



Étude de l'impact
des changements climatiques futurs
sur les ressources en eau
au Burkina Faso

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


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

Juin 2019

Mis en oeuvre par :

giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Mandaté par :

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

Sous la tutelle de :



En coopération avec :

CLIMATE
ANALYTICS 

AUTEURS

Quentin LEJEUNE

Fahad SAEED

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

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

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

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

Ce document peut être cité sous le titre :

LEJEUNE Q., SAEED F. Étude de l'impact des changements climatiques futurs sur les ressources en eau au Burkina Faso. Report produced under the project "Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation dans les pays francophones les moins avancés d'Afrique subsaharienne", Climate Analytics gGmbH, Berlin.

Une copie numérique de ce rapport est disponible en ligne sur :
www.climateanalytics.org/publications.

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

Table des Matières

Résumé	2
Introduction	4
Méthodes	6
Principe des modèles hydrologiques utilisés et simulations réalisées	6
Description de l'analyse des simulations hydrologiques réalisées	8
Résultats	9
Évolution future des précipitations	9
Évolution future de l'évapotranspiration.....	11
Évolution future du ruissellement de surface	15
Évolution future de l'infiltration (ou recharge des aquifères).....	18
Évolution future de l'humidité du sol	21
Discussion et conclusions	24
Références	28

Résumé

Les impacts du réchauffement climatique global présentent des risques sérieux pour les ressources en eau au Burkina Faso et les populations et activités économiques qui en dépendent. Les ressources en eau occupent une place incontournable dans l'économie nationale et leur sensibilité aux impacts des changements climatiques risque de remettre en question les objectifs du PNDES. Il apparaît donc crucial de déterminer *comment* les changements climatiques globaux attendus au cours du 21^e siècle en raison de l'augmentation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre influenceront les ressources en eau du pays. L'objectif de l'étude présentée dans ce rapport est de mieux comprendre cette évolution.

Cette étude cadre dans la mise en œuvre du Plan National d'Adaptation du Burkina Faso (MEEVCC, 2015). Le PNA rassemble 6 plans d'adaptation sectoriels (agriculture, productions animales, environnement et ressources naturelles, énergie, santé, infrastructures et habitat) ainsi que des plans d'adaptation pour les questions transversales (associations féminines, organisation de la société civile et la sécurité en eau). Pour la mise en œuvre du PNA, le Burkina Faso bénéficie pour la période 2018-2019 du Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation (PAS-PNA) financé par le Ministère fédéral Allemand de l'Environnement, de la Protection de la Nature et la Sûreté Nucléaire (BMU), et mis en œuvre par la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) en collaboration avec Climate Analytics.

Selon les Directives techniques du Groupe d'experts des pays les moins avancés (PMA), le processus PNA doit dorénavant reposer sur des connaissances scientifiques solides (CCNUCC, 2012). Ces connaissances scientifiques sont le focus de la composante 2 du projet PAS-PNA. La composante envisage d'évaluer et renforcer les bases et capacités scientifiques de plusieurs PNA sectoriels et transversaux, pour faciliter d'avantage la planification et la programmation de mesures d'adaptation. La sécurité de l'eau est un des PNA transversaux ciblés par le PAS-PNA.

La présente étude sur l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau au Burkina Faso se base sur la comparaison des résultats de trois modèles hydrologiques (H08, WATERGAP2, PCR-GLOBW) et deux modèles de surface continentale globaux (CLM4.5 et JULES) ayant participé au projet d'intercomparaison de modèles d'impacts ISIMIP2b, dans le cadre duquel ils ont réalisé des expériences coordonnées de sensibilité des ressources en eau aux variations climatiques futures en suivant un protocole expérimental commun. Concrètement, des simulations du cycle de l'eau sur la surface continentale pour la période historique forcées par des jeux de données d'observations climatiques ont été réalisées, et leurs résultats ont été comparés à ceux de simulations de l'évolution future des ressources en eau forcées par les résultats de simulations climatiques de quatre modèles de circulation générale du projet CMIP5 et suivant le scénario climatique Representative Concentration Pathway 6.0 (RCP6.0). Toutes les composantes du bilan hydrique à la surface ont été étudiées pour trois périodes de projection (2016-2046, 2036-2066 et 2056-2086), qui ont été comparées à la période de référence 1976-2005.

Les résultats indiquent une forte incertitude quant à l'évolution future des précipitations annuelles moyennes au Burkina Faso en réponse à l'augmentation de la température moyenne globale, avec un signal moyen proche de zéro et une dispersion relativement grande entre les quatre modèles de circulation générale considérés. Néanmoins, quatre des cinq modèles hydrologiques pris en compte

dans l'étude montrent un risque non négligeable de diminution des taux de ruissellement et de recharge des aquifères sur au moins la moitié sud-ouest du Burkina Faso durant la seconde moitié du 21^e siècle selon le scénario RCP6.0 considéré, qui suppose que l'effort mondial visant à atténuer les émissions de gaz à effet de serre resterait limité. Une tendance opposée est simulée par tous les modèles sur la partie nord-est du pays, mais celle-ci tend à s'estomper au cours du siècle. En moyenne, les incertitudes associées au taux de ruissellement sont plus importantes que celles associées au taux de recharge des aquifères. De plus, les projections étudiées indiquent une légère diminution (non robuste) de l'humidité des sols. Ces évolutions sont à relier à une hausse marquée des taux d'évapotranspiration, qui augmentent clairement sur le pays tout au long du 21^e siècle, et en particulier sa partie nord. Les résultats pour les périodes 2016-2046 et 2036-2066 de ce scénario RCP6.0 sont caractérisés par une plus grande dispersion entre les modèles et donc une plus grande incertitude, et suggèrent donc que l'approche utilisée dans cette étude n'indiquerait pas de réponse robuste des ressources en eau en réponse à un scénario de forte atténuation des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale (par exemple RCP2.6).

Afin d'améliorer la robustesse des résultats décrits dans ce rapport, il conviendrait en priorité d'utiliser les sorties d'un plus grand nombre de modèles de circulation générale et d'ensembles de simulations climatiques en entrée des modèles hydrologiques ou de surface continentale considérés, afin de diminuer les incertitudes liées au forçage climatique futur et à la variabilité interannuelle, qui sont grandes dans la région. Ensuite, il serait souhaitable d'améliorer la calibration des modèles hydrologiques utilisés sur le Burkina Faso avec des données d'observation locales qui permettraient de mieux prendre en compte, par exemple, la variation de la nature du socle dans le pays. Enfin, la représentation des eaux souterraines par les modèles hydrologiques doit être améliorée, leur connaissance étant encore trop limitée au Burkina Faso. Malgré ces limitations, la présente étude souligne un risque de possible renforcement de l'aridité des conditions climatiques au Burkina Faso et notamment dans sa partie sud-ouest en cas de faible effort mondial pour l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, qui appelle à la mise en place de politiques adéquates.

Introduction

Le climat du Burkina Faso est caractérisé par de grandes variations de précipitations à l'intérieur de ses frontières, ses quantités annuelles variant selon un gradient nord-sud. Par conséquent, le pays est fréquemment divisé en trois zones climatiques qui suivent des bandes longitudinales, selon les quantités de précipitations qui y tombent au cours d'une année (Banque Mondiale, 2017) :

- Une zone sahélienne au nord du parallèle 14°N, qui reçoit moins de 600 mm d'eau par an ;
- Une zone soudano-sahélienne située entre les parallèles 11°30' et 14°N, qui reçoit entre 600 et 900 mm par an ;
- Une zone soudanienne au sud du parallèle 11°30'N, où tombent plus de 900 mm d'eau par an.

Ces précipitations sont majoritairement regroupées pendant la saison des pluies, qui se déroule pendant environ 3 mois dans la zone sahélienne (de mi-juin à mi-septembre environ), mais peut durer de 6 à 7 mois dans le sud du pays.

La quantité limitée de précipitations reçue par le Burkina Faso, ainsi que la forte évapotranspiration potentielle qui y règne en raison des températures élevées, en fait un pays sujet à la rareté des ressources en eau et donc physiquement vulnérable aux variations climatiques. Les changements climatiques globaux qui sont projetés pendant le siècle à venir à cause des émissions de gaz à effet de serre de nature anthropique (GIEC, 2013) vont entraîner une modification spatiale et temporelle des températures et régimes de précipitations en Afrique de l'Ouest (Sylla, et al., 2016). Dans ce contexte, il apparaît donc crucial de connaître tout d'abord comment l'exposition aux aléas climatiques (i.e., les régimes de précipitations) évoluera dans le futur au Burkina Faso, afin de comprendre comment cette nouvelle exposition, combinée à la sensibilité des réservoirs hydrologiques du pays aux variations climatiques, impactera ses ressources en eau.

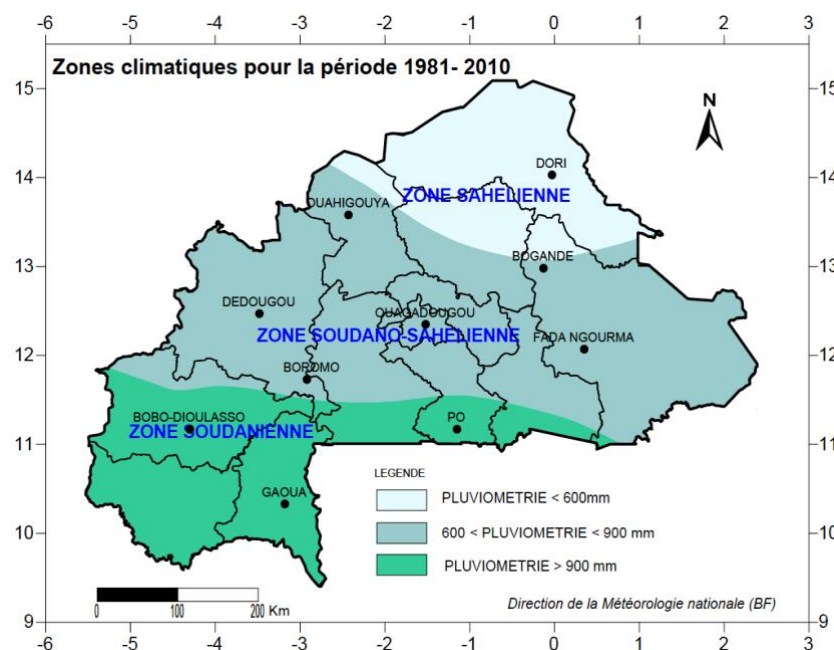


Figure 1 : Les zones climatiques du Burkina Faso (Banque Mondiale, 2017). Figure produite à partir de données de l'Agence Nationale de la Météorologie du Burkina Faso.

L'étude présentée dans ce rapport se base sur les résultats de 5 modèles hydrologiques globaux forcés par des simulations climatiques pour le 21^e siècle. Selon le cadre de référence pour la vulnérabilité présenté par le GIEC dans son 4^e rapport de synthèse (IPCC, 2007), les résultats de ces modèles permettent donc d'étudier la composante biophysique de la future vulnérabilité climatique, à laquelle il conviendrait de superposer la capacité d'adaptation des systèmes étudiés afin d'obtenir la vulnérabilité totale. La capacité d'adaptation des systèmes étudiés ne sera pas abordée dans le présent rapport.

Ce rapport se divise en plusieurs parties comme suit. La méthodologie employée est tout d'abord expliquée via une description des modèles utilisés, des composantes du cycle de l'eau qu'ils sont capables de représenter ainsi que des simulations climatiques réalisées. Les résultats de ces simulations sont ensuite décrits dans une autre partie, avant d'être discutés de manière critique dans une dernière partie où sont dégagées des conclusions générales, ainsi que des recommandations émises à la lumière des limitations de cette étude.

Méthodes

Principe des modèles hydrologiques utilisés et simulations réalisées

La présente étude se base sur trois modèles hydrologiques globaux : H08 (Hanasaki, et al., 2018), PCR-GLOBW (Wada, et al., 2014), WATERGAP2 (Müller Schmied, et al., 2016), ainsi que deux modèles de surface continentale : CLM4.5 (NCAR, 2013), et JULES-W1, dérivé de JULES (Best, et al., 2011). Par souci de simplicité, dans cette étude nous désignerons ces cinq modèles sous le terme de modèles hydrologiques car ils sont capables de représenter les composantes principales du cycle de l'eau sur la surface continentale, ainsi que les flux d'eau entre la surface continentale et l'atmosphère et entre la surface continentale et le sous-sol (incluant les nappes phréatiques) en fonction des conditions climatiques, de la végétation, ainsi que de l'importance de l'intervention humaine (par exemple, via l'usage des sols, l'abstraction d'eau pour l'irrigation ou la construction de barrages). Ces modèles reçoivent donc en entrée des informations sur ces conditions, qui peuvent être modifiées pour tester la sensibilité du cycle de l'eau à celles-ci. Par exemple, il est possible de tester la sensibilité du cycle de l'eau sur les surfaces continentales aux variations climatiques en forçant ces modèles hydrologiques par des données climatiques issues de jeux de données d'observation, ou de sorties de modèles climatiques globaux ou de circulation générale (GCMs) issues de différentes expériences, afin de refléter des conditions climatiques passées, présentes ou futures variées.

Les cinq modèles hydrologiques considérés font tous partie du projet ISIMIP¹ (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project), qui a pour objectif de pouvoir comparer les impacts du changement climatique simulés par différents modèles pour des secteurs particuliers, mais également de manière transversale en couvrant des secteurs différents. Ces secteurs sont : eau (focus global), eau (focus régional), pêcheries et écosystèmes marins, offre et demande en énergie, forêts (focus régional), biomes globaux, agriculture, agroéconomie, biodiversité terrestre, permafrost, infrastructure côtière, santé, et lacs. Pour atteindre l'objectif d'ISIMIP mentionné, un protocole expérimental commun est établi pour chacune des phases du projet, à laquelle chaque modèle participant à ISIMIP est tenu de se tenir afin de permettre les comparaisons entre modèles et secteurs recherchés. Ce protocole décrit les modalités des expériences numériques réalisées avec les modèles ISIMIP, qui sont définies pour être cohérentes avec les simulations des projets CMIP² (Coupled Model Intercomparison Project), elles-mêmes utilisées notamment pour les rapports du GIEC. Les différentes phases d'ISIMIP se dénomment FastTrack (réalisée de 2012 à 2013), 2A (de 2013 à 2015), 2B (de 2016 à 2018), et 3 (depuis 2018). Pour cette étude, nous nous basons sur les résultats d'ISIMIP 2B (Frieler, et al., 2017).

Les simulations ISIMIP peuvent être réalisées en faisant varier principalement les paramètres suivants :

- les conditions climatiques : des simulations visant à reproduire les conditions observées sur la période historique sont forcées par le produit EWEMBI issu de trois jeux de données d'observation (Earth2Observe, WFDEI et ERA-Interim), au préalable fusionnés et corrigés du biais (Lange, 2016). De plus, des simulations visant à reproduire les impacts des variations climatiques antérieures à la période historique (période pré-industrielle), ou bien futures (projections), sont réalisées en forçant les modèles avec les sorties de quatre modèles de circulations générale issus du projet CMIP5 : IPSL-CM5A-LR, GFDL-ESM2M, MIROC5 et

¹ www.isimip.org

² cmip.llnl.gov

HadGEM2-ES. Ces sorties de modèle sont également corrigées du biais³. Les scénarios climatiques desquels sont dérivées les données de forçage pour les projections sont les Representative Concentration Pathways (RCPs). Dans le cadre d'ISIMIP2b, les RCPs 2.6, correspondant à un scénario de forte atténuation des émissions de gaz à effet de serre, et 6.0, correspondant à un scénario avec peu d'atténuation de ces émissions, sont considérées ;

- les conditions d'usage des sols, les surfaces irriguées et les quantités de fertilisant utilisées qui reflètent soit les variations pré-industrielles et historiques selon le jeu de reconstruction LUH2 (Hurtt, et al., in preparation, 2019), soit les variations futures simulées par le modèle global d'allocation de l'usage des sols MAGPIE (Stevanović, et al., 2016) en accord avec le scénario dénommé Shared Socioeconomic Pathway 2 or SSP2 (Popp, et al., 2017). Alternativement, dans certaines simulations forcées pas les conditions climatiques futures les conditions d'usage des sols sont laissées constantes et égales à leur état de 2005 afin de pouvoir isoler l'effet des seules variations climatiques futures.

La population et le Produit Intérieur Brut peuvent également varier dans les simulations ISMIP pour refléter soit les variations historiques issues de reconstructions ou de projections en accord avec le scénario SSP2 (Frieler, et al., 2017), mais ces variations se reflètent peu sur le cycle de l'eau et donc ne seront pas décrites plus en détail ici.

Dans ce rapport, nous étudions les changements futurs de plusieurs composantes du cycle de l'eau sur la surface terrestre à l'intérieur du territoire du Burkina Faso, selon les simulations réalisées avec les cinq modèles hydrologiques mentionnés (CLM4.5, H08, PCR-GLOBW, WATERGAP2 et JULES). La comparaison de ces cinq modèles, rendue possible par la nature du projet ISIMIP, permet d'augmenter la robustesse des résultats mis en avant et permet également de quantifier les incertitudes associées. De plus, chacun de ces modèles hydrologiques a été forcé par les quatre modèles de circulation générale mentionnés plus haut (IPSL-CM5A-LR, GFDL-ESM2M, MIROC5 et HadGEM2-ES), afin de prendre également en compte l'incertitude des projections climatiques dans les résultats présentés. En tout, ce sont donc 20 simulations de l'évolution des processus de surface du cycle de l'eau qui ont été analysées, et dont les résultats sont ici présentés. De plus, l'étude s'est portée uniquement sur les impacts futurs du changement climatique sur les ressources en eau selon un seul des scénarios climatiques disponibles dans ISIMIP2b, à savoir le plus pessimiste (RCP 6.0), afin de pouvoir dégager une réponse aux variations climatiques plus importante. Enfin, les modèles hydrologiques globaux participant à ISIMIP ont une résolution horizontale de 0.5°, et les variables analysées dans le cadre de ce rapport ont été simulées à une résolution temporelle mensuelle.

³ pour plus d'informations, voir <https://www.isimip.org/gettingstarted/isimip2b-bias-correction/>

Description de l'analyse des simulations hydrologiques réalisées

Pour chaque modèle, l'analyse se focalise sur trois périodes futures : 2016-2046, 2036-2066, et 2056-2086. Celles-ci sont choisies suffisamment longues afin de gommer le bruit des variations climatiques, et sont comparées à une période de référence (1976-2005) extraite de simulations des variations des ressources en eau sur la période historique (1860-2005) afin de refléter les conditions actuelles.

Les variables considérées dans cette étude ont été choisies afin de couvrir toutes les composantes du bilan hydrique à la surface, qui peut s'écrire comme suit :

$$P = ET + R + I + \frac{\Delta Hs}{\Delta t},$$

où P représente les précipitations, ET l'évapotranspiration (incluant l'évaporation depuis les étendues d'eau de surface et du sol ainsi que la transpiration des plantes), R le ruissellement de surface, I l'infiltration dans le sol et Hs l'humidité du sol. P, ET, R et I sont généralement exprimés en mm/jour et Hs en mm, bien que les résultats présentés dans ce rapport soient exprimés en terme de changements relatifs, et donc en %. P est ici directement issu des sorties de modèles des GCMs corrigées du biais et utilisées pour forcer les modèles hydrologiques. En revanche, les autres composantes du bilan hydrique sont simulées par les modèles hydrologiques.

R a deux composantes : le ruissellement de surface et le ruissellement de sub-surface. Le ruissellement de surface correspond à l'eau qui se dirige vers les cours d'eau après avoir atteint la surface continentale sous forme de précipitations, et ses variations peuvent donc être considérées comme une estimation des variations du débit des cours d'eau et donc des ressources en eau superficielle. Le ruissellement de sub-surface correspond lui au flux d'eau latéral sous la surface.

L'infiltration permet quant à elle d'estimer le taux de recharge des nappes phréatiques. Cette variable est d'autant plus importante au Burkina Faso, où la plupart des cours d'eau sont asséchés pendant une grande partie de l'année durant laquelle l'approvisionnement des populations en eau repose donc sur les nappes phréatiques. Il convient de noter que sur ce point, les modèles hydrologiques globaux analysés dans cette étude ne représentent pas les réservoirs d'eau souterraine, qui restent très mal connus au Burkina Faso (Banque Mondiale, 2017). Néanmoins, les variations du taux d'infiltration simulées par ces modèles peuvent être considérés comme une estimation des variations de la recharge naturelle des aquifères existants.

L'humidité du sol est une donnée cruciale en agriculture et est également considérée en détail dans ce rapport. Enfin, les précipitations et l'évapotranspiration sont également analysées afin de réaliser une analyse complète du bilan hydrique à la surface.

Résultats

Évolution future des précipitations

Les quatre modèles de circulation générale dont les données de sortie corrigées du biais sont utilisées en données d'entrée pour les modèles hydrologiques varient de manière relativement importante dans les changements de précipitation qu'ils projettent pour le 21^è siècle (Figures 2 à 4). D'un côté, MIROC5 et HadGEM2-ES montrent une augmentation des précipitations sur une grande moitié est ou nord-est du pays allant jusqu'à entre 10 et 30%, qui semble persister voire s'amplifier entre la première (2016-2046) et la troisième (2056-2086) période de projection. D'un autre côté, les GCMs GFDL-ESM2M et IPSL-CM5A-LR indiquent des changements presque nuls (IPSL-CM5A-LR) ou une légère augmentation des précipitations sur la pointe sud du pays (GFDL-ESM2M) pendant la première période de projection. En moyenne sur la troisième période de projection, la légère augmentation observée dans GFDL-ESM2M persiste mais s'accompagne d'une diminution des précipitations sur la moitié nord-est du pays atteignant entre -10 et -30%, tandis qu'une diminution des précipitations de plus de 5% est simulée par IPSL-CM5A-LR également dans le sud-est du Burkina Faso. La deuxième période de projection montre elle un état intermédiaire aux deux autres dans le cas de GFDL-ESM2M, mais une augmentation temporaire des précipitations dans celui d'IPSL-CM5A-LR. Cette augmentation temporaire suggère une grande variabilité interannuelle à l'échelle décennale dans ce modèle, puisque le scénario RCP 6.0 est caractérisé par une augmentation continue de la température moyenne globale au cours du 21^è siècle (GIEC, 2013).

D'une manière générale, la présence de cette variabilité interannuelle ainsi que la faible magnitude de la moyenne des modèles présentés est cohérente avec les changements de précipitation projetés pour la région ouest-africaine sur la Figure 8b) du Résumé à l'attention des décideurs du 5^è rapport de synthèse du GIEC (GIEC, 2013). Ces résultats témoignent donc d'une incertitude sur le signe même des futurs changements annuels moyens de précipitation sur le Burkina Faso, qui doit être gardé en tête pour la suite de l'interprétation des résultats présentés dans ce rapport.

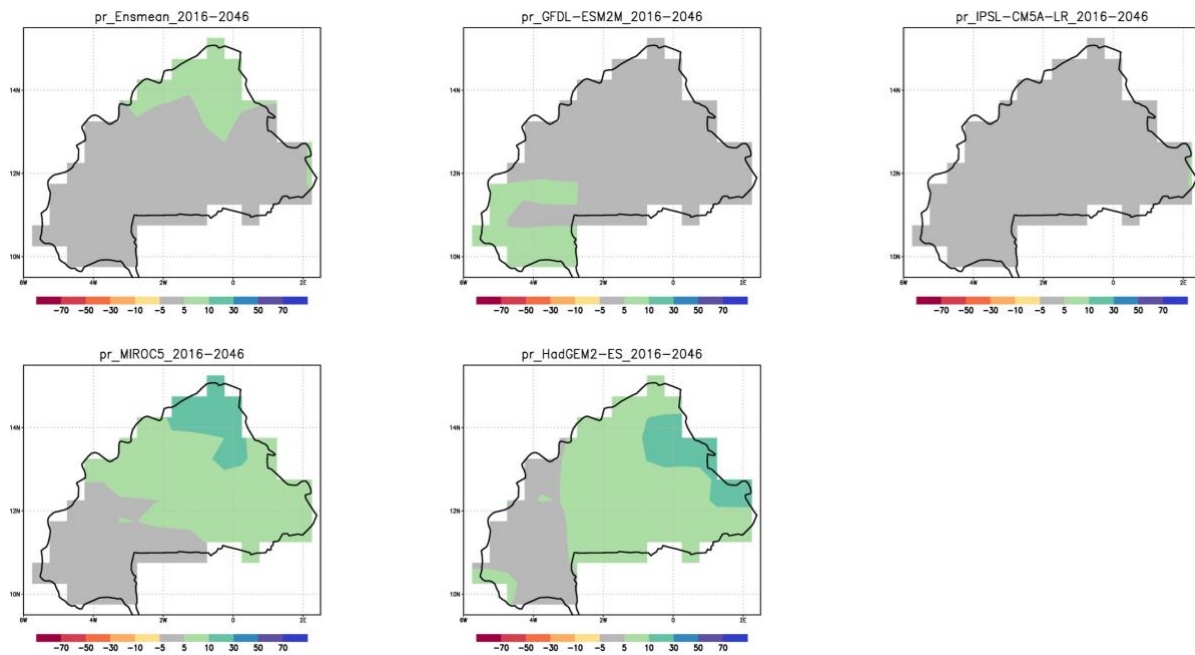


Figure 2 : Changement annuel moyen de précipitations (en %) au Burkina Faso sur la période 2016-2046 par rapport à la période de référence 1976-2005, selon la moyenne de tous les modèles de circulation générale considérés (en haut à gauche), GFDL-ESM2M (en haut au milieu), IPSL-CM5A-LR (en haut à droite), MIROC5 (en bas à gauche), et HadGEM2-ES (en bas au milieu). Les zones grisées représentent là où les variations sont comprises entre -5 et 5%.

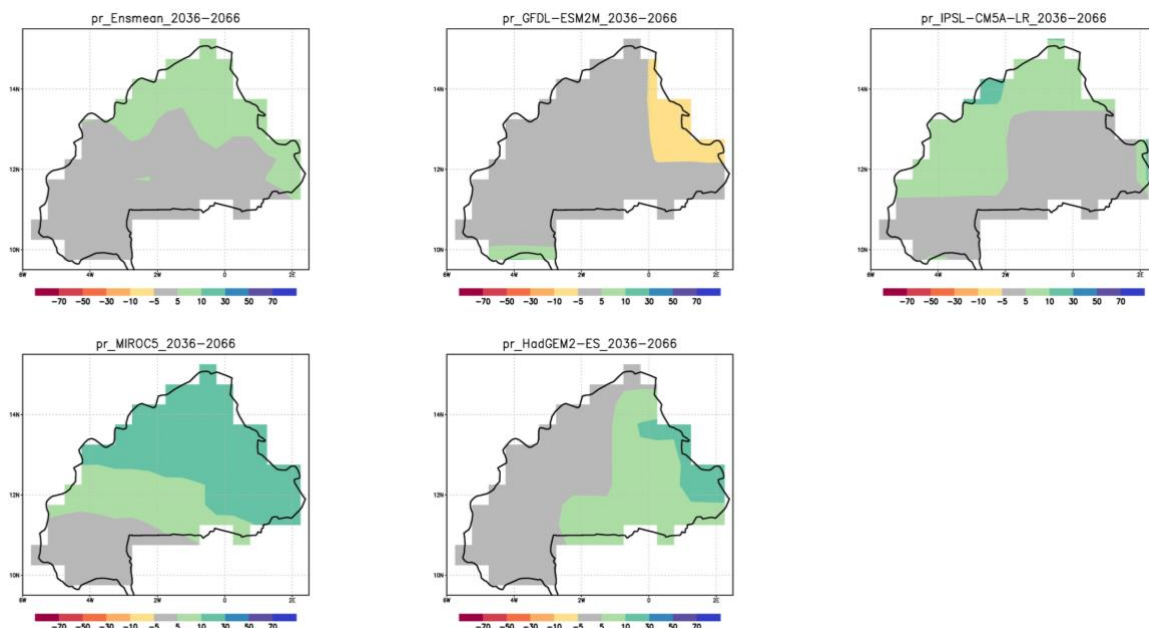


Figure 3 : Similaire à la Figure 2, mais pour la période de projection 2036-2066.

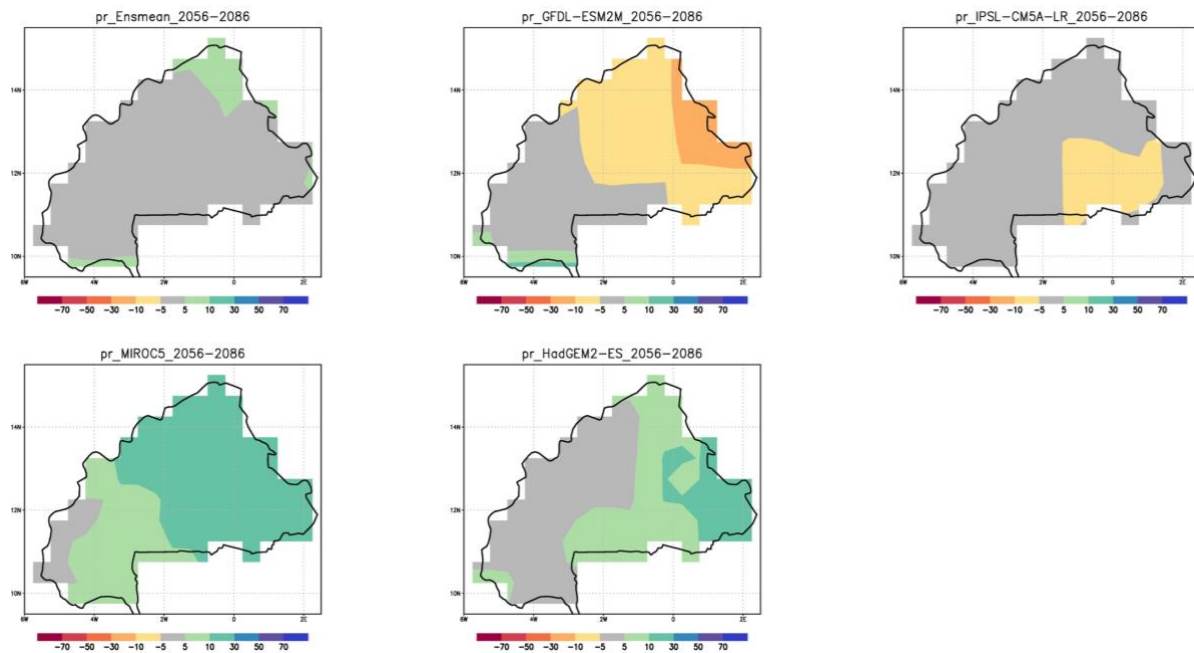


Figure 4 : Similaire à la Figure 2, mais pour la période de projection 2056-2086.

Évolution future de l'évapotranspiration

Les modèles hydrologiques montrent des résultats plus uniformes sur l'évolution de l'évapotranspiration. Ils simulent en effet tous une augmentation du taux d'évaporation de plus de 5% au nord du parallèle 13°N pour la première période de projection par rapport à la période de référence (Figure 5). Le fait que la partie du nord soit la plus affectée par cette tendance reflète très probablement la plus forte augmentation de température (qui est un moteur de l'évapotranspiration) sur cette région, telle que démontrée par exemple par le 5^e rapport de synthèse du GIEC (GIEC, 2013). Cette région s'étend ensuite vers le sud du pays dans la seconde période de projection, vraisemblablement en lien avec l'évolution à la hausse des températures au long du 21^e siècle dans le scénario RCP6.0 considéré (Figure 6). En revanche, les régions subissant une augmentation de l'ET sont plus restreintes pour la troisième période de projection dans JULES-W1, PCR-GLOBW et WATERGAP2 (Figure 7) en dépit de l'augmentation continue des températures, suggérant ainsi une limitation de l'eau disponible pour alimenter la plus forte demande en évapotranspiration vers la fin du 21^e siècle dans ces modèles.

Les changements annuels moyennés sur tout le pays indiquent une augmentation de l'ET légère mais robuste d'environ 5% selon la moyenne de toutes les simulations pour la première période de projection (Figure 8). Ce chiffre reste similaire pour la période 2056-2086 (Figure 9), mais avec une dispersion entre les résultats des différents modèles qui s'accroît vers la fin du siècle.

En revanche, l'étude du cycle saisonnier de l'ET indique des variations de sens opposés selon les saisons, avec une augmentation robuste dans toutes les simulations durant la deuxième moitié de la saison des pluies et le mois qui la suit (c'est-à-dire, de juillet à octobre), mais une tendance à la diminution en décembre, janvier et février, qui est néanmoins sujette à une grande dispersion entre

les modèles (Figure 10).

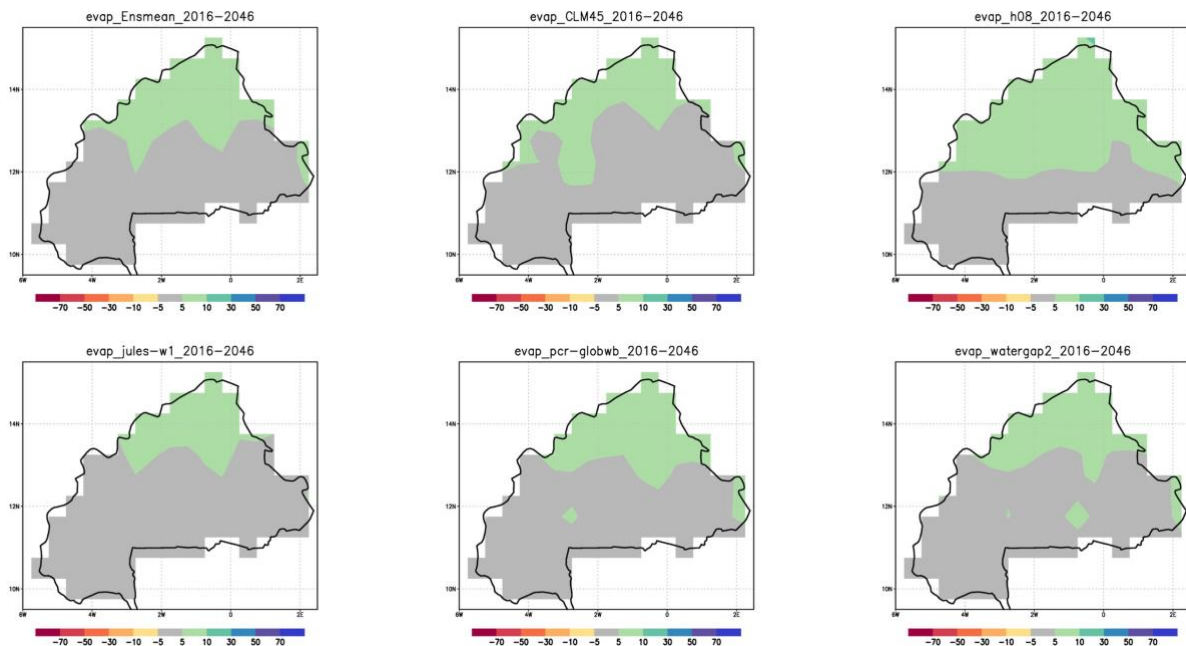


Figure 5 : Changement annuel moyen de l'évapotranspiration (en %) au Burkina Faso sur la période 2016-2046 par rapport à la période de référence 1976-2005, selon la moyenne de toutes les combinaisons modèle hydrologique-GCM considérées (en haut à gauche), les simulations réalisées par les modèles hydrologiques globaux CLM4.5 (en haut au milieu), H08 (en haut à droite), JULES (en bas à gauche), PCR-GLOBW (en bas au milieu), et WATERGAP2 (en bas à droite). Les zones grisées représentent là où les variations sont comprises entre -5 et 5%.

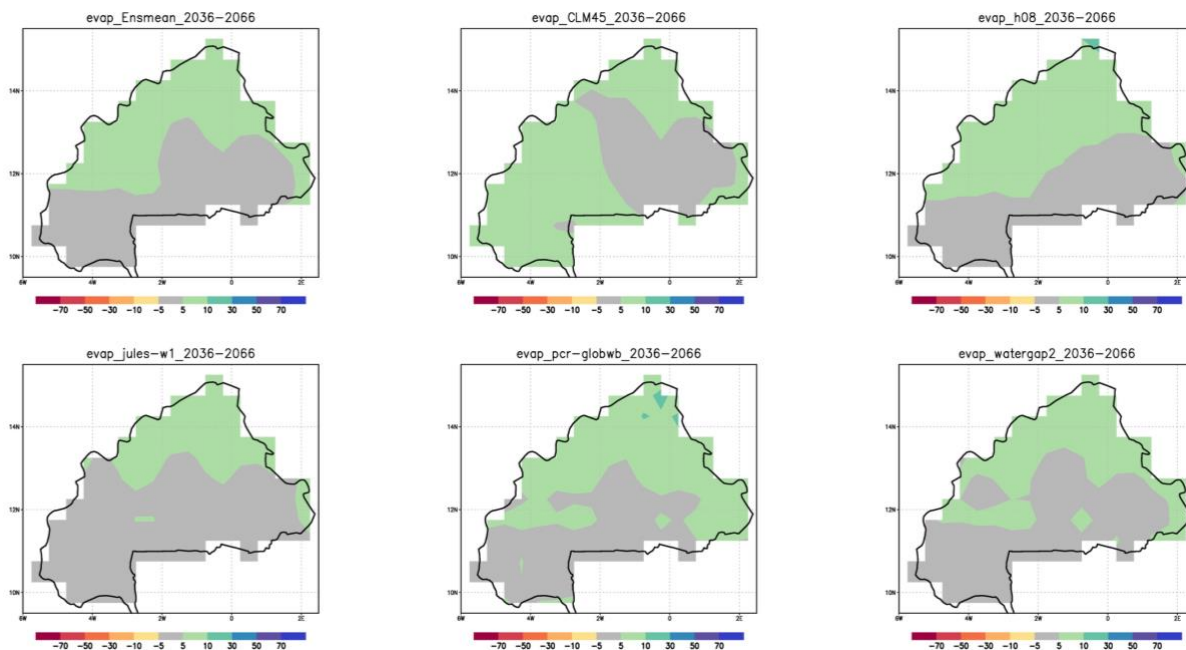


Figure 6 : Similaire à la Figure 5, mais pour la période de projection 2036-2066.

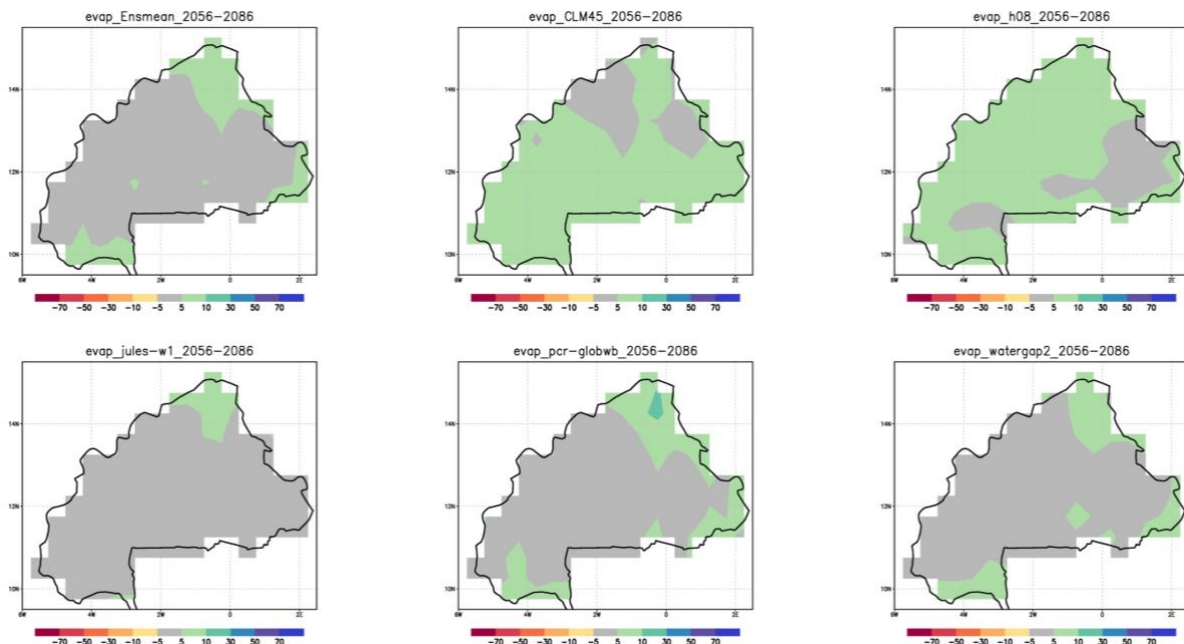


Figure 7 : Similaire à la Figure 5, mais pour la période de projection 2056-2086.

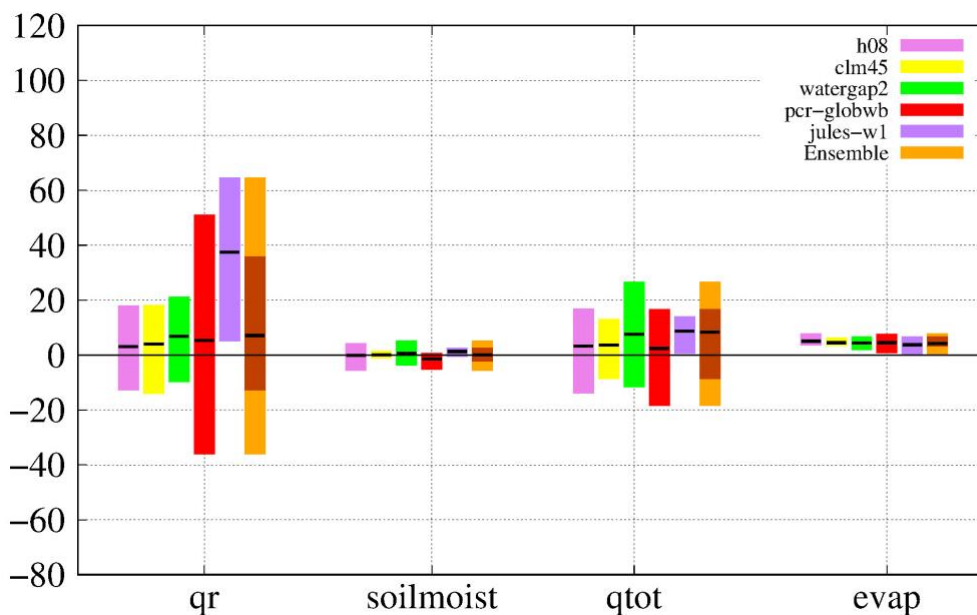


Figure 8 : Histogramme présentant les variations annuelles moyennes (de gauche à droite) : du taux d'infiltration ou de recharge des aquifères, de l'humidité du sol, du ruissellement total (de surface et sub-surface), et de l'évapotranspiration pour la première période de projection (2016-2046) par rapport à la période de référence (1976-2005). Chaque barre de couleur matérialise la dispersion entre les valeurs correspondant à chacune des simulations effectuées par un des modèles hydrologiques, ou bien l'ensemble des combinaisons modèle hydrologique-GCM (en orange). Les barres noires horizontales indiquent les changements moyens pour un modèle hydrologique pour chaque barre verticale, tandis que les barres oranges foncés indiquent l'écart entre les 33^e et 66^e percentiles de toutes les combinaisons, pour chaque variable.

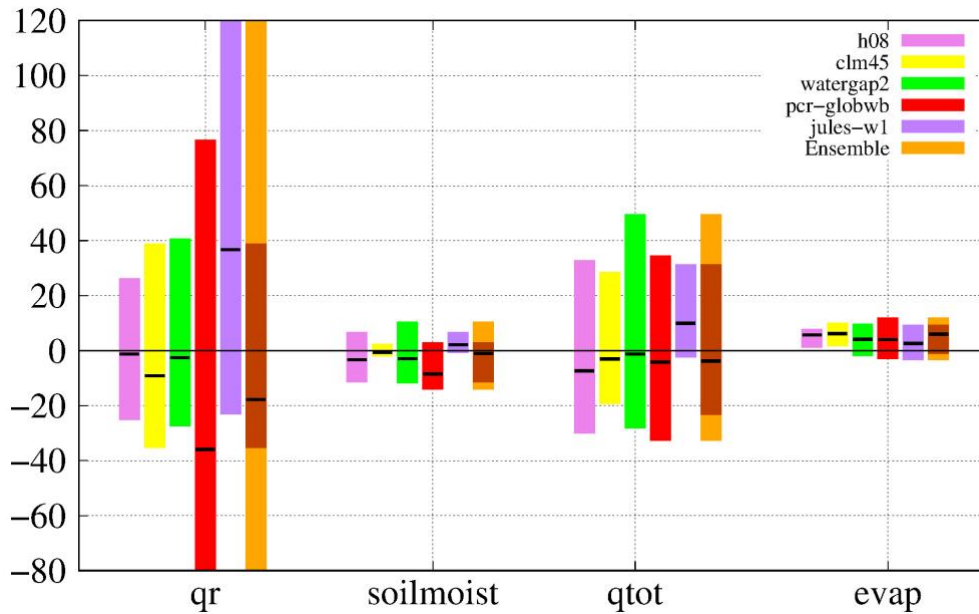


Figure 9 : Similaire à la Figure 8, mais pour la période de projection 2056-2086.

evap-Ensemble-2056-2086

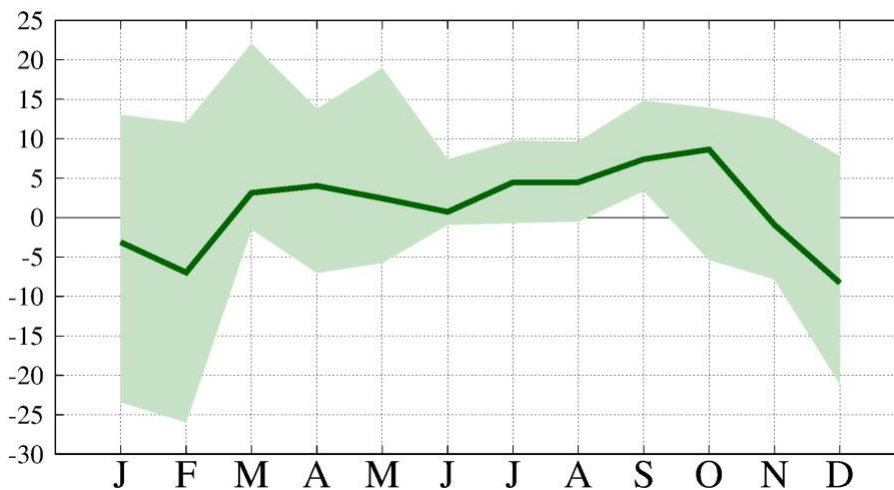


Figure 10 : Cycle saisonnier de variations d'évapotranspiration au Burkina Faso pour la troisième période de projection (2056-2086) par rapport à la période de référence (1976-2005). La ligne en gras indique la moyenne de toutes les simulations, tandis que la dispersion entre les résultats individuels de celles-ci est matérialisée par l'enveloppe verte claire.

Évolution future du ruissellement de surface

Les modèles hydrologiques analysés indiquent tous une légère augmentation du ruissellement total d'environ 5-10% en moyenne sur le Burkina Faso entre la première période de projection (2016-2046) et la période de référence (Figure 9), malgré une dispersion entre les modèles trop grandes pour suggérer que cette augmentation soit robuste. Cette augmentation est alors plutôt localisée sur la partie nord ou nord-est du pays, excepté pour JULES-W1 pour lequel tout le pays connaît une augmentation du ruissellement, qui atteint entre +10 et +30% localement (Figure 11). En revanche, un autre signal climatique se dégage dans la période 2056-2086 pour la plupart des modèles, avec l'apparition d'un contraste entre la moitié nord-est du pays dans laquelle est simulée une augmentation du ruissellement atteignant en moyenne entre 10 et 30% sur la pointe nord du pays, et la moitié sud-ouest sur laquelle apparaît une diminution importante du ruissellement pouvant atteindre entre -10 et -30% (Figure 13). En moyenne sur le pays, la variation de R devient négative par rapport à la période de référence tout au long de l'année et égale presque -5% une fois moyennée sur l'année, malgré une incertitude plus importante que pour la première période de référence (Figures 9 et 14). Ainsi, presque chaque modèle hydrologique présente au moins une simulation indiquant une variation de signe opposé à la moyenne de toutes les combinaisons. Cependant, là encore le modèle JULES-W1 fait figure d'exception en simulant une augmentation du ruissellement sur tout le pays, avec une dispersion plus faible entre les modèles (Figures 9 et 13).

La légère augmentation du ruissellement en moyenne pour la période 2016-2046 semble apparaître comme une réponse directe à l'augmentation des précipitations simulée par la moyenne des modèles de circulation générale inclus dans cette étude pendant cette période, mais doit être relativisée au vu de la variabilité climatique naturelle dans cette région ainsi que de la proximité temporelle de la période étudiée. En revanche, durant la période 2056-2086 semble se dégager un signal climatique malgré la dispersion entre les modèles, car bien que les GCMs considérés dans ce rapport indiquent des changements presque nuls, voire légèrement positifs de précipitations sur le Burkina Faso, quatre modèles hydrologiques sur cinq indiquent un contraste marqué entre les moitiés nord-est et sud-ouest du pays dans la réponse du ruissellement à ce forçage. Ce dipôle spatial apparaît donc comme une réponse robuste du ruissellement aux futurs changements de précipitation dus au changement climatique global de nature anthropique, en dépit de la nature incertaine de ceux-ci. Ces résultats suggèrent donc une probable diminution des ressources en eau superficielle dans la moitié sud-ouest du Burkina Faso, et donc un renforcement de l'aridité de ces territoires.

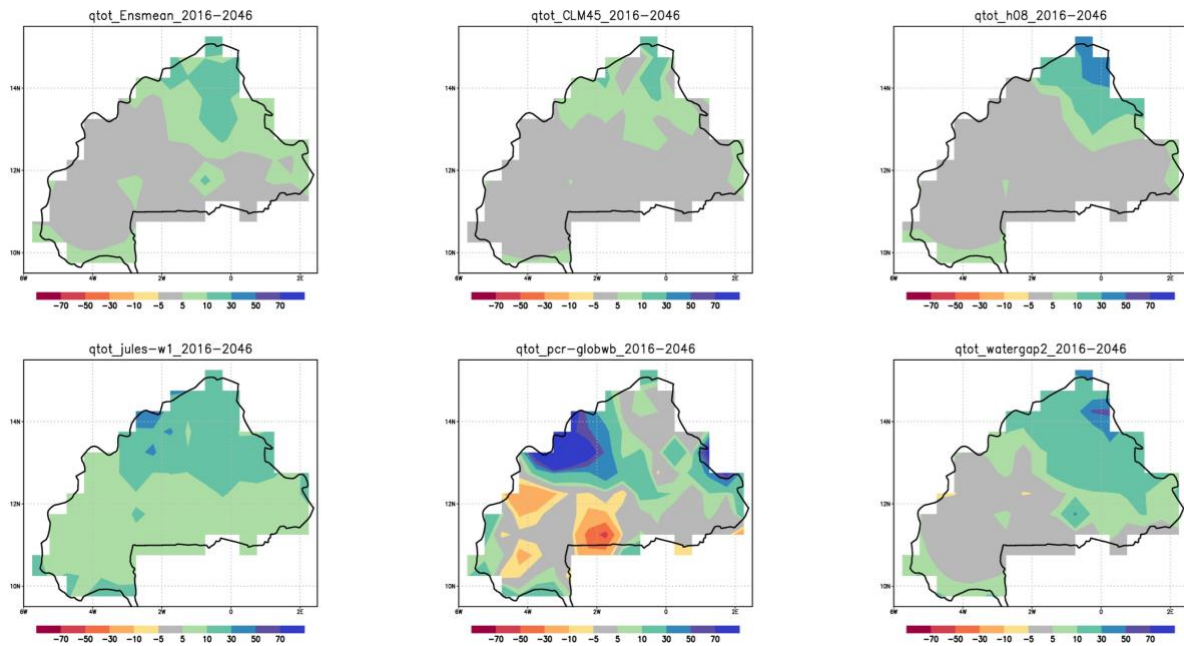


Figure 11 : Changement annuel moyen du ruissellement total (en %) au Burkina Faso sur la période 2016-2046 par rapport à la période de référence 1976-2005, selon la moyenne de toutes les combinaisons modèle hydrologique-GCM considérées (en haut à gauche), les simulations réalisées par les modèles hydrologiques globaux CLM4.5 (en haut au milieu), H08 (en haut à droite), JULES (en bas à gauche), PCR-GLOBWB (en bas au milieu), et WATERGAP2 (en bas à droite). Les zones grisées représentent là où les variations sont comprises entre -5 et 5%.

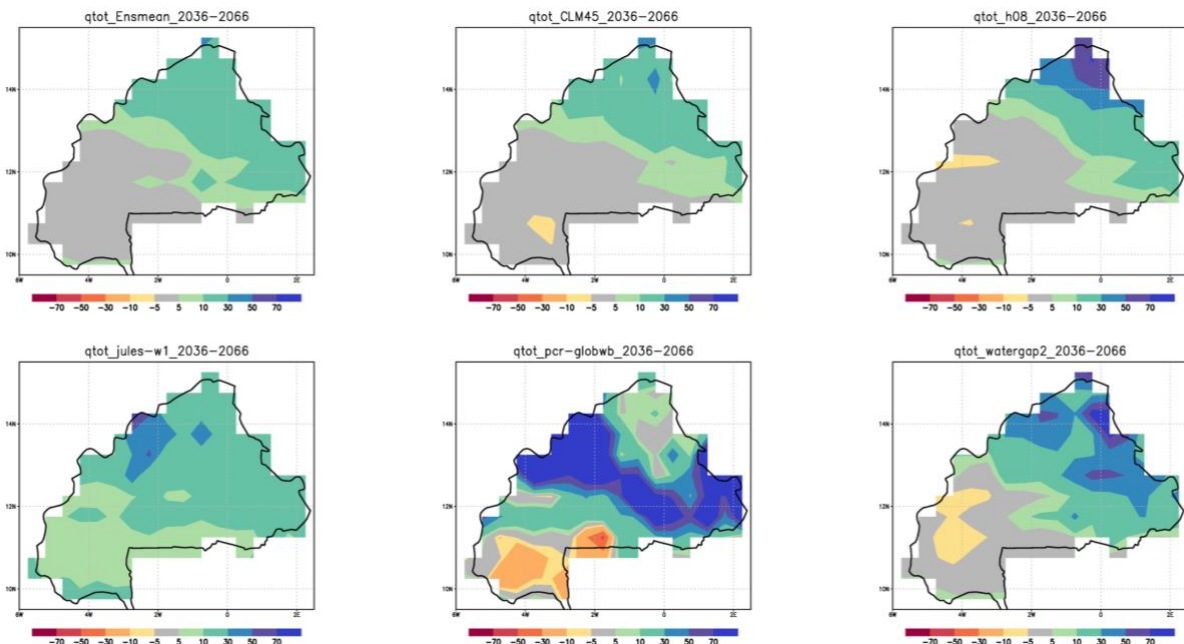


Figure 12 : Similaire à la Figure 11, mais pour la période de projection 2036-2066.

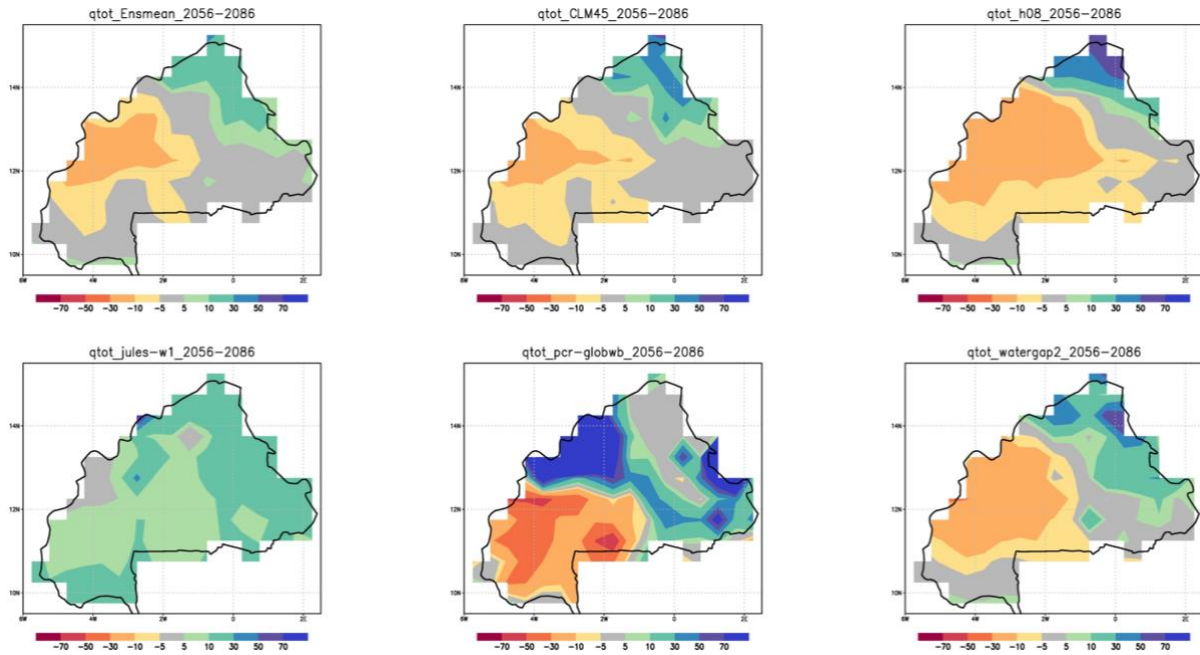


Figure 13 : Similaire à la Figure 11, mais pour la période de projection 2056-2086.

qtot-Ensemble-2056-2086

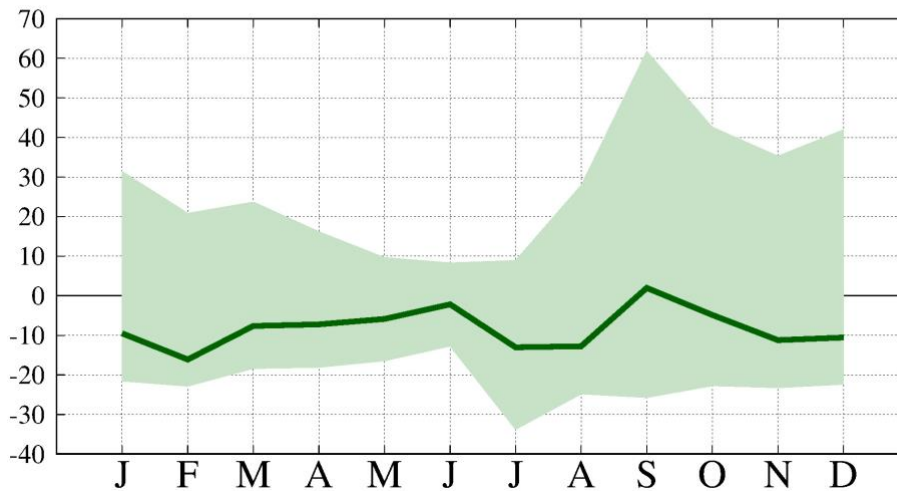


Figure 14 : Cycle saisonnier de variations du ruissellement au Burkina Faso pour la troisième période de projection (2056-2086) par rapport à la période de référence (1976-2005). La ligne en gras indique la moyenne de toutes les simulations, tandis que la dispersion entre les résultats individuels de celles-ci est matérialisée par l'enveloppe verte claire.

Évolution future de l'infiltration (ou recharge des aquifères)

De manière similaire au ruissellement, en moyenne sur le pays la recharge des aquifères augmente tout d'abord légèrement pendant la période 2016-2046 par rapport à la période de référence (+5-10% pour la moyenne des modèles), pour finir par diminuer de presque 20% pendant la période 2056-2086 par rapport à 1976-2005 en raison de l'augmentation du taux d'évapotranspiration combinée à l'augmentation moins prononcée des précipitations (Figures 8 et 9). Cette tendance est observable, de même que pour le ruissellement, dans tous les modèles hydrologiques considérés dans cette étude sauf JULES-W1, qui indique une augmentation du taux d'infiltration d'environ 40% en moyenne sur le pays pour 2016-2046 et 2056-2086 comparé à 1976-2005. En revanche, l'incertitude autour des futurs changements du taux d'infiltration vers les aquifères est encore plus prononcée qu'autour de ceux de ruissellement, avec une dispersion plus élevée entre les simulations forcées par les différents GCMs. Il convient de noter que contrairement aux autres modèles hydrologiques analysés, JULES-W1 ne représente pas les aquifères et ne simule qu'un taux d'infiltration vers les couches inférieures du sol (Best, 2011).

Tous les modèles hydrologiques indiquent une augmentation de plus de 5% du taux de rechargement des aquifères sur au moins la moitié nord-est du pays en 2016-2046 par rapport à 1976-2005. CLM4.5 indique cependant une diminution importante (dépassant 50%) mais localisée sur le nord du Burkina Faso, alors que PCR-GLOBW suggère une diminution sur la même région ainsi que le sud-ouest du pays. De même que dans le cas du ruissellement, l'étendue de cette zone d'augmentation du taux d'infiltration rétrécit au cours du 21^e siècle jusqu'à devenir minoritaire en 2056-2086, et laisser la place à une vaste région de diminution du taux d'infiltration occupant au moins la moitié sud-ouest du pays. Cette diminution est cependant moins marquée dans les modèles JULES-W1 et PCR-GLOBW. La plupart des variations du taux de rechargement des aquifères sont simulées en juillet et août (Figure 18).

En résumé, malgré la dispersion entre les simulations analysées, qui est due principalement à celle du forçage climatique, l'évolution du taux de recharge des aquifères apparaît contraire à celle des précipitations pour la plupart des modèles hydrologiques, indiquant une diminution de ce taux sur particulièrement la moitié sud-ouest du Burkina Faso vers la fin du siècle dans le scénario considéré (RCP6.0). Cela signifie qu'il existe un réel risque que pour une utilisation inchangée des réserves d'eau souterraines, celles-ci se retrouvent diminuées sous l'effet des changements climatiques en cas de non-poursuite d'une politique d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre ambitieuse à l'échelle planétaire.

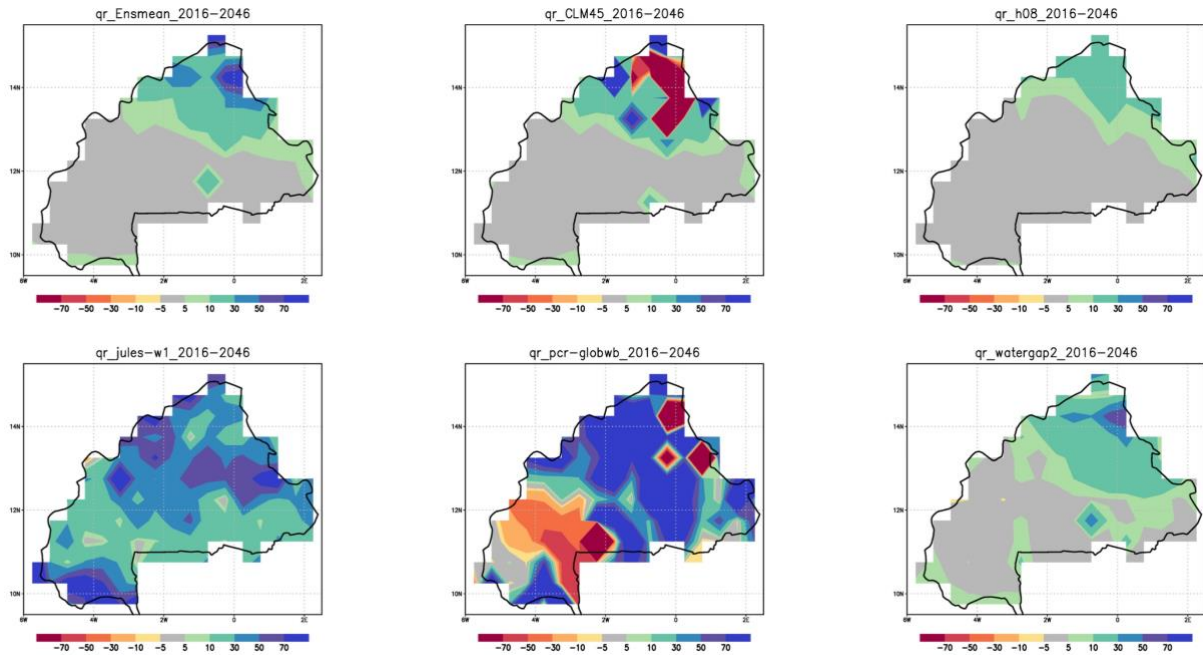


Figure 15 : Changement annuel moyen de l'infiltration (en %) au Burkina Faso sur la période 2016-2046 par rapport à la période de référence 1976-2005, selon la moyenne de toutes les combinaisons modèle hydrologique-GCM considérées (en haut à gauche), les simulations réalisées par les modèles hydrologiques globaux CLM4.5 (en haut au milieu), H08 (en haut à droite), JULES (en bas à gauche), PCR-GLOBWB (en bas au milieu), et WATERGAP2 (en bas à droite). Les zones grisées représentent là où les variations sont comprises entre -5 et 5%.

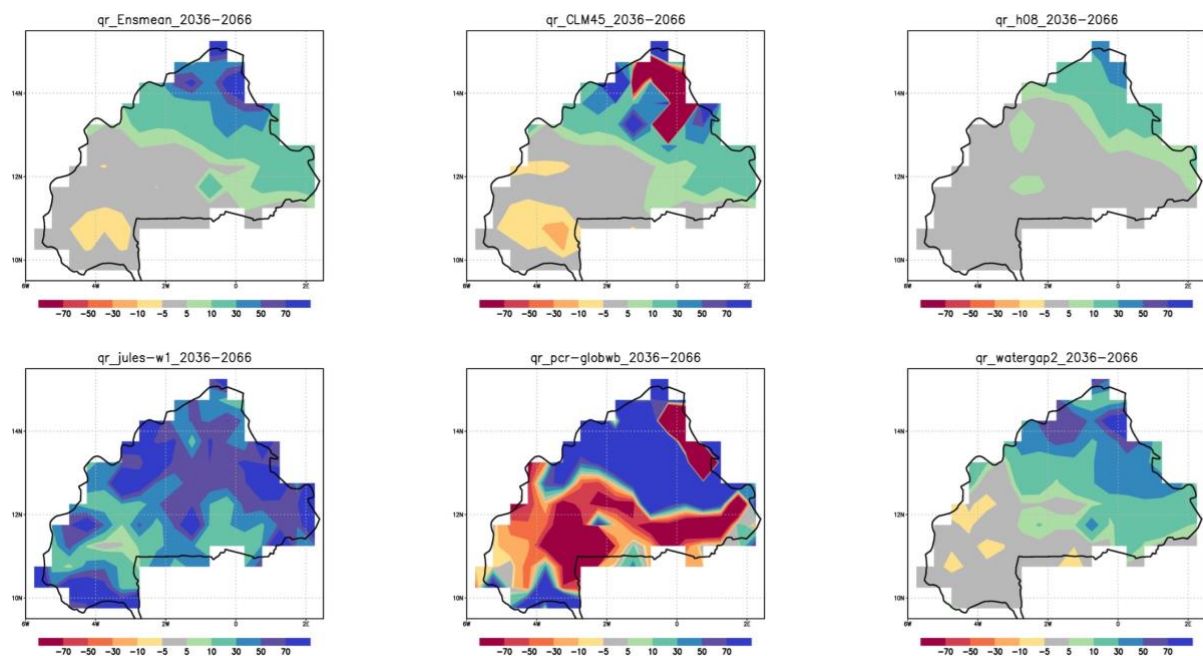


Figure 16 : Similaire à la Figure 15, mais pour la période de projection 2036-2066.

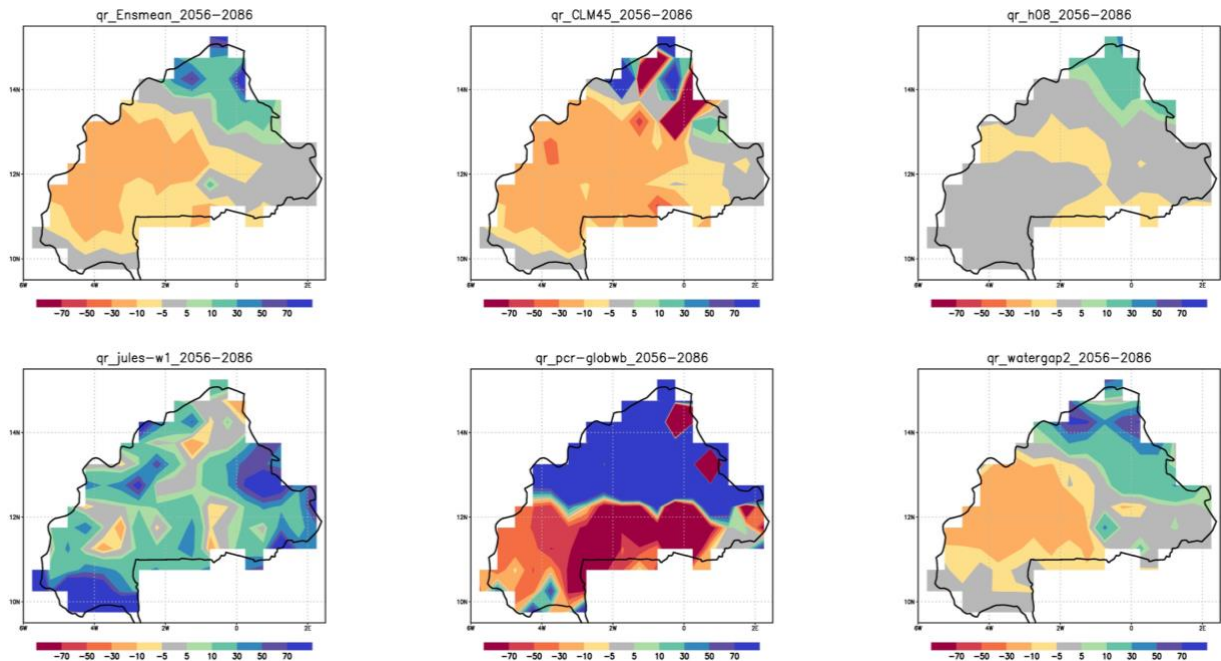


Figure 17 : Similaire à la Figure 15, mais pour la période de projection 2056-2086.

qr-Ensemble-2056-2086

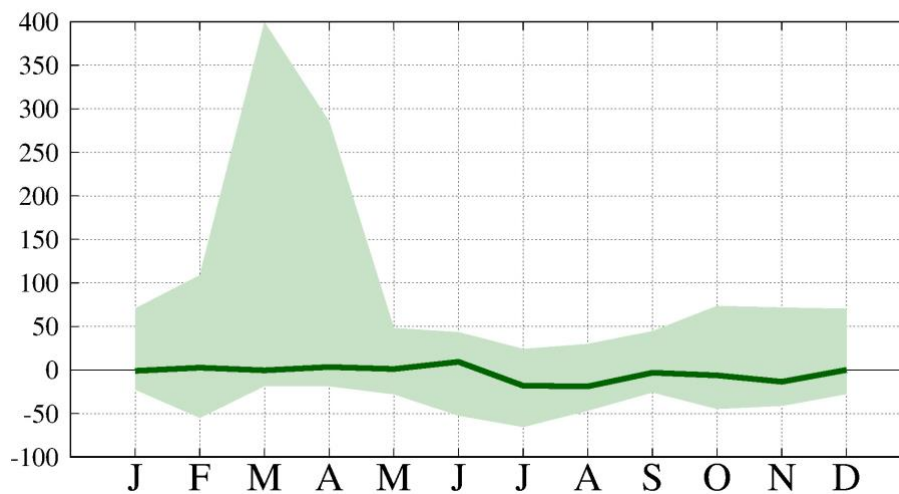


Figure 18 : Cycle saisonnier de variations de l'infiltration au Burkina Faso pour la troisième période de projection (2056-2086) par rapport à la période de référence (1976-2005). La ligne en gras indique la moyenne de toutes les simulations, tandis que la dispersion entre les résultats individuels de celles-ci est matérialisée par l'enveloppe verte claire.

Évolution future de l'humidité du sol

L'humidité du sol évolue en moyenne très peu entre 2016-2046 et 1976-2005 (Figures 8 et 19), mais diminue légèrement par la suite au cours du 21^è siècle sous les effets combinés du renforcement des taux d'évapotranspiration et de la stagnation des quantités de précipitations (de +1% pour JULES-W1 à -10% pour PCR-GLOBWR, voir Figures 9 et 21). Cette légère diminution se répartit sur toute l'année (Figure 22), et indique que même si la majorité des modèles n'indique pas de changements significatifs, il n'est pas exclu que les plantes se reposant sur l'humidité du sol pour leur croissance ou survie nécessitent un apport extérieur plus important (par exemple via l'irrigation dans le cas des productions agricoles burkinabées).

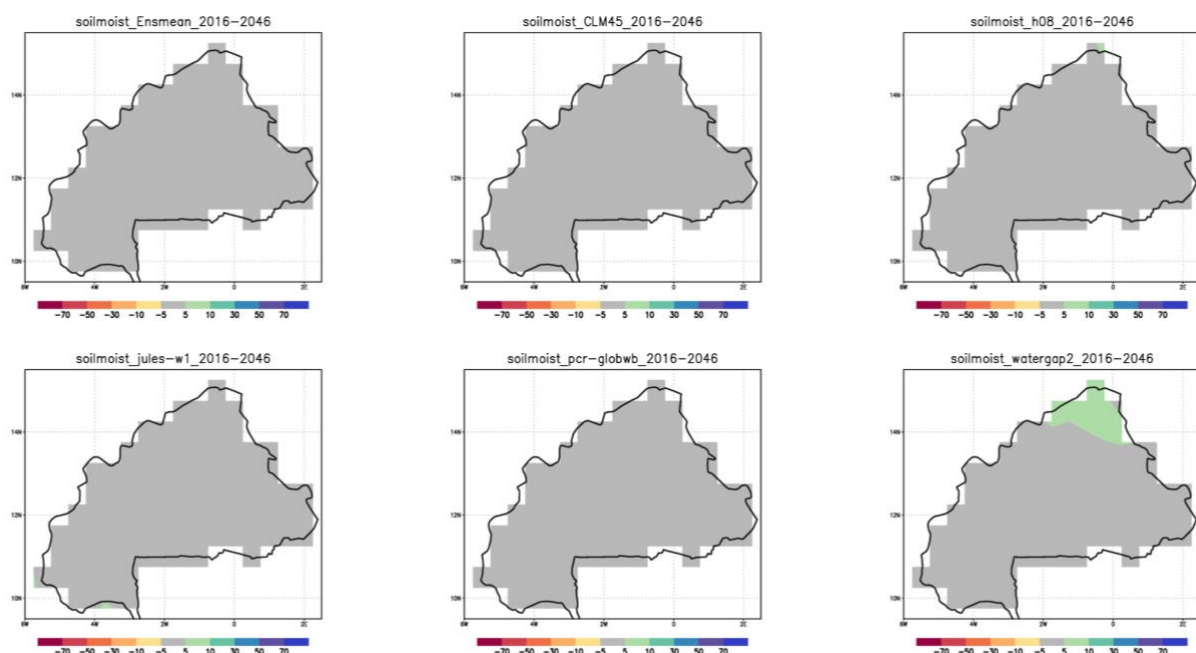


Figure 19 : Changement annuel moyen de l'humidité du sol (en %) au Burkina Faso sur la période 2016-2046 par rapport à la période de référence 1976-2005, selon la moyenne de toutes les combinaisons modèle hydrologique-GCM considérées (en haut à gauche), les simulations réalisées par les modèles hydrologiques globaux CLM4.5 (en haut au milieu), H08 (en haut à droite), JULES (en bas à gauche), PCR-GLOBWR (en bas au milieu), et WATERGAP2 (en bas à droite). Les zones grisées représentent là où les variations sont comprises entre -5 et 5%.

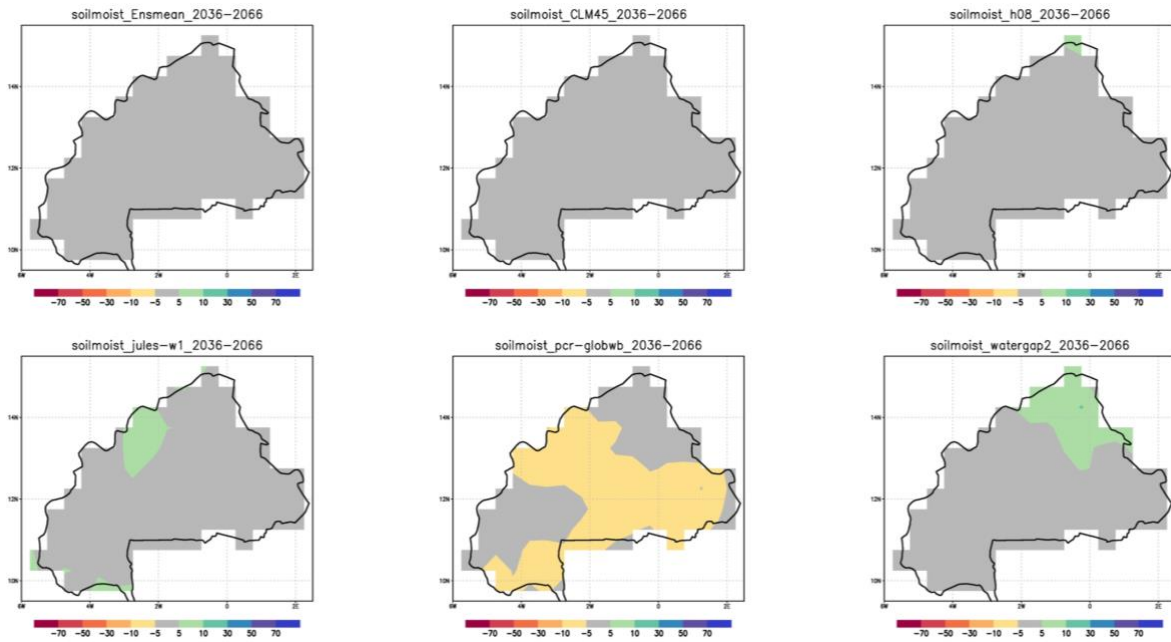


Figure 20 : Similaire à la Figure 19, mais pour la période de projection 2036-2066.

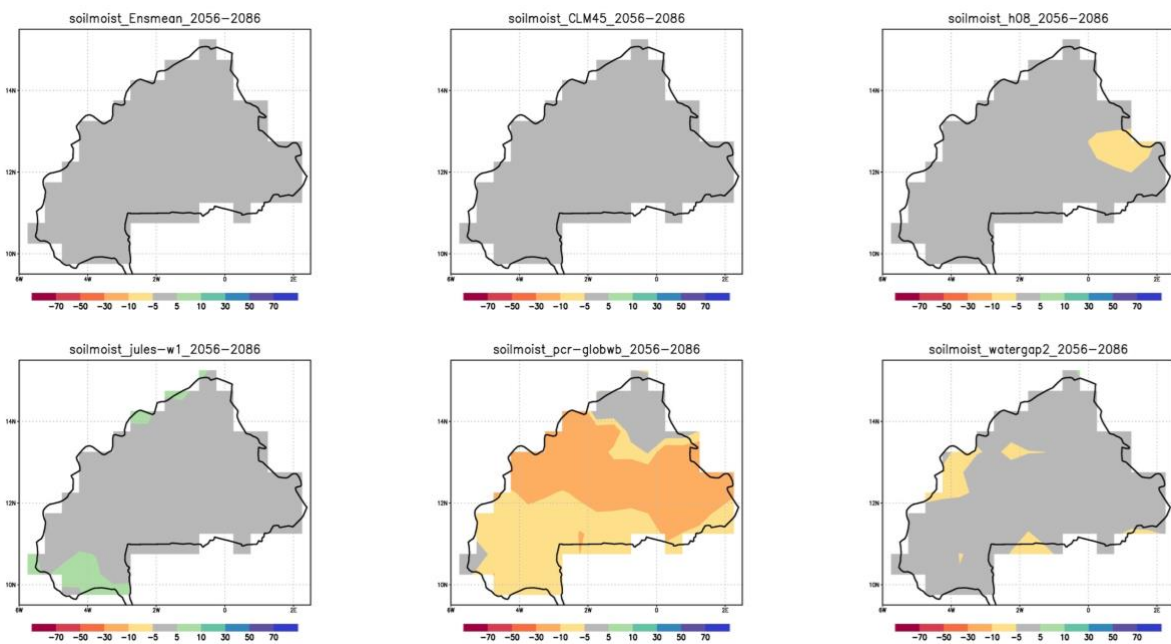


Figure 21 : Similaire à la Figure 19, mais pour la période de projection 2056-2086.

soilmoist-Ensemble-2056-2086

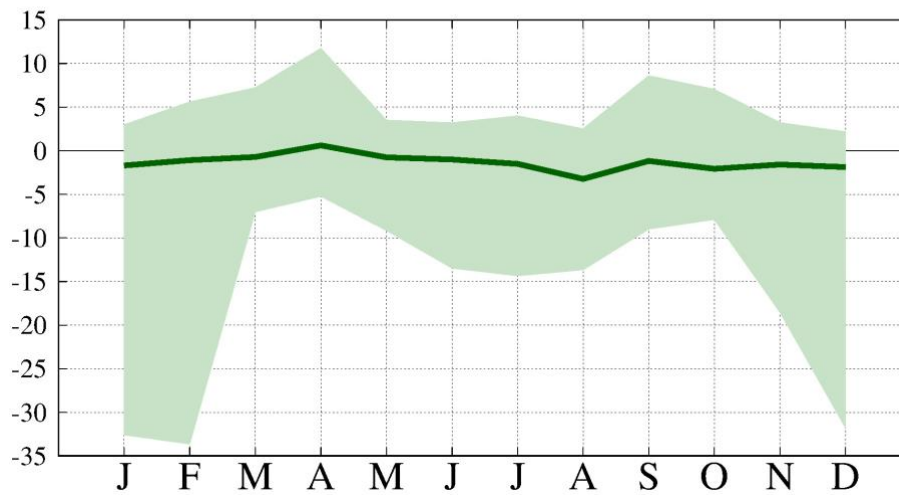


Figure 22 : Cycle saisonnier de variations de l'humidité du sol au Burkina Faso pour la troisième période de projection (2056-2086) par rapport à la période de référence (1976-2005). La ligne en gras indique la moyenne de toutes les simulations, tandis que la dispersion entre les résultats individuels de celles-ci est matérialisée par l'enveloppe verte claire.

Discussion et conclusions

L'approche utilisée dans l'étude présentée dans ce rapport consistait à analyser les résultats de cinq modèles hydrologiques globaux différents forcés par soit trois jeux de données d'observation fusionnés et corrigés du biais (période historique), soit les sorties de quatre modèles de circulation générale eux aussi corrigés du biais (projections pour le 21^e siècle). Tous ces modèles ont suivi les mêmes protocoles expérimentaux (celui de ISIMIP2b pour les modèles hydrologiques, celui de CMIP5 dans le cas des GCMs) pour réaliser les simulations analysées dans cette étude, ce qui rend leurs résultats directement comparables. Cela signifie que cette approche permet de prendre en compte les incertitudes liées au forçage climatique sur la région ouest-africaine, ainsi que celles liées à la réponse des modèles hydrologiques à celui-ci, et donc de mieux estimer la robustesse des résultats présentés.

Malgré l'avantage de cette approche, les modèles hydrologiques considérés dans cette étude souffrent de quelques limitations pour la réalisation d'une étude d'impact du changement climatique sur les ressources en eau.

Premièrement, ce sont des modèles hydrologiques globaux qui ne sont pas nécessairement calibrés de manière idéale sur la région étudiée. Concrètement, les valeurs de débit des cours d'eau qu'ils simulent n'ont pas nécessairement pu être calibrées contre des valeurs mesurées au Burkina Faso. Ce problème intervient souvent dans les régions pauvres en observations de ce type, et où de plus l'accès aux quelques données existantes est parfois rendu difficile par le faible taux de documentation de leur existence ou des réticences institutionnelles. Cette phase de calibration est néanmoins essentielle pour valider la représentation des composantes du cycle de l'eau simulées par les modèles hydrologiques. Elle est d'autant plus importante pour capturer correctement les valeurs absolues de ces flux, mais est également souhaitable dans le cadre d'une étude de leurs variations relatives futures telle que celle décrite dans ce rapport. L'intégration des cartes des barrages existants, en construction ou planifiés est également importante pour que les modèles hydrologiques puissent représenter correctement les valeurs de débit des fleuves et des réservoirs. Une fois encore, cette intégration est d'autant plus nécessaire lorsqu'on s'intéresse aux valeurs absolues de ces variables, et a été très limitée dans le cas des modèles analysés.

Deuxièmement, les modèles globaux participant à ISIMIP ont une résolution horizontale de 0.5°, c'est-à-dire que les cellules de la maille sur laquelle sont effectuées les simulations analysées ont une taille d'environ 55 x 55 kilomètres, soit 3025 km². Le Burkina Faso occupe une superficie de 274200 km², soit environ 90 fois la taille d'une cellule de la maille des modèles hydrologiques considérés. On peut donc espérer observer des résultats relativement robustes à l'échelle du pays, néanmoins des signaux robustes d'une dimension inférieure à environ 20000 km² peuvent difficilement être identifiés avec les modèles employés.

Troisièmement, les modèles employés ne représentent que très peu voire pas du tout les flux et réservoirs d'eau souterraine malgré leur importance pour l'approvisionnement en eau des populations locales. Ces flux et réservoirs sont néanmoins très mal connus dans le cas du Burkina Faso (Banque Mondiale, 2017). De plus, si les modèles prennent en compte le type de sol (argile, sable, etc.) dans le calcul de l'infiltration, ses propriétés hydrogéologiques (ou celles du socle granitique que l'on trouve sur la majeure partie du Burkina Faso) qui jouent également un rôle important dans ce processus, sont

représentées de manière approximative dans certains modèles, en jouant plutôt un rôle de variable d'ajustement a posteriori pour éviter la simulation de valeurs d'infiltration trop extrêmes. D'autres modèles ne les prennent pas en compte, quant au modèle JULES-W1 il ne représente pas les aquifères. Il convient par conséquent d'interpréter les valeurs d'infiltration avec précaution, en les considérant avant tout comme une réponse au signal climatique.

Il existe des modèles individuels qui bénéficient d'une meilleure calibration sur la région ouest-africaine, d'une résolution spatiale plus fine ou d'une meilleure représentation des aquifères (SWIM et HYPE). Cependant, dans la majorité des cas les expériences réalisées avec ces modèles suivent des protocoles expérimentaux différents, et ne permettent pas une comparaison stricte des résultats qui en découlent, au contraire de l'approche suivie par l'étude présentée dans ce rapport. Des modèles hydrologiques régionaux participent également à ISIMIP, dans le cadre duquel ils suivent un protocole expérimental commun pour chaque phase du projet en suivant les mêmes scénarios RCPs et SSPs décrits dans la partie Méthodes. Grâce à la plus petite taille du domaine qu'ils couvrent, ces modèles peuvent mieux représenter les processus locaux, de plus ils bénéficient très souvent d'une meilleure calibration à l'aide de données d'observation locales. Les modèles hydrologiques régionaux participant à ISIMIP réalisent entre autres des expériences coordonnées sur le Bassin du Haut-Niger. Celui-ci ne couvre cependant qu'une petite partie du Burkina Faso, et l'analyse des simulations réalisées par ces modèles n'était donc pas appropriée pour cette étude. Une publication récente a comparé les résultats des modèles hydrologiques globaux et régionaux participant à ISIMIP (Hattermann, et al., 2017). En moyenne sur le Haut-Niger, pendant et après la saison des pluies les modèles globaux surestiment les valeurs de débit par rapport aux modèles régionaux, qui eux les capturent correctement. Cependant, en moyenne les deux types de modèles indiquent des variations de débit similaires en réponse aux variations climatiques à venir, avec néanmoins une dispersion notablement plus importante entre les résultats des modèles globaux individuels en comparaison avec la dispersion entre les résultats des modèles régionaux. On peut donc noter que réaliser un exercice de comparaison entre modèles hydrologiques régionaux suivant un protocole expérimental commun comme celui d'ISIMIP et focalisé sur le Burkina Faso permettrait de réduire les incertitudes associées aux variations du cycle de l'eau futures et présentées dans ce rapport, tout en permettant de mieux prendre en compte les incertitudes liées aux futures variations climatiques simulées par les GCMs ainsi qu'à la réponse des modèles hydrologiques à celles-ci. Un tel exercice de comparaison est prévu dans le cadre du projet Climate Information for integrated Renewable Electricity Generation (CIREG)⁴, qui effectuera des simulations hydrologiques multi-modèles sur le Bassin de la Volta, et dont les résultats pourraient donc compléter de manière intéressante ceux présentés dans cette étude.

Malgré les limites mentionnées des modèles utilisés, cette étude a permis de dégager des résultats relativement robustes sur l'évolution des ressources en eau disponibles au Burkina Faso en réponse aux changements climatiques qui pourraient advenir à la suite de l'augmentation des concentrations en gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Un des résultats majeurs est qu'en réponse à une augmentation à un rythme soutenu des émissions de gaz à effet de serre (scénario RCP6.0), il existe un risque réel de diminution du ruissellement et du taux de recharge des aquifères sur la moitié sud-ouest du Burkina Faso d'ici à la fin du 21^e siècle, atteignant localement entre -10 et -30% en moyenne sur l'année. Ce résultat est simulé par quatre des cinq modèles hydrologiques globaux considérés, malgré une incertitude sur l'évolution des précipitations sur le pays en réponse à

⁴ <https://cireg.pik-potsdam.de/en/>

l'augmentation de la température moyenne mondiale (avec un changement nul ou légèrement positif dans la moyenne des modèles). Ce résultat apparaît donc robuste et pourrait se manifester même si les précipitations venaient à augmenter légèrement sur la région, accentuant ainsi l'aridité des régions concernées et y diminuant les ressources en eau superficielle et souterraine disponibles. En revanche, tous les modèles hydrologiques simulent une augmentation des taux de ruissellement et de recharge des aquifères sur une région couvrant la partie nord-est du pays, qui tend néanmoins à se rétrécir au cours du 21^e siècle. Cette augmentation doit de plus être appréciée à la lumière des incertitudes existantes sur l'évolution future des précipitations discutées auparavant. De manière générale, les incertitudes associées à l'évolution du taux de ruissellement sont plus basses que dans le cas du taux de recharge des aquifères. Les projections étudiées indiquent également en moyenne une diminution très légère et non robuste de l'humidité des sols, qui pourraient éventuellement accentuer le stress hydrique des plantations agricoles et donc augmenter leur demande d'apport d'eau extérieur via l'irrigation. La diminution des taux de ruissellement et de l'infiltration vers les aquifères sur la moitié sud-ouest du Burkina Faso, ainsi que les faibles changements d'humidité du sol simulés à l'horizon 2070 en réponse au scénario RCP6.0 apparaît alors que les projections pour les précipitations indiquent de faibles variations sur le pays, d'après la moyenne des GCMs utilisés en forçage des modèles hydrologiques. Ceci est dû à une évolution à la hausse en parallèle des taux d'évapotranspiration, qui est alimentée par l'augmentation des températures sur le pays et est plus marquée sur sa partie nord. Néanmoins, sa progression est limitée vers la fin du 21^e siècle dans certains modèles en raison de la diminution des quantités d'eau disponibles sur la partie sud-ouest du pays.

De manière générale, il apparaît difficile d'effectuer des prédictions sur l'évolution des composantes du cycle de l'eau étudiées pour les horizons 2030 et 2050 (périodes de projection 2016-2046 et 2036-2066, respectivement), hormis pour le taux d'évapotranspiration, dont l'augmentation d'environ 5% en moyenne sur le pays et exacerbée sur le nord de celui-ci qui est simulée pour la période 2016-2046 apparaît robuste à travers les modèles. Cela signifie que reproduire cette étude sur les mêmes périodes de projection, mais pour des scénarios correspondant à une plus forte atténuation des émissions de gaz à effet de serre telle que le RCP2.6 (pour lequel les niveaux de température moyenne globale ne dépassent pas ceux de la période 2036-2066 dans le scénario RCP6.0), ne permettraient très vraisemblablement pas de dégager un signal climatique suffisamment fort par rapport aux incertitudes existantes sur les variations futures des précipitations ainsi que sur la réponse des modèles hydrologiques à celles-ci.

Les simulations analysées dans le cadre de cette étude nécessiteraient d'être reproduites avec des forçages climatiques issus de modèles différents, et avec idéalement un ensemble de simulations pour chaque modèle afin de mieux prendre en compte les incertitudes liées aux modèles climatiques utilisés ainsi que celles liées à la variabilité interannuelle. De plus, elles mériteraient d'être effectuées avec plus de modèles hydrologiques pour pouvoir mieux estimer les incertitudes associées à notre compréhension de la réponse du cycle de l'eau au forçage climatique. Compléter l'approche multi-modèle entamée par cette étude grâce aux simulations d'ISIMIP2b permettrait ainsi de renforcer la robustesse des résultats mis en avant. Comme mentionné précédemment, il pourrait être également faisable de réaliser des simulations avec un modèle régional à résolution plus fine sur un ou plusieurs bassins recouvrant le Burkina Faso. Néanmoins, une étude a précédemment conclu que la plus grande partie de l'incertitude des résultats des simulations effectuées à l'aide de modèles régionaux d'ISIMIP sur le bassin du Haut-Niger provient de celle associée aux données climatiques d'entrée, plutôt que de celle liée aux scénarios ou modèles hydrologiques employés (Vetter, et al., 2015). A la lumière de cette

publication et de celle décrite précédemment qui a conclu à des valeurs de changements de débit des cours d'eau similaires en moyenne pour les modèles hydrologiques régionaux et globaux d'ISIMIP (Hattermann, et al., 2017), il apparaît donc prioritaire de réduire les incertitudes liées au forçage climatique en utilisant les sorties d'autres GCMs ainsi que des ensemble de simulations pour chaque GCM en données d'entrées des modèles hydrologiques analysés, plutôt que de reproduire cette étude avec d'autres modèles hydrologiques.

En conclusion, les résultats mis en avant dans cette étude permettent d'étudier la composante biophysique de la vulnérabilité des ressources en eau du Burkina Faso aux changements climatiques futurs. Ils indiquent un risque d'augmentation non négligeable de l'aridité sur au moins la moitié sud-ouest du Burkina Faso pour la deuxième moitié du 21^e siècle, dans l'hypothèse où l'effort mondial visant à atténuer les émissions de gaz à effet de serre restait limité. La raréfaction des ressources en eau qui en découlerait exacerberait la pression sur celles-ci, déjà limitées dans cette région, et qui doit de plus être examinée à la lumière de l'augmentation de la demande en eau liée aux prévisions de forte croissance de la population dans le pays (INSD, 2018). Il apparaît donc nécessaire de mettre en place des stratégies adéquates pour faire face aux risques mis en avant dans cette étude, ainsi de continuer à insister sur une augmentation des efforts mondiaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans les fora internationaux.

Références

- Banque Mondiale, 2017. *Amélioration de la connaissance et de la gestion des eaux au Burkina Faso*, s.l.: s.n.
- Best, M. et al., 2011. The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description – Part 1: Energy and water fluxes. *Geoscientific Model Development*, Volume 4, pp. 677-699.
- Frieler, K., Lange, S., Piontek, F. & et al., 2017. Assessing the impacts of 1.5 °C global warming – simulation protocol of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP2b). *Geoscientific Model Development*, Volume 10, pp. 4321-4345.
- GIEC, 2013. *Résumé à l'intention des décideurs, Changements climatiques 2013: Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*, Cambridge, Royaume-Uni et New York (état de New York), États-Unis d'Amérique: Cambridge University Press.
- Hanasaki, N., Yoshikawa, S., Pokhrel, Y. & Kanae, S., 2018. A global hydrological simulation to specify the sources of water used by humans. Volume 22, pp. 789-817.
- Hattermann, F., Krysanova, V. & Gosling, S., 2017. Cross-scale intercomparison of climate change impacts simulated by regional and global hydrological models in eleven large river basins. *Climatic Change*, Volume 141, pp. 561-576.
- Hurt, G., Chini, L., Sahajpal, R. & et al., in preparation, 2019. Harmonization of global land-use change and management for the period 850–2100.
- Institut National de la Statistique et de la Démographie (INSD), 2018. Chiffres clés, Données Démographiques. Accessible à www.insd.bf [Accès le 19 Janvier 2019]
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Klein Goldewijk, K., 2016. *A historical land use data set for the Holocene*. [En ligne] Available at: <https://doi.org/10.17026/dans-znk-cfy3>
- Lange, S., 2016. *Earth2Observe, WFDEI and ERA-Interim data Merged and Bias-corrected for ISIMIP (EWEMBI). GFZ Data Services*. [En ligne] Available at: <http://doi.org/10.5880/pik.2016.004>
- Müller Schmied, H. et al., 2016. Variations of global and continental water balance components as impacted by climate forcing uncertainty and human water use. *Hydrology and Earth System Sciences*, Volume 20, pp. 2877-2898.
- NCAR, 2013. *Technical Description of version 4.5 of the Community Land Model (CLM)*. [En ligne] Available at: http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.2/clm/CLM45_Tech_Note.pdf [Accès le January 2019].
- Popp, A., Calvin, K., Fujimori, S. & et al., 2017. Land use futures in the Shared Socio-Economic Pathways. *Global Environmental Change*, Volume 42, pp. 331-345.
- Samir, C. & Lutz, W., 2014. The human core of the shared socioeconomic pathways: Population scenarios by age, sex and level of education for all countries to 2100. *Global Environmental Change*, Volume 42, pp. 181-192.
- Stevanović, M., Popp, A. L.-C. H. & et al., 2016. High-end climate change impacts on agricultural welfare. *Science Advances*, Volume 2.
- Sylla, M. B. et al., 2016. Climate Change over West Africa: Recent Trends and Future Projections. Dans: *Adaptation to Climate Change and Variability in Rural West Africa*. s.l.:Springer, Cham.

- Vetter, T. et al., 2015. Multi-model climate impact assessment and intercomparison for three large-scale river basins on three continents. *Earth System Dynamics*, Volume 6, pp. 17-43.
- Wada, Y., Wisser, D. & Bierkens, M., 2014. Global modeling of withdrawal, allocation and consumptive use of surface water and groundwater resources. *Earth System Dynamics*, Volume 5, pp. 15-40.

Climate Analytics gGmbH
Ritterstr. 3
10969 Berlin
Germany

T / +49 302 5922 9520
E / contact@climateanalytics.org

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

T / + 1 718 618 5847
E / info.ny@climateanalytics.org


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

T / +228 22 25 65 38 / 22 25 74 74
E / togooffice@climateanalytics.org

Mis en oeuvre par :

giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Mandaté par :

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

Sous la tutelle de :



En coopération avec :

CLIMATE
ANALYTICS 