Federal Ministry
for Economic Cooperation
and Development

Potsdam Institute for
Climate Impact Research
P I K

giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Analyse des risques climatiques pour l'identification et la pondération des stratégies d'adaptation dans le secteur agricole du Burkina Faso

Page de couverture - © Matthieu - stock.adobe.com
Introduction - © Gilles Paire - stock.adobe.com
Chapitre 1 Changement des conditions climatiques - © YEMPABOU - stock.adobe.com
Chapitre 2 Changements hydrologiques - © CIFOR - stock.adobe.com
Chapitre 3 Impacts climatiques sur la production agricole - © pauli197 - stock.adobe.com
Chapitre 4 Impacts climatiques sur la production animale - © CIFOR - stock.adobe.com
Chapitre 5 Méthodes et données pour l'évaluation de l'adaptation - © CIFOR - stock.adobe.com
Chapitre 6 Capacité d'adaptation et facteurs pertinents pour la planification de l'adaptation - © Gilles Paire - stock.adobe.com
Chapitre 7 Services d'informations climatiques - © WASCAL
Chapitre 8 Irrigation - © CIFOR - stock.adobe.com
Chapitre 9 Gestion intégrée de la fertilité des sols - © CGIAR Climate - stock.adobe.com
Chapitre 10 Variétés de cultures améliorées - © Sunshine Seeds - stock.adobe.com
Chapitre 11 Incertitudes - © Matthieu - stock.adobe.com
Chapitre 12 Conclusion et recommandations à l'attention des politiques - © Alexander - stock.adobe.com
Références - © Britta - stock.adobe.com

Federal Ministry
for Economic Cooperation
and Development

Potsdam Institute for
Climate Impact Research
P I K

giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Analyse des risques climatiques pour l'identification et la pondération des stratégies d'adaptation dans le secteur agricole du Burkina Faso

Felicitas Röhrig, Nele Gloy, Sophie von Loeben, Christoph Gornott

Ponraj Arumugam, Paula Aschenbrenner, Hye-Rin Léa Baek, Igor Bado, Abel Chemura, Lemlem Habtemariam, Juliane Kaufmann, Hagen Koch, Rahel Laudien, Stefan Liersch, Sophia Lüttringhaus, Lisa Murken, Oblé Neya, Steffen Noleppa, Sebastian Ostberg, Safietou Sanfo, Bernhard Schauberger, Roopam Shukla, Julia Tomalka, Stefanie Wesch, Michel Wortmann

2021

Un rapport élaboré par le Potsdam Institute for Climate Impact Research (Institut de recherche de Potsdam sur les effets du changement climatique PIK) avec la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH au nom du ministère fédéral allemand de la Coopération économique et du Développement (BMZ), en coopération avec le Centre ouest-africain de service scientifique sur le changement climatique et l'utilisation adaptée des terres (WASCAL), la HFFA Research GmbH ainsi que des intervenants issus des autorités gouvernementales locales et nationales, de la société civile, des universités, du secteur privé, des professionnels et des partenaires au développement.

Analyse des risques climatiques pour l'identification et la pondération des stratégies d'adaptation dans le secteur agricole du Burkina Faso

Felicitas Röhrig [1], Nele Gloy[1], Sophie von Loeben[1], Christoph Gornott[1,2]

Ponraj Arumugam[1], Paula Aschenbrenner[1], Hye-Rin Léa Baek[1], Igor Bado[3], Abel Chemura[1], Lemlem Habtemariam[1], Juliane Kaufmann[4], Hagen Koch[1], Rahel Laudien[1], Stefan Liersch[1], Sophia Lüttringhaus[1,4], Lisa Murken[1], Oblé Neya[3], Steffen Noleppa[4], Sebastian Ostberg[1], Safietou Sanfo[3], Bernhard Schauberger[1], Roopam Shukla[1], Julia Tomalka[1], Stefanie Wesch[1] and Michel Wortmann[1]

[1] Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), [2] Université de Cassel, [3] Centre ouest-africain de service scientifique sur le changement climatique et l'utilisation adaptée des terres (WASCAL), [4] Forum for Food and Agriculture (HFFA) Research GmbH

Remerciements

Ce travail a été commandité et financé par le ministère fédéral allemand de la Coopération économique et du Développement (BMZ) auquel notre gratitude est adressée. Les auteurs tiennent également à remercier tous les réviseurs qui ont apporté leur contribution à cette étude - au Centre ouest-africain de service scientifique sur le changement climatique et l'utilisation adaptée des terres (WASCAL), au Humboldt Forum for Food and Agriculture (HFFA) Research GmbH, au BMZ, à la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, et en particulier à Matti Cartsburg et à Isabel Hackenberg pour leur précieuse participation à cette étude.
Des remerciements particuliers sont adressés à nos collègues du Programme de soutien aux politiques climatiques de la GIZ, Sibylla Neer et Enrico Grams, qui ont coordonné l'étude globale et apporté leurs contributions et un feedback précieux. L'équipe les remercie chaleureusement pour leur flexibilité, le temps qu'ils lui ont accordé et leurs contributions. Aussi, les auteurs aimeraient remercier cordialement WASCAL et plus précisément Oblé Neya pour son soutien au processus d'engagement des acteurs, la conduite des ateliers et la collecte de données. L'étude a beaucoup bénéficié des ateliers tenus à Ouagadougou ayant réuni des intervenants des autorités locales et nationales, de la société civile, des universités, du secteur privé, ainsi que des professionnels et des partenaires au développement. Les débats animés sur l'approche et le contenu de l'étude ont abouti à de judicieuses recommandations.

Contributions des auteurs :

Christoph Gornott, Felicitas Röhrig, Nele Gloy et Sophie von Loeben ont coordonné et révisé l'étude dans son ensemble, veillant à harmoniser les différentes étapes de l'analyse et à en extraire les résultats essentiels et les conclusions. Christoph Gornott, Lisa Murken et Felicitas Röhrig ont élaboré l'approche de l'étude, orientée par les contributions des intervenants. Felicitas Röhrig et Oblé Neya ont coordonné le processus d'engagement des intervenants. Paula Aschenbrenner a réalisé l'analyse climatique du chapitre 1. Hagen Koch, Stefan Liersch et Michael Wortmann ont conduit l'analyse hydrologique du chapitre 2. Ponraj Arumugam a analysé les impacts climatiques sur les rendements agricoles et l'aptitude aux cultures du chapitre 3 ainsi que les évaluations des risques biophysiques aux chapitres 8-10, sous la direction d'Abel Chemura, de Bernhard Schauberger, de Felicitas Röhrig et de Christoph Gornott ; Rahel Laudien a analysé les impacts climatiques sur les rendements des cultures en recourant à des méthodes statistiques ; Abel Chemura a conduit une analyse d'aptitude culturale. Sophia Lüttringhaus, Juliane Kaufmann et Steffen Noleppa ont mené les analyses coûts-avantages au niveau de l'exploitation dans les chapitres 8-10. Julia Tomalka a contribué aux chapitres 6-8. Sophia Lüttringhaus a contribué au chapitre 10. Sophie von Loeben a contribué au chapitre 9. Tous les auteurs ont contribué au chapitre 5 sur les méthodes et au chapitre 11 sur les incertitudes. Felicitas Röhrig, Nele Gloy, Sophie von Loeben, Lisa Murken, Julia Tomalka ont fourni un soutien global aux recherches. Le résumé pour les responsables politiques a été élaboré par Hye-Rin Léa Baek avec Nele Gloy, Sophie von Loeben et Christoph Gornott.

Référence recommandée :
Röhrig, F., Gloy, N., von Loeben, S., Arumugam, P., Aschenbrenner, P. Baek, H., Bado, I., Chemura, A., Habtemariam, L., Kaufmann, J., Koch, H., Laudien, R., Liersch, S., Lüttringhaus, S., Murken, L., Neya, O., Noleppa, S., Ostberg, S., Safietou, S., Schauberger, B., Shukla, R., Tomalka, J., Wesch, S., Wortmann, M. & Gornott, C., (2021). *Analyse des risques climatiques pour l'identification et la pondération des stratégies d'adaptation dans le secteur agricole du Burkina Faso*. Un rapport élaboré par le Potsdam Institute for Climate Impact Research (Institut de recherche de Potsdam sur les effets du changement climatique PIK) avec la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH au nom du ministère fédéral allemand de la Coopération économique et du Développement (BMZ), 151 pp. DOI: 10.48485/pik.2022.001.

© Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK)
Telegraphenberg A 31
14473 Potsdam
Germany

2021

Cette publication en accès libre est distribuée sous licence Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 Generic (CC BY-NC-ND).

Abstract

Au point de vue socio-économique, le Burkina Faso est largement dépendant de l'agriculture, un secteur fortement influencé par les facteurs météorologiques et de plus en plus malmené par les effets du changement climatique. Actuellement, les informations disponibles sur les risques climatiques et leurs impacts concernant le secteur agricole du pays sont limitées. Cette étude a donc pour objectif de fournir une analyse approfondie des risques climatiques accompagnée d'une vaste évaluation de quatre stratégies d'adaptation potentielles pouvant guider les décideurs locaux en matière de planification et de mise en œuvre de l'adaptation au Burkina Faso. L'évaluation des impacts du changement climatique consiste en plusieurs étapes comprenant : des projections climatiques basées sur deux scénarios d'émissions (SSP3-RCP7.0 et SSP1-RCP2.6), une modélisation hydrologique sur les variations de la disponibilité en eau, la modélisation et la comparaison des rendements futurs de quatre cultures couramment utilisées (le maïs, le sorgho, le millet et le niébé), ainsi qu'une évaluation de la production animale dans les conditions climatiques à venir. À partir de la projection des impacts du changement climatique sur la production agricole, quatre stratégies d'adaptation différentes ((1) Gestion intégrée de la fertilité des sols (GIFS), (2) irrigation, (3) semences améliorées et (4) services d'informations climatiques (SIC)) suggérées et sélectionnées par différents acteurs à l'échelle nationale ont été analysées en ce qui concerne leur potentiel à atténuer les risques climatiques, leur rapport coût-efficacité et leur adaptabilité aux conditions locales. Les analyses ont été complétées par des évaluations d'experts et des études publiées, auxquelles sont venus s'ajouter des entretiens semi-structurés auprès d'informateurs essentiels et deux ateliers réunissant les acteurs concernés.

Les résultats montrent que la température quotidienne moyenne est en augmentation et que les projections indiquent la poursuite de son élévation de 0,6 °C (2030) à 1,1 °C (2090) en vertu de SSP1-RCP2.6 et de 0,5 °C (2030) à 3,6 °C (2090) en vertu de SSP3-RCP7.0 par rapport à 2004, en fonction des émissions futures de gaz à effet de serre. Des incertitudes règnent autour des projections des précipitations annuelles, avec de légères augmentations jusqu'en 2050 suivies d'une légère baisse en vertu de SSP1-RCP2.6 et une augmentation constante en vertu de SSP3-RCP7.0 avec une forte variabilité interannuelle. Les projections concernant les impacts du changement climatique sur les rendements varient suivant les régions et montrent en partie des tendances opposées. Certaines régions du nord montrent des rendements en augmentation (jusqu'à +30 % en vertu de SSP1-RCP2.6 et jusqu'à +20 % en vertu de SSP3-RCP7.0), tandis que peu de régions au sud présentent des rendements en baisse (de jusqu'à -30 % en vertu de SSP1-RCP2.6 et de jusqu'à -20 % en vertu de SSP3-RCP7.0). Les modèles culturaux montrent que les zones propices au sorgho, au millet et au niébé vont diminuer au Burkina Faso dans les conditions climatiques à venir, mais que la vocation à la culture du maïs restera stable. En outre, la possibilité de produire des cultures multiples deviendra de plus en plus difficile, ce qui limitera les options de diversification des agriculteurs. Pour ce qui est du secteur de l'élevage, il semble fort probable que la capacité de pâturages diminuera en vertu des deux scénarios de changement climatique avec des baisses plus importantes en vertu de SSP1-RCP2.6 que de SSP3-RCP7.0.

Les quatre stratégies d'adaptation se sont révélées être rentables sur le plan économique. Elles peuvent avoir un fort potentiel d'atténuation des risques et comporter divers avantages conjoints. En particulier, la GIFS peut être vivement recommandée aux petits exploitants, car elle engendre des effets très positifs pour les sociétés et l'environnement. Grâce à l'irrigation et aux semences améliorées, les moyens de subsistance peuvent être optimisés, en particulier au nord du Burkina Faso, mais ce sont des stratégies d'adaptation complexes et coûteuses qui nécessitent un soutien intensif. Enfin, les SIC peuvent aider les agriculteurs à prendre des décisions éclairées et à réduire ainsi les impacts des risques climatiques. En règle générale, l'association de différentes stratégies d'adaptation peut entraîner des avantages supplémentaires. L'engagement actif des acteurs et des méthodes participatives sont nécessaires pour assurer la faisabilité et la durabilité à long terme des stratégies d'adaptation. Les résultats de cette étude pourraient contribuer à l'élaboration de l'adaptation au niveau national et local ainsi qu'aux décisions concernant les investissements et la planification du développement agricole, afin de renforcer la résilience du secteur agricole et surtout des petits exploitants face au changement climatique.

Mots-clés : adaptation au changement climatique, impacts climatiques, risques climatiques, agriculture, élevage, Burkina Faso, modélisation biophysique, analyse coûts-avantages, analyse multicritère

Table des matières

Abstract i
Liste des figures vii
Liste des tableaux xi
Liste des abréviations xii

PARTIE I – IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE 1

Introduction 1
Domaine de l'étude 1
Approche de l'étude 3

Chapitre 1 – Changement des conditions climatiques 7

1.1 Quelles influences subit le climat du Burkina Faso ? 7
1.2 Données et méthode 10
1.3 Conditions climatiques actuelles 11
1.4 Changement climatique et variabilité dans le passé et l'avenir proche 13
Résumé du chapitre 1 19

Chapitre 2 – Changements hydrologiques 21

2.1 Brève présentation de la situation hydrologique au Burkina Faso 21
2.2 Data and method 23
2.3 Changements passés 23
2.4 Changements hydrologiques dans le cadre du changement climatique au 21e siècle 24
2.4.1 Débit fluvial 24
2.4.2 Recharge des nappes phréatiques 27
Résumé du chapitre 2 29

Chapitre 3 – Impacts climatiques sur la production agricole ... 31

3.1 Influence météorologique passée sur la production agricole 32
3.1.1 Données et méthode 32
3.1.2 Résultats 32
3.2 Évaluation de la vocation culturale et changement des conditions climatiques 35
3.2.1 Données et méthode 35
3.2.2 Facteurs déterminant la vocation culturale au Burkina Faso 36
3.2.3 Résultats 36
3.3 Évaluation de la perte des rendements dans les conditions futures du changement climatique 45
3.3.1 Données et méthode 45
3.3.2 Résultats 45
Résumé du chapitre 3 48

Chapitre 4 – Impacts climatiques sur la production animale .. 51

4.1 Le secteur de l'élevage au Burkina Faso 51
4.2 Données et méthode 55
4.3 Résultats 56
Résumé du chapitre 4 62

PARTIE II – ADAPTATION 65

Chapitre 5 – Méthodes et données pour l'évaluation de l'adaptation 65

5.1 Sélection des stratégies d'adaptation 66
5.2 Évaluation multicritère des stratégies d'adaptation 67
5.3 Évaluation biophysique du potentiel d'atténuation des risques 68
5.4 Analyse coûts-avantages 69

Chapitre 6 – Capacité d'adaptation et facteurs pertinents pour la planification de l'adaptation 73

6.1 Adaptation et capacité d'adaptation 73
6.2 Facteurs à la base de la planification de l'adaptation 74
6.2.1 Accès aux ressources 74
6.2.2 Contexte local et diversité 74
6.2.3 Savoir et informations 75
6.2.4 Gouvernance, institutions et réseaux 76
6.3 Les sexospécificités, la vulnérabilité et l'adaptation au changement climatique au Burkina Faso 77
6.3.1 Les sexospécificités dans les politiques et les plans nationaux 77
6.3.2 Facteurs déterminants à la vulnérabilité au changement climatique liée au genre 77
6.3.3 Un point de vue intersectoriel 78

Chapitre 7 – Services d'informations climatiques 81

7.1 Contexte et description de la stratégie d'adaptation 81
7.2 Potentiel d'atténuation des risques 82
7.3 Analyse coûts-avantages de la culture pluviale du maïs associée à l'utilisation des informations climatiques 83
7.3.1 Référentiel et scénarios 83
7.3.2 Données de l'étude 83
7.3.3 Suppositions 84
7.3.4 Résultats 85
7.4 Évaluation qualitative des services d'informations climatiques 86
7.4.1 Potentiel de développement 86
7.4.2 Avantages conjoints potentiels 87
7.4.3 Répercussions inopportunes potentielles 87

7.4.4 Obstacles à la mise en œuvre ... 87
7.4.5 Besoins en matière de soutien institutionnel ... 88
7.5 Conclusion ... 89

Chapitre 8 – Irrigation ... 91

8.1 Contexte et description de la stratégie d'adaptation ... 91
8.2 Évaluation biophysique du potentiel d'atténuation des risques ... 91
8.3 Analyse coûts-avantages de la culture pluviale du maïs complétée par l'irrigation ... 94
8.3.1 Référentiel et scénarios ... 94
8.3.2 Données de l'étude ... 95
8.3.3 Suppositions ... 96
8.3.4 Résultats ... 96
8.4 Évaluation qualitative ... 97
8.4.1 Potentiel de développement ... 97
8.4.2 Avantages conjoints potentiels ... 98
8.4.3 Répercussions inopportunes potentielles ... 99
8.4.4 Obstacles à la mise en œuvre ... 100
8.4.5 Besoins en matière de soutien institutionnel ... 101
8.5 Conclusion ... 101

Chapitre 9 – Gestion intégrée de la fertilité des sols ... 103

9.1 Contexte et description de la technologie ... 103
9.2 Évaluation biophysique du potentiel d'atténuation des risques ... 104
9.3 Analyse coûts-avantages de la gestion intégrée de la fertilité des sols pour la production de sorgho ... 106
9.3.1 Référentiel et scénarios ... 107
9.3.2 Données de l'étude ... 107
9.3.3 Suppositions ... 108
9.3.4 Résultats ... 108
9.4 Évaluation qualitative de la gestion intégrée de la fertilité des sols ... 109
9.4.1 Potentiel de développement ... 109
9.4.2 Avantages conjoints potentiels ... 110
9.4.3 Résultats négatifs potentiels ... 110
9.4.4 Obstacles à la mise en œuvre ... 111
9.4.5 Besoins en matière de soutien institutionnel ... 111
9.5 Conclusion ... 112

Chapitre 10 – Variétés de cultures améliorées ... 115

10.1 Contexte et description de la technologie ... 115
10.2 Potentiel d'atténuation des risques biophysiques ... 117
10.3 Analyse coûts-avantages de la culture pluviale du sorgho en utilisant des variétés améliorées ... 119
10.3.1 Référentiel et scénarios ... 119
10.3.2 Données de l'étude ... 120

10.3.3 Suppositions 120
10.3.4 Résultats 121
10.4 Évaluation multicritère 122
10.4.1 Potentiel de développement 122
10.4.2 Avantages conjoints potentiels 123
10.4.3 Répercussions inopportunes potentielles 123
10.4.4 Obstacles à la mise en œuvre 123
10.4.5 Besoins en matière de soutien institutionnel 124
10.5 Conclusion 125

Chapitre 11 – Incertitudes 127
11.1 Données du modèle climatique 127
11.2 Modèle hydrologique 128
11.3 Modèles culturaux 128
11.4 Analyse coûts-avantages 129

Chapitre 12 – Conclusion et recommandations à l'attention des politiques 131
12.1 Conclusion 131
12.2 Recommandations à l'attention des politiques 133
12.2.1 Services d'informations climatiques (SIC) 133
12.2.2 Irrigation 134
12.2.3 Gestion intégrée de la fertilité des sols (GIFS) 134
12.2.4 Variétés de cultures améliorées 135
12.2.5 Recommandations générales 135

Références 139

Liste des figures

Figure 1 : Carte du Burkina Faso avec ses régions administratives. 2

Figure 2 : La chaîne d'impacts de l'analyse des risques climatiques. 3

Figure 3: Carte topographique du Burkina Faso et ses zones agro-écologiques (ZAE). 8

Figure 4 : Deux diagrammes climatiques présentant la répartition annuelle des précipitations et des températures au sud [10.75 °N ;-3.75 °E] (à gauche) et au nord [14.25 °N ;-0.25 °E] (à droite). 8

Figure 5 : Les SSP ou trajectoires socio-économiques communes de l'ensemble de scénarios défini par le GIEC (O'Neill et al., 2016) 9

Figure 6 : Émissions globales de CO_2 ($GtCO_2$) pour toutes les séquences des modèles d'évaluation intégrée (IAM) dans la base de données SSP. Graphique réalisé par Global Carbon Project. 9

Figure 7 : En haut : Deux diagrammes climatiques présentant la répartition annuelle des précipitations et des températures au sud [10.75 °N ;-3.75 °E] (à gauche) et au nord [14.25 °N ;-0.25 °E] (à droite). En bas : Températures annuelles moyennes en °C (à gauche) et précipitations annuelles moyennes en mm (à droite) au Burkina Faso de 1997-2016. 11

Figure 8 : Le jour de l'année marquant le début de la saison des pluies établi en moyenne pour les années 1997-2016. 12

Figure 9 : Moyenne annuelle des précipitations maxi-males par jour sur la période 1997-2016. 12

Figure 10 : Différence de la température moyenne quotidienne en °C sur le Burkina Faso de 1988 à 2006.. 13

Figure 11 : La moyenne mobile sur 21 ans du changement des températures moyennes prévues comparées à 2014 en °C. Les valeurs sont des moyennes concernant le Burkina Faso. Chaque ligne colorée correspond aux projections de l'un des dix modèles individuels. La ligne noire représente la médiane de l'ensemble multi-modèles. 13

Figure 12 : Simulation et projection du nombre de nuits tropicales par an, pour les moyennes calculées sur la période de 20 ans (2004, 2030, 2050, 2090) en vertu de SSP1-RCP2.6 et de SSP3-RCP7.0. 14

Figure 13 : Simulation et projection du nombre de journées très chaudes par an, pour les moyennes calculées sur la période de 20 ans (2004, 2030, 2050, 2090) en vertu de SSP1-RCP2.6 et de SSP3-RCP7.0. 14

Figure 14 : Différence entre précipitations annuelles moyennes en mm (à droite) au Burkina Faso de 1988 à 2006. 15

Figure 15 : Projection du changement de la quantité moyenne des précipitations en mm/an en 2030, en 2050 et en 2090, par rapport à 2004 (1995-2014) en vertu de SSP1-RCP2.6 et de SSP3-RCP7.0. 15

Figure 16 : La moyenne mobile sur 21 ans de la projection du changement des précipitations annuelles comparées à 2014 en mm. Les valeurs sont des moyennes concernant le Burkina Faso. Chaque ligne colorée correspond à la projection de l'un des modèles. La ligne noire représente la médiane de l'ensemble multi-modèles. 16

Figure 17 : Modification des précipitations journalières maximales annuelles de 1988 à 2006 17

Figure 18 : Projection du changement de la quantité de précipitations journalières maximales annuelles en 2030, en 2050 et en 2090, par rapport à 2004 (1995-2014) en vertu de SSP1-RCP2.6 (rangée supérieure) et de SSP3-RCP7.0 (rangée inférieure) 17

Figure 19 : Projection du changement concernant le début de la saison des pluies en jours en 2030, en 2050 et en 2090, par rapport à 2004 (1995-2014) en vertu de SSP1-RCP2.6 (rangée supérieure) et de SSP3-RCP7.0 (rangée inférieure). La couleur rouge indique un début des pluies ultérieur ; la couleur bleue, un début des pluies antérieur. 18

Figure 20 : Projection du changement concernant le début de la saison des pluies en jours en 2090 (2081-2100), par rapport à 2004 (1995-2014) en vertu de SSP1-RCP2.6 (rangée supérieure) et de SSP3-RCP7.0 (rangée inférieure) pour chacun des dix modèles et la médiane de l'ensemble multi-modèles. La couleur rouge indique un début des pluies ultérieur ; la couleur bleue, un début des pluies antérieur. 18

Figure 21 : Carte du Burkina Faso et des limites des bassins versants de la Volta et du fleuve Niger. 22

Figure 22 : Débit observé et simulé des principaux fleuves du Burkina Faso. Observations (1951-1990) à Dapola, les relevés à long terme disponibles sont marqués d'un signe +. Les simulations sont fondées sur l'ensemble de données de réanalyse observationnelles EWEMBI. 24

Figure 23 : Projection du changement du débit annuel moyen à Dapola, le dernier limnigraphe au Burkina Faso sur la Volta noire (en haut à gauche), à Yaguru, le premier limnigraphe au Ghana sur la Volta blanche (en haut à droite) et à Bge Yalogo, le dernier limnigraphe au Burkina Faso, à l'amont de la rivière Sirba intermittente, dans l'aride nord-est (en bas à gauche). 25

Figure 24 : Débit mensuel moyen pendant la période de référence (bleue) et les trois périodes à venir pour SSP1-RCP2.6 (à gauche) et SSP3-RCP7.0 (à droite) à Dapola (Volta noire, en haut), à Yarugu (Volta blanche, au centre) et à Bge Yalogo (en amont de la rivière Sirba, en bas). Les barres d'erreur renvoient à l'intervalle interquartile (en couleur) et à l'intervalle de l'ensemble (moustaches). 26

Figure 25 : La variation médiane de la recharge des nappes phréatiques (au niveau du sous-bassin) par rapport à la période de référence (1995-2014) pour les deux scénarios (gauche/droite) et les trois périodes à venir (rangées de haut en bas). Les zones en pointillés montrent des modifications insignifiantes du point de vue statistique (seuil de signification de 5 %) en considérant les moyennes périodiques de l'ensemble. Les zones grises sont soit extérieures au Burkina Faso, soit extérieures au domaine de modélisation. 27

Figure 26 : Le débit décennal moyen à la station de Dapola (Volta noire) simulé par SWIM en vertu du scénario SSP1-RCP2.6 fondé sur l'ensemble de modèles climatiques mondiaux indiqués dans la légende. 28

Figure 27 : Variabilité des rendements expliquée par les influences météorologiques sur le maïs, le sorgho et le millet au niveau national. Sur l'axe y, le rendement est indiqué comme anomalies de rendements dépourvues de tendances en kg/ha. Tandis que les résultats du « modèle complet » peuvent être sujets au sur-apprentissage, les résultats de validation hors échantillon présentent un résultat plus réaliste des influences météorologiques sur l es rendements. Les valeurs r2 situées dans le coin inférieur droit indiquent la variabilité de rendement expliquée pour le modèle complet (r2e) et la validation hors échantillon (r2v). 33

Figure 28 : La part de variabilité des rendements due aux influences météorologiques pour le maïs, le sorgho et le millet au niveau des provinces. Les résultats du modèle complet sont présentés à gauche et ceux hors échantillon (OOS) sont présentés à droite. Les valeurs r2 représentent la part de la météo dans les variations de rendements ; plus elles sont élevées, plus le rendement dépend de la météo. Les provinces indiquées en blanc (pour le sorgho et le millet) n'ont pas fourni de données sur les cultures. 34

Figure 29 : Importance des variables dans la modélisation de l'aptitude au sorgho, au millet, au maïs et au niébé au Burkina Faso. Sols CO se réfère à la teneur en carbone organique et Sols BD à la biodiversité des sols. 36

Figure 30 : Cartes présentant l'aptitude climatique actuelle au sorgho, au millet, au maïs et au niébé au Burkina Faso d'après une modélisation basée sur les rendements observés. 37

Figure 31 : Carte montrant la modélisation des changements de l'aptitude au sorgho liés au climat au Burkina Faso pour les années 2030 (en haut), 2050 (au milieu) et 2090 (en bas) en vertu des scénarios SSP1-RCP2.6 (colonne gauche) et SSP3-RCP7.0. 38

Figure 32 : Cartes montrant la modélisation des changements de l'aptitude au millet perlé liés au climat au Burkina Faso pour les années 2030, 2050 et 2090 en vertu des scénarios SSP1-RCP2.6 et SSP3-RCP7.0. 39

Figure 33 : Cartes montrant la modélisation des changements de l'aptitude au maïs liés au climat au Burkina Faso pour les années 2030, 2050 et 2090 en vertu des scénarios SSP1-RCP2.6 et SSP3-RCP7.0. 40

Figure 34 : Cartes montrant la modélisation des changements de l'aptitude au niébé liés au climat au Burkina Faso pour les années 2030, 2050 et 2090 en vertu des scénarios SSP1-RCP2.6 et SSP3-RCP7.0. 41

Figure 35 : Potentiel d'aptitude à la polyculture en vertu de la situation actuelle et des scénarios SSP1-RCP2.6 et SSP3-RCP7.0 au Burkina Faso en 2030, 2050 et 2090..... 43

Figure 36 : Impact du changement climatique sur les zones adaptées de façon optimale à la polyculture au Burkina Faso en zone absolue par combinaison de cultures (graphique supérieur) et modification de l'aptitude par combinaison de cultures (graphique inférieur). 44

Figure 37 : Niveaux de rendements de sorgho (kg/ha) actuels et projetés à l'avenir au Burkina Faso selon un intervalle de quadrillage de 0,5 ° en vertu de SSP1-RCP2.6 (rangée supérieure) et SSP3-RCP7 (rangée inférieure) pour les années 2005 ("actuel"), 2030, 2050, et 2090. 46

Figure 38 : Simulation des pertes de rendements par région au Burkina Faso pour les années 2030, 2050 et 2090 en vertu de SSP1-RCP2.6 et de SSP3-RCP7.0 47

Figure 39 : Répartition des bovins, des ovins et des chèvres dans les provinces du Burkina Faso pour l'année 2019. 52

Figure 40 : Rendements des herbages annuels suivant différentes densités de cheptel dans une cellule et en une année ; la densité de bétail au rendement annuel le plus élevé est considérée comme potentiel de pâturage (marquée en vert dans la cellule)..... 56

Figure 41 : Médiane de l'ensemble multi-modèles du potentiel de pâturage annuel simulé pour la période historique de 1995-2014 au Burkina Faso. 57

Figure 42 : Variabilité du potentiel de pâturage passé au cours d'une année et sur plusieurs années dans l'ensemble multi-modèle observant la période historique. Chaque barre représente la fourchette du potentiel de pâturage mensuel suivant les dix MCM sur un intervalle de 20 années. Les couleurs plus claires indiquent des valeurs élevées atteintes en seulement quelques années. La ligne horizontale noire dans chaque barre marque la moyenne sur toutes les années et tous les modèles climatiques mondiaux. 58

Figure 43 : Variations du potentiel de pâturage annuel au niveau national en vertu des deux scénarios d'émissions et des trois intervalles chronologiques. Les boîtes à moustaches montrent l'étendue des dix modèles climatiques mondiaux. 58

Figure 44 : Médiane de l'ensemble multi-modèles du changement du potentiel de pâturage annuel à trois périodes (2030 en haut, 2050 au milieu, 2090 en bas) et selon deux scénarios d'émissions (SSP1-RCP2.6 à gauche et SSP3-RCP7.0 à droite). Les changements sont mesurés par rapport à la période historique indiquée à la figure 36. 59

Figure 45 : Rendements d'herbage sous des gestions de pâturage et de fauchage. 61

Figure 46 : Aperçu du processus de sélection des stratégies d'adaptation évaluées dans l'étude. 67

Figure 47 : Développement de la valeur actuelle nette (VAN) dès la transition à la culture pluviale du maïs associée à l'utilisation des informations climatiques. 85

Figure 48 : Répartition spatiale de la projection des impacts de l'utilisation de l'irrigation sur les rendements du sorgho suivant différents scénarios d'émissions et périodes. 92

Figure 49 : Intercomparaison des impacts sur les rendements à différentes périodes avec l'irrigation automatique..... 93

Figure 50 : Impacts de l'irrigation sur les rendements par région selon les différents scénarios et les différentes périodes. 93

Figure 51 : Développement de la valeur actuelle nette (VAN) dès la transition de la culture pluviale du maïs à l'utilisation complémentaire de l'irrigation..... 96

Figure 52 : Répartition spatiale des impacts de l'utilisation de la gestion intégrée de la fertilité des sols sur les rendements (%) du sorgho au Burkina Faso. 104

Figure 53 : Intercomparaison des impacts sur les rendements du sorgho à différentes périodes au niveau national. 105

Figure 54 : Désagrégation régionale des impacts sur les rendements avec l'utilisation de la gestion intégrée de la fertilité des sols suivant différents scénarios et périodes..... 106

Figure 55 : Développement de la valeur actuelle nette dès la transition à la culture du sorgho associée à la GIFS..... 109

Figure 56 : Répartition spatiale quadrillée de la projection des impacts sur les rendements de la variété améliorée (Fadda) au Burkina Faso suivant différents scénarios et périodes. 117

Figure 57 : Intercomparaison au niveau régional des impacts sur les rendements à différentes périodes avec la variété améliorée. 118

Figure 58 : Impacts sur les rendements par région avec la variété améliorée selon les différents scénarios et les différentes périodes. 118

Figure 59 : Développement de la valeur actuelle nette dès la transition à la culture des variétés de sorgho améliorées. Source : figure basée sur nos propres calculs. 121

Liste des tableaux

Tableau 1 : Aperçu des conditions climatiques changeantes au Burkina Faso. 19
Tableau 2 : Récapitulatif des changements hydrologiques. 29
Tableau 3 : Pourcentage de variations des surfaces par rapport à leur aptitude au sorgho, au millet, au maïs et au niébé d'ici à 2030, à 2050 et à 2090 en vertu des scénarios SSP1-RCP2.6 et SSP3-RCP7.0 au Burkina Faso. 42
Tableau 4 : Récapitulatif des impacts du changement climatique sur la production agricole. 48
Tableau 5 : Facteurs de conversion en Unités de bétail tropical (UBT) pour les différents types d'animaux. 55
Tableau 6 : Impacts climatiques sur la production animale. 62
Tableau 7 : Récapitulatif des principaux indicateurs ACA pour la transition à la culture pluviale du maïs associée à l'utilisation des informations climatiques 86
Tableau 8 : Récapitulatif de l'évaluation multicritère des CIS en tant que stratégie d'adaptation 89
Tableau 9 : Récapitulatif des principaux indicateurs ACA pour la transition à la culture pluviale du maïs associée à l'utilisation complémentaire de l'irrigation. 97
Tableau 10 : Récapitulatif de l'évaluation multicritère de l'irrigation en tant que stratégie d'adaptation 101
Tableau 11 : Récapitulatif des principaux indicateurs ACA pour la transition à la culture du sorgho avec la GIFS. 109
Tableau 12 : Récapitulatif de l'évaluation multicritère de la GIFS en tant que stratégie d'adaptation 112
Tableau 13 : Récapitulatif des principaux indicateurs ACA pour la transition à la culture des variétés améliorées de sorgho. 122
Tableau 14 : Récapitulatif de l'évaluation des variétés de cultures améliorées en tant que stratégie d'adaptation au Burkina Faso. 125
Tableau 15 : Récapitulatif de l'évaluation multicritère de toutes les stratégies d'adaptation. 132

Liste des abréviations

A/C	Rapport avantages-coûts
ACA	Analyse coûts-avantages
AGRA	Alliance for the Green Revolution in Africa (Alliance pour la révolution verte en Afrique)
ALR	Agrarian Land Re-organization (Réorganisation des terres agraires)
AMPLIFY	Agricultural Model for Production Loss Identification and Failures of Yields (Modèle agricole servant à identifier les pertes de production et de rendements)
ANAM	Agence nationale de la météorologie
AUC	Area Under the receiver operating Curve (Aire sous la courbe ROC)
AZN	Association Zoramb Naagtaaba
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Ministère fédéral allemand de la Coopération économique et du Développement)
C3S	Service Copernicus concernant le changement climatique
CDN	Contributions déterminées au niveau national
CFA	Communauté financière africaine
CGIAR	Consultative Group on International Agricultural Research (Groupe consultatif pour la recherche agricole internationale)
CHIRPS	Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (Ensemble de données des précipitations relevées par le Climate Hazards Group de l'Université de Californie à Santa Barbara)
CIA	Critère d'information d'Akaike
CILSS	Comité inter-États de lutte contre la sécheresse au Sahel
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project
CWR	Crop Water Requirement (Besoin en eau des cultures)
DGESS	Direction générale des études et des statistiques sectorielles
DGRE	Direction générale des ressources en eau
DSSAT	Decision Support System for Agrotechnology Transfer
ECS	Equilibrium Climate Sensitivity (Sensibilité climatique à l'équilibre)
ERA5	Projet de réanalyse atmosphérique du climat mondial cinquième génération du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT)
FAO ou ONUAA	Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
FEWS NET	Famine Early Warning Systems Network (Réseau de systèmes d'alerte précoce contre la famine)
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GIFS	Gestion intégrée de la fertilité des sols
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
GLC	Global Land Cover (Couverture végétale mondiale)
GRDC	Centre mondial de données sur les eaux de ruissellement
$GtCO_2$	Émissions globales de CO_2
HWSD	Harmonised World Soil Database (Base de données harmonisée mondiale des sols)
ICV	Improved Crop Varieties (Variétés de cultures améliorées)
IITA	International Institute of Tropical Agriculture (Institut international d'agriculture tropicale)
INERA	Institut de l'environnement et de recherches agricoles
ISIMIP	Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project

JPA	Jardin potager africain
LPJmL	Lund-Potsdam-Jena with managed Land
LUCODEB	Lutte contre la désertification au Burkina
MAAH	Ministère de l'agriculture et des aménagements hydro-agricoles
MCM	Modèle climatique mondial
MCR	Modèle climatique régional
MEI	Modèles d'évaluation intégrée
MMEM	Multi-Model Median (Médiane de l'ensemble multi-modèles)
MOA	Mousson ouest-africaine
MRAH	Ministère des ressources animales et halieutiques
ODD	Objectifs de développement durable
OMM	Organisation météorologique mondiale
ONG	Organisation non gouvernementale
OOS	Out-Of-Sample (Hors échantillon)
PAGIRE	Plan d'action pour la gestion intégrée des ressources en eau
PIB	Produit intérieur brut
PIK	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (Institut de recherche de Potsdam sur les effets du changement climatique)
PNA	Plan national d'adaptation
PSDB9	Programme Sahel Burkina
RCP	Profil représentatif d'évolution de concentration
SAP	Système d'alerte précoce
SCADD	Stratégie de croissance accélérée et de développement durable
SIC	Services d'informations climatiques
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SSP	Shared Socioeconomic Pathways (Trajectoires socio-économiques communes)
SWIM	Soil and Water Integrated Model
TIC	Technologies de l'‘information et de la communication
TRI	Taux de rendement interne
UBT	Unité de bétail tropical
UNPS-BF	Union nationale des producteurs de semences du Burkina Faso
USAID	United States Agency for Internal Development (Agence des États-Unis pour le développement international)
USD	Dollar US
VAN	Valeur actuelle nette
WASCAL	West African Science Service Centre on Climate Change and Adapted Land Use (Centre ouest-africain de service scientifique sur le changement climatique et l'utilisation adaptée des terres)
XGBoost	eXtreme Gradient Boosting
ZAE	Zone agro-écologique
ZCIT	Zone de convergence intertropicale

PARTIE I – IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Dans la première partie de cette analyse des risques climatiques, nous examinons les interactions entre les variations des conditions climatiques, la disponibilité en eau et l'agriculture au Burkina Faso. L'objectif est de répondre aux deux questions principales suivantes :

Comment les conditions climatiques vont-elles évoluer au cours des prochaines décennies ? Comment ces changements vont-ils influencer les activités agricoles des petits exploitants au Burkina Faso ?

Introduction

De nombreux pays prennent de plus en plus conscience de l'importance de recourir à des stratégies d'adaptation face au changement climatique, or un accompagnement sur la manière de mettre en œuvre les mesures nécessaires pour y parvenir fait défaut. Dans le cadre de leurs engagements internationaux en vertu de l'Accord de Paris, les pays cherchent à élaborer et à déployer des politiques d'adaptation et des plans d'investissement, par exemple dans leurs contributions déterminées au niveau national (CDN) et leurs plans d'adaptation nationaux (PAN). Fortement dépendant des facteurs climatiques, le secteur agricole est particulièrement vulnérable au changement du climat. Les événements extrêmes et les risques qui se développent progressivement menacent de plus en plus la production agricole et mettent en péril les moyens de subsistance liés à l'agriculture, avec des effets en cascade sur la sécurité alimentaire et nutritionnelle. Les décisions concernant les stratégies d'adaptation sont souvent prises au niveau infranational alors que les décideurs sont confrontés à un manque de données locales et spécifiques sur les risques climatiques actuels et projetés, sur leurs impacts, de même que sur les coûts et avantages des stratégies d'adaptation adéquates. Ces lacunes mettent en lumière la nécessité de recourir à des analyses et à des évaluations détaillées des risques climatiques, qui constitueraient une base cruciale à la prise de décisions rentables au niveau local. Une meilleure compréhension de la projection des impacts climatiques sur la production agricole et animale, des risques climatiques associés et des avantages éventuels liés à l'adaptation, à la fois à l'échelle nationale et régionale, est essentielle pour guider, promouvoir et accélérer les investissements publics et privés visant à établir un développement agricole résilient face au climat.

La présente étude fournit une analyse détaillée des risques climatiques pour certaines cultures et certains systèmes d'élevage au Burkina Faso, ainsi que des recommandations et une évaluation de la faisabilité, des coûts et des avantages de quatre stratégies d'adaptation sélectionnées. Le Burkina Faso fait l'objet de cette étude en raison de sa forte dépendance sur le plan socio-économique envers le secteur agricole, particulièrement exposé et vulnérable au changement climatique. Cette étude tente de fournir une base propice à la prise de décisions rentables et pertinentes vis-à-vis des risques pour le secteur agricole au Burkina Faso.

Domaine de l'étude

Le Burkina Faso est un pays enclavé d'Afrique de l'Ouest, semi-aride, bordé à l'est et au nord par le Mali, au nord-est par le Niger, au sud-est par le Bénin, au sud par le Ghana, le Togo et la Côte d'Ivoire. Situé au Sahel, il est fortement vulnérable au changement climatique en raison d'une combinaison de facteurs : une variabilité climatique élevée, une forte dépendance par rapport à l'agriculture pluviale, et une capacité économique et institutionnelle à faire face et à s'adapter à la variabilité et au changement climatique limitée. Depuis la fin des années 1960, cette région connaît une diminution des précipitations, ce qui a conduit à de graves famines accompagnées de répercussions néfastes

sur la société et l'économie. Les tendances climatiques montrent une transition actuelle générale vers un climat plus chaud, lié à l'augmentation des températures des eaux de surface tropicales, qui risque d'accroître la fréquence et l'intensité des sécheresses dans la région (Traore et Owiyo, 2013). Dans ce contexte, le besoin d'informations fiables sur les tendances climatiques, sur leurs impacts associés pour la production agricole et la sécurité alimentaire ainsi que sur des possibilités d'adaptation adéquates devient de plus en plus important.

Figure 1 : Carte du Burkina Faso avec ses régions administratives.

La situation est d'autant plus aggravée par l'un des plus forts taux de croissance démographique au monde, qui s'élève à près de 3 % (Plecher, 2020), entraînant un doublement de la population en 25 ans et une augmentation considérable des besoins alimentaires dans le contexte du changement climatique. Actuellement, tous les pays d'Afrique occidentale sont importateurs nets de céréales. Leur production actuelle est donc insuffisante pour répondre aux besoins domestiques (FAOSTAT, 2020). Les tendances actuelles concernant l'agriculture ouest-africaine montrent que l'on s'attend à des pénuries même sans compter les effets défavorables du changement climatique (Gerland et al., 2014 ; Ray et al., 2013).

L'agriculture joue un rôle important dans l'économie du Burkina Faso et la sécurité alimentaire et nutritionnelle de sa population. Dans l'ensemble, 80–90 % de la population exerce une activité agricole sur une petite exploitation et dépend fortement de l'agriculture pour sa sécurité alimentaire et ses moyens de subsistance (FAO, 2014). De nombreux ménages ruraux dans le pays dépendent aussi beaucoup de l'élevage, vivant au-dessous du seuil de pauvreté et confrontés à des obstacles majeurs pour produire ou acheter de la nourriture leur assurant un apport en calories et en protéines satisfaisant (Sanfo et Gérard, 2012). Au Burkina Faso, comme dans d'autres pays d'Afrique subsahariens, l'élevage est synonyme de richesse pour la population rurale et a, depuis très longtemps, une grande valeur culturelle. Comme il existe différentes formes d'élevage, basées sur la sédentarité ou la transhumance, le chapitre 4 met en lumière les conflits potentiels et la situation sécuritaire générale au Burkina Faso face au changement climatique.

Approche de l'étude

Le besoin de données scientifiques sur le changement climatique repose également sur davantage d'informations concernant les impacts climatiques ainsi que des informations accessibles sur les coûts et les avantages des stratégies d'adaptation possibles. De ce fait, cette étude associe l'évaluation des impacts climatiques basée sur un modèle à une analyse économique et multicritère afin de considérer des stratégies d'adaptation en vertu de différents scénarios d'émissions. Pour cela, nous nous référons à un Profil représentatif d'évolution de concentration des GES (appelé ci-après scénario d'émissions) qui suit une forte atténuation conformément à l'Accord de Paris (SSP1-RCP2.6) et à un scénario d'émissions sans politique climatique (SSP3-RCP7.0). Cette étude modélise ainsi l'intégralité de la chaîne d'impacts, de l'ampleur des impacts du changement climatique sur les secteurs de l'agriculture, de l'eau et de l'élevage aux actions concrètes possibles grâce à l'évaluation des options d'adaptation et des recommandations à l'attention des politiques, ainsi qu'à une discussion sur l'incertitude des résultats (Figure 2).

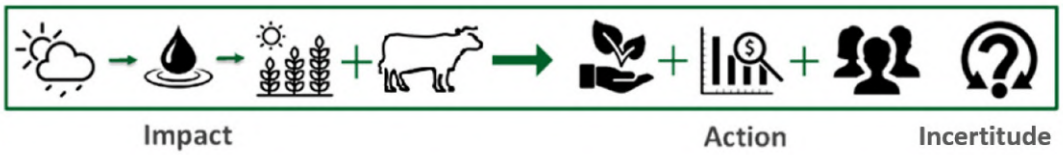


Figure 2 : La chaîne d'impacts de l'analyse des risques climatiques.

Bien que cette étude se concentre principalement sur les cultures agricoles, elle fournit en outre une analyse conjointe des secteurs de l'eau et de l'élevage. L'analyse hydrologique est axée sur la modélisation de la disponibilité future en eau pour la production agricole, évaluant à la fois le débit fluvial et la recharge des nappes phréatiques pour l'irrigation. L'évaluation des impacts climatiques sur la production animale examine la capacité de pâturage future dans le pays, un indicateur des capacités de charge pour le bétail et des disponibilités fourragères futures. En outre, ces résultats fournissent de précieux enseignements pour d'autres secteurs économiques tels que la foresterie, l'énergie, la santé et les infrastructures. Ils visent à aider les responsables politiques nationaux et locaux, les acteurs du développement, le secteur privé et les agriculteurs à élaborer leur planification et leurs investissements à long terme. Outre ce rapport scientifique approfondi, un résumé à l'attention des responsables politiques est également disponible. Il présente de manière concise les renseignements pertinents pour la politique au niveau supérieur.

Pour s'assurer que l'objectif de l'étude soit bien en accord avec les visées et priorités du pays, un vaste éventail de spécialistes et d'acteurs locaux sont impliqués dans le processus grâce à des ateliers, à des études réalisées auprès des agriculteurs et à des consultations entre spécialistes. Notre collaboration étroite avec l'institut partenaire local, le Centre Ouest Africain de Service Scientifique sur le Changement Climatique et l'Utilisation Adaptée des Terres (WASCAL) nous a permis d'assurer la validation continue de notre objectif et des résultats. L'étude est organisée de la manière suivante : les quatre premiers chapitres couvrent l'ampleur des impacts du changement climatique au Burkina Faso, tandis que les chapitres 5 à 10 se concentrent sur les actions (ou mesures d'adaptation) à entreprendre.

- Le chapitre 1 offre un aperçu des changements climatiques passés et projetés à l'avenir au Burkina Faso et se concentre sur les fluctuations des températures et des régimes de précipitations dans le pays. Toutes les projections des impacts climatiques reposent sur les résultats de dix modèles climatiques mondiaux en vertu de deux scénarios climatiques pour l'avenir : un scénario de réduction des émissions (SSP1-RCP2.6) et un scénario d'émissions élevées (SSP3-RCP7.0).
- Le chapitre 2 examine la variabilité de la disponibilité en eau pour la production agricole, en observant à la fois le débit fluvial et la disponibilité en eaux souterraines pour l'irrigation.
- Le chapitre 3 présente un vaste aperçu des impacts climatiques sur la production agricole, de l'influence météorologique sur les rendements des cultures, des variations en matière de vocation des cultures dans le contexte du changement climatique et de la projection des impacts du changement climatique sur les rendements des cultures.

- Le chapitre 4 évalue les impacts climatiques sur la production animale dans le pays en analysant à la fois la tendance du nombre de têtes de bétail et les projections concernant la capacité de pâturage et les disponibilités fourragères associées dans le contexte du changement climatique.
- Le chapitre 5 présente les actions à envisager ainsi que les méthodes et approches utilisées pour évaluer les stratégies d'adaptation en commençant par l'évaluation multicritère, puis biophysique, et enfin l'analyse coûts-avantages.
- Le chapitre 6 fournit un aperçu de la capacité d'adaptation au Burkina Faso et expose le cadre d'évaluation permettant de sélectionner et d'évaluer les recommandations d'adaptation pour le secteur agricole, en recourant à des indicateurs biophysiques, économiques et souples.
- Les chapitres 7 – 10 évaluent les stratégies d'adaptation sélectionnées. Le chapitre 7 examine les services d'informations climatiques, le chapitre 8 s'intéresse à l'irrigation, le chapitre 9 traite la gestion intégrée de la fertilité des sols, et le chapitre 10 présente l'utilisation de variétés de cultures améliorées.
- Le chapitre 11 soulève la question des sources d'incertitude et expose les limites de l'étude afin de faciliter l'interprétation des résultats.
- Le chapitre 12 établit une synthèse des résultats de l'étude qui permet de définir des recommandations à l'attention des politiques. Ces résultats visent à informer et à soutenir les autorités gouvernementales locales et nationales, les acteurs du secteur caritatif ou privé qui souhaitent définir leurs priorités et concevoir leurs investissements en matière d'adaptation, afin de renforcer la résilience des petits exploitants face au changement climatique.
- Un profil de risque climatique complémentaire sur le Burkina Faso fournit un bref aperçu des risques climatiques cruciaux pour d'autres secteurs comme la santé, l'eau, la biodiversité et les infrastructures. Ce profil et des informations associées sont disponibles sur le site web du projet www.agrica.de.

Chapitre 1 – Changement des conditions climatiques

Afin d'identifier les changements des conditions climatiques à venir au Burkina Faso, ce chapitre analyse plusieurs indicateurs relatifs aux températures et aux précipitations en vertu de deux scénarios d'émissions globaux, les scénarios SSP1-RCP2.6 et SSP3-RCP7.0 d'émissions de GES respectivement faibles et fortes, c'est-à-dire les Profils représentatifs d'évolution de concentration (Representative Concentration Pathways) examinés dans les rapports du GIEC, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (détails dans l'encadré 1). Le SSP1-RCP2.6 est un scénario qui reste globalement au-dessous de 2 °C par rapport aux températures pré-industrielles (GIEC, 2014) et qui est donc conforme aux objectifs visés par l'Accord de Paris. Le SSP3-RCP7.0 est un scénario d'émissions élevées selon lequel aucune politique climatique n'est prévue. Les données des projections climatiques ont été analysées afin de présenter l'ampleur possible des conditions climatiques à l'avenir, c'est-à-dire d'ici à 2030, à 2050 et à 2090, et d'informer ainsi les décideurs et les agents de mise en œuvre sur les conditions climatiques futures, à moyen et à long terme.

Tout d'abord, les facteurs influençant le climat actuel en Afrique occidentale, et particulièrement au Burkina Faso, sont présentés dans la partie suivante. Celle-ci est suivie de la description des données et des méthodes utilisées ainsi que d'un aperçu des conditions climatiques actuelles. À partir de ces éléments, les tendances climatiques passées et futures des variables climatiques annuelles moyennes, des événements météorologiques extrêmes et des variations saisonnières sont analysées.

1.1 Quelles influences subit le climat du Burkina Faso ?

Le Burkina Faso peut être divisé en quatre grandes zones agro-écologiques (ZAE, Figure 3), qui déterminent la production agricole du pays (Saydou, 2012). Les zones sahéliennes et subsahéliennes du nord sont caractérisées par la steppe semi-aride et les savanes arbustives. Les précipitations annuelles moyennes, qui ne dépassent pas 400 mm dans la zone sahélienne et s'élèvent à entre 400 et 700 mm dans la zone subsahélienne, se répartissent principalement sur environ cinq mois pendant l'été. Constitués en grande partie de prairies et de buissons, les sols dégradés et secs ne permettent qu'une faible production agricole, surtout dans le nord. Le millet et la production animale dominent dans cette region qui s'inscrit parmi les plus pauvres du pays (FEWS NET, 2017. ; USDA, 2011). Les quantités de précipitations annuelles augmentent progressivement vers le sud où règne un climat de plus en plus humide et tropical. La zone nord-soudanienne s'étend sur le centre du Burkina Faso. Elle présente des quantités de précipitations annuelles entre 700 et 900 mm et est recouverte de forêts et de terres cultivées. Grâce à ces terres de plus en plus fertiles, la production agricole dans cette région est dominée par le sorgho et les arachides (FEWS NET, 2017. ; Konate et al., 2020). Enfin, la zone sud-soudanienne dans le sud du pays reçoit jusqu'à 1100 mm de précipitations par an et est considérée comme le grenier à grains du pays. Grâce à ces terres fertiles et à un approvisionnement en eau relativement abondant, le coton, le maïs et le riz sont les cultures dominantes de la région (Saydou, 2012 ; USDA, 2011).

Le climat du Burkina Faso est principalement marqué par de fortes températures et des précipitations variables. Les précipitations s'intensifient du nord au sud et sont liées à la migration de la zone de convergence intertropicale (ZCIT) et ainsi à la formation de la mousson Ouest-africaine. Les processus atmosphériques et océaniques qui influencent la mousson Ouest-africaine sont complexes et sensibles au forçage externe. Suivant la migration du zénith du soleil, la mousson Ouest-africaine se développe vers le mois de mars et apporte les précipitations au sud du Burkina Faso à la fin mars et au nord à la fin juin (Figure 4). La mousson Ouest-africaine est principalement entraînée par le gradient de température entre l'océan et la surface terrestre. Les températures élevées du Sahara pen-

dant l'été boréal produisent une dépression thermique qui dirige l'air humide de l'océan Atlantique vers l'intérieur du pays, dans le Sahel, et conduit ainsi les précipitations dans l'arrière-pays (Herzschuh et al., 2014 ; Minka et Ayo, 2014).

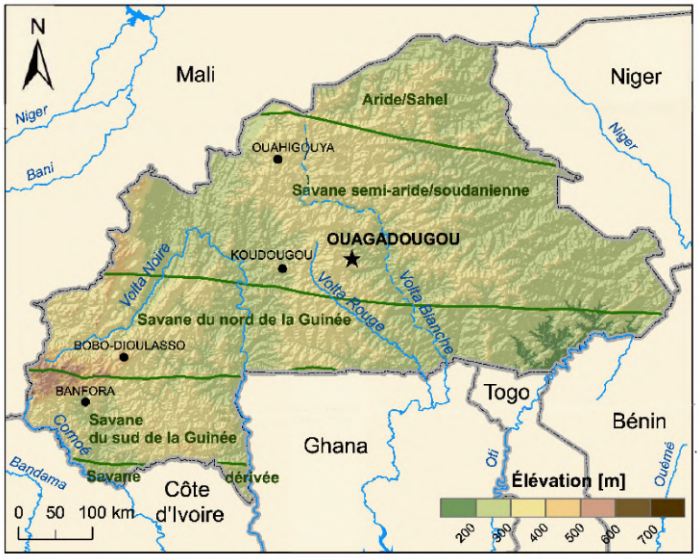


Figure 3: Carte topographique du Burkina Faso et ses zones agro-écologiques (ZAE).

Ces dernières décennies, les quantités de précipitations au Burkina Faso et dans toute la région du Sahel présentent une forte variabilité. Le Sahel a, dans sa plus vaste étendue, connu une grave sécheresse dans les années 1970 et 1980. Des études ont montré que cette période sèche peut être attribuée indirectement à l'association singulière des aérosols et des gaz à effet de serre qui ont caractérisé la période après les années 1950 (Giannini et Kaplan, 2019 ; Liersch et al., 2020).

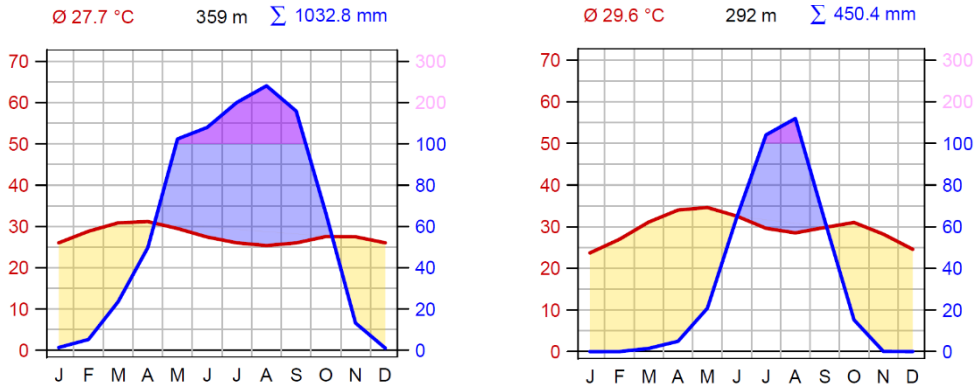


Figure 4 : Deux diagrammes climatiques présentant la répartition annuelle des précipitations et des températures au sud [10.75 °N ;-3.75 °E] (à gauche) et au nord [14.25 °N ;-0.25 °E] (à droite).

À des échéances interannuelles plus courtes, l'intensité de la mousson Ouest-africaine est influencée par la température de la surface des eaux de l'océan Atlantique et de la Méditerranée, par les températures du Sahara (Chauvin et al., 2010 ; Schewe et Levermann, 2017), par les modifications concernant l'utilisation des sols (Davin et de Noblet-Ducoudre, 2010 ; Kothe et al., 2014) et par l'augmentation de la quantité d'eau douce liée à la fonte de la calotte glaciaire au Groenland (Defrance et al., 2017). Ces interactions climatiques multidimensionnelles sont sources d'incertitudes pour les projections relatives à l'évolution de la mousson Ouest-africaine.

Trajectoires socio-économiques communes (SSP) et Profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP)

Figure 5 : Les SSP ou trajectoires socio-économiques communes de l'ensemble de scénarios défini par le GIEC (O'Neill et al., 2016).

Ces scénarios sont un nouvel ensemble de scénarios d'émissions et d'utilisation des terres utilisés dans le 6e Rapport (en comparaison aux quatre Profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP) utilisés dans le 5e Rapport d'évaluation) : les trajectoires de développement sociétal, les trajectoires socio-économiques communes (O'Neill et al., 2017), liées aux niveaux de forçage des Profils représentatifs d'évolution de concentration (Eyring et al., 2016 ; O'Neill et al., 2016).

Les SSP comprennent cinq alternatives décrivant les tendances socio-économiques dessinant la société à venir, qui contiennent des indications chiffrées relatives à des éléments cruciaux tels que la population, la croissance économique et l'urbanisation (O'Neill et al., 2016). SSP1 envisage une tendance optimiste quant au développement humain, avec des investissements importants dans la santé, l'éducation, des institutions qui fonctionnent bien, une croissance économique et, en même temps, une transition vers des pratiques durables. SSP3, au contraire, présente une tendance pessimiste, avec un développement caractérisé par des inégalités croissantes et une mise en valeur de la sécurité régionale (O'Neill et al., 2016). Pour traduire les conditions socio-économiques des SSP en trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre possibles, différents modèles d'évaluation intégrée (MEI) ont été employés (Hausfather, 2018). Les modèles d'évaluation intégrée envisagent différentes trajectoires d'émissions pour chaque SSP.

Ces différentes trajectoires d'émissions sont regroupées et représentées par les sept profils représentatifs d'évolution de concentration ou RCP qui définissent un forçage radiatif[1] accompli en 2100. Les RCP sont nommés d'après le niveau de forçage radiatif supplémentaire atteint en 2100 par rapport à l'époque pré-industrielle (+1.9, +2.6, +3.4, +4.5, +6.0, +7.0 et +8.5 W/m^2) (van Vuuren et al., 2011 ; Wayne, 2013).

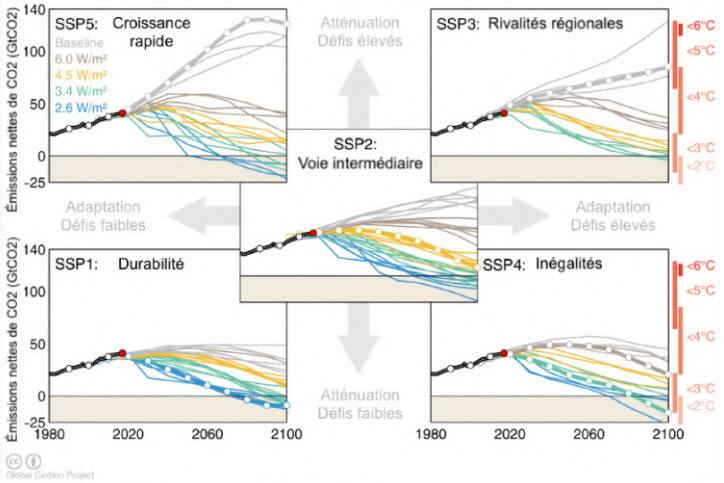


Figure 6 : Émissions globales de CO_2 ($GtCO_2$) pour toutes les séquences des modèles d'évaluation intégrée (IAM) dans la base de données SSP. Graphique réalisé par Global Carbon Project.

Afin de montrer une grande amplitude de scénarios socio-économiques et d'émissions futurs possibles, notre étude va se concentrer sur les scénarios SSP1-RCP2.6 et SSP3-RCP7.0. SSP1-RCP2.6 illustre un avenir durable au cours duquel le réchauffement climatique mondial sera vraisemblablement bien inférieur à 2 °C et donc conforme à l'Accord de Paris. SSP3-RCP7.0 illustre des défis complexes pour l'atténuation et l'adaptation dans un monde sans ou marqué par peu d'interventions politiques vis-à-vis du climat et par une augmentation de jusqu'à 5 °C des températures d'ici à la fin de ce siècle (Hausfather, 2018 ; van Vuuren et al., 2011). Ces deux scénarios nous fournissent une panoplie de climats futurs possibles, les deux trajectoires qui les encadrent restent des scénarios à venir plausibles.

[1] Le forçage radiatif décrit un changement dans le bilan énergétique radiatif du système climatique de la Terre dû à une perturbation imposée de l'extérieur. Un forçage positif (plus d'énergie entrante) réchauffe le système, tandis qu'un forçage négatif (plus d'énergie sortante) le refroidit.

1.2 Données et méthode

La base permettant d'évaluer le climat actuel et récemment passé dans cette étude est l'ensemble de données observationnelles climatiques W5E5 (Cucchi et al., 2020 ; Lange, 2019b), un jeu de données basé sur une association de simulations de modèles météorologiques mondiaux, de données satellites et d'observations in situ. L'ensemble de données recouvre la période de 1979-2016, suivant une résolution temporelle quotidienne et un intervalle de quadrillage de l'ensemble du globe de 0.5 ° x 0.5 ° (ce qui correspond à environ 55 km x 55 km au Burkina Faso). L'ensemble de données W5E5 a été réuni pour assurer une correction de biais des données climatiques sur lesquelles sont fondées les évaluations d'impacts menées en phase 3b de l'Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP3b ; (Lange, 2019a)) qu'utilise aussi beaucoup ce rapport.

Les données des projections climatiques simulées par des modèles climatiques mondiaux (MCM) proviennent du projet ISIMIP3b. Les simulations historiques couvrent les années 1850-2014, et les projections à venir (en vertu des deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre) couvrent les années 2015-2100. W5E5 est le jeu de données observationnelles de référence utilisé pour la correction de biais et la mise à échelle statistique du ISIMIP3b. Les modèles climatiques mondiaux[2] compris dans l'ISIMIP3b sont : CanESM5 (ou : Can), CNRM-ESM2-1 (ou : CNES), CNRM-CM6-1 (ou : CNCM), EC-Earth3 (ou : EC), GFDL-ESM4 (ou : GFDL), IPSL-CM6A-LR (ou : IPSL), MIROC6 (ou : MIROC), MPI-ESM1-2-HR (ou : MPI), MRI-ESM2-0 (ou : MRI), et UKESM1-0-LL (ou : UKE) (Lange, 2019a). Les MCM ont été réduits afin d'avoir une résolution spatiale plus élevée, et ont été préférés aux modèles climatiques régionaux car ils pouvaient être corrigés des biais sur les données climatiques observées et étaient cohérents avec les modèles utilisés pour les évaluations d'impact.

Les indicateurs analysés dans cette étude sont : la moyenne annuelle de la température moyenne de l'air, le nombre de journées très chaudes par an (température maximum dépassant 35 °C), le nombre de nuits très chaudes ou tropicales par an (température minimum dépassant 25 °C), la quantité annuelle moyenne des précipitations, l'intensité et la fréquence des fortes précipitations et le début de la saison des pluies.

L'indicateur de l'intensité des fortes précipitations est la quantité de précipitations maximum en une journée sur un an. L'indicateur de la fréquence des fortes précipitations est le nombre de jours dépassant un certain seuil. Ce seuil est défini au 95e centile de jours présentant des précipitations (>0,1 mm) au cours de la période de référence 1995-2014 pour chaque cellule de la grille. La moyenne au 95e centile pour la période de référence au Burkina est de 25 mm/jour avec une fourchette située entre 20 et 32 mm/jour.

Le début de la saison des pluies a été obtenu en se basant sur une définition adaptée de Laux et al. (2008) et de Stern et al. (1981), conçue pour l'Afrique occidentale, notamment le nord du Ghana et le Burkina Faso. Le début de la saison des pluies est donc considéré comme étant le premier jour de l'année réunissant toutes les conditions suivantes :

(1) au moins 20 mm de précipitations en 5 jours,
(2) le jour du commencement et au moins deux autres jours de cette période de 5 jours sont humides (>=0,1 mm de précipitations),
(3) pas de période sèche de sept jours consécutifs ou plus au cours des 30 jours suivants (30 jours après le premier jour).

Les modèles climatiques mondiaux ne peuvent représenter à la perfection le climat actuel et futur. Ils présentent naturellement des projections légèrement différentes, même s'ils sont fondés sur le même scénario d'émissions. Une validation détaillée des dix modèles climatiques mondiaux a montré que les médianes de l'ensemble multi-modèles (MMEM) se rapprochent le plus des observations réalisées en Afrique occidentale. Les différentes projections de chaque modèle individuel montrent le degré d'incertitude, et les médianes de l'ensemble multi-modèles offrent une estimation prudente des changements climatiques possibles. De ce fait, les MMEM sont présentées outre les résultats du modèle individuel. Dans le rapport, les projections du changement climatique sont basées sur des moyennes de 20 années[3], ce qui signifie que la température annuelle moyenne par

[2] Une boîte d'information sur les modèles climatiques se trouve dans le matériel supplémentaire.

[3] Les variables climatiques (telles que la température et les précipitations) présentent une forte variabilité annuelle. Afin d'analyser les changements climatiques à long terme plutôt que les variabilités annuelles, les moyennes des variables climatiques sur 20-40 ans sont comparées les uns avec les autres.

ex. en 2030 est calculée comme une moyenne des températures comprises entre 2021 et 2040. Le climat de référence, utilisé comme situation de départ dans cette étude, renvoie au climat en 2004 (1995-2014), cette période étant inclue dans les simulations historiques du ISIMIP3b. Les données des projections climatiques sont évaluées pour les périodes 2030 (2021-2040), 2050 (2041-2060) et 2090 (2081-2099). Les mentions concernant les changements à l'avenir reposent sur les calculs effectués pour chacune de ces trois périodes en comparaison à la situation de départ (2004) pour chaque modèle et scénario. Pour l'analyse des ensembles de données observationnelles, le climat actuel a été obtenu en établissant une moyenne sur la période 1997-2016.

1.3 Conditions climatiques actuelles

Le Burkina Faso présente actuellement des températures annuelles moyennes de 27-30 °C, le nord du pays connaissant des valeurs supérieures. Les différences de températures intersaisonnières sont faibles dans le sud et augmentent vers le nord, l'écart maximum étant atteint dans la partie supérieure du nord avec des températures mensuelles moyennes de 35 °C en mai et 24 °C en janvier (Figure 7). Le nombre de journées très chaudes (nuits tropicales) par an s'étend de 125 jours (25 jours) au sud à 265 jours (150 jours) au nord.

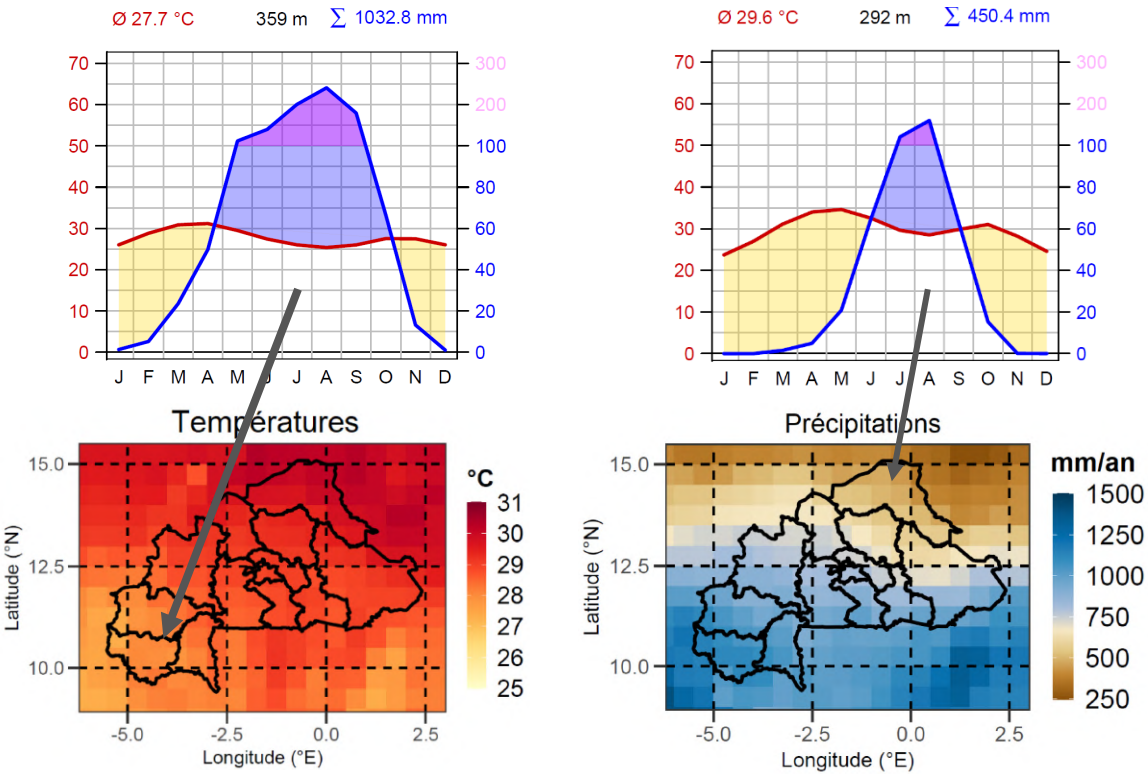


Figure 7 : En haut : Deux diagrammes climatiques présentant la répartition annuelle des précipitations et des températures au sud [10.75 °N ;-3.75 °E] (à gauche) et au nord [14.25 °N ;-0.25 °E] (à droite). En bas : Températures annuelles moyennes en °C (à gauche) et précipitations annuelles moyennes en mm (à droite) au Burkina Faso de 1997-2016.

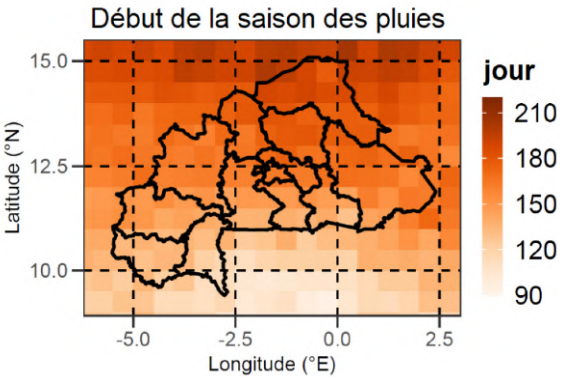


Figure 8 : Le jour de l'année marquant le début de la saison des pluies établi en moyenne pour les années 1997-2016.

Les quantités annuelles moyennes des précipitations se situent entre 300 et 1100 mm par an, avec des valeurs décroissantes en direction du nord (Figure 7, Figure 9). Le Burkina Faso connaît une saison sèche et une saison pluvieuse marquées. La saison des pluies s'étend sur plus de deux mois au nord et dure jusqu'à six mois au sud. Durant une année moyenne, la saison des pluies commence entre le 20 avril (jour 110) et le 15 juillet (jour 196), en fonction de l'emplacement (Figure 8). Le commencement et la durée de la saison des pluies présentent une forte variabilité d'une année à l'autre. La variabilité interannuelle de la quantité des précipitations annuelles est également élevée dans tout le pays. La partie nord du Burkina Faso connaît la variabilité interannuelle la plus élevée. Nous avons observé ici les tendances intersaisonnières en considérant le début de la saison des pluies comme étant l'un des facteurs influents les plus importants pour les agriculteurs.

Les agriculteurs au Burkina Faso sont très inquiets au sujet des faibles quantités de précipitations, des vagues de sécheresse ou du commencement tardif de la saison des pluies, mais ils sont aussi frappés par des pertes de récoltes provoquées par des inondations certaines années et dans certaines parties du pays (Sarr et al., 2015), entraînées par les fortes précipitations et aggravées par la dégradation des sols.

En moyenne, pour les années 1997-2016, les quantités de précipitations maximales par jour sont situées entre 30 mm et 80 mm (Figure 9). Les événements météorologiques extrêmes de très fortes précipitations peuvent atteindre localement des valeurs de 200 mm par jour.

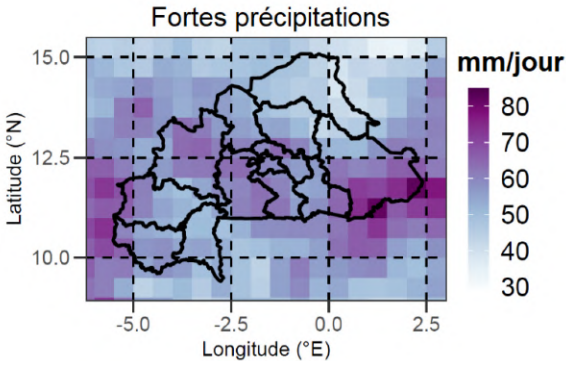


Figure 9 : Moyenne annuelle des précipitations maximales par jour sur la période 1997-2016.

1.4 Changement climatique et variabilité dans le passé et l'avenir proche

Températures

Dans le passé récent, les moyennes annuelles de températures ont présenté une augmentation de 0,27 °C entre 1988-2006 sur l'ensemble du Burkina Faso (Figure 10).

Les modèles climatiques prévoient une forte tendance en direction d'une augmentation des températures au Burkina Faso au cours du 21e siècle. Cela apparaît clairement dans les deux scénarios analysés, quoiqu'à différents degrés. La médiane de l'ensemble multi-modèles (MMEM) montre une augmentation moyenne des températures maximales par jour au Burkina Faso de 0,6 °C (2030), 0,9 °C (2050) à 1,1 °C (2090) en vertu de SSP1-RCP2.6 (scénario de réduction des émissions) et de 0,5 °C (2030), 1,3 °C (2050) à 3,6 °C (2090) en vertu de SSP3-RCP7.0 (scénario d'émissions élevées) par rapport à 2004 (Figure 12). En vertu du scénario de réduction des émissions, les températures n'augmentent pas fortement après 2050, suite à la stabilisation des émissions de GES avant le milieu du siècle. Si l'on tient compte de l'augmentation des températures avant 2004 (GIEC, 2014), l'augmentation des températures dépasserait largement l'objectif de 1,5 °C d'ici à 2050 pour la majorité des modèles, même en vertu du scénario de réduction des émissions.

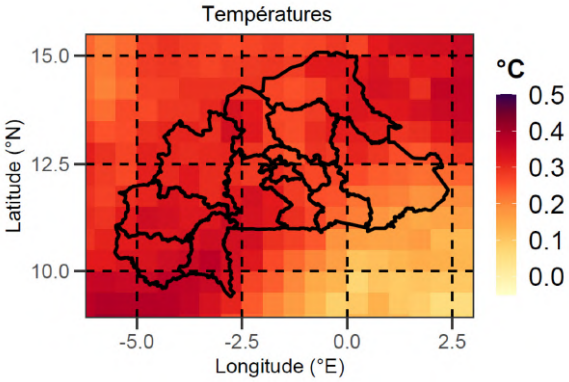


Figure 10 : Différence de la température moyenne quotidienne en °C sur le Burkina Faso de 1988 à 2006.

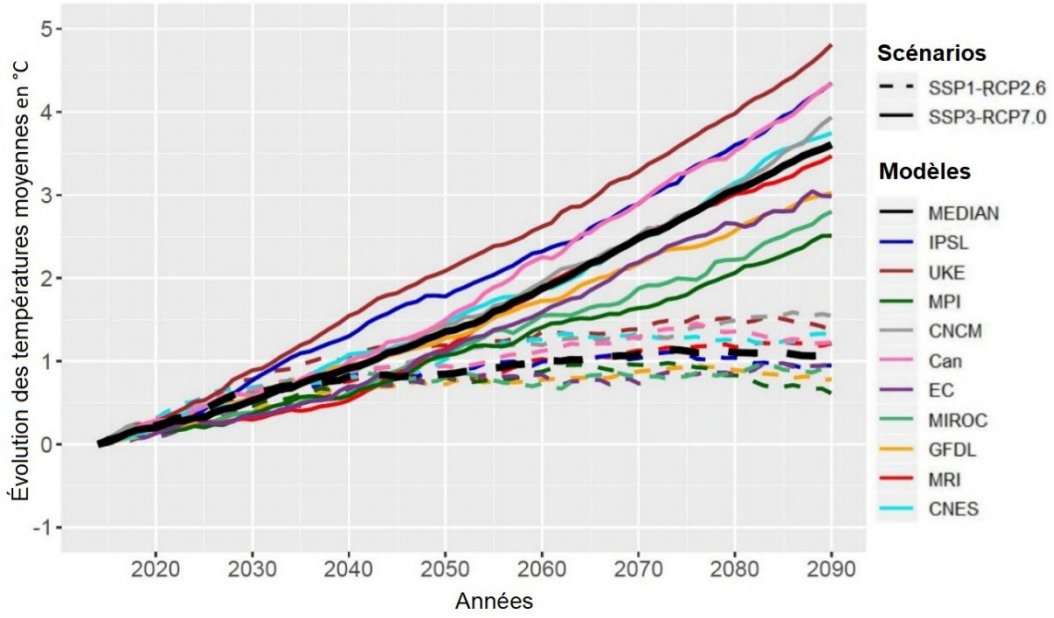


Figure 11 : La moyenne mobile sur 21 ans du changement des températures moyennes prévues comparées à 2014 en °C. Les valeurs sont des moyennes concernant le Burkina Faso. Chaque ligne colorée correspond aux projections de l'un des dix modèles individuels. La ligne noire représente la médiane de l'ensemble multi-modèles.

Les projections de températures présentent un degré de confiance très élevé, tous les modèles montrant la même tendance (Figure 11). Même si les modèles présentent différentes fourchettes d'augmentation des températures, ils indiquent tous une augmentation continue jusqu'en 2090 en vertu du scénario d'émissions élevées. Le choix des dix modèles climatiques mondiaux présente un biais pour les modèles prévoyant de fortes augmentations de températures, de ce fait, la fourchette de probabilité des températures futures au Burkina Faso pourrait être légèrement inférieure aux valeurs indiquées (comparer au chapitre 10).

Les températures extrêmes limiteraient la croissance des cultures ou même entraîneraient leur perte, selon le type de culture, de cultivars et le stade de développement phénologique. Logiquement, avec l'augmentation récente des températures, le nombre de températures extrêmes, comme les journées très chaudes et les nuits tropicales, a également augmenté.

Pour l'avenir, les projections indiquent une augmentation du nombre de journées très chaudes et de nuits tropicales dans toutes les parties du pays et en vertu des deux scénarios d'émissions, atteignant des valeurs de 270 nuits tropicales par an (Figure 12) et de 308 journées très chaudes (Figure 13) en moyenne au Burkina Faso à la fin du siècle en vertu du scénario d'émissions élevées.

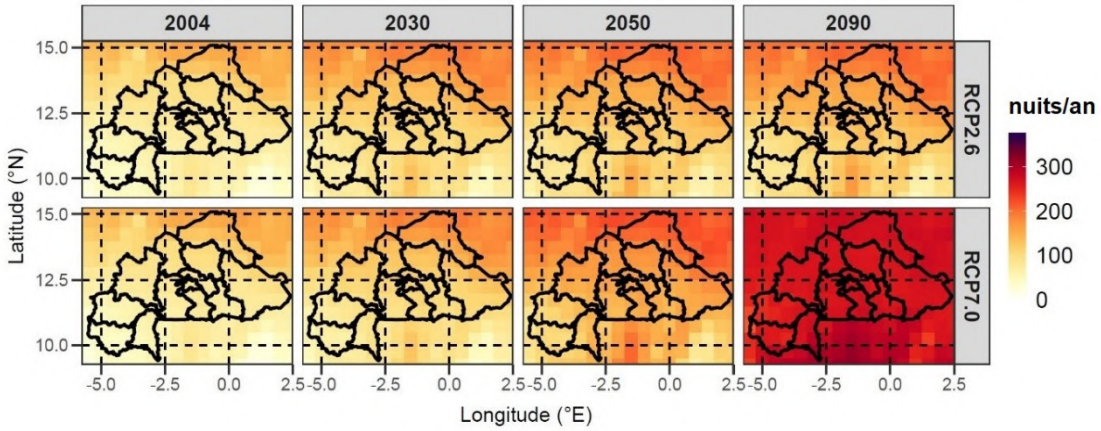


Figure 12 : Simulation et projection du nombre de nuits tropicales par an, pour les moyennes calculées sur la période de 20 ans (2004, 2030, 2050, 2090) en vertu de SSP1-RCP2.6 et de SSP3-RCP7.0.

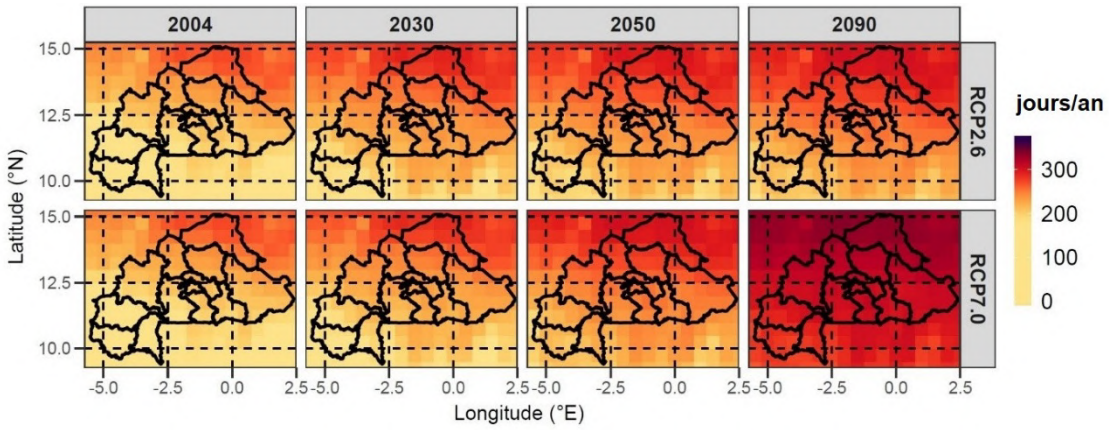


Figure 13 : Simulation et projection du nombre de journées très chaudes par an, pour les moyennes calculées sur la période de 20 ans (2004, 2030, 2050, 2090) en vertu de SSP1-RCP2.6 et de SSP3-RCP7.0.

Précipitations

Le Burkina Faso a subi des décennies de sécheresse dans les années 1970 et 1980. La quantité des précipitations annuelles moyennes s'est partiellement améliorée depuis, mais n'a jusqu'à présent pas retrouvé ses valeurs antérieures aux années 1970. Les valeurs des précipitations annuelles ont augmenté dans le passé récent dans presque toutes les parties du Burkina Faso (Figure 14). En outre, la variabilité interannuelle des quantités de précipitations annuelles s'est accrue dans de vastes parties du Burkina Faso.

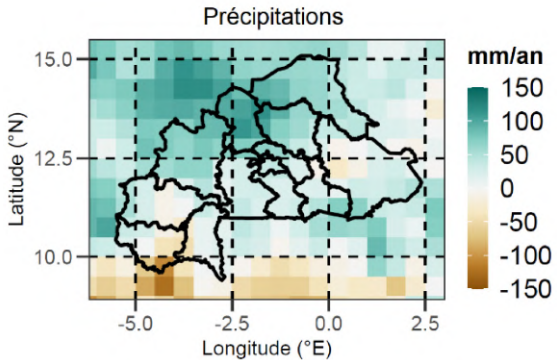


Figure 14 : Différence entre précipitations annuelles moyennes en mm (à droite) au Burkina Faso de 1988 à 2006.

Dans le prolongement de cette tendance, la médiane de l'ensemble multi-modèles prévoit des augmentations de la quantité des précipitations annuelles à l'avenir dans tout le pays en vertu des deux scénarios d'émissions d'ici à 2050. En vertu du scénario de réduction des émissions, de légères augmentations seulement sont prévues pour les prochaines décennies et après 2050, les quantités de précipitations moyennes annuelles devraient légèrement baisser. Une augmentation continue des quantités de précipitations est prévue en vertu du scénario d'émissions élevées (Figure 15). D'après les projections, la variabilité interannuelle des quantités de précipitations devrait rester élevée.

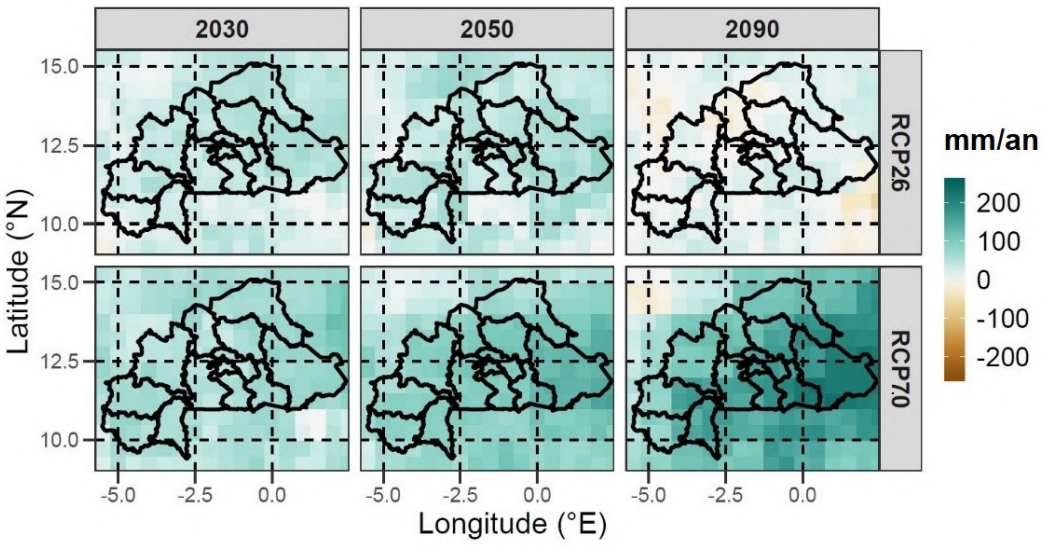


Figure 15 : Projection du changement de la quantité moyenne des précipitations en mm/an en 2030, en 2050 et en 2090, par rapport à 2004 (1995-2014) en vertu de SSP1-RCP2.6 et de SSP3-RCP7.0.

D'une manière générale, la confiance dans les changements projetés en matière de précipitations est bien moindre que dans les changements de température, car tous les modèles ne s'accordent pas sur la tendance positive des précipitations (Figure 16). Des études récentes ont montré un renforcement de la mousson Ouest-africaine à l'avenir ainsi qu'un déplacement vers l'ouest des régimes actuels de précipitations en vertu du réchauffement climatique global[4] (Aschenbrenner, 2018 ; Roehrig et al., 2013 ; Schewe et Levermann, 2017). Cela concorde avec un climat plus humide à l'avenir au Burkina Faso, prévu en vertu du scénario d'émissions élevées par la plupart des modèles présentés ici (voir Figure 16). Toutefois, même si la majorité des modèles et des études indiquent un climat plus humide au Burkina Faso, on ne peut pas exclure que le pays pourrait connaître un climat plus sec à l'avenir, pendant quelques décennies ou suivant une tendance à long terme, comme certains modèles le suggèrent en vertu des deux scénarios. Defrance (2017) concluent que la poursuite de la fonte rapide de la calotte glaciaire au Groenland pourrait entraîner l'affaiblissement soudain de la mousson Ouest-africaine[5] et donc une baisse des quantités de précipitations annuelles au Burkina Faso.

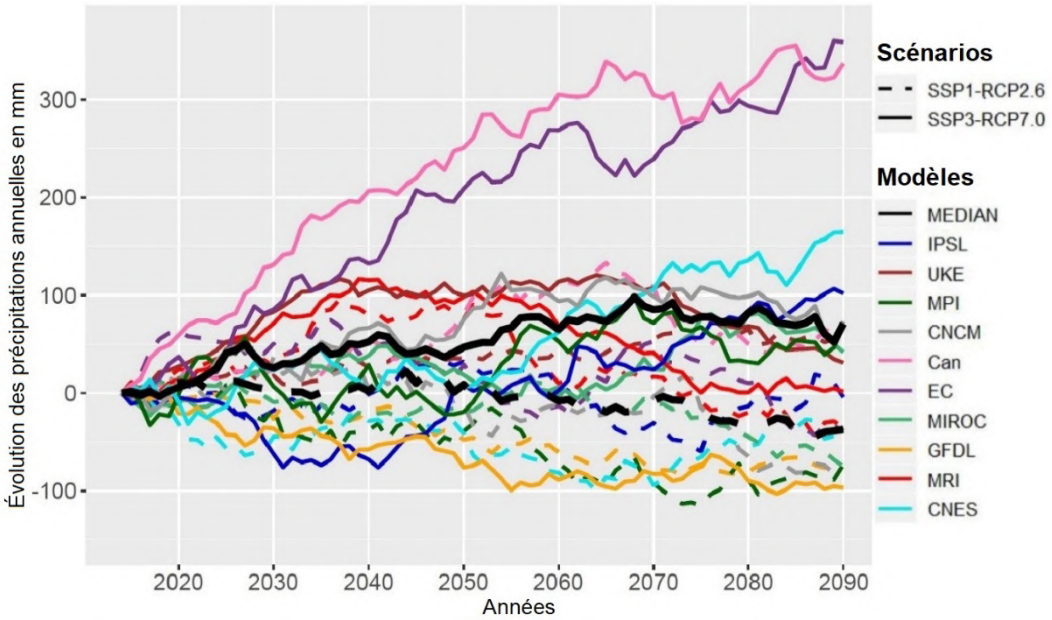


Figure 16 : La moyenne mobile sur 21 ans de la projection du changement des précipitations annuelles comparées à 2014 en mm. Les valeurs sont des moyennes concernant le Burkina Faso. Chaque ligne colorée correspond à la projection de l'un des modèles. La ligne noire représente la médiane de l'ensemble multi-modèles.

4 Principalement pour deux raisons : 1. L'augmentation de la température de la surface de la mer au-dessus des régions sources d'humidité augmente la disponibilité de l'eau pour la mousson Ouest-africaine; 2. La température au-dessus de la terre augmente plus rapidement que celle de l'océan. Cela augmente le gradient de température entre le Sahara et l'océan Atlantique, qui est la source d'énergie pour la mousson Ouest-africaine.

5 De grandes quantités d'eau douce (équivalentes à une élévation du niveau de la mer d'environ 3 m) dues à la fonte de la calotte glaciaire du Groenland peuvent entraîner une cascade complexe de modifications de la circulation océanique dans des régions où la température de la surface de la mer influence fortement la mousson Ouest-africaine.

Fortes précipitations

L'intensité ainsi que la fréquence des fortes précipitations ont augmenté ces dernières décennies dans presque toutes les parties du pays (intensité de fortes précipitations : Figure 17).

Les projections annoncent une augmentation de l'intensité et de la fréquence des fortes précipitations dans toutes les parties du pays, avec des tendances similaires pour les projections relatives à l'augmentation des quantités de précipitations annuelles moyennes (Figure 18). En vertu du scénario d'émissions élevées, tous les modèles s'accordent sur une tendance à l'augmentation de l'intensité des précipitations fortes d'ici à 2050. En revanche, les modèles ne s'accordent pas sur une augmentation en vertu du scénario de réduction des émissions.

Cela s'applique aussi aux modèles présentant une tendance décroissante concernant les quantités de précipitations annuelles moyennes. En vertu du scénario de réduction des émissions, les modèles ne prévoient aucun ou peu de changements au niveau de l'intensité des précipitations fortes d'ici à la fin du siècle.

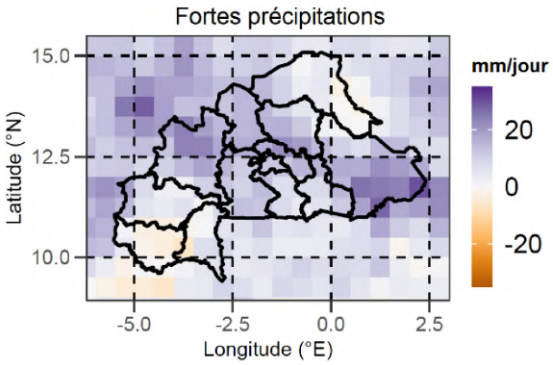


Figure 17 : Modification des précipitations journalières maximales annuelles de 1988 à 2006.

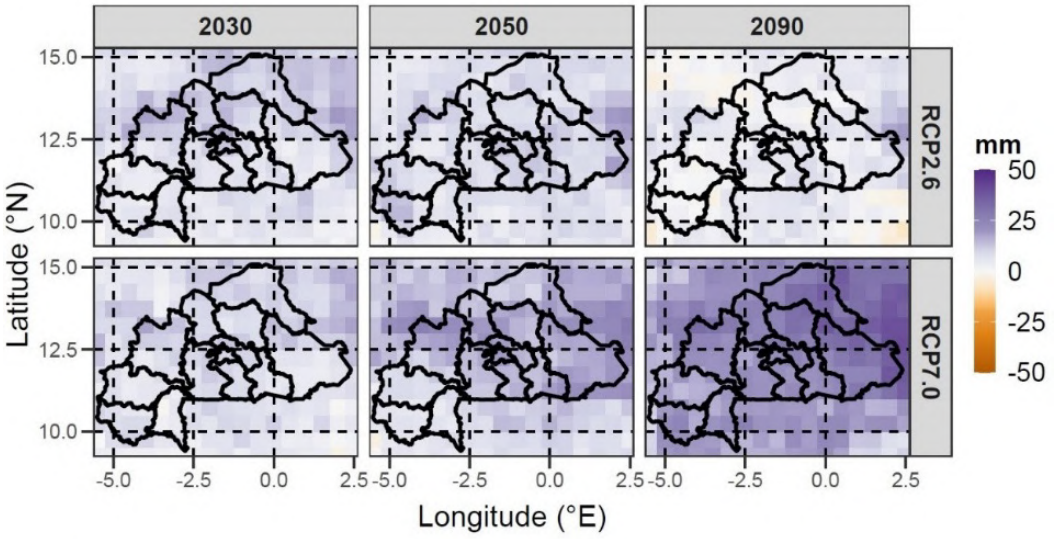


Figure 18 : Projection du changement de la quantité de précipitations journalières maximales annuelles en 2030, en 2050 et en 2090, par rapport à 2004 (1995-2014) en vertu de SSP1-RCP2.6 (rangée supérieure) et de SSP3-RCP7.0 (rangée inférieure).

Début de la saison des pluies

Ces dernières décennies, le début de la saison des pluies et sa durée ont présenté une forte variabilité, mais pas de tendance claire vers une direction particulière. Pour l'avenir, les modèles climatiques ont tendance à prévoir un début ultérieur de la saison des pluies en vertu de SSP1-RCP2.6, mais aucune tendance claire en vertu de SSP3-RCP7.0 avec des écarts régionaux et des modifications sur la durée (Figure 19). Cependant, les résultats présentent de fortes incertitudes à cause des différences entre les projections des modèles individuels, en particulier en vertu de SSP3-RCP7.0 (Figure 20).

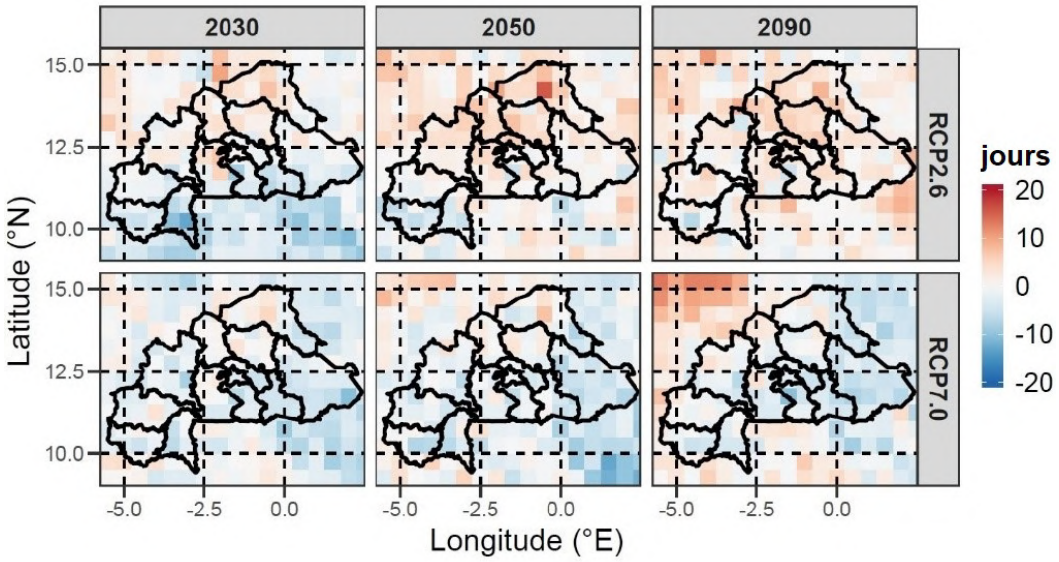


Figure 19 : Projection du changement concernant le début de la saison des pluies en jours en 2030, en 2050 et en 2090, par rapport à 2004 (1995-2014) en vertu de SSP1-RCP2.6 (rangée supérieure) et de SSP3-RCP7.0 (rangée inférieure). La couleur rouge indique un début des pluies ultérieur ; la couleur bleue, un début des pluies antérieur.

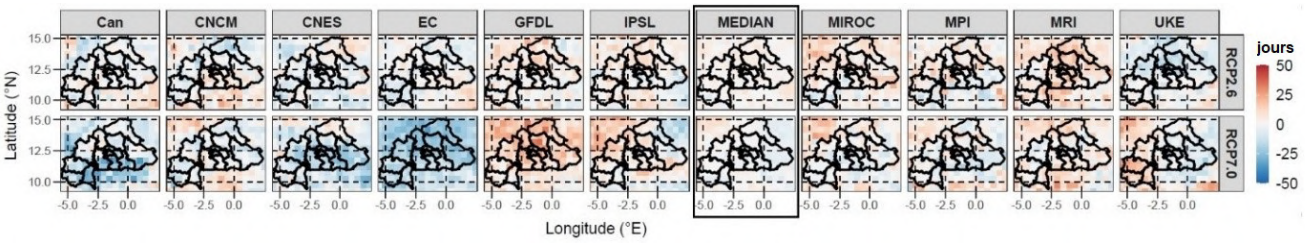
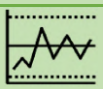


Figure 20 : Projection du changement concernant le début de la saison des pluies en jours en 2090 (2081-2100), par rapport à 2004 (1995-2014) en vertu de SSP1-RCP2.6 (rangée supérieure) et de SSP3-RCP7.0 (rangée inférieure) pour chacun des dix modèles et la médiane de l'ensemble multi-modèles. La couleur rouge indique un début des pluies ultérieur ; la couleur bleue, un début des pluies antérieur.

Résumé du chapitre 1

Outre sa variabilité naturelle, le climat du Burkina Faso a montré une tendance claire au changement. Les projections pour l'avenir indiquent principalement une poursuite des tendances actuelles. Dans le cas d'émissions plus élevées à l'avenir, les projections indiquent des changements climatiques plus forts et une plus grande ampleur du climat possible à l'avenir. Les projections concernant les températures et les températures extrêmes indiquent une tendance claire à l'augmentation continue. Les projections liées aux précipitations sont soumises à quelques incertitudes. Néanmoins, les quantités de précipitations annuelles pourraient augmenter et les précipitations extrêmes devraient augmenter en vertu du scénario d'émissions élevées. Le tableau récapitulatif ci-dessous présente les tendances climatiques passées observées et les tendances prévues à l'avenir pour différents variables climatiques.

Tableau 1 : Aperçu des conditions climatiques changeantes au Burkina Faso.

Impact climatique		Tendance passée	Tendance future	Confiance[6]
	Températures annuelles moyennes	Réchauffement ↗	Réchauffement ↗	Très élevée
	Journées très chaudes & nuits tropicales	Augmentation ↗	Augmentation ↗	Très élevée
	Intensité & fréquence des fortes précipitations	Pas de tendance	SSP3-RCP7.0 : Augmentation SSP1-RCP2.6 : Pas de tendance	Forte Forte
	Précipitations annuelles moyennes	Augmentation depuis les années 1980 ↗	Augmentation ↗	Moyenne
	Début de la saison des pluies	Pas de tendance	SSP3-RCP7.0 : Pas de tendance SSP1-RCP2.6 : Début ultérieur	Faible Faible
	**Variabilité interannuelle des quantités de précipitations annuelles**	Augmentation ↗	Baisse légère ↘	Faible

6 Le niveau de confiance des projections climatiques futures est déterminé par le pourcentage de modèles qui s'accordent sur la tendance (comparer IPCC, 2014). >= 90% : très élevé ; >= 80% : élevé ; >= 50% : moyen ; <=50% : faible.

Chapitre 2 – Changements hydrologiques

Au Burkina Faso, le secteur agricole joue un rôle vital dans l'économie du pays et les moyens de subsistance des personnes. Cependant, avec son climat semi-aride à aride, les ressources en eau sont souvent rares et représentent l'un des plus grands obstacles à la production agricole. Ce chapitre examine donc les modifications hydrologiques passées et à venir au Burkina Faso en recourant à une modélisation hydrologique semi-répartie fondée sur les Profils représentatifs d'évolution de concentration des GES et les résultats des modèles climatiques mondiaux présentés au chapitre 1. En se concentrant sur les bassins de la Volta et du Niger, qui recouvrent à eux deux 94 % de la surface du pays, trois indicateurs choisis seront examinés pour représenter et discuter des changements prévus au niveau des paramètres hydrologiques vitaux pour l'approvisionnement en eau des cultures et des communes au Burkina Faso.

2.1 Brève présentation de la situation hydrologique au Burkina Faso

La répartition des ressources en eau au Burkina Faso suit le gradient de précipitations nord-sud, avec un désert aride au nord et une savane tropicale au sud. La saison des pluies entre juin et octobre entraîne un fort régime de ruissellement saisonnier et intermittent, qui s'assèche durant la saison sèche (Mahé, 2006). Les principaux axes fluviaux du pays sont la Volta blanche (Nakambé), la Volta rouge et la Volta noire (Mouhoun) qui s'écoulent vers le sud dans le lac Volta (leurs bassins couvrent environ 63 % du territoire burkinabé) et la rivière Sirba intermittente qui s'écoule à l'est dans le fleuve Niger (son bassin recouvre environ 31 % du territoire burkinabé) (Figure 21). Comme les précipitations se traduisent habituellement par des événements forts et brefs, et que l'évapotranspiration équivaut à environ 80-95 % des précipitations annuelles, le croûtage du sol est un problème fréquent. Les dépôts de sel entraînent le compactage du sol, qui devient hermétique, ce qui favorise le ruissellement superficiel et limite les taux d'infiltration (Descroix et al., 2012).

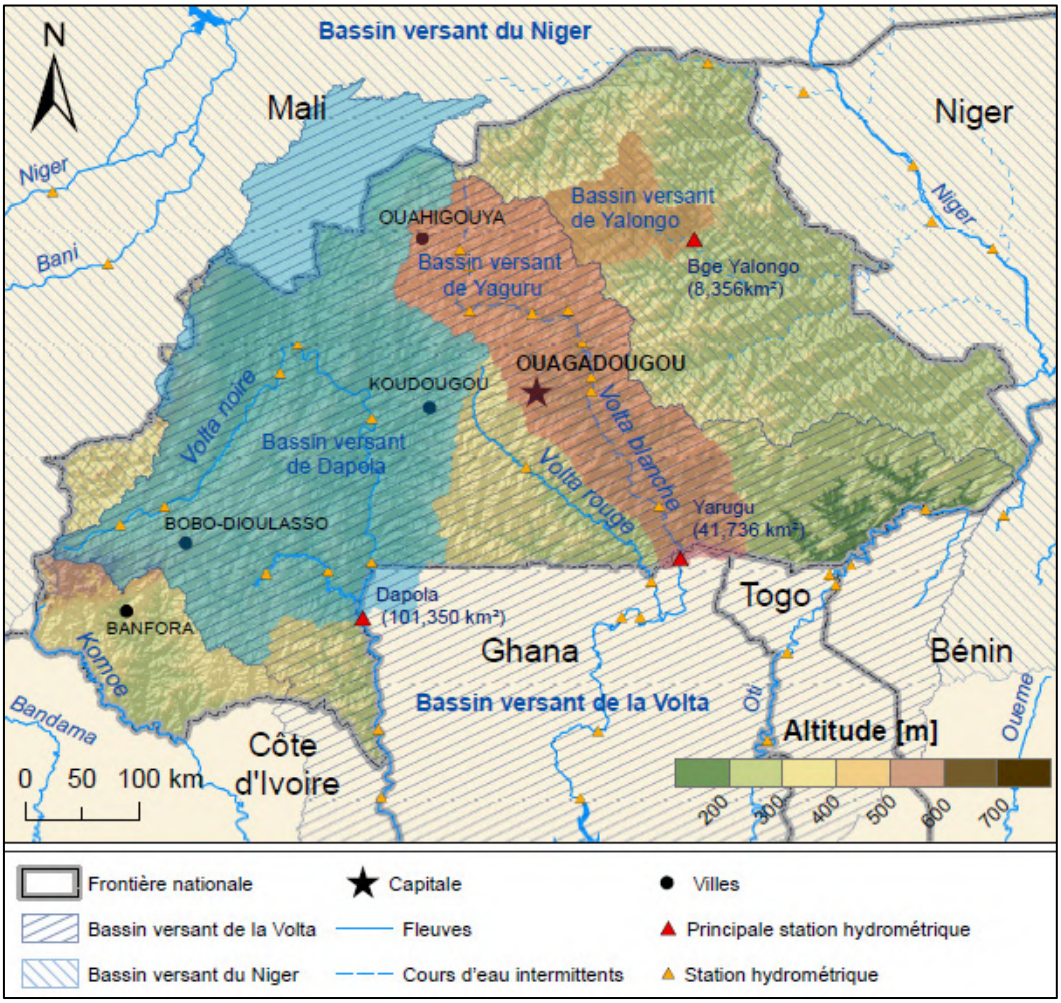


Figure 21 : Carte du Burkina Faso et des limites des bassins versants de la Volta et du fleuve Niger.

En raison de sa population essentiellement rurale dépendante de l'agriculture pluviale et de son climat aride à semi-aride, le Burkina Faso peut être considéré comme un pays déficitaire en eau. Son potentiel d'irrigation est faible, et en dehors des terres ayant un potentiel d'irrigation (env. 233.500 ha), 27 % des terres seulement sont irriguées. Cela correspond à 0,5 % à peine de l'ensemble des terres agricoles du pays (FAO, 2020). Toutefois, l'irrigation représente environ 64 % des besoins en eau, suivie de l'usage domestique avec environ 21 % et du bétail avec environ 14 % (Petit et Baron, 2009).

Les eaux souterraines sont une source importante d'eau potable, couvrant environ 85 % du besoin en eau, en provenance de puits creusés à la main ou de forages mécanisés à des profondeurs pouvant aller de 10 m à plus de 40 m (Obuobie et Barry, 2012). Bien que le volume d'eau total capté dans le pays ne représente qu'une petite partie de la recharge des eaux souterraines annuelle estimée (env. 1,5 %) (Martin et van de Giesen, 2005), la répartition spatiale et la profondeur des nappes phréatiques varient beaucoup et sont influencées par les régimes de précipitations et les captages effectués localement.

La propension du pays à la sécheresse a donné naissance à la construction de nombreux petits réservoirs informels (près de 1700) pour répondre aux besoins d'irrigation en eau pendant la saison sèche (de Fraiture, 2014 ; Fowe et al., 2015). De ce fait, le ruissellement superficiel et la recharge des eaux souterraines sont des indicateurs cruciaux des ressources aquifères au Burkina Faso ; les changements climatiques à venir pouvant par ailleurs avoir des conséquences considérables. Ces changements dans le passé et à l'avenir seront examinés dans les parties suivantes grâce à un modèle hydrologique.

2.2 Data and method

Dans le cadre de cette étude, les projections hydrologiques soumises aux conditions du changement climatique sont essentiellement basées sur les résultats du modèle éco-hydrologique intégré Soil and Water (SWIM) (Krysanova et al., 2015) fondé sur les scénarios d'émissions de GES et les résultats des modèles climatiques mondiaux présentés au chapitre 1, à savoir un ensemble de dix modèles climatiques mondiaux du projet ISIMIP3b. Le modèle SWIM est utilisé pour simuler les processus hydrologiques dans les bassins de la Volta et du Niger. Les modifications annuelles relatives et absolues du débit fluvial en différents endroits sont fournies ainsi que les modifications mensuelles moyennes au cours des trois périodes suivantes à venir : 2021-2040 (2030), 2041-2060 (2050) et 2080-2099 (2090). Les modifications à venir sont les écarts par rapport à la situation de départ 1995-2014. Différentes données d'entrée servent à configurer et à calibrer le modèle : le modèle numérique de terrain à la résolution de 90 m du Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) permet de délimiter les sous-bassins. Les paramètres des sols sont issus de la base de données harmonisée et mondiale des sols (Harmonized World Soil Database, HWSD v1.0) et les données sur l'utilisation des terres et la couverture terrestre proviennent de la carte du projet Global Land Cover (GLC2000). Le modèle hydrologique est calibré et validé d'après les données de débit quotidiennes obtenues aux limnigraphes dans tout le bassin durant la période allant de 1960–2010 en fonction de la disponibilité des données de chaque station. Les observations sont fournies par le Global Runoff Data Centre (GRDC) et quelques séries chronologiques d'annuaires hydrologiques (Orstom, 1977 ; RHV, 1978). Les principaux réservoirs ainsi que les prélèvements d'eau sont pris en compte dans les simulations, mais les prélèvements d'eau reposent surtout sur des suppositions, car des données détaillées ne sont pas disponibles. L'utilisation des terres et la couverture terrestre sont considérées comme constantes, inchangées dans les périodes projetées à l'avenir, afin d'isoler les signes du réchauffement climatique.

2.3 Changements passés

Dans le passé, les changements hydrologiques au Burkina Faso et en Afrique occidentale dans son ensemble sont caractérisés par une variabilité interannuelle et décennale. Il est communément admis que les années 1950 et 1960 furent des périodes majoritairement humides, suivies par un assèchement dans les années 1970 et une sécheresse marquante et dévastatrice dans les années 1980 (Conway et al., 2009 ; Descroix et al., 2012 ; Mahé et al., 2013). Depuis, les quantités de précipitations et le débit fluvial s'améliorent grâce à une tendance récente à l'augmentation. Pour le Burkina Faso, cette évolution se reflète dans les données de débit et les simulations SWIM fondées sur les données observationnelles de la figure 21. L'écoulement est particulièrement sensible aux variations des précipitations en raison des conditions arides à semi-arides de la région. Par exemple, Mahé et Olivry (1999) ont découvert qu'une baisse de 15-20 % des valeurs des précipitations entraîne des baisses disproportionnées de débit pouvant aller jusqu'à 60 %.

Outre les changements climatiques déjà abordés au chapitre 1, les changements concernant les ressources en eaux de surface et souterraines sont également fortement influencés par des modifications au niveau de l'utilisation des terres et de la gestion de l'eau. Ces deux facteurs ont changé de façon drastique au Burkina Faso depuis la seconde moitié du 20e siècle (Mahé et al., 2005). Une croissance démographique ininterrompue de plus de 3 % par an a conduit à la transformation extensive de la végétation naturelle (brousse et fruticée) en terres cultivées, favorisant des taux plus élevés de ruissellement et des taux d'infiltration permettant de recharger les eaux souterraines amoindris (DAES Nations Unies, 2019). La perte de végétation permanente et le compactage du sol entraînent l'affaiblissement de la capacité d'infiltration. Cela signifie que malgré la sécheresse dans la région, le débit fluvial a tout de même augmenté, un phénomène évoqué comme étant le « paradoxe du Sahel ». (Mahé et al., 2005). Parallèlement, la gestion des eaux a augmenté. On note la construction de nombreux petits réservoirs et puits profonds (Pavelic et al., 2012). Les réservoirs permettent de stocker le ruissellement inégalement réparti temporellement sur l'année et représentent donc une infrastructure de gestion de l'eau importante dans un contexte climatique fortement saisonnier.

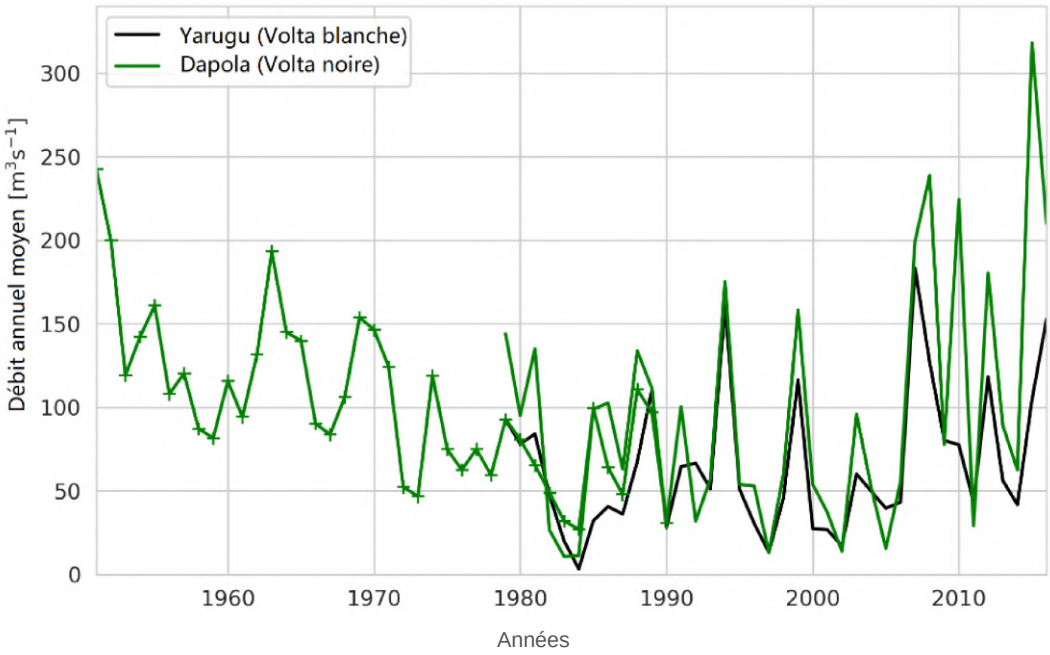


Figure 22 : Débit observé et simulé des principaux fleuves du Burkina Faso. Observations (1951-1990) à Dapola, les relevés à long terme disponibles sont marqués d'un signe +. Les simulations sont fondées sur l'ensemble de données de réanalyse observationnelles EWEMBI.

2.4 Changements hydrologiques dans le cadre du changement climatique au 21e siècle

2.4.1 Débit fluvial

Conformément à l'augmentation des précipitations (chapitre 1, partie 1.4), la moyenne annuelle du débit fluvial devrait également augmenter en général, mais cependant pas en vertu de tous les scénarios climatiques et de tous les modèles climatiques mondiaux (Figure 23). Quant aux plus grands fleuves du Burkina Faso, la Volta noire et la Volta blanche, les projections indiquent des débits annuels plus importants de 18-30 % dans l'avenir proche (2021-2040) dans la médiane de l'ensemble en vertu des deux scénarios d'émissions par rapport à la période de référence (1995-2014). Vers le milieu du siècle (2041-2060), les scénarios divergent.

Le débit devrait augmenter de 20-34 % en vertu du scénario de réduction des émissions de GES et finalement baisser de -10 à -20 % en 2080-2099, tandis qu'en vertu du scénario d'émissions de GES élevées, il devrait rester de 50-60 % supérieur à la période de référence d'ici à la fin du siècle. Cette même évolution est également attendue pour le bassin versant bien plus petit et sec de la rivière Sirba, mais avec des augmentations plus fortes pouvant atteindre 80 % en vertu du scénario SSP3-RCP7.0 et une baisse de 10 % en vertu du scénario SSP1-RCP2.6 vers la fin du siècle. Les intervalles fournis par l'ensemble sont cependant vastes, ce qui montre la grande variabilité entre les modèles climatiques mondiaux. En particulier en vertu du scénario de réduction des émissions de GES, les intervalles interquartiles présentent des directions de changement opposées au milieu et à la fin du siècle.

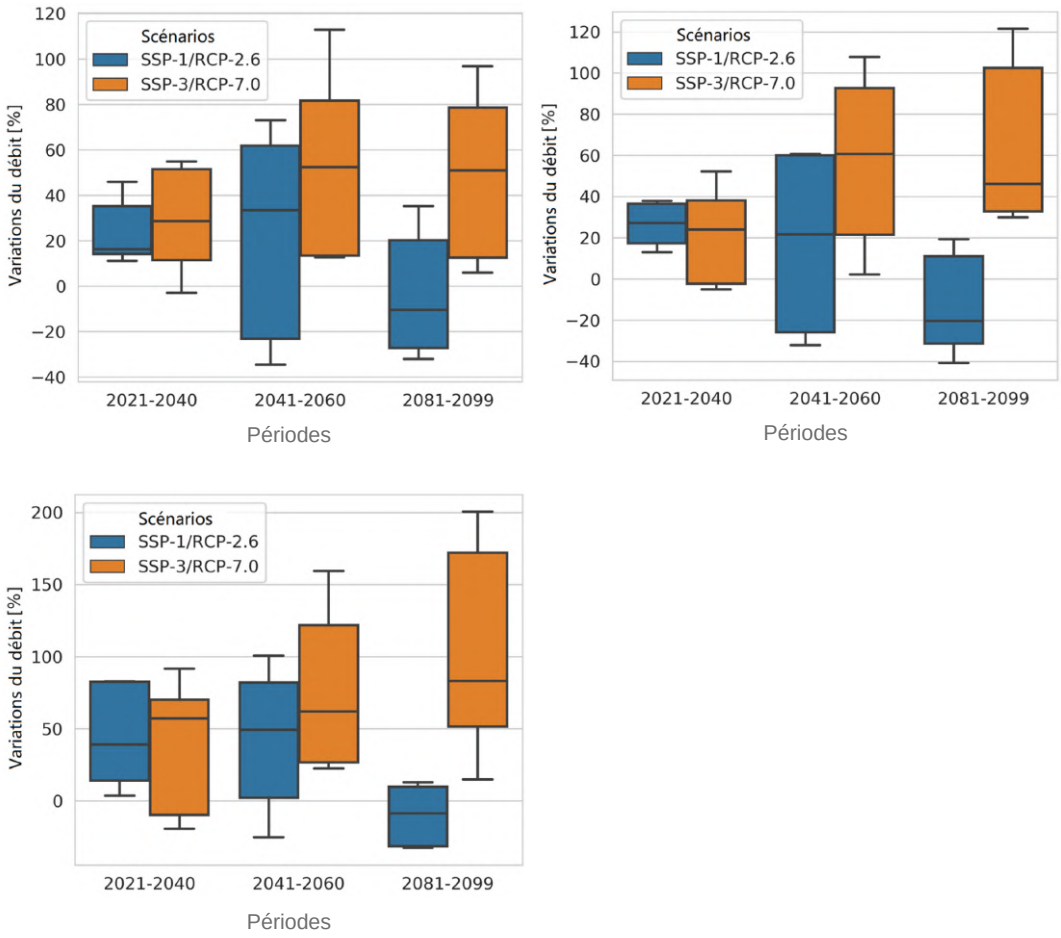


Figure 23 : Projection du changement du débit annuel moyen à Dapola, le dernier limnigraphe au Burkina Faso sur la Volta noire (en haut à gauche), à Yaguru, le premier limnigraphe au Ghana sur la Volta blanche (en haut à droite) et à Bge Yalogo, le dernier limnigraphe au Burkina Faso, à l'amont de la rivière Sirba intermittente, dans l'aride nord-est (en bas à gauche).

Dans le régime d'écoulement mensuel, ces changements annuels se reflètent principalement des mois d'août à octobre pendant la saison des pluies pour les trois cours d'eau (Figure 24). Une hausse continue pendant les mois d'août et septembre est claire pour les périodes 2021-2040 et 2041-2060 pour presque tous les scénarios et toutes les stations (sauf à Bge Yalogo en 2041-2060 en vertu du scénario SSP1-RCP2.6). À la fin du siècle (2080-2099), le débit mesuré aux trois stations choisies devrait encore baisser en vertu du scénario SSP1-RCP2.6 pendant toute la saison des pluies. En vertu du scénario SSP3-RCP7.0, un changement de régime devrait se produire, avec une médiane du débit plus basse en août, mais avec des valeurs supérieures de septembre à décembre. Si le débit fluvial se maintient tout le long de l'année (Volta noire, par ex.), les projections indiquent des changements mineurs, respectant en grande partie la tendance annuelle. Les incertitudes de l'ensemble (indiquées par les intervalles interquartiles et min. -max. dans la figure 23) sont particulièrement fortes en vertu du scénario d'émissions élevées et au cours de la période 2080-2099. Ces changements temporels sont suscités par le renforcement de la mousson Ouest-africaine (voir partie 1.4) et pourraient entraîner une augmentation des eaux de surface pendant la saison des pluies, ce qui provoquerait des crues saisonnières et un débit des eaux souterraines plus fort.

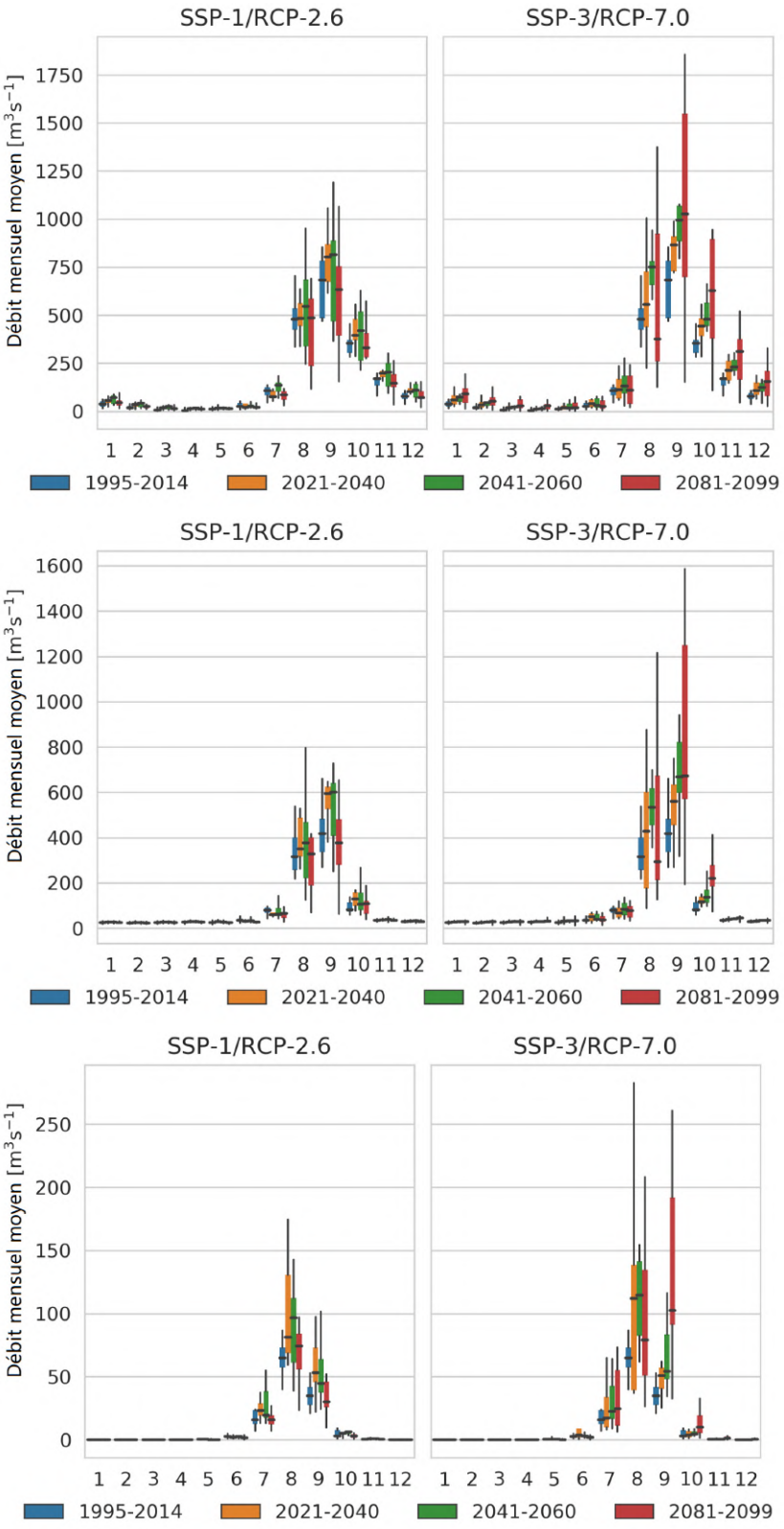


Figure 24 : Débit mensuel moyen pendant la période de référence (bleue) et les trois périodes à venir pour SSP1-RCP2.6 (à gauche) et SSP3-RCP7.0 (à droite) à Dapola (Volta noire, en haut), à Yarugu (Volta blanche, au centre) et à Bge Yalogo (en amont de la rivière Sirba, en bas). Les barres d'erreur renvoient à l'intervalle interquartile (en couleur) et à l'intervalle de l'ensemble (moustaches).

2.4.2 Recharge des nappes phréatiques

Outre le débit fluvial, des modifications au niveau de la recharge des nappes phréatiques représentent un régime hydrologique important qui détermine la disponibilité future des ressources en eau souterraine pour les communautés qui en dépendent. Les eaux souterraines sont devenues une source de plus en plus importante pour l'approvisionnement urbain et rural en eau au Burkina Faso. Selon des estimations, plus de 44 % de la population du bassin de la Volta dépend des eaux souterraines pour subvenir directement à ses besoins en eau potable (Martin et van de Giesen, 2005). Les régimes de précipitations changeants et le développement constant de forages dans tout le pays vont accroître la dépendance au niveau des nappes phréatiques à l'avenir.

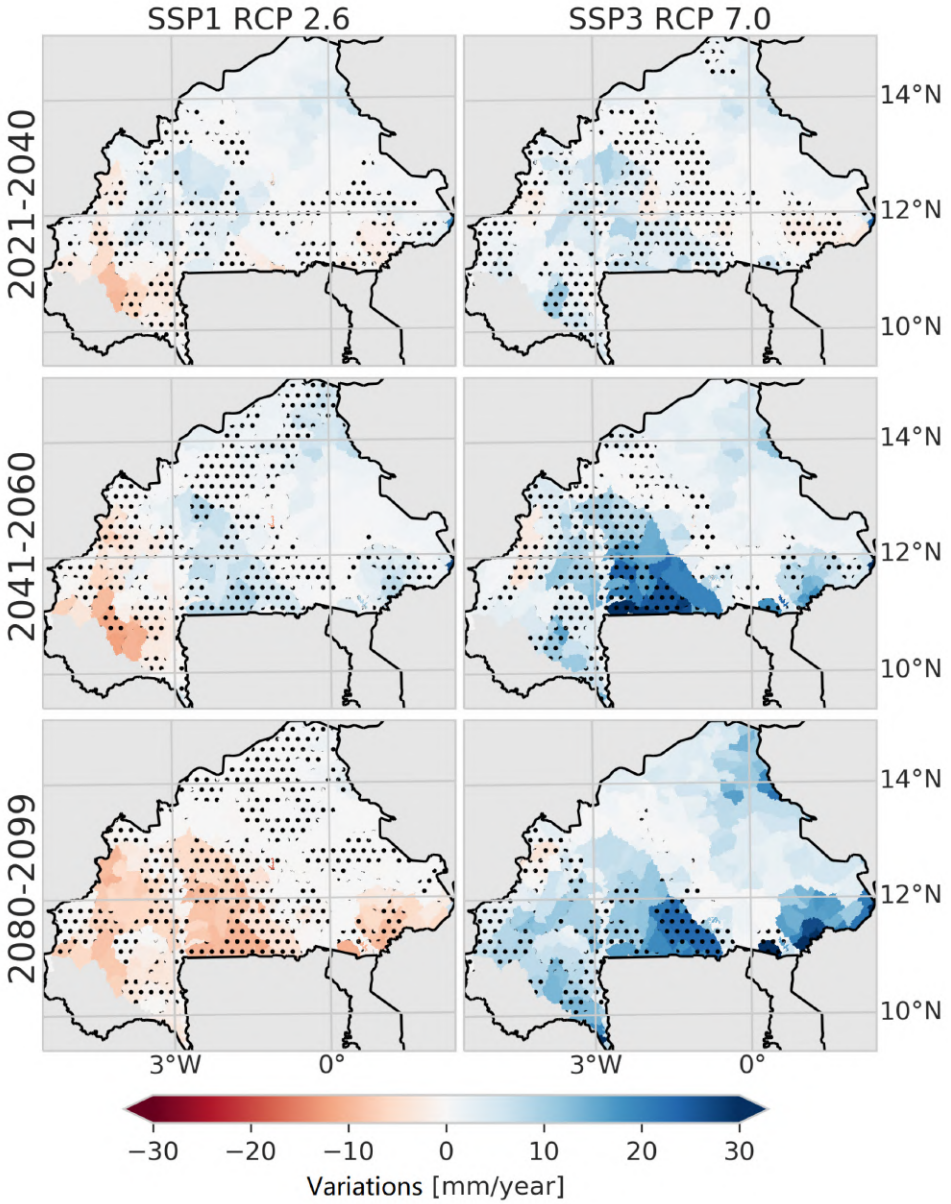


Figure 25 : La variation médiane de la recharge des nappes phréatiques (au niveau du sous-bassin) par rapport à la période de référence (1995-2014) pour les deux scénarios (gauche/droite) et les trois périodes à venir (rangées de haut en bas). Les zones en pointillés montrent des modifications insignifiantes du point de vue statistique (seuil de signification de 5 %) en considérant les moyennes périodiques de l'ensemble. Les zones grises sont soit extérieures au Burkina Faso, soit extérieures au domaine de modélisation.

La hausse des quantités de précipitations se traduit aussi en partie par des taux annuels de recharge des nappes phréatiques plus élevés, principalement en vertu du scénario SSP3-RCP7.0, dans de grandes parties du pays, surtout dans le sud très agricole (Figure 25). En vertu du scénario de réduction des émissions de GES, des baisses sont plus vraisemblables vers la fin du siècle, surtout dans le sud-ouest du pays.

Étant donné le vaste intervalle de l'ensemble, le changement n'est en grande partie pas significatif sur le plan statistique (si l'on compare les moyennes périodiques de la situation de référence aux périodes à venir). En particulier, la baisse de la médiane de l'ensemble en vertu du scénario de réduction des émissions de GES ainsi que dans le sud-ouest du pays ne présente pas de changement significatif. Cela s'accorde avec la variabilité climatique de la région, qui se reflète dans la divergence exprimée par les modèles climatiques. Toutefois, les résultats fournissent des indications importantes sur les tendances générales et montrent clairement les écarts entre les scénarios d'émissions de GES.

Avec la projection de hausse des températures (chapitre 1) et l'intensification du cycle hydrologique associée, d'autres indicateurs hydrologiques devraient également augmenter au Burkina Faso. Les projections relatives à l'évapotranspiration réelle indiquent une hausse modérée de 2-6 % si on suppose que la couverture végétale est égale à celle de la période de référence, c'est-à-dire inférieure à l'écoulement. Les projections concernant le débit maximum annuel, un indicateur de crue saisonnière, indiquent une augmentation en conformité avec les augmentations de débit saisonnières (Figure 24), rendant le risque de crues dangereuses plus probable.

Il est important de remarquer que le climat du Burkina Faso est dominé par de fortes fluctuations inter- et pluriannuelles, ce qu'illustrent les observations passées des années 1960 très humides et des années 1970 et surtout 1980 très sèches. Ce schéma de quasi-fluctuation se retrouve également au niveau des indicateurs hydrologiques et, dans de nombreux cas, l'amplitude est plus vaste que dans les projections des modifications présentées ici. Le choix des périodes de référence et des périodes à venir peut donc avoir une influence importante sur les modifications attendues, comme cela est discuté dans (Liersch et al., 2020) sur un exemple de la Volta. Les résultats des modèles climatiques mondiaux sont une réalisation synthétique de la météorologie dans les périodes de référence et futures. Bien que ces schémas de quasi-fluctuation se reflètent dans les modèles, ils ne sont pas synchronisés entre eux (Figure 26). À savoir, un modèle pourrait prévoir une période humide pour les années 2050, tandis que plusieurs autres prévoiraient des périodes très sèches. Cela explique en partie la grande ampleur des incertitudes et les signaux de changement opposés.

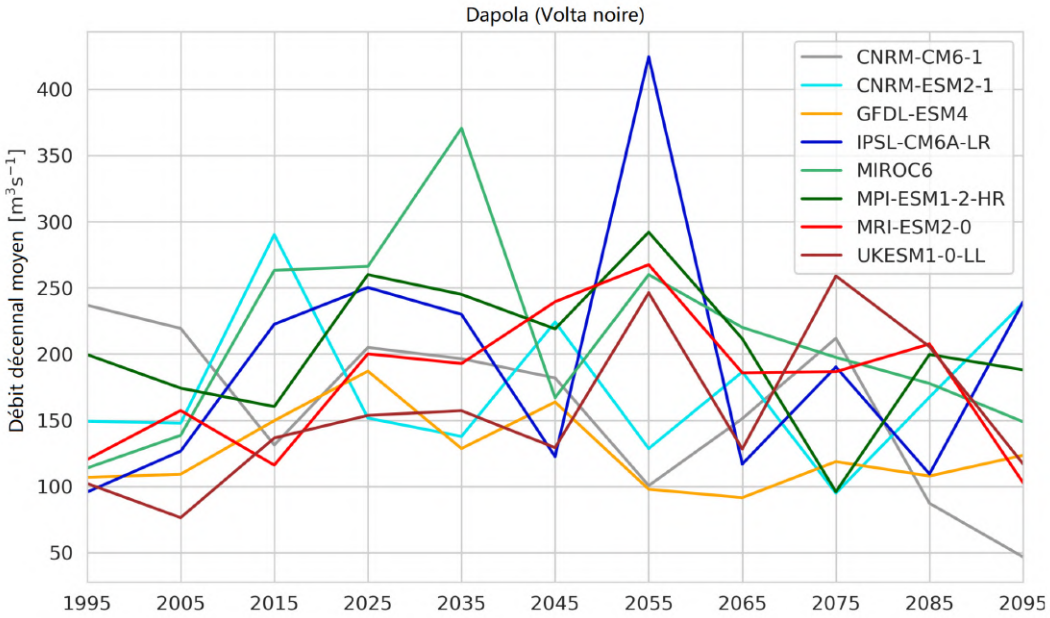
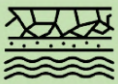


Figure 26 : Le débit décennal moyen à la station de Dapola (Volta noire) simulé par SWIM en vertu du scénario SSP1-RCP2.6 fondé sur l'ensemble de modèles climatiques mondiaux indiqués dans la légende.

Résumé du chapitre 2

Principalement, les projections futures montrent une poursuite des tendances passées, mais avec de légères variations, c'est-à-dire que des modifications au niveau du régime du débit maximum de crue sont possibles. Dans le cas de concentrations de GES élevées à l'avenir, les projections indiquent une augmentation du débit fluvial. En vertu du scénario SSP1-RCP2.6 en revanche, le débit fluvial a tendance à baisser. La recharge des nappes phréatiques devrait augmenter, et cela plus fortement en vertu du scénario des émissions élevées. Les projections relatives à l'évapotranspiration montrent clairement une augmentation modérée. Les impacts et les tendances clés sont récapitulés à nouveau dans le tableau ci-dessous. Les tendances renvoient aux moyennes annuelles à long terme et aux médianes de l'ensemble.

Tableau 2 : Récapitulatif des changements hydrologiques.

Impacts		Tendance passée	Tendance future	Confiance[7]
	Débit fluvial	Augmentation ↗	Augmentation, baisse possible en vertu de SSP1-RCP2.6 ↗	Moyenne
	**Recharge des nappes phréatiques**	Augmentation ↗	Augmentation ↗	Moyenne
	Évapotranspiration	Pas de changement majeur	Augmentation ↗	Forte
	Débit maximum de crue	Augmentation depuis les années 1990 ↗	Augmentation, mais modifications du régime possibles ↗	Medium

7 Le niveau de confiance des projections climatiques futures est déterminé par le pourcentage de modèles qui s'accordent sur la tendance (comparer IPCC, 2014). >= 90% : très élevé ; >= 80% : élevé ; >= 50% : moyen ; <=50% : faible.

Chapitre 3 – Impacts climatiques sur la production agricole

Le sorgho, le millet[8], le maïs, le niébé, le coton et les arachides sont les cultures les plus importantes au Burkina Faso en matière de superficie cultivée, de volume de production et de demande. La capacité à produire ces cultures dépend beaucoup de la faculté des variabilités météorologiques à assurer le cycle de culture, la majorité des cultures étant produite sur des terres alimentées par la pluie. La météo, la fertilité des sols et la gestion agricole sont les principaux facteurs à la base des variations du rendement agricole. Le changement climatique menace donc à la fois les moyens de subsistance et l'économie du Burkina Faso, car le pays dépend de l'agriculture et des chaînes de valeur agricoles. L'ampleur du rôle de ces facteurs dans le rendement des cultures varie dans le temps et l'espace. Dans ce chapitre, nous allons donc observer de plus près les impacts climatiques sur la production des cultures en nous appuyant sur les enseignements tirés des chapitres précédents concernant les changements climatiques et la disponibilité en eau en vertu des deux futurs scénarios d'émissions SSP1-RCP2.6 et SSP3-RCP7.0.

Notre évaluation du modèle cultural est présentée selon trois perspectives. Dans la première partie, nous recourons au modèle cultural semi-statistique AMPLIFY (Agricultural Model for Production Loss Identification to Insure Failures of Yields) afin d'évaluer le rôle de la variabilité météorologique actuelle au jour le jour sur les rendements du sorgho, du millet et du maïs au Burkina Faso, à la fois au niveau national et infra-national. Nous avons choisi de nous concentrer sur les céréales comme cultures de base principales dans notre analyse statistique, car ce sont les cultures qui ont été suffisamment testées avec AMPLIFY. AMPLIFY indique la part de la variabilité des rendements passée dépendant de la météorologie et montre ainsi l'importance de la météo dans la production agricole du pays.

Dans la deuxième partie, nous évaluons l'aptitude biophysique de certaines cultures à implanter dans des régions spécifiques du Burkina Faso, et comment cette aptitude pourrait être modifiée par le changement des conditions climatiques vers la fin du siècle. La vocation culturale détermine si une zone présente ou non, tout le long de la saison, les conditions climatiques permettant d'assurer un cycle de production agricole dans les conditions climatiques actuelles et à venir. Nous nous concentrons encore sur les principales céréales suivantes : le sorgho, le millet et le maïs, auxquels s'ajoute le niébé pour élargir l'analyse. Enfin, dans la troisième partie, nous recourons au modèle cultural DSSAT, qui est basé sur les processus, pour une analyse plus poussée des impacts projetés à moyen et à long terme du changement climatique sur les rendements agricoles d'ici à 2030, à 2050 et à 2090, grâce à une étude de cas sur le sorgho. Le modèle DSSAT est un modèle basé sur les processus qui simule au jour le jour la réponse physiologique d'une culture aux variables météorologiques et qui peut simuler les rendements actuels et projetés.

8 Il existe neuf variétés différentes de millet cultivé. Deux d'entre elles sont principalement produites au Burkina Faso : le millet perlé et le mil rouge. Notre analyse se concentre sur le millet perlé.

3.1 Influence météorologique passée sur la production agricole

3.1.1 Données et méthode

Afin de déterminer la part de la météo dans les variations des rendements culturaux au Burkina Faso, nous avons recours à la modélisation culturale semi-statistique du modèle AMPLIFY (Gornott et Wechsung, 2016). Pour chacune des 45 provinces du Burkina Faso, nous établissons un modèle de régression linéaire multiple séparé comportant des variables spécifiques aux provinces et des paramètres rendant compte de la diversité des conditions climatiques dans le pays. Pour les données d'entrée météorologiques, nous avons utilisé CHIRPS (Funk et al., 2015) (résolution de 0,25 °, soit env. 27 km au Burkina Faso) pour les précipitations et ERA5 (Copernicus Climate Change Service (C3S), 2017) (résolution de 0,25 ° aussi) pour les températures. Le déficit de la tension de vapeur a été calculé à partir des données de températures. Pour représenter les conditions météorologiques influençant le développement des cultures, nous n'avons tenu compte que des données météorologiques de la saison de croissance suivant le calendrier agricole de la FAO (FAO, 2010). Toutes les variables saisies ont été standardisées pour avoir une meilleure comparabilité des coefficients bêta. Pour les rendements des cultures, nous avons eu recours aux rendements des trois céréales déclarés entre 1984 et 2018 au niveau des provinces et fournis par WASCAL. Les rendements (kg/ha) ont été calculés à partir de la production totale sur la superficie totale par province.

Nous avons retiré l'effet tendanciel des observations du rendement – issu par ex. du progrès technologique de la gestion agricole, en testant d'abord différentes méthodes d'annulation d'effets tendanciels (moyenne, linéaire, quadratique) puis en appliquant celle s'étant révélée la plus adéquate, mesurée suivant le critère d'information d'Akaike (CIA) (Bozdogan, 1987). Les variables ont été sélectionnées selon l'algorithme LASSO qui effectue une sélection de covariables par régularisation (Tibshirani, 1996). Les résultats du « modèle complet » montrent la variabilité expliquée des rendements lorsque toutes les observations de rendements disponibles sont utilisées pour former le modèle. Les résultats plus robustes de la validation hors échantillon (appelée OOS) montrent la performance du modèle pour des observations de rendements indépendantes qui n'ont pas été utilisées pour former le modèle, obtenus en omettant chaque année à tour de rôle de la formation du modèle et en prédisant ensuite la variation du rendement pour cette « nouvelle » année inconnue au modèle. Cela limite le sur-apprentissage (ou overfitting) autrement répandu dans les modèles statistiques et fournit ainsi des preuves plus concluantes de l'influence de la météorologie sur les rendements. La qualité de l'ajustement entre les données observées et les données modélisées est évaluée à partir de R^2, qui représente la part de la variabilité des rendements qui peut être expliquée par le modèle. Si des données météorologiques prévisionnelles sont disponibles, cet outil peut servir à faire des prévisions de rendements de cultures et ainsi fournir des informations sur les rendements et la disponibilité alimentaire avant les récoltes.

3.1.2 Résultats

La figure 27 montre les influences météorologiques sur les rendements du maïs, du sorgho et du millet au Burkina Faso. Sur la moyenne nationale, les résultats montrent qu'environ 70 % de la variabilité des rendements du maïs et du millet peut s'expliquer par les influences météorologiques, pour le sorgho, cette part s'élève à environ 50 %. Ces pourcentages élevés montrent que la majeure partie des variations observées des rendements culturaux est due aux variations climatiques, et que le changement climatique modifiera donc ces variations.

L'influence attribuable à la météo est comparable aux résultats trouvés pour la province de Kossi au Burkina Faso (Belesova et al., 2019). Comme le montrent Belesova et al. (2019), des anomalies de rendements négatives peuvent avoir une forte influence sur la disponibilité alimentaire et des répercussions en cascade sur la situation sanitaire dans les zones rurales. Ces variations de rendements liées en grande partie à la météo montrent que les caprices climatiques pourraient avoir un impact direct sur la nutrition et la santé humaines.

Si on désagrège les résultats du modèle en évaluations individuelles au niveau des provinces, on obtient une image bien plus nuancée (Figure 28). La part des pertes de rendements du maïs liée à la météo est au plus haut au nord du Burkina Faso, comme en témoignent les valeurs R2 plus élevées (nuances bleu foncé), même si les rendements de maïs sont fortement dépendants de la météo dans presque toutes les provinces. Pour le sorgho et le millet, un schéma spatial clair ne ressort pas. L'influence de la météo est claire dans la plupart des provinces, mais légèrement moindre que pour le maïs.

Les résultats du modèle au niveau des provinces sont généralement plus faibles que ceux au niveau national, mais ils montrent tout de même une influence sûre des variations météorologiques sur les variations de rendements des cultures (Figure 27 : R2 complet > 0.5 [colonne de gauche] et R2 hors échantillon > 0.3 [colonne de droite]). Les influences de la météo sont plus élevées au niveau national puisque les incertitudes spécifiques aux provinces ou les inexactitudes des données sont généralement compensatrices.

Ces estimations concernant la part des variations de rendements liées à la météorologie renvoient au passé (1984-2018), ce qui souligne l'importance cruciale des facteurs climatiques pour les cultures céréalières. Cela permet de définir des projections de rendements des cultures pour l'avenir, basées sur les facteurs météorologiques, ce qui sera accompli dans les parties suivantes.

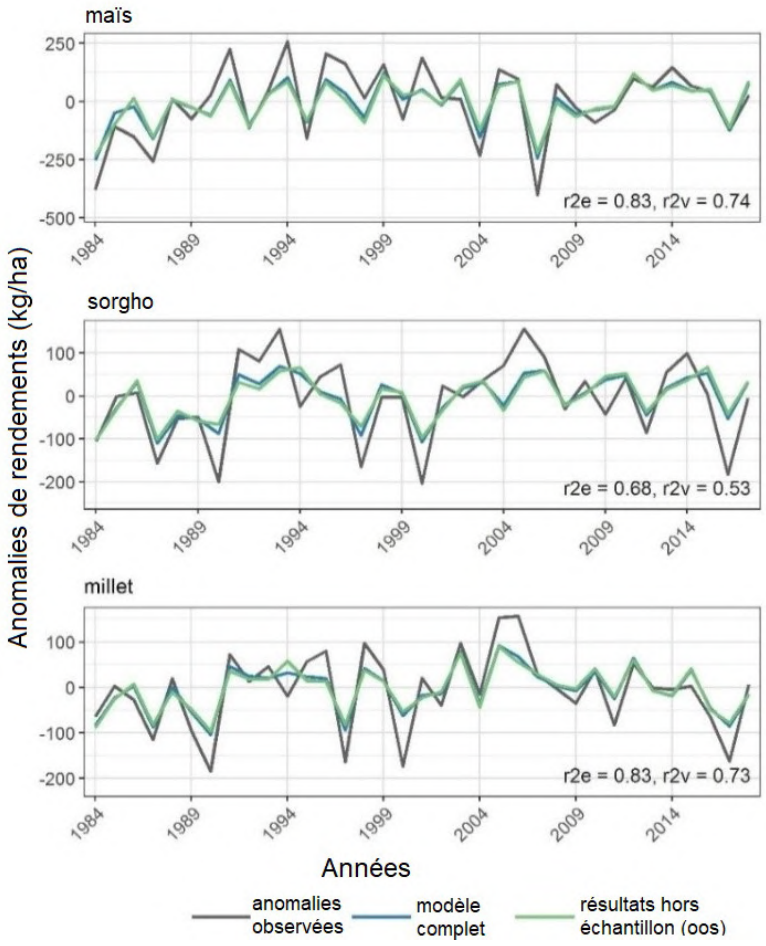


Figure 27 : Variabilité des rendements expliquée par les influences météorologiques sur le maïs, le sorgho et le millet au niveau national. Sur l'axe y, le rendement est indiqué comme anomalies de rendements dépourvues de tendances en kg/ha. Tandis que les résultats du « modèle complet » peuvent être sujets au sur-apprentissage, les résultats de validation hors échantillon présentent un résultat plus réaliste des influences météorologiques sur les rendements. Les valeurs r2 situées dans le coin inférieur droit indiquent la variabilité de rendement expliquée pour le modèle complet (r2e) et la validation hors échantillon (r2v).

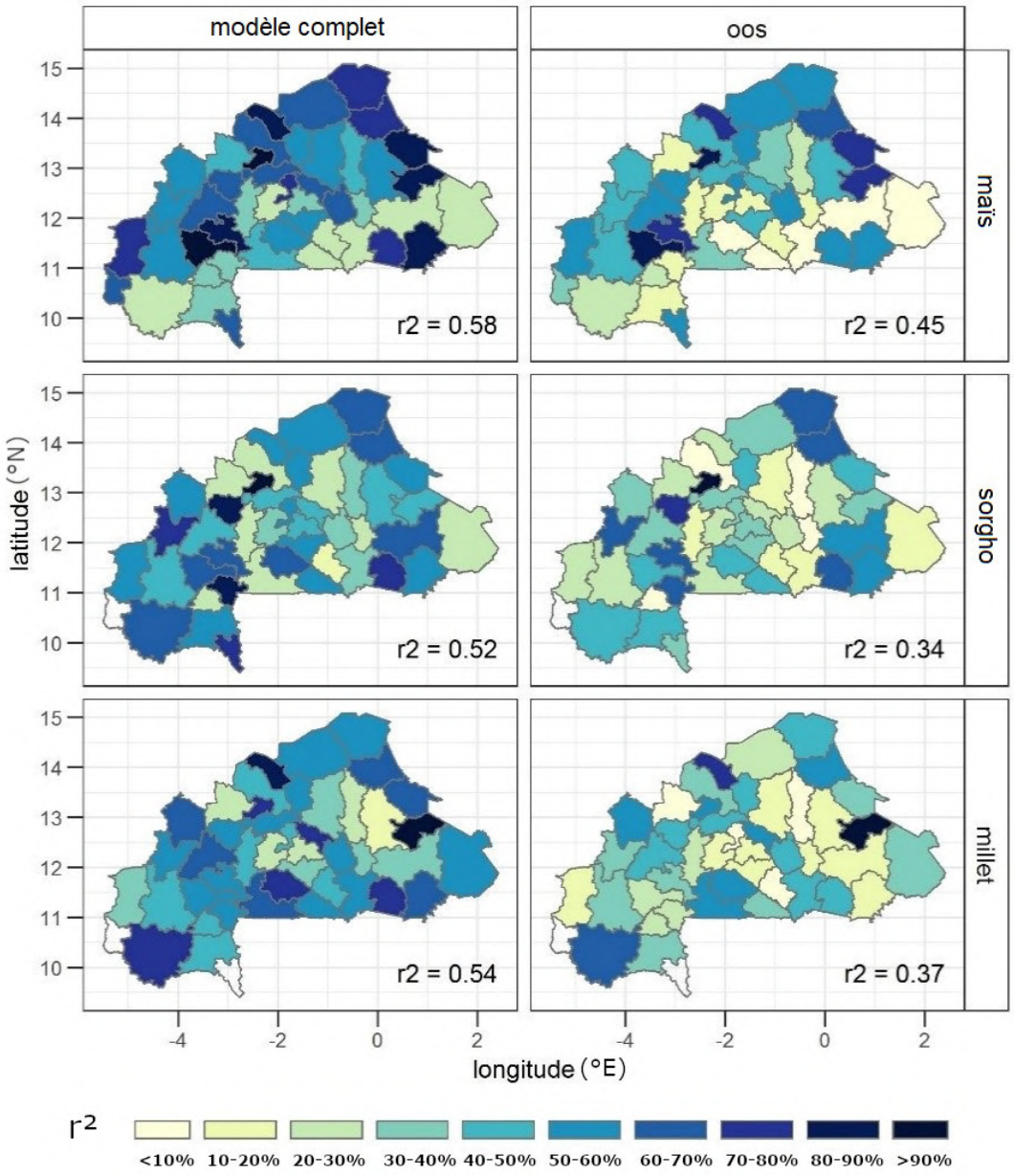


Figure 28 : La part de variabilité des rendements due aux influences météorologiques pour le maïs, le sorgho et le millet au niveau des provinces. Les résultats du modèle complet sont présentés à gauche et ceux hors échantillon (OOS) sont présentés à droite. Les valeurs r2 représentent la part de la météo dans les variations de rendements ; plus elles sont élevées, plus le rendement dépend de la météo. Les provinces indiquées en blanc (pour le sorgho et le millet) n'ont pas fourni de données sur les cultures.

3.2 Évaluation de la vocation culturale et changement des conditions climatiques

3.2.1 Données et méthode

Les modèles climatiques d'évaluation de la vocation culturale sont appliqués afin de mesurer l'impact du changement climatique sur la capacité à produire du sorgho, du millet, du maïs et du niébé au Burkina Faso. Les modèles de vocation culturale sont une classe de modèles culturaux utilisés dans les évaluations des risques du changement climatique. Les évaluations de la vocation culturale sont fondées sur le principe que les paramètres biophysiques (teneur du sol en carbone organique par ex.) et les variables climatiques (quantité totale des précipitations reçues durant la saison de croissance par ex.) jouent un rôle important dans la détermination des taux de production agricole, ce qui est vrai pour de nombreuses régions tropicales où l'agriculture est influencée par la météo. Un modèle d'évaluation de la vocation utilise donc ces variables pour générer un score pour chaque culture, chaque période et chaque emplacement, en fonction de l'adéquation des variables avec les besoins de la culture en question ou avec les conditions régnant dans les zones de production actuelles connues (Evangelista et al., 2013). Remplacer les variables climatiques par celles projetées en vertu du changement climatique montre les modifications des surfaces agricoles potentiellement cultivables d'une région pour une culture spécifique. Ainsi, les modèles de vocation culturale sont utilisés pour évaluer les effets du changement climatique sur le potentiel de production agricole tout le long d'une saison en vue de planifier l'adaptation nécessaire au niveau national et local.

Neuf paramètres biophysiques importants sur le plan agronomique (tels que la température ou les quantités de précipitations au cours des différents stades de production végétale) servent à modéliser l'aptitude climatique des quatre cultures dans les conditions climatiques actuelles et futures. L'approche d'apprentissage-machine eXtreme Gradient Boosting (XGBoost) (Chen et Guestrin, 2016) est utilisée pour modéliser cette aptitude. Les données de production agricole pour chacune des quatre cultures sont divisées en quatre groupes (optimale, modérée, marginale et limitée) en recourant aux centiles du rendement moyen. Par exemple, les zones à vocation optimale sont définies comme celles étant supérieures au 75e centile du rendement moyen à long terme, ce qui correspond aux zones ne présentant aucune limite notable à une production soutenue et stable sur la durée. Les zones à vocation modérée correspondent à celles permettant une production agricole comprise entre le 50e et le 75e centile du rendement, à vocation marginale entre le 25e et le 50e centile, et à vocation limitée si elle est inférieure au 25e centile du rendement moyen à long terme, indiquant donc que les conditions biophysiques de ces zones ne sont pas adaptées à la culture analysée.

Ces modèles ont été évalués avant leur application en recourant à la validation croisée par « leave-one-out ». Outre les indicateurs de performance basés sur la classe pour chaque culture tels que la spécificité, la sensibilité et l'exactitude équilibrée (balanced accuracy), nous avons calculé l'aire multiclasse sous la courbe ROC (AUC) pour évaluer la performance du modèle général comme Hand et Till (2001) la définissent (Hand et Till, 2001). Nous avons également regroupé les résultats des quatre cultures afin d'identifier l'altération de la capacité à la polyculture sous les effets du changement climatique, comme indicateur du potentiel de diversification ou de rotation des cultures.

Après avoir évalué la vocation aux quatre cultures individuellement au Burkina Faso, nous avons associé la vocation de l'ensemble des cultures pour définir les zones propices aux cultures multiples en recourant à la méthode de Chemura et al. (2020). Dans cette approche, les cartes présentant chaque vocation individuelle sont superposées afin de définir le nombre de cultures adaptées à chaque cellule, puis les cellules présentant les vocations à chaque culture sont comptées. Les modifications de proportion et de répartition des vocations entre les conditions climatiques actuelles et projetées ont été analysées en comparant les zones suivant des périodes chronologiques et des scénarios climatiques.

3.2.2 Facteurs déterminant la vocation culturale au Burkina Faso

Les facteurs déterminant la vocation culturale au Burkina Faso diffèrent suivant le type de culture. L'influence des températures sur la vocation culturale est très importante pour toutes les cultures du pays, les facteurs basés sur les températures expliquant l'aptitude à 43 % pour le sorgho, à 38 % pour millet, à 44 % pour le maïs et à 45 % pour le niébé. Les facteurs basés sur les précipitations sont également importants, expliquant l'aptitude à 34 % pour le sorgho, à 33 % pour le millet, à 20 % pour le maïs et à 27 % pour le niébé (Figure 29). Cependant, lorsque l'on tient compte des facteurs individuels, la quantité de précipitations pendant la saison de croissance est le déterminant le plus important pour l'aptitude culturale du sorgho et du niébé, tandis que la quantité annuelle est importante pour le millet, et les températures de la saison de croissance sont absolument cruciales pour l'aptitude au maïs. La qualité des sols, en particulier leur teneur en carbone organique, est également importante pour l'aptitude au maïs (37 %), ce qui montre que cette culture requiert des régio ns présentant de bonnes terres en comparaison aux autres cultures. Pour le sorgho (2 %), le millet (1 %) et le maïs (6 %), le moins important, ce sont les températures des mois de semences, tandis que pour le niébé, les facteurs les plus contraignants comprennent la saison de croissance, les températures (8 %) et les températures annuelles (9 %).

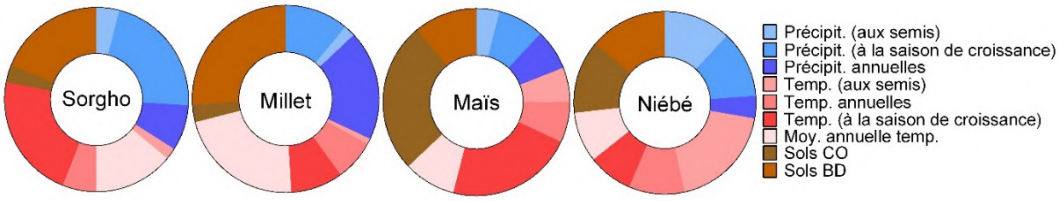


Figure 29 : Importance des variables dans la modélisation de l'aptitude au sorgho, au millet, au maïs et au niébé au Burkina Faso. Sols CO se réfère à la teneur en carbone organique et Sols BD à la biodiversité des sols.

3.2.3 Résultats

Un bon ajustement du modèle a été réalisé pour le sorgho, le millet, le maïs et le niébé (AUC>0.82) par rapport aux rendements culturaux déclarés, ce qui a donné confiance pour appliquer les modèles dans les évaluations des impacts du changement climatique au Burkina Faso.

L'aptitude aux cultures du sorgho, du millet, du maïs et du niébé est indiquée à la figure 30. Plus de la moitié du territoire du pays est considérée comme étant adaptée de manière optimale ou modérée à la production du sorgho dans les conditions climatiques actuelles. Ces terres sont situées dans les régions soudaniennes et soudano-sahéliennes au sud-ouest et s'étendent aux alentours de 13 ° latitude N vers l'est (Figure 31). Un tiers du Burkina Faso (33,3 %) est adapté de manière optimale à la production du millet dans le cadre des conditions climatiques actuelles et principalement dans le sud du pays. Les zones adaptées de manière optimale et modérée représentent 60,9 % du pays, ce sont toutes des zones agricoles aptes à produire du millet avec succès (Figure 32). Seul un cinquième du Burkina Faso est adapté de manière optimale à la production du maïs dans les conditions climatiques actuelles, ces régions se trouvant principalement au sud-ouest et au centre sud du pays (Figure 33). La répartition de l'aptitude à la culture du niébé dans les conditions climatiques actuelles est indiquée à la figure 34. Les zones actuellement adaptées à la culture du niébé sont situées dans les parties sud du pays et s'étendent vers l'ouest.

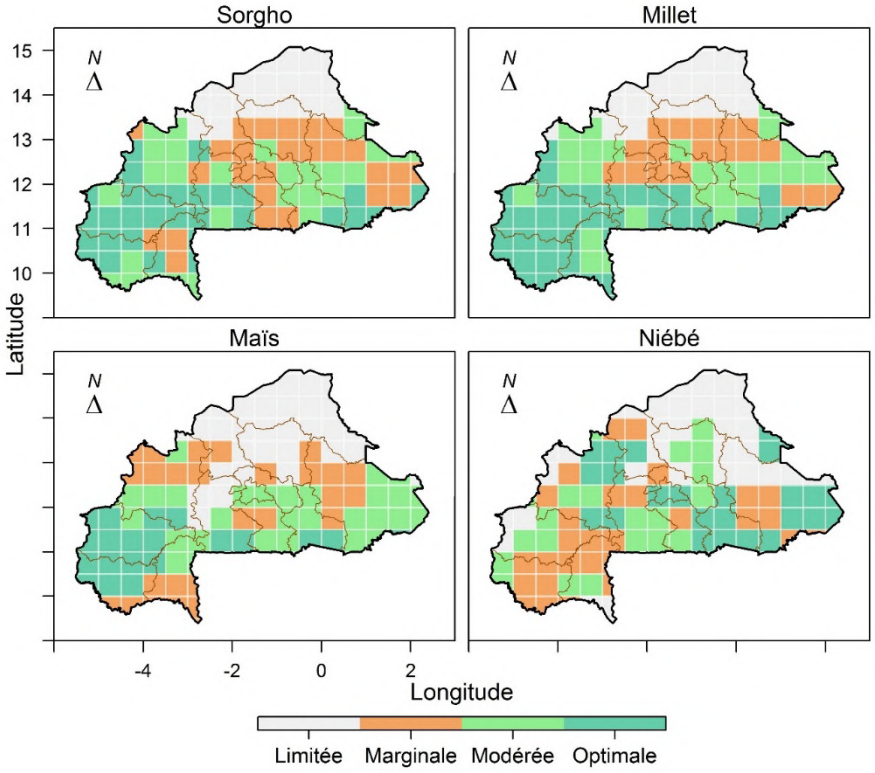


Figure 30 : Cartes présentant l'aptitude climatique actuelle au sorgho, au millet, au maïs et au niébé au Burkina Faso d'après une modélisation basée sur les rendements observés.

a) Sorgho

Avec le changement climatique, certaines zones deviendront plus aptes à la culture du sorgho, tandis que d'autres le seront moins en 2030, en 2050 et en 2090 (Figure 31). Les zones qui connaîtront une baisse de cette aptitude seront plus nombreuses que celles qui connaîtront une aptitude accrue au sorgho en vertu du scénario SSP3-RCP7.0 en 2090, où une légère augmentation nette est projetée. Au pire, 10,3 % des zones actuellement propices au sorgho perdront leur vocation en vertu du SSP1-RCP2.6 d'ici à 2090 (Tableau 3). Les résultats indiquant que l'aptitude au sorgho restera stable au Burkina Faso dans le contexte du changement climatique correspondent aux projections n'indiquant pas de changement ou d'augmentation des précipitations dans la majeure partie du pays (voir chapitre 1, figure 15). De ce fait, comme les facteurs liés aux précipitations déterminent un tiers de l'aptitude au sorgho, et en particulier, les précipitations durant la saison de croissance étant la variable la plus importante du modèle, ces résultats ne sont pas surprenants. Ces résultats concordent également avec ceux de Ramirez (2013) selon lesquels l'aptitude au sorgho dans les régions semi-arides du sud du Burkina Faso, du Mali et du Niger augmentera dans le contexte du changement climatique. Ces résultats soulignent le fait que les effets du changement climatique sur l'aptitude au sorgho sont variables dans l'espace et que les plans d'adaptation devraient viser les zones à pertes, tandis que l'intensification devrait viser les zones où l'aptitude au sorgho resterait stable ou augmenterait. Même si nous projetons une stabilité ou des augmentations dans des zones où les conditions climatiques répondent aux besoins du sorgho au Burkina Faso, celles-ci ne se traduisent pas directement en gains de rendements. L'expansion des zones de production due au fait que davantage de zones deviennent adaptées peut compenser les pertes de rendements projetées (Adam et al., 2020 ; Sultan et al., 2013) afin de répondre aux exigences de la demande en sorgho et de sa production.

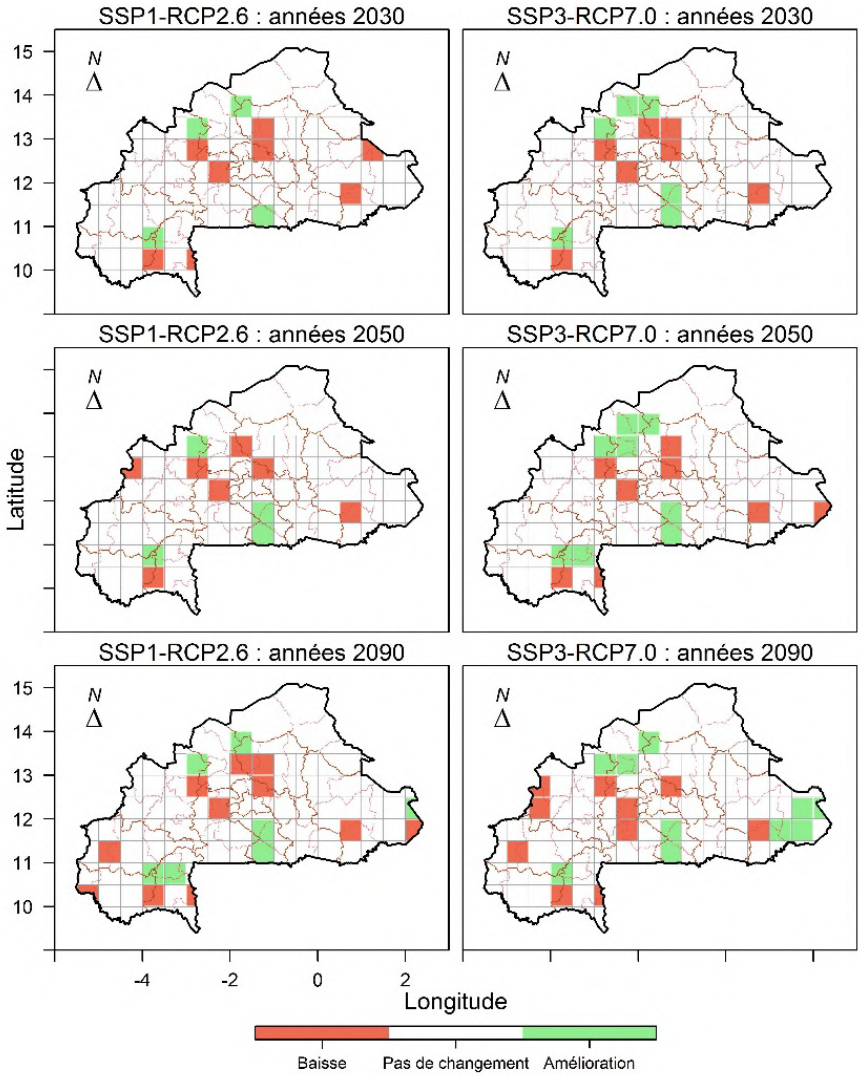


Figure 31 : Carte montrant la modélisation des changements de l'aptitude au sorgho liés au climat au Burkina Faso pour les années 2030 (en haut), 2050 (au milieu) et 2090 (en bas) en vertu des scénarios SSP1-RCP2.6 (colonne gauche) et SSP3-RCP7.0.

b) Millet

Nous projetons des diminutions marginales de l'aptitude au millet dues au changement climatique au Burkina Faso, car les zones restent vastement adaptées à cette culture (Tableau 3). Pour toutes les années et tous les scénarios, les changements nets concernant l'aptitude restent positifs en particulier pour 2090 où le gain net des zones adaptées au millet sera de 6,9 % (SSP1-RCP2.6) et de 3,5 % (SSP3-RCP7.0) (Figure 32). Cela signifie que les conditions climatiques générales répondront aux exigences de production du millet dans le cadre du changement climatique, sauf pour quelques zones où une réduction de l'aptitude est projetée. Culture de saison chaude, le millet est robuste, car il s'est adapté aux régions arides de l'Afrique dont il provient et où la qualité des sols est pauvre, les précipitations limitées, les températures de l'air élevées et les durées de la saison de croissance courtes et variables (Mason et al., 2015). Dans le cadre des changements des conditions climatiques projetés, en particulier des précipitations au Burkina Faso, les conditions pour la production du millet devraient s'améliorer, comme l'indiquent les modèles. Des impacts similaires positifs du changement climatique sur l'aptitude au millet ont été déclarés (Egbebiyi et al., 2020) et expliqués par la résilience physiologique de cette céréale. Étant donné qu'environ 19,5 % de la nourriture consommée et que 17,5 % des superficies cultivées au Burkina Faso reposent sur le millet (Jalloh et al., 2013), ces résultats dénotent un risque faible à marginal de la perte d'aptitude à cette culture en

raison du changement climatique. De ce fait, il est possible de procéder à son intensification et à son expansion même vers des zones où les projections signalent que d'autres cultures risquent de perdre leur aptitude sous les effets du changement climatique.

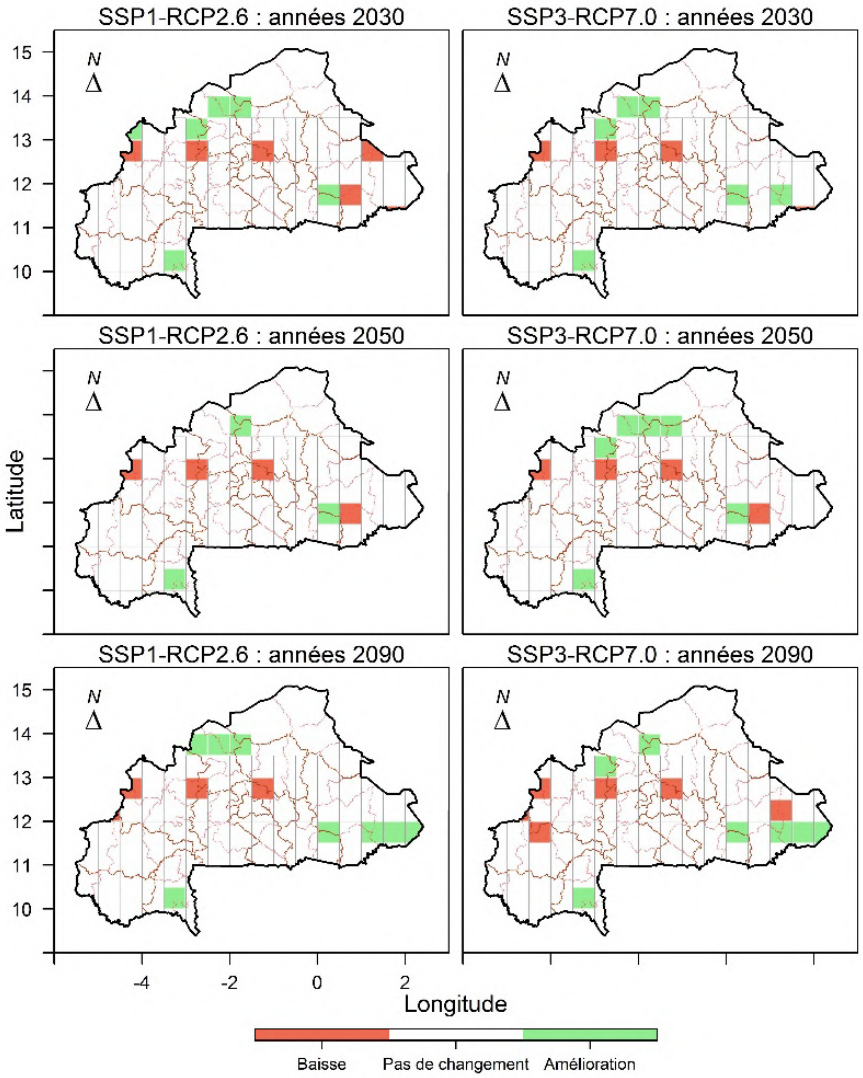


Figure 32 : Cartes montrant la modélisation des changements de l'aptitude au millet perlé liés au climat au Burkina Faso pour les années 2030, 2050 et 2090 en vertu des scénarios SSP1-RCP2.6 et SSP3-RCP7.0.

c) Maïs

Les effets du changement climatique sur l'aptitude au maïs sont présentés à la figure 33. D'après les projections, la majeure partie du pays devrait maintenir ses niveaux d'aptitude à la production de maïs, avec une légère augmentation des zones plus propices à la production de maïs que celles qui le deviendront moins. Au niveau national, les changements nets de l'aptitude au maïs sont toujours inférieurs à 4 %, ce qui montre que cette aptitude restera largement inchangée au Burkina Faso, sans changement du tout dans les zones adaptées en général dans les projections pour 2090 en vertu des deux scénarios (Tableau 3). Comme le montre l'importance des températures de la saison de croissance dans la modélisation de son adaptabilité, le maïs est une céréale sensible aux conditions météorologiques, et l'on s'attend donc à ce qu'il réagisse plus au changement climatique que d'autres céréales. Toutefois, les projections (voir chapitre 1) indiquent des augmentations des températures et des précipitations au Burkina Faso. L'interaction des deux détermine la modélisation

des impacts du changement climatique. Il est intéressant de voir que les changements positifs concernant l'aptitude sont projetés dans la Boucle du Mouhoun dans le futur proche et moyen, avec moins de changements dans le futur lointain (Figure 33). Ces résultats concordent avec les projections de Jalloh et al. (2013) selon lesquelles le maïs sera positivement influencé par le changement climatique dans cette région, et ainsi, il serait possible d'accroître la densité de cette culture hors des traditionnelles régions productrices de maïs. Sans changement dans la majorité des régions, des mesures d'intensification de cette culture pour combler les écarts de rendements sont suggérées pour augmenter la production nationale de maïs.

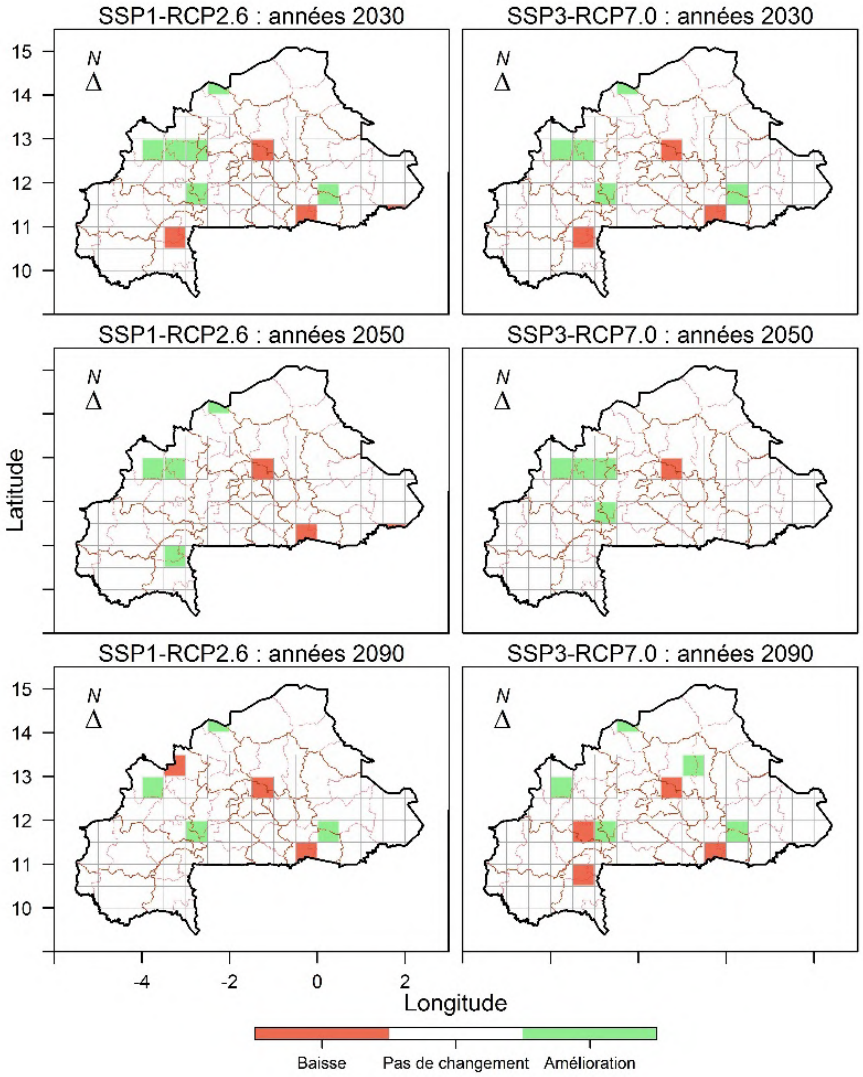


Figure 33 : Cartes montrant la modélisation des changements de l'aptitude au maïs liés au climat au Burkina Faso pour les années 2030, 2050 et 2090 en vertu des scénarios SSP1-RCP2.6 et SSP3-RCP7.0.

d) Niébé

La répartition des changements de l'aptitude au niébé dans les conditions climatiques actuelles est indiquée à la figure 34. Les résultats indiquent que d'ici à 2050, 10,3 % et 12,6 % des zones actuellement propices au niébé présenteront une aptitude réduite, tandis que 6,9 % et 8 % d'entre elles présenteront une augmentation de leur aptitude, ce qui entraînera des pertes nettes en matière d'aptitude au niébé (Tableau 3). D'après les projections, ces pertes d'aptitude devraient augmenter d'ici à 2050 et à 2090. Les résultats montrent également que davantage de zones présenteront une aptitude réduite au niébé par rapport à la situation actuelle, ce qui signifie que le niébé sera touché par le changement climatique au Burkina Faso dans certaines zones et que des mesures d'adaptation seront alors requises. Les régions sud-ouest du pays conserveront cependant des conditions qui permettront d'assurer la production de niébé (Figure 34). Nous en concluons donc que le changement climatique limitera la production de niébé au Burkina Faso, des zones limitées et marginales s'étendront vers le sud. Le niébé est une légumineuse à grains et diffère, en matière d'exigences et de réactions, du maïs, du sorgho et du millet, qui sont issus de la famille des graminées. Les résultats de modélisation ont montré que 45 % de l'aptitude au niébé, la plus élevée de toutes les cultures modélisées, dépend de variables basées sur les températures. La majorité des variétés de niébé cultivées dans la région sont sensibles à la photopériode et donc sensibles aux dates d'ensemencement.

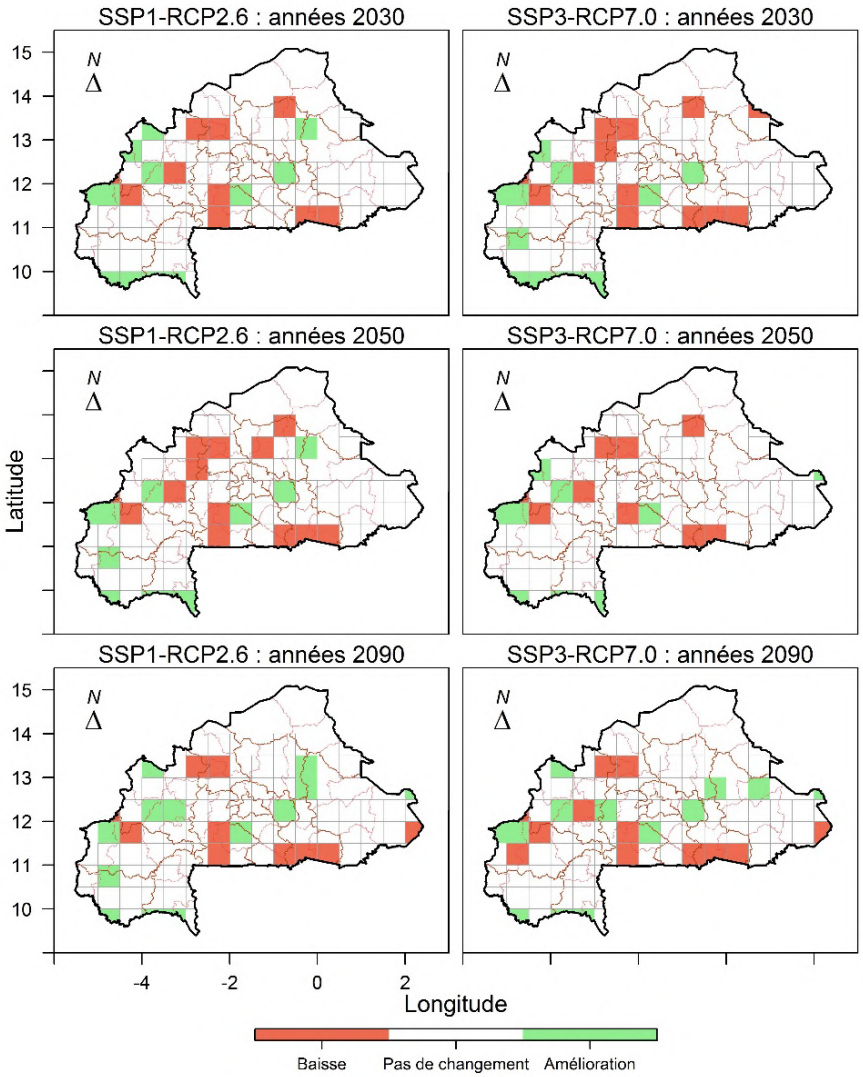


Figure 34 : Cartes montrant la modélisation des changements de l'aptitude au niébé liés au climat au Burkina Faso pour les années 2030, 2050 et 2090 en vertu des scénarios SSP1-RCP2.6 et SSP3-RCP7.0.

En outre, les pertes relativement supérieures de l'aptitude au niébé dans le cadre du changement climatique sont également liées au fait que cette culture est principalement cultivée en alternance avec le maïs, le sorgho ou d'autres plantes, et sa modélisation en tant que culture de type « ouvert » l'expose à des températures plus élevées qui limitent son adaptabilité. Les pertes projetées au niveau de l'aptitude au niébé sont préoccupantes étant donné que le niébé permet aux ménages de récolter ses feuilles et ses graines pour leur consommation ou leur vente durant la saison creuse, lorsque les stocks d'autres récoltes céréalières sont épuisés et que les cultures présentes ne sont pas prêtes à être récoltées. En conséquence, des mesures d'adaptation sont nécessaires pour maintenir la production de niébé dans le contexte du changement climatique. D'ailleurs, le Burkina Faso s'inscrit parmi les trois premiers pays producteurs de niébé au monde.

Tableau 3 : Pourcentage de variations des surfaces par rapport à leur aptitude au sorgho, au millet, au maïs et au niébé d'ici à 2030, à 2050 et à 2090 en vertu des scénarios SSP1-RCP2.6 et SSP3-RCP7.0 au Burkina Faso.

Culture		2030		2050		2090	
		SSP1-RCP2.6	SSP3-RCP7.0	SSP1-RCP2.6	SSP3-RCP7.0	SSP1-RCP2.6	SSP3-RCP7.0
Sorgho	Baisse	8,0	8,0	6,9	8,0	10,3	9,2
	Pas de changement	87,4	85,1	88,5	82,8	82,8	80,5
	Augmentation	4,6	6,9	4,6	9,2	6,9	10,3
Millet	Baisse	4,6	2,3	3,4	3,4	2,3	4,6
	Pas de changement	89,7	90,8	93,1	89,7	88,5	87,4
	Augmentation	5,7	6,9	3,4	6,9	9,2	8,0
Maïs	Baisse	3,4	3,4	2,3	1,1	3,4	4,6
	Pas de changement	90,8	92,0	94,3	94,3	93,1	90,8
	Augmentation	5,7	4,6	3,4	4,6	3,4	4,6
Niébé	Baisse	10,3	12,6	13,8	9,2	10,3	12,6
	Pas de changement	81,6	80,5	78,2	86,2	79,3	77,0
	Augmentation	8,0	6,9	8,0	4,6	10,3	10,3

Aptitude à la polyculture

La figure 35 montre le potentiel d'aptitude à la polyculture basé sur l'aptitude combinée aux quatre types de cultures sélectionnées. Conformément aux prévisions, les zones les plus propices à la polyculture se situent dans les parties sud et ouest à Cascades, Haut-Bassins, Centre-Ouest, Centre-Sud et Centre-Est. Notre modèle montre que d'ici à 2050, le potentiel d'aptitude à la polyculture diminuera en particulier dans la Boucle du Mouhoun, dans les régions Nord et Centre-Ouest où peu de cultures seront propices, mais augmentera dans les Haut-Bassins (sud-ouest) en vertu des scénarios SSP1-RCP2.6 et SSP3-RCP7.0. Dans l'ensemble, l'aptitude culturale se déplacera vers le sud dans le contexte du changement climatique, des déplacements plus radicaux se réalisant en vertu de SSP3-RCP7.0.

Très peu de zones sont propices à la production de l'ensemble des quatre cultures (sorgho, millet, maïs et niébé). Des baisses notables sont projetées dans les zones adaptées de façon optimale à au moins trois cultures, et davantage de zones deviennent adaptées de façon optimale à seulement deux ou une culture. Dans les conditions actuelles, 11,5 % du pays est adapté à la production d'au moins 3 des 4 cultures, mais ce taux baissera à seulement 9,2 % (SSP1-RCP2.6) et à 8 % (SSP3-RCP7.0) d'ici à 2090.

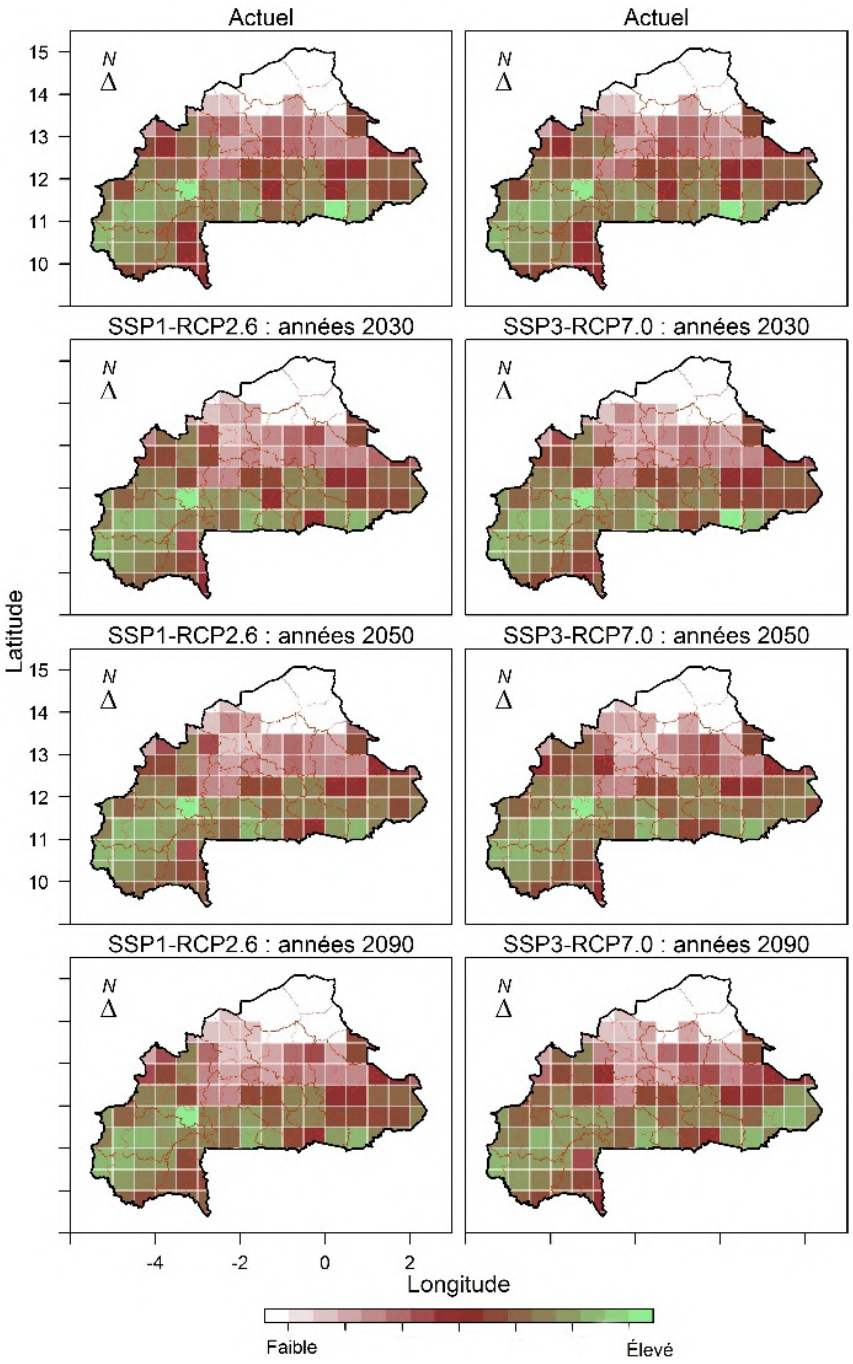


Figure 35 : Potentiel d'aptitude à la polyculture en vertu de la situation actuelle et des scénarios SSP1-RCP2.6 et SSP3-RCP7.0 au Burkina Faso en 2030, 2050 et 2090.

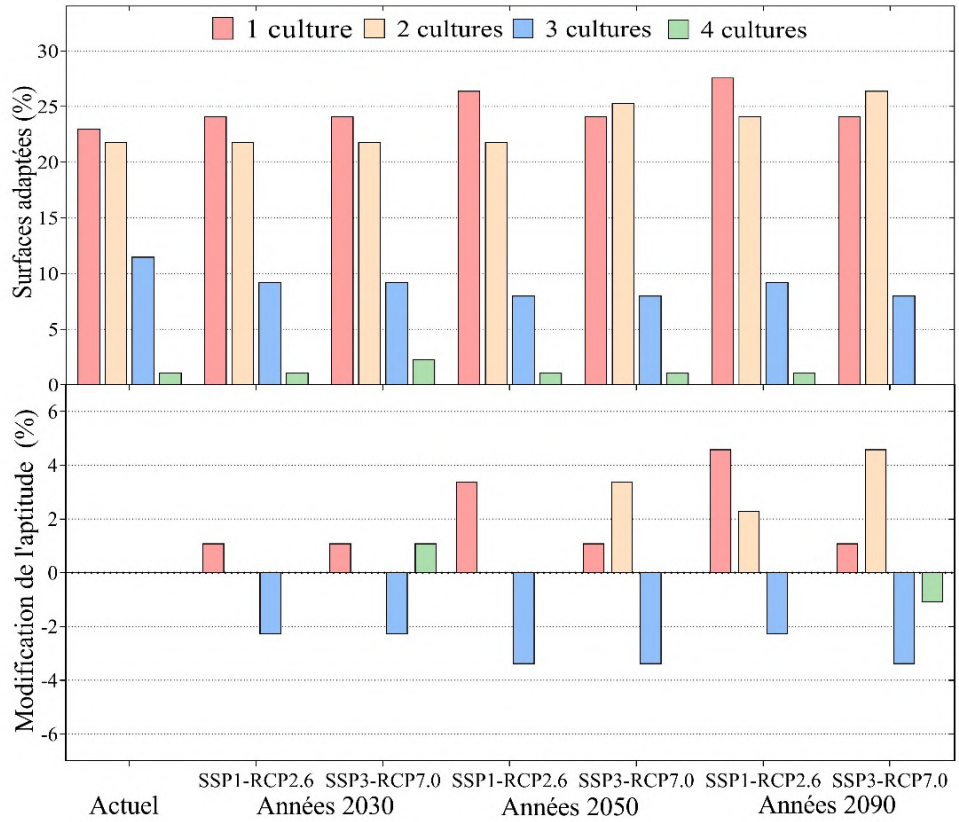


Figure 36 : Impact du changement climatique sur les zones adaptées de façon optimale à la polyculture au Burkina Faso en zone absolue par combinaison de cultures (graphique supérieur) et modification de l'aptitude par combinaison de cultures (graphique inférieur).

En conclusion, les modèles de vocation aux cultures montrent que les zones propices au sorgho et au niébé vont diminuer au Burkina Faso dans le contexte du changement climatique, tandis que celles propices au millet et au maïs resteront stables. Nous projetons une expansion vers le sud des zones à aptitude limitée en particulier pour toutes les cultures. Cela montre que dans le contexte du changement climatique, ces cultures deviendront de plus en plus difficiles à produire au Burkina Faso. En conséquence, des plans d'adaptation techniques et politiques sont nécessaires pour maintenir la production agricole à ses niveaux actuels. Nous montrons également que les agriculteurs auront de plus en plus de difficultés à produire des cultures différentes au Burkina Faso, ce qui limite leur capacité de diversification, la sécurité alimentaire associée et les avantages de la couverture économique représentée par la polyculture.

3.3 Évaluation de la perte des rendements dans les conditions futures du changement climatique

3.3.1 Données et méthode

Les rendements des cultures sont une réponse spécifique des végétaux aux variables météorologiques et à d'autres apports tels que les sols et les pratiques agricoles. Ces interactions peuvent refléter des équations représentant la réponse physiologique d'une culture à des variables environnementales (Jones et al., 2003). Les modèles de simulation de cultures biophysiques incorporent simultanément l'interaction entre les sols, les plantes et les intrants agricoles ainsi que les informations météorologiques. Pour cette étude, nous avons recouru au DSSAT (Hoogenboom et al., 2017, 2019 ; Jones et al., 2003), un modèle de simulation de culture basé sur les processus et couramment utilisé, qui simule le développement de la culture en fonction de la dynamique sol-plante-atmosphère. Ce modèle nécessite des données météorologiques quotidiennes, des informations sur la surface et le profil des sols, des informations détaillées sur la gestion de la culture, et les coefficients génétiques de la variété de culture choisie comme intrants pour simuler la croissance des plantes. Le système DSSAT calcule l'équilibre eau, azote, phosphore et carbone de la plante et du sol, ainsi que le développement végétatif et reproductif des cultures à l'intervalle temporel quotidien.

La production de sorgho est simulée à un intervalle de quadrillage de 0,5 ° (env. 55 km x 55 km) au Burkina Faso suivant les projections climatiques actuelles et futures. Conformément aux chapitres 1 et 2, nous utilisons les scénarios d'émissions SSP1-RCP2.6 et SSP3-RCP7.0 pour les projections de rendements des années 2030 (2021-2040), 2050 (2041-2060), et 2090 (2081-2100). Les données des projections climatiques simulées par des modèles climatiques mondiaux sont issues du projet ISIMIP3b (Lange, 2019a, 2019b).

Pour cette évaluation, nous adoptons des conditions d'agriculture pluviale et pas d'apport d'engrais comme stratégie de gestion par défaut pour le sorgho et utilisons pour le calibrage la variété de sorgho ouest-africaine du modèle DSSAT par défaut. La date de semis est automatiquement calculée par le modèle lorsque le champ présente au moins 10 % d'humidité du sol et que la température se trouve entre 10 et 40 °C. Simultanément, les dates de récoltes sont aussi automatiquement calculées par le DSSAT qui indique le moment où la culture arrivera à maturité. La profondeur des semis a été définie à 3 cm, avec un espacement de 45 cm entre les rangs et une densité de 13 plants/m², conformément aux pratiques courantes au Burkina Faso (White et al., 2015). Pour la calibration du modèle, nous nous référons aux statistiques des rendements fournis au niveau des provinces par le Ministère de l'agriculture du Burkina Faso (MAAH/DGESS, 2020).

Au niveau des provinces, le modèle a réalisé une bonne concordance entre les rendements moyens à long terme (2001-2016) observés et ceux simulés (une corrélation de Pearson r=0,63 et indice de concordance de Willmott d=0,78). En ce qui concerne la variabilité interannuelle de 2001-2016, le modèle a produit une corrélation de r=0,75 et un indice de concordance de d=0,83 entre les rendements observés et simulés à l'échelle nationale, ce qui indique une adéquation du modèle suffisante en vue d'analyser les scénarios d'avenir.

Contrairement aux modèles de vocation aux cultures qui recourent généralement à un modèle empirique pour mesurer les conditions climatiques saisonnières générales et à long terme (utilisés dans la partie précédente), cette partie recourt à la modélisation biophysique et mécaniste des impacts du changement climatique sur les rendements agricoles. Les rendements sont alors calculés à partir des réactions quotidiennes et potentiellement non-linéaires aux variables météorologiques et à d'autres contributions sur le terrain telles que les sols et les pratiques de l'agriculteur.

3.3.2 Résultats

Les rendements actuels de sorgho au Burkina Faso atteignent en moyenne 990 kg/ha dans les données observées (MAAH/DGESS, 2020) et 890 kg/ha dans les données simulées. Au Burkina Faso, les rendements se situent principalement entre 800 et 1200 kg/ha, les zones les plus productives se concentrant à l'ouest et au sud-ouest du pays. Les quantités de rendements en dehors de cette fourchette se trouvent au nord et au nord-est où les rendements sont généralement plus faibles.

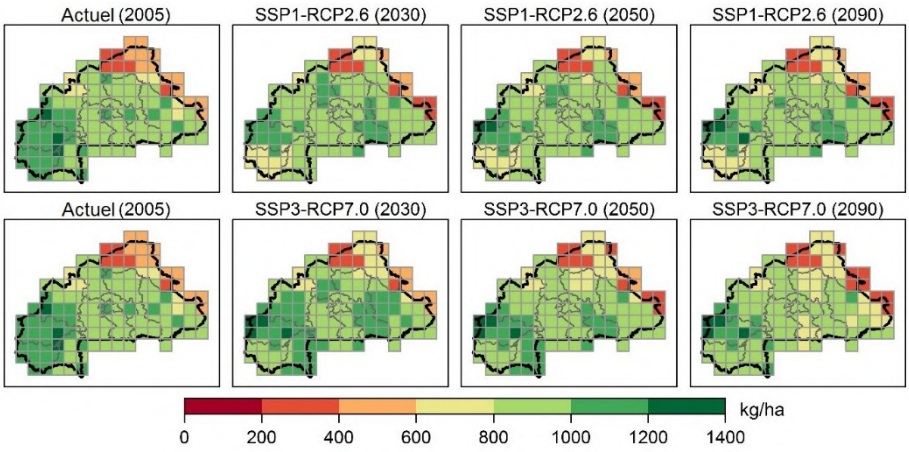


Figure 37 : Niveaux de rendements de sorgho (kg/ha) actuels et projetés à l'avenir au Burkina Faso selon un intervalle de quadrillage de 0,5 ° en vertu de SSP1-RCP2.6 (rangée supérieure) et SSP3-RCP7.0 (rangée inférieure) pour les années 2005 ("actuel"), 2030, 2050, et 2090.

La figure 37 présente la répartition actuelle des niveaux de rendements absolus au Burkina Faso (colonne gauche) ainsi que les changements projetés à l'avenir pour 2030, 2050, et 2090 en vertu de SSP1-RCP2.6 (rangée supérieure) et SSP3-RCP7.0 (rangée inférieure). Les projections de rendements jusqu'en 2090 montrent des tendances distinctes à l'échelle régionale en raison des disparités climatiques futures à cette même échelle. Au niveau national, d'après les projections, les rendements futurs devraient rester similaires aux rendements actuels (simulés) en vertu de SSP1-RCP2.6 avec 891 kg/ha. En vertu de SSP3-RCP7.0, la moyenne des rendements nationaux baissera pour atteindre 856 kg/ha (-3,8 %) comparé aux rendements actuels simulés.

La répartition régionale des anomalies de rendements devient particulièrement claire dans la figure 38. Jusqu'à la fin du siècle, les rendements devraient rester quasi inchangés à l'échelle nationale. Cependant, à l'échelle régionale, les projections des rendements prévoient des tendances en partie opposées allant de -30 % en vertu de SSP1-RCP2.6 à jusqu'à +20 % en vertu de SSP3-RCP7.0. Peu de régions au nord (Sahel, Nord et Centre-Nord) montrent des rendements en augmentation (jusqu'à +30 % en vertu de SSP1-RCP2.6 et jusqu'à +20 % en vertu de SSP3-RCP7.0), tandis que peu de régions au sud (Cascades, Haut-Bassins, et Sud-Ouest) présentent des rendements en baisse (de jusqu'à -30 % en vertu de SSP1-RCP2.6 et de jusqu'à -20 % en vertu de SSP3-RCP7.0). Une fertilisation plus élevée par le CO_2 associée à la projection de l'augmentation des événements de précipitations vers le nord ainsi qu'une baisse dans le sud serait une cause plausible. Une projection de l'augmentation des rendements au nord (Sahel et Nord) pourrait être due à une meilleure disponibilité en eau pour les cultures dans ces régions sèches, en particulier dans le cas des scénarios d'émissions élevées.

La comparaison des deux scénarios montre que les tendances de rendements dans certaines régions sont plus marquées en vertu de SSP1-RCP2.6 que de SSP3-RCP7.0 en raison des disparités régionales concernant les événements de précipitations comme l'intensité ou la fréquence des fortes précipitations et le changement du début de la mousson. Le scénario de réduction des émissions SSP1-RCP2.6 aboutit à des résultats similaires sur les rendements dans la plupart des régions au fil du temps en raison du manque de tendances au niveau de l'intensité ou de la fréquence des fortes précipitations (chapitre 1) ; on n'observe pas de tendance notable au niveau des variations de précipitations sur la durée (Figure 15). En même temps, pour certaines régions, le SSP1-RCP2.6 pourrait mener à de plus fortes pertes de rendements que le SSP3-RCP7.0 en raison du début tardif de la mousson, car en vertu de SSP3-RCP7.0, le début de la mousson reste presque inchangé par rapport au scénario actuel (chapitre 1). Plus précisément, d'après les projections, les régions du sud comme Cascades, Haut Bassins, et Sud-Ouest devraient subir des événements de précipitations moins intenses ou fréquents en comparaison aux autres régions (Figure 16), ce qui pourrait expliquer leurs pertes de rendements plus élevées par rapport à d'autres régions.

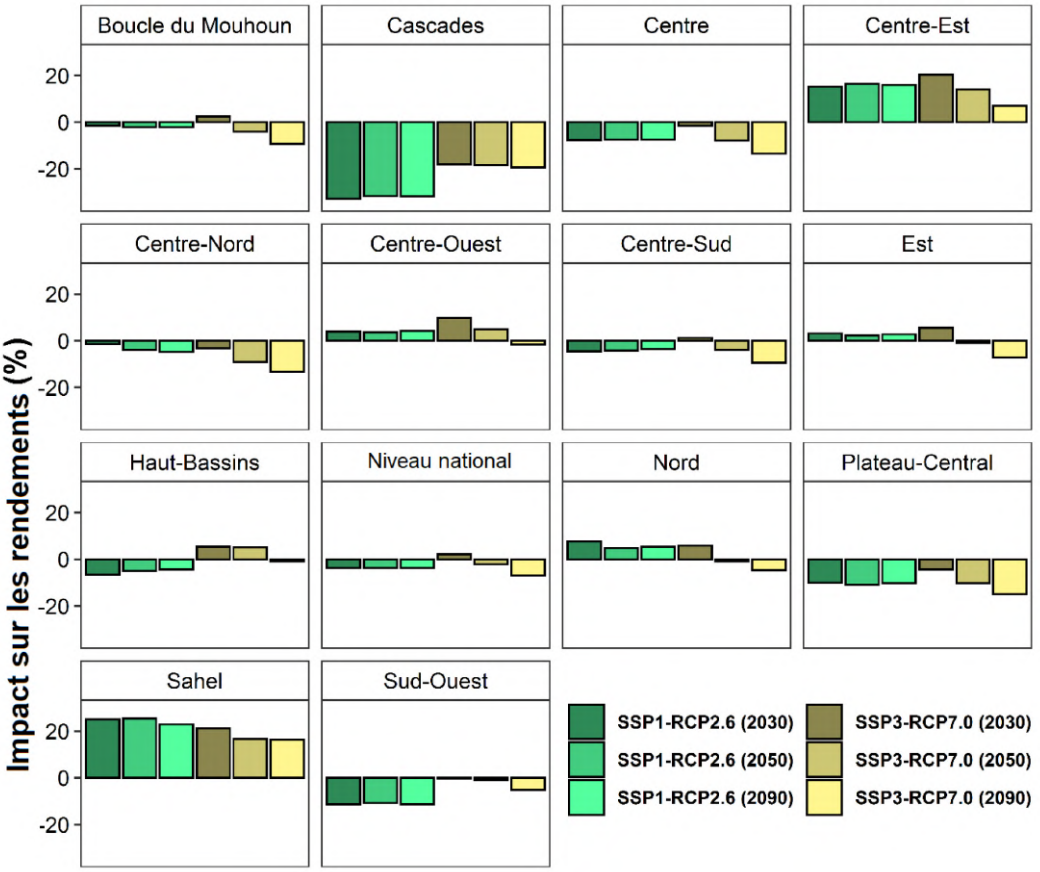


Figure 38 : Simulation des pertes de rendements par région au Burkina Faso pour les années 2030, 2050 et 2090 en vertu de SSP1-RCP2.6 et de SSP3-RCP7.0

Une analyse des indicateurs climatiques suggère que la majeure partie des pertes de rendements projetées peut s'expliquer par des augmentations de 1 à 4 °C des températures maximales et minimales durant la phase d'ensemencement et de germination (mai et juin), tandis que la quantité et la répartition des précipitations tout le long de la saison devraient rester relativement inchangées, ne subissant qu'une légère tendance à la hausse (voir aussi le chapitre 1). Dans l'ensemble, nos résultats concordent avec d'autres études selon lesquelles les rendements de sorgho devraient baisser au Burkina Faso à l'avenir à cause du réchauffement escompté, indépendamment de la hausse ou de la baisse des quantités de précipitations (Sultan et al., 2013).

AMPLIFY a montré que seulement environ 50 % de la variabilité du rendement de sorgho au Burkina Faso s'explique par les variables météorologiques, ce qui suggère que d'autres facteurs comme les sols et la gestion pourraient être à l'origine des 50 % restants. Les résultats issus de la modélisation de l'aptitude aux cultures dévoilent que les conditions tout le long de la saison pour le sorgho resteront stables au Burkina Faso (partie précédente), quoiqu'avec des niveaux de rendements inférieurs comme le montre cette modélisation basée sur les processus. Cela est dû au fait que l'aptitude tient compte des conditions sur la durée de la saison, tandis que la modélisation basée sur les processus est basée sur les conditions quotidiennes. Par exemple, la quantité totale de précipitations au cours d'une saison peut être suffisante pour attester de l'aptitude générale, tandis qu'à peine quelques jours secs durant cette même saison peuvent réduire les rendements de manière notable. La même remarque peut s'appliquer aux températures : même au cours d'une année « moyenne » optimale, une série de journées chaudes peut considérablement réduire les récoltes. Dans l'ensemble, les zones présentées comme étant très adaptées à la production de sorgho (Figure 30) correspondent aux zones simulées présentant un rendement élevé (Figure 35). En outre, nos résultats montrent que les variations de rendements sont plus importantes que les variations en matière d'aptitude, ce à quoi l'on s'attend du fait que les rendements sont plus vulnérables au changement climatique que l'aptitude aux cultures.

Résumé du chapitre 3

Ce chapitre a évalué les impacts climatiques sur la production agricole sous trois angles différents : la première partie a mis en évidence le rôle clé de l'influence météorologique sur les rendements des cultures : 70 % de la variabilité des rendements du maïs et du millet ainsi que 20 % de la variabilité des rendements du sorgho sont attribuables à la météo.

Les modèles de vocation aux cultures ont montré que les zones les plus propices au sorgho, au millet et au maïs resteront majoritairement stables dans le contexte du changement climatique d'ici à 2050, tandis que l'aptitude au niébé diminuera au cours de la même période. Nous projetons une expansion vers le sud des zones à l'aptitude limitée en particulier pour le maïs et le niébé. Cela montre que dans le contexte du changement climatique, ces cultures deviendront de plus en plus difficiles à produire au Burkina Faso. En conséquence, des plans d'adaptation techniques et politiques sont nécessaires pour maintenir la production agricole à ses niveaux actuels. Nous montrons également que la capacité des agriculteurs à produire des cultures multiples sera de plus en plus remise en question au Burkina Faso, ce qui limite la capacité de diversification des agriculteurs, la sécurité alimentaire associée et les avantages de la couverture économique représentée par la polyculture. En outre, la question scientifique spécifique devrait être gardée à l'esprit, justificatrice de l'utilisation parallèle des modèles empiriques pour l'adaptation aux cultures et des modèles mécanistes pour examiner les effets météorologiques infra-saisonniers.

Une analyse approfondie des projections relatives aux rendements du sorgho en vertu des deux scénarios d'émissions (SSP1-RCP2.6 et SSP3-RCP7.0) d'ici à 2030, à 2050, et à 2090 a mis en évidence une diminution des rendements (jusqu'à -20 %) pour les deux scénarios. Toutefois, les projections du scénario d'émissions élevées énoncent des rendements plus élevés (ou des pertes atténuées) que le scénario d'émissions réduites en raison d'une plus forte concentration de CO_2 et de régimes de précipitations plus avantageux en comparaison à l'avenir (Figure 15).

Tableau 4 : Récapitulatif des impacts du changement climatique sur la production agricole.

Impacts		Actuellement	Tendance future	Confiance
	Influence météorologique sur les rendements du sorgho	50%	-	Moyenne
	Adaptabilité au sorgho	Moyens	SSP1-RCP2.6 Relativement stable SSP3-RCP7.0 Relativement stable	Forte
	Rendements de sorgho	Moyens	SSP1-RCP2.6 Baisse ↘ SSP3-RCP7.0 Baisse ↘	Moyenne
	Influence météorologique sur les rendements du millet	70%	-	Moyenne
	Adaptabilité au millet	Moyens	SSP1-RCP2.6 Relativement stable SSP3-RCP7.0 Relativement stable	Forte
	Influence météorologique sur les rendements du maïs	70%	-	Moyenne
	Adaptabilité au maïs	Faibles à moyens	SSP1-RCP2.6 Relativement stable SSP3-RCP7.0 Relativement stable	Forte
	Adaptabilité au niébé	Moyens	SSP1-RCP2.6 Baisse ↘ SSP3-RCP7.0 Baisse ↘	Forte

Chapitre 4 – Impacts climatiques sur la production animale

Le secteur de l'élevage joue un rôle essentiel dans l'économie du Burkina Faso et contribue considérablement à sa sécurité alimentaire et nutritionnelle (Tiemtoré, 2004). Comme le Plan National d'Adaptation (PNA) au changement climatique le souligne, le secteur de l'élevage devrait être confronté à des risques élevés à modérés en raison du changement climatique. Les impacts induits par le changement climatique, tels que les sécheresses qui entraînent un manque de pâturages et des cycles de production agricole réduits, provoqueront des pertes au niveau de la production animale de différentes manières. Déjà aujourd'hui, le changement climatique a des impacts sur le nombre de têtes de bétail, la qualité fourragère et la teneur des pâturages dans la région (Pfeifer et al., 2020). Comme les systèmes herbagers sont très vulnérables aux fluctuations climatiques (Knauer et al., 2017), il est important de comprendre l'évolution de la productivité herbagère dans le passé et d'estimer la projection de son évolution en vertu des scénarios d'émissions pour l'avenir. En outre, il est essentiel de saisir les répercussions des disponibilités fourragères futures sur la production animale au Burkina Faso.

Dans la première partie de ce chapitre, nous allons évoquer l'impact du changement climatique sur la situation sécuritaire au Burkina Faso en examinant ses différents groupes ethniques : les Peuls, qui pratiquent généralement un pastoralisme nomade ou semi-nomade pour subvenir à leurs besoins, et les Mossis qui, quant à eux, recourent à l'agriculture sédentaire. Une synthèse d'études publiées à ce sujet montre les interactions et les conflits que pourrait comporter leur coexistence dans le cadre des enjeux croissants liés au changement climatique.

Dans la deuxième partie, les effets du changement climatique sur la productivité herbagère et la production animale basée sur le pâturage au Burkina Faso sont évalués grâce au modèle dynamique global de la végétation LPJmL.

La dernière partie s'intéresse au fauchage, une option d'adaptation éventuelle pour les systèmes d'élevage. Il s'agit d'une stratégie supplémentaire qui n'est pas intégrée dans l'évaluation multicritère.

4.1 Le secteur de l'élevage au Burkina Faso

La production animale au Burkina Faso représente environ 13 % du PIB et 36-40 % de la valeur ajoutée de l'agriculture (FAO, 2018a). Nombre de ménages ruraux au Burkina Faso dépendent fortement de l'élevage, car ils vivent au-dessous du seuil de pauvreté et sont confrontés à des obstacles majeurs pour produire ou acheter de la nourriture leur assurant un apport en calories et en protéines satisfaisant (Sanfo et Gérard, 2012). Au Burkina Faso, comme dans d'autres pays d'Afrique subsahariens, l'élevage est synonyme de richesse pour la population rurale et a, depuis très longtemps, une grande valeur culturelle. Pour la population rurale pauvre, il présente de multiples avantages : apport de nourriture de haute qualité, services de transport et de traction, source de revenus supplémentaires, économies et assurance aux risques climatiques et production de fumier, engrais précieux pour la production agricole (Keil et al., 2020). Généralement entretenus par les ménages plus pauvres, les petits ruminants sont fréquemment gérés par les femmes. Les ruminants plus grands sont principalement détenus par les ménages plus aisés et gérés par les hommes (Morgan and Pica-Ciamarra, 2011).

Une diversité considérable d'animaux ruminants et non-ruminants repose sur les catégories principales suivantes : bovins, ovins, chèvres, porcins et volailles (poules et pintades). La hausse de la

demande en production animale s'accompagne d'une hausse du nombre de têtes de bétail depuis les années 1990. Pour les ovins et la volaille, les chiffres ont augmenté de 3 %, et pour les bovins, les porcins et les chèvres, de 2 %. En 2019, on a estimé le nombre de bovins à 10 millions, d'ovins à 10,7 millions, de chèvres à 16,1 millions, de porcins à 2,5 millions et de volailles à 49 millions dans le pays (MRAH/DGSS, 2020). Cependant, la moyenne nationale du nombre de têtes de bétail est inégalement répartie dans les différentes régions et provinces du Burkina Faso comme le montre la figure 39, qui illustre la répartition des principaux ruminants (bovins, ovins et chèvres) au niveau des provinces.

Comme dans la plupart des pays subsahariens, les zones rurales bénéficiant de meilleures terres et de précipitations suffisantes intègrent généralement l'élevage dans un système mixte de production agricole et animale. En revanche, les zones au potentiel de production agricole faible voient souvent l'élevage au cœur des systèmes agro-pastoraux et pastoraux. Au Burkina Faso, l'élevage agro-pastoral sédentaire est le système d'élevage le plus courant. Il est pratiqué en particulier dans les parties sud et centrales du pays, tandis que dans le nord semi-aride (Sahel), l'est et le bassin cotonnier de l'ouest du pays, les systèmes pastoraux transhumants prédominent (FAO, 2018a ; Zoma-Traoré et al., 2020). Dans les systèmes mixtes de production agricole et animale sédentaires, les exploitants détiennent en général un troupeau de 5 à 100 têtes (à la fois bovins et petits ruminants) abrités dans des étables fixes proches de la ferme.

En revanche, les pastoralistes transhumants peuvent détenir des troupeaux allant d'une centaine à plusieurs milliers de bestiaux (FAO, 2018a). Dans ce type de systèmes, les pastoralistes déplacent constamment leurs troupeaux à travers le pays en quête de nourriture et d'eau (Zoma-Traoré et al., 2020). Avec les sous-produits de cultures occasionnels, les pâturages sont la principale source alimentaire du bétail transhumant. Quant aux ressources en eau, elles proviennent des fleuves et ruisseaux. Le déplacement des troupeaux est facilité par des couloirs de transhumance établis et marqués. Habituellement, les troupeaux parcourent des centaines de kilomètres dans tout le pays ou dépassent même les frontières nationales (FAO, 2018a).

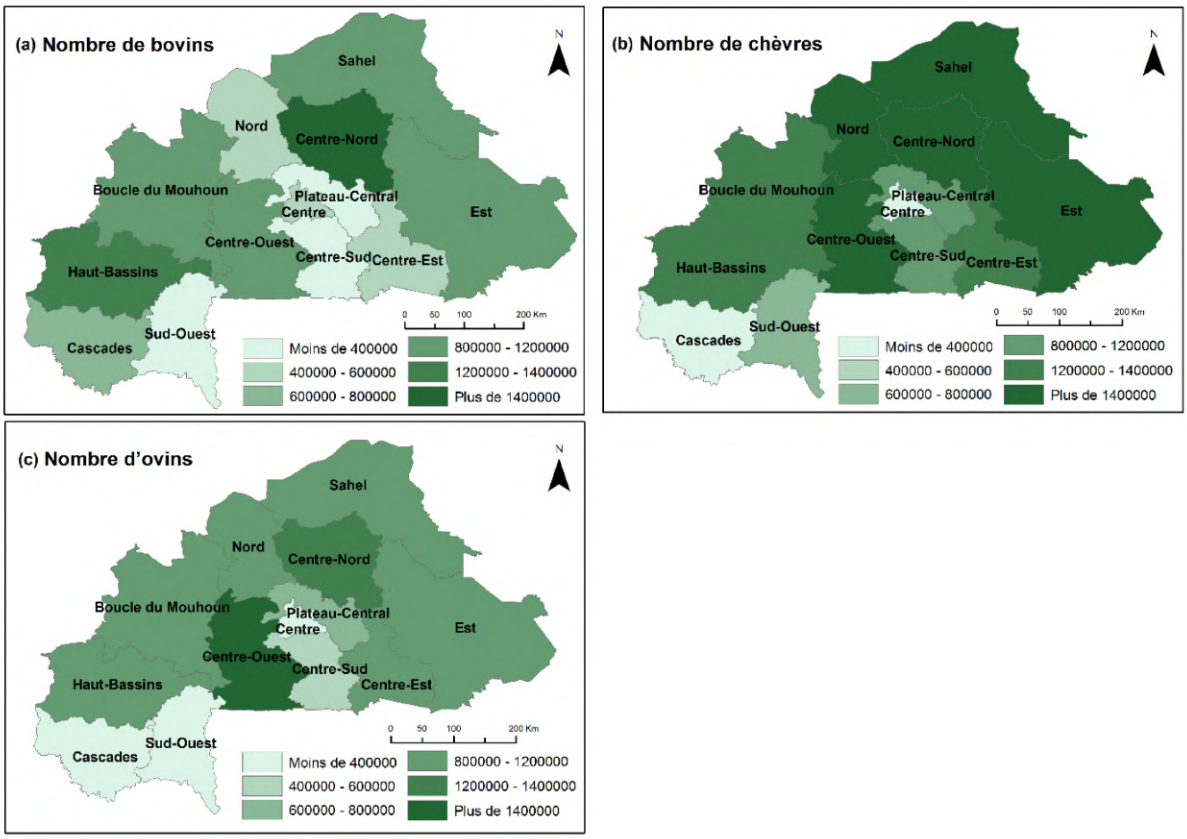


Figure 39 : Répartition des bovins, des ovins et des chèvres dans les provinces du Burkina Faso pour l'année 2019.

Le lien entre le changement climatique et la sécurité au Burkina Faso

Littérature spécialisée récente sur l'interdépendance entre le changement climatique et les conflits

De plus en plus d'études concordent pour affirmer que le changement climatique peut avoir un impact significatif sur le déclenchement et la prolongation des conflits armés (Brzoska et Scheffran, 2020 ; Kelley et al., 2015 ; Mach et al., 2019 ; Schilling et al., 2010 ; Schleussner et al., 2016 ; Von Uexkull et al., 2016). Toutefois, les mécanismes sous-jacents selon lesquels les événements climatiques extrêmes ont un impact sur les situations de conflits ne sont pas clairs. Des études montrent une relation de réciprocité entre les catastrophes environnementales et les conflits armés, ces deux facteurs aggravant les dommages causés par l'un et l'autre (Von Uexkull et al., 2016). En général, les impacts climatiques se produisent dans des circonstances socio-économiques très variées dans le monde entier. De ce fait, ils se traduisent de façon différente en fonction du contexte local et de l'historique propre au conflit. En particulier dans les régions déjà vulnérables et fragmentées au niveau politique et ethnique, le changement climatique représente un risque important d'émergence et d'exacerbation des situations de conflit (Schleussner et al., 2016). D'autres facteurs de conflits, plus établis, comme les inégalités socio-économiques, la fragmentation ethnique et le manque de ressources et de capacités gouvernementales, sont encore considérés comme étant plus influents sur le développement de conflits que le changement climatique même (Mach et al., 2019). En même temps, ces facteurs de conflits aggravent la vulnérabilité des communautés déjà marginalisées face aux événements climatiques extrêmes. En outre, le changement climatique risque de marginaliser davantage les communautés défavorisées sur le plan socio-économique, d'accroître les rivalités pour l'accès aux ressources entre différents groupes d'utilisateurs et d'aggraver la faiblesse de la gouvernance. Le niveau élevé de dépendance d'une grande partie de la population par rapport à l'agriculture représente un risque supplémentaire, car les répercussions du changement climatique sur l'agriculture menacent directement l'existence de grands groupes de populations et peuvent mener à des déplacements de grande envergure (Kelley et al., 2015). En raison de ses effets néfastes sur tous ces facteurs de conflits potentiels, le changement climatique est reconnu comme un « multiplicateur de menaces » dans les publications scientifiques.

Impacts du changement climatique sur les agriculteurs et les éleveurs de subsistance, et les voies menant aux conflits armés

Les dynamiques multiplicatrices de menaces, telles que celles causées par le changement climatique, sont particulièrement aggravées dans les sociétés dépendantes en particulier de l'agriculture et du pastoralisme de subsistance, et qui reposent sur l'agriculture pluviale (Von Uexkull et al., 2016). En dépit de leur empreinte carbone relativement faible, les agriculteurs et les pastoralistes sont particulièrement vulnérables aux effets du changement climatique, car ils sont très exposés aux événements météorologiques extrêmes, et leur situation ne leur permet pas de pouvoir s'adapter de manière adéquate. Outre les rudes sécheresses des années 1970 et 1980, le nord du Burkina Faso a subi des sécheresses plus récentes en 2004, en 2010 et en 2012 (Lodoun et al., 2013 ; Snorek et al., 2014). Cela a eu de graves répercussions sur la disponibilité fourragère et entravé la capacité des pastoralistes à pratiquer leur transhumance annuelle (Traore et Owiyo, 2013). D'après les projections, la fréquence et l'intensité de ces sécheresses devraient s'intensifier. Comme les ressources terrestres adéquates ont tendance à s'amenuiser en raison des changements climatiques, les clivages conflictuels sous-jacents mais existants risquent de devenir catalyseurs de violence, même entre les communautés aux relations auparavant basées sur la coopération (Schilling et al., 2010). Les Peuls, groupe ethnique comptant environ 40 millions de personnes dispersées en Afrique occidentale, pratiquent habituellement le pastoralisme nomade ou semi-nomade pour subvenir à leurs besoins. Au Burkina Faso, ils représentent la plus grande minorité. Les Mossis représentent le groupe ethnique majoritaire dans le pays et pratiquent communément l'agriculture ou l'élevage sédentaires. Leur culte est de type traditionnel, tandis que les Peuls sont adeptes de la foi islamique. En raison de leur mode de vie nomade à semi-nomade, les pastoralistes sont particulièrement vulnérables aux impacts climatiques, car non seulement ils dépendent des précipitations, mais ils suivent en outre la pluie lors de leur transhumance (Traore et Owiyo, 2013). Sur leur chemin, ils rencontrent des agriculteurs locaux ainsi que d'autres pastoralistes. Si ces relations peuvent être basées sur la coopération, des modifications des régimes de précipitations peuvent aussi entraîner la modification de leurs trajets dans leur quête de pluie et de pâturages (Schilling et al., 2010). Les relations avec des agriculteurs de groupes ethniques différents doivent donc être établies, ce qui peut être source de conflits, surtout durant la période de croissance (Von Uexkull et al., 2016). Les problèmes relatifs à la propriété foncière et à l'usage des terres entre les pastoralistes et les groupes externes sont courants (Traore et Owiyo, 2013).

Une foule d'acteurs au cœur du conflit au Burkina Faso

Jusqu'à récemment, le Burkina Faso était acclamé comme l'un des modèles de stabilité dans une région autrement instable. En outre, le pays était considéré comme un exemple de coexistence pacifique entre groupes ethniques et religieux différents (Aboagye et al., 2008). Mais l'instabilité régionale s'est installée dans la région du Sahel après la rébellion touareg et le coup d'État qui s'est ensuivi au Mali voisin en 2012. La vacance résultante au niveau du pouvoir a permis à plusieurs groupes extrémistes de s'implanter (Coalition citoyenne pour le Sahel, 2021). Au cours des cinq dernières années, ces groupes ont intensifié leurs campagnes au Niger, au Tchad et au Burkina Faso en commettant des attaques meurtrières sur les institutions étatiques, les forces de sécurité et les civils (Human Rights Watch, 2018 ; International Crisis Group, 2020b, 2020a). Les opérations anti-insurrectionnelles au nom des forces de sécurité nationales ont été brutales (Amnesty International, 2020). Les pastoralistes peuls, plus grand groupe minoritaire au Burkina Faso, sont pris entre les deux parties belligérantes. Fondé par le Peul Mallam Dicko, le groupe extrémiste local Ansarul, qui apportait son soutien en particulier aux pastoralistes victimes de griefs, est parvenu à s'attirer le soutien des pastoralistes durant l'étape initiale de la formation du groupe (International Crisis Group, 2020a). Par la suite, la tactique d'Ansarul s'est déviée, s'intéressant de moins en moins aux griefs concernant les difficultés liées à l'élevage traditionnel et à la corruption de l'État et du clergé pour viser la conquête de territoires et l'imposition de changements sociétaux censés être en accord avec la doctrine religieuse dans ces communautés. Par ailleurs, les Koglweogo, aussi appelés groupes « d'autodéfense », ont rejoint la scène déjà chaotique des acteurs régionaux du conflit armé. Mis en place à l'origine pour protéger les villages sahéliens burkinabés des groupes extrémistes et des bandits, des massacres de villages peuls entiers se sont ensuivis pour venger le supposé soutien des Peuls aux activités extrémistes (Human Rights Watch, 2018). Tout cela a aggravé l'atmosphère de méfiance entre les communautés, notamment entre la minorité peule marginalisée au plan socio-économique et la majorité des Mossis.

Les rapports établis par des ONG montrent qu'au Burkina Faso, les Peuls sont inextricablement liés de différentes manières à la récente instabilité. De nombreux rapports font état d'exécutions sommaires, de mauvais traitements infligés aux suspects ainsi que d'arrestations arbitraires, ce qui représente des mesures d'intimidation à l'égard des groupes particulièrement marginalisés comme surtout les Peuls (Human Rights Watch, 2018). Cela, ainsi que la présence de groupes extrémistes, a conduit à de vastes déplacements internes. Récemment, le nombre de personnes déplacées dans la région a dépassé les 2 millions, 1 million pour le cas du Burkina Faso à lui seul (Programme alimentaire mondial, 2020). Les groupes extrémistes formés localement, comme Ansarul Islam, n'ont pas seulement été initiés par des membres de l'ethnie peule, mais ont aussi fondé leur recrutement sur de jeunes hommes peuls du nord du Burkina Faso (International Crisis Group, 2020). Cette dynamique de peur et de méfiance a contribué aux tensions ethniques. Les violences de la part des forces de sécurité, des groupes extrémistes armés et des communautés sont devenues chose courante ces dernières années dans la région, à la frontière du Mali et du Niger, c'est-à-dire dans les provinces de Seno, Ouadalan, Yagha et Soum.

Aux pressions existantes constituées par les facteurs de conflit actifs mentionnés ci-dessus, le changement climatique vient s'ajouter. Le changement des régimes climatiques amplifie considérablement les tensions existantes, tout comme il a perpétué les cycles de privations et de marginalisation socio-économiques. Les responsables politiques devraient prêter particulièrement attention aux besoins des communautés marginalisées dans le domaine agricole. L'organisation de la transhumance est un élément crucial dans l'aggravation de nombreuses tensions intercommunautaires sous-jacentes. Plus précisément, cela signifie qu'il est nécessaire d'identifier clairement les couloirs pastoraux et de les renforcer. L'expansion de terres agricoles sur des voies de transhumance est annonciatrice de conflit social au sujet d'une production piétinée. Des efforts devraient être entrepris pour réformer les systèmes d'insécurité foncière. En outre, compte tenu des régimes de précipitations de moins en moins prévisibles, des services assurant eau et fourrages le long des voies pourraient servir de stratégie d'atténuation des impacts. À la lumière de la situation actuelle concernant la sécurité dans le pays et dans l'ensemble de la région, couplée à une faible capacité d'adaptation aux effets du changement climatique, les impacts du changement climatique sur le développement de conflits violents requièrent une analyse plus poussée. Les agences de mise en œuvre devraient tenir compte des dynamiques des conflits au moment d'entreprendre des projets d'adaptation. Les mesures d'adaptation risquent effectivement d'exacerber la violence du conflit présent ou même d'attiser le déclenchement de conflits dans un contexte de tensions intercommunautaires sous-jacentes. Le principe de l'innocuité « do no harm » doit se trouver au premier plan et au centre de l'étape de planification, dès le début.

4.2 Données et méthode

L'analyse fournie dans ce chapitre traite en particulier les impacts du changement climatique sur la productivité herbagère et donc sur la production animale basée sur les pâturages au Burkina Faso. Ainsi, l'analyse concerne les principaux animaux de pâturage comme les bovins, les ovins et les chèvres. À cet effet, le modèle dynamique global de la végétation LPJmL (Lund-Potsdam-Jena with managed land), conçu principalement au PIK, a été utilisé (Schaphoff et al., 2018 ; Von Bloh et al., 2018).

Le modèle dynamique global de la végétation LPJmL, basé sur les processus, simule les mécanismes écosystémiques essentiels tels que la photosynthèse, la respiration des plantes et des sols, la répartition du carbone, l'évapotranspiration et la phénologie de la végétation naturelle et gérée, logiquement reliés par leurs flux de carbone, d'eau et d'azote (Schaphoff et al., 2018 ; Von Bloh et al., 2018). Les modèles dynamiques mondiaux de la végétation servent souvent à étudier les effets du changement climatique sur la couverture végétale. En outre, LPJmL fournit une représentation de différents schémas de gestion des pâturages, qui lui permettent de simuler les impacts du pâturage, les intensités du pâturage et les systèmes de fauchage dans les prairies gérées (Rolinski et al., 2018). S'appuyant sur la résolution spatiale des données climatiques, LPJmL simule la surface terrestre par un fin quadrillage de cellules de 0,5 ° x 0,5 ° soit approximativement 55 x 55 km.

Les besoins fourragers quotidiens varient suivant l'espèce animale. Pour pouvoir les comparer, les types d'animaux peuvent être convertis en Unités de bétail tropical (UBT) en utilisant les facteurs de conversion du tableau 5. On considère un besoin journalier de 6,25 kg de matière sèche par UBT (MRAH, 2020), et dans l'analyse suivante, on ne fait pas de distinction entre les différents types d'animaux.

Tableau 5 : Facteurs de conversion en Unités de bétail tropical (UBT) pour les différents types d'animaux.

Espèces animales d'élevage	Nombre d'UBT
Bovins	0,8
Ovins	0,1
Chèvres	0,1

Dans les simulations modélisées, l'impact du pâturage par le bétail est représenté par la suppression journalière partielle de la biomasse foliaire des graminées. On estime que le pâturage laisse toujours une hauteur de chaume minimale d'environ 1 cm. Du point de vue de la demande, la quantité de biomasse retirée dépend de la densité des animaux de pâturage (nombre d'UBT par hectare). Sur le plan de l'offre, la biomasse disponible varie suivant les saisons et les années en fonction de la météo et du pâturage antécédent. On ne dispose pas de données spatiales ou temporelles explicites rendant compte de la densité réelle du pâturage d'élevage au Burkina Faso pour la période passée. La pratique de la transhumance, qui implique la migration saisonnière de troupeaux sur bien souvent de longues distances, complique l'estimation du besoin en pâturages à l'échelle infra-annuelle. En outre, les statistiques du Burkina Faso sur le fourrage suggèrent un usage important des résidus agricoles pour compléter le fourrage des herbes pâturées (MRAH, 2020).

Étant donné les limites de ces données, nous ne tentons pas de reproduire les régimes de pâturage réels au Burkina Faso. Au contraire, nous testons systématiquement une fourchette des taux de retrait de biomasse (correspondant à des densités de cheptel entre 0 et 5 UBT/ha) et sélectionnons dans chaque cellule et pour chaque année le taux de retrait produisant le rendement total annuel des herbages le plus élevé. La figure 40 illustre cette procédure dans le cas d'une cellule pour une année. Nous considérons ce rendement d'herbages comme un potentiel de pâturage, mais soulignons qu'il n'équivaut pas à une capacité de charge. Comme le montre la figure 40, les rendements des herbages varient à l'échelle saisonnière. De ce fait, utiliser le potentiel de pâturage dans son intégralité nécessiterait soit un ajustement saisonnier de la densité de cheptel, soit un complément de fourrages issus d'autres sources. Le potentiel de pâturage que nous calculons reconnaît que ces deux techniques de gestion sont actuellement utilisées au Burkina Faso, tout en n'en rendant pas compte quantitativement de manière explicite tel que cela serait nécessaire afin d'estimer la capacité de charge.

Lors de la transposition à l'échelle régionale ou nationale des niveaux de rendements par cellule, toute terre qui n'est pas terre cultivable dans une cellule est considérée comme potentiellement disponible en pâturages. Ainsi, les cellules dont la part de terres cultivables est élevée contribuent moins à la moyenne régionale ou nationale que les cellules dépourvues de terres cultivables. Les cartes des terres cultivables proviennent de l'ensemble de données LUH2 qui fournit une chronologie de cartes quadrillées de l'utilisation des sols conformes aux zones d'utilisation des sols à l'échelle nationale déclarées dans la base de données FAOSTAT (Hurtt et al., 2020). Comme mentionné au chapitre 1, des simulations de la productivité herbagère passée et future suivant différents régimes de gestion sont fondées sur les dix modèles climatiques mondiaux (MCM) et deux scénarios d'émissions. Les changements à venir concernant le potentiel de pâturage sont présentés pour trois périodes : ~2030 (2021–2040), ~2050 (2041–2060), et ~2090 (2081–2100). Tous les changements sont établis en comparaison à la période historique de 1995–2014.

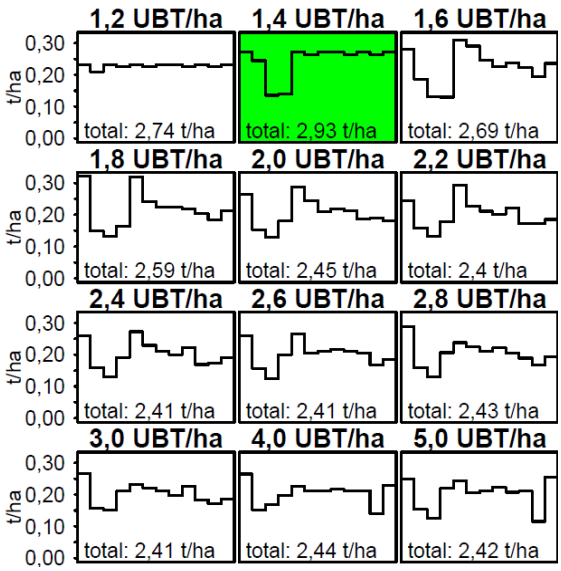


Figure 40 : Rendements des herbages annuels suivant différentes densités de cheptel dans une cellule et en une année ; la densité de bétail au rendement annuel le plus élevé est considérée comme potentiel de pâturage (marquée en vert dans la cellule)

4.3 Résultats

La figure 41 montre la médiane de l'ensemble multi-modèles du potentiel de pâturage annuel pour la période historique de 1995–2014. Les potentiels de pâturage les plus élevés se trouvent dans la région des Cascades : ils dépassent 3,5 tonnes de matière sèche par hectare et par an le long de la frontière avec la Côte d'Ivoire. Les potentiels de pâturage diminuent vers le nord-est au fur et à mesure que baisse le gradient de précipitations au travers du Burkina Faso. Les potentiels de pâturage les plus faibles se trouvent dans la région du Sahel, atteignant moins de 1,5 t par ha et par an le long de la frontière avec le Niger et le Mali.

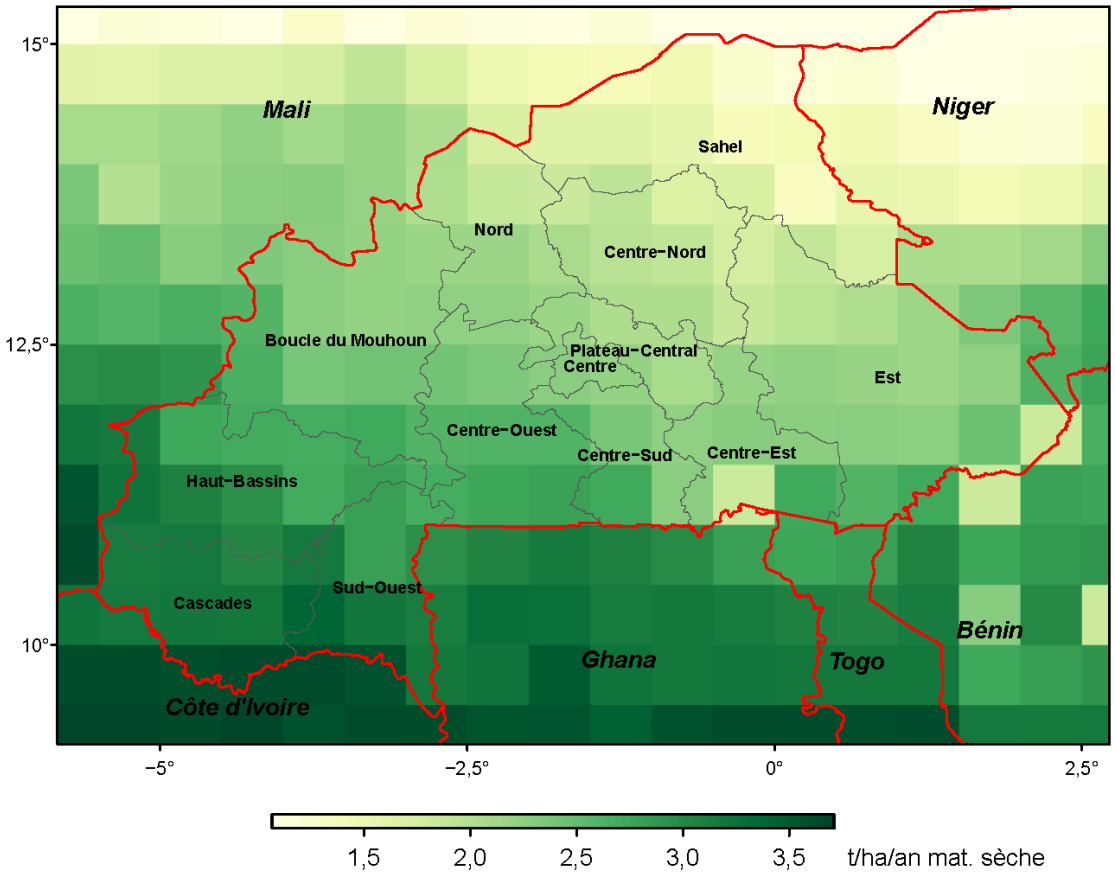


Figure 41 : Médiane de l'ensemble multi-modèles du potentiel de pâturage annuel simulé pour la période historique de 1995-2014 au Burkina Faso.

Il convient de noter que le potentiel de pâturage varie considérablement au fil des saisons et des années, comme le montre la figure 42 sur le potentiel de pâturage mensuel dans les 13 régions du Burkina Faso. Dans cette figure, le gradient coloré de vert clair à vert foncé montre la variabilité sur les dix MCM et sur 20 années, constituant la médiane de l'ensemble multi-modèles. Contrairement au potentiel de pâturage annuel, la variabilité saisonnière et pluriannuelle des potentiels de pâturage est au plus bas dans le sud-ouest (Cascades, Sud-Ouest, Haut-Bassins) et augmente vers le nord-est, la variabilité la plus forte se situant dans les régions Centre-Nord, Nord, et Sahel.

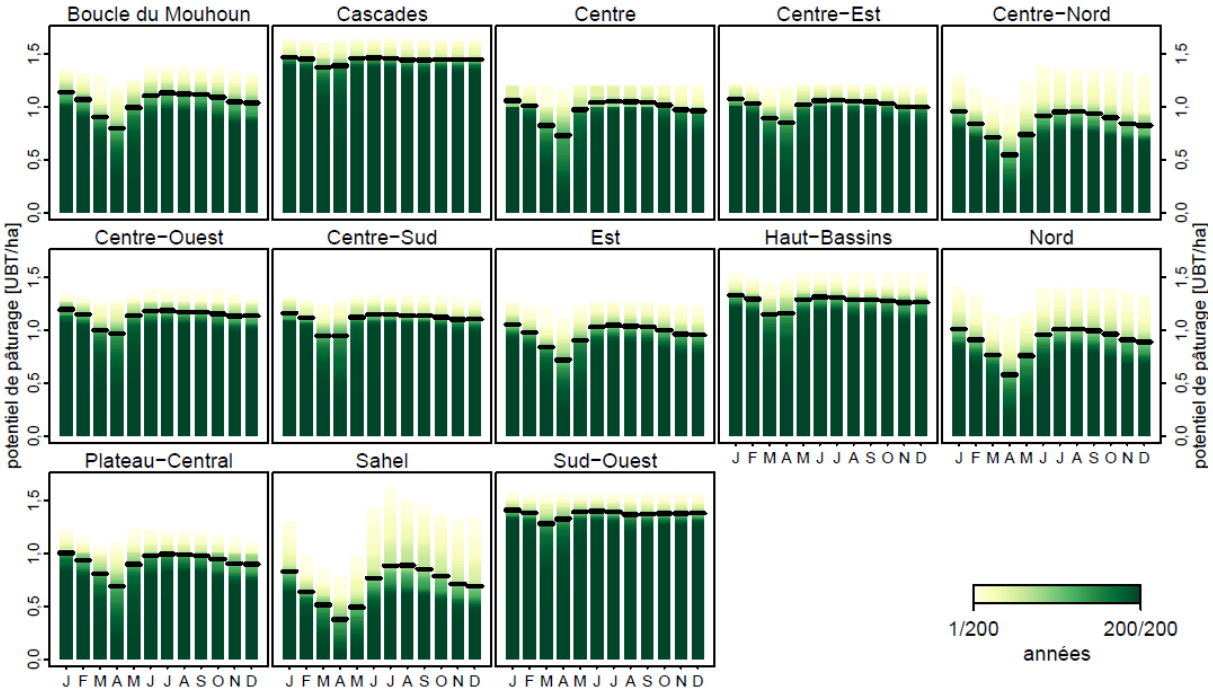


Figure 42 : Variabilité du potentiel de pâturage passé au cours d'une année et sur plusieurs années dans l'ensemble multi-modèle observant la période historique. Chaque barre représente la fourchette du potentiel de pâturage mensuel suivant les dix MCM sur un intervalle de 20 années. Les couleurs plus claires indiquent des valeurs élevées atteintes en seulement quelques années. La ligne horizontale noire dans chaque barre marque la moyenne sur toutes les années et tous les modèles climatiques mondiaux.

À l'échelle nationale, les projections indiquent une baisse des potentiels de pâturage au Burkina Faso au cours du 21e siècle (Figure 43). Les variations les plus faibles sont à envisager pour la période de 2030 et s'intensifieraient vers la fin du siècle. Les pertes en potentiel de pâturage sont plus prononcées en vertu du scénario de réduction des émissions SSP1-RCP2.6 où elles augmenteront de 3 % en 2030, à 5 % en 2050 et à 10 % en 2090 d'après la médiane de l'ensemble multi-modèles. En comparaison, les pertes en potentiel de pâturage en vertu du scénario SSP3-RCP7.0 augmenteront d'environ 2 % en 2030 à 3 % en 2050 et à 4 % en 2090. Même s'il y a un certain écart d'un modèle à l'autre concernant l'ampleur des pertes de potentiel en pâturage, l'ensemble des dix modèles climatiques mondiaux s'accorde sur la direction du changement et sur la tendance générale qui prévoit des pertes plus importantes en vertu du scénario de réduction des émissions SSP1-RCP2.6. Les effets d'un réchauffement plus élevé en vertu de SSP3-RCP7.0 pourraient être partiellement contrebalancés par une hausse des précipitations associée à une meilleure utilisation de l'eau par les plantes en raison de la concentration atmosphérique plus élevée de CO_2, tandis qu'un réchauffement plus faible devrait coïncider avec une baisse des précipitations pendant la seconde moitié du 21e siècle en vertu de SSP1-RCP2.6.

L'image devient plus hétérogène si l'on passe de l'échelle nationale à l'échelle régionale (Figure 44). Si la tendance générale pour le Burkina Faso s'avère négative, des zones de la région du Sahel devraient observer en 2030 une légère augmentation de leur potentiel de pâturage en vertu de SSP1-RCP2.6. Cette tendance positive s'inverse plus tard au cours du siècle : le potentiel de pâturage de la région du Sahel baisse de 1 % au-

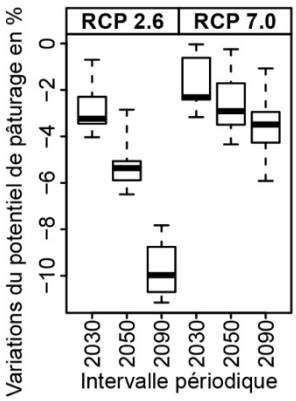


Figure 43 : Variations du potentiel de pâturage annuel au niveau national en vertu des deux scénarios d'émissions et des trois intervalles chronologiques. Les boîtes à moustaches montrent l'étendue des dix modèles climatiques mondiaux.

dessous des niveaux historiques vers 2050 et de 4 % au-dessous des niveaux historiques vers 2090. Cependant, les modèles climatiques mondiaux présentent une incertitude importante : seuls quatre des dix modèles mondiaux indiquent une modification positive du potentiel de pâturage en 2030. Cette prévision n'est fournie que par trois MCM en 2090. Tandis que la moyenne multi-modèle indique une baisse du potentiel de pâturage, la gamme des modèles inclut tout de même la possibilité d'une tendance positive dans la région du Sahel.

D'après les projections, la région du Sahel devrait connaître une augmentation plus marquée du potentiel de pâturage en vertu de SSP3-RCP7.0, passant de 1,5 % en 2030 à 4 % en 2050 et à 10 % en 2090. La confiance est également plus élevée, huit à dix des dix modèles mondiaux s'accordant sur la direction du changement. Les tendances positives du potentiel de pâturage s'étendent également sur des parties des régions Centre Nord et Est. Toutefois, la majorité des MCM indique une baisse générale du potentiel de pâturage pour les deux régions.

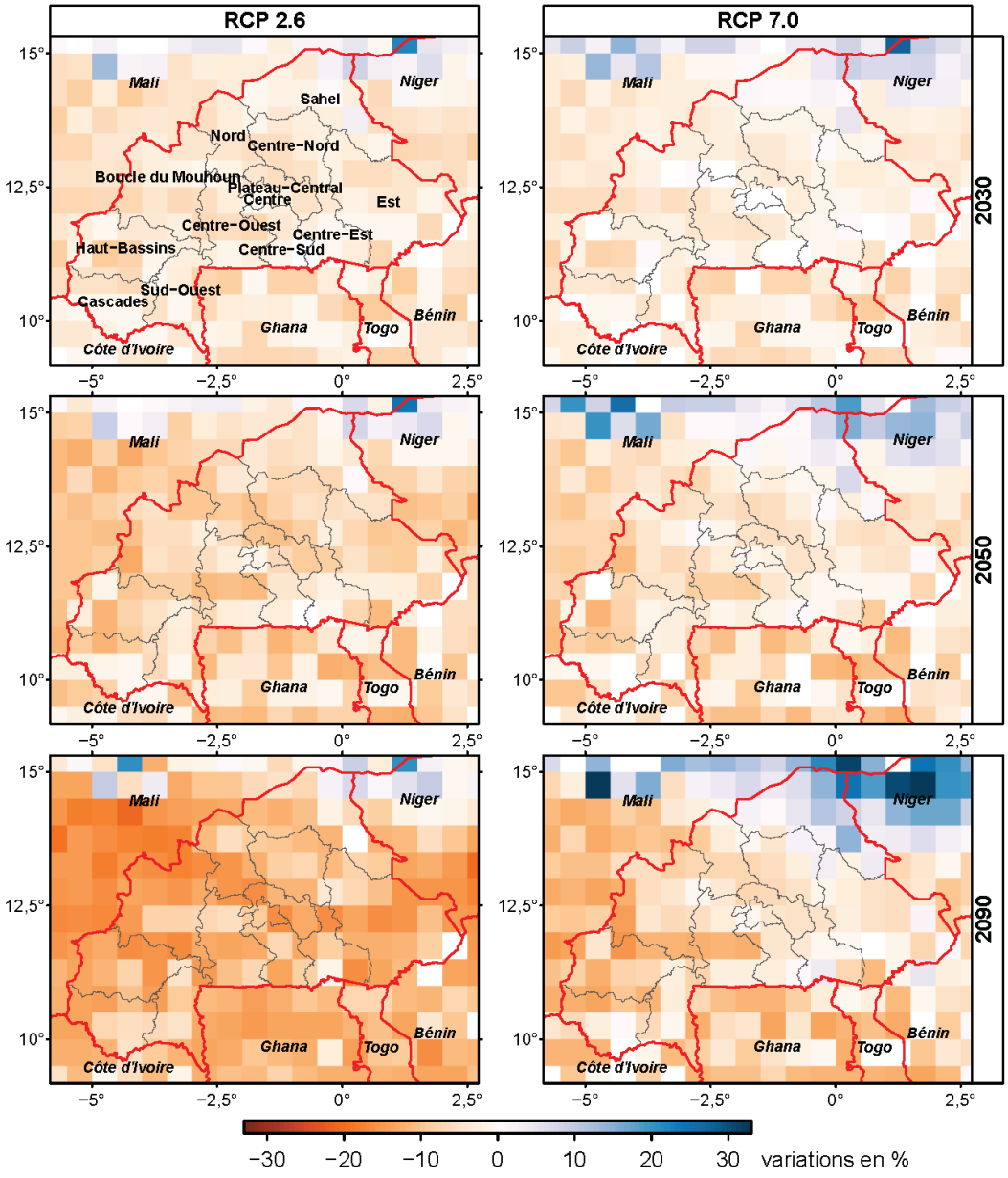


Figure 44 : Médiane de l'ensemble multi-modèles du changement du potentiel de pâturage annuel à trois périodes (2030 en haut, 2050 au milieu, 2090 en bas) et selon deux scénarios d'émissions (SSP1-RCP2.6 à gauche et SSP3-RCP7.0 à droite). Les changements sont mesurés par rapport à la période historique indiquée à la figure 36.

Encadré : le fauchage comme option d'adaptation

L'une des options d'adaptation qui se présente au secteur de l'élevage est le fauchage.[9] Le gouvernement du Burkina Faso estime que le fauchage et le stockage de fourrages sont de bonnes pratiques pastorales pouvant s'inscrire dans une gestion durable des sols (SP/CONEDD, 2011), car ces pratiques sont censées :

- améliorer à la fois la qualité et la quantité de la disponibilité en fourrages durant la saison sèche ;
- conduire à une meilleure gestion des pâturages et à une meilleure utilisation des fourrages ;
- permettre l'intensification de la production animale et
- réduire le risque de feux de brousse.

Afin d'analyser dans quelle mesure le fauchage pourrait s'avérer être une bonne option d'adaptation, quatre régimes de fauchage différents ont été testés : un seul événement de fauchage par an le 1er octobre (M1), deux événements de fauchage par an le 1er août et le 1er octobre (M2), trois événements de fauchage par an le 1er mai, le 1er août et le 1er octobre (M3), et un seul événement de fauchage tardif, le 1er novembre (M4). Dans le modèle, les effets potentiels du fauchage sont représentés par le retrait complet de la biomasse foliaire des graminées jusqu'à une hauteur de chaume d'environ 5 cm sur des jours de fauchage pré-déterminés.

La figure 45 compare les rendements annuels des différentes régions du Burkina Faso exerçant une gestion du pâturage (marquées « G » dans la figure) et quatre régimes de gestion de fauchage différents (marquées « M1 » à « M4 » dans la figure). La première colonne présente les résultats de la période historique (1995–2014). En moyenne sur toutes les années et les MCM formant l'ensemble historique, le fauchage conduit à des rendements d'herbage plus élevés que le pâturage dans toutes les régions sauf au Centre-Nord, au Nord et au Sahel. Le fauchage présente une amélioration des rendements de jusqu'à 60 % comparé à la région des Cascades et de jusqu'à 56 % dans la région Sud-Ouest. L'effet positif s'atténue vers le nord. Le régime reposant sur deux événements de fauchage par an le 1er août et le 1er octobre (M2) s'avère être le plus productif parmi les quatre options testées. Le régime composé d'un seul événement de fauchage tardif le 1er novembre (M4) n'est pas avantageux, car il conduit à des rendements plus faibles que le pâturage dans la plupart des régions.

L'effet bénéfique du fauchage sur les rendements des herbages se poursuit dans le contexte du changement climatique. On observe une légère augmentation sur les trois périodes futures en vertu des deux scénarios d'émissions. Les projections indiquent que le fauchage devrait augmenter les rendements de jusqu'à 89 % par rapport à ceux du pâturage pour la période de 2090 (moyenne de l'ensemble multi-modèles, SSP1-RCP2.6, région Sud-Ouest). De manière plus significative, tandis que les projections annoncent une baisse des rendements du pâturage dans le cadre du changement climatique dans toutes les régions sauf Sahel, les rendements de fauchage sont non seulement supérieurs à ceux du pâturage, mais ils augmentent aussi par rapport à la période historique. Ces résultats produisent un argument solide en faveur de l'expansion du fauchage comme régime de gestion des pâturages pour s'adapter au changement climatique. Des réserves subsistent cependant :

- Les rendements du fauchage semblent présenter une plus vaste incertitude que les rendements du pâturage, comme le prouve la longueur plus élevée des boîtes à moustaches à la figure 45. Celles-ci montrent l'étendue des rendements annuels du fauchage sur les 20 années et les 10 MCM qui s'inscrivent dans la moyenne périodique et suggèrent une variabilité interannuelle des rendements du fauchage plus élevée par rapport au pâturage.
- Le fauchage réalisé seulement une ou deux fois par an implique la nécessité d'installations de stockage pour conserver le fourrage en sécurité pour le restant de l'année. Les pertes au cours du stockage peuvent partiellement contrer les avantages des rendements plus élevés du fauchage.
- Le fauchage requiert davantage de travail manuel et d'équipements que le pâturage.

Le fauchage pourrait servir à remplacer entièrement le pâturage. Cela permettrait de profiter pleinement des potentiels de rendements plus élevés du fauchage par rapport au pâturage. Même si le pâturage reste la forme dominante de l'élevage du bétail, réserver une part des prairies au fauchage permettrait de fournir des réserves de fourrages pour combler le déficit en capacités de pâturage des prairies restantes pendant la saison sèche.

9 Si le fauchage a fait partie des stratégies d'adaptation présélectionnées, il n'a pas été choisi comme stratégie d'adaptation prioritaire au cours des ateliers ayant réuni les acteurs concernés pour l'analyse en trois étapes du processus d'adaptation menée dans la deuxième partie de l'étude. De ce fait, cette pratique est explorée brièvement dans le chapitre traitant les impacts climatiques sur l'élevage.

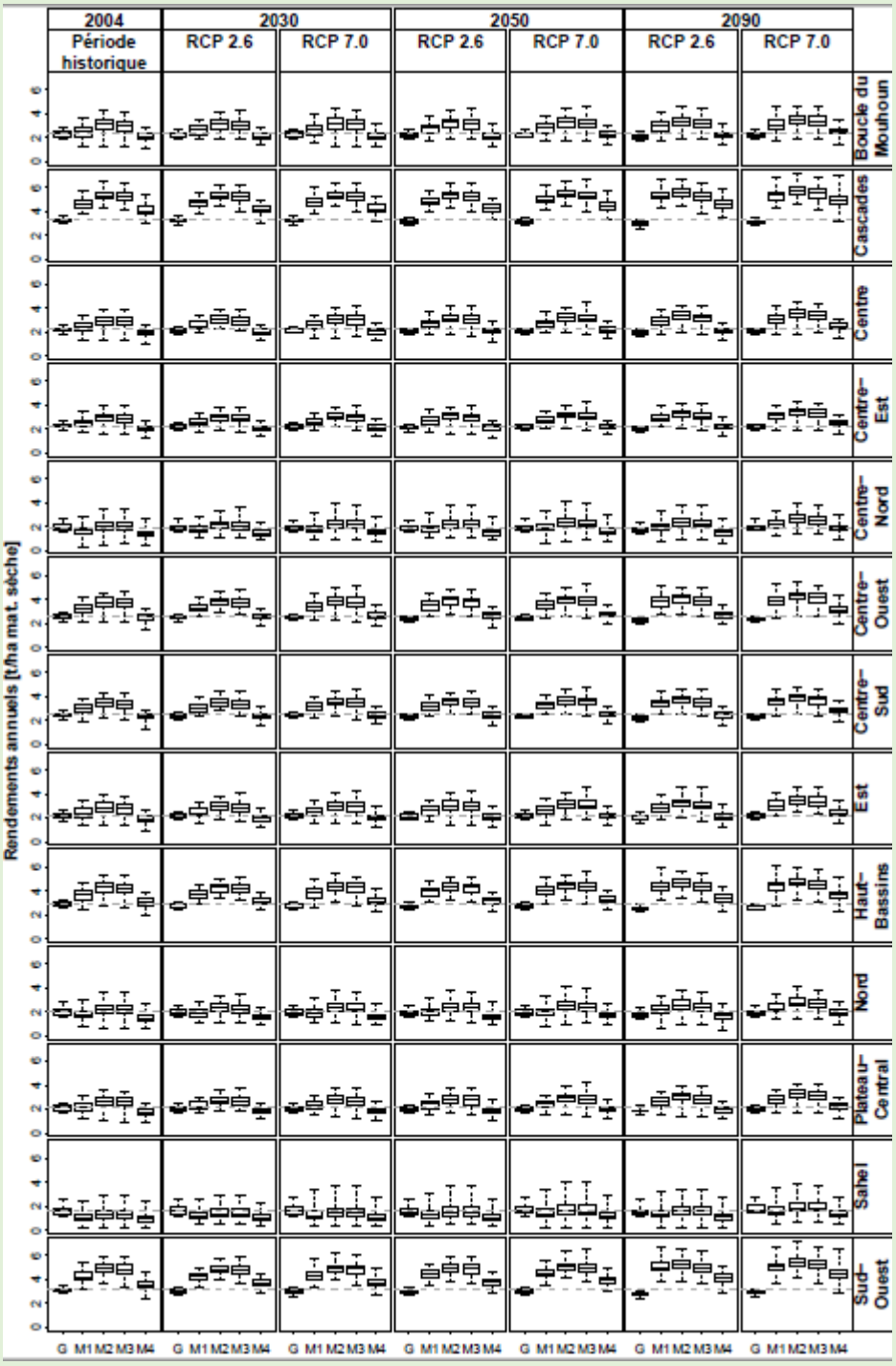


Figure 45 : Rendements d'herbage sous des gestions de pâturage et de fauchage. Chaque rangée présente les résultats d'une région. Chaque panel d'une rangée présente un intervalle périodique et un scénario d'émissions. Dans chaque panel, la première boîte à moustaches indique le rendement annuel lié au pâturage, les quatre autres boîtes indiquent les rendements liés aux quatre différents régimes de fauchage (voir le texte pour de plus amples détails). La longueur de chaque boîte illustre l'étendue sur les dix MCM et les 20 années, et elle peut être considérée comme une mesure d'incertitude. La ligne horizontale en pointillés dans chaque rangée indique le rendement de pâturage au cours de la période historique et sert de guide visuel pour évaluer rapidement si les rendements augmentent ou baissent selon les régimes de fauchage ou dans le cadre du changement climatique.

Résumé du chapitre 4

Ce chapitre a permis d'analyser les conséquences du changement climatique sur le secteur de l'élevage. L'analyse s'est concentrée sur les changements induits par le climat vis-à-vis du potentiel de pâturage en vertu des deux scénarios de changement climatique (SSP1-RCP2.6 et SSP3-RCP7.0). Les potentiels de pâturage historiques présentent un gradient spatial important sur l'ensemble du Burkina Faso : les potentiels de pâturage sont plus de deux fois plus forts au sud qu'au nord. Le consensus entre les modèles climatiques sur la baisse des potentiels de pâturage en vertu des deux scénarios de changement climatique est élevé. Les pertes prévues concernant le potentiel de pâturage sont plus fortes en vertu du scénario de réduction des émissions SSP1-RCP2.6 que du scénario d'émissions élevées SSP3-RCP7.0. Les capacités de pâturage dans la région du Sahel présentent une légère tendance à la hausse dans certaines simulations de modèles climatiques. Si la concordance des modèles sur cette tendance positive est forte en vertu du scénario SSP3-RCP7.0, seule une petite minorité de modèles prévoit une tendance à l'augmentation dans la région du Sahel en vertu du scénario SSP1-RCP2.6.

Tableau 6 : Impacts climatiques sur la production animale.

Impact		Tendance passée	Tendance future	Confiance
	Nombre de têtes de bétail	Augmentation	- pas de données -	-
	Disponibilités fourragères, potentiel de pâturage	Baisse	SSP1-RCP2.6 Baisse ↘ SSP3-RCP7.0 Baisse légère →	Fort

PARTIE II – ADAPTATION

La première partie de cette analyse des risques climatiques s'est en particulier intéressée aux impacts, d'abord sur les températures et les précipitations, puis sur la disponibilité en eau et enfin sur la production agricole et l'élevage. Dans la seconde partie de l'analyse des risques climatiques, ces résultats serviront à évaluer les quatre stratégies d'adaptation choisies dans le contexte du secteur agricole du Burkina Faso.

Comme le montre la partie I, les changements climatiques projetés auront de fortes répercussions sur le secteur agricole du Burkina Faso. Une adaptation sera nécessaire afin de préserver les moyens de subsistance et d'assurer la sécurité alimentaire et nutritionnelle. Parmi un vaste éventail de stratégies d'adaptation possibles, quatre stratégies d'adaptation, à savoir l'apport d'informations climatiques, la gestion intégrée de la fertilité des sols, l'irrigation et l'utilisation de variétés de cultures améliorées, ont été soigneusement sélectionnées pour l'analyse, en fonction de l'intérêt d'un grand nombre d'acteurs locaux et de spécialistes ainsi que des priorités définies dans le Plan National d'Adaptation (PNA) du Burkina Faso. Le PNA souligne l'exposition du secteur agricole aux effets de la variabilité et du changement climatique (Gouvernement du Burkina Faso, 2015a). Il estime que le secteur agricole est l'un des quatre secteurs les plus vulnérables du pays, à l'instar des ressources en eau, de l'élevage et de la foresterie qui sont tous reliés entre eux et interdépendants. Ainsi, le PNA du Burkina Faso reconnaît l'importance de l'adaptation au changement climatique et suggère des objectifs d'adaptation à long terme afin d'assurer la sécurité alimentaire et nutritionnelle (Gouvernement du Burkina Faso, 2015a). D'autre part, la stratégie de croissance accélérée et de développement durable (SCADD) du pays considère le secteur agricole comme un domaine prioritaire où les efforts se concentreraient sur le développement de la production de céréales, d'oléagineux, de légumes, de fruits et de coton (Ministère de l'Économie et des Finances, 2012). Toutefois, le PNA indique avec justesse que les objectifs de la SCADD seront difficiles à accomplir si l'on ne s'applique pas à résoudre les enjeux de l'adaptation au changement climatique (Gouvernement du Burkina Faso, 2015a).

Chapitre 5 – Méthodes et données pour l'évaluation de l'adaptation

Les effets du changement climatique sur l'agriculture ayant été établis, les quatre stratégies d'adaptation choisies sont maintenant évaluées suivant différents critères afin de faciliter l'élaboration de politiques et de définir des recommandations pour les investissements nécessaires à l'adaptation sur le terrain. Les stratégies d'adaptation examinées ont été sélectionnées en se basant sur les priorités visées par la politique nationale, sur l'intérêt des parties prenantes et en tenant compte des résultats de l'analyse des impacts climatiques décrits dans la partie I de cette étude. Une analyse multicritère a ensuite été appliquée à l'aide de huit indicateurs d'évaluation. L'ensemble de l'évaluation repose sur trois piliers : une méthode de modélisation, la revue de la littérature et le savoir local recueilli au cours d'ateliers réunissant des acteurs, d'entretiens avec des spécialistes et par la collecte de données auprès des ménages.

Pour assurer la pertinence de nos résultats pour les décideurs ainsi qu'un engagement constant des spécialistes et des acteurs locaux, nous avons collaboré étroitement avec une organisation partenaire régio-

nale tout le long de l'étude : le Centre Ouest Africain de Service Scientifique sur le Changement Climatique et l'Utilisation Adaptée des Terres (WASCAL).

La section suivante décrit plus en détail les méthodes appliquées pour choisir et évaluer les stratégies d'adaptation.

5.1 Sélection des stratégies d'adaptation

La sélection des stratégies d'adaptation constituait la première étape de l'analyse. Afin de renforcer la pertinence de cette étude pour l'élaboration de politiques, le processus de sélection a été soigneusement réalisé pour s'accorder au mieux avec les priorités locales et les intérêts des différents acteurs représentatifs du gouvernement, des universités, du secteur privé et de la société civile. Comme les résultats de cette étude visent à informer la politique d'adaptation, à promouvoir les actions d'adaptation et à soutenir la mise en œuvre des stratégies d'adaptation sur le terrain, l'accent a été mis en particulier sur la participation des acteurs pertinents dans un processus d'apprentissage continu et d'ajustement collaboratif. Cela a été accompli en différentes étapes de participation, notamment grâce à des ateliers pour les acteurs, des consultations de spécialistes, la validation de décisions et des échanges entre acteurs, des études d'experts, des entretiens avec des agriculteurs, ainsi qu'une présentation finale et la validation des résultats.

Durant la première phase de ce processus, un atelier pour les acteurs concernés a été organisé à Ouagadougou en mai 2020. Il a réuni des participants issus du gouvernement, du monde universitaire, de la société civile et des organisations de développement spécialisés dans le changement climatique, l'agriculture, l'élevage, la foresterie, la gestion de l'eau et le développement. En raison de la situation sanitaire et des restrictions de voyages internationales dues à la pandémie de Covid-19, l'atelier organisé par WASCAL s'est tenu sur plusieurs jours, en invitant un nombre limité de participants chaque jour et en imposant des règles d'hygiène et de distanciation strictes. Les scientifiques du PIK rejoignaient virtuellement l'atelier chaque jour pour une durée de deux heures afin de participer aux débats. Malgré ces circonstances difficiles, 46 acteurs au total ont pu participer à l'atelier. Les objectifs principaux consistaient à introduire l'approche de l'étude, à débattre des éléments essentiels de son élaboration et à assurer une compréhension commune de sa pertinence. En outre, l'atelier servait à discuter et à définir quatre stratégies d'adaptation prioritaires à inclure dans l'étude.

Le PNA et les contributions déterminées au niveau national (CDN) du Burkina Faso ont servi de point de départ pour établir une longue liste de stratégies d'adaptation complétées par d'autres stratégies issues de la Stratégie nationale d'apprentissage sur le changement climatique (SNACC 2016-2025) et d'un document général sur les « Bonnes pratiques pour la gestion durable des terres au Burkina Faso » du Ministère de l'Environnement (Gouvernement du Burkina Faso, 2011, 2015a, 2015b, 2016). Les auteurs de cette étude ont effectué une sélection préalable des stratégies d'adaptation en accord avec les risques climatiques identifiés, avec l'objectif de cette analyse (liée à l'agriculture et à l'élevage) et adaptées à l'analyse de nos modèles culturaux et économiques. Cela a permis d'établir une liste de huit stratégies d'adaptation possibles parmi lesquelles les acteurs ont choisi quatre stratégies prioritaires à inclure dans l'analyse (Figure 46).

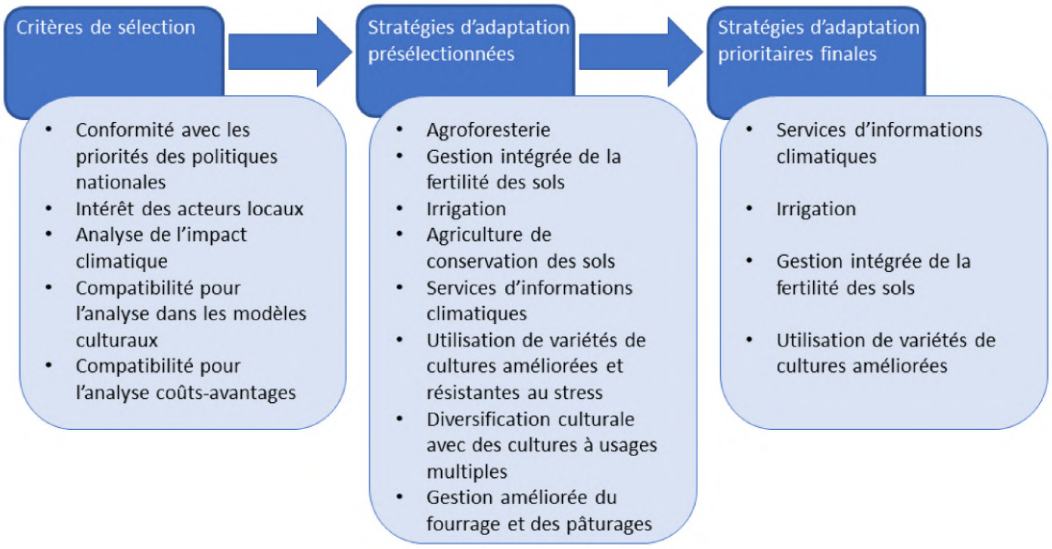


Figure 46 : Aperçu du processus de sélection des stratégies d'adaptation évaluées dans l'étude.

Sur l'ensemble des documents, le terme « stratégie d'adaptation » a été utilisé à différents degrés de spécification. Pour la longue liste de stratégies d'adaptation et le processus de hiérarchisation avec les acteurs, nous avons inclus plusieurs technologies spécifiques sous des termes génériques. Par exemple, le terme « gestion intégrée de la fertilité des sols » a été défini pour englober une technologie spécifique unique ou une combinaison de technologies visant à la conservation des sols, comme l'utilisation de compost, la réalisation de trous de zaï, de demi-lunes, de cordons pierreux ou de bassins d'infiltration (voir chapitre 9 pour des descriptions détaillées). Cela a permis d'assurer que les priorités des acteurs soient d'abord retenues en tenant compte des domaines problématiques d'ordre général et non pas suivant les préférences accordées aux technologies spécifiques disponibles dans les domaines en question. Les acteurs ont été invités à discuter en petits groupes des pratiques actuelles, de l'état des connaissances et du potentiel relatifs à chaque stratégie d'adaptation dans le contexte du Burkina Faso, avant de voter individuellement pour les quatre stratégies considérées comme les plus pertinentes pour l'analyse. Une fois le processus de sélection effectué, les quatre stratégies d'adaptation ont été plus amplement définies avec l'aide de WASCAL en recourant à des interventions concrètes inclues dans les stratégies d'adaptation générales pour réaliser l'analyse modélisée.

Les quatre stratégies d'adaptation finales sont :
- les services d'informations climatiques
- l'irrigation
- la gestion intégrée de la fertilité des sols
- l'utilisation de variétés de cultures améliorées.

Chacun d'elle sera évaluée dans un chapitre particulier (les chapitres 7 à 10 de ce rapport), après la présentation des huit critères d'évaluation effectuée dans la partie suivante.

5.2 Évaluation multicritère des stratégies d'adaptation

Les stratégies d'adaptation sélectionnées ont été soumises à une évaluation approfondie basée sur une approche de méthodes mixtes reposant sur les huit critères suivants :

1. **Potentiel d'atténuation des risques :** Un des critères d'évaluation clé pour les stratégies d'adaptation est leur potentiel à atténuer les risques climatiques, c'est-à-dire à réduire les pertes de rendements à cause du changement climatique. Cette évaluation est basée sur les résultats du modèle cultural.
2. **Gradient de risque (indépendance vis-à-vis des risques et spécificité au risque)** : Les stratégies d'adaptation peuvent se révéler utiles

même en l'absence de changement climatique. L'indépendance vis-à-vis des risques est importante, surtout en cas d'incertitude concernant les futurs impacts liés au changement climatique. Les stratégies spécifiques à un risque ne sont bénéfiques que si les impacts climatiques projetés surviennent vraiment. L'évaluation du gradient de risque est basée sur les résultats du modèle cultural.

3. **Rapport coût-efficacité** : Une analyse coûts-avantages au niveau d'une exploitation agricole fournit des informations sur les coûts et le rapport coût-efficacité des différentes stratégies d'adaptation en fonction du scénario d'émissions.
4. **Potentiel de développement** : Pour ce critère, nous examinons dans quelle mesure différentes stratégies d'adaptation peuvent être appliquées au Burkina Faso, en fonction de la stratégie actuelle adoptée et de l'opinion des spécialistes.
5. **Avantages conjoints potentiels** : De nombreuses stratégies d'adaptation ne permettent pas seulement de faire face aux risques climatiques, elles présentent d'autres avantages potentiels comme la réduction d'inégalités socio-économiques ou sexospécifiques, des avantages environnementaux ou la création de nouvelles opportunités commerciales.
6. **Répercussions inopportunes potentielles** : Certaines stratégies d'adaptation peuvent également entraîner des effets non souhaités sur la société, le climat et l'environnement qu'il faut prendre en compte pour réaliser une évaluation approfondie et qui sont discutés dans le cadre de cet indicateur.
7. **Obstacles à la mise en œuvre** : Les obstacles potentiels à l'adoption d'une stratégie d'adaptation et les solutions possibles sont au centre de la réflexion.
8. **Besoins en matière de soutien institutionnel** : Si toutes les stratégies d'adaptation profitent d'un environnement favorable généré par un soutien institutionnel, la quantité de soutien requis diffère. Il est possible de faire une distinction entre les stratégies nécessitant généralement un fort soutien institutionnel et celles pouvant être initiées par les agriculteurs eux-mêmes (menées par les institutions ou autonomes).

Les critères 1 à 3 sont évalués à partir de nos modèles culturaux et économiques, tandis que les critères 4 à 8 sont évalués à partir de la revue de la littérature, des consultations d'experts et des entretiens avec les agriculteurs. Dans les sous-chapitres suivants, nous décrirons la méthode appliquée pour les critères 1 et 2 en utilisant des modèles culturaux. Ensuite suivra une description de la méthode pour le critère 3 en recourant à une analyse coûts-avantages.

5.3 Évaluation biophysique du potentiel d'atténuation des risques

Nous avons eu recours au modèle cultural DSSAT, basé sur les processus, tel qu'il a été utilisé au chapitre 3 pour quantifier le potentiel d'atténuation des risques des stratégies d'adaptation dans le cadre d'une étude de cas sur le sorgho. Dans le modèle cultural, il est possible de réaliser des simulations permettant de prédire et de comprendre les répercussions de différentes pratiques agricoles avec assez de certitude pour guider l'élaboration de politiques agricoles. Nous avons modifié des paramètres essentiels du modèle par rapport aux réglages de base afin de simuler l'effet sur les rendements entraîné par la stratégie d'adaptation appliquée dans le contexte du climat actuel et à venir. Afin d'évaluer le potentiel d'atténuation des risques de la stratégie d'adaptation, nous évaluons l'impact sur les rendements produit par la stratégie d'adaptation dans les conditions climatiques actuelles et projetées à l'avenir. Pour obtenir un potentiel d'atténuation des risques positif, la stratégie d'adaptation doit produire un impact de rendement positif net dans les conditions climatiques futures par rapport aux conditions climatiques actuelles.

Comme une évaluation basée sur un modèle cultural n'est pas possible pour toutes les stratégies d'adaptation et les cultures, nous avons complété cette analyse à l'aide des résultats d'autres documentations.

5.4 Analyse coûts-avantages

Une analyse coûts-avantages (ACA) a été menée afin d'évaluer les coûts et avantages économiques des stratégies d'adaptation sélectionnées au niveau de l'exploitation agricole. Une ACA conduite dans un contexte d'adaptation étudie les coûts et bénéfices attendus lors de la mise en œuvre d'une stratégie d'adaptation spécifique et permet de la comparer aux coûts et bénéfices d'un système de production habituel ou à d'autres stratégies d'adaptation. L'ACA est effectuée en traduisant en valeur monétaire tous les coûts et avantages associés à la mise en œuvre d'une stratégie d'adaptation spécifique sur une certaine durée. Les coûts d'une stratégie d'adaptation au niveau d'une exploitation agricole comprendraient les coûts liés aux intrants agricoles, au travail, aux outils et aux machines, tandis que les avantages issus de la stratégie d'adaptation au niveau de l'exploitation concernent essentiellement une augmentation des rendements ou un revenu complémentaire provenant d'une production diversifiée. Dans le cadre d'une ACA, les coûts et les avantages des stratégies d'adaptation liés à différentes périodes sont actualisés à un taux d'actualisation approprié afin de tenir compte de la valeur temporelle de l'argent (Boardman et al., 2011). Cela est nécessaire, car il convient d'estimer les avantages présents (et les coûts) plus que les avantages dans l'avenir (lointain), cet aspect étant intégré dans les calculs grâce à un taux d'actualisation.

Les indicateurs économiques tels que la valeur actuelle nette (VAN), le rapport avantages-coûts (A/C) et le taux de rendement interne (TRI) servent habituellement à la hiérarchisation ou la priorisation dans l'ACA (Quillérou, 2019). La VAN représente le bénéfice net actualisé. Une stratégie d'adaptation dont la VAN est positive est considérée comme économiquement viable (Boardman et al., 2011). Si on compare différents scénarios possibles, la stratégie d'adaptation présentant la plus forte VAN devrait être privilégiée pour sa valeur économique. Le rapport avantages-coûts (A/C) représente le ratio entre les avantages et les coûts actualisés d'une stratégie d'adaptation. Si la valeur du rapport A/C de la stratégie d'adaptation est supérieure à 1, la stratégie est considérée comme économiquement rentable. Toutefois, si l'on compare différents scénarios, la stratégie d'adaptation présentant le rapport A/C le plus élevé n'est pas nécessairement celle ayant la VAN la plus élevée aussi si les stratégies d'adaptation comparées ont un autre barème (Boardman et al., 2011). De ce fait, il est important d'examiner à la fois la VAN et l'A/C. Le TRI, par contre, indique le taux d'actualisation pour lequel la VAN est égale à 0, et si le TRI est supérieur au taux d'actualisation, la stratégie d'adaptation est considérée comme économiquement rentable (Boardman et al., 2011).

Une augmentation des rendements résultant de la mise en œuvre d'une stratégie d'adaptation ne signifie pas nécessairement une augmentation des bénéfices économiques pour le ménage de l'exploitation. De ce fait, une ACA est essentielle pour l'évaluation des stratégies d'adaptation en matière d'incidence sur le bien-être. La rentabilité économique dépend de la productivité du rendement et des coûts de production spécifiques à la stratégie d'adaptation. Néanmoins, étant donné qu'une ACA prend souvent la rentabilité économique comme unique critère de décision et, dans notre cas, seulement au niveau de l'exploitation agricole, une ACA seule risque de ne pas suffire pour évaluer les autres coûts et avantages environnementaux et sociaux d'une stratégie d'adaptation. Cela est particulièrement vrai pour les coûts et bénéfices difficiles à quantifier en termes monétaires (FAO, 2018b). En outre, les coûts et avantages environnementaux et sociaux des stratégies d'adaptation sont souvent vécus en dehors de l'exploitation. Il est donc important de recourir à des méthodes d'évaluations complémentaires souples évaluant les stratégies d'adaptation au-delà de leur valeur économique, comme cela est effectué dans la présente étude pour chaque stratégie d'adaptation.

L'ACA de chaque stratégie d'adaptation repose sur des études de cas choisies, réalisées dans divers villages du Burkina Faso. Pour chaque stratégie, nous avons réuni les données détaillées de coûts et de production de 10 agriculteurs qui mettaient en œuvre la technologie, ainsi que celles de 10 autres agriculteurs témoins qui n'y recouraient pas. Les niveaux de rendements locaux ont servi de référentiel pour le scénario ne prévoyant pas d'adaptation. Les futures variations de rendements dues aux impacts climatiques en vertu de différents scénarios d'émissions sont calculées à partir des résultats de notre modèle cultural basé sur le sorgho. En ce qui concerne les projections pour le maïs, en raison d'un manque de données pour le Burkina Faso, nous avons recours aux résultats du modèle cultural en provenance de districts choisis au nord-ouest du Ghana, où les conditions de production et du climat sont très comparables aux études de cas des districts du Burkina Faso. Nous avons mené les études de cas d'ACA suivantes :

1. Irrigation complémentaire dans la culture pluviale du maïs
2. Mise en œuvre des technologies de gestion des sols et de l'eau dans la culture pluviale du sorgho
3. Utilisation de variétés améliorées dans la culture pluviale du sorgho
4. Utilisation de services d'informations climatiques dans la culture pluviale du maïs

Chapitre 6 – Capacité d'adaptation et facteurs pertinents pour la planification de l'adaptation

Avant d'analyser de manière détaillée le potentiel des quatre stratégies d'adaptation identifiées, ce chapitre présente divers aspects du concept de capacité d'adaptation ainsi que les facteurs à considérer pour la planification de l'adaptation, notamment l'accès aux ressources, le contexte local et la diversité, les connaissances et l'information, la gouvernance, les institutions et les réseaux. En outre, le thème des sexospécificités et leurs vulnérabilités différentielles associées ainsi que leurs conséquences sur la capacité d'adaptation seront discutés.

6.1 Adaptation et capacité d'adaptation

Moser et Ekstrom définissent l'adaptation dans les termes suivants : « L'adaptation implique des modifications au niveau des systèmes socio-écologiques en réponse aux impacts réels et escomptés du changement climatique dans le contexte de changements non climatiques interdépendants. Les stratégies d'adaptation et les actions vont de la résolution de problèmes à court terme à des transformations plus profondes à long terme ; elles visent à accomplir davantage que les objectifs du changement climatique seuls, et peuvent ou non parvenir à modérer les maux ou à exploiter les opportunités bénéfiques » (Moser et Ekstrom, 2010). De la même manière, Adger et al. (2005) déclarent que l'adaptation au changement climatique peut être motivée par de nombreux facteurs, tels que le bien-être économique et la sécurité.

Le succès de l'adaptation repose non seulement sur le choix de stratégies d'adaptation convenables, mais aussi sur l'augmentation de la capacité d'adaptation des systèmes humains et naturels, car c'est ce qui assurera le potentiel de mise en œuvre durable de stratégies d'adaptation. Le GIEC définit la capacité d'adaptation comme la « faculté d'ajustement des systèmes, des institutions, des êtres humains et d'autres organismes leur permettant de se prémunir contre d'éventuels dommages, de tirer parti des opportunités ou de réagir aux conséquences. » (GIEC, 2014). L'origine du terme « capacité d'adaptation » provient de la sociologie et de la gestion des organisations et des entreprises, mais il s'est intégré dans le domaine de la réponse au changement climatique. Comme le montre la définition ci-dessus, il existe différents types de capacité d'adaptation. L'adaptation peut être mise en œuvre en préparation ou en réaction directe aux impacts générés par le changement climatique (Adger et al., 2005 ; Engle, 2011). L'adaptation réactive renvoie à la capacité de s'adapter à un environnement en train de changer, c'est-à-dire de réagir à un choc survenu dans le passé ; l'adaptation anticipée signifie la capacité d'anticiper les chocs futurs, basée sur « la capacité de comprendre comment l'avenir pourrait être [et] influencée par la capacité d'apprentissage à partir des expériences passées » (Engle, 2011). La présente analyse des risques climatiques est basée sur le principe de l'adaptation anticipée, c'est-à-dire que le climat à venir est modélisé à partir des données historiques et, ainsi, des stratégies d'adaptation adéquates sont choisies pour la planification anticipée.

6.2 Facteurs à la base de la planification de l'adaptation

Différents facteurs doivent être pris en compte afin de planifier une adaptation au changement climatique adéquate. L'adaptation doit être considérée comme un processus social dynamique. D'après Basson et al., le leadership, la structure organisationnelle, la collaboration, le réseautage, l'engagement des parties prenantes et l'accès à l'information sont les facteurs permettant au processus d'adaptation de réussir (Basson et al., 2020). Aussi, Tompkins considère les réseaux de soutien, une gouvernance forte et la volonté d'apprendre comme les moteurs de la réussite de l'adaptation au changement climatique (Tompkins, 2005). Les processus d'adaptation dépendent de la capacité de chaque acteur à exercer ses choix et, plus largement, du capital social, c'est-à-dire, de l'interdépendance des différents acteurs par leurs relations entre eux, leurs relations avec les institutions dans lesquels ils se trouvent et la base de ressources dont ils dépendent (Adger, 2003 ; Ribot et Peluso, 2003). Dans une étude des risques climatiques réalisée pour l'Éthiopie, (Murken et al., 2020) quatre facteurs ont été identifiés : l'accès aux ressources, la diversité et la flexibilité, l'apprentissage et le savoir, et la gouvernance et les institutions. Dans la section ci-après, ces quatre facteurs seront plus amplement adaptés et discutés par rapport au contexte de l'adaptation au changement climatique au Burkina Faso.

6.2.1 Accès aux ressources

Plusieurs études mentionnent le manque d'accès aux ressources comme l'obstacle principal à l'adaptation au changement climatique (Acquah, 2011 ; Moser et Ekstrom, 2010 ; Shackleton et al., 2015 ; Sorgho et al., 2020). Les ressources sont importantes à toutes les étapes du processus d'adaptation, et comprennent les ressources naturelles, financières et techniques, l'information et l'expertise concernant le changement climatique et les alternatives d'adaptation, le travail, les transports et le temps. Dans une étude menée dans deux communautés agricoles au nord et au sud du Burkina Faso, 78 % des agriculteurs ont déclaré que le coût élevé des intrants (par ex. semences améliorées, engrais ou pesticides) est l'obstacle principal à l'adoption de pratiques agricoles intelligentes sur le plan climatique. 55 % des agriculteurs ont dénoncé le manque de ressources financières, dont le manque de capitaux et d'accès aux crédits, comme un autre obstacle (Yaméogo et al., 2017). D'après Moser et Ekstrom (2010), des ressources inadéquates constituent souvent la première réponse à la question de savoir pourquoi les professionnels n'ont pas encore commencé à planifier l'adaptation au changement climatique. En outre, Murken et al. (2020) ainsi que Shackleton et al. (2015) signalent que les pénuries en eau sont une entrave fréquente à l'adoption de stratégies d'adaptation, comme l'irrigation, dans l'agriculture. Il convient de noter que la capacité à bénéficier des différentes ressources nécessaires est modérée par les obstacles établis par les cadres politiques, économiques et culturels dans lesquels les agriculteurs cherchent à accéder à ces ressources. Parmi les facteurs constitutifs se trouvent des « mécanismes d'accès structurels et relationnels », dont l'accès à l'éducation et au savoir, l'accès aux technologies, aux marchés, au travail et aux opportunités d'emplois, aux autorités et l'accès par le biais de négociations avec d'autres relations sociales (Ribot et Peluso, 2003).

6.2.2 Contexte local et diversité

La conception et la mise en œuvre de stratégies d'adaptation peinent souvent à reconnaître les contextes locaux de manière adéquate et leur hétérogénéité inhérente. Les contextes locaux sont façonnés par la culture (les valeurs, les normes, les croyances, etc.), les niveaux de gouvernance et les systèmes politiques différents, les écosystèmes et les réseaux sociaux. Ces facteurs, qui interagissent entre eux, sont essentiels pour la planification de l'adaptation au changement climatique (Shackleton et al., 2015). Ils peuvent servir soit de moteurs soit de barrières à la réussite des stratégies d'adaptation. Au nord du Burkina Faso, différents groupes ethniques et, en conséquence, différentes valeurs culturelles, ont permis à un groupe, mais en revanche en ont empêché un autre, de diversifier ses stratégies de subsistance, par exemple en tirant profit des projets de développement, du jardinage et en engageant les femmes dans les activités économiques (Nielsen et Reenberg, 2010). Différents facteurs, comme le sexe, l'âge, la catégorie sociale, la religion et l'appartenance ethnique

conditionnent les capacités d'adaptation des individus (Biesbroek et al., 2013 ; Shackleton et al., 2015). Nielsen et Reenberg (2010) appellent ces facteurs des « sensibilités variées » (varied sensitivities) : des groupes différents éprouvent les risques climatiques, leurs impacts et les opportunités d'adaptation différemment. Les populations pauvres et marginalisées des pays à revenu faible sont plus à mêmes de rencontrer des obstacles à l'adaptation tels que le manque d'accès aux crédits, au pouvoir de décision, aux informations et aux ressources naturelles comme les terres ou les forêts (Engle, 2011 ; Shackleton et al., 2015). En outre, certains groupes, en particulier les femmes, auront plus de difficultés à émigrer (Shackleton et al., 2015). « Une mise en lumière des dimensions entrecroisées des inégalités permettrait d'identifier les facteurs complexes qui empêchent certains groupes de personnes désavantagées de s'adapter au changement climatique tandis que d'autres auraient plus de chance ou en tireraient profit » (Shackleton et al., 2015). En outre, même si des stratégies d'adaptation sont mises en place, leur simple existence ne garantit pas une égalité d'accès : d'après Ludi et al. (2012), l'établissement d'infrastructures d'irrigation risque de maintenir l'exclusion sociale, celle des femmes en particulier, à qui il manquerait l'argent pour verser des pots-de-vin ou le statut social nécessaire pour les revendiquer.

Si, d'un point de vue extérieur, le changement climatique semble être un problème urgent dans les pays du monde entier, même ceux du Sahel, plusieurs scientifiques précisent qu'il existe d'autres problèmes, peut-être même encore plus urgents. (Brockhaus et al., 2012 ; Shackleton et al., 2015). D'après Brockhaus et al. (2012), c'est également la situation au Burkina Faso, où différents acteurs au niveau communautaire ou régional ont mentionné le changement climatique comme étant un facteur de tension parmi bien d'autres. D'autres problèmes sont liés, par exemple, à la croissance démographique, aux conflits ethniques et aux risques sanitaires (SIDA, par ex.) (Shackleton et al., 2015). En effet, dans l'analyse des risques climatiques menée en Éthiopie, les informateurs ont désigné la croissance démographique comme un facteur majeur à l'origine de tensions, entraînant la réduction de la taille des terres agricoles et leur fragmentation (Murken et al., 2020). Il s'agit souvent de facteurs de tensions plus immédiats qui sont donc traités en priorité.

6.2.3 Savoir et informations

D'après Shackleton et al. (2015), l'incertitude et la variabilité climatiques, le manque d'informations sur les événements météorologiques extrêmes et une capacité de prédiction insuffisante à l'échelle locale représentent des obstacles fréquents à l'adaptation au changement climatique. De ce fait, les connaissances et les informations sur les risques climatiques sont essentielles pour concevoir et mettre en œuvre des stratégies d'adaptation adéquates. Les systèmes de valeurs et de croyances au niveau local définissent la façon dont les personnes comprennent et interprètent les risques climatiques (Moser et Ekstrom, 2010). Les expériences réelles avec les facteurs de tensions climatiques et les réactions à ces facteurs jouent également un rôle important : d'une part, vivre les facteurs de tensions liés au climat comme les sécheresses peuvent servir d'éléments déclencheurs et motiver les personnes à investir dans des stratégies d'adaptation (Shackleton et al., 2015). Cela s'applique particulièrement lorsque les rendements sont touchés de manière négative, car, selon Akponikpè et al. (2010), les agriculteurs ne perçoivent pas le climat d'un point de vue météorologique mais le considèrent plutôt par rapport à leurs activités agricoles. D'autre part, les phénomènes comme la variabilité climatique font partie intégrante de la vie de nombreuses personnes au Sahel. C'est la raison pour laquelle il se peut qu'ils les considèrent comme des phénomènes naturels, incontrôlables par l'homme, et qu'ainsi ils sous-estiment la gravité du changement climatique (Shackleton et al., 2015). De ce fait, une communication efficace sur les risques climatiques est essentielle pour accroître la prise de conscience et la compréhension. Selon une étude menée dans deux villages au nord et au sud du Burkina Faso, l'accès limité aux connaissances et le manque d'accès aux informations ont représenté des obstacles majeurs à l'adoption de pratiques agricoles intelligentes sur le plan climatique (Yaméogo et al., 2017). Réciproquement, Mubaya et al. (2012) ont trouvé que les agriculteurs ayant accès aux informations météorologiques étaient plus à mêmes d'être conscients des changements et capables de s'y adapter en conséquence.

Un des problèmes sous-jacents majeurs concernant l'information climatique, c'est qu'elle repose sur la connaissance d'impacts à long terme, et que « ces connaissances sont remplies d'incertitudes » (Vink et al., 2013). En outre, le caractère à long terme de l'adaptation au changement climatique nécessite plusieurs cycles politiques avant que les

effets des stratégies d'adaptation puissent être évalués. Cette dimension temporelle et l'incertitude (perçue) qui y est associée compliquent la prise de décision dans la planification de l'adaptation et l'initiative d'en faire une priorité (Hovi et al., 2009 ; Lazarus, 2009).

6.2.4 Gouvernance, institutions et réseaux

La gouvernance, les institutions et les réseaux sont des éléments cruciaux pour créer un contexte favorable à l'adaptation au changement climatique (Adger et al., 2005 ; Biermann et al., 2010 ; Brockhaus et al., 2012 ; Moser et Ekstrom, 2010). Ces éléments impliquent des acteurs, des niveaux, des échelles et des secteurs divers qui interagissent tous entre eux.

La conception et la mise en œuvre de stratégies d'adaptation sont conditionnées par les politiques, les lois, les règles, les réglementations, les programmes et les mandats existants (Moser et Ekstrom, 2010). Ces cadres institutionnels, déclarent Brockhaus et al. (2012), sont nécessaires pour passer d'une réponse réactive aux impacts climatiques, souvent réalisée au niveau local, à une action climatique durable et systématique. La planification de l'adaptation à grande échelle, comme au niveau national ou international, doit également tenir compte des besoins d'adaptation spécifiques au lieu concerné et des capacités propres aux communautés locales : « Si les institutions opérant à plus grande échelle sont capables de créer un environnement propice à l'adaptation au niveau national, leur degré d'engagement a tendance à laisser de vastes lacunes en matière de réactions d'adaptation au niveau local, en ignorant des acteurs importants dans la compréhension du rapport entre les tendances climatiques et les conséquences de l'adaptation à l'échelle locale » (Amaru et Chhetri, 2013).

Ainsi, Amaru et Chhetri (2013), estiment que l'adaptation au changement climatique devrait mettre en lumière et engager activement un grand nombre d'acteurs, dont les agriculteurs, les organisations qui les soutiennent, les communautés, les institutions publiques, la société civile (ONG, par ex.), les agences internationales et le secteur privé. Ces acteurs, qui dépendent les uns des autres, représentent des intérêts, des responsabilités et des cadrages du problème de différentes sortes qui peuvent, dans certains cas, entrer en conflit les uns avec les autres (Rodima-Taylor, 2012 ; Vink et al., 2013). En même temps, leurs contributions, constituées de leurs enseignements, de leurs connaissances et de leurs ressources, peuvent grandement faciliter la planification de l'adaptation. Adger et al. (2005) affirment que l'adaptation au changement climatique implique des « décisions en cascade » dans cet environnement d'acteurs. S'il est important de réunir différents acteurs, il est aussi important d'intégrer l'adaptation au changement climatique à différents secteurs. Brockhaus et al. (2012) ont mené plusieurs études à différents niveaux au Burkina Faso et au Mali et ont constaté une forte conception sectorielle parmi les acteurs gouvernementaux qui ne considéraient pas l'adaptation au changement climatique comme une activité intersectorielle, percevant les secteurs comme l'eau ou la foresterie indépendamment les uns des autres.

Enfin, outre la gouvernance et les cadres institutionnels, il est important d'inclure les communautés locales dans la planification de l'adaptation pour établir l'actionnariat et de tenir compte des réseaux informels organisés autour des liens de parenté et d'amitié, des institutions coutumières, comme les pratiques de gestion des ressources acceptées au niveau local, les normes et les tabous (Amaru et Chhetri, 2013 ; Yaméogo et al., 2018). Les réseaux informels peuvent assurer une aide plus rapide et plus facilement accessible en matière d'adaptation au changement climatique, par exemple grâce au partage des informations et des connaissances. Ces réseaux peuvent également être sources de ressources financières, de recours au crédit, soit de façon informelle par le biais de parents ou d'amis, soit plus formelle par le biais des associations d'agriculteurs (Yaméogo et al., 2018). La connectivité sociale peut également avoir des répercussions négatives : s'ils sont exclusifs et rigides, les réseaux sociaux peuvent renforcer les structures de pouvoir existantes et marginaliser davantage les groupes déjà défavorisés. Ils peuvent aussi représenter un obstacle à l'apprentissage si la sagesse traditionnelle n'est jamais contestée (Newman et Dale, 2005 ; Wolf et al., 2010).

6.3 Les sexospécificités, la vulnérabilité et l'adaptation au changement climatique au Burkina Faso

Un nombre croissant d'études reconnaît le fait que différents groupes sociaux présentent une vulnérabilité différente au changement climatique et des capacités d'adaptation à des niveaux différents (Alston, 2013 ; Arora-Jonsson, 2011 ; Perez et al., 2015 ; Rao et al., 2019). Ces différents groupes sociaux disposent d'atouts et de compétences variés, endossent diverses responsabilités et rôles au sein de leur famille et de leur communauté (Carr et Thompson, 2014). En même temps, ces rôles divers et ces connaissances spécifiques, notamment en matière de pratiques agricoles, font d'eux de puissants catalyseurs de changement face aux enjeux du changement climatique, ce qui met en lumière l'importance de reconnaître les différences sexospécifiques et les groupes marginalisés dans la prise de décision. Même si les sexospécificités sont un facteur parmi d'autres, elles jouent un rôle déterminant en ce qui concerne la vulnérabilité au changement climatique et la capacité d'adaptation (Ahmed et al., 2016). « Dans le moment vulnérable qui suit les catastrophes, on constate que les inégalités sexospécifiques sont renforcées et légitimées d'une manière qui réduit la capacité d'adaptation des femmes », indique Alston (2013).

6.3.1 Les sexospécificités dans les politiques et les plans nationaux

Dans le cadre de ses CDN, le Burkina Faso mentionne à peine le sujet des sexospécificités et de la situation des femmes face au changement climatique (Gouvernement du Burkina Faso, 2015b). Le PNA, par contre, aborde les sexospécificités plus systématiquement, car il reconnaît un biais masculin dans la planification de l'adaptation et insiste sur le besoin d'y intégrer les femmes (Gouvernement du Burkina Faso, 2015a). Il met également la question du genre en lumière en l'insérant dans les six principes directeurs : la participation, l'intervention cohérente, l'autonomisation des acteurs, la mise en œuvre équitable et le principe de partenariat (Gouvernement du Burkina Faso, 2015a). De façon plus spécifique, le PNA désigne l'éducation et la formation sur les risques climatiques, l'accès aux équipements techniques et l'accès au processus de prise de décision comme des domaines prioritaires pour les femmes (Gouvernement du Burkina Faso, 2015a). En outre, la stratégie de croissance accélérée et de développement durable (SCADD) aborde les inégalités sexospécifiques, en particulier dans les zones rurales, et revendique le besoin d'un meilleur accès aux ressources, aux services sociaux de base et aux groupes de décision pour les femmes (Ministère de l'Économie et des Finances, 2012b). Comme le PNA, elle fait écho à la politique nationale en faveur de l'égalité des sexes adoptée en 2009 et destinée à encourager le développement équitable des personnes, hommes et femmes, et à assurer l'accès égal aux ressources et leur contrôle, aux processus de décisions et aux droits fondamentaux (Ministère de la Promotion de la Femme, 2009).

6.3.2 Facteurs déterminants à la vulnérabilité au changement climatique liée au genre

Biens et ressources

Les femmes ont tendance à moins accéder aux revenus et aux facteurs de production comme les semences, les engrais ou les charrues, et à en moins obtenir le contrôle (Ahmed et al., 2016 ; Alston, 2013 ; Kakota et al., 2011 ; Tall et al., 2014). Kieran et al. (2012) ont mené des entretiens à Didyr et à Doudoulcy, deux communautés rurales au centre du Burkina Faso, où la majorité des femmes ont signalé qu'au sein des couples, la prise de décision en commun était rare, les hommes prenant la majorité des décisions. Dickin et al. (2020) confirment ce déséquilibre dans leur étude sur la sécurité de l'eau dans les ménages dans la région au centre est du Burkina Faso : les femmes contrôlent très peu les revenus et les ressources financières comme l'argent liquide pour payer les frais de l'eau ou les vélos/motocyclettes permettant son transport. Un rapport de la FAO estime que si les femmes avaient le même accès aux ressources que leurs homologues masculins, elles pourraient accroître le rendement de leurs récoltes dans leurs fermes de 20 à 30 % (FAO, 2011).

Insécurité terrienne et foncière

En raison de l'insécurité foncière et des coutumes sociales, les femmes sont rarement propriétaires de terres (Kieran et al., 2012). Les participants d'une étude menée dans plusieurs pays, dont le Burkina Faso, révèlent qu'en réalité, seuls les hommes possèdent et héritent de terres, tandis que les femmes cultivent les terres qui leur sont remises par leur mari ou qu'elles louent à la communauté (Perez et al., 2015 ; Rigg et al., 2016). Même les femmes musulmanes qui ont normalement le droit d'hériter de la moitié des terres de leur mari transfèrent dans la plupart des cas leur legs à leurs frères (FAO, 2007). Cela rejoint les tendances générales identifiées en Afrique subsaharienne qui montrent qu'environ 60 % des personnes travaillant dans l'agriculture ou des activités reliées sont des femmes, alors qu'elles ne représentent que 14 % des propriétaires (ONU Femmes, 2019). De ce fait, l'accès restreint aux terres et à leur contrôle empêche les femmes de réaliser des investissements à long terme ou de mettre en œuvre des stratégies d'adaptation (Bryan et al., 2018 ; Jost et al., 2016).

Connaissances sur le changement climatique

Les connaissances sur le changement climatique continuent d'être inégalement réparties entre les hommes et les femmes. Les femmes rencontrent également des obstacles pour accéder aux informations climatiques, en raison de leur alphabétisation insuffisante, ou parce qu'elles n'ont pas de radio ou de téléphone mobile, ce qui entraîne des perceptions des risques climatiques et des décisions d'adaptation différentes en fonction du sexe (Bryan et al., 2018 ; Rigg et al., 2016 ; Tall et al., 2014). Les besoins en matière d'informations climatiques peuvent aussi dépendre du sexe : dans une communauté rurale au Sénégal, les agricultrices avaient besoin en particulier d'informations concernant les précipitations parce que les hommes procédaient d'abord à la mise en culture de leurs parcelles, ne venant qu'assister les femmes par la suite. De ce fait, celles-ci avaient en particulier besoin d'en savoir plus sur les vagues de sécheresse potentielles et la fin de la saison des pluies (Tall et al., 2014).

Coutumes sociales et responsabilités ménagères

En raison des coutumes sociales, les modèles de responsabilité et de travaux associés au ménage reposent fortement sur le genre, les femmes endossant souvent un rôle de triple dimension dans les activités productives, reproductives et de gestion communautaire (Moser, 1993 ; Rigg et al., 2016). Dans l'étude réalisée par Kieran et al. (2012), les femmes ont indiqué que les hommes travaillaient 14 heures par jour, et qu'elles travaillaient 11 heures par jour, sans toutefois inclure les heures passées aux tâches ménagères comme la collecte du bois ou de l'eau, or il s'agit de tâches presque exclusivement réservées aux femmes (Dickin et al., 2020 ; Rigg et al., 2016). Une étude de Dickin et al. (2020) a montré qu'aller chercher de l'eau était une corvée principalement exécutée par des femmes adultes (92 %). Si on ajoute ce labeur aux autres responsabilités ménagères et au travail dans les champs, y compris le temps de trajet pour se rendre aux puits, on constate que les femmes sont chargées de multiples fardeaux (Dickin et al., 2020). C'est en particulier le cas durant la saison sèche, lorsque le temps de trajet pour se rendre aux puits s'accroît, et lorsque beaucoup d'hommes émigrent pour travailler dans des plus grandes villes, dans des régions où se trouvent des mines d'or ou dans des pays voisins comme la Côte d'Ivoire (Dabiré et al., 2018 ; Kieran et al., 2012). Tous ces facteurs limitent la mobilité des femmes et leurs sources de revenus. De ce fait, les moyens de subsistance des femmes dépendent beaucoup de l'agriculture et de l'élevage qui sont de plus en plus fragilisés par les impacts climatiques (Alston, 2013 ; Belcore et al., 2020).

6.3.3 Un point de vue intersectoriel

Ce n'est pas seulement le problème des sexospécificités qui détermine la vulnérabilité au changement climatique. Au lieu de se concentrer exclusivement sur la question du genre, Ahmed et al. (2016) adoptent un point de vue plus large et parlent d'un « ensemble de vulnérabilités où divers critères sociaux, dont le handicap, la classe sociale, l'appartenance ethnique, et les systèmes de valeurs, produisent des conditions hétérogènes » pour l'adaptation au changement climatique. D'autres facteurs, comme l'état matrimonial (marié-e, divorcé-e, veuf ou veuve), une famille qui s'agrandit ou une santé fragile, peuvent également aggraver la vulnérabilité des femmes (Nation, 2010 ; Nyantakyi-Frimpong, 2019 ; Van Aelst et Holvoet, 2016). Nyantakyi-Frimpong (2019) a conduit des recherches sur la vulnérabilité des petits exploitants par rapport aux événements climatiques extrêmes

au nord du Ghana. Son étude a mis en lumière l'importance d'une perspective intersectorielle tenant compte de différents facteurs sociaux notamment, sur l'exemple d'une agricultrice qui n'était pas « juste une femme, mais séropositive, pauvre et veuve, sans époux pour gérer le problème quotidien au village consistant à sécuriser une charrue » (Nyantakyi-Frimpong, 2019).

Si l'on trouve beaucoup de documentation sur la vulnérabilité liée au genre, un nombre croissant d'études souligne l'action des femmes dans l'adaptation au changement climatique (Aguilar, 2013; Alston, 2013 ; Bee et al., 2013 ; Rao et al., 2019). S'il est vrai que les femmes ont un accès limité aux capitaux, aux terres ou aux informations, elles possèdent des connaissances cruciales sur l'agriculture, la pêche, l'eau et l'énergie, qui sont utiles à la conception de politiques d'adaptation au changement climatique et à l'instauration de stratégies d'adaptation (Alston, 2013). Souvent principales gestionnaires des ressources naturelles, les femmes ont tendance à être plus proches de la nature, ce qui est en partie lié à leur plus grande dépendance vis-à-vis des ressources naturelles, et de ce fait, elles peuvent être plus conscientes de l'environnement (Arora-Jonsson, 2011 ; Figueiredo et Perkins, 2013). Ainsi, la participation et l'influence à parts égales des femmes et des hommes dans les prises de décision liées à l'adaptation, avec des représentants de groupes marginalisés, permettent le renforcement des capacités et créent des conditions propices à une mise en œuvre inclusive.

SAMSUNG

Chapitre 7 – Services d'informations climatiques

7.1 Contexte et description de la stratégie d'adaptation

L'échange d'informations et de savoirs est primordial pour gérer les risques climatiques et atténuer les impacts induits par le climat sur la production agricole, les ressources en eau et la sécurité alimentaire. Les services d'informations climatiques (SIC) permettent de combler les lacunes en matière de connaissances et de savoirs. Pour Tall (2013), les SIC sont une aide à la prise de décision, au moment opportun, basée sur les informations climatiques. Ils permettent aux individus et aux organisations de perfectionner leur planification exante, leurs politiques et leur prise de décision au niveau pratique. Les SIC comprennent donc la production, la traduction, la diffusion et l'utilisation d'informations climatiques pour différents publics cibles, généralement issus de secteurs sensibles au changement climatique comme l'agriculture, l'eau, la santé ou la réduction des risques liés aux catastrophes (Carr et al., 2020 ; Tall, 2013). Selon Zongo et al. (2015), les SIC fournissent habituellement des estimations sur les dates de début et de fin de la saison des pluies, la durée de la saison des pluies, le nombre de jours de précipitations, les précipitations cumulatives annuelles et la durée moyenne et maximale des vagues de sécheresse au cours de la saison des pluies. Ainsi, les SIC facilitent les décisions concernant les dates de semis, les variétés de cultures, l'épandage des engrais et l'utilisation d'autres facteurs de production (Klopper et al., 2006). Les SIC sont souvent créés par les agences météorologiques nationales, les instituts de recherche et d'autres organisations intermédiaires comme les conseils environnementaux et, de plus en plus, par le secteur privé (Singh et al., 2018). D'après une étude réalisée par Zongo et al. (2015), 93 % des agriculteurs interviewés ont fait part de leur intérêt pour les informations climatiques, notamment en ce qui concerne le début de la saison des pluies.

La majeure partie des informations météorologiques et climatiques pour l'Afrique provient d'ensembles de données globales tels que le Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) Phase 5 ou d'autres projets présentant une ample couverture géographique (Singh et al., 2018). Outre ces données globales, les agences météorologiques nationales sont chargées de la collecte des données observationnelles et de la diffusion de prévisions météorologiques et climatiques à différents acteurs, notamment aux communautés, aux gouvernements et au secteur privé (ibid). En Afrique occidentale, le Centre régional AGRHYMET, une institution du Comité Inter-États de Lutte contre la Sécheresse au Sahel (CILSS), surveille et établit des prévisions sur les conditions météorologiques, hydrologiques, agricoles et pastorales (Traore et al., 2014).

Au Burkina Faso, diverses institutions fournissent des informations météorologiques et assurent des SIC. L'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM), sous l'égide du Ministère des transports, de la mobilité urbaine et de la sécurité routière, est chargée de fournir des informations climatiques et météorologiques aux usagers publics et privés de différents secteurs (Banque mondiale, 2017). Cependant, selon un rapport de la Banque mondiale (2017), l'infrastructure d'observation principale de l'ANAM est considérée comme fragile et devrait être renforcée au niveau de ses capacités techniques, humaines et financières. En outre, sa gamme de services, son niveau d'exactitude et de fiabilité étaient estimés comme limités. Enfin, en raison de la couverture territoriale insuffisante de l'équipement d'observation, l'envergure des données ne permet pas de fournir d'informations assez détaillées.

La Direction Générale des Ressources en eaux (DGRE), qui fait partie du Ministère de l'eau et de l'assainissement, est chargée de la surveillance et des utilisations diverses des ressources en eaux de surface et souterraines ainsi que de l'établissement d'un système d'informations pertinent (WMO, 2006). Le rapport de la Banque mondiale (2017) cité ci-dessus témoigne de la médiocrité du réseau. Seules quelques stations au Burkina Faso

fonctionnent correctement ou sont même opérationnelles. La collecte et la transmission des données sont également considérées comme insuffisantes, de même que l'état des équipements techniques prévus pour mesurer les débits.

Pour ce qui est de la surveillance de la sécurité alimentaire et nutritionnelle, le Système d'Alerte Précoce (SAP) du Ministère de l'Agriculture est une institution clé. Le SAP est chargé de surveiller la saison agricole, par le biais notamment de missions sur le terrain, de l'utilisation d'informations transmises par les ministères et des analyses de l'imagerie satellite. Cette surveillance permet de déterminer le début et la fin de la saison agricole, information essentielle pour les petits exploitants, ainsi que la nourriture disponible et la situation alimentaire générale, avec par ex. la diversité nutritionnelle. Ce système permet également de veiller sur les risques régionaux et d'identifier les populations vulnérables en fonction des données socio-économiques et du niveau d'exposition.

Déploiement et politique des SIC

Le déploiement des SIC est un des aspects prioritaires du développement agricole et de l'adaptation au changement climatique au Burkina Faso. Cela se reflète dans plusieurs politiques et initiatives nationales entreprises dans le cadre de l'amélioration ciblée par le gouvernement. Par exemple, le PNA du pays est fondé sur cinq axes stratégiques, l'un d'eux étant l'utilisation des systèmes d'informations (Gouvernement du Burkina Faso, 2015a). Le PNA met en lumière le besoin de données : des données biophysiques, comme les modèles d'impacts climatiques, aux données socio-économiques tant au niveau des ménages qu'à celui de la communauté. La Politique Nationale de l'Eau souligne également la nécessité de (1) posséder un système d'informations sur l'eau opérationnel, avec des instruments permettant d'acquérir, de traiter et de diffuser des informations sur les besoins en eau, sur ses utilisations et sur les impacts de son utilisation avec les risques potentiels liés, et de (2) mener des recherches pertinentes à l'intersection de l'eau et du changement climatique (Ministère de l'Agriculture et du Développement de l'Irrigation du Burkina Faso, 2015b). Parallèlement, le Programme du Secteur Rural souligne le manque de connaissances et d'informations sur les ressources en eau, qui représente un obstacle majeur à la production agricole (Gouvernement du Burkina Faso, 2012). Il mentionne également le besoin de réunir et de diffuser des informations alimentaires et nutritionnelles afin de renforcer le SAP. La Stratégie de développement rural 2016-2025 met en particulier l'accent sur l'état déficient des systèmes d'informations sur l'eau du pays ainsi que sur la qualité médiocre des informations météorologiques (Gouvernement du Burkina Faso, 2015b).

7.2 Potentiel d'atténuation des risques

Les SIC représentent une stratégie d'adaptation prometteuse permettant de faire face à la variabilité et au changement climatiques au Burkina Faso. Comme nous l'avons précisé au chapitre 1, le changement climatique entraînera des quantités de précipitations de plus en plus incertaines. Aussi, le nombre de vagues de sécheresse, même durant la saison des pluies, ainsi que le début et la durée de cette dernière deviendront de plus en plus aléatoires. Ces changements climatiques et ces variabilités se traduisent en incertitudes concernant la disponibilité en eau et la production agricole. Les SIC permettraient de compenser ces incertitudes en fournissant des informations climatiques et météorologiques accessibles, fiables et pertinentes, en prédisant notamment les quantités et la répartition des précipitations (Carr et al., 2020), ou en conseillant les agriculteurs sur la date adéquate pour préparer les terres et réduire le désherbage ou sur le choix d'une variété culturale en particulier (Alvar-Beltrán et al., 2020). De cette façon, les SIC permettraient d'atténuer les impacts des risques climatiques, de préserver au mieux les ressources en eau et d'améliorer la sécurité alimentaire (Tall, 2013). Différentes études ont été menées pour évaluer à la fois l'impact et l'impact potentiel des SIC sur les rendements agricoles et les revenus des fermiers. Les résultats sont généralement positifs, bien qu'ils dépendent du contexte local, du climat, du type de cultures ainsi que du type de SIC examiné et de sa précision. Par exemple, Ouédraogo et al. (2015) ont mené une étude auprès d'agriculteurs produisant du niébé dans différents villages au Burkina Faso et constaté que ceux qui avaient accès à des prévisions météorologiques saisonnières et quotidiennes obtenaient de meilleurs rendements (847 kg/ha pour les fermiers informés contre 685 kg/ha pour le groupe témoin) et des marges brutes plus élevées. De la même manière, Roudier et al. (2016) ont évalué les impacts des prévisions sur 10 jours

et saisonnières sur les pratiques culturales et les revenus des producteurs de millet nigériens. Leurs résultats montrent que les prévisions sur 10 jours ou qu'une combinaison de prévisions de 10 jours et saisonnières peuvent être avantageuses pour tous les types d'agriculteurs, et que ceux ayant accès aux engrais et à des terres arables plus vastes bénéficient davantage des prévisions. Les résultats d'une étude au Sénégal suggèrent aussi un impact positif des SIC sur les rendements des cultures : les rendements des arachides étaient plus élevés de 15 % pour les agriculteurs ayant accès aux informations climatiques par rapport à ceux qui en étaient dépourvus (Lo et Dieng, 2015).

7.3 Analyse coûts-avantages de la culture pluviale du maïs associée à l'utilisation des informations climatiques

L'ACA suivante a pour objectif d'analyser si la transition d'un système de production pluviale du maïs en fonction du calendrier traditionnel vers une production guidée par les données météorologiques et climatiques par téléphonie mobile est rentable. Pour ce faire, nous comparons les coûts et les bénéfices d'un programme d'adaptation à ceux d'un programme sans adaptation en vertu de deux scénarios climatiques projetés chacun jusqu'en 2050, en se basant sur un scénario référentiel décrivant la situation actuelle.

7.3.1 Référentiel et scénarios

Le référentiel et les scénarios sont définis ainsi :

Référentiel (sans mesures, sans impacts climatiques) : Production pluviale du maïs dans les conditions climatiques et technologiques actuelles dans la région.

Pas d'adaptation (pas de mesures, impacts du changement climatique en vertu de SSP1-RCP2.6 et de SSP5-RCP8.5 [10] : Production pluviale du maïs suivant le calendrier traditionnel. Les revenus et les coûts du système de production sont extrapolés jusqu'en 2050 en présupposant des impacts du changement climatique sur les rendements en vertu de SSP1-RCP2.6 et de SSP5-RCP8.5.

Adaptation (mesures, impacts du changement climatique en vertu de SSP1-RCP2.6 et de SSP5-RCP8.5) : Production pluviale du maïs associée à l'utilisation des informations climatiques. Les revenus et les coûts du système de production sont extrapolés jusqu'en 2050 en présupposant des impacts du changement climatique sur les rendements en vertu de SSP1-RCP2.6 et de SSP5-RCP8.5.

7.3.2 Données de l'étude

Les calculs économiques sous-jacents sont basés principalement sur les données des ménages collectées en septembre 2020 par WASCAL et recueillies par la HFFA auprès de dix familles d'exploitants au sud-ouest du Burkina Faso (dans la commune de Dano, province d'Ioba) cultivant du maïs sur une superficie moyenne de 1,6 hectares. Cependant, tenant compte des paramètres économiques standards pour les exploitations agricoles, nous analysons les revenus et les coûts de production consécutifs pour un hectare.

En comparaison au scénario sans adaptation, les agriculteurs participant à l'étude obtenaient des informations spécifiques sur la météo et des données climatiques sur leur téléphone mobile dans le cadre du scénario avec adaptation. Les informations spécifiques concernaient les dates de début et de fin de la saison des pluies, ainsi que la répartition saisonnière des précipitations. Ces données et ces informations déterminent le meilleur moment pour procéder aux étapes de production individuelle, et les agriculteurs ajustent leurs pratiques agricoles et leur gestion conformément à celles-ci.

[10] Contrairement au reste de l'analyse des risques climatiques qui est basée sur le 6e Rapport d'évaluation du GIEC publié en 2021, les analyses coûts-avantages réalisées aux chapitres 7 et 8 reposent sur les projections du PIK pour le nord du Ghana (qui présente des conditions agroécologiques similaires au sud-ouest du Burkina Faso) et utilisent encore les scénarios du 5e Rapport d'évaluation du GIEC (2014), à savoir SSP1-RCP2.6 et SSP5-RCP8.5 au lieu de SSP1-RCP2.6 et SSP3-RCP7.0. Les données issues du nord du Ghana ont été utilisées parce que les projections de rendements pour le Burkina Faso ont été effectuées pour le sorgho (voir chapitre 3), or l'analyse coûts-avantages évalue la production de maïs.

Pour déterminer de manière pertinente les modifications consécutives des revenus et des coûts de production, il faut tenir compte des aspects suivants :

- Comme le recours aux informations climatiques ne nécessite qu'un téléphone mobile, il n'y a pas de coût d'équipement supplémentaire (investissement) pour introduire cette stratégie d'adaptation. D'après l'étude, les agriculteurs devaient acquérir un nouveau téléphone l'année précédant la stratégie d'adaptation et le renouveler tous les trois ans. Cependant, nous présumons que le téléphone est également utilisé à d'autres fins. De ce fait, les coûts sont répartis sur la taille totale de l'exploitation et non pas seulement sur le secteur de l'exploitation concerné par la production de maïs analysée ici.
- Outre les coûts d'acquisition, la charge de travail des agriculteurs dédiée à la collecte d'informations sur le téléphone est estimée à cinq minutes par jour. En se basant sur un tarif journalier pour le travail agricole de 2188 francs CFA (~ 4 USD[11]), le coût de travail dédié au téléphone est estimé à 8317 francs CFA (~ 15 USD) par an et par hectare. En outre, les agriculteurs passent deux jours pour leur formation, la planification et le traitement des informations recueillies, cumulant les coûts à 1838 francs CFA (~ 3,3 USD) la première année et à la moitié de ce montant la deuxième, puis chaque année suivante.
- En ce qui concerne la charge de travail, il faut tenir compte d'un autre aspect. Les rendements plus élevés induits par la stratégie de croissance adaptée entraînent aussi une charge de travail plus importante pour la récolte, le séchage et le battage. Les coûts de main-d'œuvre respectifs pour ces trois activités sont ajustés chaque année en utilisant le quotient des rendements attendus une année particulière sur les rendements pour lesquels les coûts de main-d'œuvre pour la récolte, le séchage et le battage ont été alloués, en tenant compte notamment des rendements du scénario référentiel (WASCAL, 2021).
- Afin de calculer les revenus, le prix du marché pour un kilo de maïs a été fixé à 123 francs CFA (~ 0,20 USD), comme indiqué dans l'étude des ménages. D'après les agriculteurs interviewés, les rendements de maïs ont augmenté de 84 kg par hectare durant la première année d'adaptation et de 87 kg durant la deuxième. À partir des revenus calculés ainsi, les revenus et les coûts ont été extrapolés jusqu'en 2050.

7.3.3 Suppositions

Ce faisant, certaines hypothèses qualifiées supplémentaires ont dû être formulées en raison de certaines informations manquantes. Les points suivants seront soulignés à cet égard :

- Le développement des rendements induit par le changement climatique est basé sur les projections du PIK pour le nord du Ghana (qui présente des conditions agroécologiques similaires au sud-ouest du Burkina Faso) en vertu des scénarios SSP1-RCP2.6 et SSP5-RCP8.5 avec un effet positif sur les rendements grâce à l'adaptation (Aschenbrenner et al., à venir).
- Pour ce qui est de l'évolution technologique, nous supposons que la productivité des agriculteurs participants augmente de 0,6 % par an grâce au changement technologique autonome. Il s'agit d'une extrapolation des hausses de rendements précédentes sur les 30 dernières années au Burkina Faso (FAOSTAT, 2021).
- Pour représenter le taux d'inflation, nous avons calculé le taux de croissance exponentiel du PIB par habitant au Burkina Faso ces 30 dernières années, sa valeur est de 3,88 % (FAOSTAT, 2021).

[11] Tous les taux de change ont été récupérés le 04.03.2021 sur : https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/procedures-guidelines-tenders/information-contractors-and-beneficiaries/exchange-rate-inforeuro_fr

7.3.4 Résultats

Les résultats de l'ACA montrent qu'en 2050, la stratégie d'adaptation qui consiste à passer d'un calendrier de croissance traditionnel à l'utilisation d'informations climatiques pour la production pluviale du maïs serait très avantageuse, car elle a un retour positif sur un investissement relativement limité. Cela s'applique aux deux scénarios de changement climatique, toutefois, le scénario en vertu de SSP5-RCP8.5 présente une performance légèrement meilleure probablement en raison d'une hausse de l'effet de fertilisation par le CO_2. Les aspects suivants sont particulièrement à noter :

- Le flux de trésorerie net des agriculteurs est déjà positif dès la troisième année, ce qui entraîne une hausse de la valeur actuelle nette (VAN) dès la même année (voir figure 47). La VAN est négative les deux premières années : elle débute à -2091 francs CFA (~ -3,8 USD) en 2020 pour les deux scénarios et devient positive en 2022.
- Les coûts de réinvestissement liés au renouvellement du téléphone mobile tous les trois ans entraînent un développement non linéaire de la VAN, mais ajoutés aux coûts de formation, de récolte, de séchage et de battage, ils ne mènent jamais à un flux de trésorerie net négatif les années suivantes. Avec la poursuite de l'augmentation, en 2050, la VAN passe à 243 880 francs CFA (~ 455 USD) en vertu du scénario SSP1-RCP2.6 et à 258 656 francs CFA (~ 482 USD) en vertu du scénario SSP5-RCP8.5.

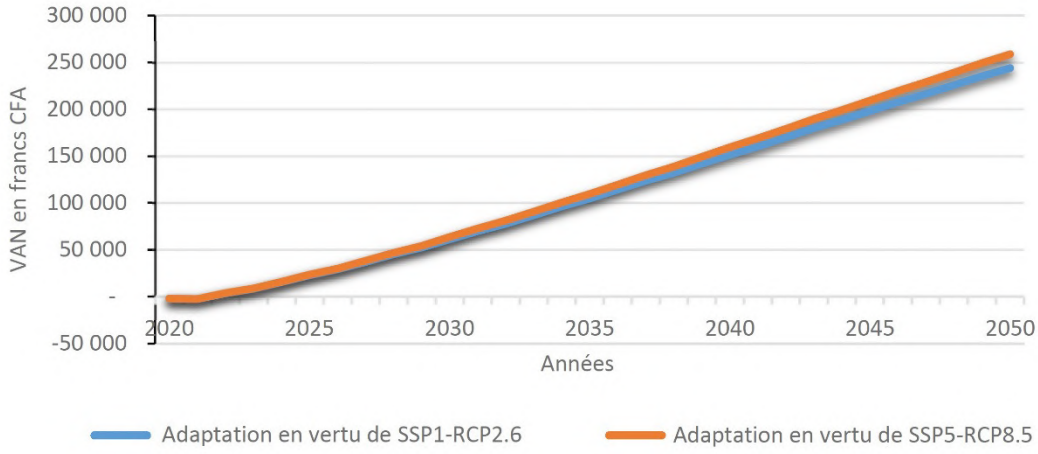


Figure 47 : Développement de la valeur actuelle nette (VAN) dès la transition à la culture pluviale du maïs associée à l'utilisation des informations climatiques.

Les résultats montrent qu'investir dans l'accès aux prévisions météorologiques et aux informations climatiques est rentable pour un agriculteur au bout de deux ans en vertu des deux scénarios de changement climatique. Le seuil de rentabilité entre les coûts nets accumulés et les bénéfices nets est donc atteint en 2022. Par conséquent, le taux de rendement interne (TRI) est très positif et représente 130 % pour une adaptation en vertu de SSP1-RCP2.6 et 132 % pour une adaptation en vertu de SSP5-RCP8.5. Pour indiquer un investissement rentable, le TRI doit être plus élevé que le taux d'intérêt local. D'après l'étude, celui-ci est de 15 % pour le site de notre étude de cas. [12] Étant donné que les TRI pour les deux scénarios (SSP1-RCP2.6 et SSP5-RCP8.5) sont bien plus élevés, le passage de l'utilisation du calendrier traditionnel à l'utilisation des informations climatiques précises via téléphone mobile est particulièrement rentable pour les agriculteurs.

Cela se reflète directement aussi dans le rapport avantages-coûts (A/C) qui est de 1,95 en 2050 selon le changement climatique prévu en vertu du scénario SSP1-RCP2.6 et de 2,00 en vertu du scénario SSP5-RCP8.5 (voir tableau 7).

[12] En règle générale, tout TRI supérieur à 6 %, l'intérêt « global » moyen atteignable au niveau du marché boursier, doit être considéré comme un investissement rentable.

Tableau 7 : Récapitulatif des principaux indicateurs ACA pour la transition à la culture pluviale du maïs associée à l'utilisation des informations climatiques.

	Adaptation en vertu de SSP1-RCP2.6	Adaptation en vertu de SSP5-RCP8.5
TRI	130,39 pour cent	132,22 pour cent
VAN	243 880 francs CFA (= 455 USD)	258 656 francs CFA (= 482 USD)
A/C	1,95	2,00

Nous en concluons donc que passer à un calendrier cultural guidé par des informations climatiques précises est beaucoup plus rentable que d'adhérer à un calendrier cultural traditionnel. Avec des coûts d'investissements très bas et peu d'efforts de travail supplémentaires, une importante hausse des rendements et, par conséquent, des revenus (ou bien – en tant que coûts d'opportunités – des sources d'alimentation à consommer directement sur le site de l'exploitation), peuvent être réalisés, ce qui offre à la stratégie un vrai potentiel de développement. Comme l'étude l'indique, les raisons principales qui empêchent l'utilisation des informations climatiques sont moins de nature financière, elles sont surtout liées au manque d'informations et de savoirs.

7.4 Évaluation qualitative des services d'informations climatiques

7.4.1 Potentiel de développement

Le nombre de services climatiques disponibles au Burkina Faso est faible, ce qui est probablement dû au manque de production et de fourniture d'informations climatiques en provenance des banques de données et de la recherche (Alvar-Beltrán et al., 2020). Les résultats d'une étude menée par Zongo et al. (2015) révèlent que sur quatre sites d'études différents dans les zones sahéliennes et soudano-sahéliennes du Burkina Faso, seuls 22 % des agriculteurs ont accès aux prévisions saisonnières officielles avant la saison agricole.

Actuellement, les principales voies de communication pour transmettre les informations climatiques et météorologiques aux agriculteurs burkinabé sont la radio (39 %), suivie de la télévision (27 %), le bouche à oreille (26 %), et les téléphones mobiles (SMS) (3 %) (Alvar-Beltrán et al., 2020). Cependant, on constate des différences régionales : au Sahel, la radio et le bouche à oreille sont les principaux canaux de transmission, tandis que plus au sud, la majorité des agriculteurs reçoivent les informations par la radio et la télévision (ibid). Dans certaines régions, le bouche à oreille est encore répandu en raison des contraintes liées aux infrastructures telles que l'accès à l'énergie nécessaire pour recharger les téléphones mobiles, et à cause de l'illettrisme et de l'innumérisme (Lo et Dieng, 2015). De ce fait, les marchés hebdomadaires ou les prières du vendredi représentent de bonnes opportunités pour diffuser les SIC.

Étant donné l'accès limité aux SIC et l'exploitation insuffisante des différentes voies de communication, les SIC ont un fort potentiel de développement. Alvar-Beltrán et al. (2020) recommandent d'intensifier les SIC par les principales voies de communication, c'est-à-dire la radio et la télévision. Selon Lo et Dieng (2015), qui ont mené une étude parmi les agriculteurs au Sénégal, les informations du soir à la radio représentent une bonne opportunité puisqu'elles sont transmises à l'heure à laquelle les agriculteurs reviennent de leur exploitation. Toutefois, de nouvelles voies de communication via les téléphones mobiles, les smartphones et autres appareils basés sur l'internet font de plus en plus leur apparition au Burkina Faso. Les SMS représentent notamment un moyen de diversifier les canaux de diffusion, car de plus en plus d'agriculteurs possèdent un téléphone mobile (Lo et Dieng, 2015). Par exemple, au Sénégal, les SMS servent très souvent à la diffusion d'informations climatiques en cas de tempêtes, de vents forts et de pluies précoces ou tardives par exemple (ibid).

7.4.2 Avantages conjoints potentiels

S'ils sont produits et répandus de manière équitable, les SIC présentent plusieurs avantages conjoints liés à leur développement. L'utilisation des SIC permet une production agricole plus ciblée : des données climatiques et météorologiques actualisées permettent aux agriculteurs de prendre des décisions adaptées au moment opportun, par ex. en changeant les dates de semis, en choisissant les variétés de cultures ou l'utilisation d'engrais. Si les SIC sont généralement consultés pour des planifications à court terme, leur utilisation régulière peut modifier les pratiques agricoles à long terme et entraîner la rationalisation du travail et des dépenses agricoles, par exemple grâce aux économies d'énergie et d'eau (USAID, 2013). Les SIC permettraient donc aux agriculteurs d'augmenter leurs rendements agricoles et d'assurer leur sécurité alimentaire, pour la saison sèche aussi, contribuant ainsi positivement à la santé. La hausse des rendements agricoles génère un excédent qui peut être vendu au marché. Ce revenu supplémentaire peut être réinvesti soit dans de meilleurs équipements et d'autres activités agricoles, notamment liées à l'élevage, soit dans le bien-être familial grâce à un investissement dans une assurance santé ou l'éducation des enfants (Lo et Dieng, 2015). Les SIC peuvent aussi protéger des vies humaines et animales ainsi que la propriété : par exemple, à l'annonce d'une tempête, Lo et Dieng (2015) ont observé, dans leur étude sur les agriculteurs sénégalais, que les enfants et le bétail restent à la maison. Les SIC peuvent aussi faire naître une prise de conscience plus générale du changement et de la variabilité climatiques. Leurs utilisateurs accepteraient alors davantage de payer pour ces prévisions, ce qui entraînerait une amélioration de leur qualité à long terme (USAID, 2013). Ouédraogo et al. (2018) ont mené une étude parmi des agriculteurs burkinabé et évalué que 63 % d'entre eux seraient prêts à payer pour les SIC. Une prise de conscience plus importante peut également servir d'élan à la mise en œuvre d'autres stratégies d'adaptation mentionnées dans ce rapport.

7.4.3 Répercussions inopportunes potentielles

En comparaison à d'autres stratégies d'adaptation, peu d'attention a été accordée jusqu'à présent aux répercussions inopportunes potentielles et aux questions éthiques relatives aux SIC (Lugen, 2020). Deux aspects mériteraient toutefois d'être mentionnés. Le premier est l'équité et la question de l'accès aux CIS et de leur utilisation. Un accès égal aux SIC et à leur utilisation dépend de différents facteurs sociaux comme le sexe, l'âge, l'état matrimonial, la situation migratoire ou la santé (Lo et Dieng, 2015 ; Lugen, 2020 ; McOmber et al., 2013). Selon McOmber et al. (2013), en particulier l'âge, associé au sexe, met en lumière les inégalités sociales relatives à l'accès aux SIC et à leur usage. Une étude menée auprès de fermiers kényans confirme cet aspect : l'âge du chef de famille entraînait une réduction de l'accès aux SIC, et l'âge et le sexe limitaient la probabilité d'utiliser les SIC (Muema et al., 2018). D'autres facteurs tels que le revenu, la taille de la ferme ou la possession d'une télévision produisaient l'effet opposé. De ce fait, si les SIC peuvent être une stratégie d'adaptation efficace, ils peuvent aussi renforcer les inégalités existantes. Le second aspect renvoie à la politique des SIC et à la façon dont la gouvernance et le pouvoir sont impactés (Lugen, 2020). Webber (2017) critique la commercialisation des SIC et les rivalités autour de leur développement qui se produisent au détriment de la formation de partenariats collaboratifs, ce qui creuse le fossé entre la science et la politique au lieu de le combler.

7.4.4 Obstacles à la mise en œuvre

Le développement des SIC est confronté à de multiples obstacles et contraintes. À la différence d'autres stratégies d'adaptation, les SIC nécessitent souvent un soutien institutionnel, technique et financier important. C'est en partie la raison pour laquelle la production et la diffusion de SIC restent insuffisantes au Burkina Faso (Banque mondiale, 2017). Le nombre d'observateurs sur le terrain est limité et leur paiement trop modique pour assurer la fiabilité de la collecte des données, constate la Banque mondiale. L'équipement et les instruments nécessaires sont rares.

Aussi, l'identification des utilisateurs finaux représente un autre problème. Les besoins en SIC sont très spécifiques au contexte et peuvent varier d'un village à un autre (Guido et al., 2020 ; Tall, 2013). De ce fait, il est important d'identifier les utilisateurs finaux et leurs besoins afin de s'assurer que ces aspects soient pris en compte tout le long de la

chaîne de valeur des SIC (Carr et al., 2020). D'après Tall (2013), le point de vue des utilisateurs finaux est souvent négligé, en particulier dans la phase de conception des SIC, or c'est un élément crucial au succès de ces services. Des informations sur les utilisateurs finaux devraient également être prises en compte dans la gestion et la phase de mise en œuvre des SIC. Carr et al. (2020) soulignent qu'il est important de s'assurer que les utilisateurs finaux reçoivent les informations et les utilisent dans leur processus de prise de décision. Trop souvent, les SIC sont développés sans communication efficace. Tall (2013) insiste sur le rôle des différents canaux de diffusion pour garantir la réception du bon SIC auprès des communautés vulnérables et des organisateurs à différents niveaux. Ces canaux potentiels sont entre autres la radio, les SMS, les messages vocaux ou les panneaux d'affichage aux endroits stratégiques (Tall, 2013). À cet effet, il est essentiel d'assurer une communication au moment opportun dans la ou les langues locales.

Enfin, Carr et al. (2020) soulignent l'enjeu transversal qui consiste à faire face à l'instabilité des conditions. Cet enjeu renvoie à différents acteurs et à différents niveaux, dont l'évolution des besoins et des savoirs des utilisateurs, mais aussi aux évolutions au sein des communautés et au niveau des bailleurs et des prestataires. Étant donné que les SIC fonctionnent sur plusieurs années, il faut tenir compte de l'aspect de l'incertitude, et les SIC doivent être conçus comme s'inscrivant dans un processus itératif (Tall, 2013).

Les sexospécificités influencent encore beaucoup l'accès des fermiers aux biens et aux ressources (Alston, 2013 ; Backiny-Yetna et McGee, 2015). En général, les principaux pourvoyeurs des revenus étant les hommes, ce sont eux qui contrôlent les dépenses. Ce contrôle sexué des moyens financiers ne facilite pas l'accès des femmes aux technologies de l'‘information et de la communication (TIC) et aux SIC. De ce fait, elles dépendent de leurs homologues masculins pour l'achat et l'utilisation d'équipements tels que les radios ou les téléphones mobiles (McOmber et al., 2013). McOmber et al. (2013) déclarent : « Si les informations climatiques sont partagées au sein du ménage, cela ne signifie pas toujours que les femmes en profitent. » Un autre obstacle est lié à l'usage des SIC : les femmes ont tendance à avoir moins d'expérience dans l'utilisation des TIC, il est moins probable qu'elles parlent la langue nationale, et elles sont plus susceptibles d'être dans l'incapacité de lire et de compter, ce qui limite leurs capacités à utiliser les SIC, même s'ils sont disponibles (McOmber et al., 2013). Cela s'applique particulièrement aux femmes d'âge plus avancé, mais aussi aux hommes plus âgés (ibid). Un autre aspect important sont les besoins différents des hommes et des femmes en matière de SIC (Tall et al., 2014). Dans une étude menée par Tall et al. (2014), les femmes sénégalaises procédaient au semis de leur parcelle après que les hommes aient terminé les leurs. De ce fait, elles avaient en particulier besoin d'informations sur les vagues de sécheresse potentielles et la fin de la saison des pluies (ibid). Malgré de nombreux obstacles, les SIC permettent d'améliorer la vie de différents groupes sociaux, en particulier celle des femmes, qui dépendent traditionnellement des hommes pour obtenir des informations. En conséquence, si les femmes obtiennent le même accès et la possibilité d'utiliser les SIC, si elles profitent de la formation nécessaire pour utiliser les TIC, pour comprendre les SIC et la façon d'appliquer ces informations, les SIC peuvent encourager l'égalité des sexes.

7.4.5 Besoins en matière de soutien institutionnel

Le développement et la fourniture des SIC nécessitent un important soutien institutionnel. Ils sont généralement développés par des agences météorologiques et des instituts de recherche nationaux spécialisés dans le climat et les prévisions météorologiques (Singh et al., 2018). Le post-traitement des données climatiques et météorologiques brutes, qui comprend l'interprétation et la traduction de données climatiques et météorologiques complexes en SIC adaptés au secteur et au niveau local, faciles à comprendre et utilisables, nécessite également un soutien institutionnel, notamment de la part des ministères et des services de vulgarisation (Tall, 2013). Ainsi, les SIC offrent une stratégie d'adaptation efficace. Toutefois, leur adoption ne peut être assurée par des agriculteurs individuels ou des petits groupes d'agriculteurs, même si ceux-ci jouent un rôle important en tant qu'utilisateurs finaux des SIC. De préférence, les SIC doivent être fournis aux utilisateurs finaux via différentes voies de communication et avec l'appui de différents acteurs, dont les agences météorologiques, les instituts de recherche, les ministères et les services de vulgarisation agricoles. Associer ces acteurs à la chaîne de valeur SIC représente un des enjeux de la fourniture des SIC. D'autres organisations

intermédiaires, telles que les médias, les ONG, les associations communautaires et les organisations de femmes peuvent faciliter la fourniture de SIC, en particulier lorsqu'il s'agit de co-produire et de diffuser les SIC (Tall, 2013 ; WMO, 2019). Le tableau 8 récapitule l'évaluation multicritère.

7.5 Conclusion

En tenant compte de tous les aspects mentionnés, les SIC présentent, de par leurs formats variés, un potentiel d'atténuation de risques élevés avec un très bon rapport coût-efficacité comme le montre l'analyse ACA. De très faibles coûts d'investissements alliés à peu d'efforts de travail supplémentaires suffisent pour obtenir de remarquables hausses de rendements. Toutefois, l'accès aux SIC nécessite un soutien institutionnel élevé pour la collecte, l'analyse et la diffusion efficaces et au moment opportun des informations, afin d'assurer leur utilisation correcte et sûre de la part des agriculteurs.

Tableau 8 : Récapitulatif de l'évaluation multicritère des CIS en tant que stratégie d'adaptation.

Atténuation des risques	Gradient de risque	Rapport coût-efficacité	Développement	Avantages conjoints potentiels	Répercussions inadaptées potentielles	Obstacles à la mise en œuvre	Besoins en matière de soutien institutionnel
Forte	Indépendance vis-à-vis des risques	Élevé	Fort	Forts	Faibles	Moyens	Forts

Chapitre 8 – Irrigation

8.1 Contexte et description de la stratégie d'adaptation

Au Burkina Faso, le secteur agricole dépend beaucoup de l'eau de pluie. Comme les précipitations deviennent de plus en plus irrégulières, l'irrigation permet d'aider les agriculteurs à s'adapter au changement des conditions. On peut définir l'irrigation comme un processus artificiel consistant à distribuer de l'eau sur les cultures ou les terres afin de soutenir la croissance des végétaux. La FAO distingue trois types d'irrigation : (1) l'irrigation de surface, où l'eau se répand sur la terre ; (2) l'irrigation par aspersion, où l'eau est projetée, sous pression, sur la terre ; et (3) l'irrigation goutte à goutte, où l'eau est directement amenée à la plante (FAO, 2001).

La majorité des systèmes d'irrigation au Burkina Faso sont instaurés et gérés par les agriculteurs eux-mêmes – soit individuellement soit en petits groupes – et portent alors la désignation de petite irrigation au niveau privé (De Fraiture et Giordano, 2014). Les surfaces irriguées sont petites, en général moins de 2 ha, et les technologies sont à bas coûts : dans la plupart des cas, une pompe à pédale sert à transporter l'eau vers les cultures, dans certains cas, c'est une motopompe, une pompe manuelle ou de simples arrosoirs (De Fraiture et Giordano, 2014 ; Zongo et al., 2015b). L'eau provient en général de petits bassins de retenue qui collectent le ruissellement de surface pendant la saison humide (De Fraiture et Giordano, 2014). Au Burkina Faso, un petit bassin de retenue est défini par la hauteur de la digue qui l'entoure et devrait être inférieure à 10 m (Boelee et al., 2009). La retenue d'eau est soumise aux variations saisonnières et dépend de son emplacement géographique au Burkina Faso : dans le sud-ouest du pays, plus de la moitié des bassins retiennent l'eau toute l'année, mais au nord, c'est moins du tiers des bassins (Boelee et al., 2009). Différentes estimations font état actuellement de 1450 à 1650 bassins de ce type au Burkina Faso (Boelee et al., 2009 ; Cecchi et al., 2009).

Outre les techniques de gestion de l'eau traditionnelles comme les zaï et les plantations en demi-lunes, (voir chapitre 9), le gouvernement burkinabé et des donateurs internationaux ont développé des barrages et des systèmes d'irrigation à petite et à grande échelle (Fossi Tuekam et al., 2012). Les deux plus grands barrages sont notamment celui de Kompienga (capacité totale : 2 milliards de m^3) sur la rivière Koulpélogo, situé au sud-est du Burkina Faso, et le barrage de Bagré (capacité totale : 1,7 milliards de m^3) sur la Volta blanche, situé dans la partie sud du pays (Boelee et al., 2009). Le barrage de Kompienga est utilisé pour la production hydroélectrique et la pêche, tandis que celui de Bagré alimente un système d'irrigation en aval, qui recouvre une superficie de 37,28 km^2 (2014), ce qui en fait l'un des plus grands systèmes d'irrigation au Burkina Faso (Boelee et al., 2009 ; Knauer et al., 2017). Les autres surfaces irriguées sont la vallée du Kou à l'ouest du Burkina Faso, la plaine du Sourou au nord-ouest et une surface dans la province de Comoé au sud-est (Boelee et al., 2009). Parmi les cultures irriguées, on peut citer (1) les céréales, surtout le riz et le maïs ; et (2) les plantes maraîchères dominées par les oignons et les tomates, suivies des cultures maraîchères traditionnelles à petite échelle (choux, aubergines) et haricots verts pour l'exportation (MAAHA, 2019). En fonction du type de culture, l'irrigation est pratiquée à la saison sèche entre décembre et avril comme c'est le cas pour les cultures maraîchères (Gross et Jaubert, 2019), ou en complément en cas de vagues de sécheresse pendant la saison des pluies (Zongo et al., 2015b).

8.2 Évaluation biophysique du potentiel d'atténuation des risques

Pour analyser le potentiel d'atténuation des risques représenté par l'irrigation comme stratégie d'adaptation au Burkina Faso, le sorgho fait l'objet de notre étude de cas, car c'est une culture de base importante dans ce pays. Comme il s'agit traditionnellement d'une culture pluviale, cette étude de cas explore le potentiel d'atténuation des risques du passage à l'irrigation. Pour une évaluation holistique,

les savoirs traditionnels des agriculteurs ainsi que leurs pratiques de gestion devraient être pris en compte. L'option "irrigation automatique lorsque c'est nécessaire" a été sélectionnée dans le modèle DSSAT avec une profondeur d'irrigation par submersion de 5 cm. Cette option permet au modèle de fournir 5 cm d'irrigation par submersion dans le champ lorsque la céréale cultivée requiert de l'eau. En raison des processus de transpiration et d'évaporation, la culture a besoin d'eau. Les principaux facteurs climatiques déterminant les besoins en eau de la plante sont les heures d'ensoleillement, la température, l'humidité et la vitesse du vent. Dans notre cas, cinq centimètres de couverture d'eau étaient fournis aux cultures lorsque celles-ci en avaient besoin, tout en tenant compte des équipements d'irrigation limités. Toutefois, si l'on considère les besoins saisonniers moyens en eau du sorgho (450-650 mm), la hausse des températures, les variations des précipitations et la période de croissance des cultures, notre réglage du modèle sur cinq centimètres de submersion pourrait s'avérer insuffisant pour parvenir aux résultats potentiels de quelques cellules.

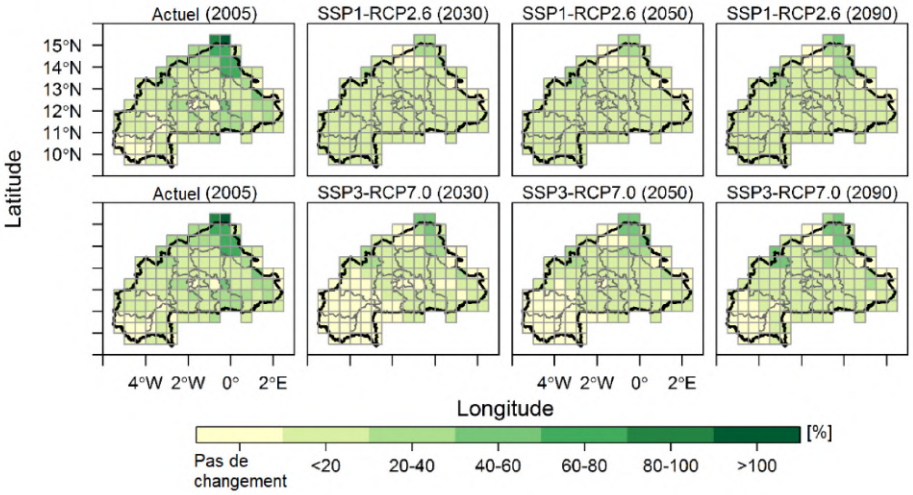


Figure 48 : Répartition spatiale de la projection des impacts de l'utilisation de l'irrigation sur les rendements du sorgho suivant différents scénarios d'émissions et périodes.

Les résultats de la modélisation montrent que l'irrigation permet d'augmenter considérablement les rendements sur la plupart des cellules (Figure 48), surtout au nord du Burkina Faso en vertu des deux scénarios d'émissions. Dans l'ensemble, les projections montrent que l'irrigation entraîne de plus forts rendements en vertu des deux scénarios et à toutes les périodes. Dans la partie sud du Burkina Faso (Cascades, Haut-Bassins et Sud-Ouest), les projections montrent que l'irrigation permettra d'augmenter davantage les rendements en vertu de SSP1-RCP2.6 que de SSP3-RCP7.0. Partout, en vertu du scénario de réduction des émissions (SSP1-RCP2.6), les impacts sur les rendements sont restés inchangés au fil du temps (années 2030, 2050 et 2090), ce qui pourrait être dû aux régimes climatiques restés identiques. Dans la partie sud-ouest du Burkina Faso (Centre-Ouest, Centre-Sud, Centre-Est, et Est inférieur), les projections indiquent que les rendements devraient rester relativement stables en vertu de SSP3-RCP7.0. Dans les régions du nord (Boucle du Mouhoun, Nord, Centre Nord, Centre et Plateau Central), l'irrigation devrait avoir des impacts positifs sur les rendements en vertu des deux scénarios, avec un impact positif plus important en vertu de SSP3-RCP7.0 qu'en vertu du scénario de réduction des émissions (SSP1-RCP2.6).

La figure 49 montre la variabilité des impacts sur les rendements liée à l'application de l'irrigation selon différentes périodes. Si l'on compare les deux scénarios, on remarque que les variations de rendements sont très faibles au fil du temps en vertu de SSP1-RCP2.6, mais que la tendance s'accroît au fil du temps en vertu de SSP3-RCP7.0.

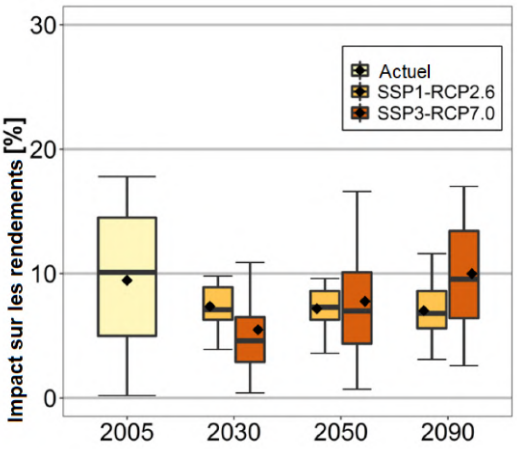


Figure 49 : Intercomparaison des impacts sur les rendements à différentes périodes avec l'irrigation automatique.

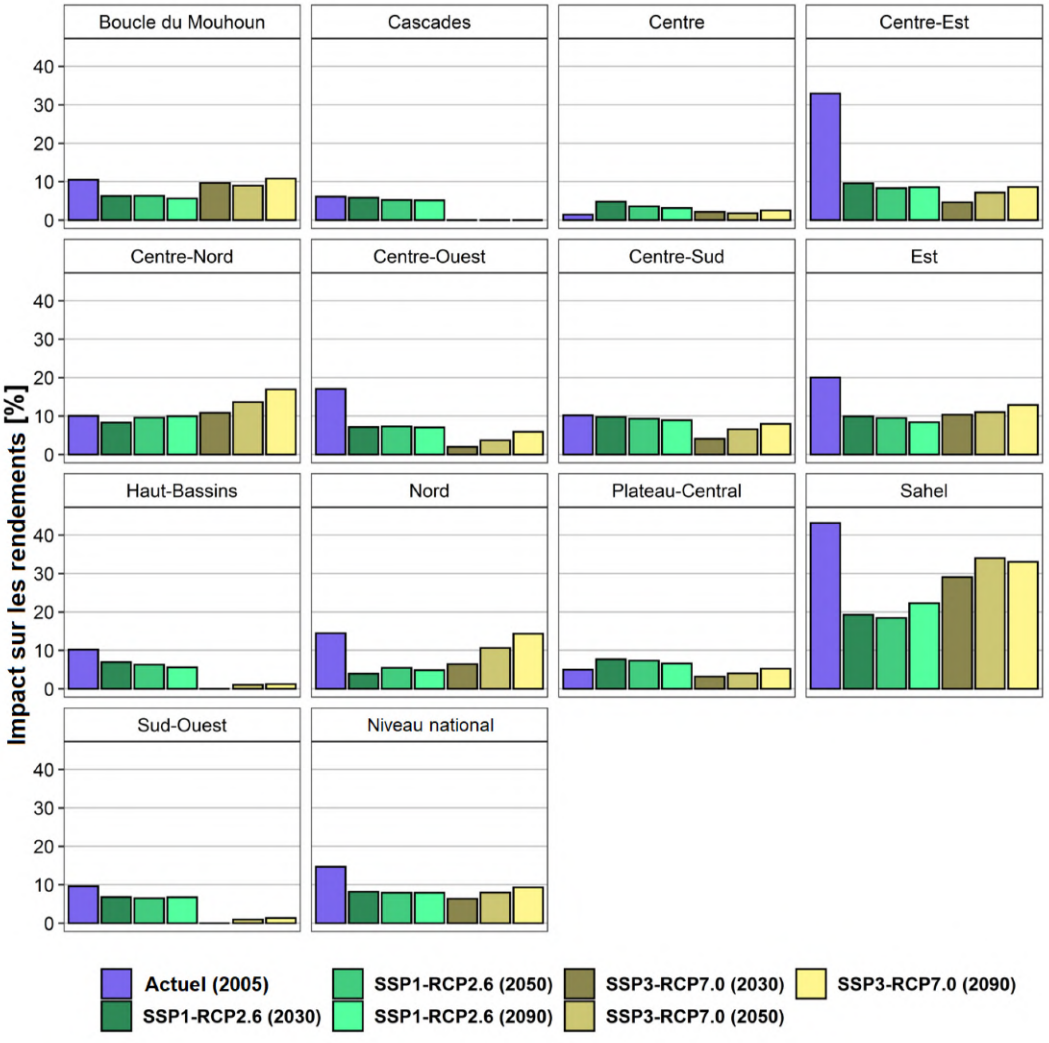


Figure 50 : Impacts de l'irrigation sur les rendements par région selon les différents scénarios et les différentes périodes.

En outre, la figure 50 montre l'importance des répercussions de l'irrigation sur les rendements en vertu des deux scénarios d'émissions et selon différentes périodes, en comparant les régions administratives. L'impact de l'irrigation sur les rendements varie suivant les régions et les périodes. Comme on peut le voir, l'irrigation n'entraîne pas de changements positifs considérables sur les rendements en vertu du scénario SSP3-RCP7.0 dans certaines parties du pays dont Cascades, Centre, Haut-Bassins et Sud-Ouest. Cela pourrait s'expliquer par les processus d'évaporation improductive à partir du sol nu, les pertes d'interception, la percolation profonde et le ruissellement de surface, qui sont le résultat d'une combinaison de précipitations plus élevées que celles projetées en vertu de SSP1-RCP2.6 et de l'irrigation au sud du Burkina Faso (Rockstrom, 2000). Dans la partie nord du pays, le besoin en eau des cultures est optimal pour ce qui est des précipitations et de l'irrigation, ce qui explique pourquoi les projections indiquent des rendements plus élevés résultant de la mise en œuvre de l'irrigation. Ce chapitre s'est concentré sur le sorgho, une culture importante, également en matière de rendements, dans les régions semi-arides et arides d'Afrique. Pour ce qui est des impacts climatiques, le sorgho présente une meilleure résilience que le maïs et les différents millets (Orr et al., 2020). Le sorgho est une céréale qui supporte mieux la sécheresse, c'est la culture la plus adaptée là où et lorsque de longues périodes de sécheresse sont vécues ou attendues pendant la saison de croissance ou dans des environnements naturellement secs (Muitire et al., 2021). Les mécanismes hétérotiques du sorgho permettent une biomasse et la production de composants plus importantes en une plus courte durée, un système racinaire efficace, des mécanismes de prévention de la déshydratation, une capacité à « rester vert », une tolérance à la verse et au dessèchement, en comparaison à d'autres cultures céréalières (Blum, 2004 ; Choudhary, 2021). Si l'on tient compte de ces facteurs, l'effet d'atténuation des risques lié à l'irrigation pourrait être encore plus fort pour d'autres céréales telles que le maïs ou le millet, qui sont plus sensibles au changement climatique.

8.3 Analyse coûts-avantages de la culture pluviale du maïs complétée par l'irrigation

Afin d'évaluer la faisabilité économique de l'irrigation en complément à la culture pluviale du maïs, nous avons comparé les coûts et les avantages d'un scénario avec adaptation à un scénario sans adaptation. Le scénario d'adaptation est constitué d'agriculteurs qui ont construit des bassins et des réservoirs pour collecter et stocker les eaux de ruissellement afin d'irriguer leurs champs de maïs en cas de périodes de sécheresse durant la saison des pluies (pas de production en saison sèche). Dans le cadre du scénario sans adaptation, les agriculteurs produisent du maïs sans irrigation complémentaire. Les coûts et les bénéfices sont projetés jusqu'en 2050 en se basant sur un scénario référentiel décrivant la situation actuelle.

8.3.1 Référentiel et scénarios

Le référentiel et les scénarios sont définis ainsi :

Référentiel (sans mesures, sans impacts climatiques) : Production pluviale du maïs dans les conditions climatiques et technologiques actuelles dans la région.

Pas d'adaptation (pas de mesures, impacts du changement climatique en vertu de SSP1-RCP2.6 et de SSP5-RCP8.5[13]) : Production pluviale du maïs sans techniques d'irrigation complémentaires. Les revenus du marché et les coûts du système de production sont extrapolés jusqu'en 2050 en présupposant des impacts du changement climatique sur les rendements en vertu de SSP1-RCP2.6 et de SSP5-RCP8.5.

Adaptation (mesures, impacts du changement climatique en vertu de SSP1-RCP2.6 et de SSP5-

[13] Contrairement au reste de l'analyse des risques climatiques qui est basée sur le 6e Rapport d'évaluation du GIEC publié en 2021, les analyses coûts-avantages réalisées aux chapitres 7 et 8 reposent sur les projections du PIK pour le nord du Ghana (qui présente des conditions agro-écologiques similaires au sud-ouest du Burkina Faso) et utilisent encore les scénarios du 5e Rapport d'évaluation du GIEC (IPCC, 2014), à savoir SSP1-RCP2.6 et SSP5-RCP8.5 au lieu de SSP1-RCP2.6 et de SSP3-RCP7.0. Les données issues du nord du Ghana ont été utilisées parce que les projections de rendements pour le Burkina Faso ont été effectuées pour le sorgho (voir chapitre 3), or l'analyse coûts-avantages évalue spécifiquement la production de maïs.

RCP8.5) : Production de maïs au cours de la saison des pluies avec le soutien de l'irrigation complémentaire lors de vagues de sécheresse (le reste des facteurs restant inchangé). Les revenus du marché et les coûts de production sont extrapolés jusqu'en 2050 en présupposant des impacts du changement climatique sur les rendements en vertu de SSP1-RCP2.6 et de SSP5-RCP8.5.

8.3.2 Données de l'étude

Les calculs suivants sont basés sur les données des coûts et des revenus concernant cinq exploitations dans la province de Yatenga dans la région Nord du Burkina Faso. La taille moyenne de chaque exploitation est de quatre hectares, dont 0,25 hectares réservés à la culture irriguée du maïs. Pour assurer la comparabilité des différents scénarios d'adaptation, tous les revenus du marché et les coûts de production analysés sont associés pour un hectare.

L'infrastructure d'irrigation est constituée de bassins faits de ciment, de pierre et de sable présentant un volume moyen de 250 m^3, sauf un bassin dont le volume est de 2000 m^3. L'eau est pompée à l'aide d'un alternateur ou d'une pompe à pédale, puis transportée avec des seaux jusqu'aux champs. Afin de déterminer les variations ultérieures des revenus du marché et des coûts de production, les points suivants sont pris en compte pour un fermier moyen adoptant la nouvelle technologie.

- Les principaux facteurs de coûts de l'irrigation complémentaire sont ceux pour les équipements et le matériel nécessaires à l'installation des bassins. Les agriculteurs participant à l'étude prévoient que ces bassins auront une durée de vie de 36 ans, de ce fait, les coûts de rénovation ne sont pas pris en compte pour la période analysée dans cette ACA. Les coûts des matériaux de construction comme le sable, le ciment et les pierres s'élèvent à 122 400 francs CFA (~ 222 USD[14]) seulement pour l'année de construction. C'est la même chose pour l'excavatrice et la charrette achetées pour l'installation au cours de la première année à 150 117 francs CFA (~ 272 USD), mais qui n'entraînent pas de coûts de renouvellement (WASCAL, 2020).
- Même si l'infrastructure des bassins n'a pas à être renouvelée avant 36 années, certains matériaux comme les bâches, les pieux de bois et les grillages doivent être remplacés au bout d'un certain temps (information recueillie lors de l'étude), ce qui entraîne des frais variables chaque année.
- Outre les coûts d'achat du matériel et des équipements, les coûts de main-d'œuvre des agriculteurs pour l'installation des bassins est calculée à partir du tarif journalier moyen pour le travail agricole s'élevant à 1900 francs CFA (~ 3,4 USD) et du nombre moyen de jours de travail s'élevant à 319 jours par hectare à partir de l'étude. Les coûts de main-d'œuvre totaux dédiés à l'installation, comprenant la formation et l'excavation, s'élèvent donc à 606 311 francs CFA (~ 1 099 USD). Le facteur de travail pour l'irrigation est de 60 jours et s'élève à 114 000 francs CFA (~ 207 USD) (ibid.).
- Les coûts d'opportunités sont issus des activités extérieures à la ferme que les agriculteurs effectueraient s'ils n'irriguaient pas leurs champs. Les agriculteurs interviewés ont signalé que sans réaliser l'irrigation complémentaire, ils passeraient 84 jours par an à effectuer des activités extérieures à la ferme. En se basant sur le tarif journalier moyen pour chaque activité, les coûts d'opportunité s'élèveraient à 64 737 francs CFA (~ 117 USD) par an et par hectare (ibid.).
- Les rendements plus élevés induits par l'irrigation entraînent aussi une charge de travail plus importante pour la récolte, le séchage et le stockage. De ce fait, les coûts de main-d'œuvre liés à ces trois activités sont ajustés chaque année en se servant du ratio entre les rendements attendus avec l'adaptation et les rendements référentiels avant l'adaptation (WASCAL, 2020).
- Pour calculer les revenus, nous utilisons un prix du marché de 176 francs CFA (~ 0,32 USD) pour un kilogramme de maïs, comme indiqué dans l'étude sur les ménages. D'après les agriculteurs interviewés, les rendements de maïs ont augmenté de 1 489 kg par hectare grâce à l'irrigation. À partir des revenus de marché acquis par l'excédent des rendements, nous avons extrapolé les revenus et les coûts jusqu'en 2050 (WASCAL, 2020).

[14] Tous les taux de change ont été récupérés le 09.04.2021 sur : https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/procedures-guidelines-tenders/information-contractors-and-beneficiaries/exchange-rate-inforeuro_fr

8.3.3 Suppositions

Pour réaliser l'ACA, les données de l'étude ont dû être complétées par les suppositions suivantes :

- Les effets du changement climatique sur les rendements en vertu des scénarios SSP1-RCP2.6 et SSP5-RCP8.5. sont basés sur les projections du PIK pour le nord du Ghana (qui présente des conditions agroécologiques similaires au sud-ouest du Burkina Faso) montrant un effet positif grâce à l'adaptation (Aschenbrenner, à venir).
- Nous supposons que la productivité des agriculteurs participants augmente de 0,6 % par an grâce au changement technologique indépendant. Il s'agit d'une extrapolation des hausses de rendements de maïs passées au cours des 30 dernières années au Burkina Faso (FAOSTAT, 2021).
- Pour représenter le taux d'inflation, nous avons calculé le taux de croissance exponentiel du PIB par habitant au Burkina Faso ces 30 dernières années : sa valeur est de 3,88 % (FAOSTAT, 2021).

8.3.4 Résultats

Les résultats de l'ACA montrent qu'en vertu des deux scénarios d'émissions, la stratégie d'adaptation qui consiste à passer d'une production pluviale à une production irriguée du maïs présente un retour positif sur l'investissement (Figure 51) :

- Après des coûts d'investissements initiaux élevés, estimés à 1 484 226 francs CFA (~ 2 691 USD), le flux de trésorerie net devient positif dès la deuxième année de l'adaptation. La VAN augmente donc à partir de la même année et devient aussi positive avec 27 102 francs CFA (~ 49 USD) en 2041 en vertu de SSP1-RCP2.6, moment où le seuil de rentabilité est atteint pour l'investissement. En vertu de SSP5-RCP8.5, le seuil de rentabilité est même atteint une année plus tôt, en 2040, avec une VAN de 762 francs CFA (~ 1,4 USD).
- En raison des coûts de réinvestissements liés à certains matériaux et équipements, la VAN se développe de manière non-linéaire. En 2035 et en 2050, les coûts de rénovation pour les pompes et les bâches entraînent un flux de trésorerie négatif pour les agriculteurs et une VAN en baisse.
- Mais à nouveau, dès l'année suivante, la VAN augmente et s'élève en 2050 à 804 369 francs CFA (~ 1 458 USD) en vertu du scénario SSP1-RCP2.6 et à 959 230 francs CFA (~ 1 739 USD) en vertu du scénario SSP5-RCP8.5.

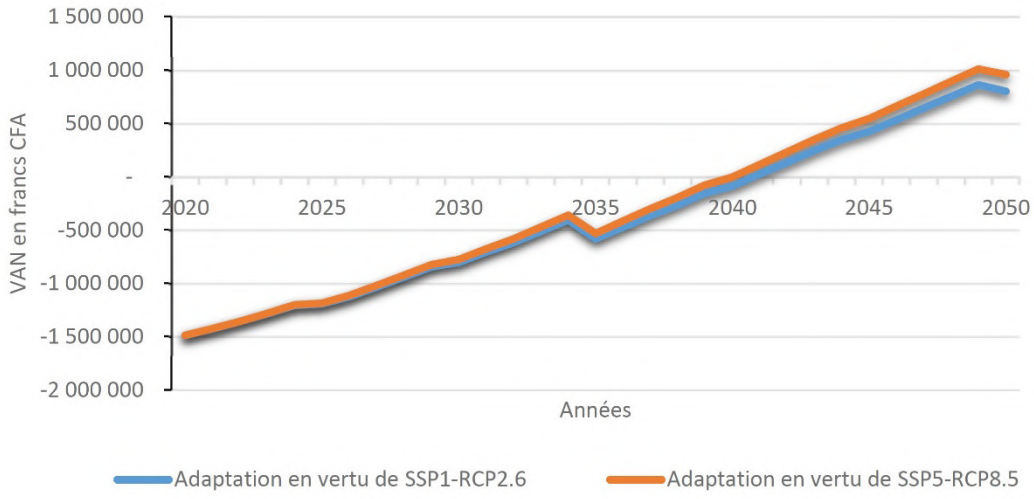


Figure 51 : Développement de la valeur actuelle nette (VAN) dès la transition de la culture pluviale du maïs à l'utilisation complémentaire de l'irrigation.

En d'autres termes, les investissements des agriculteurs dans l'irrigation complémentaire deviennent profitables au bout de dix ans en vertu de SSP1-RCP2.6 et de onze ans en vertu de SSP5-RCP8.5. Par conséquent, le taux de rendement est positif et représente 6,89 % pour une adaptation en vertu de SSP1-RCP2.6 et 7,35 % pour une adaptation en vertu de SSP5-RCP8.5, ces deux taux étant évalués pour 2050. En supposant une perspective de rentabilité globale, souvent prise pour des ACA locales, tout TRI supérieur à 6 % est considéré comme un investissement rentable. Comme les TRI des deux scénarios dépassent 6 %, le passage de la production pluviale du maïs à l'irrigation est rentable pour les agriculteurs. Cela se reflète également dans le rapport avantages-coûts (A/C) de l'investissement pour l'adaptation, qui est de 1,14 en 2050 en vertu de SSP1-RCP2.6 et de 1,17 en vertu de SSP5-RCP8.5 (Voir aussi le tableau 9).

Tableau 9 : Récapitulatif des principaux indicateurs ACA pour la transition à la culture pluviale du maïs associée à l'utilisation complémentaire de l'irrigation.

	Adaptation en vertu de SSP1-RCP2.6	Adaptation en vertu de SSP5-RCP8.5
TRI	6,89 pour cent	7,35 pour cent
VAN	804 369 francs CFA (= 1 458 USD)	959 230 francs CFA (= 1 739 USD)
A/C	1,14	1,17

Comme expliqué ci-dessus, la transition d'un système de production pluviale du maïs à une production incluant une irrigation complémentaire est économiquement viable puisque ce changement partiel du système de production conduit à un TRI élevé et à un rapport A/C supérieur à 1,0. Cela signifie que les revenus supplémentaires attribuables au changement sont plus élevés que les coûts supplémentaires associés. Ce résultat particulier ne signifie toutefois pas que le système de production dans son ensemble est rentable en ce qui concerne le calcul normalisé au plan international des marges économiques. En fait, suivant les données de l'étude des ménages, il faut déterminer si la production de maïs du scénario référentiel (sans mesures, sans impacts climatiques), c'est-à-dire la production pluviale du maïs dans les conditions climatiques et technologiques actuelles dans la région, présente une marge brute et nette négative. En d'autres mots, si les coûts variables et fixes sont plus élevés que les revenus du marché. D'un point de vue purement économique, cela signifierait de ne pas produire de maïs dans les conditions actuelles. Toutefois, le TRI positif suggère que le système de production devient plus rentable à l'avenir en raison des rendements considérablement plus élevés. La prise de décision des producteurs de maïs dans la région n'est pas forcément guidée par la rationalité. La plupart des petits exploitants et les fermiers de subsistance ont tendance à allouer un salaire plus faible, et même souvent nul, à leur propre travail ou au travail réalisé par la famille. En outre, d'autres critères tels que la sécurité alimentaire et le manque d'alternatives professionnelles peuvent s'appliquer.

Cela ne contredit pas les résultats de l'ACA, car celle-ci ne représente qu'une comptabilité partielle des coûts qui ne comprend pas tous les facteurs de production comme dans une analyse des coûts complète.

8.4 Évaluation qualitative

8.4.1 Potentiel de développement

Le développement de l'irrigation au Burkina Faso remonte à l'époque coloniale, lorsque des missionnaires français ont introduit cette technologie pour enseigner la production horticole à la population locale (Gross et Jaubert, 2019). Cependant, avec seulement 100 réservoirs construits à l'époque, l'irrigation est restée une activité marginale jusqu'après l'indépendance en 1960. Dans les années 1970 et 1980, le Burkina Faso et d'autres pays sahéliens ont été confrontés à de dures sécheresses, et c'est alors que le gouvernement burkinabé a reconnu la nécessité d'améliorer la disponi-

bilité de l'eau pour la production agricole et la sécurité alimentaire (Gross et Jaubert, 2019). En conséquence, au moins 500 réservoirs ont été construits entre 1974 et 1987 (Cecchi et al., 2009). Si ces réservoirs étaient surtout prévus pour les petits exploitants, la politique d'irrigation s'est éloignée de ce groupe dans les années 1990 et 2000 pour se tourner vers le développement du secteur privé en ciblant davantage les exploitants commerciaux (Gross et Jaubert, 2019). Depuis la fin des années 2000, le développement de l'irrigation s'est surtout concentré sur la promotion de l'irrigation goutte à goutte peu onéreuse (Gross et Jaubert, 2019). Un exemple réputé de cette tendance est le Jardin Potager Africain (JPA) lancé par l'ICRISAT en 2004 (Gross et Jaubert, 2019). Dans le cadre de ce projet, des kits d'irrigation goutte à goutte tout compris ont été distribués aux petits exploitants du Burkina Faso (Wanvoeke, 2015). Si le JPA semblait être un modèle prometteur pour améliorer la production agricole et la sécurité alimentaire et nutritionnelle, à la fin officielle de sa mise en œuvre, très peu d'agriculteurs ont continué à utiliser les kits, entre autres à cause du manque de services de soutien et de leur incapacité à continuer à faire fonctionner cette technologie (Wanvoeke et al., 2015).

Aujourd'hui, l'irrigation est un des aspects prioritaires du développement agricole au Burkina Faso. L'irrigation a repris une position centrale, notamment lors de la Déclaration de Dakar sur l'irrigation établie en 2013, où les représentants gouvernementaux de six pays sahéliens (Burkina Faso, Tchad, Mali, Mauritanie, Niger et Sénégal) ont appelé au renforcement du rôle de l'agriculture irriguée dans la croissance économique, en faveur de la réduction de la pauvreté rurale, de la sécurité alimentaire et nutritionnelle, et de l'utilisation équilibrée des terres (International Commission on Irrigation and Drainage, 2013). Cet engagement se reflète dans plusieurs politiques et initiatives nationales entreprises par le gouvernement burkinabé. La Stratégie nationale pour le développement durable de l'agriculture irriguée a pour objectif de stimuler le secteur de l'irrigation afin de résoudre les problèmes de pauvreté et d'insécurité alimentaire, et de créer des emplois (Ministère de l'Agriculture et du Développement de l'Irrigation du Burkina Faso, 2015a). De la même manière, la Politique Nationale de l'Eau souligne le potentiel de l'agriculture irriguée, tout en relevant que ce secteur est actuellement inexploité (Ministère de l'Agriculture et du Développement de l'Irrigation du Burkina Faso, 2015b). D'autres documents mettent en lumière l'irrigation : la Stratégie de développement rural du Burkina Faso et la Politique nationale pour la sécurité alimentaire et nutritionnelle, qui visent l'augmentation de la part de l'agriculture irriguée et un meilleur accès à l'irrigation afin que davantage d'agriculteurs puissent participer à cette stratégie d'adaptation (Gouvernement du Burkina Faso, 2013, 2015c).

D'après la FAO, on estime que le Burkina Faso avait un potentiel de 165 000 ha de terres irrigables en 2017 (FAO, s.d.). La même année, 28 % seulement de ce potentiel était utilisé, ce qui correspondait à seulement 8 % du total des terres cultivées dans le pays en 2017 (FAO, s.d. ; FAOSTAT, 2017). Outre les ressources en eaux souterraines, différents types de ressources en eaux de surface grâce auxquelles le potentiel d'irrigation total pourrait être exploité sont disponibles : on peut diviser le Burkina Faso en trois grands bassins, auxquels s'ajoute un quatrième plus petit bassin. Le bassin du Mouhoun, le plus vaste du pays, recouvre 33 % de la superficie territoriale, auquel s'ajoutent le bassin du Comoé, celui du Nakambé et celui du Niger (Boelee et al., 2009). Toutefois, le climat du Burkina Faso est un facteur de limitation à l'irrigation, car il se caractérise par des températures très chaudes, des quantités de précipitations limitées et de forts taux d'évapotranspiration (Lange, 2016). Il n'y a qu'une seule saison des pluies (régime de précipitation unimodal) au Burkina Faso, qui reçoit 80 à 90 % de ses précipitations annuelles entre juin et septembre. La durée de la saison des pluies décroît vers le nord, atteignant 500 mm au nord, où la population se tourne vers le pastoralisme plutôt que l'agriculture. La qualité des sols est un autre facteur de limitation (Boelee et al., 2009) : dans de nombreuses régions du Burkina Faso, les sols, en particulier au nord du pays, sont pauvres en nutriments, sableux et peu profonds, ce qui les rend vulnérables à la sécheresse, à l'érosion et aux crues, en raison de leur faible capacité de retenue d'eau (Boelee et al., 2009 ; USAID, 2017).

8.4.2 Avantages conjoints potentiels

Si elle est développée de manière planifiée et équitable, l'irrigation présente plusieurs avantages conjoints liée à son développement. Elle permet la production de cultures non traditionnelles, à forte valeur ajoutée, telles que les légumes pouvant être vendus au marché. Une production orientée sur la vente dans les marchés permet d'accroître les revenus des agriculteurs, de réduire ainsi la pauvreté,

et d'offrir à ces derniers les moyens de payer des frais d'éducation ou de santé (Boelee et al., 2009). Au Burkina Faso, l'accès à l'irrigation permettrait aux agriculteurs de cultiver des légumes et des fruits pour leur consommation ménagère et pour leur vente sur les marchés durant la saison sèche. De ce fait, l'irrigation permet de diversifier les régimes alimentaires et de sécuriser l'approvisionnement en nourriture lorsque la famine est la plus courante, ce qui contribue ainsi à la préservation de la santé (Boelee et al., 2009 ; Gross et Jaubert, 2019 ; Wanvoeke, Venot, Zwarteveen, et al., 2016). En ce qui concerne les possibilités de travail, l'irrigation peut créer de nouveaux emplois, surtout pour les agriculteurs durant la saison sèche. Selon la taille et le degré de mécanisation d'une installation d'irrigation, une main-d'œuvre est nécessaire à la construction, au fonctionnement et à la maintenance des installations. De ce fait, les infrastructures d'irrigation peuvent engendrer des opportunités de travail aux ménages, qu'ils soient agricoles ou non, durant la saison sèche. Des infrastructures d'irrigation commerciales plus vastes, telles que celles permettant d'irriguer les tomates à l'exportation, peuvent contribuer à la croissance et à la stabilité économique. Par exemple, l'installation d'irrigation à Mogtedo au centre du Burkina Faso a transformé la région en carrefour commercial important où se retrouvent producteurs, coopératives et négociants (Traore et al., 2019). De cette façon, l'irrigation peut également limiter l'exode rural, pratique courante au Burkina Faso, où les jeunes gens notamment émigrent vers les villes ou les pays voisins comme la Côte d'Ivoire. Cela s'applique particulièrement à la saison sèche, lorsque les stocks alimentaires s'amenuisent. Mais l'irrigation n'a pas que des avantages socio-économiques. Les installations d'irrigation, dont les petites digues et les réservoirs, peuvent également faire office d'infrastructures protectrices permettant de contrôler les crues saisonnières : au nord de la ville de Kaya située au centre du pays, la présence d'une douzaine de réservoirs dans un petit bassin versant a réduit le débit de crue de 38 m^3/s à 23 m^3/s, alors que la durée de la crue s'est prolongée, passant d'un jour et demi à quatre jours (Boelee et al., 2009).

8.4.3 Répercussions inopportunes potentielles

L'adoption de l'irrigation peut aussi entraîner des effets négatifs et des répercussions inopportunes dont il faut soigneusement tenir compte lorsque des efforts de développement sont envisagés. Notamment, les systèmes d'irrigation plus vastes s'accompagnent de frais de fonctionnement et d'entretien élevés (De Fraiture et al., 2014). Ces frais sont souvent couverts par une redevance sur l'eau ou par une participation sous forme de main-d'œuvre pour des activités de mise en fonctionnement ou de maintenance. Cependant, tous les agriculteurs ne sont pas en mesure ou disposés à contribuer financièrement ou d'une autre manière au fonctionnement des systèmes d'irrigation. De ce fait, des conflits peuvent surgir entre ceux qui paient pour les captages de l'eau et ceux qui ne les paient pas (De Fraiture et al., 2014 ; Evans et al., 2012). Ce fut le cas lors d'une étude De Fraiture et al. (2014) : des producteurs de légumes captaient de l'eau en amont sans payer de frais, sans contribuer à la maintenance et sans requérir de permission auprès des producteurs de riz, qui eux, se sentaient prioritaires vis-à-vis de l'utilisation de l'eau. De plus, les captages d'eau incontrôlés peuvent également nuire aux moyens de subsistance comme la pêche ou l'élevage. Par exemple, pour les pêcheurs, l'utilisation d'engrais ou de produits agrochimiques et leur accumulation dans des réservoirs pourraient constituer un problème grave, tandis que pour les éleveurs, les infrastructures d'irrigation comme les tuyaux ou les canaux peuvent empêcher le bétail d'accéder aux points d'eau (De Fraiture et al., 2014 ; Evans et al., 2012 ; Korbéogo, 2020). À l'inverse, les agriculteurs recourant à l'irrigation risquent de rencontrer des problèmes liés au bétail errant pouvant endommager les infrastructures d'irrigation et les cultures (Evans et al., 2012). En comparaison aux agriculteurs, les pêcheurs et les éleveurs manquent d'organisation formelle et, de ce fait, sont moins en mesure de résoudre ces problèmes (De Fraiture et al., 2014). L'irrigation peut également avoir des impacts négatifs sur l'environnement : par exemple, du pétrole peut s'écouler des pompes motorisées et accroître la charge de pollution (Evans et al., 2012). L'expansion de l'irrigation risque aussi d'augmenter les besoins en énergie et d'entraîner des émissions de GES issues de l'agriculture plus élevées (Zou et al., 2013), ce qui contrecarrerait les efforts d'atténuation du changement climatique. Enfin, l'irrigation peut avoir un impact négatif sur la santé humaine : la construction de réservoirs d'eau peut créer de nouveaux écosystèmes aquatiques dans des zones auparavant semi-arides ou arides et favoriser le développement de maladies liées à l'eau comme le choléra, la diarrhée ou la schistosomiase (Boelee et al., 2009).

8.4.4 Obstacles à la mise en œuvre

Le développement et la mise en œuvre de l'irrigation sont confrontés à de multiples obstacles et contraintes. En fonction du type d'irrigation et de la taille du système d'irrigation, un soutien institutionnel, technique et financier élevé peut être nécessaire. Tandis que l'irrigation à petite échelle sur quelques hectares de terrain seulement est plus facile à instaurer et à gérer par les agriculteurs eux-mêmes, des superficies plus importantes nécessitent, entre autres, des machines, des connaissances techniques et de la main-d'œuvre, certains de ces facteurs étant potentiellement indisponibles ou trop onéreux (Fossi Tuekam et al., 2012). On estime les coûts du développement de l'irrigation de terrains, comprenant la construction de canaux et de digues, à un montant situé entre 10 000 et 20 000 USD (De Fraiture et al., 2014). Une motopompe simple pouvant irriguer 2 à 3 ha coûte entre 500 et 750 USD, hors frais d'exploitation supplémentaires, principalement pour son alimentation, qui s'élèvent à entre 250 et 350 USD par hectare et par cycle de culture (De Fraiture et al., 2014). Pour les petits agriculteurs de subsistance, il est souvent difficile d'accéder aux crédits nécessaires pour financer ces coûts d'investissements initiaux (Evans et al., 2012). De nombreuses infrastructures d'irrigation plus vastes s'accompagnent de frais pour leurs utilisateurs, mais tous les agriculteurs ne sont pas en mesure ou disposés à payer ces taxes. Par exemple, l'installation d'irrigation à Bagré impose une redevance biannuelle d'environ 23 USD pour un hectare, ce qui peut peser sur les ressources financières des agriculteurs (Korbéogo, 2020).

En outre, il faut tenir compte des obstacles biophysiques à l'installation d'infrastructures d'irrigation, comme la disponibilité en eau. Souvent, les fleuves et les réservoirs s'assèchent plusieurs mois d'affilée, ce qui limite le potentiel d'irrigation. Même les grands barrages sont soumis à de fortes pertes dues à l'évaporation. Par exemple, le barrage de Bagré présente un niveau d'eau relativement élevé de 600 millions de m^3, toutefois, cela représente moins de 30 % de la capacité potentielle du barrage qui est de 2 milliards de m^3 (Kambou, 2019). La pression est non seulement forte sur les ressources en eau, mais aussi sur les terres disponibles, qui deviennent de plus en plus rares en raison de la croissance démographique, des pratiques agricoles non durables et de l'érosion des sols (Nyamekye et al., 2018).

Un autre problème important relatif aux terres est l'insécurité foncière qui perdure au Burkina Faso et qui rend difficile l'accès à la fois aux terres et à l'eau (Evans et al., 2012). Comme l'agriculture irriguée n'est pas courante dans toutes les régions du Burkina Faso, certains agriculteurs ont trop peu d'informations sur l'utilisation correcte des systèmes d'irrigation (Evans et al., 2012). Cela peut entraîner des pertes d'eau, des infestations parasitaires, la lixiviation des engrais et des frais de maintenance élevés des équipements d'irrigation. En outre, le faible niveau d'éducation des petits exploitants, dont nombre d'entre eux sont analphabètes, représente une barrière aux programmes de renforcement des capacités.

Comme le développement, le fonctionnement et la maintenance des systèmes d'irrigation s'accompagnent de coûts financiers élevés, cela peut empêcher certains groupes sociaux d'agriculteurs de participer à la stratégie d'adaptation et de bénéficier de ses avantages. Les facteurs sociaux tels que le sexe, l'état matrimonial, l'âge et la santé continuent d'influencer fortement l'accès des agriculteurs aux biens et aux ressources (Aguilar, 2013; De Fraiture et Giordano, 2014 ; Kakota et al., 2011). Cet accès différencié se traduit également dans l'accès aux systèmes d'irrigation. Cela est particulièrement vrai pour les femmes qui utilisent en majorité davantage les seaux, les bidons ou les tuyaux que leurs homologues masculins, qui sont probablement en meilleure posture et, de ce fait, en possession de motopompes (De Fraiture et Giordano, 2014 ; Wanvoeke, 2015). Toutefois, l'irrigation peut améliorer la vie de différents groupes sociaux, celle des femmes en particulier, qui cultivent traditionnellement des produits maraîchers pour favoriser la sécurité alimentaire, renforcer la santé du ménage et les revenus (Wanvoeke, 2015). De ce fait, si les femmes accèdent également aux équipements d'irrigation, aux formations, aux outils de financement et aux dispositifs techniques associés, l'irrigation peut favoriser l'égalité des sexes.

8.4.5 Besoins en matière de soutien institutionnel

En fonction du type d'irrigation, un soutien institutionnel est nécessaire dans différents domaines. Par exemple, l'irrigation à petite échelle au niveau privé est habituellement mise en œuvre et gérée par les agriculteurs eux-mêmes, qui ont alors seulement besoin de seaux ou de technologies peu onéreuses comme les pompes manuelles ou à pédale. Cependant, ces technologies nécessitent beaucoup de travail. De ce fait, les agriculteurs utilisent de plus en plus les motopompes, surtout celles fonctionnant au diesel et au kérosène, en provenance de Chine (De Fraiture et Giordano, 2014). Ces pompes sont très répandues parmi les petits exploitants en raison de leur prix d'achat et de leurs coûts d'exploitation moins onéreux comparés aux pompes japonaises ou européennes (De Fraiture et Giordano, 2014). Ainsi, les coûts d'investissements initiaux peuvent être limités pour l'irrigation à petite échelle au niveau privé. Mais cela est différent pour les systèmes d'irrigation de plus grande envergure et plus mécanisés. Certains systèmes d'irrigation sont rarement développés hors de la sphère de la coopération au développement en raison de la dépendance de financements externes par des donateurs internationaux (Wanvoeke et al., 2016). C'est, par exemple, le cas de l'irrigation goutte à goutte : des kits ont été fournis aux petits exploitants dans le passé, souvent par le biais d'intermédiaires comme les donateurs ou les ONG, et non pas par vente directe. Ainsi, beaucoup de petits exploitants ont arrêté d'utiliser ces dispositifs dès que le soutien officiel du projet a cessé (Wanvoeke et al., 2016).

8.5 Conclusion

Si l'on tient compte de tous les critères mentionnés, l'irrigation comme stratégie d'adaptation présente un potentiel d'atténuation des risques avec un rapport coût-efficacité moyen et plusieurs avantages conjoints positifs : par ex., la mise en œuvre de l'irrigation permet de diversifier les régimes et de garantir la sécurité alimentaire (tableau 10). Cependant, on constate de nombreux obstacles à la mise en œuvre durable, et un appui institutionnel serait nécessaire dans certains cas pour soutenir l'accès aux infrastructures et leur entretien afin de renforcer leur adoption par les petits exploitants. Dans l'ensemble, les répercussions négatives potentielles de l'irrigation au niveau des eaux souterraines et les écarts environnementaux et sociaux liés doivent soigneusement être pris en considération et traités lorsque le développement de l'irrigation est encouragé.

Tableau 10 : Récapitulatif de l'évaluation multicritère de l'irrigation en tant que stratégie d'adaptation.

Atténuation des risques	Gradient de risque	Rapport coût-efficacité	Développement	Avantages conjoints potentiels	Répercussions inopportunes potentielles	Obstacles à la mise en œuvre	Besoins en matière de soutien institutionnel
Moyenne à forte	Indépendance vis-à-vis des risques	Moyen	Fort	Forts	Fortes	Moyens à forts	Forts

Chapitre 9 – Gestion intégrée de la fertilité des sols

9.1 Contexte et description de la technologie

Au Burkina Faso, en raison de la surexploitation des ressources terriennes et de l'eau du sol entraînée par la croissance démographique et la demande en nourriture associée, les sols s'appauvrissent et perdent de leur fertilité. Des méthodes de gestion inadéquates (feux de brousse) provoquent souvent l'érosion des sols et la perte de la couche arable qui s'ensuit, ce qui limite davantage la disponibilité de terres adaptées à la production agricole (Nyamekye et al., 2018). La fréquence accrue des sécheresses nuit à la qualité des sols, ce qui aggrave leur dégradation et réduit leur fertilité.

La gestion intégrée de la fertilité des sols, communément appelée GIFS, permet de sécuriser la productivité agricole sous ces conditions. Elle est encouragée depuis plusieurs décennies au Burkina Faso (Zougmoré et al., 2004). La GIFS est considérée comme un facteur majeur qui permet d'améliorer la productivité médiocre des sols et des cultures en Afrique. Elle est définie comme un « ensemble de méthodes de gestion de la fertilité des sols, qui comprend nécessairement l'utilisation d'engrais, d'intrants biologiques et de germoplasmes améliorés, combinés au savoir sur l'adaptation de ces méthodes aux conditions locales, dans le but de maximiser l'efficacité agronomique des nutriments appliqués et d'améliorer la production agricole. Tous les intrants doivent être gérés selon des principes agronomiques solides. » (Vanlauwe et al., 2010). La GIFS ne se caractérise pas par des méthodes culturales spécifiques. Il s'agit plutôt d'une « approche ouverte qui consiste à combiner les technologies disponibles tout en préservant la qualité des sols et en soutenant leur productivité (Sanginga et Woomer, 2009). La GIFS nécessite des interventions ajustées aux conditions biophysiques et socio-économiques prévalentes au niveau de l'exploitation et de la parcelle (Vanlauwe et al., 2015). Comme cela est courant dans les régions arides, la GIFS au Burkina Faso est basée sur les objectifs suivants : 1) maximiser le captage de l'eau et réduire le ruissellement, 2) réduire l'érosion de l'eau et du vent, 3) gérer les ressources biologiques limitées disponibles et 4) appliquer les engrais minéraux de manière stratégique (Sanginga et Woomer, 2009). Parmi les interventions adaptées, on peut citer les zaï, les demi-lunes, les cordons pierreux, les diguettes filtrantes, les bandes enherbées et le paillage. Ci-après, nous allons décrire certaines de ces interventions de façon plus détaillée.

Au Burkina Faso, le **zaï** et les plantations en **demi-lunes** sont des techniques très répandues pour collecter l'eau et la retenir pour la production du sorgho et du millet (Sawadogo, 2011). Signifiant « préparer à l'avance » en langue nationale Mooré, le zaï est une adaptation locale de l'agriculture de conservation servant à réhabiliter des terres fortement dégradées. Au début de la saison sèche, les agriculteurs creusent de petits trous de semis (20-40 cm de diamètre, 10-30 cm de profondeur et 40-150 cm d'intervalle) qui permettent de capter les eaux de pluie et d'accroître ainsi l'humidité du sol (Abdoussalam et al., 2017 ; Savadogo et al., 2011 ; Schuler et al., 2016 ; Techniques et al., s.d.). Les demi-lunes fonctionnent de manière similaire, mais les trous creusés mesurent environ 2 m de diamètre, ont 15-20 cm de profondeur, et sont réalisés en forme de croissant sur une distance d'environ 8 m (Savadogo et al., 2011). Ces deux bonnes pratiques visent à accumuler l'eau avant de procéder au semis afin d'accroître l'humidité du sol. L'ajout de compost, de résidus végétaux et de fumier améliore davantage la performance de ces bonnes pratiques (Sawadogo, 2011). Aussi, une méthode appelée micro-dosage, qui consiste à ajouter de petites quantités d'engrais minéraux aux points de semis dans les champs où l'on pratique la conservation de l'eau, est couramment utilisée au Sahel (Sanginga et Woomer, 2009).

Souvent, les demi-lunes sont construites avec des **tranchées**, ce qui permet également de réhabiliter les sols. Creusées juste derrière les demi-lunes, les tranchées mesurent généralement 5 m de longueur, environ 30 cm de largeur et 30 cm de profondeur (Abdoussalam et al., 2017). Parfois, des matières organiques sont rajoutées aux tranchées. Les tranchées sont conçues pour réduire le ruissellement de l'eau et faciliter sa recharge dans le sol. Pour un effet similaire, les cordons de pierres sont

une mesure antiérosive qui consiste à empiler des pierres à faible distance le long des contours naturels du terrain, afin de réduire le flux de ruissellement de l'eau, d'améliorer son infiltration et de réduire l'enlèvement de la couche arable par le vent et l'eau. En général, un cordon pierreux présente une hauteur de 25 cm et une largeur de 35-40 cm à la base. Nombre d'agriculteurs au nord-ouest du Burkina Faso recourent à une combinaison de zaï et de cordons pierreux, de compost et de fumier sur leur exploitation afin d'accélérer la régénération de la végétation (Sawadogo, 2011).

Par sa capacité à assurer une utilisation plus efficace de l'eau, à empêcher l'érosion et à restaurer les sols dégradés, le potentiel de la GIFS s'avère intéressant pour l'adaptation au changement climatique. Au Burkina Faso, ces mesures ont fait leur preuve en améliorant la structure des sols, le rendement des cultures, la recharge en eaux souterraines, l'infiltration des eaux de pluie et la densité de plantation (Sawadogo, 2011 ; Zougmore et al., 2003). L'association des intrants biologiques aux engrais permet de réduire la sensibilité de la production agricole aux impacts climatiques. Une étude au Burkina Faso semi-aride a montré qu'une saison des pluies irrégulière conduisait à des périodes de stress hydrique fréquentes. Les cordons pierreux ou les bandes enherbées associés au compost ont réduit le ruissellement, augmenté le stockage de l'eau du sol et la production de biomasse de sorgho (Zougmore et al., 2003). Promouvoir l'alternance et la rotation des cultures comme l'encourage la GIFS permet de réduire les risques de mauvaises récoltes. Enfin, l'augmentation de la productivité agricole réalisée par la GIFS contribue à la sécurité alimentaire et renforce ainsi la résilience des moyens de subsistance des communautés rurales (Roobroeck et al., 2015). Lamachere et Sewantie (1990), notamment, ont constaté que les cordons pierreux pouvaient accroître la production agricole de 30 à 80 % au cours des années marquées par une bonne répartition des précipitations.

9.2 Évaluation biophysique du potentiel d'atténuation des risques

L'impact de la mise en œuvre de la GIFS sur les rendements de sorgho au Burkina Faso est simulé grâce au modèle cultural DSSAT introduit au chapitre 3.3. Pour notre étude de cas servant à présenter le potentiel d'atténuation des risques de la GIFS, nous recourons à la technologie des zaï. Comme cette stratégie d'adaptation ne fait pas partie des options directement disponibles dans le modèle DSSAT, elle est simulée grâce à des valeurs représentatives. Sur la base de données expérimentales et régionales sur le terrain, nous fixons des conditions de sols initiales pour les zaï correspondant à une disponibilité en eau de 60 % en raison des ressources limitées en eau (sur 100 % de disponibilité en eau nécessaire pour atteindre les rendements potentiels) et à une teneur en azote de 62 kg/ha. Cette dernière estimation repose sur l'hypothèse que 2 à 3 tonnes/ha environ de compost et de fumier sont appliqués dans les trous de zaï (Fatondji et al., 2012 ; Faye et al., 2018).

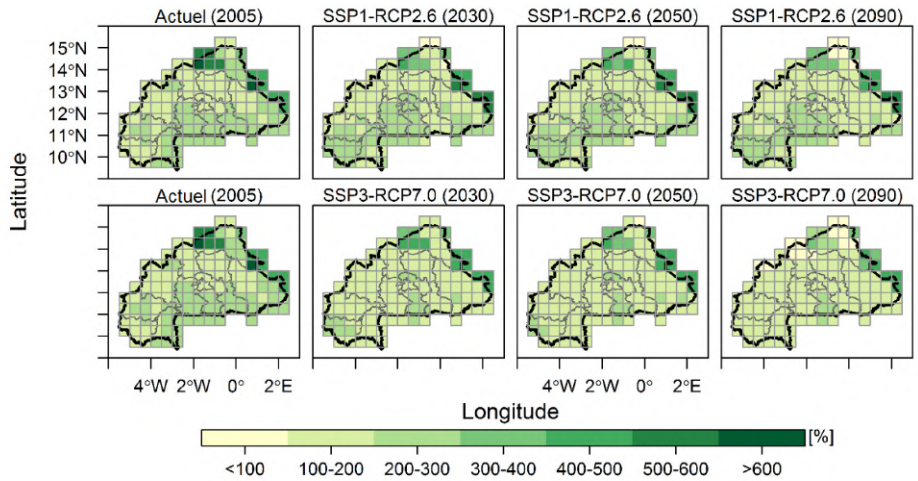


Figure 52 : Répartition spatiale des impacts de l'utilisation de la gestion intégrée de la fertilité des sols sur les rendements (%) du sorgho au Burkina Faso.

Comme on peut le voir à la figure 52, la stratégie des zaï appliquée dans le cadre de la GIFS devrait entraîner une augmentation importante des rendements de sorgho, jusqu'à près de 600 %, sur l'ensemble des régions du Burkina Faso. L'impact le plus fort est réalisé au nord du Burkina Faso en vertu des deux scénarios d'émissions. Si l'on compare les deux scénarios, la stratégie devrait obtenir les meilleurs résultats en vertu du scénario de réduction des émissions SSP1-RCP2.6 au cours du prochain siècle, surtout dans la partie sud du Burkina Faso. Toutefois, la technologie des zaï devrait produire de forts impacts positifs sur les rendements de sorgho en vertu des deux scénarios, ce qui laisse supposer que cette pratique est une stratégie d'adaptation très prometteuse en vertu de tous les scénarios de changement climatique pour l'avenir.

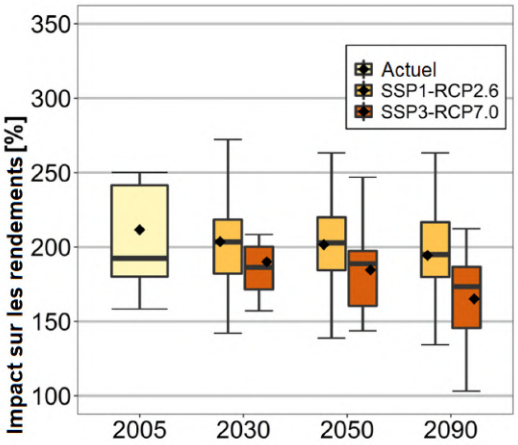


Figure 53 : Intercomparaison des impacts sur les rendements du sorgho à différentes périodes au niveau national.

La figure 53 montre la variabilité des impacts sur les rendements à différentes périodes au niveau national. Si l'on compare les deux scénarios, SSP1-RCP2.6 suggère que les impacts types sur les rendements sont maintenus au fil du temps, tandis que SSP3-RCP7.0 présente une tendance à la baisse. Néanmoins, au niveau régional, les deux scénarios d'avenir suggèrent une augmentation d'au moins 100 % des rendements actuels dans un scénario comprenant l'application de la technologie zaï en comparaison à un scénario ne la comprenant pas. La tendance positive générale se maintient, même si l'on désagrège les résultats au niveau régional (Figure 54). Les résultats montrent que la technologie des zaï aura des impacts positifs de 100 % à 300 % sur les rendements du sorgho dans les deux scénarios et pour toutes les périodes à venir. Dans la plupart des régions, la technologie des zaï est plus performante en vertu de SSP1-RCP2.6 que de SSP3-RCP7.0. Les résultats en vertu de SSP3-RCP7.0. pour 2090 présentent les gains de rendement les plus faibles dans la plupart des régions.

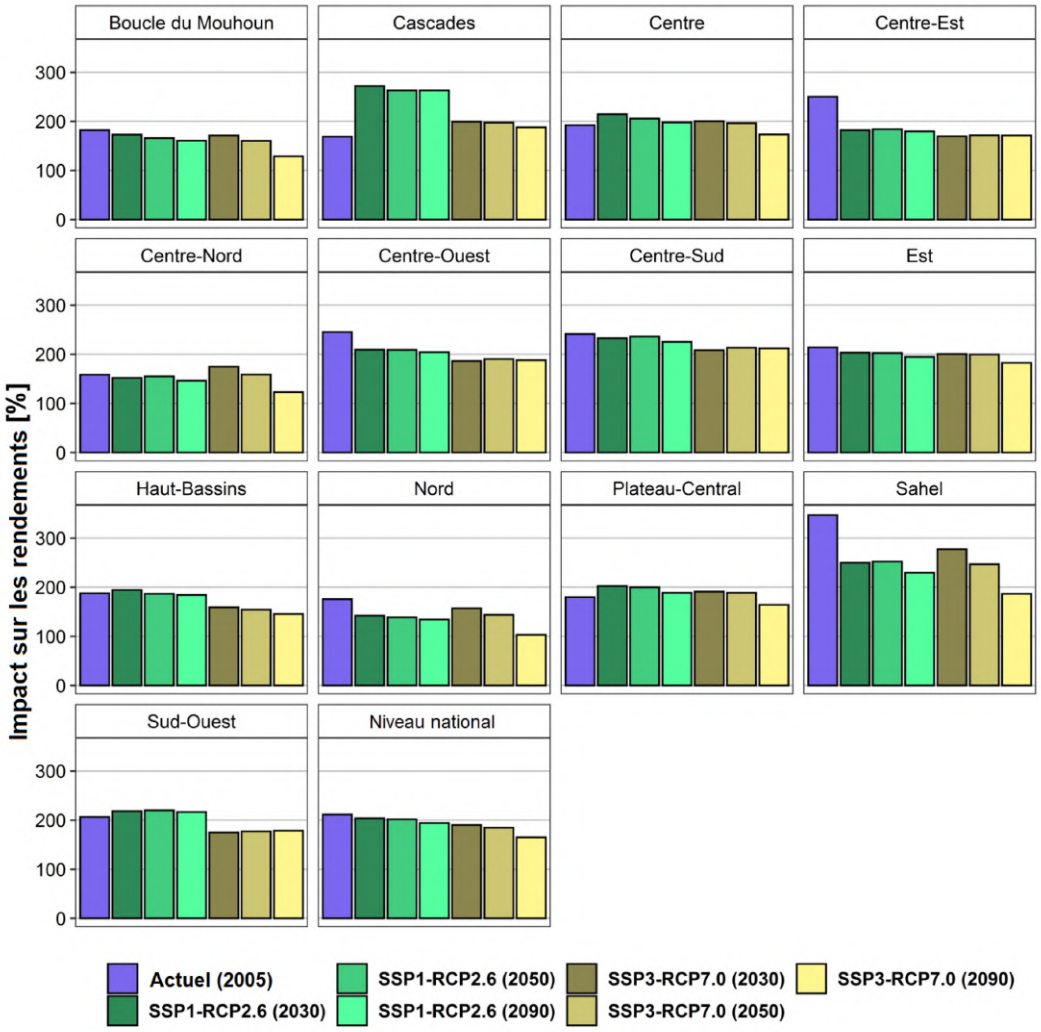


Figure 54 : Désagrégation régionale des impacts sur les rendements avec l'utilisation de la gestion intégrée de la fertilité des sols suivant différents scénarios et périodes.

9.3 Analyse coûts-avantages de la gestion intégrée de la fertilité des sols pour la production de sorgho

Afin d'analyser la faisabilité économique de la technologie GIFS comme stratégie d'adaptation, nous comparons les coûts et les avantages d'un système de production de sorgho dans la région du Plateau Central ayant adopté la technologie de la GIFS à un système d'exploitation conventionnel sans GIFS. Nous utilisons un cas de GIFS basé sur une combinaison de trous de zaï, de digues, de barrages, de bassins d'infiltration et de tranchées autour des champs servant de techniques de conservation de l'eau et des sols. Nous comparons ces résultats en vertu des deux scénarios de changement climatique SSP1-RCP2.6 et SSP3-RCP7.0 projetés jusqu'en 2050 en se basant sur un scénario référentiel décrivant la situation actuelle.

9.3.1 Référentiel et scénarios

Le référentiel et les scénarios sont définis ainsi :

Référentiel (sans mesures, sans impacts climatiques) : Production pluviale du sorgho dans les conditions climatiques et technologiques actuelles dans la région du Plateau Central.

Pas d'adaptation (pas de mesures, impacts du changement climatique en vertu de SSP1-RCP2.6 et de SSP3-RCP7.0) : Production pluviale du sorgho sans recours à la GIFS. Les revenus du marché et les coûts de production du système sont extrapolés jusqu'en 2050 en présupposant des impacts du changement climatique sur les rendements tels qu'ils sont simulés dans le modèle DSSAT (voir chapitre 3.3) en vertu des scénarios SSP1-RCP2.6 et SSP3-RCP7.0.

Adaptation (mesures, impacts du changement climatique en vertu de SSP1-RCP2.6 et de SSP3-RCP7.0) : Production pluviale du sorgho et recours à la GIFS. Les revenus du marché et les coûts de production du système sont extrapolés jusqu'en 2050 en présupposant des impacts du changement climatique sur les rendements similaires à ceux du scénario « sans adaptation » en vertu des scénarios SSP1-RCP2.6 et SSP3-RCP7.0.

9.3.2 Données de l'étude

L'ACA de la technologie GIFS est calculée à partir des données détaillées de production des exploitations et de leurs données économiques recueillies auprès de dix fermes de la région du Plateau Central au centre du Burkina Faso. Les fermiers soumis à l'étude ont installé des digues, des barrages, des bassins d'infiltration et des tranchées autour de leurs champs afin de conserver les sols et l'eau. En outre, chaque année, les agriculteurs creusent des trous de zaï afin de collecter l'eau et les nutriments du compost ou du fumier (voir 9.1 pour une définition plus détaillée). Chacun de ces agriculteurs cultive du sorgho sur une surface d'environ deux hectares en recourant à la GIFS. Toutefois, conformément à la situation économique moyenne des fermes et pour une meilleure comparaison de tous les scénarios, nous analysons les revenus moyens du marché et les coûts de production pour un hectare.

Les agriculteurs participant à l'étude devaient fournir des informations détaillées sur les coûts de l'installation de la technique, sur les rendements avant et après l'adaptation, ainsi que sur les prix du marché. Afin de déterminer les variations ultérieures des revenus du marché et des coûts de production, les points suivants sont pris en compte pour un fermier moyen adoptant la technologie.

- Les principaux facteurs de coûts de l'ACA sont les coûts de main-d'œuvre pour l'installation de la technologie de la GIFS (digues, bassins et tranchées) et pour la préparation des trous de zaï. D'après les fermiers participant à l'étude, les digues, les barrages, les bassins et les tranchées doivent être renouvelés tous les 15 ans ; les trous de zaï doivent être creusés chaque année. Pour calculer les coûts de main-d'œuvre supplémentaires associés, nous avons utilisé la valeur moyenne entre le tarif journalier des activités extérieures à la ferme obtenu à partir de l'étude, qui est de 929 francs CFA (~ 1,65 USD[15]), et le tarif journalier de 2000 francs CFA (~ 3,5 USD) payé couramment pour un travail comparable dans la région et parvenons au tarif de 1 464 francs CFA (~ 2,6 USD) par jour (WASCAL, 2020a).
- Les coûts d'opportunité sont aussi un facteur de coût de production important, il s'agit du revenu que les agriculteurs auraient généré par d'autres activités au moment où ils ont installé la technologie de la GIFS. La plupart de ces activités sont extérieures à celles de la ferme, comme la fabrication ou le commerce de briques, mais elles peuvent aussi être réalisées dans d'autres exploitations. Comme cela est indiqué dans l'étude, nous nous basons sur le tarif journalier moyen pour des activités extérieures à la ferme de 929 francs CFA (~ 1,65 USD) afin de calculer les coûts d'opportunité issus des pertes de revenus liées à la mise en place de la GIFS.
- Comme les digues, les barrages, les bassins et les tranchées sont réalisés à partir de matériaux présents dans la nature (sable et cailloux ramassés dans les champs), nous ne tenons pas compte de coûts supplémentaires à cet égard. Cela s'applique aussi à l'équipement utilisé pour la construction. La plupart des outils sont

15 Tous les taux de change ont été récupérés le 18.3.2021 sur : https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/procedures-guidelines-tenders/information-contractors-and-beneficiaries/exchange-rate-inforeuro_fr

nécessaires dans d'autres activités de la ferme et, de ce fait, n'engendrent pas de coûts supplémentaires pour l'adaptation, ils ne sont d'ailleurs utilisés que tous les 15 ans (sauf les outils permettant de creuser les trous de zaï).
- Cependant, la hausse des rendements produite par une meilleure gestion de la fertilité des sols et de l'eau entraîne une charge de travail plus importante pour les récoltes et la conservation des semences. Les coûts de main-d'œuvre liés à ces activités sont donc ajustés chaque année en se servant du ratio entre les rendements avec adaptation et les rendements référentiels avant l'adaptation (WASCAL, 2020a).
- Pour calculer les revenus, nous utilisons un prix du marché de 165 francs CFA (~ 0,30 USD) pour un kilogramme de sorgho. Ce prix correspond à la valeur moyenne du prix du marché du sorgho indiqué dans l'étude sur les ménages ; celle-ci est ajustée pour tenir compte du niveau moyen du cours du marché des cinq dernières années dans la région (FEWS NET, 2020). D'après les agriculteurs interviewés, les rendements de sorgho ont augmenté de 97 kg par hectare durant la première année d'adaptation et de 20 kg de plus durant la deuxième. À partir des revenus acquis par l'excédent, nous avons extrapolé les revenus de marché supplémentaires et les coûts de main-d'œuvre additionnels jusqu'en 2050 (WASCAL, 2020a).

9.3.3 Suppositions

Pour compléter les informations des données de l'étude, des suppositions complémentaires sur les effets des progrès technologiques, de l'inflation et du changement climatique ont dû être posées :
- Les développements des rendements induits par le changement climatique dans la région du Plateau Central sont dérivés des projections du PIK en vertu des scénarios SSP1-RCP2.6 et SSP3-RCP7.0 avec un effet positif sur les rendements grâce à l'adaptation (voir aussi le chapitre 7.2).
- Nous supposons que la productivité des agriculteurs participants augmente de 2,4 % par an grâce au changement technologique indépendant. Il s'agit d'une extrapolation des hausses de rendements de sorgho entre 1984 et 2010 dans la région cible (WASCAL, 2020b).
- Pour représenter le taux d'inflation, nous avons calculé le taux de croissance exponentiel du PIB par habitant au Burkina Faso ces 30 dernières années, sa valeur est de 3,88 % (FAOSTAT, 2021).

9.3.4 Résultats

Les résultats de l'ACA montrent que la mise en œuvre de techniques de GIFS serait profitable aux agriculteurs, car elle présente un retour positif sur un investissement relativement limité (Figure 55). Cela s'applique aux deux scénarios de changement climatique : toutefois, le scénario en vertu de SSP3-RCP7.0 présente de bien meilleurs résultats en raison de l'inclusion des effets additionnels du changement climatique sur les rendements. En particulier, il convient de souligner les résultats suivants :
- Si l'on part d'une valeur actuelle nette (VAN) de -35,830 francs CFA (~ -63 USD), le flux de trésorerie net des agriculteurs est déjà positif dès la deuxième année. Les coûts d'investissement initiaux comparativement bas conduisent à une hausse de la VAN dès le début, ce qui entraîne une VAN positive en vertu du scénario SSP1-RCP2.6 à partir de 2030. En vertu du scénario SSP3-RCP7.0, la VAN devient déjà positive en 2026.
- La VAN continue d'augmenter. Ce n'est qu'en 2035 et plus tard encore en 2050 que la réinstallation des technologies de GIFS conduit à un flux de trésorerie négatif en vertu des deux scénarios de changement climatique, ce qui réduit temporairement la VAN. Cependant, à partir de l'année suivante, elle augmente à nouveau.
- En 2050, la VAN passe à 77 142 francs CFA (~ 136 USD) en vertu de SSP1-RCP2.6 et à 175 604 francs CFA (~ 310 USD) en vertu de SSP3-RCP7.0.

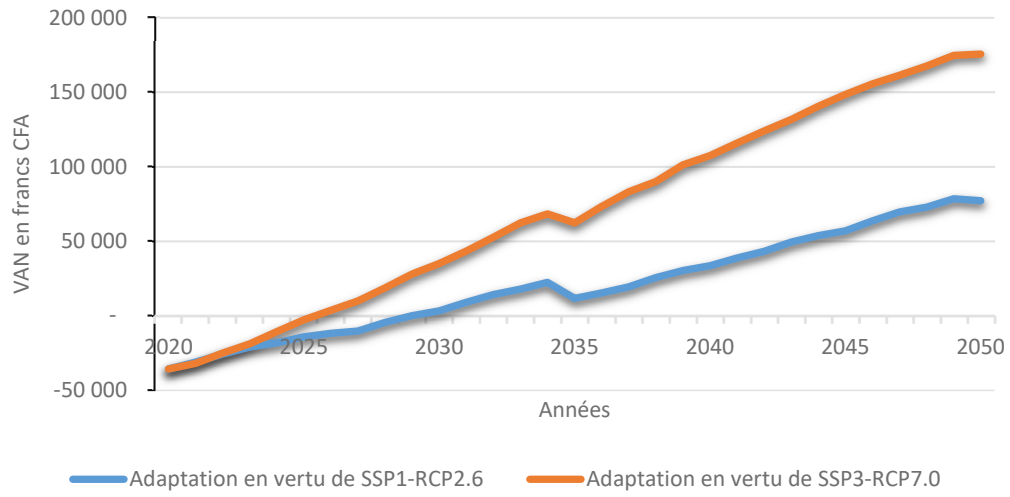


Figure 55 : Développement de la valeur actuelle nette dès la transition à la culture du sorgho associée à la GIFS.

Les résultats des calculs suggèrent que les investissements des agriculteurs dans les technologies de GIFS sont rentables au bout de dix ans en vertu du scénario SSP1-RCP2.6 et au bout de six ans seulement en vertu de SSP3-RCP7.0. Les seuils de rentabilité entre les coûts nets accumulés et les bénéfices nets sont donc respectivement atteints en 2030 et en 2026. Par conséquent, le taux de rendement interne (TRI) est positif et rapporte 14 % pour un effort d'adaptation en vertu de SSP1-RCP2.6 et 23 % pour un effort d'adaptation en vertu de SSP3-RCP7.0. En supposant une perspective de rentabilité globale, souvent prise pour une ACA locale, tout TRI supérieur à 6,0 % est considéré comme un investissement rentable. Comme c'est le cas pour les deux scénarios d'avenir (SSP1-RCP2.6 et SSP3-RCP7.0), on peut considérer que l'investissement dans les techniques permettant d'améliorer la fertilité des sols pour la culture du sorgho est avantageux. Le rapport avantages-coûts (A/C) de l'investissement pour l'adaptation le confirme par les résultats suivants : il est de 1,29 en 2050 en vertu de SSP1-RCP2.6 et de 1,65 en vertu de SSP3-RCP7.0 (Tableau 11).

Tableau 11 : Récapitulatif des principaux indicateurs ACA pour la transition à la culture du sorgho avec la GIFS.

	Adaptation SSP1-RCP2.6	Adaptation SSP3-RCP7.0
TRI	14,68 pour cent	23,28 pour cent
VAN	77 142 francs CFA (= 136 USD)	175 604 francs CFA (= 310 USD)
A/C	1,29	1,65

9.4 Évaluation qualitative de la gestion intégrée de la fertilité des sols

9.4.1 Potentiel de développement

Pour réduire les risques de dégradation des sols, les agriculteurs du Burkina Faso pratiquent la GIFS depuis des décennies, en particulier dans les régions centre et nord du pays (Zougmoré et al., 2004). Les zaï et les demi-lunes sont surtout pratiqués sur les sols dégradés et encroûtés des climats sahéliens, sud sahéliens et soudanais du nord qui connaissent des précipitations allant de 400 à 600 mm par an. Ils sont courants au Sahel, dans les régions du nord, du centre nord et du plateau central, ainsi que pour les terres destinées aux cultures pluviales. Les cordons pierreux et les diguettes filtrantes sont adoptés dans tout le pays pour résoudre les problèmes de ravinement, surtout dans les régions Sahel, Nord, Centre Nord, Centre et Plateau Central, sur les terres pluviales et les plaines

cultivées (CILSS, 2012). Les bandes enherbées et le paillage sont des techniques pratiquées dans toutes les zones climatiques du Burkina Faso et sur tous les types de sols pour permettre leur régénération (Government of Burkina Faso, 2011).

Le soutien important des donateurs, des ONG et des politiques nationales en faveur de la GIFS a conduit à une vaste diffusion de cette technologie (Kabore-Sawadogo et al., 2013). Outre ce soutien extérieur, les agriculteurs ont perfectionné les techniques de collecte de l'eau existantes et se sont mis à partager entre eux ces bonnes pratiques. Yacouba Swadogo, un agriculteur de Gourcy, a notamment amélioré l'usage traditionnel des zaï dans les années 1980 et réussi à stopper la désertification dans son village. Depuis lors, les agriculteurs du Burkina Faso sont parvenus à transformer de vastes zones du paysage aride en terres agricoles fertiles grâce à la GIFS. Dans certains villages, les techniques de collecte de l'eau sont pratiquées sur jusqu'à 90 % des terres cultivées (Kabore-Sawadogo et al., 2013). Sawadogo (2011) souligne que dans les provinces de Yatenga, de Zondoma, de Lorum et de Passore au nord du Burkina Faso, tous les ménages recourent au zaï sur au moins une exploitation. Dans la région du Plateau central, on estime que la GIFS a permis de réhabiliter 200 000 à 300 000 ha de terrains et de produire 80 000 à 120 000 tonnes de céréales par an au cours des trois dernières décennies (Reij et al., 2009).

Face à la couverture plutôt limitée de l'irrigation, l'agriculture pluviale joue encore un rôle important au Burkina Faso. Selon la FAO, 28 % seulement des terres irrigables du Burkina Faso ont été irriguées en 2017, ce qui représente 8 % des terres cultivables totales du pays (FAO, s.d. ; FAOSTAT, 2017). De ce fait, les propriétés de la GIFS en matière de collecte de l'eau offrent aux agriculteurs une méthode peu onéreuse pour utiliser plus efficacement l'eau de pluie et limiter ainsi les impacts des sécheresses récurrentes. Si elles sont déjà très répandues dans les régions au centre et au nord du Burkina Faso, toutes les régions du pays pourraient bénéficier de technologies localement spécifiques pour gérer l'humidité et la fertilité des sols afin de faire face au stress climatique (Kabore-Sawadogo et al., 2013).

9.4.2 Avantages conjoints potentiels

Les effets de la GIFS sur la structure des sols, les rendements agricoles et la recharge en eaux souterraines engendrent des avantages conjoints non négligeables en ce qui concerne la restauration des sols, la sécurité alimentaire et la réduction de la pauvreté. Comme nous l'avons mentionné précédemment, la GIFS a permis de réhabiliter de vastes zones de terres dégradées au Burkina Faso. Parmi les avantages conjoints environnementaux, on peut citer l'augmentation de la diversité végétale et des eaux souterraines (Reij et al., 2005 ; Roose et al., 1999). La mise en œuvre de la GIFS présente également un fort potentiel d'atténuation du changement climatique du fait de la réduction des gaz à effet de serre (GES) grâce à l'absorption des engrais azotés et à la séquestration de carbone qui en résultent (Roobroeck et al., 2015).

La hausse de la production agricole engendrée par la GIFS contribue à la sécurité alimentaire du pays. Une étude (Sawadogo, 2011) réalisée au nord-ouest du Burkina Faso a montré qu'au cours des années marquées par des précipitations moyennes, les rendements agricoles ont augmenté de 63 à 74 % dans les fermes des villages participants où l'on a eu recours aux cordons pierreux et de plus de 100 % dans celles recourant au zaï. En outre, la GIFS peut avoir un impact positif sur la disponibilité de fourrage pour le bétail en raison de la régénération de la végétation et de l'augmentation des résidus végétaux. Dans la région de Bam se situe un village où les troupeaux n'ont plus à être déplacés en raison de l'abondance de résidus agricoles et de graminées vivaces (Reij et al., 2005).

Dans l'ensemble, ces facteurs peuvent entraîner une réduction importante de la pauvreté rurale qui résulte souvent en une diminution de l'émigration. Reij et al. (2005) ont fait état d'une baisse de la pauvreté de 50 % dans les villages du Plateau Central qui se sont lancés dans la mise en œuvre de la GIFS depuis les années 1980, ainsi que d'une augmentation de 25 % de la population entre 1985 et 1996 en raison de cette mise en œuvre.

9.4.3 Résultats négatifs potentiels

Les publications sur le sujet font état de très peu de répercussions inopportunes. Roose et al. (1999) signalent le possible engorgement et le lessivage des nutriments des trous de zaï causés par des excédents de pluies, comme on l'a observé dans le cas de la production de céréales au Cameroun.

Les besoins élevés en main-d'œuvre liés à la mise en œuvre de la GIFS peuvent avoir des effets secondaires négatifs. Une étude au Tigré en Éthiopie a révélé que la GIFS n'apportait pas de revenus au ménage, car le travail nécessaire intense pour établir la GIFS absorbe la main-d'œuvre qui pourrait être productive dans un autre domaine (Hörner et Wollni, 2021).

Dans l'ensemble, ces quelques mentions limitées de répercussions inopportunes potentielles suggèrent que la possibilité d'élever la GIFS en stratégie d'adaptation au Burkina Faso est forte.

9.4.4 Obstacles à la mise en œuvre

Les chercheurs ont bien mis en lumière le fort potentiel de la GIFS à améliorer la fertilité des sols et à ainsi accroître la productivité alimentaire (Kabore-Sawadogo et al., 2013 ; Mugwe et al., 2019 ; Sanginga et Woomer, 2009). Toutefois, il existe divers obstacles à l'adoption de la GIFS dont il faut tenir compte lorsque l'on souhaite encourager la stratégie d'adaptation.

L'un des obstacles majeurs à la mise en œuvre de la GIFS est représenté par ses besoins intensifs en main-d'œuvre. Dans le cas des zaï par exemple, on estime que le nombre d'heures de travail exigé varie entre 300 (Roose, 1999) et 600 heures environ par hectare, pour ce dur labeur consistant à creuser des trous, avec un supplément de 300 heures pour la production, le transport et la répartition du fumier dans les trous (Kabore-Sawadogo et al., 2013). Cela peut avoir des répercussions sur les revenus des agriculteurs.

En outre, la GIFS repose sur un savoir intensif, et beaucoup de petits exploitants manquent d'informations adaptées sur la mise en œuvre de la GIFS et sur les avantages de cette stratégie d'adaptation (Mugwe et al., 2019). De plus, l'accès à l'équipement pour l'extraction et le transport (charrettes, pioches, brouettes) et aux intrants requis (engrais minéraux, compost, fumier, gravats, paille), ainsi que l'accès aux marchés et aux ressources financières peuvent également entraver l'adoption de la GIFS au Burkina Faso (Roobroeck et al., 2015 ; Sanginga et Woomer, 2009 ; Savadogo et al., 2011 ; Vanlauwe et al., 2010).

Les autres obstacles sont notamment les relations insuffisantes entre la recherche, la vulgarisation et le monde agricole, l'insécurité foncière, les questions sexospécifiques et les technologies qui ne sont pas assez adaptées aux conditions agricoles (Sanginga et Woomer, 2009 ; Vanlauwe et al., 2010).

9.4.5 Besoins en matière de soutien institutionnel

La GIFS est basée sur les connaissances et nécessite l'accès non seulement aux intrants et à la main-d'œuvre, mais aussi à des informations suffisantes permettant aux agriculteurs de prendre de meilleures décisions en matière de gestion des sols d'après un ensemble de principes souples constituant la GIFS. Reconnaître la dégradation des sols comme un risque pour la production agricole est une première étape importante. Au Burkina Faso, par exemple, Sidibé (2005) a trouvé que l'éducation et la perception de la dégradation des sols étaient des facteurs importants à l'adoption des zaï et des cordons pierreux. Savoir comment correctement mettre en œuvre la GIFS est également un prérequis (Savadogo et al., 2011). Le gouvernement devrait donc mettre l'accent sur l'éducation des agriculteurs, la vulgarisation des causes et des effets de la dégradation des sols et renforcer la prise de conscience et la formation sur la GIFS (Partey et al., 2018). Les services de vulgarisation et les associations d'agriculteurs existants sont des structures utiles pour aider les agriculteurs à adopter les techniques de GIFS. En outre, les négociants en produits agricoles et les agences de petits planteurs sont bien placés pour mener la diffusion et la vulgarisation (Sanginga et Woomer, 2009). Pour assurer la promotion efficace de la GIFS, les recommandations devraient être bien ciblées sur le contexte local en tenant compte des conditions biophysiques spécifiques au site et socio-économiques qui déterminent la performance technique et la faisabilité de la GIFS (Vanlauwe et al., 2015).

Aussi, des politiques stratégiques sont nécessaires pour stimuler la réponse institutionnelle et commerciale envers la GIFS et les excédents agricoles qui en résultent (Sanginga et Woomer, 2009). Les politiques visant le renforcement de l'utilisation durable ainsi que la réhabilitation des sols dégradés et les mécanismes nécessaires pour les mettre en œuvre et les évaluer pourraient promouvoir l'adoption de la GIFS (Vanlauwe et al., 2010). Au Burkina Faso, plusieurs initiatives encouragent déjà l'adoption de la GIFS, notamment le Plan d'Action pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (PAGIRE) (MEA, 2016) et plusieurs projets mis en œuvre par la Fédération Nationale des Groupements Naam, créée en 1967, qui encourage

l'adoption et le développement des zaï, des diguettes filtrantes, des cordons pierreux et des demi-lunes. L'Association Zoramb Naagtaaba (AZN), au travers des fermes des terres vertes, s'engage en faveur de l'expansion du système de bocage depuis 1988. La Réorganisation des terres agraires (ALR), introduite en 1984, a représenté une étape importante pour encourager les agriculteurs à investir dans leurs terres et à mettre en œuvre la GIFS. À la même époque, différents projets et programmes ont été lancés dans le but de réhabiliter la capacité productive des terres, par le biais d'un meilleur contrôle des précipitations et du ruissellement, ainsi que par la gestion améliorée de la fertilité des sols et la reforestation. On peut citer notamment le Programme d'Action National de Lutte Contre la Désertification, le Programme Sahel Burkina (PSDB9), la lutte contre la désertification au Burkina (LUCODEB) et le Programme national du secteur rural (Nyamekye et al., 2018 ; Reij et al., 2005).

Les politiques qui encouragent les programmes de crédits, de prêts ou de subventions soutenant la production d'intrants biologiques pourraient traiter le problème du manque d'accès aux équipements et aux intrants (Roobroeck et al., 2015). Au Burkina Faso, le recours aux systèmes de « warrantage », des systèmes marketing bien établis pour les agriculteurs, pourrait représenter une option permettant aux agriculteurs d'accéder à des crédits pour la mise en œuvre de la GIFS. Un meilleur accès au crédit et des marchés équitables de produits de base augmentent la productivité et les retours sur investissements, les agriculteurs profitant des excédents agricoles (Sanginga et Woomer, 2009).

Pour le développement à grande échelle de la GIFS, il est nécessaire d'investir dans de vastes partenariats. La recherche sur les pratiques et leur diffusion doivent être renforcées. Le secteur public peut jouer un rôle important en créant une plateforme réunissant et reliant les partenaires clés dans le domaine de la recherche, de l'éducation, de la vulgarisation, les fournisseurs de services et d'intrants, ainsi que les agriculteurs pour faciliter la mobilisation et le renforcement des capacités des fermiers, et rapprocher ces derniers des crédits et des marchés (Stewart et al., 2020).

La valeur ajoutée du soutien institutionnel pour le développement des bonnes pratiques a été examinée par Reij et Thiombiano (2003). Ils ont montré comment les investissements réalisés dans la conservation des sols et de l'eau associés à d'autres éléments de la GIFS ont conduit à une augmentation considérable des rendements de millet et de sorgho entre 1996 et 2000 après des décennies de dégradation des sols et d'émigration au Plateau Central du Burkina Faso. Ceux-ci étaient accompagnés d'investissements dans le bétail qui, associés à une gestion améliorée, ont conduit à une hausse de la disponibilité de fumier. Le tableau 12 récapitule les différents indicateurs mentionnés.

9.5 Conclusion

Dans un contexte comme celui du Burkina Faso, où une importante pression démographique est exercée sur les ressources terriennes et où les infrastructures d'irrigation sont peu répandues, le développement de la GIFS représente un potentiel pour les agriculteurs en leur offrant une méthode peu onéreuse pour utiliser l'eau de pluie plus efficacement et limiter ainsi les répercussions des impacts climatiques négatifs. En outre, cette stratégie contient divers avantages conjoints socio-économiques comme une production agricole plus élevée, la sécurité alimentaire, la restauration des terres dégradées et de la biodiversité.

Tableau 12 : Récapitulatif de l'évaluation multicritère de la GIFS en tant que stratégie d'adaptation

Atténuation des risques	Gradient de risque	Rapport coût-efficacité	Développement	Avantages conjoints potentiels	Répercussions inopportunes potentielles	Obstacles à la mise en œuvre	Besoins en matière de soutien institutionnel
Forte	Indépendance vis-à-vis des risques	Élevé	Fort	Forts	Faibles	Moyens	Moyens à faibles

Chapitre 10 – Variétés de cultures améliorées

10.1 Contexte et description de la technologie

L'amélioration génétique des cultures soumises au stress et des conditions de croissance optimales représentent un moyen d'aider les fermiers à utiliser les sols, l'eau et les nutriments de façon plus productive afin d'améliorer la sécurité alimentaire (Voss-Fels et al. 2019 ; GIEC, 2019 ; Searchinger et al., 2014). Cela représente une stratégie d'adaptation très prometteuse vis-à-vis du changement climatique (Sanou et al., 2016). Une variété moderne ou améliorée est une nouvelle variété d'espèce végétale qui produit des rendements plus élevés, de meilleure qualité ou qui présente une meilleure résistance aux organismes nuisibles et aux maladies tout en minimisant la pression sur l'environnement naturel (Access to Seeds Index, 2020). Ces variétés améliorées sont uniformes au niveau génétique, ce qui signifie que leurs caractéristiques sont constantes chez tous les individus de cette même espèce spécifique. La définition exacte des variétés améliorées et les exigences qui y sont associées dépendent de la législation nationale et des traités internationaux (par ex. réglementation semencière harmonisée de la CEDEAO). Les variétés améliorées présentent notamment une meilleure tolérance aux facteurs de stress abiotiques tels que la sécheresse (Fisher et al., 2015), une meilleure résistance aux facteurs de stress biotiques (maladies et parasites), une meilleure utilisation des ressources, ou d'autres altérations qui permettent de modifier la gestion agronomique, par ex. en nécessitant des cycles de croissance plus courts. Outre les technologies peu exigeantes en main-d'œuvre et les crédits flexibles, les variétés de semences localement adaptées s'inscrivent parmi les intrants fondamentaux pour les agriculteurs du Burkina Faso (Roncoli et al., 2001). Outre des rendements suffisamment élevés, les caractéristiques importantes des semences pour les agriculteurs sont : une maturité précoce, une résistance à la sécheresse, la couleur et la taille des semences (Ishikawa et al., 2020). Il est important de savoir qu'il existe de grandes différences entre les semences, qu'elles soient considérées comme races primitives ou améliorées. La culture formelle des variétés améliorées est une activité ancienne étroitement liée aux systèmes agricoles. Dès le milieu du 19e siècle, Gregor Mendel a découvert les principes de la sélection végétale. Pour accomplir l'effet d'adaptation optimal des variétés améliorées, une variété doit remplir différentes conditions comme les préférences de l'agriculteur (comprenant les aspects traditionnels et culinaires), l'adaptabilité locale, la gestion agronomique, etc. Il est donc nécessaire de s'assurer que des nouvelles semences de bonne qualité et adaptées localement soient disponibles et accessibles. Des variétés améliorées plus anciennes pourraient être devenues sensibles à certains agents pathogènes et ne représentent pas l'état actuel des récents efforts d'amélioration.

Au Burkina Faso, des variétés améliorées existent principalement pour les cultures de base comme le maïs, le millet, le sorgho, le niébé, le riz, le manioc, le sésame, des légumes également, et la culture de rente, le coton. Toutefois, le taux d'adoption des variétés améliorées reste très faible, et on l'estime à environ 10 % (Compaoré et al., 2008 ; Access to seeds, 2018). La superficie totale ensemencée par des graines améliorées en 2008 était estimée à 587 882 ha, soit 11 % de la surface totale cultivée du pays (RGA, 2008). La majeure partie de la surface ensemencée par des graines améliorées revient au coton (82 % de la production de coton totale), suivi du maïs avec 12 %, tandis que le sorgho et le millet ont un taux de représentation de semences améliorées inférieur à 2 %, même s'ils couvrent la majorité des surfaces cultivées au Burkina Faso (Compaoré et al., 2008). Les variétés améliorées de riz, de sésame et de niébé ne couvrent qu'une part marginale de cette surface (Compaoré et al., 2008). Pour ce qui est de la proportion des surfaces dédiées aux variétés améliorées en rapport à la surface cultivée totale, la région des Hauts-Bassins se range en première position avec 32,93 % de ses surfaces cultivées avec des semences améliorées. Elle est suivie par les Cascades (24,44 %), la Boucle du Mouhoun (16,67 %) et le Sud-Ouest (15,52 %). Les régions Centre-Ouest, Nord, et Plateau Central représentent moins de 2 % des surfaces cultivées avec des semences améliorées.

Comme le taux d'adoption des semences améliorées est faible, la plupart des semences plantées par les petits exploitants sont des races primitives. Ces races primitives évoluent dans des systèmes agricoles entretenus par des petits exploitants. La sélection des semences par les agriculteurs et les processus environnementaux (dont les interactions génétiques avec des espèces sauvages apparentées) ont façonné les races primitives actuelles sur des générations culturales. Au Burkina Faso, ces races primitives proviennent de l'hérédité ou des échanges entre producteurs. En général, les races primitives ne constituent pas une variété pour les sélectionneurs de semences professionnels ou conformément aux définitions légales, car leurs caractéristiques peuvent être hétérogènes lorsqu'elles sont génétiquement isolées (Smale et Jamora, 2020 ; Harlan, 1992). En outre, leurs normes de qualité ne sont pas éprouvées. Leurs caractéristiques, telles que leur apparence ou leurs rendements, n'ont pas à être constantes sur la durée et sur l'ensemble des individus.

La disponibilité de semences améliorées de bonne qualité et localement adaptées est une condition préalable à la mise en œuvre de la stratégie d'adaptation. Les modes de production et la disponibilité des semences améliorées pour les cultures vivrières ont fortement évolué dans les pays subsahariens au cours des 50 dernières années (Kabore et al., 2010), en passant d'un secteur géré par l'État, où les variétés étaient surtout développées par des instituts de recherche nationaux et des centres CGIAR, au secteur d'aujourd'hui, qui présente un secteur privé de plus en plus important, surtout constitué d'entreprises régionales (Access to seeds, 2018). Néanmoins, les institutions nationales ou internationales dominent encore le secteur des semences au Burkina Faso (Access to seeds, 2019).

Le Burkina Faso a appliqué une politique des semences et une réglementation pour ce secteur qui comprennent la mise au commerce et l'inscription des variétés et autorisent l'activité d'acteurs dans ce secteur des semences (Access to seeds, 2019). De ce fait, son secteur des semences est leader en Afrique occidentale (Access to seeds, 2019). Les principaux acteurs impliqués dans la chaîne de production des semences améliorées sont les scientifiques et les techniciens de l'Institut de l'Environnement et des Recherches Agricoles (INERA), les inspecteurs des semences pour le Ministère de l'agriculture, les coopératives agricoles qui produisent des semences ainsi que des acteurs privés organisés en associations. D'autres agences de développement et des instituts internationaux dédiés à la recherche agricole pour le développement (centres CGIAR, par ex.) jouent un rôle dans le transfert de technologies. Par exemple, l'Institut international d'agriculture tropicale (IITA) a collaboré avec le gouvernement burkinabé pour créer des variétés de niébé améliorées avec la participation d'agriculteurs ayant sélectionné des variétés. On peut aussi citer la collaboration d'instituts de recherche agricole nationaux avec le Réseau Ouest et Centre Africain de Recherche sur le Mil (ROCAFREMI) d'une part, et l'ICRISAT (International Crop Research Institute for Semi-Arid and Tropics) d'autre part, qui ont permis de donner accès aux agriculteurs des pays sahéliens à un nombre croissant de variétés de millet (Compaoré et al., 2020).

Access to seeds (2019) analyse les informations nationales spécifiques pour 17 entreprises privées (surtout régionales) qui opèrent dans le pays, la plupart d'entre elles assurant la vente des semences (n=16), une minorité ayant des sites de sélection dans le pays (2), des sites de tests (3), des sites de production des semences (5) ou des services de vulgarisation (2) et impliquent des petits exploitants dans des activités de production des semences.

L'une des tâches de l'INERA (Institut de l'environnement et des recherches agricoles) est d'encourager l'adoption de variétés améliorées, et il a donc établi un accord pour de futurs partenariats publics-privés visant la production de semences (Access to seeds, 2019). Aussi, des instituts de recherche comme l'INERA et l'Union Nationale des Producteurs de Semences du Burkina (UNPS-BF) organisent régulièrement des foires aux semences de variétés améliorées afin de populariser de nouvelles variétés parmi les producteurs. Dans cette perspective, plusieurs projets et programmes ont été créés au niveau national pour appuyer la production de semences et l'expansion de variétés améliorées. Plusieurs entreprises de semences ont bénéficié du soutien financier de projets et d'ONG comme l'Alliance pour la révolution verte en Afrique (AGRA).

10.2 Potentiel d'atténuation des risques biophysiques

La variété de sorgho améliorée a été choisie à partir de l'historique de sa sélection, de sa phénologie (maturité et sensibilité à la photopériode), et de sa capacité de rendement en grains pour représenter des types de sorgho contrastés cultivés en Afrique de l'Ouest (Adam et al., 2018). Dans cette étude, nous avons utilisé Fadda, un hybride simple dérivé de parents de race guinéenne avec une capacité de rendement en grains dépassant celle des variétés locales utilisées par les agriculteurs (Rattunde et al., 2016).

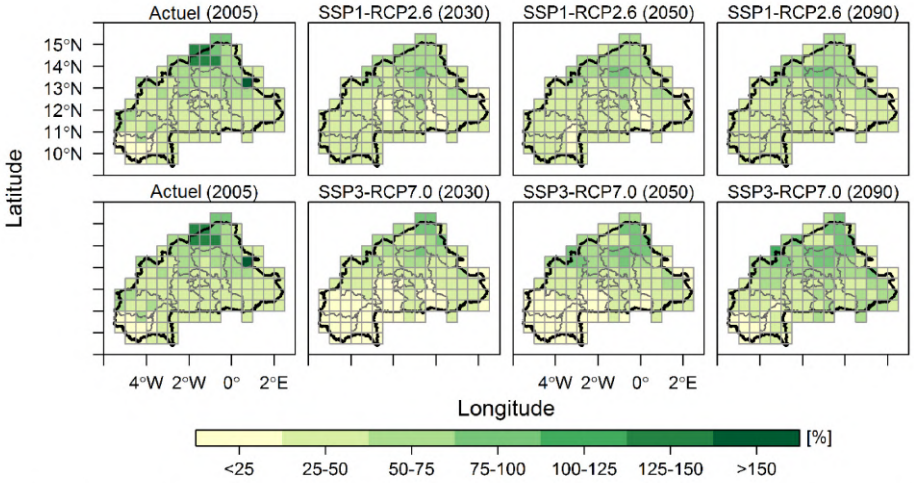


Figure 56 : Répartition spatiale quadrillée de la projection des impacts sur les rendements de la variété améliorée (Fadda) au Burkina Faso suivant différents scénarios et périodes.

Dans l'ensemble, sur toutes les cellules, la variété améliorée a entraîné une augmentation considérable des rendements de jusqu'à 150 % (Figure 56), en particulier au nord du Burkina Faso (Boucle du Mouhoun, Nord, Centre Nord, Centre, et Plateau Central) en vertu des deux scénarios d'émissions. Si l'on compare les deux scénarios, le sud-ouest du Burkina Faso (Centre-Ouest, Centre-Sud, Centre-Est, et l'Est inférieur) reste quasiment inchangé en vertu du scénario de réduction des émissions (SSP1-RCP2.6), mais le scénario d'émissions élevées (SSP3-RCP7.0) a projeté une tendance à la croissance au fil du temps. Les impacts sur les rendements plus élevés dans la région du nord (Boucle du Mouhoun, Nord, Centre Nord, Centre, et Plateau Central) peuvent s'expliquer par les précipitations plus fortes au nord qu'au sud, qui créent des conditions optimales pour le besoin en eau des cultures. Toutefois, en vertu du scénario de réduction des émissions (SSP1-RCP2.6), les régions du sud du Burkina Faso (Cascades, Hauts-Bassins, et Sud-Ouest) présentent des rendements plus élevés qu'en vertu du scénario SSP3-RCP7.0. Néanmoins, les deux scénarios ont produit des impacts de rendements clairement positifs avec la variété améliorée (Fadda).

La figure 57 montre la variabilité des impacts sur les rendements avec la variété améliorée pour les deux scénarios et les différentes périodes. Si l'on compare les deux scénarios, SSP1-RCP2.6, le scénario de réduction des émissions, maintient des rendements habituels sur la durée (années 2030, 2050 et 2090), mais SSP3-RCP7.0 présente une tendance à la hausse au fil du temps. Au niveau actuel (si la variété améliorée avait été utilisée), la variété améliorée projette une hausse des rendements de jusqu'à 60 %. À partir de la période actuelle, les projections indiquent une augmentation des rendements au fil du temps en vertu de SSP3-RCP7.0 et pas de changement en vertu de SSP1-RCP2.6.

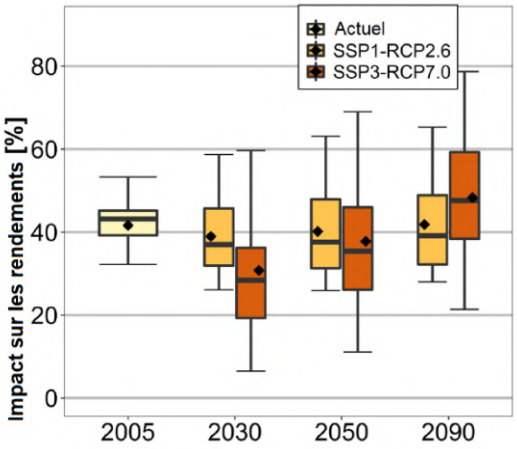


Figure 57 : Intercomparaison au niveau régional des impacts sur les rendements à différentes périodes avec la variété améliorée.

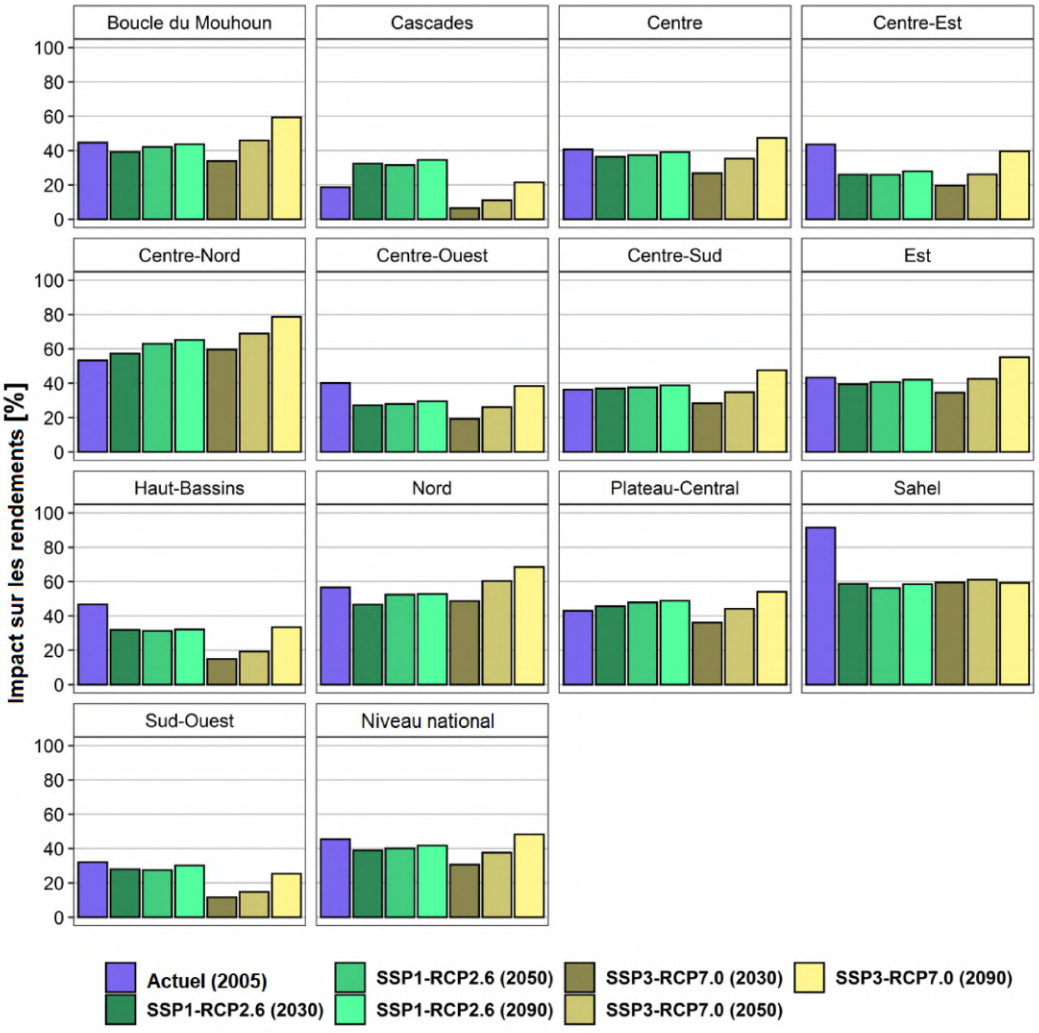


Figure 58 : Impacts sur les rendements par région avec la variété améliorée selon les différents scénarios et les différentes périodes.

La figure 58 montre la variabilité régionale des impacts sur les rendements avec la variété améliorée pour les deux scénarios et les différentes périodes. Toutes les régions présentent des impacts sur les rendements d'au moins 10 à 80 %. Si l'on compare toutes les régions, les régions sud du Burkina Faso (Cascades, Haut-Bassins, et Sud-Ouest) présentent des rendements plus élevés en vertu de SSP1-RCP2.6 que de SSP3-RCP7.0, et les rendements du nord du Burkina Faso (Boucle du Mouhoun, Nord, Centre Nord, Centre, et Plateau Central) sont plus élevés en vertu de SSP3-RCP7.0 que de SSP1-RCP2.6. Les projections pour la région du Sahel présentent le même niveau d'impact dans le cas des deux scénarios.

Les variétés améliorées permettent aux agriculteurs de générer une production en plus grande quantité et de meilleure qualité dans des conditions de stress et de croissance optimale (Voss-Fels et al., 2019), ainsi, elles représentent une stratégie d'adaptation au changement climatique importante (Sanou et al., 2016). Ces résultats sont dus au fait qu'elles présentent une meilleure tolérance aux facteurs de stress abiotiques tels que la sécheresse (Fisher et al., 2015), une meilleure résistance aux facteurs de stress biotiques (maladies et parasites), une meilleure utilisation des ressources, ou d'autres altérations qui permettent de modifier la gestion agronomique, par ex. en nécessitant des cycles de croissance plus courts. Outre les technologies peu exigeantes en main-d'œuvre et les crédits flexibles, les variétés de semences localement adaptées s'inscrivent parmi les intrants fondamentaux pour les agriculteurs du Burkina Faso (Roncoli et al., 2001). Outre les rendements suffisamment élevés, les caractéristiques importantes des semences pour les agriculteurs sont une maturité précoce, une résistance à la sécheresse, la couleur et la taille des semences (Ishikawa et al., 2020).

Il est important de savoir qu'il existe de grandes différences entre les semences, qu'elles soient considérées comme races primitives ou améliorées. La culture formelle des variétés améliorées est une activité ancienne étroitement liée aux systèmes agricoles. Dès le milieu du 19e siècle, Gregor Mendel a découvert les principes de la sélection végétale. Pour accomplir l'effet d'adaptation optimal des variétés améliorées, une variété doit remplir différentes conditions comme les préférences de l'agriculteur (comprenant les aspects traditionnels et culinaires), l'adaptabilité locale, la gestion agronomique, etc. Il est donc nécessaire de s'assurer que des nouvelles semences de bonne qualité et adaptées localement soient disponibles et accessibles. Des variétés améliorées plus anciennes pourraient être devenues sensibles à certains agents pathogènes et ne représentent pas l'état actuel des récents efforts d'amélioration.

10.3 Analyse coûts-avantages de la culture pluviale du sorgho en utilisant des variétés améliorées

L'ACA suivante a pour objectif d'évaluer si le passage des variétés de sorgho traditionnelles, appelées races primitives, aux variétés de cultures améliorées représente une stratégie d'adaptation rentable. Les coûts et les avantages de l'utilisation des semences améliorées sont comparés à un scénario dépourvu d'adaptation et projetés jusqu'en 2050, en tenant compte de deux scénarios de changement climatique différents. Notre référentiel est le scénario décrivant la situation actuelle.

10.3.1 Référentiel et scénarios

Référentiel (sans mesures, sans impacts climatiques) : Production pluviale du sorgho dans les conditions climatiques et technologiques actuelles de la région.

Pas d'adaptation (pas de mesures, impacts du changement climatique en vertu de SSP1-RCP2.6 et de SSP3-RCP7.0) : Production pluviale du sorgho basée sur des variétés de sorgho traditionnelles. Les revenus du marché et les coûts du système de production sont extrapolés jusqu'en 2050 en présupposant des impacts du changement climatique sur les rendements en vertu de SSP1-RCP2.6 et de SSP3-RCP7.0.

Adaptation (mesures, impacts du changement climatique en vertu de SSP1-RCP2.6 et de SSP3-RCP7.0) : Production pluviale du sorgho avec des variétés améliorées. Les revenus du marché et les coûts de production sont extrapolés jusqu'en 2050 en présupposant des impacts du changement climatique sur les rendements en vertu de SSP1-RCP2.6 et de SSP3-RCP7.0.

10.3.2 Données de l'étude

L'ACA des variétés de sorgho améliorées a été menée à partir des données de production et économiques détaillées collectées à Sanmatenga au Centre-Nord du Burkina Faso. Les données sont issues de dix exploitations qui recourent aux variétés de cultures améliorées depuis plus de 12 ans. La taille totale moyenne de chaque exploitation est d'environ 7 hectares, dont 2 hectares réservés à la culture du sorgho. Cependant, tenant compte des paramètres économiques standards pour les exploitations agricoles et pour une meilleure comparaison de tous les scénarios, nous analysons les revenus moyens du marché et les coûts de production associés pour un hectare.

Tandis que le scénario dépourvu d'adaptation utilise une race de sorgho locale appelée Roco, le scénario d'adaptation recourt à la culture des variétés améliorées ICSV 10.49 et CSM63E. Contrairement aux races traditionnelles héritées de génération en génération ou obtenues auprès de voisins, les variétés de cultures améliorées doivent être achetées dans les marchés locaux.

Pour identifier les changements associés au niveau des revenus du marché et des coûts de production, nous tenons compte des aspects suivants :

- À la différence des autres stratégies d'adaptation, l'utilisation des variétés de cultures améliorées ne requiert ni équipement, ni matériel, ni autre facteur de travail supplémentaire important. Ainsi, les principaux facteurs de coûts se limitent à l'achat des graines des variétés améliorées. En nous basant sur les exploitations étudiées, nous avons relevé des coûts moyens de 1 932 francs CFA (~ 3,5 USD[16]) par hectare et par an (WASCAL, 2020a). Ce sont des coûts supplémentaires pour les agriculteurs puisque les semences des races traditionnelles de sorgho sont généralement transmises d'une génération à l'autre et ne sont ainsi pas soumises à un prix officiel.
- Outre les coûts des semences, les agriculteurs passent une demi-journée réservée à la formation et à la planification liées aux nouvelles variétés, ce qui représente 744 francs CFA (~ 1,3 USD) par hectare au cours de la première année d'usage des variétés de cultures améliorées, puis ce montant se répète tous les cinq ans. Comme on suppose que les semences subissent des modifications tous les cinq ans, les agriculteurs doivent recevoir une formation à leur sujet la même année. Toutefois, comme il est probable que les agriculteurs passent du temps à planifier la période de culture que les variétés aient été modifiées ou non, nous prenons en compte des frais s'élevant à 372 francs CFA (~ 0,70 USD) pour chaque année (ibid.).
- Comme pour les autres stratégies d'adaptation, la hausse des rendements des variétés de cultures améliorées entraîne une charge de travail plus importante pour les récoltes, la conservation des semences et le séchage. De ce fait, les coûts de main-d'œuvre liés à ces activités sont donc ajustés chaque année en se servant du ratio entre les rendements des semences améliorées de sorgho et les rendements référentiels des races primitives (ibid.).
- Afin de calculer les revenus du marché, le prix a été fixé à 189 francs CFA (~ 0,34 USD) pour un kilo de sorgho amélioré, et à 147 francs CFA (~ 0,27 USD) pour la variété conventionnelle, comme indiqué dans l'étude des ménages. Le prix plus élevé peut s'expliquer par les meilleures caractéristiques de la variété en matière de goût et de teneur en protéines (WASCAL, 2020a). D'après les agriculteurs interviewés, les rendements de sorgho ont augmenté de 380 kg par hectare avec la variété améliorée par rapport à la race traditionnelle. À partir des revenus de marché acquis par l'excédent, nous avons extrapolé les revenus et les coûts jusqu'en 2050 (ibid.).

10.3.3 Suppositions

Outre les informations issues de l'étude, des suppositions sur les impacts des technologies, du changement climatique et des taux d'inflation ont dû être posées :

- Les développements des rendements induits par le changement climatique dans la région du Plateau Central sont dérivés des projections du PIK en vertu des scénarios SSP1-RCP2.6 et

16 Tous les taux de change ont été récupérés le 04.3.2021 sur : https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/procedures-guidelines-tenders/information-contractors-and-beneficiaries/exchange-rate-inforeuro_fr

SSP3-RCP7.0 avec un effet positif sur les rendements grâce à l'adaptation (voir aussi le chapitre 3).
- Nous supposons que la productivité des agriculteurs participants augmente de 2,4 % par an grâce au changement technologique indépendant. Il s'agit d'une extrapolation des hausses de rendements de sorgho entre 1984 et 2010 dans la région cible (WASCAL, 2020b).
- Pour représenter le taux d'inflation, nous avons calculé le taux de croissance exponentiel du PIB par habitant au Burkina Faso ces 30 dernières années, sa valeur est de 3,88 % (FAOSTAT, 2021).

10.3.4 Résultats

Comme l'indique la figure 58, les résultats de l'ACA montrent qu'en 2050, la stratégie d'adaptation qui consiste à passer des variétés de sorgho traditionnelles à des variétés améliorées serait très avantageuse, car elle a un retour positif sur un investissement relativement limité. Cela s'applique aux deux scénarios de changement climatique, toutefois, le scénario en vertu de SSP1-RCP2.6 présente une performance légèrement meilleure que SSP3-RCP7.0. Les chiffres clés suivants sont particulièrement intéressants :

En raison des très faibles coûts d'investissements, le flux de trésorerie net des agriculteurs est déjà positif dès la deuxième année, et les coûts plus élevés pour les semences sont immédiatement couverts. Parallèlement, la valeur actuelle nette (VAN) augmente et devient positive dès le début (voir figure 59). Elle poursuit rapidement son développement positif. Puisque les coûts pour les agriculteurs restent les mêmes chaque année et n'augmentent que légèrement tous les cinq ans en raison des coûts de formation, la VAN évolue de manière quasi linéaire jusqu'en 2050. Elle atteint une valeur de 1 991 184 francs CFA (= 3 592 USD) en 2050 en vertu du scénario 2.6 et une valeur de 1 686 852 francs CFA (= 3 043 USD) en vertu du scénario 7.0.

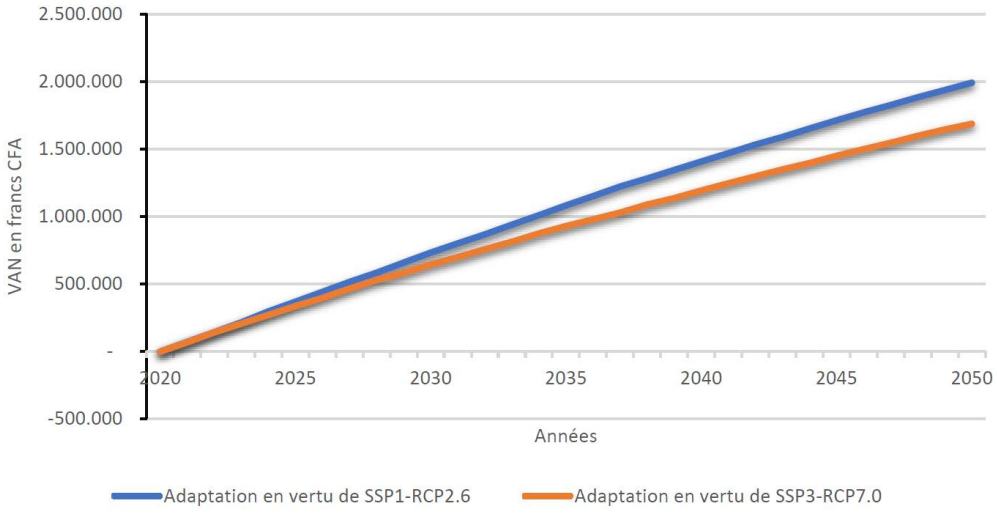


Figure 59 : Développement de la valeur actuelle nette dès la transition à la culture des variétés de sorgho améliorées. Source : figure basée sur nos propres calculs.

Les résultats montrent que les investissements des agriculteurs dans les variétés de sorgho améliorées sont rentables au cours de la première année. L'année 2021 marque le seuil de rentabilité entre les coûts nets de production accumulés et les revenus nets du marché. Par conséquent, le taux de rendement interne (TRI) est très positif et représente 2,829 % pour une adaptation en vertu de SSP1-RCP2.6 et 2,709 % pour une adaptation en vertu de SSP3-RCP7.0, ces deux taux étant évalués pour 2050. En supposant une perspective de rentabilité globale, souvent prise pour une ACA locale, tout TRI supérieur à 6 % est considéré comme un investissement rentable. Ces valeurs excessivement élevées ne sont pas inhabituelles en cas d'investissements dans des variétés améliorées. Avec un

changement marginal des dépenses, les bénéfices augmentent tout de même en raison de l'énorme hausse des rendements qui s'ensuit (Lotze-Campen et al., 2015).

Le rapport avantages-coûts (A/C) de l'investissement pour l'adaptation le confirme par les résultats suivants : il est de 7,87 en 2050 en vertu de SSP1-RCP2.6 et de 6,82 en vertu de SSP3-RCP7.0 (voir aussi tableau 13). La transition aux variétés améliorées de sorgho à fort rendement est donc bien plus rentable économiquement parlant que la culture des races traditionnelles de sorgho, et il s'agit donc une stratégie d'adaptation fort recommandable.

Tableau 13 : Récapitulatif des principaux indicateurs ACA pour la transition à la culture des variétés améliorées de sorgho.

	Adaptation en vertu de SSP1-RCP2.6	Adaptation en vertu de SSP3-RCP7.0
TRI	2 829 pour cent	2 709 pour cent
VAN	1 991 184 francs CFA (= 3 592 USD)	1 686 852 francs CFA (= 3 043 USD)
A/C	7,87	6,82

La transition des variétés traditionnelles de sorgho aux variétés améliorées est pertinente au niveau économique parce que le changement partiel de système de production entraîne un TRI élevé et un rappport A/C supérieur à 1,0. Cela signifie que les revenus supplémentaires attribuables au changement sont plus élevés que les coûts supplémentaires associés. Ce résultat particulier ne signifie toutefois pas que le système de production dans son ensemble soit rentable pour ce qui est du calcul normalisé au plan international des marges économiques. Si l'on se base sur les données de l'étude des ménages, on constate que la production de sorgho du référentiel (sans mesures, sans impacts climatiques), c'est-à-dire des variétés traditionnelles de sorgho dans les conditions climatiques et technologiques actuelles dans la région, présente une marge brute et nette négative. En d'autres mots, les coûts variables et fixes sont plus élevés que les revenus du marché, le travail étant le principal facteur de coûts.

D'un point de vue purement économique, la production de sorgho n'est donc pas recommandable, même si le TRI positif laisse supposer un système de production plus rentable à l'avenir. Mais la prise de décision des producteurs dans la région n'est pas forcément guidée par la rationalité. La sécurité alimentaire et le manque d'emplois peuvent être d'autres éléments décisifs. Il faut également tenir compte du fait que la monétisation du travail à la ferme (accompli en général par les membres de la famille) ne reflète pas la réalité des petites exploitations et des agriculteurs de subsistance qui, habituellement, ne se versent pas de salaire.

Les résultats de l'ACA ne contredisent pas les résultats d'analyse de l'ensemble du système de production, car l'ACA ne représente qu'une comptabilité des coûts partielle et ne comprend pas tous les facteurs de production comme dans une analyse des coûts complète.

10.4 Évaluation multicritère

10.4.1 Potentiel de développement

La plupart des semences au Burkina Faso sont des races primitives préservées par les agriculteurs, le potentiel de développement des variétés améliorées pour l'adaptation est donc très important. L'agriculture est un pilier essentiel de l'économie du pays, ses effets multiplicateurs au niveau macro-économique peuvent donc être immenses si la production agricole est améliorée, même dans le contexte de conditions climatiques néfastes.

10.4.2 Avantages conjoints potentiels

Les variétés améliorées peuvent aider à lutter contre la sous-alimentation, car elles offrent des rendements plus élevés et plus stables dans les conditions climatiques actuelles et changeantes. Grâce à leur niveau de nutriments amélioré, elles peuvent aussi aider à réduire la malnutrition. La qualité plus élevée des récoltes permet aussi aux agriculteurs de vendre leurs produits à des prix plus élevés et d'accroître ainsi les revenus du ménage. Les variétés améliorées ont aussi permis d'optimiser la gestion agronomique, notamment grâce aux variétés courtes sur tige qui sont plus stables. Des avantages conjoints intéressants pourraient aussi être créés si l'adoption des variétés améliorées s'accompagnait de nouveaux savoirs sur la façon d'améliorer la production agricole. Il semblerait que des petites modifications au niveau de la disponibilité des semences pourraient inciter les agriculteurs à adopter radicalement de nouvelles stratégies (Mertz et al., 2009).

Au-delà des avantages conjoints dans le secteur agricole et alimentaire, l'utilisation des variétés de cultures améliorées a entraîné une plus grande indépendance financière. Ainsi, les agriculteurs ont la possibilité d'inscrire leurs enfants à l'école ou d'utiliser les services de santé. Selon une étude, l'adoption d'au moins une variété améliorée génère des revenus ménagers plus élevés et réduit la pauvreté en conséquence (CORAF, 2018). Au cours de l'étude, les agriculteurs ont mentionné des avantages conjoints tels qu'un plus grand respect de la part des pairs, le confort, l'épanouissement et des ressources pour construire le logement. La capacité d'améliorer d'autres domaines de la vie par les économies, au lieu d'investir celles-ci dans la nourriture, est importante.

L'adoption de nouvelles variétés peut également comporter des avantages conjoints climatiques et environnementaux. Le potentiel de productivité élevé des variétés de cultures améliorées peut aboutir à une réduction de la superficie à ensemencer, ce qui est important pour réduire la reconversion des sols, notamment par la culture sur brûlis. Ainsi, les semences améliorées peuvent aussi atténuer la perte de la biodiversité.

10.4.3 Répercussions inopportunes potentielles

En raison de la réglementation insuffisante du marché des semences et de l'importation de variétés qui ne sont pas optimales aux conditions locales associées à des connaissances agroéconomiques insuffisantes, les agriculteurs risquent de planter des variétés inadaptées qui ne fourniront pas les résultats attendus.

L'introduction et l'adoption progressive des variétés améliorées a conduit les chercheurs à élaborer et à débattre de l'hypothèse du remplacement en se concentrant sur l'agriculture traditionnelle andine où les variétés améliorées ont été introduites dans les années 1950. Selon eux, les variétés améliorées remplaceront les races primitives (Popenoe et al. ,1989 ; Harlan, 1976 ; Brush, 2004). D'autres études (Brush et al., 1992 ; Ortega, 1997) concluent que le remplacement de l'une par l'autre ne s'effectue pas, car il existe un seuil de saturation au moment duquel les agriculteurs cessent d'adopter de nouvelles variétés. Les races primitives et les variétés améliorées satisfont un ensemble de caractéristiques d'ordre agronomique, de sécurité alimentaire, ainsi que de préférences traditionnelles et culinaires. De ce fait, il existe des systèmes agricoles gérés par des petits exploitants où les cultures de races primitives et de variétés améliorées coexistent et se complètent les unes les autres (Haan, 2009 ; Brush, 1991).

10.4.4 Obstacles à la mise en œuvre

Au Burkina Faso, le secteur agricole emploie 86 % de la population, mais il est confronté à de nombreux enjeux, comme la faible adoption des semences améliorées. Le secteur formel et informel des semences ne fournit pas suffisamment les agriculteurs en semences améliorées. Souvent, elles sont indisponibles, de piètre qualité ou ne correspondent pas aux préférences des agriculteurs. Aussi, un manque de connaissances sur le potentiel des variétés et la meilleure façon de les cultiver entravent l'augmentation des taux d'adoption (Juana et al., 2013). L'inadéquation des prix des éléments essentiels à l'agriculture et des prix des produits agricoles, le manque de soutien logistique et financier (manque notamment de systèmes de crédits adaptés), la mauvaise organisation du secteur, le manque de motivation des producteurs de graines à l'entrée sur le marché, les risques climatiques associés à la production agricole et le déclin de la fertilité des sols freinent le recours aux inno-

vations technologiques, comme les semences améliorées, par les agriculteurs burkinabé.

Une analyse sexospécifique binaire de la production de riz révèle des écarts de rendements entre les parcelles gérées par les hommes et celles des femmes (Yameogo et al., 2019). Les rendements de riz moyens sur les parcelles des hommes sont considérablement plus élevés que sur celles des femmes en Afrique de l'Ouest, ce qui suggère un effet lié au sexe. Les agents de vulgarisation pensent que cela est probablement lié au manque de maintenance, dû à une main-d'œuvre insuffisante (ménage) et au temps imparti manquant. En général, les femmes doivent s'occuper de la parcelle de leur mari avant la leur. En outre, les parcelles des femmes sont moins approvisionnées en engrais et en protection de végétaux, car les engrais sont appliqués en priorité sur les parcelles des maris (Yameogo et al., 2019). Accompagnés d'un manque de formation et d'accès aux services de vulgarisation pour les femmes, ces facteurs pourraient être à l'origine de ces rendements inégaux. En ce qui concerne la sélection des variétés, il n'existe qu'une petite différence entre les critères de sélection des femmes et des hommes (Ishikawa et al., 2020).

10.4.5 Besoins en matière de soutien institutionnel

Pour favoriser l'adoption des variétés améliorées et le développement agricole en général, il est nécessaire d'améliorer le fonctionnement de la chaîne de valeur agricole afin qu'une adoption devienne possible et rentable. Cela suppose une infrastructure et des marchés agricoles fonctionnels, afin de renforcer la disponibilité et l'accessibilité des éléments essentiels à l'agriculture (en assurant notamment des prix abordables pour les semences améliorées) et la nécessité de fournir la possibilité de vendre des produits à des prix couvrant les coûts de production (Barbier et al., 2009).

Des réglementations favorisant le secteur des semences devraient cibler à la fois les secteurs formel et informel, car tous deux sont importants pour diffuser les semences aux agriculteurs (Smale et King, 2005). Depuis des siècles, le secteur informel génère un flux de semences même vers les zones les plus éloignées tout en créant une grande diversité de semences avec les savoirs liés et répondant aux besoins des agriculteurs (Access to seeds, 2018). Le secteur des semences doit assurer la disponibilité de graines de haute qualité et leur accessibilité. De ce fait, les efforts devraient se diriger sur la création d'un secteur des semences couvrant tout le processus des semences améliorées, de la présélection et la sélection des plantes à la diffusion, au marketing et au service de conseil concernant les semences, tout en se concentrant sur les besoins des agriculteurs. Un système aussi complet pourrait également assurer un processus d'adoption de l'innovation constant. Les chercheurs et le gouvernement ont souligné le besoin de perfectionnement en matière de coordination pour une meilleure efficacité du système des semences et envisagent de substituer le soutien indirect de l'État à une forme d'intervention commerciale directe encourageant l'utilisation durable des semences améliorées (Kabore et al., 2010). En outre, une meilleure communication et des échanges renforcés entre les acteurs du secteur des semences sont nécessaires pour améliorer la diffusion des semences (Ishikawa et al., 2013) et surmonter les difficultés d'ordre technique. Pour tirer au maximum profit de l'amélioration des variétés, les agriculteurs ont régulièrement besoin de nouvelles variétés améliorées. Une certaine vitesse d'adoption est souhaitable (Beyene et Kassie, 2015). Par exemple, dans notre étude de cas ACA, les variétés améliorées avaient été émises il y a onze ans en moyenne. Cela signifie que des variétés plus récentes aux caractéristiques améliorées pourraient déjà être disponibles. Il faut encourager la recherche pour mieux comprendre les conditions de croissance locales (Worou et al., 2019) et les critères de sélection des semences (Ishikawa et al., 2020), afin d'améliorer le secteur des semences. Les systèmes de sélection centrés sur l'innovation qui permettent de partager les savoirs et le matériel de sélection ont généré de gros excédents économiques pour les agriculteurs et la société dans son ensemble (Lüttringhaus et al., 2020). Les connaissances agronomiques générales et les savoirs spécifiques sur le potentiel des semences améliorées, la façon de les sélectionner, d'accéder à elles et de les cultiver doivent être partagés. Les outils numériques pouvant être consultés, par ex. via des smartphones, peuvent compléter les services de vulgarisation.

Accompagnées de la promotion des semences améliorées, les politiques et les activités de mise en œuvre devraient aussi mettre l'accent sur la valeur des races primitives locales. Il s'agit aussi d'un pilier important de préservation des traditions locales, des pratiques agronomiques et des savoirs qui les accompagnent. Une telle préservation des semences et des pratiques pourrait être institutionnalisée par des projets de conservation in situ, des banques de semences locales, des corporations de banques de gènes nationales ou internationales, et des salons pour la diversité.

10.5 Conclusion

En tenant compte de tous les critères mentionnés, on peut en déduire que la stratégie d'adaptation des variétés améliorées présente un potentiel d'atténuation des risques élevés et un très bon rapport coût-efficacité (voir tableau 14). Toutefois, la stratégie mise en œuvre devrait tenir compte des répercussions négatives potentielles en raison du manque de semences adaptées au contexte local, outre les connaissances limitées sur l'utilisation des variétés améliorées disponibles. L'aide des institutions serait nécessaire pour accroître la disponibilité des semences de qualité, adaptée au contexte local, ainsi que l'accès à celles-ci, afin de renforcer leur adoption par les petits exploitants.

Tableau 14 : Récapitulatif de l'évaluation des variétés de cultures améliorées en tant que stratégie d'adaptation au Burkina Faso.

Atténuation des risques	Gradient de risque	Rapport coût-efficacité	Développement	Avantages conjoints potentiels	Répercussions inopportunes potentielles	Obstacles à la mise en œuvre	Besoins en matière de soutien institutionnel
Forte	Indépendance vis-à-vis des risques	Fort	Fort	Forts	Moyennes	Moyens à forts	Moyens à forts

Chapitre 11 – Incertitudes

Les résultats présentés ci-dessus sont soumis à un certain nombre d'incertitudes et de limites qui doivent être pleinement prises en compte afin d'assurer une interprétation correcte et de pouvoir esquisser des implications et des recommandations au niveau politique. Ce chapitre présente et évalue les incertitudes liées aux différents types d'analyses de cette étude, et met en lumière leur pertinence dans le contexte du Burkina Faso.

11.1 Données du modèle climatique

Le développement des modèles climatiques a fait de gros progrès ces dernières décennies, mais les modèles climatiques présentent encore des incertitudes importantes en ce qui concerne la simulation du climat actuel (Tebaldi et Knutti, 2007). Pour éliminer les biais des simulations climatiques et adapter les modèles à notre analyse des modèles culturaux, les données climatiques sont traitées statistiquement (correction de biais) à l'aide de nos ensembles de données observationnelles (W5E5 dans notre cas). Cette approche a des limites importantes (Ehret et al., 2012 ; Maraun, 2016), car elle ajuste les données simulées aux observations sans corriger l'incapacité des modèles à représenter certains processus physiques du système planétaire. Toutefois, cette étape est nécessaire et appropriée pour obtenir des simulations réalistes des impacts climatiques (Chen et al., 2013 ; Teutschbein et Seibert, 2012). Nous avons analysé la performance de chaque modèle climatique individuellement afin de représenter le climat actuel pour s'assurer qu'aucun des modèles ne présente de biais extrêmement fort. Travailler avec un ensemble de modèles climatiques permet de réduire éventuellement les biais que présentent les modèles individuellement. En outre, les ensembles de données observationnelles climatiques eux-mêmes sont imparfaits, surtout dans les régions dotées de peu de stations météorologiques. Les ensembles de données utilisés sont basés sur des modèles de ré-analyse, d'observations satellites et de données stationnaires. En raison de la faible densité de données stationnaires à long terme et fiables en Afrique occidentale, les ensembles de données présentent de forts biais, en particulier sur une petite échelle.

Dans ce rapport, l'analyse du climat à venir repose sur dix modèles climatiques mondiaux dont les biais ont été corrigés, conçus dans le cadre du projet ISIMIP3b (https://www.isimip.org/protocol/3/), un sous-ensemble du Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) utilisé dans le prochain rapport AR6 du GIEC.

En outre, les projections climatiques pour l'avenir s'accompagnent d'incertitudes, visibles aux divergences présentées par les températures et les projections de précipitations sur différents modèles climatiques. Les MCM projettent la même tendance pour les températures sur l'Afrique, tandis que les projections des modèles au sujet des précipitations ne concordent que dans certaines régions (Niang et al., 2014). Pour établir des conclusions générales sur les impacts climatiques à venir, il est important de sélectionner des modèles qui couvrent la totalité des résultats des modèles climatiques, c'est-à-dire en appliquant des modèles prévoyant des tendances humides et sèches dans leurs projections de précipitations (le cas échéant) ainsi que différentes amplitudes pour les variations des températures projetées dans la région cible. Les tendances divergentes liées aux projections des précipitations dans les dix modèles choisis présentent des régimes similaires à l'ensemble du modèle CMIP5 utilisé auparavant (Niang et al., 2014), ce qui laisse supposer que les modèles conviennent pour couvrir l'amplitude des précipitations éventuelles à venir au Burkina Faso.

Les dix modèles recouvrent une grande ampleur de sensibilité climatique[17] avec des valeurs de sensibilité climatique à l'équilibre (ECS)[18] de 1,53-5,41 °C

[17] La sensibilité climatique d'un modèle influence les projections futures du modèle. Elle décrit à quel Point la température de la Terre change après une modification du système climatique, par exemple un changement de la concentration de CO_2.

[18] La sensibilité du climat à l'équilibre (ECS) est une estimation de l'éventuel réchauffement planétaire en régime permanent après un doublement de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère (Nijsse et al., 2020).

(Nijsse et al., 2020). Toutefois, l'ensemble des modèles présente un biais concernant les sensibilités climatiques à l'équilibre : quatre modèles sur dix ont une sensibilité climatique à l'équilibre supérieure à 4,5 °C, ce qui est très improbable, comme l'indiquent différentes études (Nijsse et al., 2020). Cela signifie que les hausses de températures présentées par cinq modèles suggèrent des températures élevées improbables à l'avenir dans le cadre d'une augmentation de la concentration des gaz à effet de serre, et la médiane de l'ensemble multi-modèles présentera un biais sur les projections de réchauffement.

11.2 Modèle hydrologique

La plus grande source d'incertitude dans la modélisation hydrologique et l'évaluation des impacts provient des résultats des modèles climatiques (voir par ex. Vetter et al., 2015 ; Vetter et al., 2017). Comme cela est expliqué dans la partie 11.1, nous avons observé un écart important dans certains modèles climatiques, ce qui entraîne des variations extrêmes du débit fluvial et du bilan hydrologique vers la fin du siècle. Les modèles CanESM5 et EC-Earth3 en sont deux exemples : les précipitations annuelles augmentent beaucoup plus fortement en comparaison à d'autres modèles et peuvent même représenter le double des quantités mesurées à la période historique.

Toutefois, quelques questions relatives aux données s'ajoutent aux répercussions des incertitudes :

- La disponibilité des données concernant le débit fluvial observé (nombre de stations, périodes disponibles, nombreux manques au niveau chronologique) limite la calibration et la validation du modèle hydrologique.
- Les données climatiques des bassins de la Volta et du Niger sont nécessaires pour paramétrer SWIM. De ce fait, des ensembles de données climatiques mondiaux (maillés), WFD-ERA40 et W5E5, en fonction des données disponibles sur le débit observé, ont servi à la calibration de SWIM. Lorsque la répartition des précipitations (spatiale et temporelle) est incertaine, la vérification de ces données grâce aux données observées serait nécessaire.
- En raison du manque d'informations sur la gestion des ressources en eau (irrigation et gestion des réservoirs, paramétrage), les répercussions liées aux petits ou micro barrages sont difficiles à évaluer. La fiabilité est plus élevée concernant le paramétrage de barrages plus grands tels que Bagré, Kompienga, Loumbila, Ziga, où plus de données sont disponibles et fournies par diverses institutions comme WASCAL et des organisations relatives aux ressources en eau.
- En outre, il serait bien de recourir à des contrôles qualité plus avancés des données d'entrée (paramétrage du sol comprenant, par ex., une adaptation de la profondeur des sols, paramétrage de l'utilisation des sols et de la couverture terrestre associés à une validation des cycles de végétation etc.).

Tous ces facteurs augmentent l'incertitude de la modélisation hydrologique et de l'évaluation des impacts climatiques. En même temps, nous estimons que l'analyse des tendances concernant les variations à l'échelle régionale est fiable. L'orientation des résultats clés obtenus au cours des recherches ne changerait pas, même avec des données ou des modèles plus précis.

11.3 Modèles culturaux

Les modèles culturaux servent à définir la part des variations des rendements liés à la météorologie et à projeter les impacts des variations du changement climatique sur les rendements culturaux. Ces analyses permettent d'aider les agriculteurs à prendre les décisions adéquates pour stabiliser et améliorer leurs rendements face aux conditions climatiques incertaines à venir. Les modèles culturaux sont souvent utilisés pour projeter ces impacts – au-delà de l'amplitude observée de la variabilité des rendements et de la météo – du changement climatique sur les futurs rendements (Ewert et al., 2015 ; Folberth et al., 2012 ; Rosenzweig et al., 2014). Toutefois, l'utilisation des modèles culturaux présente certaines limites. Comme les données disponibles peuvent être limitées, l'adaptation du modèle risque d'être restreinte (manque d'informations sur les dates de la saison de croissance, les rendements, la répartition de l'utilisation des terres, l'alternance des cultures ou sur l'application des en-

grais (Müller et al., 2016). Aussi, la qualité des données sur les sols contribue à l'incertitude des évaluations sur les rendements (Folberth et al., 2016). Les données fragmentées et imprécises en provenance de régions présentant peu de stations météorologiques accroissent l'incertitude (Van Wart et al., 2013), surtout si des données météorologiques très locales sont nécessaires comme c'est le cas pour cette étude de district. En outre, la sélection des données des scénarios climatiques ajoute un facteur d'incertitude supplémentaire (Müller et al., 2021). Dans le cas de notre analyse, trois enjeux principaux sont apparus : premièrement, les données d'entrée du modèle peuvent contenir des erreurs. Cela est vrai pour les données météorologiques, celles sur les sols et les rendements. En ce qui concerne la météorologie, tous les ensembles de données climatiques passés comportent des incertitudes. Pour la banque de données sur les rendements, nous avons appliqué des filtres de prétraitement. Mais cela n'exclut pas les biais qui mènent finalement à des modèles instables. Deuxièmement, les séries de données à court terme des rendements et de gestion peuvent rendre difficile l'estimation des impacts climatiques sur les rendements des cultures. Cependant, l'ensemble de données disponibles sur le Burkina Faso est très complet et long (1984-2018) en comparaison à d'autres pays, ce qui renforce le poids des résultats. Troisièmement, la conception du modèle pourrait être faussée, et une formulation plus adaptée pourrait mieux saisir les variations de rendements observées, en particulier les pertes extrêmes. Les différents types de modèles présentent certaines divergences – statistiques, apprentissage-machine et basés sur les processus – (Schauberger et al., 2017), toutefois, les trois types de modèles de cette étude de cas ont été utilisés dans des études précédentes, et il est improbable qu'ils soient considérés comme inadéquats d'un point de vue général.

11.4 Analyse coûts-avantages

L'analyse coûts-avantages (ACA) a été menée afin d'évaluer les coûts et avantages économiques des quatre stratégies d'adaptation sélectionnées au niveau de l'exploitation agricole. Les ACA prenait en considération un agriculteur représentatif en utilisant des données ménagères détaillées sur les rendements, les coûts et les prix issus d'échantillons d'enquêtes. En outre, les moyennes des données sur les coûts et les rendements ont été utilisées pour compléter et vérifier l'étude des ménages, comme cela se fait dans de nombreuses ACA. De telles ACA ont cependant des limites : elles ne permettent pas d'élucider la répartition des coûts et des avantages qu'une stratégie d'adaptation entraînerait sur un éventail de groupes d'exploitation, car une stratégie d'adaptation ne touche pas nécessairement tous les types d'exploitations de la même manière.

Les hypothèses sur les rendements dans le contexte du changement climatique avec et sans adaptation ont été faites à partir de simulations de rendements culturaux qui, à leur tour, étaient basées sur des données climatiques prévues par des modèles. De ce fait, la moindre incertitude dans les modèles culturaux et les modèles climatiques (voir ci-dessus) se traduit dans l'analyse.

L'incertitude des hypothèses concernant les futures variations de prix et de coûts ainsi que le choix du taux d'actualisation aggravent encore l'incertitude des résultats de l'ACA. Toutefois, les hypothèses posées dans notre étude sont basées sur des études menées dans des conditions socio-économiques comparables à celles du Burkina Faso, diverses sources de données ont été triangulées et des opinions d'experts ont été recherchées. Les conclusions de l'ACA ne devraient pas être considérées comme des résultats définitifs à prévoir lors de la mise en œuvre des stratégies d'adaptation, mais elles peuvent guider la prise de décision et fournir des études de cas pour des scénarios d'adaptation. Les hypothèses sur les rendements dans le contexte du changement climatique avec et sans adaptation ont été faites à partir de simulations de rendements culturaux qui, à leur tour, étaient basées sur des données climatiques prévues par des modèles. De ce fait, la moindre incertitude dans les modèles culturaux et les modèles climatiques se traduit dans l'analyse.

Chapitre 12 – Conclusion et recommandations à l'attention des politiques

12.1 Conclusion

Cette étude fournit une analyse détaillée des risques climatiques au Burkina Faso dans le but d'offrir une base décisionnelle approfondie aux décideurs nationaux et locaux concernant les risques climatiques actuels et futurs pour le secteur agricole. Elle leur permettra de planifier et de mettre en œuvre une stratégie d'adaptation adéquate dans le pays. L'intégralité de la chaîne d'impacts a été modélisée, depuis les variations climatiques et hydrologiques jusqu'aux impacts sur la production animale et agricole qui en découlent.

Le changement climatique aggrave les conditions difficiles auxquelles les petits exploitants sont confrontés au Burkina Faso. Aujourd'hui déjà, les conditions climatiques variables influencent le secteur agricole et, d'après les projections, les risques climatiques devraient s'intensifier à l'avenir. Outre sa variabilité naturelle, le climat du Burkina Faso montre une tendance claire vers le changement. Les projections pour les températures en particulier présentent une fiabilité très élevée ; tous les modèles projetant une augmentation constante des températures jusqu'en 2090 en vertu du scénario d'émissions élevées. En vertu du scénario de réduction des émissions, les températures n'augmentent pas fortement après 2050. Si l'on tient compte de l'augmentation des températures avant 2004 (GIEC, 2014), l'augmentation des températures dépasserait largement l'objectif de 1,5 °C d'ici à 2050 pour la majorité des modèles, même en vertu du scénario de réduction des émissions. Les projections indiquent une augmentation des journées très chaudes et des nuits tropicales dans l'ensemble du pays en vertu des deux scénarios d'émissions. La quantité des précipitations annuelles devrait augmenter dans tout le pays en vertu des deux scénarios d'émissions d'ici à 2050. Après 2050, les projections indiquent une augmentation constante de la quantité des précipitations annuelles en vertu du scénario d'émissions élevées, et leur légère baisse en vertu du scénario de réduction des émissions. D'après les projections, la variabilité interannuelle des quantités de précipitations devrait rester élevée. Cependant, la confiance est bien moindre en ce qui concerne les projections au niveau des changements de précipitations que des températures.

Dans le contexte du changement climatique, nous avons également analysé la future disponibilité en eau des bassins de la Volta et du Niger qui recouvrent ensemble 94 % du Burkina Faso. Les projections indiquent une hausse du débit fluvial en vertu du scénario d'émissions élevées, alors qu'en vertu du scénario SSP1-RCP2.6, le débit fluvial a tendance à diminuer. La recharge des nappes phréatiques devrait augmenter, mais plus fortement en vertu du scénario des émissions élevées. Les projections relatives à l'évapotranspiration suggèrent une augmentation modérée.

La variabilité des rendements des cultures principales au Burkina Faso est principalement liée aux facteurs météorologiques. Leur production est donc particulièrement exposée au changement climatique. Même si notre analyse de modèle cultural comporte certaines incertitudes, les projections montrent que dans le contexte du changement climatique, les cultures analysées deviendront de plus en plus difficiles à produire au Burkina Faso. Les modèles de vocation aux cultures montrent que dans certaines régions du pays, l'adaptabilité au sorgho, au millet et au maïs va augmenter, mais diminuer dans d'autres, et on en conclut donc que dans l'ensemble, les zones propices au sorgho, au millet et au maïs resteront relativement stables au Burkina Faso dans le contexte du changement climatique. Les projections pour le niébé suggèrent une baisse de l'adaptabilité. Nous montrons également que la capacité des agriculteurs à produire des cultures multiples deviendra de plus en plus difficile au Burkina Faso, ce qui limite la capacité de diversification des agriculteurs,

la sécurité alimentaire associée et les avantages de la couverture économique représentée par la polyculture. Les projections concernant les impacts du changement climatique sur les rendements varient suivant les régions et montrent en partie des tendances opposées. Peu de régions au nord (Sahel, Nord et Centre-Nord) montrent des rendements en augmentation (jusqu'à +30 % en vertu de SSP1-RCP2.6 et jusqu'à +20 % en vertu de SSP3-RCP7.0), tandis que peu de régions au sud (Cascades, Haut-Bassins, et Sud-Ouest) présentent des rendements en baisse (de jusqu'à -30 % en vertu de SSP1-RCP2.6 et de jusqu'à -20 % en vertu de SSP3-RCP7.0). Cela peut être dû à une fertilisation plus élevée par le CO_2 associée à la projection de l'augmentation des événements de précipitations vers le nord ainsi que d'une baisse dans le sud. Une projection de l'augmentation des rendements au nord (Sahel et Nord) pourrait être due à la projection d'une meilleure disponibilité en eau pour les cultures dans ces régions sèches, en particulier dans le cas des scénarios d'émissions élevées.

En raison de l'importance de l'élevage dans l'économie du Burkina Faso et pour sa sécurité alimentaire et nutritionnelle, nous avons également analysé les impacts climatiques sur la production animale, en particulier sur la productivité herbagère pour la production animale basée sur les pâturages. Le consensus entre les modèles climatiques sur la baisse des potentiels de pâturage en vertu des deux scénarios de changement climatique est élevé, la baisse étant plus prononcée en vertu du scénario de réduction des émissions que du scénario d'émissions élevées. Les effets d'un réchauffement plus élevé en vertu de SSP3-RCP7.0 pourraient être partiellement contrebalancés par une hausse des précipitations associée à une meilleure utilisation de l'eau par les plantes en raison de la concentration atmosphérique plus élevée de CO_2. Certaines simulations de modèles climatiques indiquent même des hausses de jusqu'à 10 % du potentiel de pâturage en 2090 dans la région du Sahel en vertu du scénario d'émissions élevées.

À partir de la projection de ces impacts liés au changement climatique et des intérêts exprimés par les parties prenantes, nous avons évalué quatre stratégies d'adaptation associées à des cultures spécifiques : les services d'informations climatiques, l'irrigation, la gestion intégrée de la fertilité des sols et les semences améliorées, en ce qui concerne leur potentiel de réduction des risques, leur rapport coût-efficacité ainsi que d'autres critères d'évaluation socio-économiques tels que le développement d'avantages conjoints potentiels. Cette évaluation a été menée selon un cadre multicritère associant des indicateurs d'évaluation d'après un mode biophysique, une analyse économique et des indicateurs d'évaluation souples basés sur une analyse des publications sur le sujet. Le tableau ci-dessous en présente les résultats.

Tableau 15 : Récapitulatif de l'évaluation multicritère de toutes les stratégies d'adaptation.

Stratégies d'adaptation	**Services climatiques**	**Irrigation**	**GIFS**	**Variétés améliorées**
Potentiel d'atténuation des risques	Fort	Moyen à fort	Fort	Fort
Gradient de risque	Indépendance vis-à-vis des risques	Indépendance vis-à-vis des risques	Indépendance vis-à-vis des risques	Indépendance vis-à-vis des risques
Rapport coût-efficacité	Fort	Moyen	Fort	Fort
Potentiel de développement	Fort	Fort	Fort	Fort
Avantages conjoints potentiels	Forts	Forts	Forts	Forts
Répercussions inopportunes potentielles	Faibles	Fortes	Faibles	Moyennes
Obstacles à la mise en œuvre	Moyens	Moyens à forts	Moyens	Moyens à forts
Besoins en matière de soutien institutionnel	Forts	Forts	Moyens à faibles	Moyens à forts

Légende des couleurs : rouge = négatif, jaune = moyen, vert = positif

Si les quatre stratégies d'adaptation se sont avérées présenter un fort potentiel d'atténuation des risques, elles apportent toutes des avantages conjoints différents, certaines pouvant avoir des répercussions négatives potentielles dont il faut soigneusement tenir compte lors de l'encouragement à leur mise en œuvre. Les besoins en matière de soutien institutionnel varient légèrement, mais toutes les stratégies d'adaptation nécessitent au moins l'accompagnement d'un transfert de savoirs et la promotion de l'accès à l'information. L'association de multiples stratégies d'adaptation soigneusement évaluées représente souvent un bon moyen de tirer avantage de plus d'une stratégie.

En général, aucune stratégie d'adaptation seule ne convient pour tout un pays puisque son efficacité et ses avantages conjoints dépendent finalement des impacts climatiques projetés ainsi que de sa conception concrète sur mesure, par rapport au contexte local et aux besoins des agriculteurs. Les impacts concrets des changements climatiques projetés sont non seulement formés par les risques réels, mais aussi par la vulnérabilité et l'exposition des communautés agricoles touchées. Les différentes caractéristiques sociales comme le sexe, l'âge, l'éducation et la santé façonnent considérablement la vulnérabilité des agriculteurs et, de ce fait, leur exposition au changement climatique. Tenir compte de ces caractéristiques est un prérequis important pour former la résilience des communautés agricoles.

Les stratégies d'adaptation bien conçues et correctement mises en œuvre représentent un mécanisme important de réduction des pertes de rendements projetées et présentent des avantages sociaux et environnementaux conjoints variés. La planification de l'adaptation à l'échelle nationale doit être basée sur les connaissances existantes et tenir compte des réalités divergentes sur le terrain. Donner aux agriculteurs l'accès aux informations adaptées, aux outils et aux encouragements incitatifs permettra de développer les mesures d'adaptation dans tout le pays.

12.2 Recommandations à l'attention des politiques

À partir des analyses menées dans le cadre de cette étude des risques climatiques et en coopération étroite avec différents acteurs et spécialistes, diverses recommandations concrètes pour les politiques visant l'adaptation du secteur agricole burkinabé ont été identifiées.

12.2.1 Services d'informations climatiques (SIC)

Plusieurs études ont montré l'impact positif des SIC sur les rendements culturaux et soulignent leur haut potentiel en tant que stratégie d'adaptation. L'accès à des informations climatiques pertinentes permet aux agriculteurs de prendre des décisions éclairées et de réduire ainsi les impacts des risques climatiques. Associés à un investissement relativement restreint et à des retours positifs, les SIC représentent une stratégie très avantageuse. Toutefois, la mise en place de SIC fonctionnels nécessite un appui institutionnel et technique important. À partir de la revue de la littérature, des évaluations multicritères et des ACA, des recommandations spécifiques ont pu être définies afin de soutenir la mise en œuvre des SIC :

- Des campagnes de sensibilisation permettent d'informer les agriculteurs et les communautés rurales sur les avantages considérables des SIC et de renforcer la confiance dans les informations reçues. Des formations sur les SIC permettent aux agriculteurs et, en particulier, aux femmes des communautés rurales, de bien comprendre les informations communiquées et d'agir en fonction. S'assurer que les femmes et d'autres groupes minoritaires ont un accès égalitaire aux SIC permettrait d'encourager l'égalité hommes-femmes dans la production agricole.
- Pour l'instant, les canaux de communication existants (radio, télévision, bouche à oreille) sont les moyens les plus efficaces pour diffuser les SIC, mais de nouvelles voies de communication (téléphones mobiles, smartphones, appareils connectés à internet) se développent au Burkina Faso et devraient être pris en compte pour atteindre une couverture optimale.
- Il faudrait donc soutenir l'accès à des technologies d'informations et de communication plus modernes (smartphones, internet, etc.).
- Les SIC devraient cibler les différents besoins des utilisateurs finaux. Une analyse de toute la chaîne de valeur et des données ventilées selon le sexe permettraient d'identifier ces besoins et de développer des formats ciblés pour rendre la communication plus efficace.

- Il est important que la dissémination des informations par les SIC repose sur une communication efficace et opportune dans la (les) langue(s) locale(s) et sur l'utilisation performante de formats visuels ou audio par ex. pour surmonter les barrières limitant l'accès aux personnes analphabètes ou peu scolarisées.

12.2.2 Irrigation

L'irrigation est une stratégie d'adaptation prometteuse au Burkina Faso. L'irrigation permet aux petits exploitants de compenser les impacts négatifs des précipitations irrégulières et insuffisantes et de stabiliser considérablement la production agricole. La rétention d'eau, qui est essentielle aux systèmes d'irrigation utilisés au Burkina Faso, dépend des variations saisonnières et des zones spécifiques qui influencent l'accessibilité et les effets de l'irrigation. En outre, l'irrigation requiert un investissement important et ne devient rentable qu'au bout de quelques années, en fonction du système d'irrigation et de l'emplacement de l'exploitation. Un soutien institutionnel constant est généralement nécessaire, et il faut veiller à prendre des mesures pour éviter les éventuelles répercussions inopportunes issues de l'irrigation. L'utilisation de l'eau pour l'irrigation doit être soigneusement gérée pour éviter la baisse des nappes phréatiques et les conséquences qui s'ensuivent.

Les recommandations spécifiques relatives à l'irrigation au Burkina Faso sont les suivantes :

- Des options d'irrigation à bas coûts associées à des besoins d'entretien limités peuvent être encouragées partout où des ressources en eau sont disponibles au Burkina Faso.
- Il est essentiel de sensibiliser les usagers sur une gestion de l'irrigation plus économe en eau, afin d'assurer une utilisation à long terme et responsable des ressources naturelles.
- Dans l'idéal, des équipements permettant une économie d'eau comme l'irrigation goutte-à-goutte ou les systèmes d'irrigation intelligents devraient être encouragés par les services de vulgarisation afin d'inciter les agriculteurs à utiliser des techniques durables et respectueuses de l'environnement.
- La fourniture de services de soutien est nécessaire pour renforcer la capacité des agriculteurs à utiliser les technologies et à veiller à leur maintenance.
- Pour développer l'irrigation, tous les intérêts des utilisateurs concernant l'eau et l'énergie devraient être attentivement pris en compte. Des mécanismes de règlement des litiges peuvent être mis en œuvre pour résoudre les conflits potentiels entre utilisateurs en amont et en aval.
- Le développement d'instruments financiers, l'accès aux prêts ou aux crédits, faciliteraient l'accessibilité aux équipements d'irrigation.

12.2.3 Gestion intégrée de la fertilité des sols (GIFS)

Dans le cadre de tous les scénarios de changement climatique, la GIFS est une stratégie d'adaptation prometteuse qui soutient en outre la réhabilitation de vastes zones de terres déjà dégradées et renforce la diversité végétale au Burkina Faso. Actuellement très répandue dans les régions au centre et au nord du Burkina Faso, cette technologie pourrait être bénéfique dans toutes les régions du pays afin de gérer l'humidité et la fertilité des sols et de faire face au stress climatique. Voici les recommandations spécifiques pouvant être définies pour le Burkina Faso :

- La sensibilisation et les formations sur les avantages et la mise en œuvre de la GIFS permettent d'appuyer l'efficacité de cette stratégie, assez coûteuse en matière de temps pour les agriculteurs. La prise en compte de la technologie dans les programmes de formation et de vulgarisation servirait à soutenir une diffusion efficace.
- Les politiques visant le renforcement de l'utilisation durable ainsi que la réhabilitation des sols dégradés et les mécanismes nécessaires pour les mettre en œuvre et les évaluer pourraient promouvoir l'adoption de la GIFS.
- La recherche sur les pratiques de GIFS innovantes ainsi que la diffusion des résultats permettent d'améliorer l'efficacité de la technologie et d'accroître son taux d'adoption.
- Le secteur public peut endosser un rôle important en créant une plateforme réunissant et reliant les partenaires clés dans le domaine de la recherche, de l'éducation, de la vulgarisation, les fournisseurs de services et d'intrants ainsi que les agriculteurs, en vue de faciliter la mobilisation et le renforcement des capacités des fermiers.

- Les politiques qui encouragent les programmes de crédits, de prêts ou de subventions soutenant la production d'intrants biologiques pourraient traiter le problème du manque d'accès aux équipements et aux intrants.

12.2.4 Variétés de cultures améliorées

Le recours aux variétés de cultures améliorées est une stratégie d'adaptation très rentable au Burkina Faso. L'analyse coûts-avantages indique un retour très positif sur un investissement relativement limité. En raison de leur impact positif sur la hausse des rendements, leur stabilité et leur plus grande richesse en nutriments, les variétés améliorées permettent de réduire la malnutrition et la sous-nutrition. Toutefois, plusieurs facteurs tels que le prix élevé des éléments essentiels à cette agriculture, le manque de soutien logistique et financier, la faible organisation du secteur, le manque de motivation des producteurs de semences concernant leur entrée sur le marché, les risques climatiques associés à la production agricole et la baisse de la fertilité des sols entravent l'utilisation des semences améliorées par les agriculteurs. Outre ces facteurs, le manque de connaissances agronomiques ou des variétés non adaptées au niveau local peuvent entraîner des effets controversés ou des répercussions négatives dans le cadre de cette stratégie.

Pour accomplir l'effet d'adaptation optimal des variétés améliorées, des recommandations spécifiques doivent être observées :

- Dans l'idéal, les variétés améliorées promues sont celles qui remplissent diverses conditions comme les préférences des agriculteurs, l'adaptabilité locale, la gestion agronomique, et qui sont disponibles et accessibles aux petits exploitants. Il faudrait donc soutenir la fourniture suffisante de semences de bonne qualité adaptées au niveau local.
- Pour promouvoir un processus continu d'adoption des innovations, les efforts devraient se diriger sur la création d'un secteur des semences couvrant tout le processus des semences améliorées, de la présélection et la sélection des plantes à la diffusion, au marketing et au service de conseil concernant les semences, tout en se concentrant sur les besoins des agriculteurs.
- Le transfert de savoir sur le potentiel des variétés améliorées et sur la meilleure façon de les cultiver encouragerait les agriculteurs à recourir aux variétés améliorées.
- Pour que l'adoption soit profitable, il faut améliorer le fonctionnement de la chaîne de valeur agricole, dont le fonctionnement des infrastructures et des marchés agricoles, pour renforcer la disponibilité et l'accessibilité des éléments essentiels à l'agriculture.
- Il convient également de mettre en lumière la valeur des races primitives locales, car elles sont un pilier important de préservation des traditions locales, des pratiques agronomiques et des savoirs qui les accompagnent. Une telle préservation des semences et des pratiques pourrait être institutionnalisée par des projets de conservation in situ, des banques de semences locales, des corporations de banques de gènes nationales ou internationales, et des salons pour la diversité.
- Une communication et une interaction de meilleure qualité entre acteurs du secteur des semences permettraient d'améliorer la diffusion des semences et des savoirs au niveau local, régional et national.

12.2.5 Recommandations générales

Outre les recommandations liées aux quatre stratégies d'adaptation spécifiques, quelques recommandations générales concernant l'adaptation au Burkina Faso peuvent être mentionnées :

- La planification de l'adaptation devrait être définie au niveau régional, car les différentes parties du Burkina Faso seront touchées différemment par le changement climatique.
- La réaction des cultures aux stratégies d'adaptation diffère suivant les cultures et les régions, ce qui nécessite des mesures d'adaptation spécifiques aux cultures.
- Une meilleure gestion des sols et de l'eau devrait être intégrée dans toutes les activités d'adaptation et prise en compte dès que possible.
- Les potentiels de pâturage du bétail baisseront en vertu des deux scénarios de changement climatique. Le fauchage est une stratégie d'adaptation prometteuse pour fournir des réserves en fourrages.

- À la lumière de la situation actuelle concernant la sécurité dans le pays et dans l'ensemble de la région, couplée à une faible capacité d'adaptation aux effets du changement climatique, les projets d'adaptation doivent tenir compte des dynamiques des conflits. Les responsables politiques devraient prêter particulièrement attention aux besoins dans le domaine agricole des communautés marginalisées. L'organisation de la transhumance est un élément crucial dans l'aggravation de nombreuses tensions intercommunautaires sous-jacentes.
- Quel que soit le risque climatique spécifique visé, les combinaisons de stratégies d'adaptation sont souvent plus efficaces que des approches n'en prévoyant qu'une. Pour éviter tout effet secondaire néfaste, chaque combinaison doit être soigneusement évaluée.
- Il faudrait tenir compte des nombreux savoirs autochtones et traditionnels sur l'adaptation dans les régions du Burkina Faso pour que l'adaptation réussisse. Toutefois, il serait nécessaire de soutenir la recherche dans ce domaine, et même de réactiver des stratégies d'adaptation pratiquées autrefois et qui ont perdu un peu de leur influence ces dernières décennies.
- Des mesures incitatives sont essentielles pour induire l'adoption de stratégies d'adaptation adéquates. De telles structures incitatives reposent notamment sur les systèmes fonciers, l'accessibilité aux crédits et l'accès aux marchés.
- Les agriculteurs ont besoin de soutien pour combler le déficit de financement entre l'investissement et le seuil de rentabilité qui marque le moment où la stratégie d'adaptation devient rentable. C'est généralement le cas au bout de quelques années seulement, et de ce fait, un soutien financier provisoire s'avère nécessaire.
- Des formations et des services de vulgarisation devraient être mis à la disposition des agriculteurs pour les aider à établir et à maintenir les stratégies d'adaptation.
- Il est essentiel de trouver le bon moment pour la fourniture d'intrants aux agriculteurs ou le renforcement de leurs capacités, car autrement, ils risquent de ne pas pouvoir stocker les intrants de manière adéquate ou retenir le savoir et l'utiliser lorsque c'est nécessaire. L'apport tardif d'une formation pourrait entraver les stratégies d'adaptation, car les agriculteurs risquent de ne pas pouvoir pleinement appliquer ce qu'ils ont appris. Souvent, des formations répétées s'avèrent nécessaires pour s'assurer que les informations fournies se transforment en savoirs à long terme.
- La commercialisation des technologies d'adaptation et des produits est importante. Les chaînes de valeur et l'accès aux marchés devraient être pris en compte dans les stratégies d'adaptation des petits exploitants pour leur permettre de commercialiser leurs activités agricoles.
- Les stratégies d'adaptation apportent divers avantages conjoints. Tirant profit de ces avantages, les stratégies d'adaptation devraient être spécialement conçues pour assurer l'égalité entre hommes et femmes, l'atténuation des risques climatiques, et pour protéger les sols.
- La conception des mesures d'adaptation devrait être inclusive. Il faudrait engager les communautés dans toutes les étapes de planification, par ex. grâce aux réunions d'échanges au sein de la communauté. La collecte de données ventilées selon le sexe est cruciale pour la conception de stratégies d'adaptation promouvant l'égalité des sexes.
- Le soutien financier devrait se constituer, par exemple, du Fonds pour l'environnement mondial (FEM), du Fonds vert pour le climat (FVC), des ONG et des partenaires techniques et financiers, qui peuvent contribuer à la mise en œuvre efficace et au développement des stratégies d'adaptation. Les résultats de ce rapport constituent des informations de base fondées sur des preuves pour soutenir une demande auprès du Fonds pour l'environnement mondial, par exemple.
- Les stratégies d'adaptation devraient être intégrées ou soulignées dans les programmes nationaux existants tels que le PAN, le Plan National de Développement Economique et Social (PNDES), le Programme National du Secteur Rural (PNSR), le Programme National pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (PN-GIRE) entre autres.

Références

Abdoussalam, M.S., Dougbedji, D.F., Bado, D.V. B., Ousmane, M. H., Savadogo, D. P. (2017). Manuel a l'usage des formateurs et des producteurs—Recuperation biologique des terres degradees (BDL).

Aboagye, Festus et al. (2008). African Security Review. 17(3).

Access to Seeds. (2018). Identifying Leading Seed Companies in Western and Central Africa. https://www.accesstoseeds.org/app/uploads/2018/05/Leading-Seed-Companies-in-Western-and-Central-Africa.pdf

Access to Seeds. (2019). Burkina Faso. https://www.accesstoseeds.org/index/western-central-africa/country-profile/burkina-faso/

Access to Seeds Index. (2020). Definitions. https://www.accesstoseeds.org/definitions/

Acquah, H. D.-G. (2011). Farmers' Perception and Adaptation to Climate Change: A Willingness to Pay Analysis. Journal of Sustainable Development in Africa, 13(1), 87–107.

Adam, M., Dzotsi, K.A., Hoogenboom, G., Traoré, P.C.S., Porter, C.H., Rattunde, H.F.W., Nebie, B., Leiser, W.L., Weltzien, E., Jones, J.W. (2018). Modelling varietal differences in response to phosphorus in West African sorghum. European Journal of Agronomy, 100 (April), 35–43. https://doi.org/10.1016/j.eja.2018.04.001

Adam, M., MacCarthy, D.S., Traoré, P.C.S., Nenkam, A., Freduah, B.S., Ly, M., Adiku, S.G.K. (2020). Which is more important to sorghum production systems in the Sudano-Sahelian zone of West Africa: Climate change or improved management practices? Agricultural Systems, 185. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102920

Adger, W.N. (2003). Social Aspects of Adaptive Capacity. Climate Change, Adaptive Capacity and Development, 29–49. https://doi.org/10.1142/9781860945816_0003

Adger, W.N., Arnell, N.W., Tompkins, E.L. (2005). Successful Adaptation to Climate Change Across Scales. Global Environmental Change, 15(2), 77–86. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2004.12.005

Aguilar, L. (2013). A Path to Implementation: Gender-Responsive Climate Change Strategies. In Alston, M., Whittenbury, K. (Eds.), Research, Action and Policy: Addressing the Gendered Impacts of Climate Change. Springer Dordrecht.

Ahmed, A., Lawson, E. T., Mensah, A., Gordon, C., Padgham, J. (2016). Adaptation to Climate Change or Non-Climatic Stressors in Semi-Arid Regions? Evidence of Gender Differentiation in Three Agrarian Districts of Ghana. Environmental Development. https://doi.org/10.1016/j.envdev.2016.08.002

Akponikpè, P.B.I., Johnston, P., Agbossou, E.K. (2010). Farmers' Perception of Climate Change and Adaptation Strategies in Sub-Saharan West-Africa. 2nd International Conference: Climate, Sustainability and Development in Semi-Arid Regions, January, 15.

Alston, M. (2013). Introducing Gender and Climate Change: Research, Policy and Action. In Alston, M., Whittenbury, K. (Eds.), Research, Action and Policy: Addressing the Gendered Impacts of Climate Change. Springer Dordrecht.

Alvar-Beltrán, J., Dao, A., Marta, A.D., Heureux, A., Sanou, J., Orlandini, S. (2020). Farmers' Perceptions of Climate Change and Agricultural Adaptation in Burkina Faso. Atmosphere, 11(8), 1–15. https://doi.org/10.3390/ATMOS11080827

Amaru, S., Chhetri, N.B. (2013). Climate Adaptation: Institutional Response to Environmental Constraints, and the Need for Increased Flexibility, Participation and Integration of Approaches. Applied Geography, 39, 128–139. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2012.12.006

Arora-Jonsson, S. (2011). Virtue and vulnerability: Discourses on women, gender and climate change. Global Environmental Change. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.01.005

Aschenbrenner, P. (2018). Climate Model Performance and Projections over West Africa based on ISI-MIP Data (Master's Thesis).

Aschenbrenner, P., Chemura, A., Jarawura, F., Habtemariam, L., Lüttringhaus, S., Murken, L., Roehrig, F., Tomalka, J., Gornott, C. (forthcoming). Climate Risk Analysis for Identifying and Weighing Adaptaiton Strategies for the Agricultural Sector in Northern Ghana. Potsdam Institute for Climate Impact Research.

Backiny-Yetna, P., McGee, K. (2015). Gender Differentials and Agricultural Productivity in Niger (No. 7199; Policy Research Working Paper).

Barbier, B., Hamma, A. E., Ae, Y., Karambiri, H., Malick, A. E., Ae, Z., Somé, B. (2009). Human Vulnerability to Climate Variability in the Sahel: Farmers' Adaptation Strategies in Northern Burkina Faso. Environmental Management, 43(5), 790–803. https://doi.org/10.1007/s00267-008-9237-9

Basson, F., Dayamba, D.S., Korahire, J., Dipama, J.M., Zougmore, F., Neya, T. (2020). Institutional Barriers to Climate Change Adaptation in Burkina Faso: How Could We Go Around

Them? Journal of Sustainable Development, 13(5), 67. https://doi.org/10.5539/jsd.v13n5p67

Bee, B., Biermann, M., Tschakert, P. (2013). Gender, Development and Rights-Based Approaches: Lessons for Climate Change Adaptation and Adaptive Social Protection. In Alston, M., Whittenbury, K. (Eds.), Research, Action and Policy: Addressing the Gendered Impacts of Climate Change. Springer Dordrecht.

Belcore, E., Pezzoli, A., Calvo, A. (2020). Analysis of Gender Vulnerability to Climate-Related Hazards in a Rural Area in Ethiopia. The Geographical Journal, 186, 156–170.

Belesova, K., Gornott, C., Milner, J., Sié, A., Sauerborn, R., Wilkinson, P. (2019). Mortality impact of low annual crop yields in a subsistence farming population of Burkina Faso under the current and a 1.5 °C warmer climate in 2100. Science of The Total Environment, 691, Pages 538-548.

Biermann, F., Betsill, M.M., Gupta, J., Kanie, N., Lebel, L., Liverman, D., Schroeder, H., Siebenhüner, B., Zondervan, R. (2010). Earth System Governance: A Research Framework. International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics, 10(4), 277–298. https://doi.org/10.1007/s10784-010-9137-3

Biesbroek, G.R., Klostermann, J.E.M., Termeer, C. J. A. M., Kabat, P. (2013). On the Nature of Barriers to Climate Change Adaptation. Regional Environmental Change, 13(5), 1119–1129. https://doi.org/10.1007/s10113-013-0421-y

Blum, A. (2004). Sorghum physiology. https://doi.org/10.1201/9780203022030.ch4

Boardman, A., Greenberg, D., Vining, A., Weimer, D. (2011). Cost-Benefit Analysis: Concepts and Practice, 4th edition.

Boelee, E., Cecchi, P., Koné, A. (2009). Health Impacts of Small Reservoirs in Burkina Faso (No. 136; IMWI Working Paper Series).

Bozdogan, H. (1987). Model selection and Akaike's information criterion (AIC): The general theory and its analytical extensions. Psychometrika, 52(3), 345–370.

Brockhaus, M., Djoudi, H., Kambire, H. (2012). Multi-Level Governance and Adaptive Capacity in West Africa. International Journal of the Commons, 6(2), 200–232.

Brush, S.B. (1991). A farmer-based approach to conserving crop germplasm. Economic Botany, 45(2), 153–165.

Brush, S B. (2004). Farmers' bounty. The survival of crop diversity in the modern world. Yale University Press.

Brush, S.B., Taylor, J., Bellon, M.R. (1992). Technology adoption and biological diversity in Andean potato agriculture. Journal of Development Economics, 39(2), 365–387. https://doi.org/10.1016/0304-3878(92)90044-A

Bryan, E., Bernier, Q., Espinal, M., Ringler, C. (2018). Making Climate Change Adaptation Programmes in Sub-Saharan Africa More Gender Responsive: Insights From Implementing Organizations on the Barriers and Opportuni-ties. Climate and Development, 10(5), 417–431. https://doi.org/10.1080/17565529.2017.1301870

Brzoska, M., Scheffran, J. (eds.) (2020). Climate Change, Security Risks, and Violent Conflicts. Essays from Integrated Climate Research in Hamburg. Hamburg: Hamburg University Press.

Carr, E.R., Goble, R., Rosko, H.M., Vaughan, C., Hansen, J. (2020). Identifying Climate Information Services Users and Their Needs in Sub-Saharan Africa: A Review and Learning Agenda. Climate and Development, 12(1), 23–41. https://doi.org/10.1080/17565529.2019.1596061

Carr, E. R., Thompson, M. C. (2014). Gender and Climate Change Adaptation in Agrarian Settings: Current Thinking, New Directions, and Research Frontiers. Geography Compass, 8(3), 182–197. https://doi.org/10.1111/gec3.12121

Cecchi, P., Nikiema, A., Moiroux, N. (2009). Towards an Atlas of Lakes and Reservoirs in Burkina Faso (Small Reservoirs Toolkit, Issue January).

Chauvin, F., Roehrig, R., Lafore, J.P. (2010). Intraseasonal variability of the saharan heat low and its link with midlatitudes. Journal of Climate. https://doi.org/10.1175/2010JCLI3093.1

Chemura, A., Schauberger, B., Gornott, C. (2020). Impacts of climate change on agro-climatic suitability of major food crops in Ghana. PLoS ONE, 15(6). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229881

Chen, J., Brissette, F.P., Chaumont, D., Braun, M. (2013). Finding appropriate bias correction methods in downscaling precipitation for hydrologic impact studies over North America. Water Resources Research. https://doi.org/10.1002/wrcr.20331

Chen, T., Guestrin, C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. Proceedings of the ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 13-17-August, 785–794. https://doi.org/10.1145/2939672.2939785

Choudhary, S., Guha, A., Kholova, J., Pandravada, A., Messina, C.D., Cooper, M., Vadez, V. (2020). Maize, sorghum, and pearl millet have highly contrasting species strategies to adapt to water stress and climate change-like conditions. Plant Science 295, 110297.

CILSS (Comité permanent Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel) (2012). Bonnes pratiques agro-sylvo- pastorales d'amélioration durable de la fertilité des sols au Burkina Faso. http://portails.cilss.bf:8500/documents/1_BonnesPratiques_AgroSylvoPastorales.pdf

Compaore, G.C., Sawadogo-Compaore, E., Temple, L., Nlend Nkott, A.L., Sourrisseau, J., Sawadogo, N. (2020). Gouvernance, structuration du secteur semencier du Burkina Faso. Un focus sur Sorgho, Niébé, Gombo (p. 34). CIRAD-INERA. (Working Paper - Projet Coex, 2)

CORAF (Le Conseil ouest et centre africain pour la recherche et le développement agricoles). (2018). Impact de l'adoption des variétés améliorées de maïs sur l'amélioration du bien-être et la réduction de la pauvreté des maïsiculteurs de la zone UEMOA, Document d'orientation politique. http://coraf.org/wp-content/uploads/2018/09/document-orientation-politique.pdf

Conway, D., Persechino, A., Ardoin-Bardin, S., Hamandawana, H., Dieulin, C., Mahé, G. (2009). Rainfall and Water Resources Variability in Sub-Saharan Africa during the Twentieth Century. Journal of Hydrometeorology, 10(1), 41–59. https://doi.org/10.1175/2008JHM1004.1

Copernicus Climate Change Service (C3S). (2017). ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate.

Cucchi, M., Weedon, G. P., Amici, A., Bellouin, N., Lange, S., Muller Schmied, H., Hersbach, H., Buontempo, C. (2020). WFDE5: Bias adjusted ERA5 reanalysis data for impact studies.

Dabiré, I., Theriault, V., Smale, M. (2018). Le Rôle du Genre dans l'Intensification de la Production du Sorgho au Burkina Faso: Une Etude de Méthodes Mixtes. In MSU International Development Working Paper Series (Vol. 159).

Davin, E.L., de Noblet-Ducoudre, N. (2010). Climatic impact of global-scale Deforestation: Radiative versus nonradiative processes. Journal of Climate. https://doi.org/10.1175/2009JCLI3102.1

De Fraiture, C., Giordano, M. (2014). Small Private Irrigation: A Thriving but Overlooked Sector. Agricultural Water Management, 131, 167–174. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.07.005

De Fraiture, C., Ndanga, G., Sally, H., Kabre, P. (2014). Pirates or Pioneers? Unplanned irrigation Around Small Reservoirs in Burkina Faso. Agricultural Water Management, 131, 212–220. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.07.001

Defrance, D., Ramstein, G., Charbit, S., Vrac, M., Famien, A. M., Sultan, B., Swingedouw, D., Dumas, C., Gemenne, F., Alvarez-Solas, J., Vanderlinden, J. P. (2017). Consequences of rapid ice sheet melting on the Sahelian population vulnerability. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. https://doi.org/10.1073/pnas.1619358114

Descroix, L., Genthon, P., Amogu, O., Rajot, J.-L., Sighomnou, D., Vauclin, M. (2012). Change in Sahelian Rivers hydrograph: The case of recent red floods of the Niger River in the Niamey region. Global and Planetary Change, 98–99, 18–30. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.07.009

Dickin, S., Segnestam, L., Sou Dakouré, M. (2020). Women's Vulnerability to Climate-Related Risks to Household Water Security in Centre-East, Burkina Faso. Climate and Development, 0(0), 1–11. https://doi.org/10.1080/17565529.2020.1790335

Egbebiyi, T.S., Crespo, O., Lennard, C., Zaroug, M., Nikulin, G., Harris, I., Price, J., Forstenhäusler, N., Warren, R. (2020). Investigating the potential impact of 1.5, 2 and 3 °C global warming levels on crop suitability and planting season over West Africa. PeerJ. 2020 May 5;8:e8851. PMID: 32411508. https://doi.org/10.7717/peerj.8851.

Ehret, U., Zehe, E., Wulfmeyer, V., Warrach-Sagi, K., Liebert, J. (2012). HESS Opinions "Should we apply bias correction to global and regional climate model data?" In Hydrology and Earth System Sciences. https://doi.org/10.5194/hess-16-3391-2012

Engle, N. L. (2011). Adaptive Capacity and Its Assessment. Global Environmental Change, 21(2), 647–656. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.01.019

Evangelista, P., Young, N., Burnett, J. (2013). How will climate change spatially affect agriculture production in Ethiopia? Case studies of important cereal crops. Climatic Change, 119(3–4), 855–873. https://doi.org/10.1007/s10584-013-0776-6

Evans, A. E. V., Giordano, M., Clayton, T. (2012). Investing in Agricultural Water Management to Benefit Smallholder Farmers in Burkina Faso. In IWMI Working Papers (No. 149; IMWI Working Papers, Vol. 149). https://doi.org/10.5337/2012.211

Ewert, F., Rötter, R. P., Bindi, M., Webber, H., Trnka, M., Kersebaum, K. C., Olesen, J. E., van Ittersum, M. K., Janssen, S., Rivington, M., Semenov, M. A., Wallach, D., Porter, J. R., Stewart, D., Verhagen, J., Gaiser, T., Palosuo, T., Tao, F., Nendel, C., Roggero, P.P., Bartosova, L., Asseng, S. (2015). Crop modelling for integrated assessment of risk to food production from climate change. Environmental Modelling & Software, 72, 287–303. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.12.003

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. Geoscientific Model Development. https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016

FAO (Food and Agriculture Organization). (2001). Irrigation Manual: Planning, Development, Monitoring and Evaluation of Irrigated Agriculture with Farmer Participation.

FAO (Food and Agriculture Organization). (2007). Gender and Law: Women's Rights in Agriculture. FAO Legislative Study 76, Rev. 1. FAO: Rome, Italy.

FAO (Food and Agriculture Organization). (2010). Crop calendar—An information tool for seed security.

FAO (Food and Agriculture Organization). (2011). The State of Food and Agriculture 2010–2011: Women in Agriculture, Closing the Gender Gap for Development. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44988-9_8

FAO (Food and Agriculture Organization). (2014). Burkina Faso. Socio-economic context and role of agriculture. Country fact sheet on food and agriculture policy trends. http://www.fao.org/docrep/field/009/i3760e/i3760e.pdf

FAO (Food and Agriculture Organization). (2018a). Africa Sustainable Livestock (ASL) 2050 Livestock production systems spotlight – Burkina Faso.

FAO (Food and Agriculture Organization). (2018b). Cost-benefit analysis for climate change adaptation policies and investments in the agriculture sectors.

FAO (Food and Agriculture Organization). (n.d.). AQUASTAT Database. AQUASTAT Website. accessed on (25/11/2021). http://www.fao.org/aquastat/statistics/query/index.html

FAOSTAT. (2017). Agricultural area in Burkina Faso. http://www.fao.org/faostat/en/#country/233

FAOSTAT. (2020). Burkina Faso Crop and Livestock Data. http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC

FAOSTAT. (2021). FAOSTAT - Marco Indicators. http://www.fao.org/faostat/en/#data/MK

Fatondji, D., Bationo, A., Tabo, R., Jones, J.W., Adamou, A., Hassane, O. (2012). Water use and yield of millet under the zai system: Understanding the processes using simulation. In Improving soil fertility recommendations in Africa using the Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) (pp. 77–100). Springer.

Faye, B., Webber, H., Naab, J.B., MacCarthy, D.S., Adam, M., Ewert, F., Lamers, J. P.A., Schleussner, C.F., Ruane, A., Gessner, U., Hoogenboom, G., Boote, K., Shelia, V., Saeed, F., Wisser, D., Hadir, S., Laux, P., Gaiser, T. (2018). Impacts of 1.5 versus 2.0 °c on cereal yields in the West African Sudan Savanna. Environmental Research Letters, 13(3) . https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaab40

FEWS NET (Famine Early Warning Systems Network). (2017). Burkina Faso Staple Food and Livestock Market Fundamentals. https://fews.net/sites/default/files/documents/reports/FEWS%20NET%20BurkinaFaso%20MFR_final_20170929_0.pdf

FEWS NET (2020): Burkina Faso Price Bulletin, May 2020, USAID

Figueiredo, P., Perkins, P.E. (2013). Women and Water Management in Times of Climate Change: Participatory and Inclusive Processes. Journal of Cleaner Production, 60, 188–194. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.02.025

Fisher, M., Abate, T., Lunduka, R.W., Asnake, W., Alemayehu, Y., Madulu, R.B. (2015). Drought tolerant maize for farmer adaptation to drought in sub-Saharan Africa: Determinants of adoption in eastern and southern Africa. Climate Change, 133(2), 283–299. https://doi.org/10.1007/s10584-015-1459-2

Folberth, C., Gaiser, T., Abbaspour, K. C., Schulin, R., Yang, H. (2012). Regionalization of a large-scale crop growth model for sub-Saharan Africa: Model setup, evaluation, and estimation of maize yields. Agriculture, Ecosystems & Environment, 151, 21–33. https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.01.026

Folberth, C., Skalský, R., Moltchanova, E., Balkovič, J., Azevedo, L. B., Obersteiner, M., Van Der Velde, M. (2016). Uncertainty in soil data can outweigh climate impact signals in global crop yield simulations. Nature Communications. https://doi.org/10.1038/ncomms11872

Fossi Tuekam, S., Barbier, B. Yacouba, H., Diarra, A. (2012). Supplemental irrigation in farming systems: history of a practice and outlooks for Burkina Faso.

Fowe, T., Karambiri, H., Paturel, J.-E., Poussin, J.-C., Cecchi, P. (2015). Water balance of small reservoirs in the Volta basin: A case study of Boura reservoir in Burkina Faso. Agricultural Water Management, 152, 99–109. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.006

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—A new environmental record for monitoring extremes. Scientific Data, 2, 150066.

Gerland, P., Raftery, A. E., Ševčíková, H., Li, N., Gu, D., Spoorenberg, T., Alkema, L., Fosdick, B. K., Chunn, J., Lalic, N. (2014). World population stabilization unlikely this century. Science, 346(6206), 234–237.

Giannini, A., Kaplan, A. (2019). The role of aerosols and greenhouse gases in Sahel drought and recovery. Climatic Change. https://doi.org/10.1007/s10584-018-2341-9

Gornott, C., Wechsung, F. (2016). Statistical regression models for assessing climate impacts on crop yields: A validation study for winter wheat and silage maize in Germany. Agricultural and Forest Meteorology, 217, 89–100. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.10.005

Government of Burkina Faso. (2011). Les bonnes pratiques de gestion durable des terres au Burkina Faso. http://www.onedd-burkina.info/images/gestion_durable_terres/bp-gdt_0_sommaireintro_nov-2011.pdf

Government of Burkina Faso. (2012). Programme National du Secteur Rural (PNSR) 2011-2015.
Government of Burkina Faso. (2013). Politique Nationale de Sécurité Alimentaire et Nutritionelle.
Government of Burkina Faso. (2015a). Burkina Faso National Climate Change Adaptation Plan (NAP) (Issue May).
Government of Burkina Faso. (2015b). Intended Nationally Determined Contributions (INDC) in Burkina Faso (Issue September).
Government of Burkina Faso. (2015c). Stratégie de Developpment Rural à l'Horizon 2016-2025 du Burkina Faso.
Government of Burkina Faso. (2016). Strategie nationale d'apprentissage sur le changement climatique 2016-2025.
Gross, B., Jaubert, R. (2019). Vegetable Gardening in Burkina Faso: Drip Irrigation, Agroecological Farming and the Diversity of Smallholder Farmers. Water Alternatives, 12(1), 46–67.
Guido, Z., Knudson, C., Campbell, D., Tomlinson, J. (2020). Climate Information Services for A daptation: What Does It Mean to Know the Context? Climate and Development, 12(5), 395–407. https://doi.org/10.1080/17565529.2019. 1630352
Haan de, S. (2009). Potato diversity at height. Multiple dimensions of farmer-driven in-situ conservation in the Andes. Wageningen University.
Hand, D.J., Till, R.J. (2001). A Simple Generalisation of the Area Under the ROC Curve for Multiple Class Classification Problems. Machine Learning, 45(2), 171–186. https://doi.org/10.1023/A:1010920819831
Harlan, J. R. (1976). Genetic Resources in Wild Relatives of Crops. Crop Science, 16(3), 329. https://doi.org/10.2135/cropsci1976.0011183X001600030004x
Harlan, J.R. (1992). Crops & man (2nd ed.). American Society of Agronomy and Crop Science Society of America, Madison.
Hausfather, Z. (2018). Explainer: How "shared socioeconomic pathways" explore future climate change. CarbonBrief. https://doi.org/10.1007/s10584-013-0905-2
Herzschuh, U., Borkowski, J., Schewe, J., Mischke, S., Tian, F. (2014). Moisture-advection feedback supports strong early-to-mid holocene monsoon climate on the eastern tibetan plateau as inferred from a pollen-based reconstruction. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2014.02.022
Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Shelia, V., Wilkens, P.W., Singh, U., White, J.W., Asseng, S., Lizaso, J.I., Moreno, L.P. (2019). The DSSAT crop modeling ecosystem. Advances in Crop Modelling for a Sustainable Agriculture, 173–216.
Hoogenboom, G., Porter, C. H., Shelia, V., Boote, K. J., Singh, U., White, J. W., Hunt, L. A., Ogshi, R., Lizaso, J. I., Koo, J., Asseng, S., Singels, A., Moreno, L. P., Jones, J. W. (2017). Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.7. USA.
Hörner, D., Wollni, M. (2021). Integrated soil fertility management and household welfare in Ethiopia. Food Policy, 102022. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2020.102022
Hovi, J., Sprinz, D. F., Underdal, A. (2009). Implementing Long-term Climate Policy: Time Inconsistency, Domestic Politics, International Anarchy. Global Environmental Politics, 9(3), 20–39. https://doi.org/10.1162/glep.2009.9.3.20
Human Rights Watch. (2018). "By Day We Fear the Army, By Night the Jihadists" - Abuses by Armed Islamists and Security Forces in Burkina Faso. https://www.hrw.org/report/2018/05/21/day-we-fear-army-night-jihadists/abuses-armed-islamists-and-security-forces
Hurtt, G. C., Chini, L., Sahajpal, R., Frolking, S., Bodirsky, B. L., Calvin, K., Doelman, J. C., Fisk, J., Fujimori, S., Klein Goldewijk, K., Hasegawa, T., Havlik, P., Heinimann, A., Humpenöder, F., Jungclaus, J., Kaplan, J., Kennedy, J., Kristzin, T., Lawrence, D., Ma, L., Mertz, O., Pongratz, J., Popp, A., Poulter, B., Riahi, K., Shevliakova, E., Stehfest, E., Thornton, P., Tubiello, F.N., van Vuuren, D.P., Zhang, X. (2020). Harmonization of Global Land-Use Change and Management for the Period 850–2100 (LUH2) for CMIP6. Geoscientific Model Development Discussions, in review. https://doi.org/10.5194/gmd-2019-360
International Commission on Irrigation and Drainage. (2013). Dakar Declaration on Irrigation. https://www.icid.org/decl_dakar.html
International Crisis Group. 2020. Burkina Faso: Stopping the Spiral of Violence. Dakar/Brussels.
IPCC. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. In Climate Change 2014: Synthesis. https://doi.org/10.1256/004316502320517344
IPCC. (2019). Climate Change and Land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Intergovernmental Panel on Climate Change.
Ishikawa, H., Drabo, I., Joseph, B., Batieno, B., Muranaka, S., Fatokoun, C., Boukar, O. (2020). Characteristics of farmers' selection criteria for cowpea (Vigna unguiculata) varieties differ between north and south regions of Burkina Faso. Ex. Agric, 56(1), 94–103. https://doi.org/10.1017/S001447971900019X
Ishikawa, H., Drabo, I., Muranaka, S., Boukar, O. (2013). Cowpea field guide for Burkina Faso. IITA.
Jalloh, A., Nelson, G.C., Thomas, T.S., Zougmoré, R., Roy-Macauley, H. (2013). West African agriculture and climate change: A comprehensive analysis. IFPRI Research Monograph. Washington, D.C. International Food Policy

Research Institute
http://dx.doi.org/10.2499/9780896292048
Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K. J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., Ritchie, J.T. (2003). The DSSAT cropping system model. European Journal of Agronomy, 18(3–4), 235–265.
Jost, C., Kyazze, F., Naab, J., Neelormi, S., Kinyangi, J., Zougmore, R., Aggarwal, P., Bhatta, G., Chaudhury, M., Tapio-Bistrom, M. L., Nelson, S., Kristjanson, P. (2016). Understanding Gender Dimensions of Agriculture and Climate Change in Smallholder Farming Communities. Climate and Development, 8(2), 133–144.
https://doi.org/10.1080/17565529.2015.1050978
Juana, J. S., Kahaka, Z., Okurut, F. N. (2013). Farmers' Perceptions and Adaptations to Climate Change in Sub-Sahara Africa: A Synthesis of Empirical Studies and Implications for Public Policy in African Agriculture. Journal of Agricultural Science, 5(4), 121–135.
https://doi.org/10.5539/jas.v5n4p121
Kaboré, R., Dabat, M.-H., Vom, B. K. (2010). Coordination et durabilité des nouvelles formes de production semencière vivrière au Burkina Faso.
Kabore-Sawadogo, S., Ouattara, K., Balima, M., Ouédraogo, I., Traoré, S., Savadogo, M., Gowing, J. (2013). Burkina Faso: Cradle of farm-scale technologies. In Critchley, W., Gowing, J. (Eds.). (2012). Water Harvesting in Sub-Saharan Africa (1st ed.). Routledge.
https://doi.org/10.4324/9780203109984
Kakota, T., Nyariki, D., Mkwambisi, D., Kogi-Makau, W. (2011). Gender Vulnerability to Climate Variability and Household Food Insecurity. Climate and Development, 3(4), 298–309.
https://doi.org/10.1080/17565529.2011.627419
Kambou, D. (2019). Évaluation des performances techniques de l'irrigation au Burkina Faso. Université de Liège, 166.
Keil, A., Krishnapriya, P. P., Mitra, A., Jat, M. L., Sidhu, H. S., Krishna, V. V., Shyamsundar, P. (2020). Changing agricultural stubble burning practices in the Indo-Gangetic plains: Is the Happy Seeder a profitable alternative? International Journal of Agricultural Sustainability.
https://doi.org/10.1080/14735903.2020.1834277
Kelley, C. P., Mohtadi, S., Cane, M. A., Seager, R., Kushnir, Y. (2015). Climate change in the Fertile Crescent and implications of the recent Syrian drought. Proceedings of the National Academy of Sciences, 112(11), 3241–3246.
https://doi.org/10.1073/pnas.1421533112
Kieran, C., Gray, B., Gash, M. (2012). Understanding Gender Norms in Rural Burkina Faso: A Qualitative Assessment.
Klopper, E., Vogel, C. H., Landman, W. A. (2006). Seasonal Climate Forecasts: Potential Agricultural Risk Management Tools? Climatic Change, 76(1–2), 73–90.
https://doi.org/10.1007/s10584-005-9019-9
Knauer, K., Gessner, U., Fensholt, R., Forkuor, G., Kuenzer, C. (2017). Monitoring agricultural expansion in Burkina Faso over 14 years with 30 m resolution time series: The role of population growth and implications for the environment. Remote Sensing, 9(2).
https://doi.org/10.3390/rs9020132
Konate, M., Sanou, J., Miningou, A., Okello, D. K., Desmae, H., Janila, P., Mumm, R. H. (2020). Past, present and future perspectives on groundnut breeding in Burkina Faso. Agronomy, 10(5), 704.
https://doi.org/10.3390/agronomy10050704
Korbéogo, G. (2020). Framing the Fluidity of Water Management Conflicts in the Bagré Irrigation Scheme, Burkina Faso. Water Alternatives, 13(1), 70–92.
Kothe, S., Lüthi, D., Ahrens, B. (2014). Analysis of the West African Monsoon system in the regional climate model COSMO-CLM. International Journal of Climatology.
https://doi.org/10.1002/joc.3702
Krysanova, V., Hattermann, F., Huang, S., Hesse, C., Vetter, T., Liersch, S., Koch, H., Kundzewicz, Z. W. (2015). Modelling climate and land-use change impacts with SWIM: lessons learnt from multiple applications. Hydrological Sciences Journal, 60(4), 606–635.
https://doi.org/10.1080/02626667.2014.925560
Lamachere, J., Sewantie, G. (1990). Valorisation agricole des eaux de ruissellement et lutte contre l'érosion sur champs cultives en mil en zone soudano-sahélienne Burkina Faso—Province du Yatenga—Région de Bidi. In Utilisation Rationnelle de L'eau et des Petits Bassins Versants en Zone Aride.
Lange, S. (2016). EartH2Observe, WFDEI and ERA-Interim Data Merged and Bias-Corrected for ISIMIP (EWEMBI). In GFZ Data Services.
Lange, S. (2019a). Trend-preserving bias adjustment and statistical downscaling with ISIMIP3BASD (v1.0). Geoscientific Model Development Discussions.
https://doi.org/10.5194/gmd-2019-36
Lange, S. (2019b). WFDE5 over land merged with ERA5 over the ocean (W5E5). V. 1.0. GFZ Data Services.
https://doi.org/10.5880/pik.2019.023
Laux, P., Kunstmann, H., Bárdossy, A. (2008). Predicting the regional onset of the rainy season in West Africa. International Journal of Climatology. https://doi.org/10.1002/joc.1542
Lazarus, R. J. (2009). Super Wicked Problems and Climate Change: Restraining the Present to Liberate the Future. Cornell Law Review, 94(5), 1153–1233.
Liersch, S., Drews, M., Pilz, T., Salack, S., Sietz, D., Aich, V., Larsen, M.A.D., Gädeke, A., s, K.H., Thiery, W., Huang, S., Lobanova, A., Koch, H., Hattermann, F.F. (2020). One simulation,

different conclusions—The baseline period makes the difference! Environmental Research Letters, 15(10), 104014. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba3d7

Lotze-Campen, H., Witzke, H. v., Noleppa, S., Schwarz, G. (2015): Science for food, climate protection and welfare: An economic analysis of plant breeding research in Germany. - Agricultural Systems, 136, 79-84. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.02.005

Lo, H. M., Dieng, M. (2015). Impact Assessment of Communicating Seasonal Climate Forecasts in Kaffrine, Diourbel, Louga, Thies and Fatick (Niakhar) Regions in Senegal.

Ludi, E., Jones, L., Levine, S. (2012). Changing focus? How to start taking adaptive capacity seriously. ODI Briefing Papers, January, 1–4.

Lugen, M. (2020). Framing Climate Services: Logics, Actors, and Implications for Policies and Projects. Atmosphere, 11(10). https://doi.org/10.3390/atmos11101047

Lüttringhaus, S., Gornott, C., Wittkop, B., Noleppa, S., Lotze-Campen, H. (2020). The Economic Impact of Exchanging Breeding Material: Assessing Winter Wheat Production in Germany. Frontiers in Plant Science, 11(601013). https://doi.org/10.3389/fpls.2020.601013

MAAHA (Ministry of Agriculture and Hydro-Agricultural Development). (2019). Tableau de Bord Statistique de l'Agriculture.

MAAH/DGESS (Ministère de l'Agriculture et des Aménagements Hydroagricoles/ Direction Générale des Etudes et des Statistiques Sectorielles). (2020). Données officielles de l'Enquête Permanente Agricole (EPA) sur le rendement des principales cultures au Burkina Faso sur le période 1990-2019.

Mach, K.J., Kraan, C.M., Adger, W.N. et al. Climate as a risk factor for armed conflict. Nature 571, 193–197 (2019). https://doi.org/10.1038/s41586-019-1300-6

Mahé, G. (2006). The impacts of land-use/land-cover change and climate variability on the hydrology of the Sahel. 8.

Mahe, G., Lienou, G., Descroix, L., Bamba, F., Paturel, J. E., Laraque, A., Meddi, M., Habaieb, H., Adeaga, O., Dieulin, C., Kotti, F. C., Khomsi, K. (2013). The rivers of Africa: Witness of climate change and human impact on the environment. Hydrological Processes, 27(15), 2105–2114. https://doi.org/10.1002/hyp.9813

Mahé, G., Olivry, J.-C. (1999). Assessment of freshwater yields to the ocean along the intertropical Atlantic coast of Africa (1951–1989). Comptes Rendus de l'Académie Des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science, 328(9), 621–626. https://doi.org/10.1016/S1251-8050(99)80159-1

Mahe, G., Paturel, J.-E., Servat, E., Conway, D., Dezetter, A. (2005). The impact of land use change on soil water holding capacity and river flow modelling in the Nakambe River, Burkina-Faso. Journal of Hydrology, 300(1), 33–43. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol. 2004.04.028

Maraun, D. (2016). Bias Correcting Climate Change Simulations—A Critical Review. In Current Climate Change Reports. https://doi.org/10.1007/s40641-016-0050-x

Martin, N., van de Giesen, N. (2005). Spatial distribution of groundwater production and development potential in the volta river basin of ghana and burkina faso. Water International, 30(2), 239–249. https://doi.org/10.1080/02508060508691852

Mason, S. C., Maman, N., Palé, S. (2015). Pearl Millet Production Practices in Semi-Arid West Africa: A Review. Experimental Agriculture, 51(4), 501–521. https://doi.org/10.1017/S0014479714000441

McOmber, C., Panikowski, A., McKune, S., Bartels, W.-L., Russo, S. (2013). Investigating Climate Information Services Through a Gendered Lens (No. 42; CCAFS Working Paper Series, Issue 42).

MEA. (2016). Programme National pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau 2016-2030—PNGIRE.

Mertz, O., Mbow, C., Reenberg, A., Diouf, A. (2009). Farmers' perceptions of climate change and agricultural adaptation strategies in rural Sahel. Environmental Management, 43(5), 804–816. https://doi.org/10.1007/s00267-008-9197-0

Ministere de la Promotion de la Femme. (2009). Document de la politique nationale genre du Burkina Faso.

Ministère de l'Agriculture et du Développement de l'Irrigation du Burkina Faso. (2015a). Politique Nationale de Développment Durable de l'Agriculture Irriguée.

Ministère de l'Agriculture et du Développement de l'Irrigation du Burkina Faso. (2015b). Politique Nationale de l'Eau.

Ministry of Economy and Finance. (2012). Burkina Faso: Strategy for Accelerated Growth and Sustainable Development 2011-2015. https://doi.org/10.5089/9781475503951.002

Minka, N.S., Ayo, J. (2014). Influence of cold–dry (harmattan) season on colonic temperature and the development of pulmonary hypertension in broiler chickens, and the modulating effect of ascorbic acid. Open Access Animal Physiology. 2014; 6:1-11. https://doi.org/10.2147/OAAP.S51741

Morgan, N., Pica-Ciamarra, U. (2011). What does sex-disaggregated data say about livestock and gender in Niger? Livestock Data Innovation in Africa Brief 1. Rome, Italy. FAO. https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/16569/SexDisaggrigated.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Moser, C. (1993). Gender Planning and Development: Theory, Practice and Training. Routledge.

Moser, S.C., Ekstrom, J.A. (2010). A Framework to Diagnose Barriers to Climate Change Adaptation. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 107(51), 22026–22031. https://doi.org/10.1073/pnas.1007887107

MRAH (Ministry of Animal and Fisheries Resources Burkina Faso). (2020). Synthesis Report on Pastoral Resources and Pastoral Zones.

MRAH/DGSS. (Ministry of Animal and Fisheries Resources Burkina Faso / Direction Générale des Etudes et des Statistiques Sectorielles) (2020). Données officielles de l'Enquête Nationale sur l'Effectif du Cheptel (ENEC) sur la période 2004-2019.

Mubaya, C.P., Jemimah, N., Mutsvangwa, E.P., Mugabe, F.T., Nanja, D. (2012). Climate Variability and Change or Multiple Stressors? Farmer Perceptions Regarding Threats to Livelihoods in Zimbabwe and Zambia. Journal of Environmental Management 102 (2012): 9–17. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.02.005

Muema, E., Mburu, J., Coulibaly, J., Mutune, J. (2018). Determinants of Access and Utilisation of Seasonal Climate Information Services Among Smallholder Farmers in Makueni County, Kenya. Heliyon, 4(11). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00889

Mugwe, J., Ngetich, F., Otieno, E.O. (2019). Integrated Soil Fertility Management in Sub-Saharan Africa: Evolving Paradigms Toward Integration (pp. 1–12). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69626-3_71-1

Müller, C., Elliott, J., Chryssanthacopoulos, J., Arneth, A., Balkovic, J., Ciais, P., Deryng, D., Folberth, C., Glotter, M., Hoek, S., Iizumi, T., Izaurralde, R. C., Jones, C., Khabarov, N., Lawrence, P., Liu, W., Olin, S., Pugh, T.A.M., Ray, D., Reddy, A., Rosenzweig, C., Ruane, A.C., Sakurai, G., Schmid, E., Skalsky, R., Song, C., X., Wang, X., de Wit, A., Yang, H. (2016). Global Gridded Crop Model evaluation: Benchmarking, skills, deficiencies and implications. Geoscientific Model Development Discussions. https://doi.org/10.5194/gmd-2016-207

Murken, L., Cartsburg, M., Chemura, A., Didovets, I., Gleixner, S., Koch, H., Lehmann, J., Liersch, S., Lüttringhaus, S., Rivas López, M.R., Noleppa, S., Roehrig, F., Schauberger, B., Shukla, R., Tomalka, J., Yalew, A., Gornott, C. (2020). Climate Risk Analysis for Identifying and Weighing Adaptation Strategies in Ethiopia's Agricultural Sector.

Muitire, C., Kamutando, C., Moyo, M. (2021). Building Stress Resilience of Cereals under Future Climatic Scenarios: 'The Case of Maize, Wheat, Rice and Sorghum.' In Cereal Grains [Working Title]. IntechOpen.

Nation, M.L. (2010). Understanding Women's Participation in Irrigated Agriculture: A Case Study From Senegal. Agriculture and Human Values, 27, 163–176. https://doi.org/10.1007/s10460-009-9207-8

Newman, L.L., Dale, A. (2005). Network structure, diversity, and proactive resilience building: a response to Tompkins and Adger. Ecology and Society 10(1): r2. http://www.ecologyandsociety.org/vol10/iss1/resp2/

Niang, I., Ruppel, O.C., Abdrabo, M.A., Essel, A., Lennard, C., Padgham, J., Urquhart, P. (2014). IPCC - Africa. In Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability—Contributions of the Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415386.002

Nielsen, J. Ø., Reenberg, A. (2010). Cultural Barriers to Climate Change Adaptation: A Case Study from Northern Burkina Faso. Global Environmental Change, 20(1), 142–152. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2009.10.002

Nijsse, F.J. M.M., Cox, P.M., Williamson, M.S. (2020). Emergent constraints on transient climate response (TCR) and equilibrium climate sensitivity (ECS) from historical warming in CMIP5 and CMIP6 models. Earth Syst. Dynam., 11(3), 737–750. https://doi.org/10.5194/esd-11-737-2020

Nyamekye, C., Thiel, M., Schönbrodt-Stitt, S., Zoungrana, B.J.B., Amekudzi, L.K. (2018). Soil and Water Conservation in Burkina Faso, West Africa. Sustainability, 10(9), 1–24. https://doi.org/10.3390/su10093182

Nyantakyi-Frimpong, H. (2019). Unmasking difference: Intersectionality and smallholder farmers' vulnerability to climate extremes in Northern Ghana. Gender, Place and Culture. https://doi.org/10.1080/0966369X.2019.1693344

Obuobie, E., Barry, B. (2012). Burkina Faso. Groundwater Availability and Use in Sub-Saharan Africa: A Review of 15 Countries, 7.

O'Neill, B.C., Kriegler, E., Ebi, K.L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D.S., van Ruijven, B.J., van Vuuren, D.P., Birkmann, J., Kok, K., Levy, M., Solecki, W. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. Global Environmental Change. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004

O'Neill, B.C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D.P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.F., Lowe, J., Meehl, G.A., Moss, R., Riahi, K., Sanderson, B.M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. Geoscientific Model Development. https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016

Orr, A., Schipmann-Schwarze, C., Gierend, A., Nedumaran, S., Mwema, C., Muange, E., Manyasa, E., Ojulong, H. (2020). Research & Development for sorghum and millets? The business case for East and Southern Africa. Glob. Food Sec. 26, 100458

Orstom. (1977). Monographies Hydrologiques Orstom No. 5—Le Bassin Du Fleuve Volta.

Ortega, R. (1997). Peruvian in situ conservation of Andean crops. In N. Maxted, B. Ford-Lloyd, Hawkes (Eds.), Plant genetic conservation. The in situ approach (1st ed.). Chapman & Hall.

Ouédraogo, M., Barry, S., Zougmoré, R.B., Partey, S.T., Somé, L., Baki, G. (2018). Farmers' Willingness to Pay for Climate Information Services: Evidence From Cowpea and Sesame Producers in Northern Burkina Faso. Sustainability (Switzerland), 10(3). https://doi.org/10.3390/su10030611

Ouédraogo, M., Zougmoré, R.B., Barry, S., Somé, L., Grégoire, B. (2015). The value and benefits of using seasonal climate forecasts in agriculture: evidence from cowpea and sesame sectors in climate-smart villages of Burkina Faso.

Partey, S. T., Zougmoré, R. B., Ouédraogo, M., Campbell, B. M. (2018). Developing climate-smart agriculture to face climate variability in West Africa: Challenges and lessons learnt. Journal of Cleaner Production, 187(April), 285–295. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.199

Pavelic, P., Giordano, M., Keraita, B. N., Ramesh, V., Rao, T. (2012). Groundwater availability and use in Sub-Saharan Africa: A review of 15 countries. International Water Management Institute (IWMI).

Perez, C., Jones, E.M., Kristjanson, P., Cramer, L., Thornton, P.K., Förch, W., Barahona, C. (2015). How Resilient Are Farming Households and Communities to a Changing Climate in Africa? A Gender-Based Perspective. Global Environmental Change, 34, 95–107. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.06.003

Petit, O., Baron, C. (2009). Integrated Water Resources Management: From general principles to its implementation by the state. The case of Burkina Faso. Natural Resources Forum, 33(1), 49–59. https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.2009.01208.x

Pfeifer, C., Morris, J., Ensor, J., Ouédraogo-Koné, S., Mulatu, D. W., Wakeyo, M. (2020). Designing sustainable pathways for the livestock sector: The example of Atsbi, Ethiopia and Bama, Burkina Faso. International Journal of Agricultural Sustainability, 1–16. https://doi.org/10.1080/14735903.2020.1824419

Plecher, H. (2020). Countries with the highest population growth rate 2017. Statista.

Popenoe, H., King, S.R., Leon, J., Kalinowski, L.S., Vietmeyer, N.D., Dafforn, M. (1989). Lost crops of the Incas. Little-known plants of the Andes with promise for worldwide cultivation. National Academy Press.

Quillérou, E. (2019). Module: Cost-benefit analysis.

Ramirez-Villegas, J., Jarvis, A., Läderach, P. (2013). Empirical approaches for assessing impacts of climate change on agriculture: The EcoCrop model and a case study with grain sorghum. Agricultural and Forest Meteorology, 170, 67–78. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.09.005

Rao, N., Lawson, E.T., Raditloaneng, W.N., Solomon, D., Angula, M.N. (2019). Gendered Vulnerabilities to Climate Change: Insights From the Semi-Arid Regions of Africa and Asia. Climate and Development, 11(1), 14–26. https://doi.org/10.1080/17565529.2017.1372266

Rattunde, H.F.W., Michel, S., Leiser, W.L., Piepho, H.P., Diallo, C., Vom Brocke, K., Diallo, B., Haussmann, B.I.G., Weltzien, E. (2016). Farmer participatory early-generation yield testing of sorghum in west Africa: Possibilities to optimize genetic gains for yield in farmers' fields. Crop Science, 56(5), 2493–2505. https://doi.org/10.2135/cropsci2015.12.0758

Ray, D. K., Mueller, N. D., Paul, C. (2013). West, and Jonathan A. Foley. Yield Trends Are Insufficient to Double Global Crop Production By, 2050, 1–8.

Reij, C., Tappan, G., Belemvire, A. (2005). Changing land management practices and vegetation on the Central Plateau of Burkina Faso (1868-2002). Journal of Arid Environments, 63, 643–659. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.03.010

Reij, C., Tappan, G., Smale, M. (2009). Agroenvironmental Transformation in the Sahel: Another Kind of "Green Revolution". In IFPRI Discussion Paper (Issue 00914).

Reij, C., Thiombiano, T. (2003). Développement rural et environnement au Burkina Faso: La réhabilitation de la capacité productive des terroirs sur la partie nord du Plateau Central entre 1980 et 2001. Ambassade des Pays-Bas, German Agency for Technical Cooperation-PATECORE, and U.S. Agency for International Development.

RHV (République de Haute-Volta). (1978). Annuaire Hydrologique de Haute-Volta 1967-1978. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers17-05/010013558.pdf

Ribot, J.C., Peluso, N.L. (2009). A Theory of Access*. Rural Sociology, 68(2), 153–181. https://doi.org/10.1111/j.1549-0831.2003.tb00133.x

Rigg, S., Lovell, E., Pichon, F. (2016). Assessing Gender in Resilience Programming: Burkina Faso. 2.

Rockstrom, J. (2000). Water resources management in smallholder farms in eastern and southern Africa, an overview. Physics and Chemistry of the Earth Part B-hydrology Oceans and Atmosphere. 25, 275–283.

Rodima-Taylor, D. (2012). Social Innovation and Climate Adaptation: Local Collective Action in Diversifying Tanzania. Applied Geography, 33(1), 128–134. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.10.005

Roehrig, R., Bouniol, D., Guichard, F., Hourdin, F., Redelsperger, J. L. (2013). The present and future of the west african monsoon: A process-oriented assessment of CMIP5 simulations along the AMMA transect. Journal of Climate. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00505.1

Rolinski, S., Müller, C., Heinke, J., Weindl, I., Biewald, A., Leon Bodirsky, B., Bondeau, A., Boons-Prins, E.R., Bouwman, A.F., Leffelaar, P. A., Roller, J.A.T., Schaphoff, S., Thonicke, K. (2018). Modeling vegetation and carbon dynamics of managed grasslands at the global scale with LPJmL 3.6. Geoscientific Model Development, 11(1), 429–451. https://doi.org/10.5194/gmd-11-429-2018

Roncoli, C., Ingram, K., Kirshen, P. (2001). The costs and risks of coping with drought: Livelihood impacts and farmers' responses in Burkina Faso. Clim. Res., 19, 119–132. https://doi.org/10.3354/cr019119

Roobroeck, D., van Asten, P., Jama, B., Harawa, R., Vanlauwe, B. (2015). Integrated Soil Fertility Management: Contributions of Framework and Practices to Climate-Smart Agriculture.

Roose, E., Kabore, V., Guenat, C. (1999). Zai practice: A west African traditional rehabilitation system for semiarid degraded lands, a case study in Burkina Faso. Arid Soil Research and Rehabilitation, 13(4), 343–355. https://doi.org/10.1080/089030699263230

Rosenzweig, C., Elliott, J., Deryng, D., Ruane, A.C., Müller, C., Arneth, A., Boote, K. J., Folberth, C., Glotter, M., Khabarov, N., Neumann, K., Piontek, F., Pugh, T.A.M., Schmid, E., Stehfest, E., Yang, H., Jones, J.W. (2014). Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. https://doi.org/10.1073/pnas.1222463110

Roudier, P., Alhassane, A., Baron, C., Louvet, S., Sultan, B. (2016). Assessing the Benefits of Weather and Seasonal Forecasts to Millet Growers in Niger. Agricultural and Forest Meteorology, 223, 168–180. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.04.010

Sanfo, S., Gérard, F. (2012). Public policies for rural poverty alleviation: The case of agricultural households in the Plateau Central area of Burkina Faso. Agricultural Systems, 110, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.02.006

Sanginga, N., Woomer, P. L. (2009). Integrated Soil Fertility Management in Africa—Principles, Practices and Development Process. Tropical Soil Biology and Fertility Institute of the International Centre for Tropical Agriculture (TSBF-CIAT).

Sanou, J., Bationo, B. A., Barry, S., Nabie, L. D., Bayala, J., Zougmore, R. (2016). Combining soil fertilization, cropping systems and improved varieties to minimize climate risks on farming productivity in northern region of Burkina Faso. Agric & Food Secur, 5(1). https://doi.org/10.1186/s40066-016-0067-3

Sarr, B., Atta, S., Ly, M., Salack, S., Ourback, T., Subsol, S., George, D. A. (2015). Journal of Agricultural Extension and Rural Development Adapting to climate variability and change in smallholder farming communities: A case study from Burkina Faso, Chad and Niger. 7(1), 16–27. https://doi.org/10.5897/JAERD2014.0595

Savadogo, M., Somda, J., Seynou, O., Zabré, S. (2011). Catalogue des bonnes pratiques d'adaptation aux risques climatiques au Burkina Faso. UICN.

Sawadogo, H. (2011). Using Soil and Water Conservation Techniques to Rehabilitate Degraded Lands in Northwestern Burkina Faso. International Journal of Agricultural Sustainability, 9(1), 120–128. https://doi.org/10.3763/ijas.2010.0552

Saydou, B. (2012). Caractérisation des dispositifs d'accompagnement des exploitations agricoles familiales vers l'intensification durable au Burkina Faso. Université de Ouagadougou.

Schaphoff, S., von Bloh, W., Rammig, A., Thonicke, K., Biemans, H., Forkel, M., Gerten, D., Heinke, J., Jägermeyr, J., Knauer, J., Langerwisch, F., Lucht, W., Müller, C., Rolinski, S., Waha, K. (2018). LPJmL4 – a dynamic global vegetation model with managed land – Part 1: Model description. Geoscientific Model Development, 11(4), 1343–1375. https://doi.org/10.5194/gmd-11-1343-2018

Schauberger, B., Gornott, C., Wechsung, F. (2017). Global evaluation of a semiempirical model for yield anomalies and application to within-season yield forecasting. Global Change Biology, 23(11), 4750–4764. https://doi.org/10.1111/gcb.13738

Schewe, J., Levermann, A. (2017). Non-linear intensification of Sahel rainfall as a possible dynamic response to future warming. Earth System Dynamics. https://doi.org/10.5194/esd-8-495-2017

Schilling, J., Scheffran, J., Link, P.M. (2010). Climate Change and Land Use Conflicts in Northern Africa. Nova Acta Leopoldina NF 112(384): 173–82.

Schleussner, C.-F., Donges, J.F., Donner, R.V., Schellnhuber, H.J. (2016). Armed-Conflict Risks Enhanced by Climate-Related Disasters in Ethnically Fractionalized Countries. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 113(33):

9216–21. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27457927 (June 18, 2019).

Schuler, J., Voss, A. K., Ndah, H. T., Traore, K., de Graaff, J. (2016). A socioeconomic analysis of the zaï farming practice in northern Burkina Faso. Agroecology and Sustainable Food Systems, 40(9), 988–1007. https://doi.org/10.1080/21683565.2016.1221018

Searchinger, T., Hanson, C., Lacape, J.-M. (2014). Crop Breeding: Renewing the Global Commitment. WRI.

Shackleton, S., Ziervogel, G., Sallu, S., Gill, T., Tschakert, P. (2015). Why Is Socially-Just Climate Change Adaptation in Sub-Saharan Africa So Challenging? A Review of Barriers Identified From Empirical Cases. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 6(3), 321–344. https://doi.org/10.1002/wcc.335

Sidibé, A. (2005). Farm-level adoption of soil and water conservation techniques in northern Burkina Faso. Agricultural Water Management, 71(3), 211–224. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.09.002

Singh, C., Daron, J., Bazaz, A., Ziervogel, G., Spear, D., Krishnaswamy, J., Zaroug, M., Kituyi, E. (2018). The Utility of Weather and Climate Information for Adaptation Decision-Making: Current Uses and Future Prospects in Africa and India. Climate and Development, 10(5), 389–405. https://doi.org/10.1080/17565529.2017.1318744

Smale, M., Jamora, N. (2020). Valuing genebanks. Food Sec. https://doi.org/10.1007/s12571-020-01034-x

Smale, M., King, A. (2005). What is Diversity Worth to Farmers? (Research at a Glance, Genetic Resource Policies, pp. 13–18). IFPRI, IPGRI.

Sorgho, R., Mank, I., Kagoné, M., Souares, A., Danquah, I., Sauerborn, R. (2020). "We Will Always Ask Ourselves the Question of How to Feed the Family": Subsistence Farmers' Perceptions on Adaptation to Climate Change in Burkina Faso. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(19), 1–26. https://doi.org/10.3390/ijerph17197200

Stern, R. D., Dennett, M. D., Garbutt, D. J. (1981). The start of the rains in West Africa. Journal of Climatology. https://doi.org/10.1002/joc.3370010107

Stewart, Z. P., Pierzynski, G. M., Middendorf, B. J., Prasad, P. V. V. (2020). Approaches to improve soil fertility in sub-Saharan Africa. Journal of Experimental Botany, 71(2), 632–641. https://doi.org/10.1093/jxb/erz446

Sultan, B., Roudier, P., Quirion, P., Alhassane, A., Muller, B., Dingkuhn, M., Ciais, P., Guimberteau, M., Traore, S., Baron, C. (2013). Assessing climate change impacts on sorghum and millet yields in the Sudanian and Sahelian savannas of West Africa. Environmental Research Letters, 8(1). https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/014040

Tall, A. (2013). What Do We Mean by Climate Services? WMO Bulletin.

Tall, A., Kristjanson, P., Chaudhury, M., Mckune, S. (2014). Who Gets the Information? Gender and Climate (No. 89; CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS)).

Techniques, F., Innovant, M., Sensible, G. (n.d.). Approche Communale pour le Marché Agricole Fiches Techniques Gestion Integree de la Fertilite des Sols (GIFS). Phase 2.

Teutschbein, C., Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. Journal of Hydrology. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052

Tibshirani, R. (1996). Regression Shrinkage and Selection Via the Lasso. Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 58(1), 267–288. https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1996.tb02080.x

Tiemtoré, S. (2004). Problématique de la mobilisation et de la maîtrise de l'eau pour la promotion de l'élevage dans un contexte sahélien. Oral Communication. Roundtable on 'Scientific and Technological Research: The Water Issue and Sustainable Development', Forum National de La Recherche Scientifique et Des Innovations Technologiques (FRSIT), FRSIT, 11 pp.

Tompkins, E.L. (2005). Planning for Climate Change in Small Islands: Insights from National Hurricane Preparedness in the Cayman Islands. Global Environmental Change, 15(2), 139–149. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2004.11.002

Traore, F., Bonkoungou, J., Kouadio, L., Wellens, J. (2019). Using Multi-Temporal Landsat Images and Support Vector Machine to Assess the Changes in Agricultural Irrigated Areas in the Mogtedo Region, Burkina Faso. Remote Sensing, 11(1442), 1–18. https://doi.org/10.3390/rs11121442

Traore, S.B., Ali, A., Tinni, S.H., Samake, M., Garba, I., Maigari, I., Alhassane, A., Samba, A., Diao, M.B., Atta, S., Dieye, P.O., Nacro, H.B., Bouafou, K.G.M. (2014). AGRHYMET: A Drought Monitoring and Capacity Building Center in the West Africa Region. Weather and Climate Extremes, 3, 22–30. https://doi.org/10.1016/j.wace.2014.03.008

Traore, S., Owiyo, T. (2013). Dirty droughts causing loss and damage in Northern Burkina Faso. International Journal of Global Warming, 5(4), 498. https://doi.org/10.1504/IJGW.2013.057288

UN DESA (United Nations Department of Economic and Social Affairs). (2019). World Population Prospects—Population Division—

United Nations. https://population.un.org/wpp/Graphs/Probabilistic/POP/TOT/

UNDP (United Nations Development Programme) (2019). Human Development Index Ranking. http://hdr.undp.org/en/content/latest-human-development-index-ranking (November 27, 2020).

USAID (United States Agency for International Development). (2013). The Value of Climate Services Across Economic and Public Sectors.

USAID (United States Agency for International Development). (2017). Climate Risks in Food for Peace Geographies: Burkina Faso.

USDA (United States Agency for International Development). (2011). West Africa—Crop Production Maps.

Van Aelst, K., Holvoet, N. (2016). Intersections of Gender and Marital Status in Accessing Climate Change Adaptation: Evidence from Rural Tanzania. World Development, 79(July 2015), 40–50. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2015.11.003

van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., Rose, S.K. (2011). The representative concentration pathways: An overview. Climatic Change. https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z

Van Wart, J., Kersebaum, K.C., Peng, S., Milner, M., Cassman, K.G. (2013). Estimating crop yield potential at regional to national scales. Field Crops Research, 143, 34–43. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.11.018

Vanlauwe, B., Bationo, A., Chianu, J., Giller, K.E., Merckx, R., Mokwunye, U., Ohiokpehai, O., Pypers, P., Tabo, R., Shepherd, K.D., Smaling, E.M.A., Woomer, P.L., Sanginga, N. (2010). Integrated Soil Fertility Management: Operational Definition and Conse-quences for Implementation and Dissemination. Outlook on Agriculture, 39(1), 17–24. https://doi.org/10.5367/000000010791169998

Vanlauwe, B., Descheemaeker, K., Giller, K.E., Huising, J., Merckx, R., Nziguheba, G., Wendt, J., Zingore, S. (2015). Integrated soil fertility management in sub-Saharan Africa: Unravelling local adaptation. Soil, 1, 491–508.

Vink, M. J., Dewulf, A., Termeer, C. (2013). The Role of Knowledge and Power in Climate Change Adaptation Governance: A Systematic Literature Review. Ecology and Society, 18(4). https://doi.org/10.5751/ES-05897-180446

Von Bloh, W., Schaphoff, S., Müller, C., Rolinski, S., Waha, K., Zaehle, S. (2018). Implementing the nitrogen cycle into the dynamic global vegetation, hydrology, and crop growth model LPJmL (version 5.0). Geoscientific Model Development, 11(7), 2789–2812. https://doi.org/10.5194/gmd-11-2789-2018

Von Uexkull, N., Croicu, M., Fjelde, H., Buhaug, H. (2016). Civil Conflict Sensitivity to Growing-Season Drought. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 113(44): 12391–96. https://doi.org/10.1073/pnas.1607542113

Voss-Fels, K. P., Stahl, A., Wittkop, B., Lichthardt, C., Nagler, S., Rose, T., Chen, T.W., Zetzsche, H., Seddig, S., Baig, M.M., Ballvora, A., Frisch, M., Ross, E., Hayes, B.J., Hayden, M.J., Ordon, F., Leon, J., Kage, H., Friedt, W., Stützel, H., Snowdon, R.J. (2019). Breeding improves wheat productivity under contrasting agrochemical input levels. Nature Plants, 5(7), 706–714. https://doi.org/10.1038/s41477-019-0445-5

Wanvoeke, J. (2015). Low Cost Drip Irrigation in Burkina Faso: Unravelling Actors, Networks and Practices. Wageningen University.

Wanvoeke, J., Venot, J., Fraiture, C. De, Wanvoeke, J., Venot, J., Fraiture, C.D.E. (2016). Smallholder Drip Irrigation in Burkina Faso: The Role of Development Brokers Smallholder Drip Irrigation in Burkina Faso: The Role of Development Brokers. The Journal of Development Studies, 52(7), 1019–1033. https://doi.org/10.1080/00220388.2015.1107048

Wanvoeke, J., Venot, J., Zwarteveen, M., De, C. (2015). Performing the Success of an Innovation: The Case of Smallholder Drip Irrigation in Burkina Faso. Water International, 40(3), 432–445. https://doi.org/10.1080/02508060.2015.1010364

Wanvoeke, J., Venot, J.-P., Zwarteveen, M., De Fraiture, C. (2016). Farmers' Logics in Engaging with Projects Promoting Drip Irrigation Kits in Burkina Faso. Society & Natural Resources, 29(9), 1095–1109. https://doi.org/10.1080/08941920.2015.1132354

WASCAL (West African Science Service Centre on Climate Change and Adapted Land Use). (2020a). Household survey on sorghum production with ICV.

WASCAL (West African Science Service Centre on Climate Change and Adapted Land Use). (2020b). Regional sorghum yield data for Centre North region.

Wayne, G.P. (2013). The Beginner's Guide to Representative Concentration Pathways. In Skeptical Sciece. https://doi.org/10.1063/1.1370531

Webber, S. (2017). Circulating Climate Services: Commercializing Science for Climate Change Adaptation in Pacific Islands. Geoforum, 85, 82–91. https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2017.07.009

White, J.W., Alagarswamy, G., Ottman, M.J., Porter, C.H., Singh, U., Hoogenboom, G. (2015). An overview of CERES–sorghum as implemented in the cropping system model version 4.5.

Agronomy Journal, 107(6), 1987–2002. https://doi.org/10.2134/agronj15.0102

WMO (World Meteorological Organization). (2006). Volta-HYCOS Project: Sub-Component of the AOC-HYCOS Project.

WMO (World Meteorological Organization). (2019). 2019 State of Climate Services.

Wolf, J., Adger, W., Lorenzoni, I., Abrahamson, V., Raine, R. (2010). Social Capital, Individual Responses to Heat Waves and Climate Change Adaptation: An Empirical Study of Two UK Cities. Global Environmental Change: Human and Policy Dimensions, 20(1), 44–52.

World Bank. (2017). Strengthening Climate Resilience in Burkina Faso (P164078).

World Food Programme (2020). Burkina Faso Emergency Response Situation Report #11.

Worou, O.N., Tondoh, J.E., Sanou, J., Gaiser, T., Nikiema, P.M., Bayala, J., Bazié, P., Ky-Dembele, C., Kalinganiré, A. (2019). Intensifying Maize Production Under Climate Change Scenarios in Central West Burkina Faso. In W. Leal Filho (Ed.), Handbook of Climate Change Resilience. Springer International Publishing.

Yamegueu, D., Alokore, Y., Corso, G. (2019). Potential of microfinanced solar water pumping systems for irrigation in rural areas of Burkina Faso.

Yameogo, B.T. (2019). Adoption des variétés améliorées de riz dans les bas-fonds Analyse socioéconomique des determinants.

Yaméogo, B.T., Kabore/Bontogho, P.E., Torou, B. M., Bagagnan, A.R., Barry, B. (2017). Barriers To Uptake of Climate-Smart Agriculture Practices: A Case Study of Dano and Ouahigouya Farmers, Burkina Faso. International Journal of Agriculture and Environmental Research, 03(04), 3409–3428.

Yaméogo, T. B., Fonta, W. M., Wünscher, T. (2018). Can Social Capital Influence Smallholder Farmers' Climate-Change Adaptation Decisions? Evidence From Three Semi-Arid Communities in Burkina Faso, West Africa. Social Sciences, 7(3), 1–20. https://doi.org/10.3390/socsci7030033

Zoma-Traoré, B., Soudré, A., Ouédraogo-Koné, S., Khayatzadeh, N., Probst, L., Sölkner, J., Mészáros, G., Burger, P. A., Traoré, A., Sanou, M., Ouédraogo, G.M.S., Traoré, L., Ouédraogo, D., Yougbaré, B., Wurzinger, M. (2020). From farmers to livestock keepers: A typology of cattle production systems in south-western Burkina Faso. Tropical Animal Health and Production, 52(4), 2179–2189. https://doi.org/10.1007/s11250-020-02241-6

Zongo, B., Diarra, A., Barbier, B., Zorom, M., Yacouba, H., Dogot, T. (2015a). Farmers' Perception and Willingness to Pay for Climate Information in Burkina Faso. Journal of Agricultural Science, 8(1), 175. https://doi.org/10.5539/jas.v8n1p175

Zongo, B., Diarra, A., Barbier, B., Zorom, M., Yacouba, H., Dogot, T. (2015b). Farmers' Practices and Willingsness to Adopt Supplemental Irrigation in Burkina Faso. International Journal of Food and Agricultural Economics, 3(1), 101–117.

Zou, X., Li, Y., Li, K., Cremades, R., Gao, Q., Wan, Y., Qin, X. (2013). Greenhouse gas emissions from agricultural irrigation in China. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 20(2), 295–315. https://doi.org/10.1007/s11027-013-9492-9

Zougmore, R., Mando, A., Ringersma, J., Stroosnijder, L. (2003). Effect of combined water and nutrient management on runoff and sorghum yield in semiarid Burkina Faso. Soil Use and Management, 19(3), 257–264. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2003.tb00312.x

Zougmoré, R., Ouattara, K., Mando, A., Ouattara, B. (2004). Rôle des nutriments dans le succès des techniques de conservation des eaux et des sols (cordons pierreux, bandes enherbées, zaï et demi lunes) au Burkina Faso. Science et Changements Planétaires/ Sécheresse, 15(1), 41–48.