≥ 35°C. Avec la variable de température tronquée, nous incluons une moyenne quadratique des précipitations pendant la saison de culture. Pour éviter une parfaite multicollinéarité avec les variables de température, nous excluons les températures

entre 20°C et 25°C comme variable de référence. Il n'y a pas d'observations sous des températures inférieures ou égales à 20°C.

$$f(C_{it}) = \alpha_1 d_{20-25}(exclu) + \alpha_2 d_{25-30} + \alpha_3 d_{30-35} + \alpha_4 d_{>35} + \beta_1 \overline{p_{it}} + \beta_2 \overline{p_{it}^2}$$

4. Inclusion des événements extrêmes à l'aide de SPEI et du RX5 aux conditions météorologiques moyennes quadratiques de la saison de culture, où le SPEI mensuel est spécifié pour indiquer la présence d'une sécheresse sévère pendant les mois de semis/plantation, de croissance et de récolte ; et en comptant le nombre de mois de la saison de croissance où une sécheresse sévère est survenue.

$$f(C_{it}) = \alpha_1 \overline{h_{it}} + \alpha_2 \overline{h_{it}^2} + \beta_1 \overline{p_{it}} + \beta_2 \overline{p_{it}^2} + \delta_1 SPEI + \varphi_1 RX5$$

5. Inclusion des événements extrêmes à l'aide de SPEI et RX5 dans l'équation de rendement logarithmique linéaire par morceaux.

$$f(C_{it}) = \alpha_1 d_{20-25}(exclu) + \alpha_2 d_{25-30} + \alpha_3 d_{30-35} + \alpha_4 d_{>35} + \beta_1 \overline{p_{it}} + \beta_2 \overline{p_{it}^2} + \delta_1 SPEI + \varphi_1 RX5$$

6. Combinaison des cinq spécifications précédentes, selon la pertinence.
7. Inclusion de variables relatives à la population active, à l'utilisation de semences améliorées et à l'utilisation de différents engrais : rodenticide (solide et liquide), fongicide (solide et liquide), herbicide (solide et liquide), urée, NPK.

La robustesse des résultats est testée à l'aide d'une prédiction hors échantillon comme dans Schlenker & Roberts (2009) et Auffhammer & Steinhauser (2010), où chaque modèle est estimé  $n$  fois, et où chaque répétition choisit au hasard un échantillon plus court de la série temporelle par rapport à un échantillon complet. La robustesse est mesurée à l'aide de la précision de chaque modèle  $n$  dans la prédiction du reste des années non incluses dans l'estimation, mais les données sont disponibles dans l'échantillon complet. Les modèles varieraient en fonction des différentes spécifications des variables climatiques (moyenne annuelle, par étapes, polynômial ou par morceau). La comparaison de la précision entre les modèles utilise l'erreur quadratique moyenne de prédiction (RMSE) et le test  $t$  de Welch par rapport à l'hypothèse nulle que la RMSE dans les  $n$  répétitions sera la même pour toute comparaison de 2 modèles.

#### 4.3.3. Projections futures au niveau régional

Le risque d'une baisse de la production agricole d'une culture spécifique dans les années 2030 et 2040 due aux changements climatiques est calculé en appliquant les coefficients sectoriels climat-économie optimaux calculés à l'étape précédente aux projections futures des précipitations et températures provenant des modèles climatiques régionaux (MCR). Les résultats supposent qu'il n'y a pas de changement dans la réponse du rendement au climat et excluent donc la possibilité d'un changement du taux d'adaptation au cours des prochaines années par rapport aux observations historiques.

#### 4.4. Résultats des régressions pour le modèle agricole

Tableau 6: Régression de panel groupée

	Dependent variable:						
	log(Yield)						
	linear (1)	quadratic (2)	nonparametric (3)	quadratic with extremes (4)	nonparametric with extremes (5)	quadratic tasmx (6)	with fertilizer and employment (7)
tas	-0.157*** (0.049)	-1.922 (1.491)		-1.992 (1.525)		-0.365*** (0.069)	0.094 (0.299)
l(tas2)		0.031 (0.026)		0.032 (0.026)			
tas25_30			-0.012*** (0.003)		-0.013*** (0.003)		
tas30_35			-0.013*** (0.003)		-0.013*** (0.003)		
tasabove35			-0.013** (0.006)		-0.013** (0.006)		
tasmxabove40						0.029*** (0.008)	-0.038 (0.029)
l(tasmxabove402)						-0.0002* (0.0001)	0.0005 (0.0003)
pr_tot	0.001** (0.0003)	0.004*** (0.001)	0.005*** (0.001)	0.005*** (0.001)	0.005*** (0.001)	0.003*** (0.001)	0.007** (0.003)
l(pr_tot2)		-0.00000*** (0.00000)	-0.00000*** (0.00000)	-0.00000*** (0.00000)	-0.00000*** (0.00000)	-0.00000** (0.00000)	-0.00000** (0.00000)
RX5				-0.008 (0.006)	-0.010* (0.006)	-0.007 (0.006)	0.005 (0.013)
sd6_binary				0.023 (0.065)	0.044 (0.064)		
activepop							-0.00000 (0.00000)
rodenticide_liquid							0.00000 (0.00000)
rodenticide_solid							-0.464 (0.750)
fongicide_liquid							-0.00000 (0.00000)
fongicide_solid							0.242 (0.249)
herbicide_liquid							-0.000 (0.00000)
herbicide_solid							-0.035 (0.044)
semence_amelioree							0.002* (0.001)
urea							-0.0003 (0.0004)
npk							0.0003 (0.0003)
tt	0.055*** (0.011)	0.053*** (0.011)	0.054*** (0.011)	0.053*** (0.013)	0.052*** (0.012)	0.042*** (0.011)	0.372 (1.317)
l(tt2)	-0.001*** (0.0004)	-0.001*** (0.0003)	-0.001*** (0.0003)	-0.001** (0.0004)	-0.001** (0.0004)	-0.0004 (0.0004)	-0.006 (0.024)
Constant	3.561** (1.578)	27.389 (21.165)	0.464 (0.815)	28.062 (21.638)	0.476 (0.828)	8.145*** (2.110)	-11.008 (18.221)
Observations	384	384	384	371	371	384	36
R <sup>2</sup>	0.359	0.376	0.386	0.376	0.390	0.413	0.770
Adjusted R <sup>2</sup>	0.352	0.366	0.374	0.362	0.375	0.400	0.526
F Statistic	53.096*** (df = 4; 379)	37.810*** (df = 6; 377)	33.742*** (df = 7; 376)	27.263*** (df = 8; 362)	25.663*** (df = 9; 361)	32.967*** (df = 8; 375)	3.157** (df = 18; 17)

Note:

\*p<0.1; \*\*p<0.05; \*\*\*p<0.01

Tableau 7: Régression à effets fixes

	Dependent variable:						
	log(Yield)						
	linear (1)	quadratic (2)	nonparametric (3)	quadratic with extremes (4)	nonparametric with extremes (5)	quadratic tasmax (6)	with fertilizer and employment (7)
tas	0.083 (0.174)	-3.022 (2.030)		-2.814 (2.070)		0.316* (0.188)	-1.029 (0.762)
I(tas2)		0.056 (0.034)		0.053 (0.035)			
tas25_30			0.007 (0.005)		0.006 (0.005)		
tas30_35			0.013** (0.006)		0.013** (0.006)		
tasabove35			0.029*** (0.010)		0.028*** (0.010)		
tasmaxabove40						-0.015 (0.010)	-0.023 (0.039)
I(tasmaxabove402)						0.0002 (0.0001)	0.001 (0.0004)
pr_tot	0.001** (0.0003)	0.005*** (0.001)	0.004*** (0.001)	0.005*** (0.001)	0.004*** (0.001)	0.005*** (0.001)	0.006* (0.003)
I(pr_tot2)		-0.00000*** (0.00000)	-0.00000*** (0.00000)	-0.00000*** (0.00000)	-0.00000*** (0.00000)	-0.00000*** (0.00000)	-0.00000* (0.00000)
RX5				0.002 (0.007)	0.003 (0.007)	0.004 (0.007)	-0.005 (0.014)
sd6_binary				0.080 (0.080)	0.065 (0.082)		
activepop							-0.00000 (0.00000)
rodenticide_liquid							0.00000 (0.00000)
rodenticide_solid							-0.480 (0.666)
fongicide_liquid							-0.00000 (0.00000)
fongicide_solid							0.033 (0.426)
herbicide_liquid							-0.00000 (0.00000)
herbicide_solid							0.011 (0.057)
semence_amelioree							0.001 (0.001)
urea							0.00004 (0.0004)
npk							-0.00002 (0.0004)
Observations	384	384	384	371	371	384	36
R <sup>2</sup>	0.014	0.053	0.065	0.058	0.068	0.054	0.655
Adjusted R <sup>2</sup>	-0.111	-0.073	-0.063	-0.076	-0.068	-0.078	-0.344
F Statistic	2.425* (df = 2; 340)	4.757*** (df = 4; 338)	4.664*** (df = 5; 337)	3.302*** (df = 6; 324)	3.363*** (df = 7; 323)	3.202*** (df = 6; 336)	1.066 (df = 16; 9)

Note:

\*p<0.1; \*\*p<0.05; \*\*\*p<0.01

## 5. Références bibliographiques

- Auffhamer, M., & Steinhauser, R. (2010). Forecasting the Path of US CO2 Emissions using state-level Information.
- Baarsch, F., Granadillos, J.R., Hare, W., Knaus, M., Krapp, M., Schaeffer, M., Lotze-Campen, H. (2019). The impact of climate change on incomes and convergence in Africa. *World Development*
- Lange, S. (2016). Earth2Observe, WFDEI and ERA-Interim data Merged and Bias-corrected for ISIMIP (EWEMBI). GFZ Data Services.
- Saeed F, Bethke I, Lange S, Lierhammer L, Shiogama H, Stone D A, Trautmann T and Schleussner C-F 2018 Bias correction of multi-ensemble simulations from the HAPPI model intercomparison project *Geosci. Model Dev. Discuss.* **2018** 1–23 Online: <https://www.geosci-model-dev-discuss.net/gmd-2018-107/>
- Schlenker, W., & Lobell, D. B. (2010). Robust negative impacts of climate change on African agriculture. *Environmental Research Letters*, 5(1), 014010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/1/014010>
- Schlenker, W., & Roberts, M. J. (2009). Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(37), 15594–15598. <https://doi.org/10.1073/pnas.0906865106>
- Kottek, M., J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, and F. Rubel, 2006: World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.*, 15, 259-263. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130.
- The World Bank in Burkina Faso. Website: <http://www.worldbank.org/en/country/burkinafaso/overview>. Accessed on 19 March 2019.
- FAO Country Fact Sheet on Food and Agriculture Policy Trends. April 2014.
- UNDP Human Development Index 2018.
- AfDB Prospects 2019 [https://www.afdb.org/fileadmin/uploads/afdb/Documents/Publications/2019AEO/AEO\\_2019-FR.pdf](https://www.afdb.org/fileadmin/uploads/afdb/Documents/Publications/2019AEO/AEO_2019-FR.pdf)
- Niang, I., O.C. Ruppel, M.A. Abdrabo, A. Essel, C. Lennard, J. Padgham, and P. Urquhart, 2014: Africa. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1199-1265.

Climate Analytics gGmbH  
Ritterstr. 3  
10969 Berlin  
Germany

T / +49 302 5922 9520  
E / [contact@climateanalytics.org](mailto:contact@climateanalytics.org)

Climate Analytics Inc. New York  
115 E 23rd St, 3rd Floor, Office #319  
New York, NY, 10010  
USA

T / + 1 718 618 5847  
E / [info.ny@climateanalytics.org](mailto:info.ny@climateanalytics.org)

Climate Analytics Lomé  
61, ru 195 Quartier Agbalépédogan  
s/c BP 81 555 Lomé  
Togo

T / +228 22 25 65 38 / 22 25 74 74  
E / [togooffice@climateanalytics.org](mailto:togooffice@climateanalytics.org)

Mis en oeuvre par :

**giz** Deutsche Gesellschaft  
für Internationale  
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Mandaté par :

 Ministère fédéral  
de l'Environnement, de la Protection de la Nature  
et de la Sécurité nucléaire  
de la République fédérale d'Allemagne

Sous la tutelle de :



En coopération avec :

CLIMATE  
ANALYTICS 