

# Scénarios des changements climatiques dans le bassin du Congo

## Rapport final



Climate change scenarios



Hydrological assessment



Impacts assessment



Adaptation options



On behalf of



Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety

of the Federal Republic of Germany



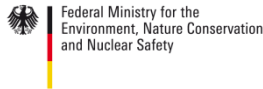
An institution of Helmholtz-Zentrum Geesthacht

**Le document d'origine a été rédigé en langue anglaise et le présent document est la version française dudit document. Les auteurs déclinent toute responsabilité en cas d'erreur de traduction et vous prient de bien vouloir vous référer à la version anglaise avant de la citer.**

## Remerciements

Le projet « Scénarios des changements climatiques dans le bassin du Congo » est un projet conjoint de l'Agence de coopération internationale allemande pour le développement (GIZ) GmbH, du Centre de service climatologique (Climate Service Centre, CSC) de Hambourg, en Allemagne; et de l'Université et du Centre de recherche de Wageningen (WUR), aux Pays-Bas. Financé par le Ministère fédéral allemand de l'Environnement, de la Protection de la nature et de la Sûreté nucléaire (BMU), il a été réalisé entre la fin de l'année 2010 et le début de l'année 2013.

On behalf of



of the Federal Republic of Germany



## Préface technique

Le présent rapport est le résumé des résultats du projet « Scénarios des changements climatiques dans le bassin du Congo ». Il comprend quatre rapports indépendants sur les thématiques suivantes : Évaluation des signaux des changements climatiques projetés pour la région ; Évaluation des impacts potentiels des changements climatiques sur le régime hydrologique de la région ; Évaluation des impacts des changements climatiques sur la région ; et Identification des options d'adaptation aux changements climatiques dans la région. Le Sommaire exécutif, qui se trouve au début du rapport, dresse la synthèse des résultats de chaque rapport indépendant.

### L'ensemble du rapport doit être cité comme suit:

CSC (2013): *Climate Change Scenarios for the Congo Basin*. [Haensler A., Jacob D., Kabat P., Ludwig F. (eds.)]. Climate Service Center Report No. 11, Hamburg, Germany, ISSN: 2192-4058.

### Les différents rapports doivent être cités comme suit:

#### Rapport 1 :

Haensler, A., Saeed, F. and Jacob, D. (2013): Assessment of projected climate change signals over central Africa based on a multitude of global and regional climate projections. In: *Climate Change Scenarios for the Congo Basin*. [Haensler A., Jacob D., Kabat P., Ludwig F. (eds.)]. Climate Service Center Report No. 11, Hamburg, Germany, ISSN: 2192-4058.

#### Rapport 2 :

Beyene T., Ludwig F., Franssen W. (2013): The potential consequences of climate change in the hydrology regime of the Congo River Basin. In: *Climate Change Scenarios for the Congo Basin*. [Haensler A., Jacob D., Kabat P., Ludwig F. (eds.)]. Climate Service Center Report No. 11, Hamburg, Germany, ISSN: 2192-4058.

#### Rapport 3 :

Ludwig F., Franssen W., Jans W., Beyenne T., Kruijt B., Supit I. (2013): Climate change impacts on the Congo Basin region. In: *Climate Change Scenarios for the Congo Basin*. [Haensler A., Jacob D., Kabat P., Ludwig F. (eds.)]. Climate Service Center Report No. 11, Hamburg, Germany, ISSN: 2192-4058.

#### Rapport 4 :

van Garderen, Ludwig F. (2013): Climate change adaptation options for the Congo Basin countries. In: *Climate Change Scenarios for the Congo Basin*. [Haensler A., Jacob D., Kabat P., Ludwig F. (eds.)]. Climate Service Center Report No. 11, Hamburg, Germany, ISSN: 2192-4058.

## Contact

Dr. Andreas Hänsler  
Helmholtz-Zentrum Geesthacht  
Climate Service Center (CSC)  
Fischertwiete 1  
20095 Hamburg  
Allemagne  
andreas.haensler@hzg.de

# Scénarios des changements climatiques dans le bassin du Congo

## Résumé exécutif

Le continent africain présente un risque accru de vulnérabilité aux perturbations induites par les changements climatiques. En outre, ainsi que l'illustre le 4<sup>e</sup> rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), les capacités du continent en matière d'adaptation demeurent faibles. Les forêts du bassin du Congo constituent la deuxième plus grande surface de forêts tropicales humides au monde et s'étendent sur une superficie d'environ 1,8 million de km<sup>2</sup>. Elles jouent un rôle déterminant pour le stockage du carbone et ont un impact sur le cycle mondial de l'eau. Cependant, il existe peu d'études relatives aux changements climatiques et à leur impact sur le bassin du Congo. Une des principales causes de cette situation est l'absence de données hydrologiques et climatiques d'observation, ce qui rend difficile l'évaluation du rendement des études de modélisation. Au regard de la vulnérabilité accrue des secteurs comme l'agriculture, la sécurité alimentaire, l'alimentation en eau et les écosystèmes, il importe de prendre en compte et, le cas échéant, d'ajuster les concepts de développement durable et de stratégies de développement. Malheureusement, les données relatives à la sous-région sont insuffisantes. Dès lors, il devient impératif de recueillir des données sous-régionales probantes, relatives aux changements climatiques et à leur impact sur les secteurs clés de l'économie et de l'écologie de l'Afrique centrale. Par ailleurs, les données à produire incluront d'éventuelles options d'adaptation, afin de juguler les effets des changements climatiques.

Depuis 2008, dans le cadre de l'Initiative internationale pour le climat (ICI), le ministère fédéral allemand de l'Environnement, de la Conservation de la nature et de la Sécurité nucléaire (BMU) subventionne des projets dans les domaines de la lutte contre les changements climatiques et de la protection de la biodiversité, dans les nouveaux pays industrialisés et dans les pays à économie en transition. L'ICI constitue un élément clé du dispositif de financement accéléré de l'Allemagne. En 2009, dans le cadre de l'ICI, le BMU a mandaté la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH pour la mise en œuvre du projet «Scénarios de changements climatiques dans le bassin du Congo». Le principal objectif du projet consistait à mettre à la disposition des décideurs nationaux et sous-régionaux des scénarios plausibles de changements climatiques pour l'ensemble de la région du Bassin du fleuve Congo. En effet, il s'agissait d'outiller ces décideurs, de manière à leur permettre i) d'adapter leurs stratégies de gestion des ressources naturelles (forêts, eau, agriculture) aux problématiques des changements climatiques; et ii) de renforcer la base scientifique dans leur propre intérêt, dans le contexte des négociations de l'après Kyoto.

Il s'agissait d'un projet conjoint de la GIZ, du Centre de service climatologique (Climate Service Centre, CSC) de Hambourg en Allemagne; et de l'Université et du Centre de recherche de Wageningen aux Pays-Bas (WUR), dont la mise en œuvre s'étendait entre fin 2010 et début 2013, pour un coût total de 1 530 000 €. La GIZ, principal organisme d'exécution, était chargée de sous-traiter le volet scientifique du projet à des instituts de recherche de renommée internationale, et d'établir des liens entre ces institutions et les pays de la sous-région. La GIZ a en outre facilité le transfert des résultats aux décideurs des pays membres de la Commission des forêts d'Afrique centrale (COMIFAC).

Le volet scientifique a été réalisé par le CSC et le WUR, et un flux de travail interdisciplinaire a été établi à cet effet. Il relie les changements climatiques prévus et leur impact sur l'hydrographie, les forêts et l'agriculture, ainsi que les menaces et les risques financiers directs et indirects, et fournit des conseils en matière de stratégies de gestion et de processus décisionnel. La figure 1 représente une esquisse du flux de travail.

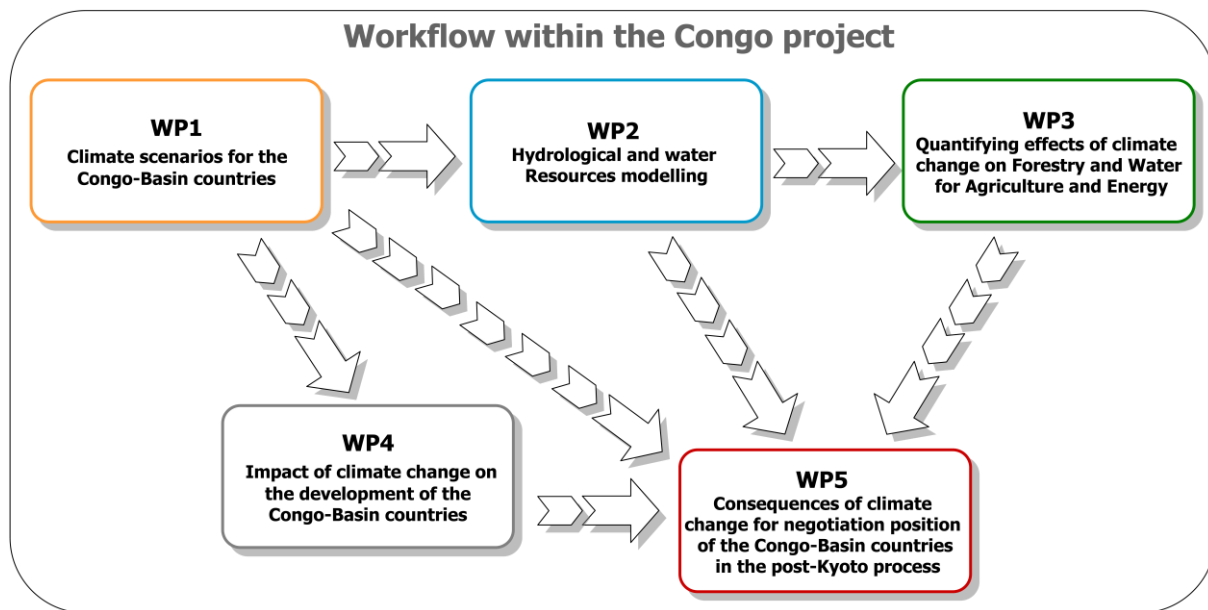


Figure 1: Flux de travail interdisciplinaire du projet «Scénarios des changements climatiques dans le bassin du Congo», par module de travail (MT) Le MT1 a été réalisé par le CSC; les autres modules (2-5) ont été réalisés par le WUR.

Le CSC était chargé de réaliser l'évaluation des changements climatiques au niveau régional. Dans un premier temps, les projections obtenues à partir des modèles climatiques mondiaux les plus récents (CIMP 3 et CIMP 5) ont été analysées. Par ailleurs, des projections récentes obtenues à partir des modèles climatiques mondiaux du projet CIMP5 ont été réduites à l'aide de modèles climatiques régionaux, afin d'élargir l'ensemble des données disponibles sur les projections indépendantes relatives aux changements climatiques. Par la suite, une série de données issues de 77 projections différentes, relatives à des modèles climatiques régionaux et mondiaux ont été exploitées aux fins d'une évaluation des changements climatiques à l'échelle régionale. Le WUR a utilisé six projections représentatives de ce vaste ensemble, afin d'effectuer d'autres simulations, en appliquant les résultats obtenus à deux modèles d'impacts climatiques, à savoir le modèle de gestion des terres Lund-Potsdam-Jena (modèle LPJml) et le modèle hydrologique à capacité d'infiltration variable (VIC). Ces simulations ont permis de mener des études relatives à l'impact des changements climatiques sur la disponibilité des ressources en eau dans la région, avec d'éventuelles incidences sur le potentiel hydroélectrique; l'utilisation de l'eau et la productivité dans le secteur agricole; et les stocks de carbone dans la végétation. Sur la base des résultats des modèles, des options appropriées d'adaptation et de gestion ont été développées dans le cadre du projet. Les principaux résultats sont résumés dans les paragraphes ci-dessous. Un résumé des données de base et des modèles utilisés dans les différents modules de travail est présenté dans la figure 2.

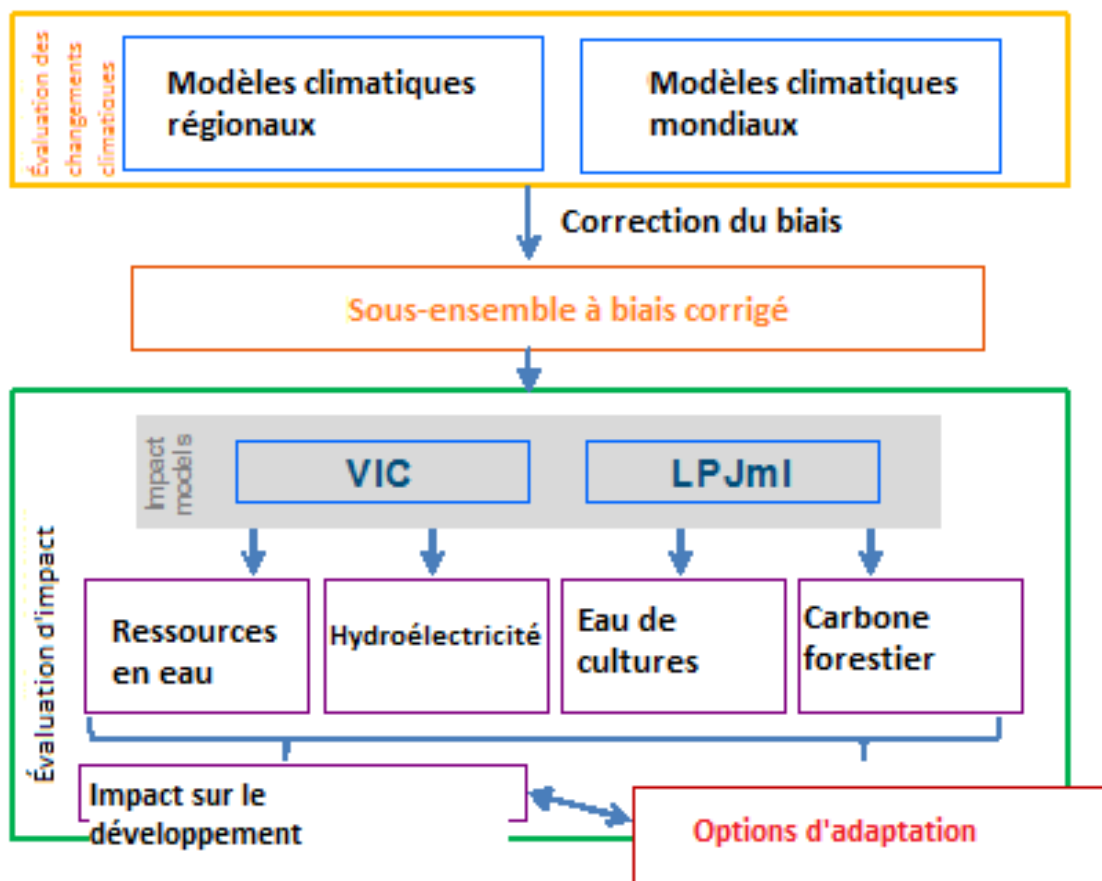


Figure 2 : Chaîne de modélisation du projet « Scénarios de changements climatiques dans le Bassin du Congo »

### Évaluation des changements climatiques à l'échelle régionale

L'évaluation des changements climatiques décrite dans le présent rapport est fondée sur un vaste ensemble unique de projections basées sur des modèles climatiques du projet CMIP3 (base de données du 4<sup>e</sup> rapport d'évaluation du GIEC) et du projet CMIP5 (base de données du 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation du GIEC, prévu pour 2013). Par ailleurs, les projections à biais corrigé et les projections statistiques à échelle réduite du projet EU-WATCH ont été incluses, ainsi que les projections de modèles climatiques régionaux. Certes, la majorité des projections climatiques régionales ont été réalisées dans le cadre de ce projet, néanmoins, l'analyse tient également compte de quelques simulations faites à partir de l'archive de données préliminaires du CODEX Africa.

S'agissant de l'analyse d'éventuels changements climatiques, deux développements futurs ont été pris en compte - un scénario d'émissions «pessimiste» (qui combine des projections climatiques obtenues à partir des scénarios d'émissions SRES A2 et RCP 8.5) et un scénario d'émissions «optimiste» (qui combine des projections climatiques obtenues sur la base des scénarios d'émissions SRES B1, RCP4.5 et RCP2.6). Au total, 46 projections différentes ont été analysées, en ce qui concerne le scénario optimiste, contre 31 projections, s'agissant du scénario pessimiste. Ce vaste ensemble unique de données basées sur différents modèles de projections (modèles climatiques mondiaux, projections climatiques régionales et projections à biais corrigé fondées sur des statistiques et projections mondiales à échelle réduite) permet de mettre en évidence, pour la première fois dans la région, des modèles fiables et les portées des changements prévus.

Les principales conclusions de la présente évaluation des changements climatiques pourraient être résumées ainsi qu'il suit. S'agissant de la température atmosphérique près de la surface, tous les modèles évalués indiquent un réchauffement significatif vers la fin du siècle, en toute saison, indépendamment du scénario de base. Il est à prévoir, vers la fin du 21<sup>e</sup> siècle, un réchauffement annuel oscillant entre +1,5°C et +3°C, pour le scénario optimiste, et entre +3,6°C et +6°C, pour le scénario pessimiste. Dans l'ensemble, les prévisions d'élévation de la température se situent légèrement en-deçà de la moyenne, au nord, et légèrement au-dessus de la moyenne, au centre de la

région. Par ailleurs, s'agissant des températures extrêmes (fréquence des journées et des nuits froides/chaudes), tous les modèles prévoient une baisse/élévation de la température. D'après les prévisions, il faut s'attendre à une recrudescence de journées et de nuits chaudes à l'avenir, notamment dans le cas du scénario pessimiste. Étant donné que, s'agissant des paramètres relatifs aux températures, les 77 projections analysées concordent sur les changements prévus, ceux-ci peuvent être considérés comme suffisamment fiables.

En ce qui concerne l'ensemble des précipitations, le niveau de convergence entre les projections évaluées est inférieur au niveau de convergence observé en matière de températures. Pour toutes les zones, certains modèles prévoient une augmentation du niveau des précipitations annuelles, tandis que d'autres prévoient une baisse. Si l'on considère l'ensemble des changements concernant le niveau de précipitations annuelles, on constate que, dans la plupart des zones pour lesquelles il est prévu une légère augmentation globale du niveau de précipitations annuelles, tous les modèles indiquent un changement inférieur ou égal à  $\pm 30\%$  vers la fin du 21<sup>e</sup> siècle. Cependant, dans la zone septentrionale sèche, il est prévu une plus grande augmentation du niveau annuel des précipitations (jusqu'à environ +75%, dans l'ensemble). Cette augmentation est due, pour l'essentiel, à une expansion, en direction du nord, de la zone tropicale de convection décrite dans les ouvrages scientifiques. Ces résultats ne tiennent pas compte du scénario d'émissions de base. Dans le cas où seule la portée probable est prise en compte, les prévisions de changements en matière de précipitations annuelles totales oscillent entre  $\sim -10$  et  $+10\%$  ( $-10\%$  et  $+30\%$  dans la partie septentrionale); et  $-5$  et  $10\%$  ( $-10$  et  $+15\%$  dans la partie septentrionale), s'agissant, respectivement, des scénarios pessimiste et optimiste. Se fondant sur la vaste gamme de projections de changements climatiques évalués, les résultats permettent, une fois de plus, de conclure qu'il est peu probable que des changements drastiques (s'agissant du niveau annuel des précipitations) se produisent à l'avenir, dans l'ensemble de la région du bassin du Congo.

Bien qu'il soit peu probable que des changements drastiques interviennent au niveau des précipitations annuelles, le régime des précipitations pourrait enregistrer d'importants changements. À titre d'illustration, il est à prévoir une augmentation de l'intensité de pluies abondantes (avec, dans la plupart des régions, une portée probable positive, allant jusqu'à  $\sim +30\%$ ). Par ailleurs, d'après les prévisions, la fréquence des périodes sèches pendant la saison des pluies connaîtra une augmentation considérable dans la plupart des régions du bassin, ce qui implique une distribution plus sporadique des précipitations, à l'avenir.

En résumé, l'évaluation des changements climatiques dans le Bassin du Congo a révélé qu'il est peu probable que les prévisions de changements en termes de précipitations entraînent une pénurie d'eau généralisée dans la région. En revanche l'évaluation a révélé une plus grande probabilité de la survenue de périodes de sécheresse prolongées et plus fréquentes. Ces résultats ne tiennent pas compte du scénario d'émissions de base. Quant aux projections de la température atmosphérique près de la surface, le réchauffement prévu se situe largement en dessous du scénario pessimiste, ce qui pourrait donc engendrer un plus grand impact sur l'environnement de la région.

#### **Études d'impact des changements climatiques à l'échelle régionale:**

Vu qu'il est impossible d'exploiter tous les 77 scénarios de changements climatiques, aux fins d'études d'impact, nous avons utilisé un sous-ensemble de scénarios de changements climatiques. La plupart des études sont fondées sur six différents scénarios mondiaux de changements climatiques. Cependant, pour certaines études, à l'instar de l'étude du cycle de carbone forestier, seuls deux scénarios mondiaux de changements climatiques ont été utilisés. Cette différence, au niveau du nombre de données d'entrée du MCG utilisées lors des différentes études, constitue une limite de l'étude et doit être prise en compte au moment de la comparaison des différentes études d'impact. Toutefois, les différences qu'on pourrait observer à l'avenir, dans la même étude, au niveau de l'impact des changements climatiques, entre scénarios pessimiste et optimiste, pourront être comparées de manière fiable.

Les changements prévus, en termes de précipitations et de températures, entraîneront des variations significatives de l'hydrographie du bassin du Congo. L'élévation des températures provoquera, probablement, une augmentation de l'évaporation. Toutefois, les changements prévus dans la région, en termes d'évapotranspiration, ne correspondent pas tout à fait aux différentes études. Cela est probablement dû au fait que différents modèles hydrologiques ont été utilisés et que différents scénarios climatiques ont été utilisés comme données d'entrées des modèles hydrologiques. Dans

l'ensemble, d'après les scénarios analysés, les précipitations ont enregistré une plus forte hausse, par rapport à l'évaporation. Le ruissellement des eaux a, par conséquent, connu une augmentation (jusqu'à 50%). On notera une hausse du ruissellement des eaux et du débit des cours d'eau, pendant la saison des pluies particulièrement. Par conséquent, il est à prévoir une augmentation considérable des risques d'inondations, sur toute l'étendue du bassin. On notera une augmentation des inondations, en particulier au centre et à l'ouest du bassin. S'il est clairement établi que le ruissellement des eaux et le débit des cours d'eau connaîtront une hausse pendant la saison des pluies, les scénarios de saison sèche, en revanche, présentent des résultats contradictoires. Certains scénarios indiquent une saison sèche plus rude, tandis que d'autres prévoient des débits élevés pendant la saison sèche. Les résultats des modèles démontrent, à suffisance, que, par rapport au climat actuel, la différence entre les saisons sèche et pluvieuse va s'accroître. En particulier, on observera une recrudescence et une intensification des précipitations extrêmes, ce qui correspond également aux prévisions d'intensification de précipitations abondantes.

En général, nos analyses prévoient qu'il y aura davantage de ressources en eau aux fins de la production de l'énergie hydroélectrique. Au total, les changements climatiques auront un impact positif sur le potentiel hydroélectrique. Cependant, la variabilité des précipitations connaîtra également une augmentation, ce qui entraînera, dans quelques années, une baisse significative de la production de l'hydroélectricité. Les pays doivent également s'assurer des sources d'énergie alternatives, en quantité suffisante, afin de pallier la baisse de la production de l'hydroélectricité pendant les périodes de sécheresse.

Les changements climatiques auront différents impacts sur les écosystèmes forestiers. Les plus fortes concentrations atmosphériques en CO<sub>2</sub> pourraient accélérer la croissance des forêts et le piégeage du carbone. Cependant, des températures élevées auront un impact négatif sur la croissance des forêts et entraîneront une réduction des quantités de carbone forestier. Contrairement aux projections climatiques concernant l'Amazonie, les présentes études d'impact montrent qu'il est peu probable que les changements climatiques entraînent un ralentissement de la croissance des forêts du Bassin du Congo. En revanche, on pourrait enregistrer une croissance modérée de la quantité de carbone des écosystèmes. En fonction de l'ampleur des changements climatiques, il pourrait y avoir des changements, en termes de couverture terrestre, dans les différents écosystèmes. D'après les analyses, le scénario le plus plausible prévoit une expansion modérée des forêts sempervirentes vers le nord et le sud, dans les savanes et les prairies. Les modèles d'études révèlent un niveau élevé d'incertitude. Ainsi, pour affiner les prévisions, il est nécessaire de collecter de nouvelles données (sur la biomasse au centre du bassin du Congo et sur la réaction des forêts aux changements climatiques et aux changements de concentration en CO<sub>2</sub>, par exemple).

En général, les conditions climatiques actuelles ne limitent pas la production agricole dans la région du bassin du Congo. Seules les contraintes hydriques, qui sévissent aux frontières du bassin, réduisent parfois la productivité agricole. La surabondance des précipitations et la forte humidité, qui caractérisent les climats tropicaux, entraînent un lessivage des nutriments et favorisent la moisissure, toutes choses qui limitent la production agricole. Les changements climatiques prévus auront donc un impact limité dans la région. Dans la majeure partie du bassin du Congo, le stress hydrique connaîtra une légère augmentation. Néanmoins, l'agriculture ne subira pas le contrecoup des pénuries d'eau structurelles. Seules les exploitations agricoles des savanes situées autour du bassin du Congo pourraient, à l'avenir, être confrontées à des pénuries d'eau. D'après l'étude, la recrudescence de périodes de sécheresse, dans les savanes du sud, aura un impact sur la production agricole et les contraintes hydriques.

Dans plusieurs pays de la COMIFAC, il existe une corrélation évidente entre le niveau des précipitations annuelles et la croissance du PIB. Contrairement aux années sèches, les années enregistrant des précipitations au-dessus de la moyenne se caractérisent par une tendance haussière des taux de croissance du PIB et du PIB agricole. L'impact de la variabilité du climat sur la croissance du PIB est plus prononcé au cours des années sèches. Les années enregistrant des précipitations en dessous de la moyenne se caractérisent parfois par une forte baisse du PIB et, en règle générale, plus est la sécheresse est rude, plus bas est le taux de croissance du PIB. Toutes les années enregistrant des précipitations au-dessus de la moyenne présentent des taux de croissance relativement similaires. La corrélation entre le niveau des précipitations et la croissance du PIB est plus forte dans les pays ayant un niveau de précipitations assez faible et qui sont sujets à davantage de variations. Dans la plupart des pays, le taux de croissance du PIB agricole dépend plus de la variabilité du climat que du taux de croissance du PIB. En République démocratique du Congo, par



exemple, l'on a enregistré un taux de croissance négatif au cours des années sèches, tandis que les années enregistrant des précipitations moyennes ou au-dessus de la moyenne sont caractérisées par une production économique en hausse. Au Tchad, la situation est plus dramatique, avec de fortes baisses de la productivité agricole au cours des années sèches et une croissance rapide, en particulier au cours des années enregistrant un niveau de précipitations proche de la moyenne.

D'après nos prévisions relatives à l'impact des changements climatiques sur le développement économique, les pays de la COMIFAC sont particulièrement vulnérables à une baisse du niveau des précipitations et à une augmentation considérable de la variabilité interannuelle des précipitations. Les résultats obtenus révèlent qu'à l'échelle continentale, il est probable que les changements climatiques aient un impact négatif sur le développement de l'Afrique. Toutefois, contrairement aux pays d'Afrique de l'Ouest, d'Afrique de l'Est et d'Afrique australe, les économies des pays d'Afrique centrale pourraient moins subir le contrecoup des changements climatiques. Néanmoins, certains scénarios de changements climatiques montrent une forte augmentation de la variabilité du climat, ce qui pourrait avoir un impact négatif sur le développement.

En conclusion, la région doit se préparer à faire face à une plus grande variabilité du climat et du régime hydrologique. Par ailleurs, la différence entre les saisons et les années pourra devenir plus marquée à l'avenir. La région doit, de ce fait, se préparer à faire face à des précipitations plus intenses et à plus d'inondations pendant la saison pluvieuse. De toute évidence, on assistera à une hausse des températures à l'avenir. Les mesures d'adaptation aux changements climatiques doivent donc mettre un accent sur la réduction de l'impact de l'accentuation de la variabilité des précipitations et de la hausse des températures.

#### **Options régionales d'adaptation aux changements climatiques:**

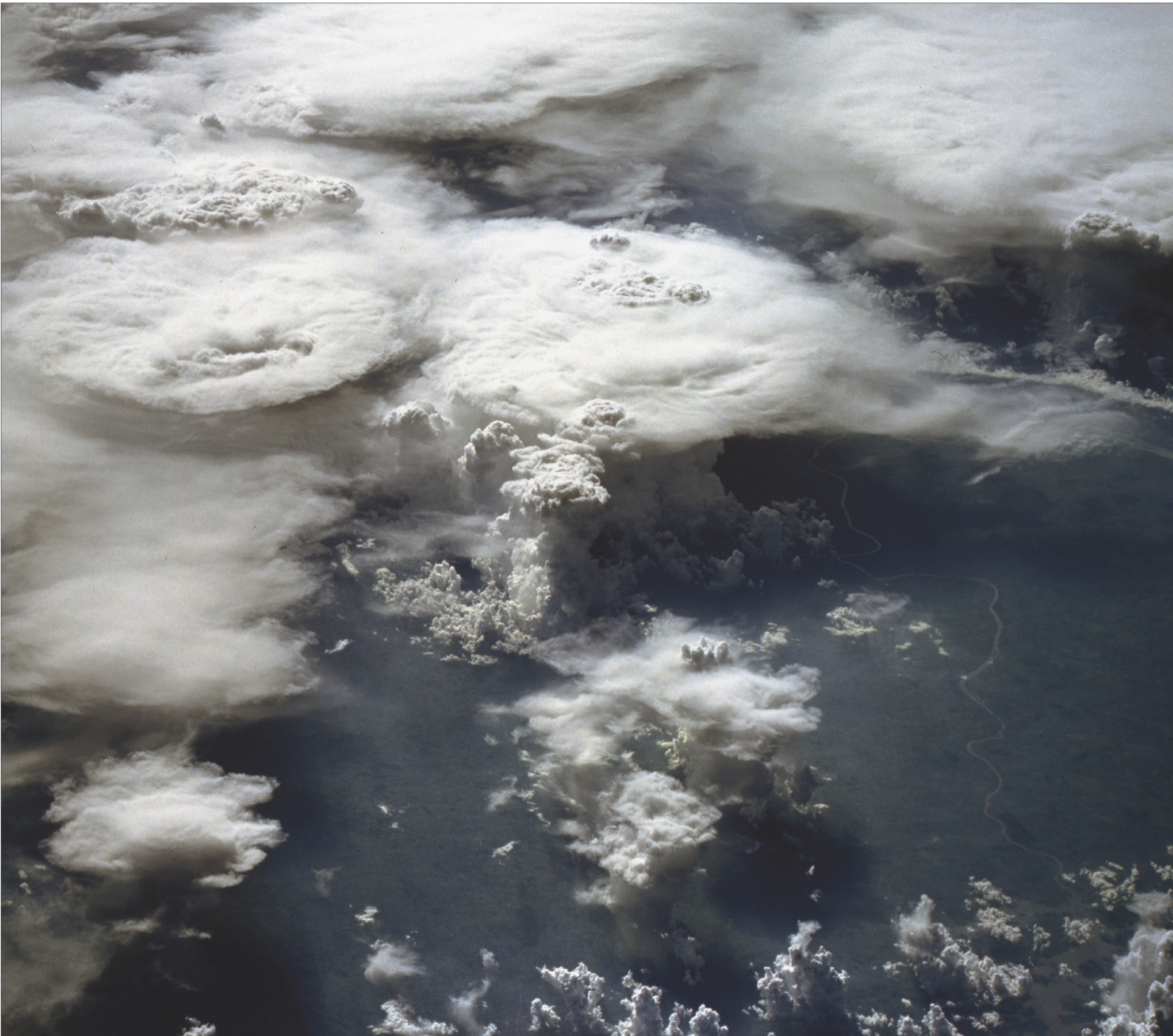
S'agissant des mesures d'adaptation, il faudrait, en premier lieu, améliorer le niveau de préparation à la survenue de phénomènes météorologiques extrêmes (sécheresses et inondations), car les changements climatiques entraîneront une recrudescence de tels phénomènes, à l'avenir. Par ailleurs, des efforts de diversification devraient être déployés dans les secteurs de l'agriculture et de l'énergie, en vue d'une répartition des risques. En effet, les agriculteurs doivent produire des cultures et variétés différentes, afin de réduire l'impact de la variabilité du climat. Les pays doivent éviter une dépendance absolue vis-à-vis de l'énergie hydroélectrique, ce qui les rendrait particulièrement vulnérables aux sécheresses. Ils doivent promouvoir d'autres sources d'énergie durables comme l'énergie solaire et les biocarburants. Afin de prévenir la dégradation des forêts et l'érosion, des efforts supplémentaires doivent être déployés dans les domaines du reboisement et de l'agroforesterie. Dans le cadre des programmes portant sur la sécurité de l'approvisionnement en eau et la sécurité alimentaire, des stratégies visant à gérer la variabilité du climat doivent être mises au point, afin de préparer les pays à faire face aux périodes de sécheresse et de précipitations. Les connaissances en matière de changements climatiques et d'adaptation auxdits changements demeurent largement insuffisantes et des efforts supplémentaires doivent être déployés en matière de renforcement des capacités et de sensibilisation.

La plupart des pays de la COMIFAC font encore face à d'énormes défis en matière de développement. Dans ces pays, les revenus sont généralement bas et le taux de pauvreté encore élevé. Ces besoins de développement sont de loin plus importants que l'adaptation aux changements climatiques. Cependant, le développement futur offre également des opportunités d'adaptation. Afin d'éviter de réaliser des investissements hasardeux et de réduire les coûts de l'adaptation, à l'avenir, les mesures d'adaptation doivent être intégrées aux futurs plans de développement. Une menace plus indirecte des changements climatiques dans les pays du Bassin du Congo proviendrait des pays voisins du nord et du sud, qui, d'après les prévisions, seront plus durement affectés par les changements climatiques. L'accentuation de la variabilité de la production agricole, pour cause de changements climatiques, pourrait amplifier les migrations de ressortissants de ces pays vers le bassin du Congo.

---

# Scénarios des changements climatiques dans le bassin du Congo

Évaluation des signaux des changements climatiques projetés pour l'Afrique centrale sur la base d'une multitude de projections climatiques régionales et globales





# Scénarios des changements climatiques dans le bassin du Congo

## Évaluation des signaux des changements climatiques projetés pour l'Afrique centrale sur la base d'une multitude de projections climatiques régionales et globales

Dr Andreas Hänsler, Dr Fahad Saeed et Prof. Dr Daniela Jacob  
Climate Service Center  
Fischertwiete 1  
D-20095, Hambourg, Allemagne  
Contact: andreas.haensler@hzg.de

Hambourg, Février 2013

**Pour le:**

Ministère fédéral de l'Environnement, de la Conservation de la nature et de la Sécurité nucléaire

**En collaboration avec:**

Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), Allemagne et l'Université de Wageningen, Pays-Bas

**Le présent rapport doit être cité comme suit:**

Haensler, A., Saeed, F. et Jacob, D. (2013): Assessment of projected climate change signals over central Africa based on a multitude of global and regional climate projections. In: Climate Change Scenarios for the Congo Basin. [Haensler A., Jacob D., Kabat P., Ludwig F. (eds.)]. Climate Service Centre Report No. 11, Hamburg, Germany, ISSN: 2192-4058.

---

« Évaluation des signaux des changements climatiques projetés pour l'Afrique centrale sur la base d'une multitude de projections climatiques régionales et globales »

Partie de la série: « Scénarios des changements climatiques dans le bassin du Congo »

Auteurs: Andreas Haensler, Fahad Saeed, Daniela Jacob

Mise en page et édition: Andreas Haensler

Date: Février 2013

Ministère fédéral allemand de l'Environnement, de la Conservation de la nature et de la Sûreté nucléaire (BMU) / Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), Allemagne / Université de Wageningen, Pays-Bas / Centre de service climatologique (CSC), Allemagne.

Photo de couverture: « Série de gros orages », par l'Observatoire terrestre de la NASA

---

## Résumé

Dans le cadre du projet «Scénarios des changements climatiques dans le bassin du Congo» (financé par le Ministère fédéral allemand de l'Environnement, de la Conservation de la nature et de la Sécurité nucléaire) une évaluation des changements climatiques à l'échelle régionale a été effectuée sur toute l'étendue de la région du bassin du Congo. L'étude était basée sur un ensemble multimodèle et multiscénario ultra moderne, utilisé pour des prévisions mondiales et régionales de changements climatiques. Plusieurs paramètres et indices de températures et de précipitations ont été utilisés pour évaluer les changements climatiques projetés pour les cas extrêmes et moyens. Une grande partie de l'ensemble analysé s'est révélée utile à la mesure des changements prévus, mais également à l'analyse de leur robustesse.

Les résultats contenus dans le rapport indiquent une robuste augmentation de la température moyenne dans l'ensemble du bassin du Congo, indépendamment du scénario d'émission de base. Outre les températures moyennes, des variations majeures des extrêmes de température sont également projetées. S'agissant des précipitations totales annuelles, l'ensemble étudié ne révèle aucun changement majeur dans la zone couverte par le projet, une fois de plus, indépendamment du scénario d'émissions de base. Cependant, il est à prévoir des variations des caractéristiques des précipitations. Les prévisions de variations, en termes d'intensité des fortes précipitations, indiquent une forte augmentation sur la majeure partie de la zone d'étude. De même, une recrudescence d'épisodes de sécheresse en saison pluvieuse est fort probable. Tous ces changements pourraient avoir un impact considérable sur les systèmes agricoles et hydro-énergétiques de la région, même si la disponibilité moyenne annuelle des ressources en eau reste constante. Les impacts potentiels des changements prévus et les stratégies possibles d'adaptation à ces changements sont présentés dans les études subséquentes du projet.

---

## Table des matières

<b>Résumé</b>	
<b>1. Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2. La circulation générale et le climat de la grande région du bassin du Congo</b>	<b>1</b>
2.1. Les caractéristiques de la circulation	1
2.2. Les caractéristiques des précipitations et de la température	3
<b>3. Introduction du concept d'analyse</b>	<b>5</b>
3.1. Les sous-régions	6
3.2. Les scénarios d'émissions	7
3.2.1. Le SRES – les scénarios d'émissions	7
3.2.2. Scénarios d'émissions RCP	8
3.3. Description des ensembles de projections climatiques évalués	9
3.3.1. Projections des modèles climatiques mondiaux	9
3.3.2. Projections des modèles climatiques mondiaux corrigés du biais	10
3.3.3. Projections des modèles climatiques régionaux	10
3.4. Paramètres et indices évalués	10
3.5. Analyse de la robustesse des changements projetés	12
<b>4. Évaluation des simulations d'ensemble multimodèles par rapport au climat observé</b>	<b>13</b>
4.1. Température moyenne annuelle et saisonnière et précipitations totales	13
4.2. Extrêmes et indices	16
<b>5. Analyse des changements projetés</b>	<b>19</b>
5.1. Changements projetés de la température moyenne et des précipitations totales, annuelles et saisonnières	19
5.2. Changements prévus dans les extrêmes de température et de précipitation	26
5.3. Changements prévus pour la saison des pluies	32
<b>6. Description des changements prévus dans le sous-ensemble des prévisions de changements climatiques utilisés pour les études d'évaluation du futur impact</b>	<b>35</b>
<b>7. Résumé et conclusion</b>	<b>41</b>
<b>Références bibliographiques</b>	<b>43</b>

---

## 1. Introduction

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) prévoit dans son quatrième Rapport d'évaluation (RE4) que les températures moyennes mondiales ont de fortes chances de connaître une augmentation comprise entre 1,1 et 6,4 °C (avec une meilleure estimation de 1,8 à 4 °C), supérieure aux niveaux de 1990, d'ici la fin du siècle actuel, associée à une probable augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes (inondations, sécheresses, températures extrêmes, etc.) Cependant, à l'échelle régionale, l'ampleur des signaux des changements climatiques et des phénomènes extrêmes associés peut être sensiblement différente par rapport à la moyenne mondiale. Ainsi, pour développer des stratégies d'adaptation et d'atténuation, des analyses détaillées de l'ampleur des changements climatiques et des phénomènes extrêmes associés sont nécessaires à l'échelle régionale. Le présent rapport contient une synthèse des projections des changements climatiques existants pour le grand bassin du Congo. Cette région a été classée dans le RE4 comme une région dont l'image est moins claire en termes des changements climatiques projetés, certains modèles prévoyant une augmentation des précipitations annuelles totales tandis que d'autres en prévoient une diminution (Christensen et al., 2007). En conséquence, des études complémentaires sur une base de données plus grande sont nécessaires pour identifier des modèles robustes de changements climatiques potentiels dans la région, en vue de constituer une base de données fiable sur laquelle les potentiels avantages et menaces résultant d'un éventuel changement climatique peuvent être identifiés pour la région.

Le bassin du Congo est principalement boisé. Les forêts de la région du Congo constituent le deuxième plus grand massif forestier du monde, couvrant une superficie d'environ 1,7 million de km<sup>2</sup>. En raison de leur immense potentiel de stockage du carbone ainsi que de leur impact sur le cycle global de l'eau à travers le recyclage local de l'eau, elles sont censées avoir un impact considérable sur le système climatique. Toutefois, jusqu'à présent, il existe un nombre limité d'études sur l'impact potentiel des changements climatiques dans la région du Congo. L'absence d'informations relatives aux changements climatiques futurs a en conséquence rendu la région plus vulnérable, et appelle donc à une étude plus approfondie et plus détaillée pour évaluer les potentiels futurs changements climatiques dans la région.

Dans le présent rapport, une évaluation unique des changements climatiques régionaux, basée sur un grand ensemble ultramoderne de projections climatiques mondiales et à échelle réduite est présentée. Cet ensemble de données regroupe plusieurs types de projections (des modèles climatiques globaux, des projections climatiques régionales et des projections mondiales statistiquement corrigées par biais) et permet pour la première fois d'identifier des tendances et des gammes robustes de changements prévus dans toute la région du grand bassin du Congo.

Le rapport est structuré comme suit: les principales caractéristiques du climat du bassin du Congo sont présentées dans la section 2. La section 3 décrit le concept d'analyse sous-jacent et les ensembles de données. La performance des bases de données sélectionnées en matière de simulation des caractéristiques climatiques des régions est évaluée dans la section 4. La section 5, quant à elle, résume les signaux des changements climatiques projetés de l'ensemble des simulations de modèles pour plusieurs paramètres dans la région du bassin du Congo. Dans la section 6, le sous-ensemble de projections de changements climatiques utilisées pour les études d'impact subséquentes du projet est analysé. Les principales conclusions du rapport sont enfin résumées dans la section 7.

## 2. La circulation générale et le climat de la grande région du bassin du Congo

### 2.1. Les caractéristiques de la circulation

Le climat du continent africain présente une configuration zonale en général, avec une distribution variable des précipitations saisonnières. Les régions du Nord et du Sud du continent africain sont sous l'influence des vents d'ouest aux latitudes moyennes durant l'hiver. Par conséquent, ces régions connaissent des conditions



humides et sèches pendant l'hiver et en été respectivement. Plus loin vers l'équateur se trouvent les déserts du Sahara et du Namib, dans les hémisphères nord et sud respectivement, qui sont dominés par des anticyclones subtropicaux tout au long de l'année. Ces zones arides sont séparées par une large ceinture de climat tropical et la région du grand bassin du Congo se trouve dans ces tropiques. Une esquisse des configurations générales des vents et de la pression sur l'Afrique est présentée dans la Figure 1(a, b) pour janvier et juillet/août. Une description plus détaillée des caractéristiques du climat et des circulations en Afrique peut être trouvée chez Nicholson (1996).

Le bassin du Congo a une circulation tropicale typique déterminée principalement par les courants méridiens des cellules de Hadley. Un schéma de la cellule de Hadley est illustré à la Figure 1(c). Dans une cellule type de Hadley, la principale force motrice de la circulation atmosphérique est le chauffage solaire provoquant un mouvement ascendant près de l'équateur, un mouvement vers le pôle dans la haute troposphère, un mouvement de plongée d'eau dans les régions subtropicales et un flux de retour vers l'équateur dans la basse troposphère. Le flux de retour vers l'équateur prend une direction nord-est-sud-ouest (sud-est-nord-ouest) dans l'hémisphère nord (sud) en raison de la force de Coriolis, et est donc appelé vents alizés venus de l'est. La région où les alizés du nord et du sud convergent est connue comme étant la *zone de convergence intertropicale* (ZCIT). En raison du chauffage solaire, la ZCIT est caractérisée par de faibles pressions de surface et des masses d'air généralement en augmentation. Par conséquent, cette région centrale est affectée par une forte nébulosité et des précipitations convectives.

Comme la circulation typique de la cellule de Hadley, la circulation de la haute troposphère est aussi influencée par le *Jet d'Est Tropical (JET)*. Le JET peut être identifié par une zone de puissants alizés du nord-est à environ 200 hPa, qui est la plus prononcée au cours de l'été boréal et se situe au cours de cette période autour de 15N. L'origine du TEJ peut être principalement liée à la présence de l'anticyclone tibétain qui est l'une des principales caractéristiques au cours de la saison de la mousson d'été en Asie du Sud (McGregor, 1998).

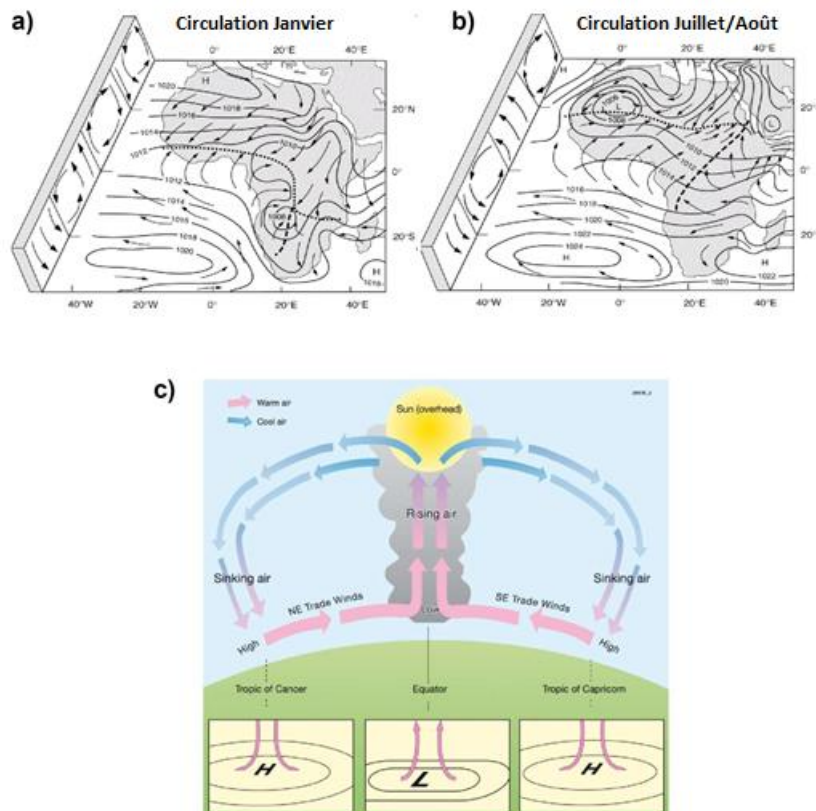


Figure 1 : Schéma des circulations générales près de la surface et des configurations des pressions sur l'Afrique pour (a) janvier (b) juillet /août de Nicholson (1996), dans lequel les lignes pointillées indiquent la ZCIT. (c) Schéma de la circulation atmosphérique dans les régions subtropicales et tropicales.

La circulation mi-troposphérique au-dessus de la région est en outre caractérisée par l'apparition des Jets d'Est Africain (JEA) à environ 600hPa des deux côtés des principales ceintures convectives de la ZCIT. Elles

sont censées être générées par les gradients thermiques se trouvant entre les régions semi-arides en zones subtropicales et les régions subhumides beaucoup plus vers le centre des tropiques (Nicholson et Griest, 2003).

Le système décrit ci-dessus, cependant, n'est pas une constante mais varie tout au long de l'année. La ZCIT oscille à travers l'équateur suivant le point zénithal du soleil. Partout dans la région du grand bassin du Congo, la ZCIT atteint sa plus grande étendue nord (sud) au cours de l'été boréal (austral). Le mouvement vers le nord et le sud de la ZCIT (et également les anticyclones subtropicaux) conduit à des régimes de précipitations généralement unimodales dans les parties nord et sud de la région du grand bassin du Congo, alors qu'un régime bimodal est présent dans les régions centrales. Cependant, l'évolution saisonnière des modèles de circulation n'est pas uniformément répartie autour de l'équateur, mais est influencée par les caractéristiques de la surface de la terre, les courants océaniques et la circulation atmosphérique à grande échelle.

Une conséquence des mouvements saisonniers des modèles de circulation est le développement d'une circulation semblable à de la mousson, généralement définie par l'apparition d'un système éolien inversé saisonnier au cours de l'année. Bien que la région d'Afrique centrale soit largement influencée par les alizés de l'est, le flux d'ouest transporte aussi des masses d'air humides vers cette région. Ces courants de l'ouest sont principalement provoqués par l'échauffement différentiel des surfaces terrestre et océanique pendant une période déterminée de l'année et conduisent en conséquence à un effet mousson (Leroux, 2001). Le vent de mousson venant de l'ouest peut atteindre à l'est jusqu'à environ 30 °E, où se trouve la chaîne de montagnes dans la partie orientale.

## **2.2 Les caractéristiques des précipitations et de la température**

En raison du chauffage solaire régulier sous les tropiques, la plupart des régions restent chaudes et en conséquence, la variation climatique saisonnière est principalement déterminée par les précipitations et la séquence des périodes pluvieuses et sans pluies. Une grande partie de la chaleur disponible est utilisée pour l'évapotranspiration, par conséquent, les masses d'air tropicales sont chargées d'humidité. La disponibilité de grandes quantités d'énergie et d'humidité est une condition préalable pour qu'il y ait des turbulences dans les basses couches de l'atmosphère. D'où, le fait que la région est généralement favorable à l'instabilité convective, formant en conséquence des nuages à grande extension verticale, provoquant des averses de tempête.

Malheureusement, la région du grand bassin du Congo dispose d'un nombre très limité de stations météorologiques pour la description quantitative des caractéristiques des précipitations climatologiques et des températures. Pour cette raison, seules quelques études traitant des pluies et des changements de précipitations dans cette région peuvent être trouvées dans la littérature antérieure. Par conséquent, la description suivante de la répartition des pluies est tirée de deux manuels traitant du climat général de la région de l'Afrique tropicale (Leroux, 2001; Bultot et Griffiths, 1972).

En général, les tropiques peuvent être divisés en zones tropicales humides (plus de 2 000 mm de précipitations par an), en zones tropicales intermédiaires (entre 1 000 et 2 000 mm de précipitations par an) et en zones tropicales sèches avec moins de 1 000 mm par an. Les précipitations sont généralement de nature convective. La région du grand bassin du Congo est principalement considérée comme une zone tropicale intermédiaire, avec des précipitations de l'ordre d'environ 1 000 à 1 750 mm par an. Des quantités de précipitations plus élevées sont observées dans les régions équatoriales au centre du bassin du Congo avec des précipitations atteignant 2.000 mm par an en moyenne, dont les zones côtières du Cameroun, où les quantités de précipitations les plus élevées de l'ensemble du continent africain sont enregistrées (par exemple plus de 11 000 mm par an sur les pentes du Mont Cameroun; Wanji et al., 2003 - voir Figure 2, en haut à droite). Cependant, des observations disponibles dans la région sont rares et également incertaines. Pour illustrer cela, nous avons inclus des taux annuels totaux de précipitations mesurés dans plusieurs stations dans l'analyse. Par rapport à l'ensemble de données maillées (données de forçage de WATCH) Voir données de forçage (DCE); Weedon et al., 2011) un grand écart est visible dans les quantités de précipitations observées le long des zones côtières de la région du grand bassin du Congo. Dans cette région, l'ensemble des données maillées montre des quantités de précipitations annuelles totales plus

élevées d'au moins 50% que les données de stations. Par conséquent, cette incertitude sur les observations disponibles doit également être gardée à l'esprit, lors de l'évaluation de la qualité des simulations de modèles décrits dans la section 4.

Comme mentionné précédemment, la répartition saisonnière de la pluviométrie dans le grand bassin du Congo est caractérisée par des régimes de précipitations soit unimodaux, soit bimodaux, causés par le mouvement nord/sud de la ZCIT dans le courant de l'année. Le régime unimodal se limite principalement aux parties nord du bassin et montre un maximum à la fin de la saison d'été boréal (juillet à août). Dans les parties nord-ouest, ce régime pluviométrique unimodal est souvent lié à la circulation de la mousson. En outre, les parties méridionales du bassin du Congo présentent un comportement unimodal de précipitations, en recevant toutefois le maximum de précipitations pendant l'hiver boréal (novembre à janvier). La majeure partie du bassin du Congo est caractérisée par un régime pluviométrique bimodal avec un plus faible pic de précipitations au printemps boréal (mars/avril) et le pic principal en octobre/novembre. Cependant, dans les régions présentant un régime bimodal, une nette différence dans les précipitations qui interviennent entre les deux principales saisons des pluies est visible. Dans les parties centrales, la grande saison sèche va de novembre à février, mais la situation dans les régions du sud est inversée, conduisant à une grande saison sèche en été boréal (voir Figure 2, lignes de fond).

Outre les études décrivant le lien général entre la formation de la pluie et le déplacement de la zone de convergence intertropicale et l'effet de la circulation de la mousson, il y a très peu d'études disponibles qui décrivent les systèmes synoptiques/à moyenne échelle responsables de la génération des pluies dans la région de l'Afrique centrale. La même chose vaut pour les processus qui régissent la variation interannuelle et interdécennale des précipitations dans la région. Nicholson et Grist (2003) ont constaté que les pluies sont plus intenses durant les saisons où les JEA se forment des deux côtés de l'équateur. Bien que le JEA du nord semble se former tout au long de l'année, son équivalent du sud ne se développe que dans la seconde moitié de l'année. En conséquence, les deux jets sont en place au cours de la saison des pluies allant de septembre à novembre, ce qui pourrait être la raison pour laquelle plus de pluies tombent au cours de cette saison. En mettant l'accent sur les variations des précipitations interannuelles, Balas et al., (2010) ont découvert que les températures de la surface des mers de l'Atlantique, du Pacifique et de l'océan Indien ont une influence sur les précipitations dans tout le bassin du Congo.

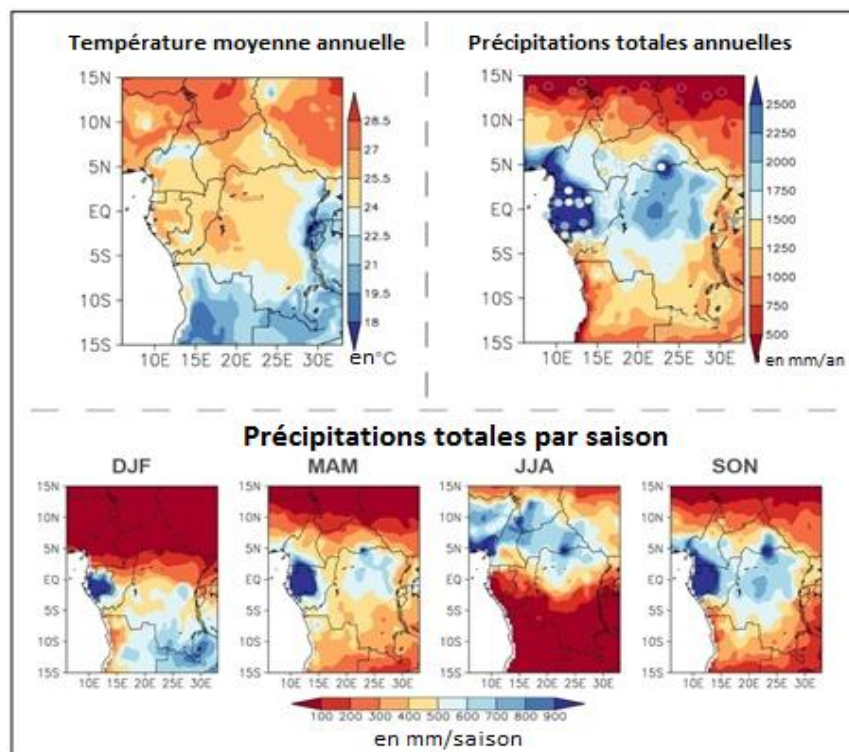


Figure 2 : Les cartes de la température moyenne annuelle observée et des précipitations annuelles totales observées (rangée du haut à partir de la gauche), ainsi que les précipitations saisonnières totales pour les quatre saisons météorologiques standard (rangée du bas) comme moyenne au cours de la période allant de 1961 à 1990. Les observations représentées sont tirées de l'ensemble de données de la DCE (Weedon et al., 2011), qui est, sur une base annuelle, semblable à l'ensemble de données du CRU mieux connu (New et al.

(2002)). Dans le chiffre des précipitations annuelles totales, des données de stations (tirées du Centre national de données climatologiques (NCDC) à la NOAA -- <http://www.ncdc.noaa.gov/land-based-station-data>) ont également été incluses sous forme de cercles, toutefois ce n'est pas l'ensemble de ces stations qui couvrent toute la période 1961-1990 (mais au moins pendant 15 ans dans cet intervalle).

Comme il a été mentionné précédemment, la rareté des mesures en stations est le principal obstacle à l'évaluation des changements passés intervenus dans les quantités et les configurations pluies. Les études disponibles semblent indiquer que, pour le bassin du Congo, aucun changement clair et régulier de configurations des précipitations au cours des dernières décennies n'a été observé. Nicholson et al. (2010) ont constaté une variabilité interdécennale, mais sans changements importants des précipitations à long terme. La même conclusion est contenue dans le 4<sup>ème</sup> Rapport d'évaluation du GIEC (GIEC-RE4; Trenberth et al., 2007). Bien que pour certaines régions une tendance significative en matière de précipitations ait été montrée (Aguilar et al., 2009), celle-ci ne peut, toutefois, être reportée sur l'ensemble du bassin du Congo, simplement en raison de l'absence de données issues des stations. Sur la base de l'ensemble de données CRU (New et al., 2002) une étude réalisée par Djomou et al. (2009) a constaté une diminution des précipitations dans la zone équatoriale de l'Afrique centrale depuis les années 1970. Toutefois, notre propre analyse de l'ensemble de données CRU faite en moyenne sur l'ensemble du bassin du Congo (voir Figure 6 dans la section 4.1.) n'a pas révélé un changement substantiel de la moyenne des quantités annuelles des précipitations dans le bassin au cours du siècle dernier.

Pour ce qui est de la température, la situation est plutôt simple. En général, la température sous les tropiques se définit un peu par une température moyenne annuelle chaude d'environ 24 à 25 °C (voir Figure 2, en haut à gauche) et seulement de petites amplitudes saisonnières de 2 à 4 °C au maximum. Au sein du bassin du Congo, cette amplitude annuelle de température est même aussi faible que 1 °C. La saisonnalité de la température dans toute la région du bassin du Congo suit un régime unimodal avec des températures maximales dans les premiers mois de l'année (janvier à mars) et des températures minimales autour de juillet à septembre. En ce qui concerne les changements de température à long terme observés dans la région, les quelques données de stations disponibles semblent indiquer un réchauffement statistiquement significatif dans la région (GIEC, 2007), avec une augmentation des chaleurs extrêmes (par exemple, la température des journées les plus chaudes a semblé augmenter d'environ 0,25 °C par décennie) et une diminution de la fréquence des vagues de froid (Aguilar et al., 2009). Toutefois, en raison de la rareté des données de stations disponibles, des déclarations solides ne peuvent être faites que pour une superficie limitée de la région.

### **3. Introduction du concept d'analyse**

Normalement, les informations obtenues à partir d'un modèle climatique sur les changements climatiques futurs ne sont présentées que comme des projections, sans aucune information sur la probabilité d'une telle projection (par exemple, Cubasch et al., 2001). Mais, quand il s'agit de l'élaboration de stratégies d'adaptation et d'atténuation, une estimation des risques de défaillance d'un mécanisme proposé est nécessaire et donc la probabilité des changements climatiques prévus doit être estimée. L'incertitude globale associée aux projections de modèles de changements climatiques futurs peut être attribuée à la contribution issue de trois sources différentes: i) de l'incertitude dans l'élaboration des futures émissions de gaz à effet de serre (GES) et d'autres facteurs anthropiques et naturels qui peuvent influencer sur le climat, ii) de l'incertitude résultant de la variabilité interne naturelle du climat et iii) de l'incertitude inhérent aux systèmes de modélisation en vue d'estimer la réponse du système climatique au forçage d'un gaz à effet de serre particulier. La contribution de ces trois différentes sources à l'incertitude globale du signal des changements climatiques prévus change avec l'horizon prévisionnel des projections (Hawkins et Sutton, 2009). La variabilité interne du climat est la principale source d'incertitude dans les projections avec un horizon prévisionnel futur (délai) de moins de 10 ans, bien que le scénario d'émissions sous-jacent et les systèmes de modélisation utilisés constituent la principale source d'incertitude dans les projections sur les changements climatiques à long terme (centenaire). Comme le présent rapport traite des changements prévus à long terme dans le système climatique, l'incertitude venant de la variabilité interne naturelle du climat peut être considérée comme étant moins importante. Par conséquent, en vue de faire face aux incertitudes résultant des émissions et du système de modèle, l'approche qui est normalement adoptée consiste à utiliser un ensemble à modèles multiples suffisamment grand et indépendant de différents

scénarios d'émissions de gaz à effet de serre pour fournir des gammes d'évolution future probable avec une certaine chance. Cette approche a également été adoptée dans la présente étude. Les scénarios d'émissions sous-jacents sont décrits dans la section 3.2. et l'ensemble à modèles multiples analysé est présenté dans la section 3.3.

### 3.1. Les sous-régions

Le centre d'intérêt régional de l'étude est la région d'Afrique centrale centrée sur le bassin du Congo (appelé généralement dans le présent rapport la région du grand bassin du Congo, voir Figure 3). Un domaine d'étude d'une superficie s'étendant de 15 °N et 15 °S et de 7 °E à 35 °E est défini. Toutefois, comme cela a déjà été mentionné dans la section 2, les caractéristiques climatiques dans ce domaine particulier montrent beaucoup de variations. Par exemple, la saison des pluies qui passe de la saison JJA dans les parties septentrionales à la saison DJF dans les parties méridionales, et d'un régime unimodal (Nord et Sud) à un régime bimodal dans le centre. En outre, les changements climatiques sont prédominants en gros, avec des conditions d'humidité dans le centre du domaine par rapport aux régions limitrophes du nord et du sud.

Tableau 1 : Détails des cinq sous-zones.

Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5
9.5 to 15.0 N 8.0 to 23.5 E	2.0 to 9.5 N (West) 5.0 to 9.5 N (East) 8.0 to 32.0 E (North) 8.0 to 18.5 E (South)	6.0 S to 5.0 N 18.5 to 32.0 E	9.0 S to 2.0 N (West) 9.0 S to 6.0 S (East) 8.0 to 18.5 E (North) 8.0 to 21.5 E (South)	14.0 to 6.0 S 21.5 to 32.0 E

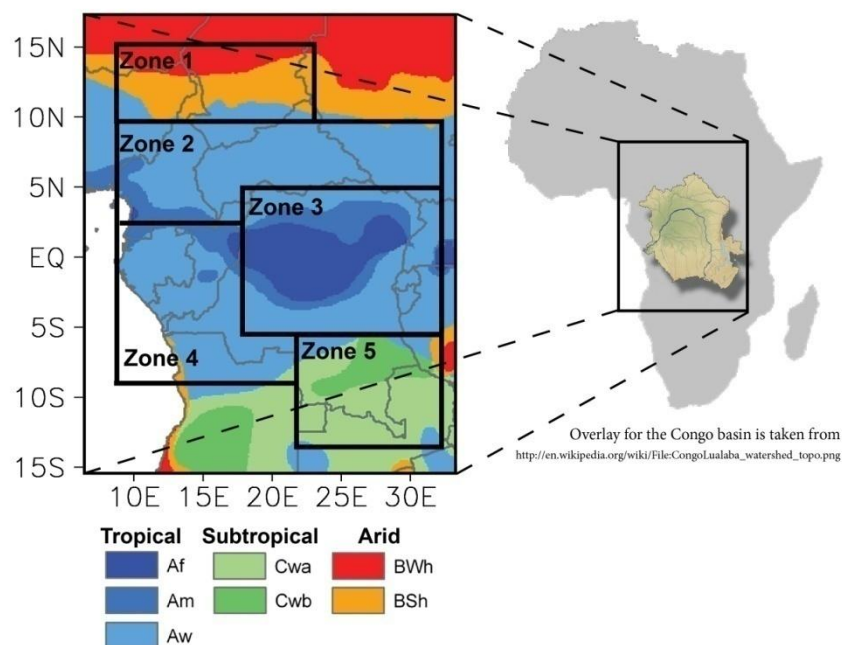


Figure 3 : La carte indique l'étendue spatiale de la région de l'étude, dénommée région du grand bassin du Congo. Les couleurs dans la carte de gauche mettent en évidence les différents climats qu'on trouve dans cette région -- allant des types de climat tropical au centre aux régions arides même le long des marges septentrionales. La classification est basée sur la classification climatique de Köppen-Geiger et la carte est tirée de Peel et al., 2007. Dans la carte également, l'étendue spatiale des 5 sous-zones est représentée (voir Tableau 1 pour plus de détails). L'étendue spatiale du bassin du Congo est représentée dans la carte de l'Afrique à droite.

Cette variabilité spatiale du climat peut être prise en compte en définissant cinq sous-zones sur lesquelles la majeure partie de l'analyse ultérieure présentée dans ce rapport a été menée. L'étendue spatiale de ces sous-zones est représentée dans la Figure 3, et les coordonnées données dans le Tableau 1. Ces zones représentent quelques zones climatiques simplifiées basées sur la classification climatique de Köppen Geiger (par exemple, Peel et al., 2007 - également incluse dans la Figure 3). Ils examinent en outre le mouvement nord-sud de la principale saison des pluies. La majeure partie nord de la Zone 1 représente la région du Sahel semi-aride (principalement classée comme désert (BWh) et steppe (BSh)). Les zones 2 et 4 peuvent être classées comme ayant essentiellement des climats tropicaux humides et secs (Aw) avec une

saison des pluies spéciale. La Zone 3 centrale s'étend autour des climats de forêt tropicale humide (AF) avec de grandes zones ayant une pluie de régime bimodal. Enfin, la Zone 5 représente les climats subtropicaux dans les parties méridionales de la région du grand bassin du Congo. Bien sûr, ces zones ne sont qu'une approximation sommaire des différents états du climat. Toutefois, comme certains des modèles climatiques globaux évalués (voir section 3.3) ont plutôt une grossière résolution horizontale d'un maximum de 500 km, ces zones très généralisées semblent être justifiées.

### **3.2. Les scénarios d'émissions**

Les scénarios socio-économiques et d'émissions fournissent des descriptions plausibles de la façon dont l'avenir peut évoluer par rapport à une gamme de variables, dont l'évolution socio-économique, les changements technologiques, l'énergie et l'utilisation des sols, et les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques (Van Vuuren et al. 2011). Ces futurs scénarios d'agents de forçage (par exemple, les gaz à effet de serre et les aérosols) sont introduits dans les modèles climatiques en tant qu'une donnée d'entrée et le résultat de ces modèles climatiques est en outre utilisé dans l'analyse des changements climatiques et par conséquent, dans l'évaluation d'impacts, de l'adaptation et de l'atténuation.

Plusieurs ensembles de scénarios, dont les scénarios IS92 (Legegett et al. 1992), les scénarios issus du Rapport spécial sur les scénarios d'émissions (SRES) (Nakicenovic et Swart, 2000) et, plus récemment, les trajectoires de concentrations représentatives (TCR) (Van Vuuren et al. 2011) sont utilisés dans les recherches sur le climat. Dans la section suivante, une brève description du SRES et des scénarios du RCP est présentée.

#### **3.2.1. Le SRES – les scénarios d'émissions**

Les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre décrits dans le Rapport Spécial sur les Scénarios d'Emissions du GIEC publié en 2000, ont été utilisés pour faire des projections d'éventuels changements futurs et par conséquent, on leur a donné le nom de scénarios SRES. Le troisième Rapport d'évaluation (RE3) et le quatrième rapport d'évaluation (RE4) du GIEC, publiés respectivement en 2001 et 2007, ont été basés sur ces scénarios SRES.

L'objectif fondamental des scénarios SRES était d'améliorer les scénarios IS92 antérieurs utilisés auparavant dans le deuxième rapport d'évaluation du GIEC en 1995. Les scénarios SRES couvrent un large éventail des principaux moteurs d'émissions futures, des développements démographiques aux développements technologiques et économiques. Les scénarios englobent différents développements futurs qui pourraient influencer sur les sources et les puits des gaz à effet de serre (GES). On dénombre au total 40 scénarios SRES dont chacun est associé à une famille particulière. Par conséquent, on peut penser que les familles de scénarios contiennent des scénarios individuels avec des thèmes communs. Ci-après figure une brève description de chaque famille.

**A1:** Cette famille de scénarios décrit un monde futur homogène avec une croissance économique rapide. Elle suppose que la population mondiale va culminer au milieu de ce siècle et décliner ensuite. D'autres grands thèmes sous-jacents sont les suivants: un monde convergent, le renforcement des capacités, une plus grande interaction culturelle et sociale et une réduction substantielle des différences régionales concernant le revenu par habitant. Il y a trois sous-ensembles de la famille A1 qui se distinguent par leur accent technologique: les sources d'énergies fossiles intensives(A1F1), les sources d'énergies non fossiles (A1T), ou un équilibre entre toutes les sources (A1B).

**A2:** Ces scénarios A2 sont ceux d'un monde plus hétérogène. Les principaux thèmes sous-jacents sont les suivants: des pays autonomes fonctionnant de manière indépendante; la croissance démographique continue et le développement économique tourné vers les régions avec la croissance économique par habitant et l'évolution technologique sont plus fragmentés et plus lents.

**B1:** Cette famille de scénarios décrit un monde futur semblable à celui de A1, mais avec des évolutions rapides des structures économiques vers une économie de services et d'informations, avec une réduction de l'intensité des matériaux et l'introduction de technologies propres et économes en ressources. L'accent est mis sur les solutions mondiales à la stabilité économique, sociale et environnementale.

**B2:** Cette famille de scénarios décrit un monde futur plus divisé, mais avec une approche plus écologique. Cette famille est caractérisée par une population en constante augmentation, mais à un rythme plus lent qu'en A2. D'autres grands thèmes sous-jacents sont: l'accent mis sur des solutions locales à la stabilité économique, sociale et environnementale; les niveaux intermédiaires de développement économique; un changement technologique moins rapide et plus fragmenté qu'en A1 et B1.

### 3.2.2. Scénarios d'émissions RCP

Les scénarios qui explorent explicitement les impacts des différentes **politiques climatiques** outre les scénarios de **politiques non climatiques** tels que le RSSE ont récemment suscité un intérêt croissant dans la communauté scientifique (Moss et coll. (2010)). Le besoin de nouveaux scénarios a poussé le GIEC à demander à la communauté scientifique de créer un nouvel ensemble de scénarios pour l'évaluation des futurs changements climatiques. De nouveaux scénarios contenant des trajectoires d'émission, de concentration et d'utilisation des terres appelées « Profils représentatifs d'évolution de concentration » ont été élaborés. Le mot « représentatif » est utilisé pour signifier que chaque RCP représente une large gamme de scénarios publiés dans la littérature. En effet, cet ensemble de RCP doit être compatible avec l'éventail complet des scénarios d'émission (avec ou sans politique climatique) disponible dans les textes scientifiques actuels. Le terme « profils de concentration » souligne que ces RCP ne sont pas des scénarios nouveaux, entièrement intégrés (c'est-à-dire qu'ils ne constituent pas un ensemble complet de projections socio-économiques, d'émissions et climatiques), mais sont plutôt des ensembles intrinsèquement cohérents de projections des composants du forçage radiatif qui sont utilisés pour l'entrée dans les modèles climatiques. Le mot « concentration » souligne également qu'au lieu des émissions, ce sont les concentrations qui sont utilisées comme produit principal des RCP, appelées entrée dans les modèles climatiques.

Tel que mentionné précédemment, le principal critère pour l'élaboration des RCP est qu'ils doivent se baser sur les scénarios publiés dans la littérature actuelle, mise au point indépendamment par différents groupes de modélisation, notamment les scénarios extrêmes, intermédiaires, de stabilisation et de référence. Une revue de la littérature révèle que les scénarios peuvent être trouvés jusqu'en 2100 avec un forçage radiatif aussi bas que  $2,5 \text{ W/m}^2$  pouvant osciller entre  $8$  et  $9 \text{ W/m}^2$  et plus. Par conséquent, il est nécessaire d'élaborer des scénarios RCP de sorte qu'ils ne couvrent pas seulement cette gamme, mais qu'ils incluent également les scénarios intermédiaires étant donné que la majorité des scénarios publiés dans la littérature conduisent à des niveaux de forçage intermédiaires. Quatre scénarios RCP ont été sélectionnés au cours du travail et ont été nommés selon le niveau cible du forçage radiatif pour 2100. Voici une brève description de chaque scénario :

**RCP2.6:** Ce scénario, aussi appelé RCP3PD, représente la trajectoire du forçage radiatif qui atteint un pic de  $3 \text{ W/m}^2$  avant 2100, suivi par un déclin (PD=Pic-Déclin). Le profil choisi descend à  $2,6 \text{ W/m}^2$  en 2100 (Van Vuuren et coll. 2007). Le rapport RE4 n'a identifié que 6 scénarios qui conduisent à des niveaux de forçage inférieurs à  $3 \text{ W/m}^2$ , cependant il existe déjà plus de 20 scénarios publiés qui conduisent à un niveau de forçage semblable à RCP2.6.

**RCP4.5:** Ce scénario décrit la stabilisation sans dépassement à  $4,5 \text{ W/m}^2$  et une stabilisation après 2100 (Clarke et coll. 2007). RCP4.5 correspond à la catégorie des scénarios du rapport RE4 qui contient la grande majorité des scénarios évalués, à savoir 118.

**RCP6 :** Ce scénario est également semblable au RCP4.5, avec une stabilisation sans dépassement à  $6 \text{ W/m}^2$  et une stabilisation après 2100 (Fujino et coll. 2006). Le nombre de scénarios d'atténuation conduisant à  $6 \text{ W/m}^2$  publiés dans la littérature est relativement bas, mais au même moment plusieurs scénarios de référence (Politique non climatique) correspondent à ce niveau de forçage.

**RCP8.5:** Ce scénario correspond au profil du forçage radiatif en pleine croissance conduisant à  $8.5 \text{ W/m}^2$  en 2100 (Riahi et coll. 2007). Ce scénario conduit à un niveau de forçage autour du 90<sup>e</sup> percentile des scénarios de référence, mais récemment 40 scénarios ayant un niveau de forçage semblable ont été identifiés (Van Vuuren et coll. 2011).

La Figure 4, modifiée après Van Vuuren et coll. (2011), présente la comparaison des émissions de  $\text{CO}_2$  entre différents scénarios RCP et RSSE. Le RCP 8.5 est représentatif d'une grande fourchette de scénarios de politiques non climatiques. Le niveau d'émission de RCP6 qui est autour de  $15\text{GtC}$  d'ici la fin du siècle est semblable à la plupart des scénarios de politiques non climatiques relevés un peu plus tôt dans la littérature. Le profil de forçage du scénario RCP4.5 contient la même série de numéros de politiques climatiques que les scénarios de référence d'émissions faibles, comme le scénario SRES B1. Le RCP2.6 représente le champ de scénarios les plus bas qui nécessite des politiques climatiques très rigoureuses pour limiter les émissions.

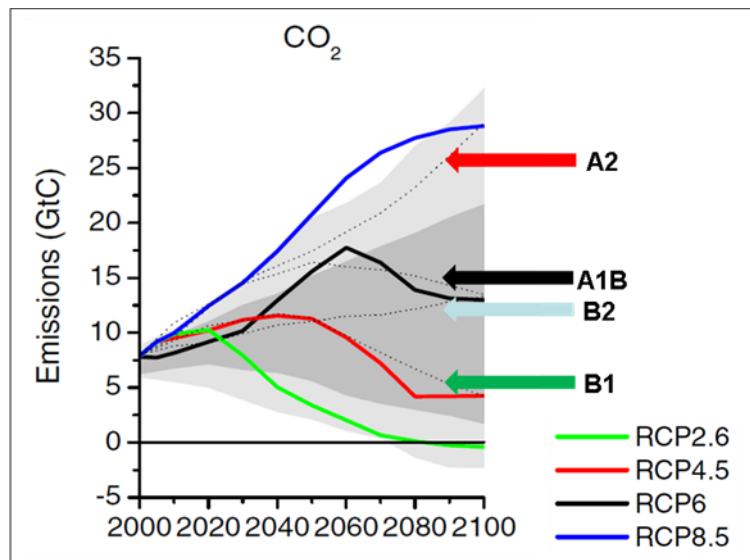


Figure 4 : Comparaison des émissions entre les scénarios d'émissions RCP et SRES – modifié après Van Vuuren et coll. (2011).

Dans l'évaluation décrite dans les parties suivantes de ce rapport, l'accent n'est mis que sur les changements projetés pour les scénarios d'émissions élevées et faibles. Pour parvenir à analyser conjointement les différentes générations des projections de changement climatique (par exemple, basés sur les scénarios d'émissions de RSSE et RCP), les différents scénarios d'émissions ont été regroupés. Ce regroupement a été fait sur la base des émissions projetées à la fin du siècle (voir Figure 4). Les projections du changement climatique selon le scénario d'émission A2 du RSSE et RCP 8.5 ont été regroupées en un ensemble de scénarios d'émissions « **élevées** ». Pour l'ensemble de scénarios d'émissions « **faibles** », les projections des scénarios d'émission B1 du RSSE et RCP2.6 et les scénarios d'émissions de RCP4.5 ont été regroupées. Les projections disponibles des scénarios A1B et B2 n'ont pas été prises en compte dans les analyses. Le nombre de projections disponibles pour chacun de ces deux ensembles de scénarios est indiqué dans le Tableau 2.

### 3.3. Description des ensembles de projections climatiques évalués

Les projections de changement climatique provenant des quatre différents ensembles de données ont été incluses et analysées dans cette étude. Les quatre différents ensembles de données sont appelés **GIEC-RE4**, **CMIP5**, **WATCH** et **MCR** et sont ci-dessous décrits.

#### 3.3.1. Projections des modèles climatiques mondiaux

**GIEC-RE4** : l'ensemble GIEC-RE4 renvoie aux projections des changements climatiques qui ont servi de base au GIEC-RE4. Cet ensemble est composé de simulations réalisées par de différents groupes de modélisation du climat à travers le monde dans le cadre du projet **CMIP3** (Phase 3 du Projet d'intercomparaison des modèles couplés). Les essais de CMIP3 sont principalement des améliorations des essais du modèle global dans lesquels les simulations sont majoritairement menées à l'aide des scénarios RSSE plus sophistiqués que les essais précédents de CMIP et aussi de Modèles de circulation générale (MCG) plus sophistiqués qui englobent plus de processus importants pour le système climatique. Dans les essais précédents de CMIP, une approche directe d'augmentation de CO<sub>2</sub> de 1 °C par an a été adoptée. Par conséquent, le résultat des essais de CMIP a fortement été considéré comme le meilleur groupe de données de modèles multiples disponibles pour les projections des changements climatiques futurs ayant existé dans le monde entier pour une multitude de différents scénarios d'émissions.

**CMIP5** : semblable à CMIP3, le CMIP5 est l'abréviation de la phase 5 du projet d'intercomparaison des modèles couplés. Les simulations de CMIP5 visent essentiellement à traiter la question scientifique soulevée par GIEC-RE4. Les résultats de ces projections de changements climatiques constitueront la base du 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation (RE5) dont la publication est prévue pour fin 2013. Comme mentionné sur le site web du Programme mondial de recherche sur le climat (PMRC) (<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>), le CMIP5 présente une norme établie de simulations de modèles climatiques afin :

- d'évaluer le degré de réalisme des modèles pour la simulation du passé récent,
- de fournir des projections des futurs changements climatiques sur des échelles à deux temps, le court terme (environ 2035) et le long terme (sur 2100 et au-delà), et
- de comprendre certains des facteurs responsables des différences entre les projections de modèles climatiques, notamment la quantification de certaines rétroactions majeures telles que celles associant les nuages et le cycle du carbone.



### 3.3.2. Projections des modèles climatiques mondiaux corrigés du biais

**WATCH :** les données du WATCH ont été préparées pour forcer la modélisation hydrologique globale dans le projet intégré Ressource en eau et changement global (WATCH, 2007-2011, Harding et al, 2011), financé dans le cadre du PFUE6. Le but de ce projet était de donner une estimation des futurs changements de la disponibilité en eau dans le monde. Les données utilisées dans le cadre de cette étude sont composées de projections de changements climatiques corrigés du biais (et ainsi avec une réduction d'échelle statistique) des trois MCG utilisés dans le projet CMIP3 (ECHAM5, CNRM et IPSL) et pour les deux scénarios d'émissions A2 et B1. Les détails sur les données du WATCH et la correction appliquée au biais sont disponibles dans Hagemann et coll. (2011) et Piani et al. (2010).

### 3.3.3. Projections des modèles climatiques régionaux

**MCR :** les projections de deux différents modèles climatiques régionaux ont été utilisées. Les modèles sont le modèle REMO (Jacob, 2001) et le modèle RCA4 (Samuelsson et al, 2011). À l'aide des deux modèles, les projections transitoires des changements climatiques régionaux ont été réalisées dans le domaine dénommé CORDEX-Afrique (voir Giorgi et coll. 2009 pour la description du domaine) à l'aide des résultats des projections de plusieurs MCG dans les différents scénarios d'émissions RCP. Les projections REMO ont été menées dans le cadre du projet « Scénarios des changements climatiques pour le bassin du Congo » ; les projections RCA4 ont été fournies par SMHI via l'archive préliminaire CORDEX-Afrique.

Dans le contexte de la présente étude, le groupe de données multimodèle du résultat de MCG CMIP5 et les projections MCR pourraient être considérés comme le groupe de données le plus récent disponible. Cependant, même les anciens groupes de données des MCG des archives GIEC-RE4 et le projet WATCH sont encore valides. Le Tableau 2 donne une présentation du nombre des projections évaluées par groupe de données et par groupe de scénarios d'émissions. Avec un nombre total de 77 différentes projections des changements climatiques, l'étude actuelle est l'une des plus complètes réalisées à ce jour.

Tableau 2 : Nombre de projections disponibles pour les différents groupes de données et les différents groupes de scénarios. Tel que décrit dans le texte, le regroupement des scénarios d'émissions « élevées » et « faibles » est motivé par les émissions projetées pour la fin du 21<sup>e</sup> siècle.

	IPCC-AR4	CMIP5	WATCH	RCM	TOUT
Scénario d'émission élevée	14	10	3	4	31
Scénario d'émission faible	16	20	3	7	46
Les deux scénarios	30	30	6	11	77

### 3.4. Paramètres et indices évalués

Dans ce rapport, les changements projetés de plusieurs paramètres et indices sont analysés. Les changements projetés sont en général considérés pendant deux périodes de 30 ans dans le futur, une à la moitié du 21<sup>ème</sup> siècle (de 2036 à 2065) et l'autre à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (de 2071 à 2100). Toutefois, pour le sous-ensemble des données du GIEC-RE4, les données quotidiennes des projections n'étaient disponibles que pour deux périodes de 20 ans (de 2046 à 2065) et (de 2081 à 2100). Tous les changements projetés dans le présent rapport sont toujours conformes à la même période de référence allant de 1961 à 1990.

Tableau 3 : Détails des paramètres et des indices analysés

Paramètres/indices	Formule courte (utilisé dans les champs)	Définition	Période	Unités (les valeurs dans les parenthèses sont celles des changements projetés)
Température moyenne	-	Température de l'air près de la surface	annuelle et saisonnière	°C (en °C)
Nombre de nuits froides	Nuits froides	Nombre de jours, avec la température minimale journalière de l'air près de la surface en dessous du 10 <sup>e</sup> percentile de la température minimale journalière de l'air près de la surface pour la période 1961 à 1990.	Annuelle et saisonnière	- (en %)
Nombres de jours froids	Jours froids	Nombre de jours, avec la température maximale journalière de l'air près de la surface en dessous du 10 <sup>e</sup> percentile de la température maximale journalière de l'air près de la surface pour la période 1961 à 1990.	annuelle et saisonnière	- (en %)
Nombres de nuits chaudes	Nuits chaudes	Nombre de jours, avec la température minimale journalière de l'air près de la surface au-dessus du 90 <sup>e</sup> percentile de la température minimale journalière de l'air près de la surface pour la période 1961 à 1990.	annuelle et saisonnière	- (en %)
Nombres de jours chauds	Jours chauds	Nombre de jours, avec la température maximale journalière de l'air près de la surface au-dessus du 90 <sup>e</sup> percentile de la température maximale journalière de l'air près de la surface pour la période 1961 à 1990.	annuelle et saisonnière	- (en %)
Total des précipitations	-	Total des précipitations à la surface	annuelle et saisonnière	mm/mois (en %)
Total des précipitations en saison de pluies	Par saison de pluie	Total des précipitations à la surface pendant la saison des pluies	par saison de pluies	mm/saison de pluies (en %)
Nombres de périodes sèches pendant la saison de pluies	N <sup>o</sup> périodes sèches pendant saison de pluies	Nombre de jours de la saison de pluies où le volume de pluies est inférieur à 1mm/jr pendant 6 jours consécutifs.	par saison de pluies	No (en %)
Durée de la saison des pluies	Durée saison de pluies	Durée de la saison de pluies. La définition de la saison de pluies est donnée par Liebmann et coll. 2012	par saison de pluies	Jours (en %)
Intensité des épisodes de fortes pluies	-	95 <sup>e</sup> du percentile du volume journalier des précipitations, mais, seuls les jours humides (jours où le volume de précipitations est au moins à 1mm/jour) sont pris en compte	annuelle et saisonnière	mm/jour (en %)
Fréquence des épisodes de fortes pluies	-	Nombre de jours où le volume journalier des précipitations est au-dessus du 95 <sup>e</sup> percentile du volume journalier des précipitations pour la période 1961 à 1990. Définie comme la fraction de tous les jours dans la période de temps respective	annuelle et saisonnière	% (in %)
Somme du Maximum de 10 jours de précipitations	Max.	Précipitations maximales se produisant en 10 jours consécutifs	annuel	Mm/10 jours (en %)

L'ensemble des paramètres et indices analysés est composé de quelques paramètres de base tels que le changement de la température moyenne annuelle et saisonnière et les quantités de précipitations totales annuelles et saisonnières pour les saisons météorologiques standards ((DJF – décembre à février ; MAM – mars à mai ; JJA – juin à août ; SON – septembre à novembre). Outre ces paramètres de base, certains indices décrivant des changements extrêmes ont été inclus dans l'analyse. Pour la température, les changements de l'occurrence des jours et des nuits froides et chaudes ont été étudiés. Pour les précipitations, les changements de l'intensité et de la fréquence des épisodes de précipitations extrêmes ont été analysés. Un épisode de précipitation extrême est défini comme le 95<sup>e</sup> percentile des quantités de

précipitations quotidiennes des journées de pluie (plus de 1 mm de précipitation par jour). Un autre paramètre extrême examiné dans ce rapport est la quantité totale de précipitations pour 10 jours maximum. Étant donné que les différentes parties de la vaste région du bassin du Congo sont caractérisées par des saisons pluvieuses se produisant à des périodes différentes de l'année, des indices décrivant les caractéristiques des saisons de pluies ont également été analysés. Pour déterminer une saison des pluies pour chaque maille des simulations des modèles évalués (de même que dans le groupe de données d'observation de la DCE utilisée pour l'évaluation de la performance du modèle), une date fixe de début et de fin de la saison des pluies ne peut pas être utilisée, mais une méthode qui évalue la saison des pluies en fonction des caractéristiques pluviométriques spécifiques doit être définie. Pour cette analyse, nous avons utilisé la méthode récemment publiée par Liebmann et coll. (2012) qui définit la date de début et de fin de la saison des pluies en fonction de la position des minima (début) et des maxima (fin) absolus de l'écart cumulé (additionné) des quantités de pluies journalières par rapport à la moyenne à long terme. Une fois les dates de début et de fin de la saison des pluies définies pour le contrôle et les périodes futures, les changements projetés de la durée moyenne de la saison des pluies, ainsi que des quantités totales de précipitations en saison pluvieuse peuvent être analysés. Enfin, les changements projetés de la fréquence des périodes de sécheresse au cours de la saison des pluies (périodes ayant au moins six jours consécutifs avec des quantités de pluie inférieures à 1mm/jour) sont décrits. Un résumé de tous les paramètres analysés et une brève définition sont fournis dans le tableau 3.

### **3.5. Analyse de la robustesse des changements projetés**

L'un des buts principaux de ce rapport est non seulement de décrire les signaux des changements climatiques projetés sur la plus grande région du bassin du Congo, mais aussi d'évaluer la robustesse de ces signaux. À cet effet, deux mesures appliquées par le GIEC-RE4 pour l'identification des changements robustes sont utilisées dans cette étude. La première mesure est le point de convergence des différentes projections des modèles dans le sens du changement. Un signal de changement climatique projeté est considéré comme robuste si au moins 66 % des modèles concordent quant au sens du changement (GIEC, 2007). La seconde mesure prend en compte l'éventail de potentiels changements futurs dérivés des différentes projections modélisées. Ce choix est motivé par le fait qu'un signal de changement climatique peut être considéré comme robuste, même si moins de 66 % des projections modélisées concordent quant au sens du changement. Ce phénomène peut être compris à partir de l'exemple suivant. Supposons qu'il y ait un scénario dans lequel 50 % des modèles présentent une augmentation de 5 % et les 50 % restants présentent une diminution de 5 % des futures précipitations. Certes, la première condition de robustesse (concordance de 66 % des modèles) ne satisfait pas, cependant, cette petite plage (10 % dans cet exemple) est tout à fait convaincante pour laisser croire que le signal qui ne marque aucune variation des précipitations est très robuste. De même, envisageons un autre cas où 50 % des modèles présentent une augmentation de 100 % et les 50 % restants des modèles présentent une diminution de 100 % des précipitations à venir. Cette plage (200 % dans cet exemple) n'est certainement pas estimée suffisante pour être considérée comme le signal robuste d'aucun changement. Par conséquent, on suppose en général que plus la plage globale des changements futurs projetés est petite, plus robuste est l'information sur les futurs changements climatiques. Néanmoins, dans ce rapport aucun seuil fixe n'est attribué à la plage devant être classée comme robuste. Au contraire, les fourchettes projetées et la robustesse associée sont quantifiées relativement aux valeurs absolues de chaque paramètre.

La deuxième hypothèse de robustesse devient surtout importante dans les régions où les projections des changements climatiques des paramètres évalués sont censées n'avoir qu'une faible ampleur. Sur la base des conclusions du GIEC-RE4, cette hypothèse s'applique aux changements prévus du régime des précipitations dans de nombreuses zones de la grande région du bassin du Congo.

L'intégration de la gamme complète des changements projetés de l'ensemble du modèle analysé permettrait certainement à quelques modèles atypiques d'avoir une incidence considérable sur l'évaluation de la robustesse. Par conséquent, une plage inférieure qui s'étend autour de l'indice central de 66 % des changements projetés par les modèles a été introduite dans l'analyse. Elle est nommée la plage « probable » des changements projetés. Selon le GIEC (Mastrandrea et al, 2010), un changement peut être dénommé « probable » si au moins 66 % de tous les changements projetés se trouvent dans cette zone. Comme il est axé sur la médiane (du 17<sup>e</sup> au 83<sup>e</sup> percentile), il n'exclut pas les cas particuliers potentiels.

Il ne fait aucun doute que la définition d'une telle plage inférieure n'est valable que si l'ensemble analysé est composé d'un nombre suffisant de projections des modèles indépendants. Pour la présente étude, vu qu'un groupe de données très large combinant les projections des MCG et des MCR est analysé, on peut supposer que la contrainte est donnée. Cependant, elle doit noter que les modèles ne sont pas totalement indépendants, mais qu'ils ont certains traits communs (voir Masson et Knutti 2011). De même, les projections MCR sont souvent considérées comme directement dépendantes du forçage MCG. Cependant, cette dépendance peut être considérée comme étant plutôt faible dans la grande région du bassin du

Congo, car elle est située au centre du domaine CORDEX (et donc loin des champs de forçage au niveau des frontières) et peut également être considérée comme une région où les processus locaux (ex., recyclage de l'humidité ; Koster et coll, 2004) jouent un rôle important.

L'utilisation d'un ensemble aussi diversifié et large réduit l'effet des dépendances entre les modèles. Il faut également mentionner que, jusqu'ici, il n'existe pas un ensemble de modèles parfaits ayant un grand nombre de projections des changements climatiques complètement indépendantes.

## **4. Évaluation des simulations d'ensemble multimodèles par rapport au climat observé**

### **4.1. Température moyenne annuelle et saisonnière et précipitations totales**

Nous commençons notre analyse par l'évaluation de la capacité des modèles à simuler le climat passé. Même si nous ne disposons et n'avons inclus que les données de quelques stations dans les groupes de données d'observation disponibles (CRU, New et coll. (2002)), elles représentent encore la meilleure source de données de superficie pour la température et les précipitations disponibles dans la région du bassin du Grand Congo. Néanmoins, comme une comparaison des données des stations le révèle, il reste encore une grande incertitude en ce qui concerne le groupe de données d'observation (voir La Figure 2, colonne droite en haut). Tels que susmentionnée, la région peut être subdivisée en plusieurs zones, en fonction de la répartition des pluies dans la région du bassin du Grand Congo (voir la Figure 3). Par conséquent, pour chacune des zones, les performances des modèles à simuler la température et des précipitations moyennes annuelles et saisonnières sont évaluées. L'évaluation de ces paramètres est résumée dans La Figure 5, avec une température moyenne observée et simulée dans la colonne gauche et les précipitations totales simulées et observées dans la colonne droite. Les valeurs observées sont indiquées par la ligne horizontale magenta. Les barres représentent la gamme complète des valeurs simulées séparées pour les différents modèles (barre rouge - GIEC-RE4 global ; barre orange - CMIP5 global ; barre verte - données à échelle réduite WATCH et barre bleue - données à échelle réduite MCR) et tous les modèles combinés (barre grise). Dans le cas de tous les modèles confondus, la plage qui couvre environ 66 % de l'ensemble des simulations modélisées (centrée sur la médiane) est également mise en évidence par la sous-partie colorée et plus foncée des barres grises. La définition de cette plage inférieure est motivée par le concept de l'analyse des changements robustes (présentés dans la partie 3.5) qui utilise la même gamme (alors dénommée la plage probable) pour déterminer une concordance entre les modèles. Enfin, pour les quatre ensembles analysés, la médiane de chaque ensemble est incluse dans les chiffres par une ligne noire.

Dans le cas de la température (colonne gauche de la Figure 5), la variation intra-annuelle est plutôt faible. Un cycle saisonnier clair n'est observé que pour les zones 1 et 5, alors que pour la zone 3, il n'y a que très peu de variations visibles. En général, les simulations sont en mesure de représenter le comportement saisonnier de la température observée, mais une plage importante est visible, surtout pour les groupes de données globaux (jusqu'à 7,5 °C du groupe de données du GIEC-RE4 sur la température simulée moyenne annuelle pour la zone 1). Les simulations du projet WATCH (3 MCG) représentent des températures parfaitement observées, mais cela est prévu, vu qu'elles ont été corrigées du biais à l'aide de l'ensemble de données d'observation de DCE (qui a des valeurs identiques à celles du groupe de données de l'URC sur une base mensuelle - voir la section 3.3.2). Si les simulations de tous les groupes sont considérées de manière combinée (barres grises), les valeurs observées sont toujours dans la plage gris foncé, qui est définie par les 66 % médians toutes les simulations. Comme cette plage est toujours sensiblement plus petite que la plage complète des simulations, on peut déduire que la plupart des modèles ont la capacité de représenter adéquatement le comportement saisonnier de la température observée dans la région. Toutefois, la majorité des modèles ont tendance à sous-estimer la température observée, puisque la médiane de toutes les températures simulées est essentiellement inférieure à la température observée.

Dans le cas des précipitations (colonne droite de la Figure 5), on observe une variation intra-annuelle plus large. Pour la Zone 1 et Zone 5, on observe un régime unimodal clair des précipitations pour la saison de JJA et DJF. Plus près de l'équateur (zone 4 et 2) le régime des précipitations demeure plus ou moins unimodal, mais il s'étend au fil des saisons et n'a qu'une seule saison sèche évidente (DJF dans la zone 2 et JJA dans la zone 4). Dans la partie centrale de la grande région du Congo (Zone 3), on observe plutôt un régime pluviométrique bimodal avec des précipitations très supérieures à la moyenne dans la saison de MAM et SON et sans saison sèche claire. Pour toutes les zones, les variations saisonnières observées sont plutôt bien captées par les simulations, mais pour les précipitations, une plage importante est également visible dans tous les groupes de données avec des valeurs plus grandes dans les deux groupes de données globaux. En outre, dans le cas de précipitations observées, la pluviométrie est toujours (en dehors de la saison JJA dans la zone 4) dans la plage de couleur gris foncé définie par le taux médian de 66 % de toutes les simulations. Et tout comme pour la température, cette plage est nettement inférieure à la plage complète des simulations, ce qui indique à nouveau que les modèles ont une grande capacité de simulation des précipitations totales. Compte tenu de la simulation des précipitations totales annuelles, ces modèles représentent encore bien les valeurs observées. Le fait que la plage inférieure aux 66 % centraux de toutes

les simulations modélisées est toujours nettement inférieure à la plage complète conduit à la conclusion que les grandes plages visibles des ensembles globaux (GIEC-RE4 et CMIP5) sont principalement causées par quelques modèles atypiques. Étant donné que tous les modèles reflètent bien les cycles saisonniers (par ex. : saisons extrêmement sèches dans les zones 1 et 5) et qu'elles tiennent également compte de la grande incertitude des ensembles de données d'observation, il n'y a aucune raison d'exclure ce petit nombre de modèles atypiques de l'analyse.

En ce qui concerne les performances individuelles des différents ensembles, aucune conclusion générale ne peut être tirée. Mais, on peut noter que les plages sont beaucoup plus basses dans les ensembles WATCH et MCR : mais cela peut aussi avoir trait au faible taux de simulations dans ces ensembles (voir le tableau 2). Une meilleure performance de l'ensemble WATCH n'est pas surprenante, car il a été corrigé du biais en fonction de l'ensemble des données d'observation incluses dans les chiffres. Pour le cas de l'ensemble des MRC, on peut noter qu'il est généralement situé au centre de toutes les simulations (excepté dans les simulations des précipitations pour les zones 3 et 4, où il est à l'extrémité inférieure et supérieure de la plage complète de toutes simulations) et assez proche du groupe de données observé. Cependant, une conclusion générale selon laquelle l'application des MCR permettrait d'améliorer les simulations ne peut pas être tirée sur la base de cette analyse, vu que le forçage des MCG n'est pas explicitement mis en évidence dans l'ensemble CMIP5.

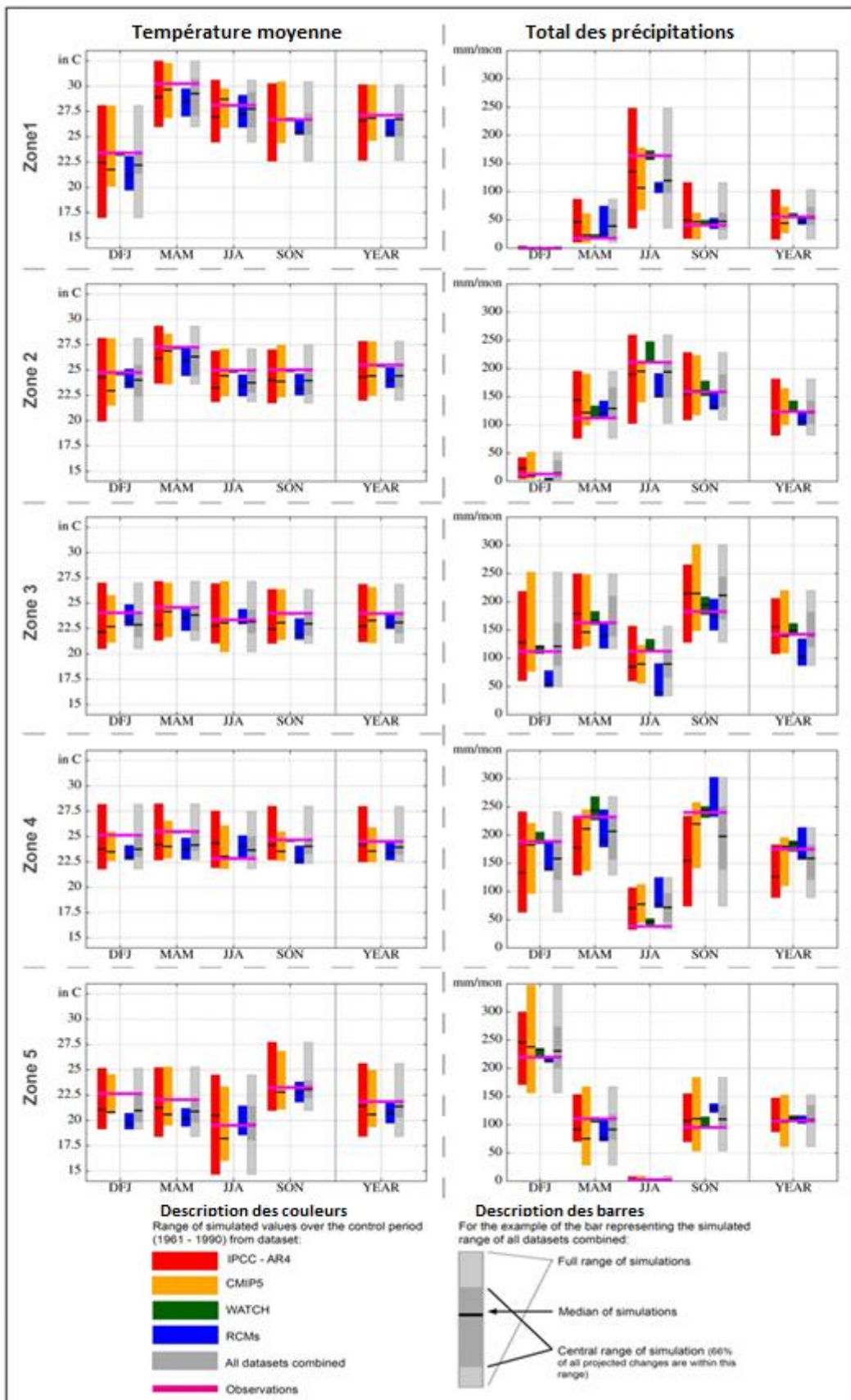


Figure 5 : Cycle annuel moyen de la température (à gauche) et des précipitations (à droite) pour les cinq différentes sous-régions de la région du bassin du Grand Congo (tel que défini dans la Figure 2) pour la période allant de 1961 à 1990. La ligne horizontale magenta représente les valeurs observées (CRU). Les barres colorées définissent les plages simulées des quatre différents ensembles inclus dans l'analyse. Les lignes noires représentent la médiane de chaque ensemble. La barre grise représente la plage de tous les groupes de données regroupés. En outre, la plage inférieure définie par les 66 % centraux de toutes les simulations (zone gris foncé) a également été incluse.

Afin d'évaluer si les tendances à long terme observées pour la température moyenne annuelle et les précipitations sont assez représentées dans les simulations, une période de temps plus longue a été évaluée. La Figure 6 présente l'évolution observée et simulée à long terme (uniquement le sous-ensemble de GIEC-RE4, car il était le seul disponible pour tout le 20<sup>e</sup> siècle) de la température (tableau supérieur) et des précipitations (tableau inférieur) moyennes annuelles à la fois moyennées dans l'espace sur l'étendue du bassin du Congo (voir La Figure 3 pour l'étendue spatiale). Comme nous l'avons déjà évoqué dans la section 2, les variations interannuelles de la température et des précipitations sont plutôt faibles dans les régions tropicales (voir également les observations de l'URC dans les Figures 2 et 6). Pour les températures, une légère hausse, commençant au début des années 1980, peut être identifiée dans les observations, tandis que pour les précipitations, aucune tendance ne semble être présente. Les modèles ont généralement tendance à surestimer légèrement l'augmentation observée de la température (tendance) pendant le siècle dernier sur le bassin du Congo ; celle-ci peut être vue dans la courbe multimodèle de température moyenne. Pour les précipitations tous les modèles concordent sur une évolution de précipitations assez constante au cours du siècle dernier.

Pour toute la période, un important écart est visible dans les simulations de MCG pour les deux quantités. Cependant, même comme les modèles ayant un plus grand écart par rapport à la moyenne affichent un comportement raisonnable à long terme et une variabilité interannuelle, il n'y a toujours pas de raison d'exclure ces modèles d'une analyse ultérieure. On doit toutefois garder à l'esprit que l'ampleur des changements projetés dans le futur dépendra sans doute du groupe de données sélectionné, et pourrait changer si un seul sous-ensemble des données disponibles est évalué (voir section 6).

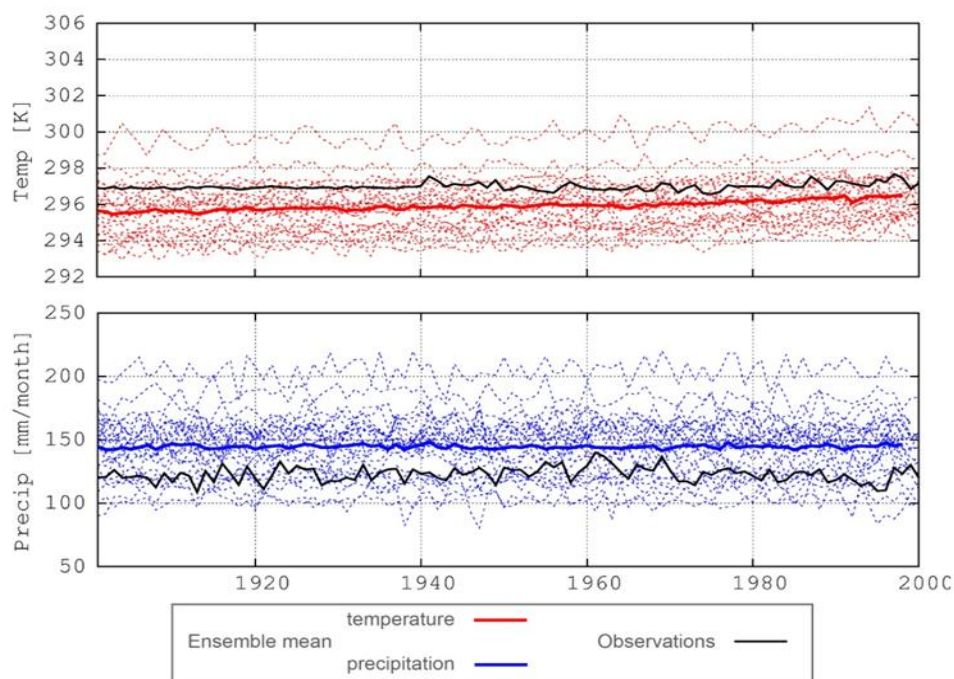


Figure 6 : Évolution à long terme des températures et des précipitations moyennes annuelles simulées et observées pour la période allant de 1901 à 2000 moyennée dans l'espace pour le bassin du Congo (voir la Figure 3 pour l'étendue spatiale). La ligne noire représente les valeurs observées (URC). Les lignes rouges et bleues représentent les valeurs simulées au cours de la période historique (AR4 seulement - ligne pointillée : un modèle unique : ligne épaisse : moyenne multimodèle) pour la température et les précipitations respectivement.

#### 4.2. Extrêmes et indices

En outre, une évaluation de l'intensité simulée des épisodes de précipitations extrêmes (Figure 7, colonne gauche), ainsi que les précipitations de 10 jours maximum et certaines caractéristiques liées à la saison des pluies (Figure 7, colonne 2-5) est présentée. Dans les Figures, la palette de couleurs est la même que celle utilisée pour l'évaluation de la température et des précipitations moyennes, annuelles et saisonnières (voir section 4.1). Toutefois, les observations (indiquées par les lignes horizontales magenta) ne sont plus prises à partir du groupe de données de l'URC, mais ; de la DCE (Weedon et coll. 2011), qui est disponible au niveau mondial à une résolution horizontale de 0,5 degré à un pas de temps quotidien. Cette résolution temporelle supérieure est nécessaire pour calculer les indices et les extrêmes de précipitations, mais le groupe de données de DCE peut toujours être comparé aux données de l'URC, car ils ont des valeurs mensuelles identiques.

L'intensité des fortes précipitations (Figure 7, colonne gauche) montre pour toutes les zones un cycle saisonnier semblable au cycle saisonnier des précipitations totales, avec des intensités plus élevées pendant la saison des pluies. Ces cycles saisonniers sont saisis par l'ensemble des simulations, toutefois

pour toutes les saisons et les zones, l'intensité des fortes précipitations est très sous-estimée dans les simulations, cette caractéristique est très souvent observée dans les modèles climatiques (ex. : Fowler et al, 2007). La sous-estimation est plus forte dans la zone 4, pourtant c'est aussi la région où le groupe de données d'observation sous-jacente est très différent des données de la station, lorsque les quantités des précipitations annuelles totales sont prises en compte.

Pour la fréquence des épisodes de fortes précipitations (non représentée), on observe un comportement saisonnier semblable à celui examiné pour l'intensité des pluies abondantes avec une fréquence plus élevée pendant les saisons des pluies. Généralement, les modèles ont tendance à surestimer légèrement la fréquence des fortes pluies (indiquant trop de jours de précipitations) pour toutes les saisons et les zones. Dans ce cas, les simulations climatiques régionales semblent avoir de meilleurs résultats. Pour les précipitations de 10 jours maximum et les paramètres de la saison des pluies, aucune analyse saisonnière n'a été réalisée. Dans La Figure 7, un seul graphe est donc incluse par indice et par zone. Pour les quantités des précipitations de 10 jours maximum, des quantités assez importantes sont observées dans la région avec plus de 350mm/10 jours dans la zone 4. Les simulations modélisées représentent mieux les quantités de précipitations de 10 jours maximum observées que l'intensité des fortes pluies (colonne droite dans la Figure 7), ayant toujours les observations du taux médian de 66 % des simulations (en dehors de la zone 4, où les valeurs simulées sont plus faibles). Cependant, on peut noter que les modèles présentent un très grand écart (en particulier les plus grands ensembles GIEC-RE4 et CMIP5), indiquant un assez grand degré d'incertitude à l'égard de ce paramètre.

L'évaluation des indices de la saison des pluies comprend la quantité totale des pluies simulée de la saison des pluies (Figure 7, 2e colonne à partir de la gauche), le nombre simulé de périodes de sécheresse pendant la saison des pluies (Figure 7, 3e colonne à partir de la gauche) et la durée simulée de la saison des pluies (2e colonne à partir de la droite dans la Figure 7). Pour toutes les zones, la plus grande quantité des pluies totales annuelles survient pendant la saison des pluies (de 65 % dans la zone 3 à 95 % dans la zone 1) et la quantité totale de pluie dans la saison des pluies correspond aussi bien aux précipitations totales annuelles dans les zones respectives (les quantités les plus élevées dans la zone 4 et les plus faibles dans les zones 1 et 5). En général, la plupart des modèles sont assez capables de simuler la quantité des précipitations de la saison des pluies dans toutes les zones, ayant toujours des observations dans la gamme gris foncé (définie par 66 % de toutes les simulations). Comme cette gamme gris foncé est sensiblement plus petite que la gamme complète, on peut conclure que la majorité des modèles sont assez capables de simuler les quantités de précipitations de la saison des pluies, et que les grandes gammes d'ensembles (encore une fois principalement dans le GIEC-RE4 et le CMIP5) sont causées par quelques anomalies.

Le nombre de périodes de sécheresse pendant la saison des pluies est généralement sous-estimé par les modèles (en particulier dans la zone 4), mais les différences absolues sont plutôt petites. La simulation de la durée de la saison des pluies concorde bien avec les observations dans les zones 4 et 5, mais elle est surestimée dans les zones restantes. En comparant la durée observée de la saison des pluies et les différentes zones, une légère variation est visible, avec la plus longue saison des pluies dans les zones 2 et 4, tandis que dans la zone centrale 3, la saison des pluies est légèrement plus courte. Cette variation est principalement due au fait que dans cette zone un régime pluviométrique bimodal est observé, ce qui signifie qu'il existe deux saisons des pluies par an et donc, la durée moyenne de chaque saison des pluies est légèrement plus courte.

On peut conclure sur la base de l'évaluation de la concordance entre les observations et les simulations que pour la plupart des paramètres évalués, la majorité des modèles a la capacité de représenter les conditions observées. Une pire performance globale est vraiment visible dans la simulation de l'intensité des pluies abondantes qui est très sous-estimée dans les ensembles de modèles. Cependant, c'est un problème connu et principalement lié à la résolution du modèle brut qui amortit les extrêmes dans les simulations du modèle. À première vue, il paraît que les simulations MCR réglées et horizontalement élevées ont les mêmes lacunes que les simulations MCG. Toutefois, si une comparaison directe entre le forçage MCG et la paire intégrée MCR est effectuée, une amélioration substantielle de l'intensité des fortes précipitations simulées est visible. Néanmoins, cette conclusion n'indique pas qu'une valeur générale des MCR a été ajoutée dans la région, mais elle est juste valable pour la combinaison et le paramètre MCR/MCG donné.

L'avantage du grand ensemble est sans doute que quelques modèles moins performants n'ont pas le même poids dans l'analyse comme si on aurait étudié un petit ensemble (y compris certaines de ces anomalies). Cela est également conforme aux conclusions provenant des études antérieures (ex. : Gleckler et al, 2008) qui montrent que la moyenne d'ensemble surpasse généralement chaque simulation de modèle simple. Mais une fois de plus, il convient également de rappeler que la disponibilité des observations est très limitée dans la région et la conclusion aurait pu être différente dans le cas d'un autre ensemble de données d'observation.



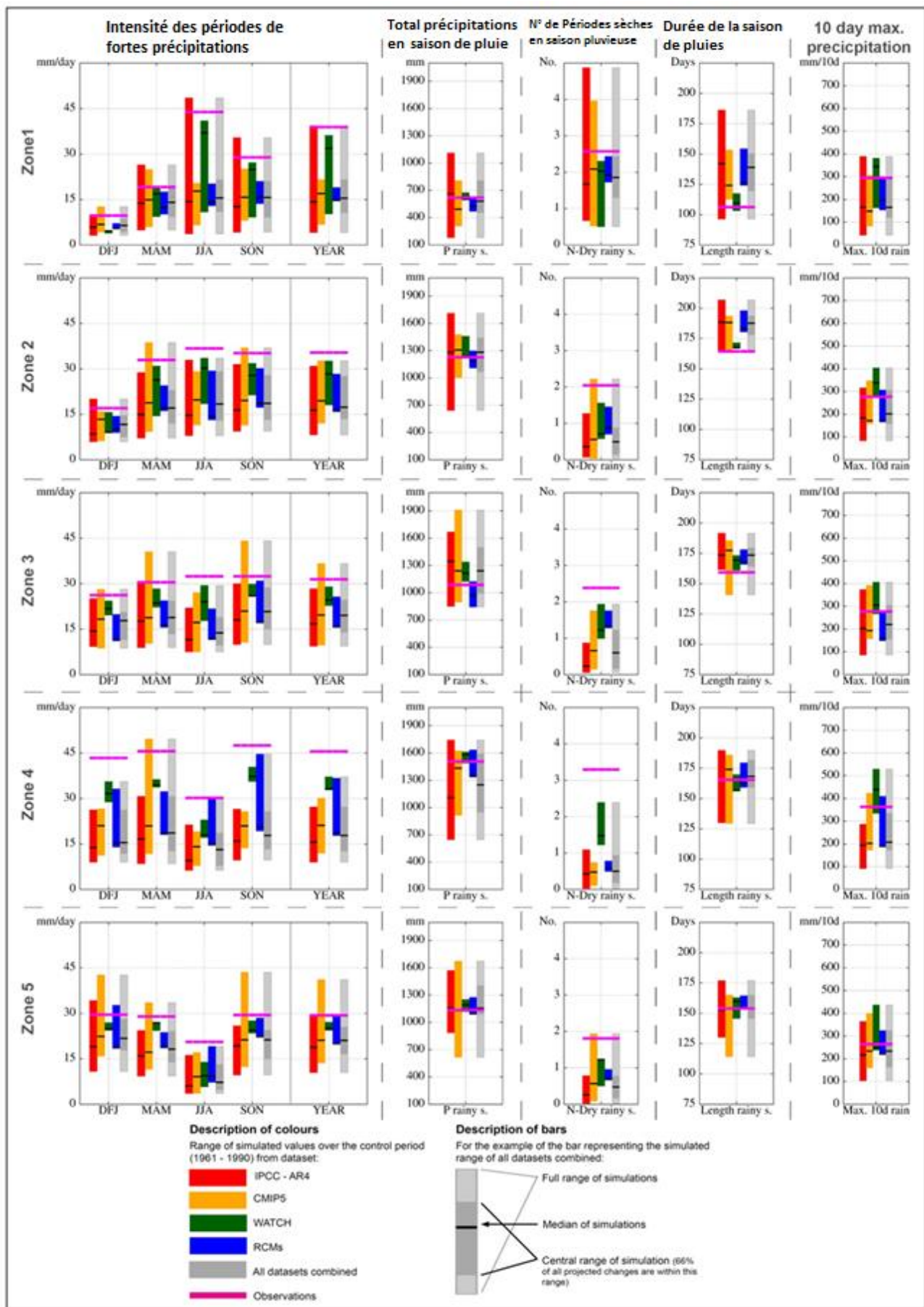


Figure 7 : Identique au Figure 5, mais pour plusieurs indices de précipitations (voir le tableau 2 pour la définition).

## 5. Analyse des changements projetés

Dans cette section, les changements projetés de l'ensemble multimodèle sont évalués pour les scénarios faibles et élevés à la fois des deux périodes de temps futurs. Bien que, chaque ensemble de données a été analysé séparément, l'objectif de l'analyse dans ce rapport porte sur les changements projetés de l'ensemble complet des simulations disponibles. La question des différents signaux des différents sous-ensembles ne sera abordée brièvement que dans la section 6. Toutefois, le matériel de l'analyse séparée de l'autre ensemble est disponible à travers le « Rapport final interactif » (disponible en ligne sous <http://www.climate-service-center.de>).

### 5.1. Changements projetés de la température moyenne et des précipitations totales, annuelles et saisonnières

Une méthode très commune permettant d'évaluer les signaux du changement climatique projetés sur une région spécifique et pour une période de temps donnée se présente sous la forme de cartes spatiales. Cette méthode est particulièrement utile si une région intègre non seulement plusieurs caractéristiques géomorphologiques, mais aussi climatologiques comme la majeure partie du bassin du Congo où on pourrait s'attendre à un signal du changement climatique hétérogène dans l'espace. Les cartes illustrant les projections des changements climatiques hétérogènes dans l'espace pour la température moyenne et les précipitations totales pour différents scénarios (faibles et élevés) et pour différentes périodes de l'année (l'année entière, les saisons standards) sont présentées et examinées (Figures 8 à 11). Dans toutes les Figures, la médiane de chaque ensemble de données sous-jacentes est indiquée pour la période de contrôle, ainsi que les changements projetés.

Chaque Figure se compose de 15 panneaux différents qui sont triés comme suit : la colonne gauche représente la médiane simulée sur la période de contrôle (allant de 1961 à 1990), la colonne centrale des changements projetés pour le milieu du siècle (2036-2065) et la colonne droite des changements projetés pour la fin du siècle (2071-2100). La rangée du haut représente les valeurs moyennes respectives pour l'année entière, et les rangées suivantes pour les quatre saisons météorologiques standards. Pour les changements projetés, la médiane ainsi que certaines informations sur la robustesse du signal de changement climatique projeté sont incluses (voir section 3.5 pour plus de détails). Les régions qui ont un signal de changement climatique robuste (basé sur la concordance quant au sens du changement) sont marquées par des pointillés noirs. Cependant, cette mesure était uniquement appliquée si la médiane des changements projetés est supérieure à  $\pm 0,5$  °C (dans le cas de la température) ou supérieure à  $\pm 5$  % pour toutes les autres variables. Les régions ayant un signal de changement dans cette gamme sont généralement décrites comme des zones blanches.

En général, l'augmentation de la température prévue (Figure 8 pour le scénario d'émissions faibles et Figure 9 pour le scénario d'émissions élevées) pour les deux scénarios et les deux périodes est assez uniforme dans la majeure partie du bassin du Congo. C'est seulement vers la fin du siècle qu'une augmentation légèrement plus importante dans les zones les moins humides du nord et du sud du bassin du Congo est visible. Toutefois, selon le scénario d'émissions élevées, les changements projetés en particulier vers la fin du siècle sont sensiblement plus grands sur toutes les parties du domaine et restent dans la gamme comprise entre environ 4 °C à plus de 5 °C (par rapport à 2 °C à 3 °C). Toutes les variations de température prévues pour les deux scénarios sont robustes dans toutes les saisons.

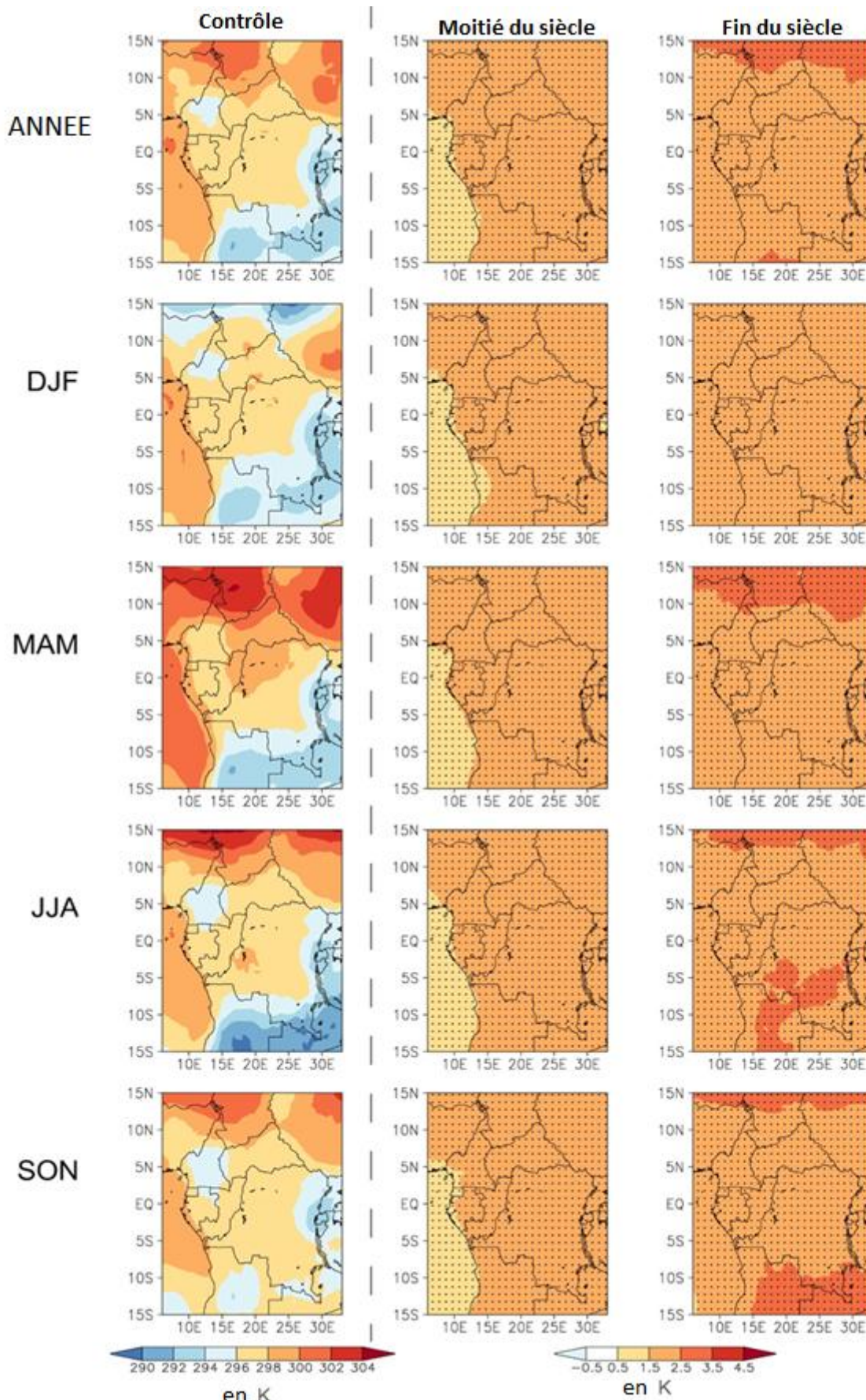


Figure 8 : Cartes des changements projetés de la température moyenne dans le scénario d'émissions faibles pour différentes périodes de temps. Les zones pointillées indiquent les régions ayant les changements « robustes », sur lesquelles au moins 66 % de tous les modèles prévoient un signal de changement climatique dans la même direction.

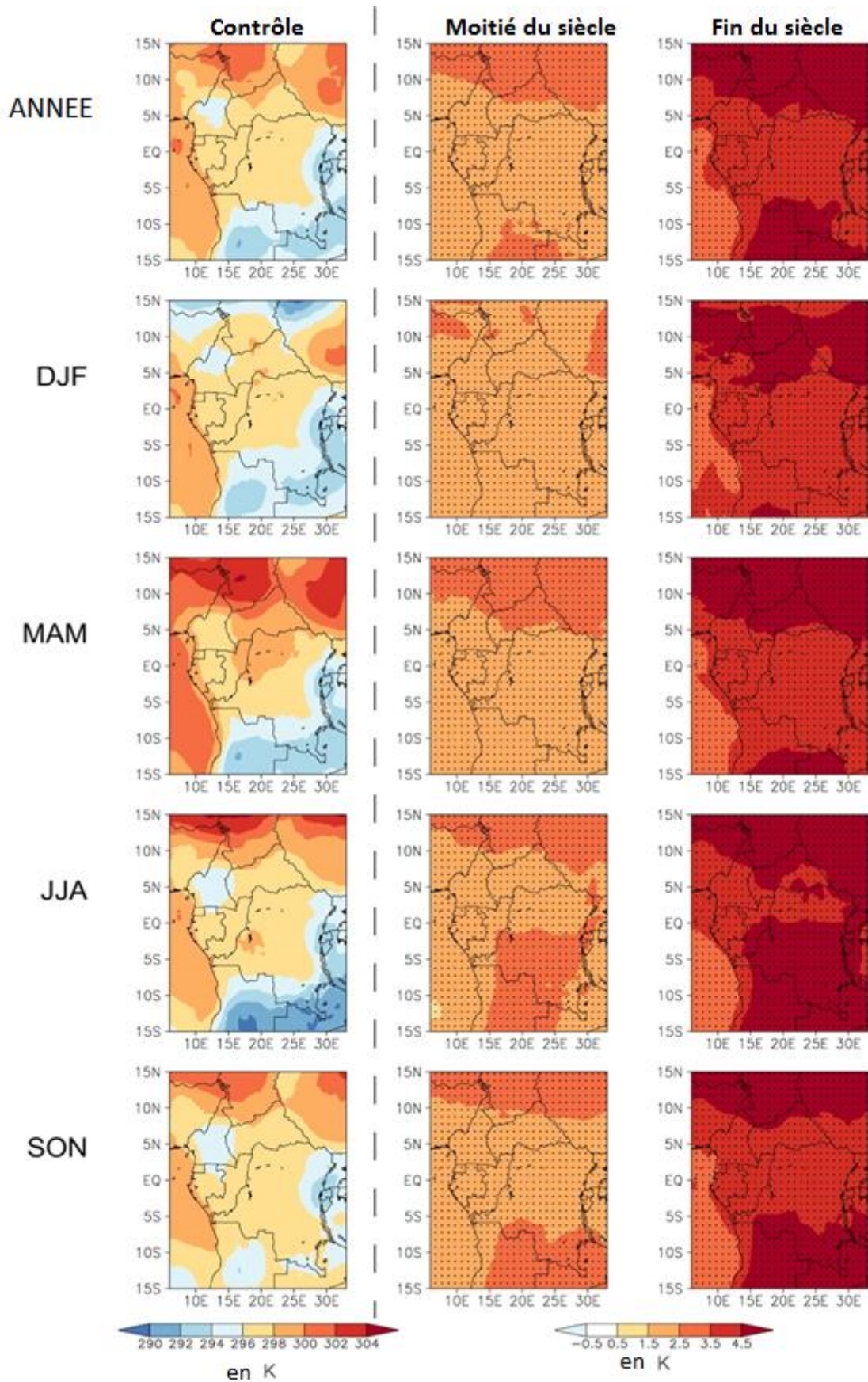


Figure 9 : Cartes des changements projetés pour la température moyenne dans le scénario d'émissions élevées pour différentes périodes de temps. Les zones pointillées indiquent les régions ayant les changements « robustes », sur lesquelles au moins 66 % de tous les modèles prévoient un signal de changement climatique dans la même direction.

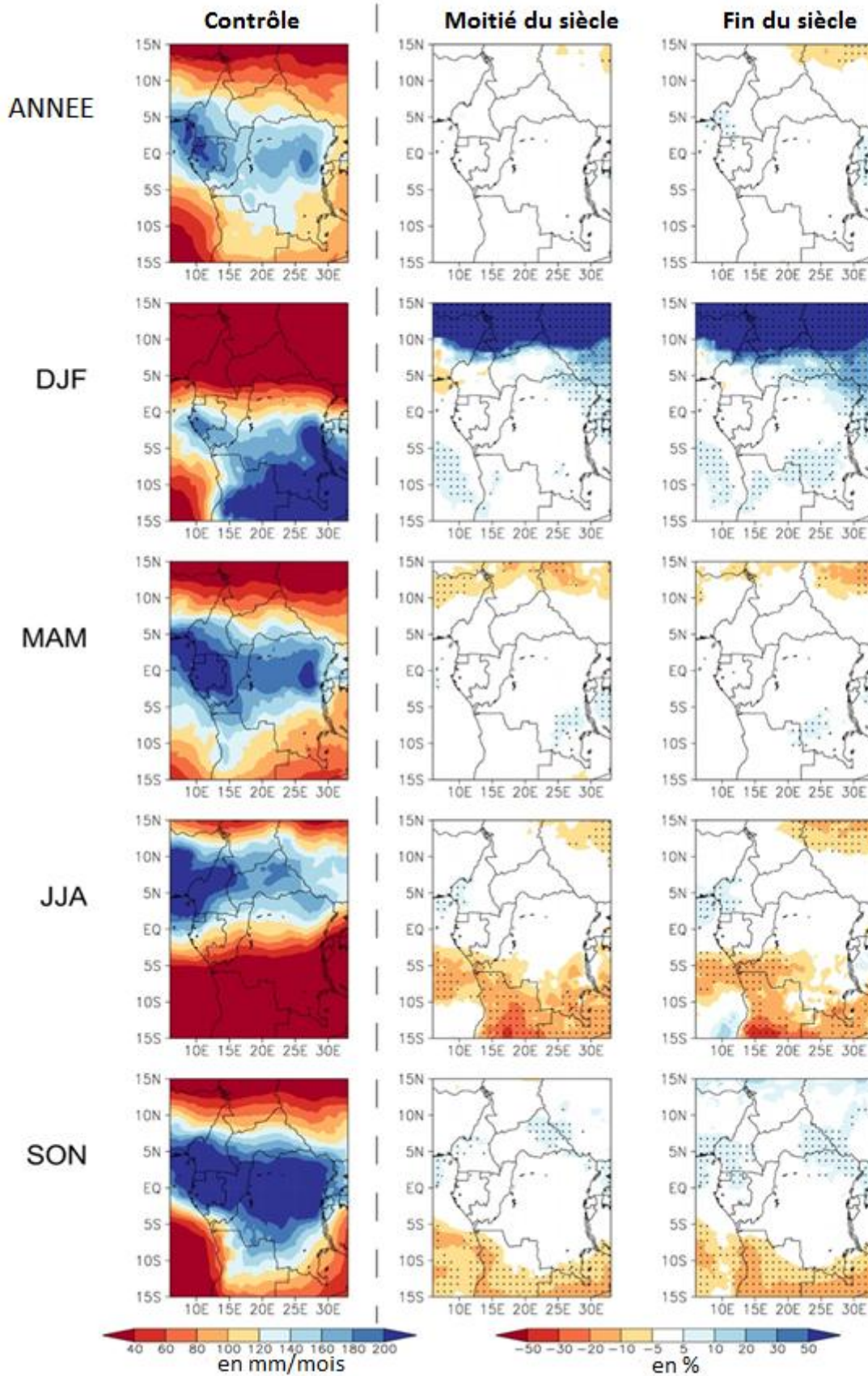


Figure 10 : Cartes des changements projetés pour les précipitations totales dans le scénario d'émissions faibles pour différentes périodes de temps. Les zones pointillées indiquent les régions ayant les changements « robustes », sur lesquelles au moins 66 % de tous les modèles prévoient un signal de changement climatique dans la même direction.

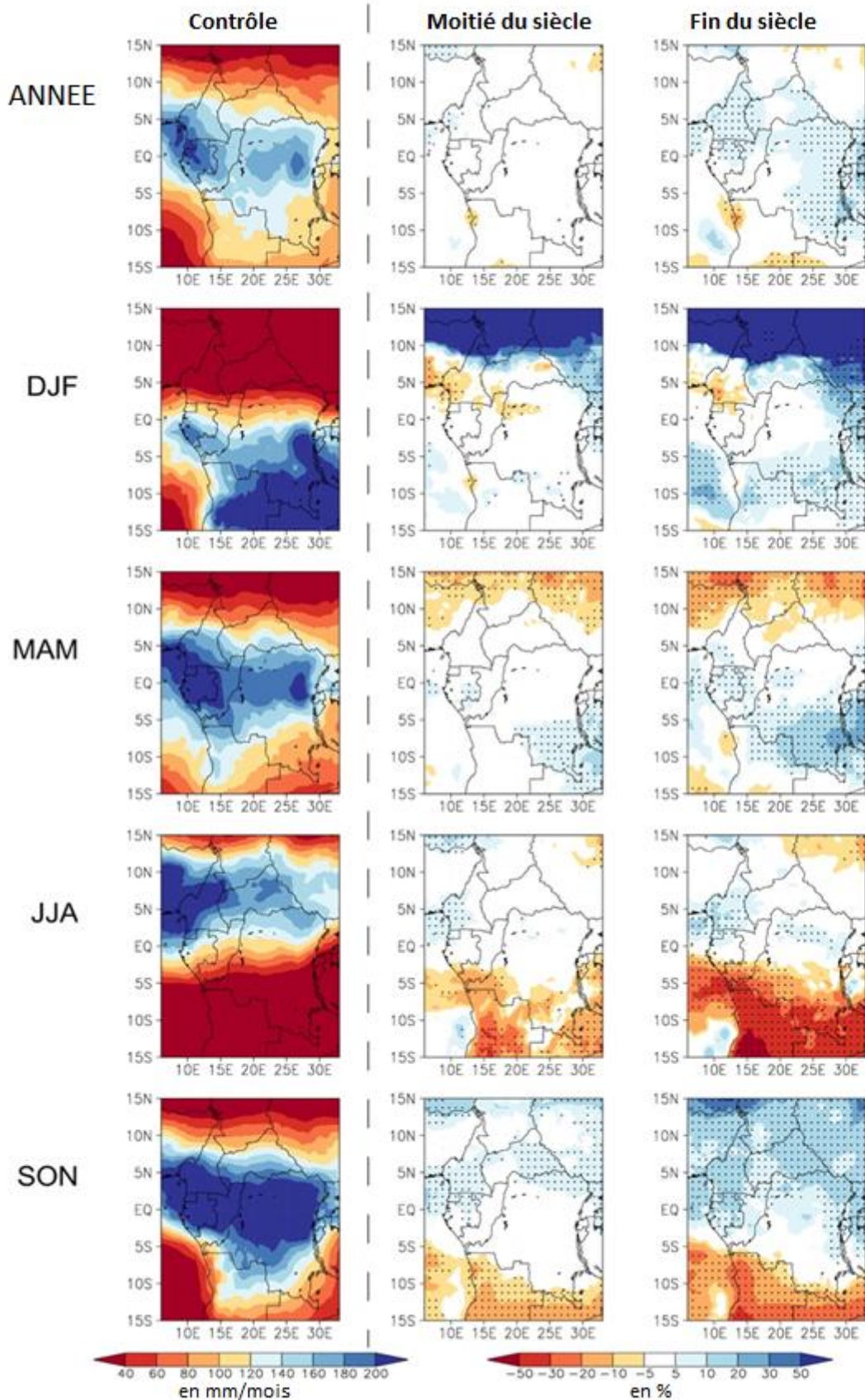


Figure 11 : Cartes des changements projetés pour les précipitations totales dans le scénario d'émissions élevées pour différentes périodes de temps. Les zones pointillées indiquent les régions ayant les changements « robustes », sur lesquelles au moins 66% de tous les modèles prévoient un signal de changement climatique dans la même direction.

La même analyse a été effectuée pour les prévisions des futures estimations des précipitations totales (La Figure 10 pour le scénario d'émission faible et La Figure 11 pour le scénario d'émission élevé). Au cas où

seule la variation annuelle des changements prévus est considérée (colonne supérieure des deux Figures), la projection médiane ne présente presque aucun changement pour ce qui est du scénario d'émission faible (Figure 10) et prévoit une faible (mais robuste le plus souvent) hausse de précipitation totale annuelle (en deçà de +10 %) dans certaines des zones du centre et de l'est de la zone d'étude.

Cependant, au cas où les changements enregistrés à différentes saisons sont impliqués dans l'analyse, il en résulte une image plus variée. Pour la zone centrale de la région, aucun changement n'est le plus souvent enregistré (scénario d'émission faible) ou une augmentation modérée, mais importante (scénario d'émission élevée) des précipitations est prévue pour toutes les saisons. Au sud de la zone, une fréquente baisse considérable durant la saison sèche est observée, pendant les saisons de JJA et SON, pour les deux scénarios. Cependant, elle est essentiellement amplifiée dans le scénario d'émission élevée. Pour ce qui est de la partie nord, une forte hausse relative des pluies est prévue durant la saison sèche (DJF). Toutefois, il faut relever qu'en raison des quantités de pluie très faibles, les changements relatifs élevés ne constituent en aucun cas un indicateur d'un futur sans précipitations.

Jusqu'ici, seule une prévision moyenne du changement a été présentée sur les cartes. Mais, évidemment, en cas d'analyse d'une telle multitude de modèles de projection, il ne suffit pas de se focaliser simplement sur la moyenne ; mais également sur certaines analyses à faire des proportions des changements prévues. Dans ce cas, la moyenne des modifications prévues pour les cinq zones énoncées en section 3.1 est une fois de plus effectuée. Pour chacune des zones, la marge totale des changements prévus est évaluée dans les deux scénarios et les deux périodes à la moitié et à la fin du 21<sup>e</sup> siècle (voir la Figure 12 - scénario d'émission faible - barres bleues ; scénario d'émission élevée - barres orange et rouge foncé ; moitié du siècle - barres bleues et orange ; fin du siècle - barres bleu foncé et rouge foncé). Avec cette approche, il faut relever que l'ensemble total des changements peut être influencé par des changements externes de quelques modèles potentiellement aberrants. Afin d'éviter cette situation, ledit ensemble des changements prévus (centre, 66 % des changements prévus - voir la section 3.5 pour les détails) est inclus. Dans les Figures utilisées dans ce rapport, l'ensemble probable est indiqué par les sous-zones des barres respectives, colorées de façon plus foncée.

Les amplitudes totales et potentielles des changements prévus des températures moyennes annuelles et saisonnières (moyenne de la zone équivalente) sont représentées dans La Figure 12 (colonne de gauche). Il apparaît clairement dans cette Figure, que, notamment vers la fin du siècle (bandes rouges) une croissance plus substantielle de la température moyenne est prévue selon le scénario d'émission élevée, ceci avec une augmentation d'au moins +3 °C (extrémité inférieure des barres rouges). Alors qu'à la moitié du siècle les changements prévus restent similaires, les potentielles amplitudes des changements prévus pour les scénarios d'émissions faibles et élevées ne coïncident plus à la fin du siècle. Dans ce cas, le réchauffement potentiel dans un scénario de forte émission pour toutes les zones est d'environ 2 °C plus élevé que dans un scénario d'émission faible (l'augmentation prévue de la température moyenne pour le scénario élevé est toujours entre +3,5 et +6 °C, contre +1,5 et +3 °C pour un scénario d'émission faible, tout ceci au terme du 21<sup>e</sup> siècle). L'amplitude totale des changements prévus est plutôt identique pour les deux scénarios. Cependant, elle diffère de zone en zone (à partir d'environ 2,5 °C en zone 4 à environ 4,5 °C en zone 2, si l'amplitude totale de la température moyenne annuelle prévue à la fin du siècle est prise en considération). Si seule l'amplitude potentielle est considérée, la largeur de la bande des changements prévus de la température moyenne annuelle est considérablement basse (environ 1,5 à 2 °C pour la température moyenne annuelle à la fin du siècle).

Pour la quantité totale de précipitation moyenne annuelle et saisonnière, la largeur de la bande des changements prévus est la plus grande dans les régions sèches (Zone 1) et/ou durant la saison sèche (DJF dans les Zones 1 et 2 ; JJA dans la zone 5). De même, pour ce paramètre, l'amplitude des changements prévus est considérablement réduite, si seule la zone centrale de 66 % (amplitude potentielle) est considérée. Malgré le fait que, même en terme d'amplitude potentielle certaines prévisions font état de précipitations totales à la hausse et d'autres en baisse, les petites amplitudes (oscillant toujours entre -10 et + 10 % dans les Zones 2 à 4 plus humides et entre -15 et +30 % dans la Zone 1 plus aride, pour ce qui est des précipitations totales annuelles) indiquent dans les deux scénarios qu'il est très probable que les précipitations totales ne changeront pas de façon drastique. Cette conclusion ne dépend pas des scénarios d'émission sous-jacents. Concernant toutes les zones, la prévision moyenne des précipitations totales annuelles est légèrement positive (pour les deux scénarios également). Une tendance pour une hausse légère des précipitations totales annuelles est prévue. Cette conclusion est bien sûr, valide uniquement sur la base d'un ensemble de données multimodèles, multiscénarios et analysées. Toutefois, en raison de sa taille et également du fait que différents types de prévisions ont été analysés, les résultats semblent plutôt pertinents.

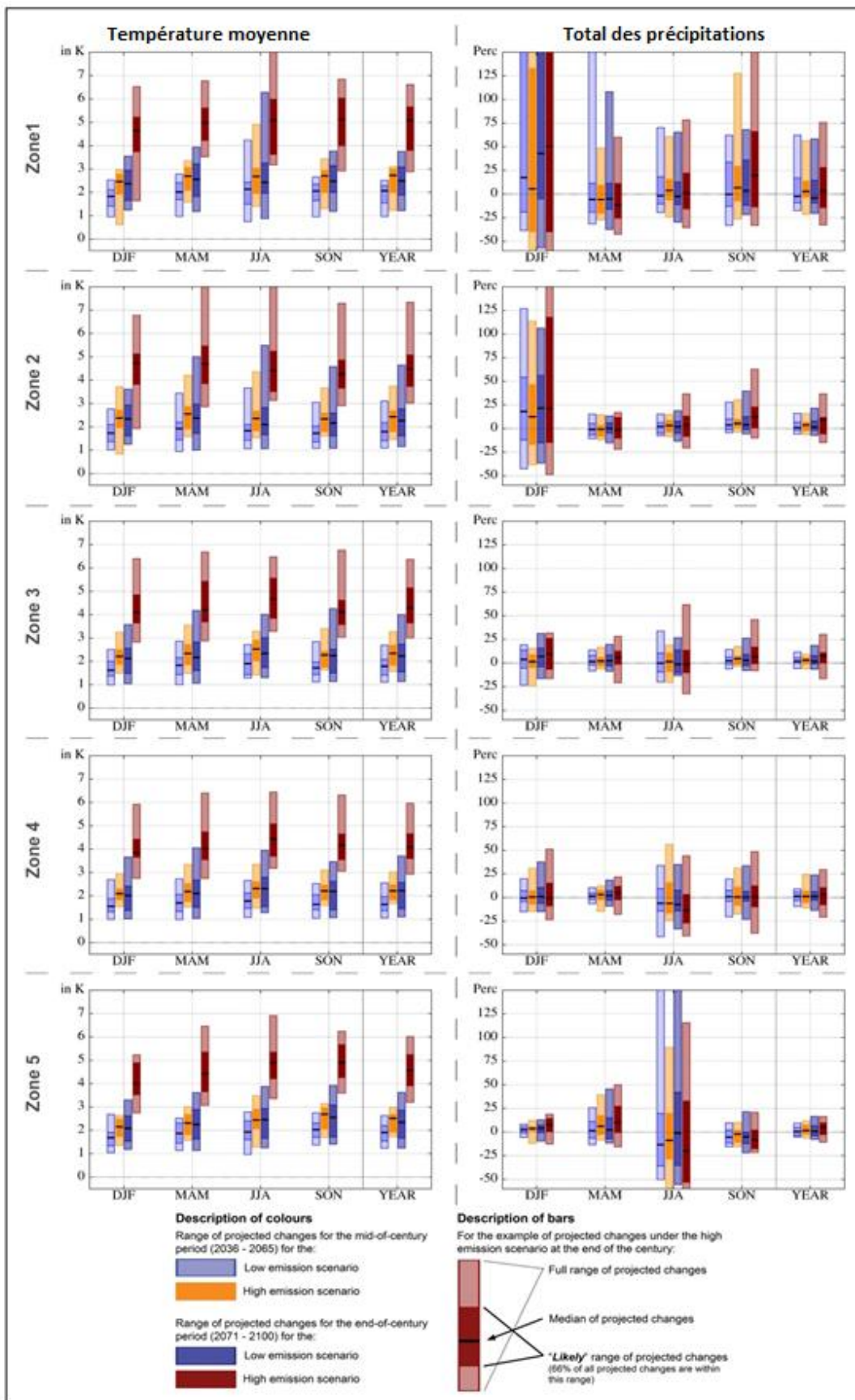


Figure 12 : Les amplitudes totales potentielles moyennes des changements prévus de la température moyenne (colonne gauche) et les précipitations totales (colonne de droite) pour les cinq sous-zones et les deux scénarios pendant des périodes de temps différentes.

Les différences substantielles entre l'amplitude totale et l'amplitude potentielle des changements prévus visibles pour les deux paramètres indiquent encore que quelques modèles de cas particulier prévoient un signal de changement climatique considérablement différent. Ceci est plus fréquent pour les changements



des prévisions de précipitation dans la région semi-aride de la zone d'étude (Figure 12, panneau droit supérieur) où déjà des différences légères dans les montants absolus de précipitation peuvent entraîner à des changements significatifs relatifs, dépendant des montants de précipitation simulés durant la saison d'étude. Par conséquent, ces grands changements ne doivent pas être surestimés. Néanmoins, l'analyse montre encore l'importance de l'analyse d'une quantité importante de différentes prévisions, comme seul moyen alors de compenser l'influence des modèles de cas particuliers.

## **5.2. Changements prévus dans les extrêmes de température et de précipitation**

Pour les extrêmes liés à la température, le changement relatif dans le nombre moyen des jours et des nuits froids et celui des jours et nuits chauds a été évalué (pour la définition, consulter la Table 3). Dans la Figure 13, la distribution spatiale des changements moyens prévus de variable respective est représentée pour le scénario d'émission faible (partie gauche de la Figure) et élevé (partie droite de la Figure) et pour les deux périodes (moitié du siècle pour la colonne de gauche et fin du siècle pour la colonne de droite). (Noter que dans la Figure 13 la moyenne sur la période de contrôle n'est pas représentée, étant donné qu'elle restera toujours constante, en raison du fait que les extrêmes sont définis à travers le 10<sup>e</sup> et le 90<sup>e</sup> percentile des températures minimales et maximales quotidiennes, respectivement).

Les prévisions moyennes de changement pour la fréquence des jours et des nuits froids sont en baisse d'environ +8 à + 12 %, ceci sur toutes les parties de la région étudiée et pour les deux scénarios (deux rangées supérieures dans la Figure 13). Pour la fréquence des jours et des nuits chauds, une hausse considérable est prévue dans les deux scénarios (deux rangées inférieures dans la Figure 13). Cependant, dans le scénario d'émission élevée, la hausse est de façon significative, plus élevée que dans un scénario d'émission faible (à la fin du siècle, en moyenne à hauteur de +25 %). Pour les deux variables, les deux scénarios et également pour les deux périodes, la hausse prévue du changement moyen est la plus grande dans les parties centrales du domaine (plus de +50 % dans un scénario d'émission faible et plus de +70 % dans un scénario d'émission élevée). Pour les changements prévus tant dans les extrêmes froids que chauds, la plupart des modèles confirment la direction des changements prévus. Par conséquent, les changements prévus peuvent être classés afin d'être soutenus sur l'ensemble de la région.

Les amplitudes totales et potentielles des changements prévus pour les indices extrêmes basés sur la température pour les différentes zones sont représentées dans la Figure 18 (colonne de gauche). Tous les modèles confirment une baisse légère de la fréquence des jours et des nuits froids ainsi qu'une hausse significative dans la fréquence des jours et des nuits chauds pour les deux scénarios et pour toutes les zones à l'avenir. Il s'agit évidemment d'un signal très fort. Alors qu'en cas d'extrême froid, aucune différence substantielle n'est perceptible entre les deux scénarios, les changements prévus pour les extrêmes chauds sont amplifiés dans le cas de scénario de forte émission (par exemple, pour la zone 1, l'amplitude probable des changements prévus dans la fréquence des jours chauds tend vers une croissance de +12 à 26 % sous le scénario de faible émission, contre +22 à +46 % en cas de scénario d'émission élevé tous pour la fin du siècle).

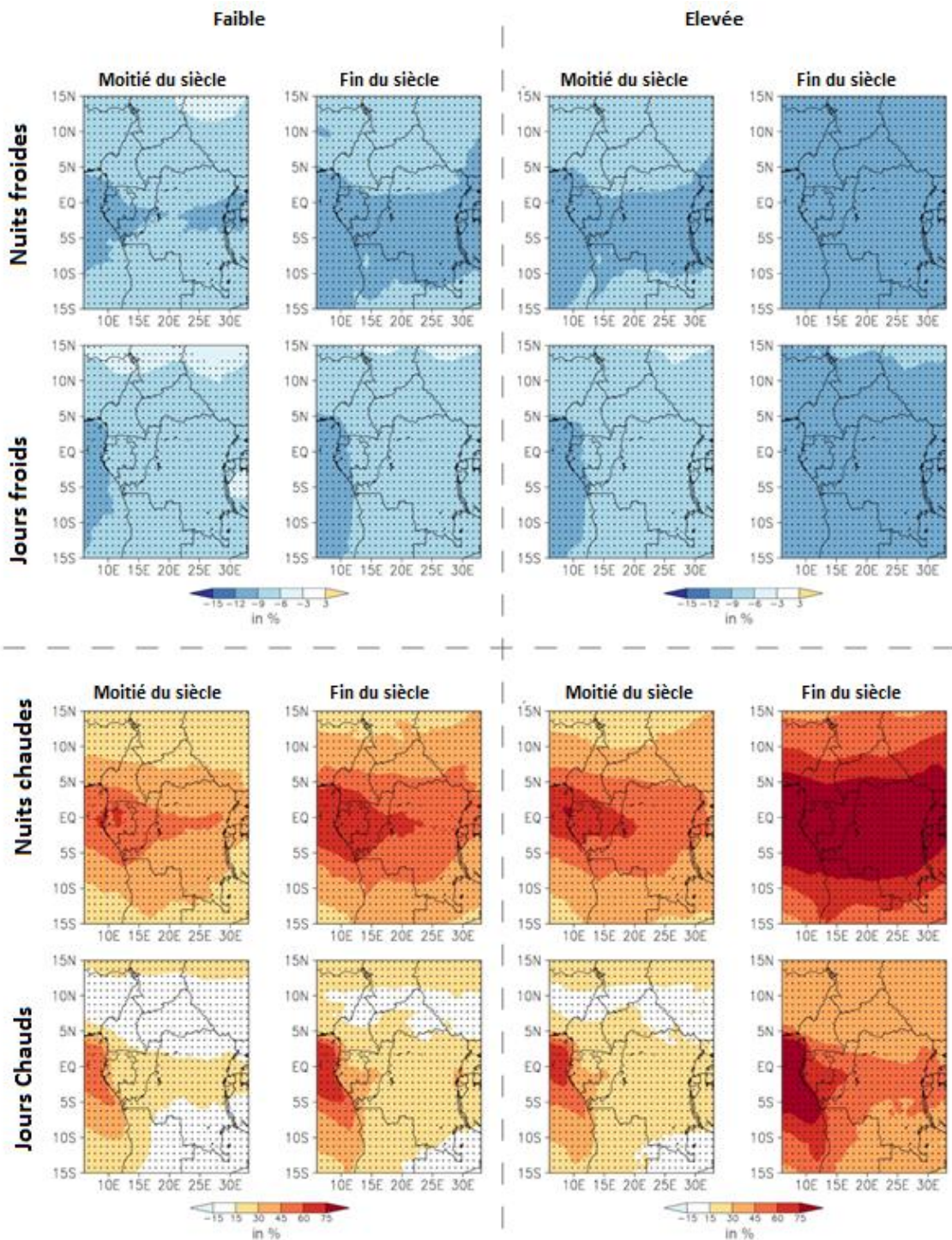


Figure 13 : Cartes des changements prévus pour la fréquence des journées et les soirées froides (deux rangées supérieures) et pour la fréquence des journées et soirées chaudes (deux rangées inférieures) dans le scénario de faible émission pour la moitié et la fin du siècle. Les zones en pointillé indiquent les régions de changement « considérable », où au moins 66 % de tous les modèles prévoient un signe de changement dans la même direction.

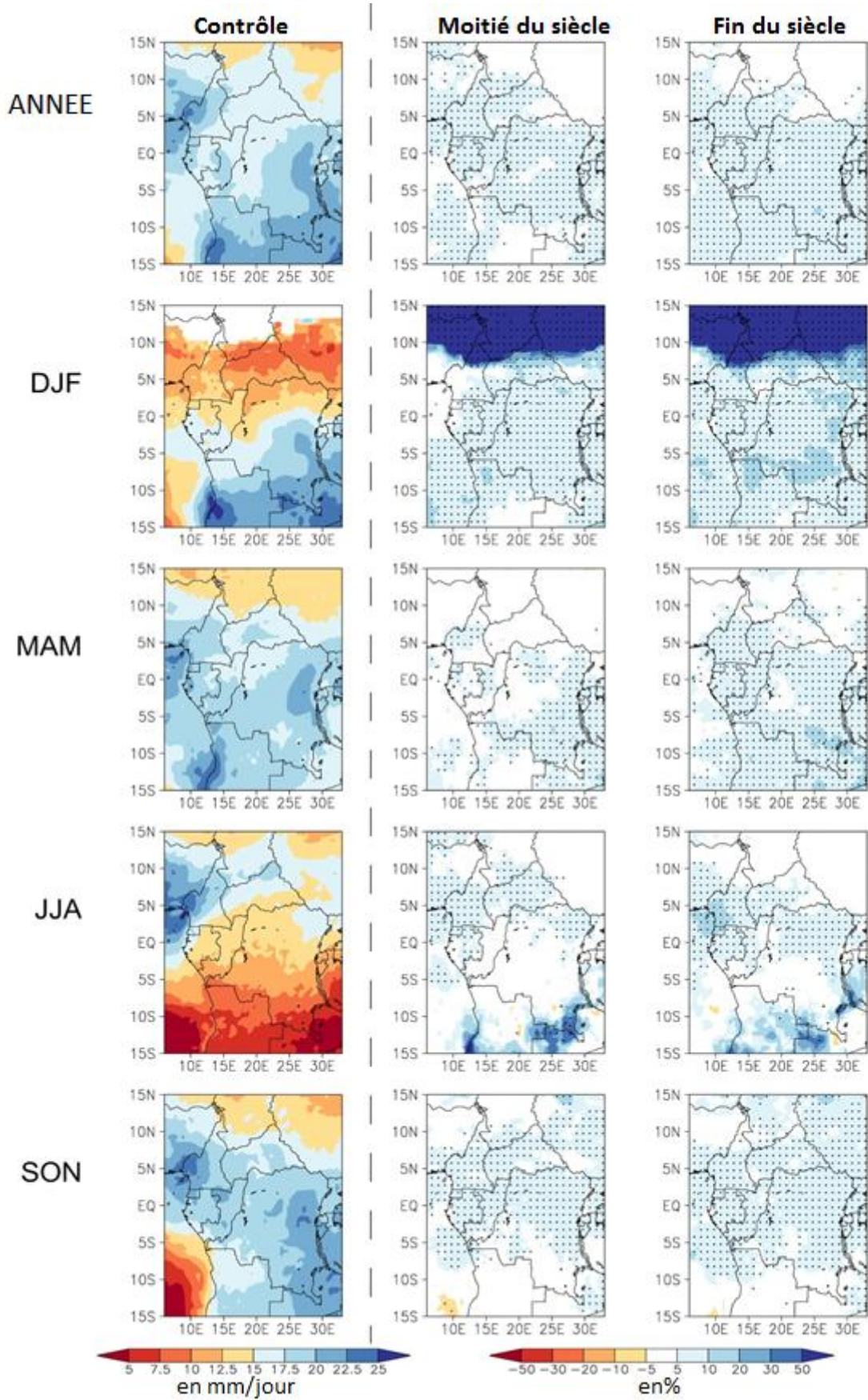


Figure 14 : Les cartes des changements prévus pour l'intensité des cas de forte pluviométrie selon le scénario de faible émission pour diverses périodes. Les zones en pointillé indiquent les régions de changement « considérable », où au moins 66 % de tous les modèles prévoient un signe de changement dans la même direction.

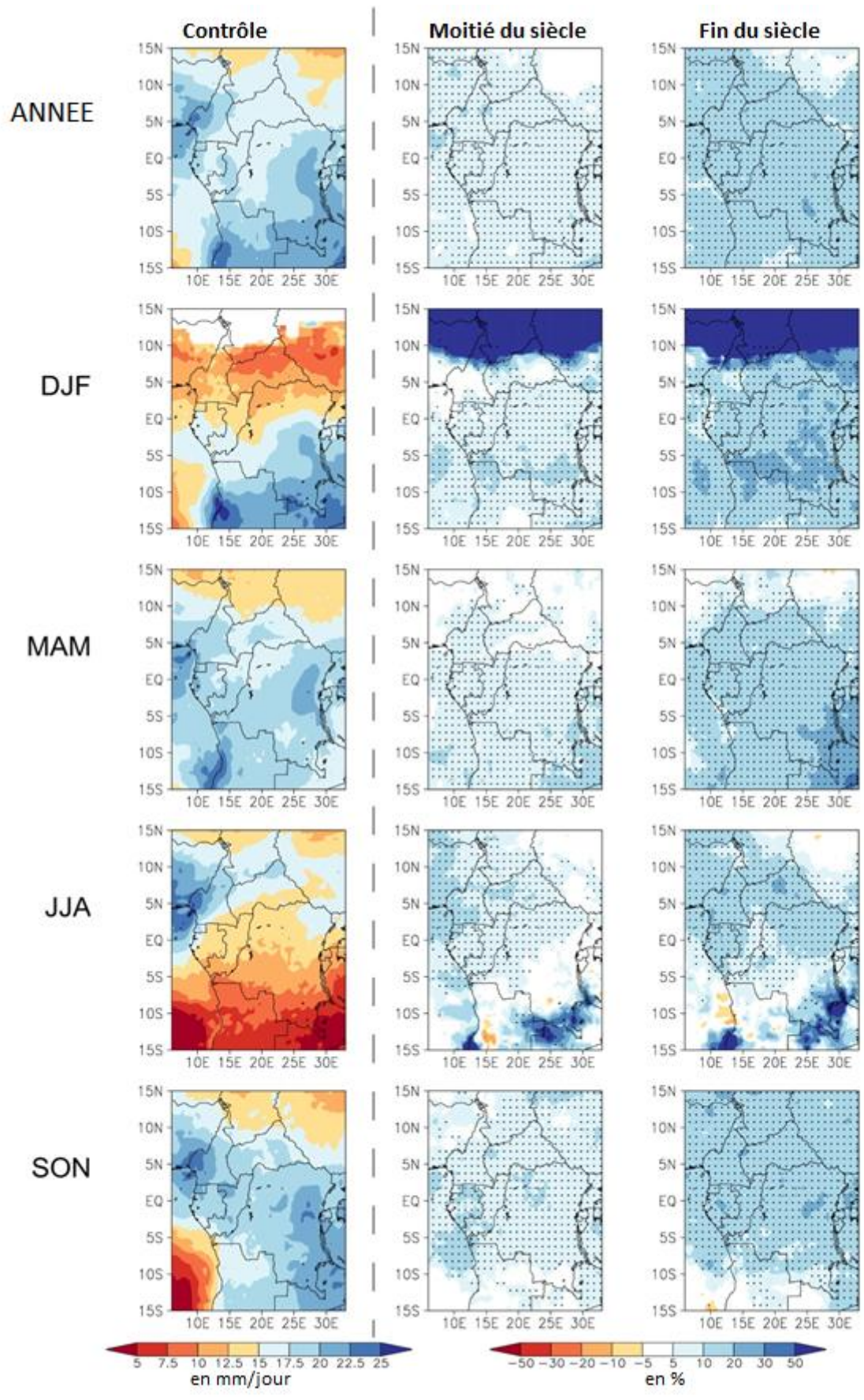


Figure 15 : Les cartes des changements prévus pour l'intensité des cas de forte pluviosité selon le scénario de forte émission pour diverses périodes. Les zones en pointillé indiquent les régions de changement « considérable », où au moins 66 % de tous les modèles prévoient un signe de changement dans la même direction.

Les configurations spatiales des prévisions moyennes de changement de l'intensité des cas de forte pluviosité sont représentées dans la Figure 14 pour ce qui est du scénario de faible émission et la Figure 15 pour le scénario de forte émission. Les panneaux des Figures sont disposés comme décrits ci-dessus pour la température annuelle et saisonnière moyenne et les Figures des précipitations totales (Figure 8-11). Autour de la fin du 21e siècle, la prévision moyenne des changements d'intensité des cas de forte pluviosité tend vers une hausse significative sur toutes les parties du domaine pour les scénarios de faible et forte émission. Ceci n'est pas vérifié seulement pour les changements d'intensité des cas de forte pluviosité moyenne sur un an (rangée supérieure des Figures), mais également pour les moyens respectifs de différentes saisons. En général, les régions qui enregistrent des changements importants dans la croissance de l'intensité des cas de forte pluviosité sont liées aux régions ayant une intensité plus élevée de pluviosité durant la période de contrôle. Évidemment, ce fait ne peut être constaté que si les croissances très élevées prévues dans les zones sèches durant la saison DJF de la partie nord de la région du bassin supérieur du Congo sont négligées. Au cas où les deux scénarios d'émission sont directement comparés l'un à l'autre, il peut être conclu que les modèles sont plutôt similaires. Cependant, dans le scénario de forte émission, les changements prévus sont plus nombreux (à hauteur d'environ 10 % de croissance encore plus forte). Pour ce qui est de la fréquence des épisodes de fortes précipitations, aucun changement considérable n'est prévu sur l'ensemble de la région ; ceci, indépendamment de la prise en compte du scénario d'émission (non représenté). Étant donné que la fréquence des épisodes de forte pluviosité est estimée relativement tous les jours de l'année (peu importe qu'il pleuve ou pas), ce résultat, combiné à la croissance prévue de l'intensité des épisodes de forte pluviosité et les changements plutôt faibles des chutes totales de pluies (voir Section 5.1), indique une potentielle réduction du nombre absolu des épisodes de pluie dans le futur. Une croissance générale particulièrement soutenue est également prévue pour des chutes de pluie pour 10 jours maximum dans les deux scénarios (Figure 16, les panneaux dans les rangées supérieure et inférieure représentent les changements moyens prévus dans les scénarios de faible d'émission et de forte émission respectivement). À l'instar des cas d'épisodes d'intensité de fortes pluies également pour des chutes de pluies de 10 jours maximum, une plus grande augmentation est prévue dans le scénario de forte émission.

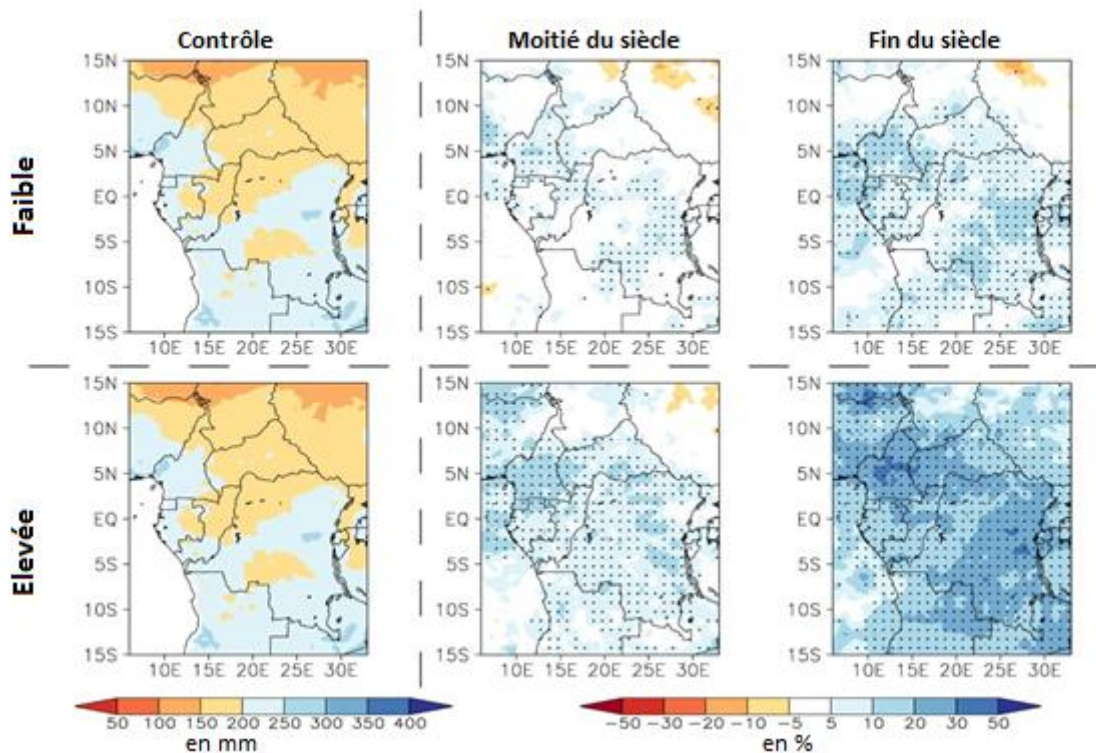


Figure 16 : Les cartes des changements prévus pour 10 jours maximum de chutes de pluie selon les scénarios de faible (rangée supérieure) et forte émissions pour des périodes différentes. Les zones en pointillé indiquent les régions de changement « considérable », où au moins 66 % de tous les modèles prévoient un signe de changement dans la même direction.

Tous les changements prévus en cas de précipitations extrêmes sont représentés dans la Figure 17 (pour les changements prévus de l'intensité des épisodes de forte pluviosité) et dans la Figure 18 (panneau droit - pour les changements prévus en 10 jours maximum de chutes de précipitation). Tous les changements prévus d'intensité d'épisodes de forte pluviosité sont en très nombreux, notamment dans les deux régions du nord et durant les saisons sèches respectives. Cependant, ce grand nombre est causé par les changements prévus de quelques modèles isolés uniquement. Par conséquent, le nombre probable est de beaucoup plus inférieur que le nombre total. Si le nombre probable est seul pris en compte, une tendance évidente et prononcée pour une augmentation d'intensité d'épisodes de forte pluviosité à hauteur d'environ +25 % est prévue autour de la fin du siècle. Ce fait est valable pour les deux scénarios, même si le nombre probable est légèrement inférieur dans le scénario de faible de scénario. Des changements plus nombreux sont seulement prévus durant les saisons sèches respectives. Ils peuvent être négligés en raison des intensités minimales observées durant cette période de l'année. Pour le cas des chutes de précipitation pendant 10 jours maximum, le nombre total des changements (Figure 18, panneau droit) est considérablement inférieur dans les deux zones du nord, comparé au nombre total des changements prévus de l'intensité des épisodes de forte pluviosité. Par ailleurs, pour ce paramètre, le nombre probable indique une augmentation en 10 jours maximum de chutes de pluie pour le futur. Dans le scénario de forte émission, le nombre probable des changements prévus s'étend principalement entre +10 à +30 % à la fin du 21e siècle. Pour la seule Zone 1, la marge est légèrement plus grande (de -6 à +40 %). Dans un scénario de faible émission, les changements prévus pour 10 jours maximum de chutes de précipitation sont légèrement plus faibles.

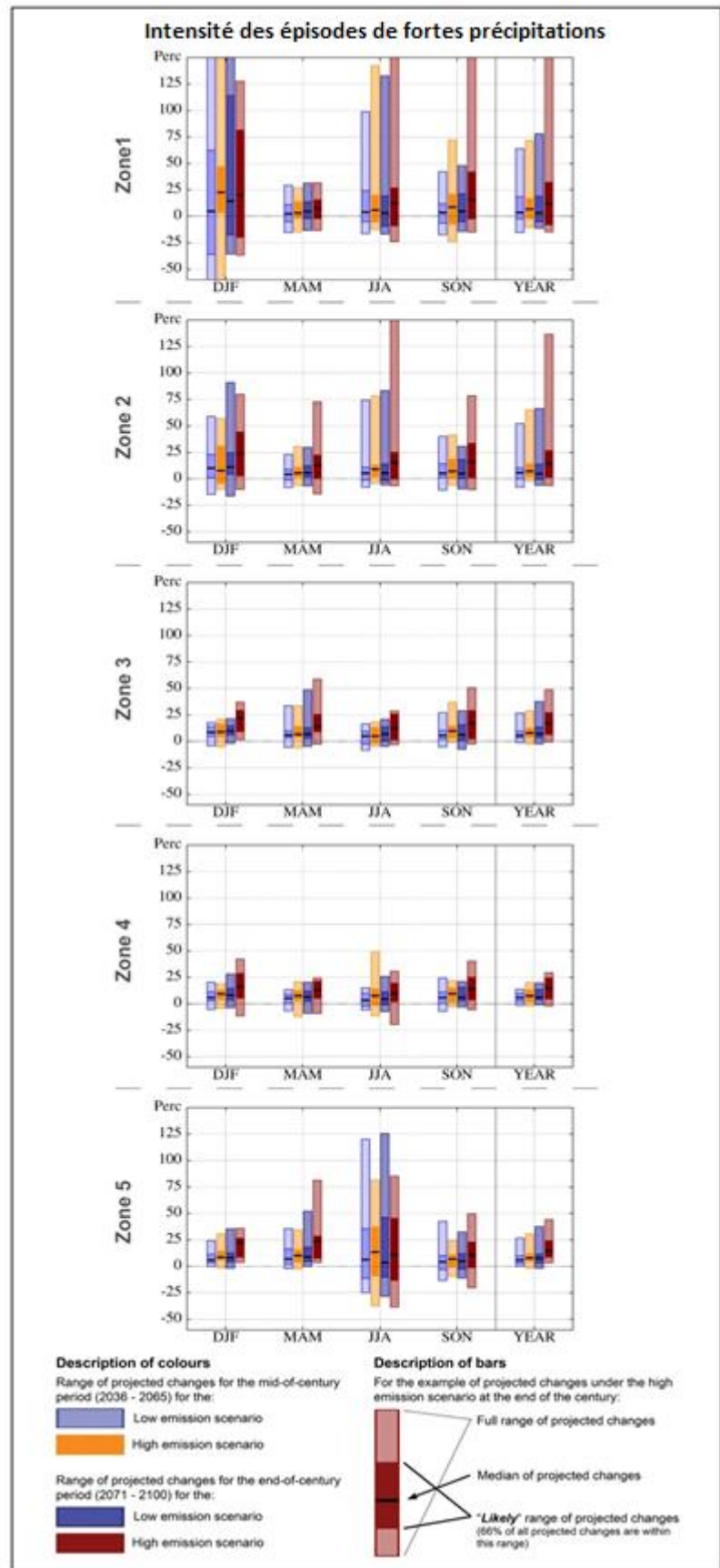


Figure 17 : Les changements complets et potentiels prévus pour les épisodes d'intensité de forte pluviosité

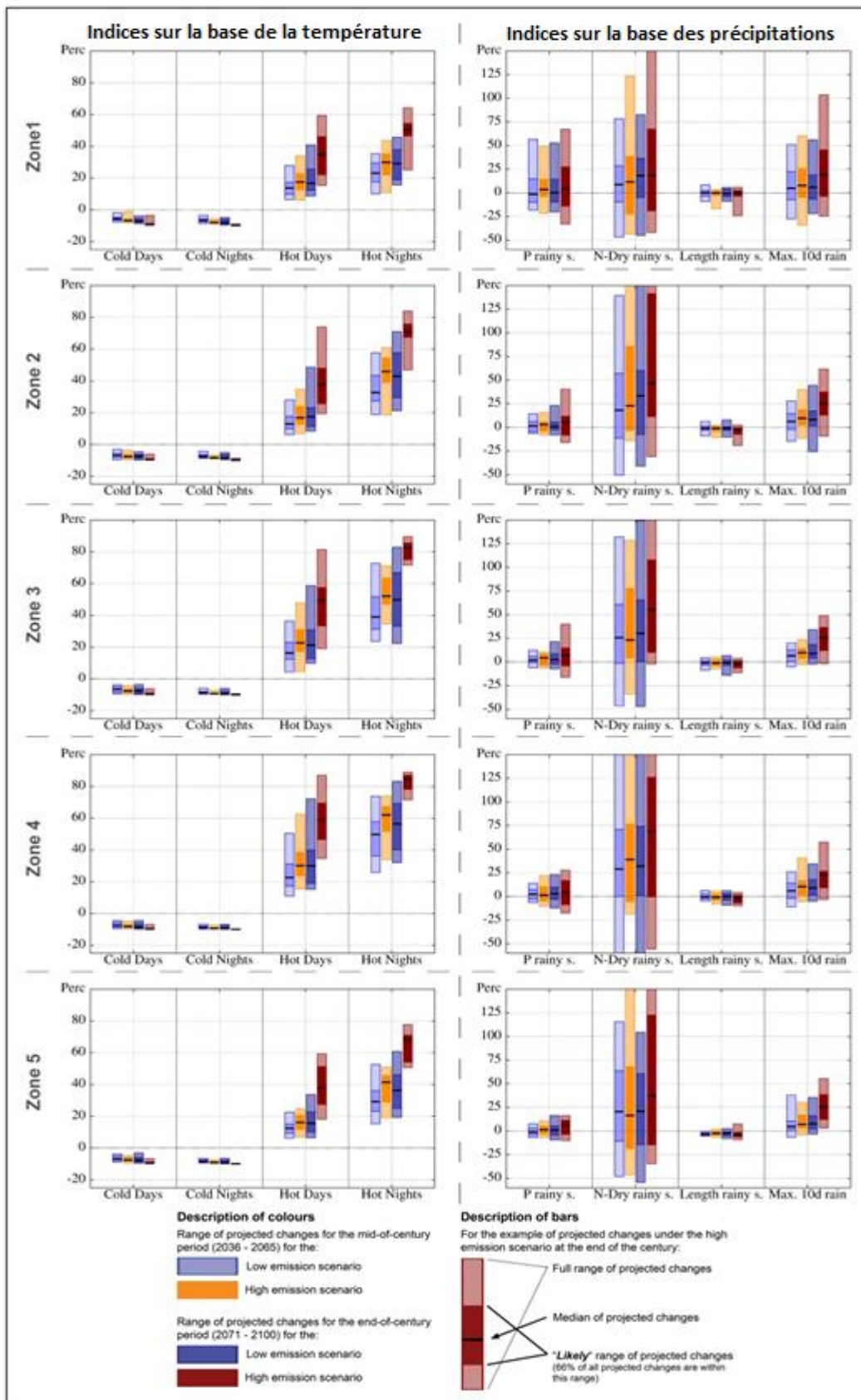


Figure 18 : Les amplitudes totales et potentielles moyennes des changements prévus des indices de température (colonne gauche) et des indices de précipitations (colonne de droite) pour les cinq sous-zones dans les deux scénarios pendant des périodes de temps différentes.

### 5.3. Changements prévus pour la saison des pluies

Dans les Figures 19 et 20, la distribution spatiale de la moyenne des changements prévus pour le total des

précipitations durant la saison des pluies (rangée supérieure), le nombre de périodes sèches pendant la saison des pluies (rangée centrale) et la longueur de la saison des pluies (rangée inférieure) sont tous représentés pour les scénarios de faible (Figure 19) et de forte (Figure 20) émission ainsi que pour les deux futures périodes. Dans le scénario de faible émission, les prévisions moyennes de changement de la pluviosité totale de la saison des pluies sont quasi identiques dans l'ensemble de la région du bassin du Grand Congo. Selon des prévisions, seules les zones côtières du Cameroun et l'est de la République démocratique du Congo (RDC) connaîtront une importante augmentation d'environ +5 à +10 %. Dans le scénario de forte émission, la prévision moyenne des changements des chutes de précipitation pendant la saison des pluies fait état d'une légère croissance sur de vastes parties du domaine. Cette croissance est légèrement plus élevée au sud-ouest du Cameroun et à l'est du Congo. Cependant, il faut relever que sur les zones étendues, les changements prévus ne sont pas prononcés. Ceci indique qu'il est prévu une baisse des chutes de pluie pendant la saison des pluies pour une large fraction de modèles (voir également ci-dessous et la Figure 18).

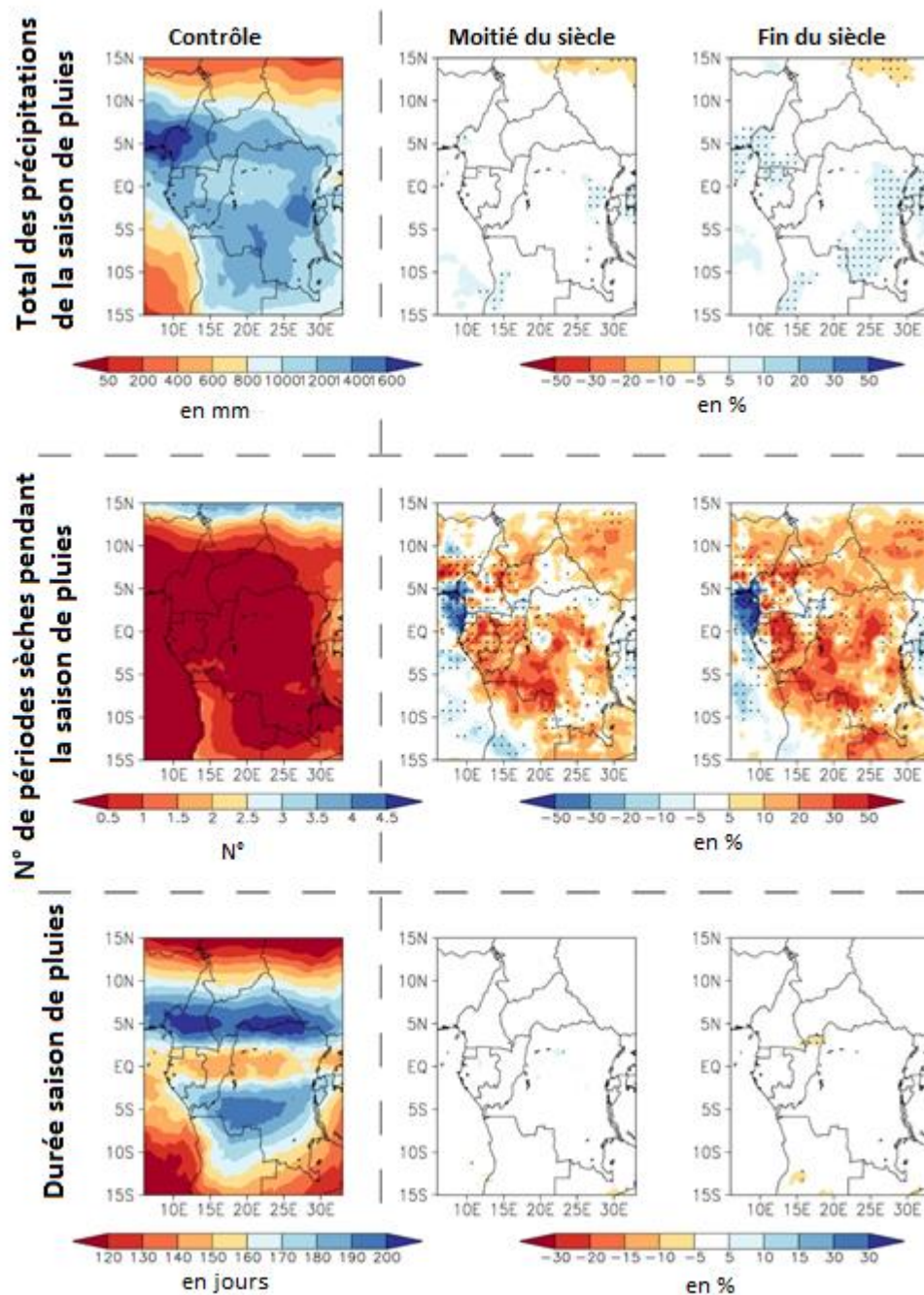


Figure 19 : Cartes des changements prévus des précipitations totales durant la saison des pluies (rangée supérieure), le nombre de périodes sèches durant la saison des pluies (rangée centrale) et la durée de la saison des pluies (rangée inférieure) dans le scénario de faible émission pour des périodes différentes. Les zones en pointillé indiquent les régions de changement « considérable », où au moins 66 % de tous les modèles prévoient un signe de changement dans la même direction.



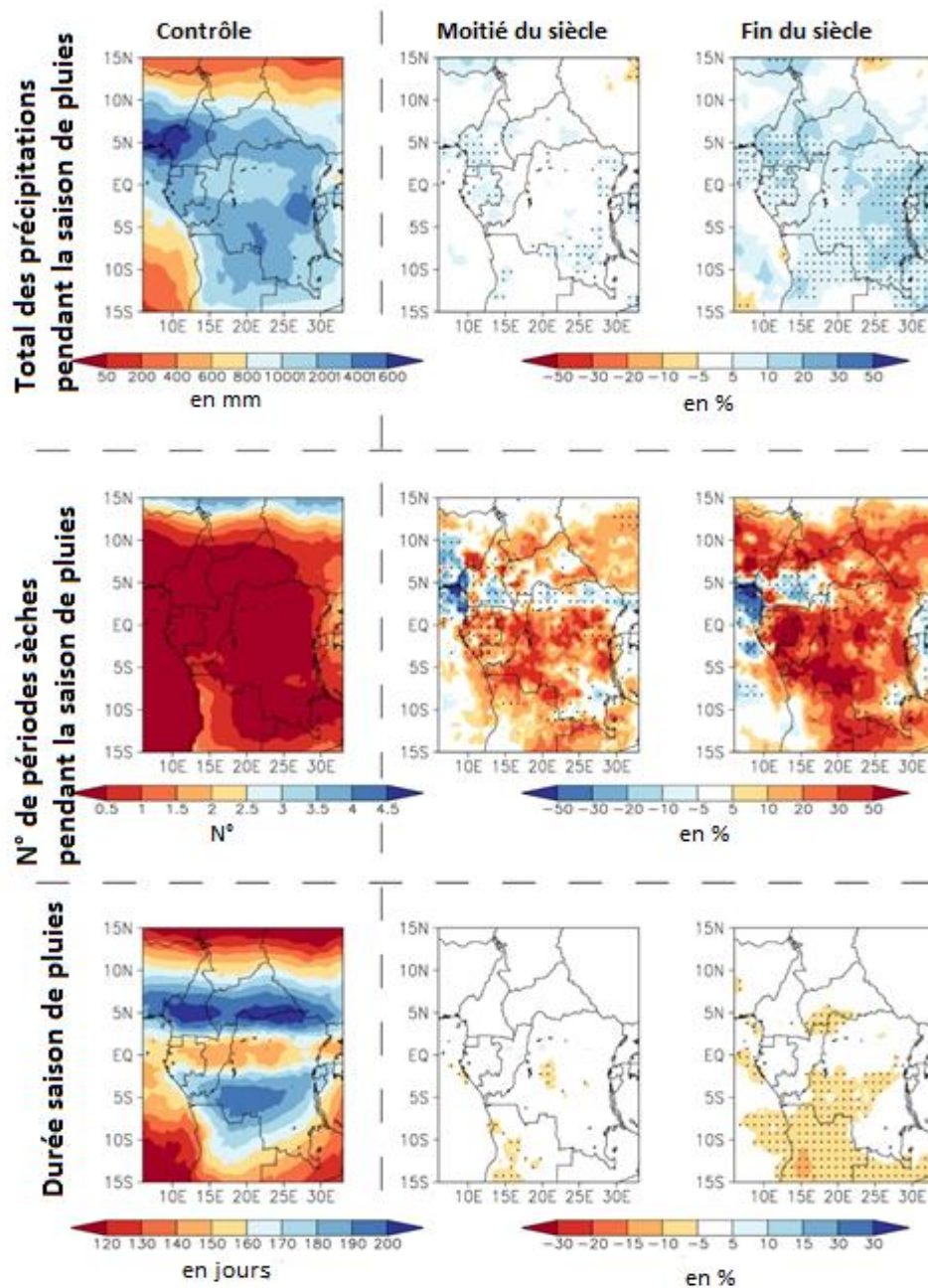


Figure 20 : Cartes des changes prévus pour le total des précipitations durant la saison des pluies (rangée supérieure), le nombre de périodes sèches durant la saison des pluies (rangée centrale) et la durée de la saison des pluies (rangée inférieure) dans le scénario de forte émission pour des périodes différentes. Les zones en pointillé indiquent les régions de changement « considérable », où au moins 66 % de tous les modèles prévoient un signe de changement dans la même direction.

Les prévisions moyennes des changements pour le nombre de périodes sèches pendant la saison des pluies sont plutôt en grande augmentation pour les majeures parties du domaine (notamment dans le scénario de forte émission et à environ la fin du siècle - voir la Figure 19, rangée centrale, panneau droit). Toutefois, dans les deux scénarios, une baisse considérable du nombre des périodes sèches est prévue pour quelques parties du sud-est du Cameroun et de la région du Golfe de Guinée. Quoi qu'il en soit, l'incertitude relative aux changements prévus est plutôt grande, étant donné que plusieurs régions ayant présenté de forts signaux de changement ne sont pas marquées en pointillé noir (et par conséquent, ne présentent pas de gros changements). Seuls très peu de changements sont prévus pour la durée de la saison des pluies ; cependant, il existe une tendance pour une saison de pluies assez légère pour les cas des deux scénarios. Cette tendance est un peu plus prononcée en cas de scénario de forte émission. Les amplitudes totales et potentielles des changements prévus des trois paramètres de saison de pluies et pour les cinq sous-zones sont représentées dans la Figure 18 (à gauche des 3 panneaux dans la colonne de

droite). Pour la pluviosité totale en saison pluvieuse, la marge potentielle des changements prévus est plutôt faible dans les régions humides (de -9 à +18 %) et légèrement plus grande dans la zone du nord (de -14 à +27 %) pour les deux scénarios. Pour toutes les zones, la marge potentielle est agrandie en cas de scénario de forte émission.

Alors que pour la durée de la saison pluvieuse tous les modèles convergent vers un faible changement (la marge probable toujours entre  $\pm 5$  %, indépendamment du scénario - voir la Figure 18, deuxièmes panneaux à partir de la droite), une très grande incertitude pèse sur les changements prévus par rapport aux nombres des périodes sèches (Figure 18, deuxièmes panneaux à partir de la gauche). Ceci est évidemment en partie dû au fait que durant la période de contrôle, très peu de périodes sèches par saison pluvieuse (souvent moins de 3 périodes sèches) ont été simulées et observées. Néanmoins, même si une grande incertitude repose également sur les changements « probables », il semble qu'une tendance nette pour toutes les zones et tous les scénarios prévoit une augmentation du nombre de périodes sèches pendant la saison sèche. Il est également question du fait que la pluviosité semble se produire de façon plus sporadique comme dans les conditions de nos jours.

## **6. Description des changements prévus dans le sous-ensemble des prévisions de changements climatiques utilisés pour les études d'évaluation du futur impact**

Toutes les analyses des changements prévus pour les différents modèles présentés jusqu'ici ont été effectuées sur la base de l'ensemble des données multimodèle et multiscénario disponible des prévisions des changements climatiques à l'échelle mondiale. En tout, cet ensemble de prévisions est constitué de données recueillies à partir de 77 simulations différentes (46 pour les scénarios de faible émission et 31 pour ceux de forte émission, voir le Tableau 2). Dans le meilleur des cas, toutes les prévisions seront à présent utilisées comme données pour les futures évaluations d'impact ou études d'adaptation. Ces études sont nécessaires, étant donné que les personnes sont concernées notamment par les impacts des potentiels changements climatiques et les méthodes possibles d'adaptation face à ces changements. Le véritable signal de changement climatique en lui-même est souvent une information de moindre importance pour les experts.

Cependant, pour plusieurs évaluations d'impact, il est tout simplement impossible d'utiliser une telle grande quantité de données, surtout au cas où une approche à outils multiples est envisagée pour une évaluation de l'impact en lui-même. Des exemples sont les modèles hydrologiques, agricoles et forestiers (tous utilisés dans ce projet - voir Beyene et coll., 2003 ; Ludwig et coll., 2013 et Van Garderen & Ludwig, 2013 pour plus de détails) qui nécessitent par ailleurs d'énormes ressources informatiques et ne peuvent pas être répétées 77 fois avec aisance (par exemple une fois pour toutes les informations sur les changements climatiques).

Par conséquent, dans la plupart des cas, seul un petit sous-ensemble de prévisions de changements climatiques est utilisé comme données pour des études d'évaluation des changements climatiques. Cependant, il est évident que cette action est dangereuse, en ce sens qu'une sous-sélection des prévisions de changement climatique pourrait avoir des impacts sur la marge de tout l'ensemble des signaux de changements climatiques prévus. Un exemple de cette situation est prévu dans la Figure 21. Dans ce cas, la moyenne des changements prévus pour la température moyenne annuelle (panneau de gauche) et les précipitations totales annuelles (panneau droit) sont présentées pour les deux scénarios séparément ainsi que la marge totale des changements prévus (scénarios de faible et forte émission combinés) pour chacun des quatre ensembles et pour toutes les 77 prévisions - chacun en moyenne sur la Zone 3. Pour le cas de toutes les prévisions (les barres de droite respectives), la marge potentielle (zone sombre) est également fournie pour les deux scénarios.

Dans le cas de la température annuelle moyenne, les différences des changements prévus parmi les quatre différents ensembles sont plutôt moindres. Pour tous les quatre ensembles de données, la prévision moyenne des changements relève respectivement de la marge probable de toutes les provisions pour les deux scénarios. Certaines différences, cependant, sont observées dans le cas des changements prévus pour les précipitations totales annuelles (panneau droit). Alors que les deux ensembles de données de prévisions MCG (AR4 et CMIP5) et l'ensemble de données corrigé de justesse et à échelle réduite WATCH convergent vers une légère croissance des précipitations dans le cas des deux scénarios (avec une

prévision moyenne de changement plutôt similaire), l'ensemble de données des modèles climatiques régionaux (RCM) indique précisément une baisse des futures précipitations. Cette différence est notamment prononcée dans le scénario d'émission élevée. En raison de la taille plutôt faible de l'ensemble des modèles régionaux (comparée à l'ensemble entier de toutes les autres simulations) les prévisions médianes de l'ensemble des RCM ne rentrent pas dans les marges probables des changements prévus pour le compte de toutes les prévisions (zone gris sombre - dans ce cas, les marges probables du scénario de faible émission et de forte émission se chevauchent).

Concernant la sous-sélection nécessaire pour les études d'évaluation d'impact, ce résultat indique que toute conclusion d'études futures sera considérablement différente au cas où seul l'ensemble de prévisions RCM est utilisé. Cependant, faut relever que ce résultat n'est fondé que pour les variables et la zone représentée dans la Figure 21. Au cas où d'autres régions et d'autres variables sont prises en compte, la situation peut s'avérer différente. Les Figures des autres zones et les prochains paramètres sont disponibles dans le « Document de rapport final interactif » (disponible en ligne sur <http://www.climate-service-center.de>).

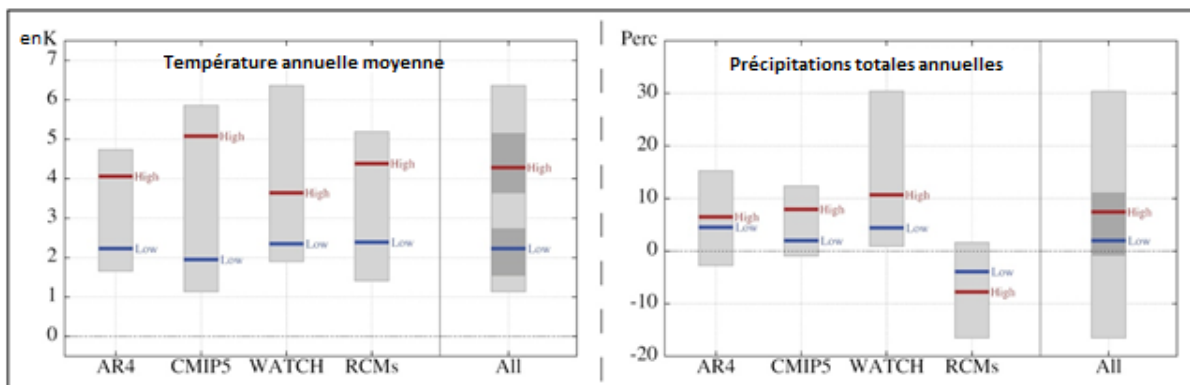


Figure 21 : Comparaison de la moyenne des changements prévus pour les scénarios de faible (lignes bleues respectives) et de forte (lignes rouges respectives) émission pour les ensembles de données et tous les ensembles de données combinées (narre droite dans la colonne correspondante) pour la température moyenne annuelle (partie gauche de la Figure) et les précipitations totales annuelles (partie droite de la Figure) pour la zone 3. Les barres gris clair représentent la marge totale des changements possibles, combinés pour les deux scénarios. Les sous-marges gris sombre décrivent les marges potentielles correspondantes aux scénarios de faible et forte émission. Dans le cas des précipitations, les marges potentielles se chevauchent.

Une méthode commune pour sous-sélectionner les prévisions à partir d'un grand ensemble est d'utiliser de préférence les prévisions des modèles qui sont le plus présents dans une région précise (par exemple, Johnson et coll., 201 ; Arnell, 2004). Cependant, il va sans dire que ce choix est soumis aux critères qui distinguent les bons modèles de performance des moins bons. En pratique, ceci dépend simplement du nombre des prévisions susceptibles d'être utilisées comme données pour de prochaines études.

Dans le cadre de ce projet, le signal de changement climatique prévu des cinq modèles les mieux performants de l'ensemble des données IPCC-AR4 ont été comparés au signal de l'ensemble total IPCC-AR4. La sélection était basée sur un indice d'efficacité (calculé à partir de la répartition des densités probables simulées et observées), la corrélation entre le cycle annuel et la justesse moyenne tant pour la température de 2m et précipitation sur l'ensemble bassin du Congo (voir la Figure 3 pour l'espace occupé). Comme données observées une fois de plus, le WFD quotidien a été utilisé. Les détails relatifs à l'indice d'efficacité peuvent être obtenus dans un article rédigé par Perkins et coll. (2007).

La Figure 22 représente une comparaison entre les changements moyens prévus pour les températures moyennes annuelle et saisonnière (les deux colonnes de gauche) et les précipitations totales annuelles et saisonnières (à droite des colonnes) pour tous les modèles de l'ensemble des données IPCC-AR4 (colonne gauche correspondante) et les cinq meilleures prévisions de performance (plus loin : BPM - colonne droite correspondante) pour le cas du scénario de forte émission (SRES A2). Dans le cas des changements de température prévus, un réchauffement accru est observé pour le sous-ensemble des BPM sur les régions du nord et du sud du bassin du Congo. Cependant, une Figure similaire de réchauffement est observée sur les parties centrales. Pour le total des précipitations sur de vastes parties du bassin du Congo un signal opposé est prévu dans les BPM comparés à l'ensemble total des prévisions du GIEC-RE4. Ces signaux opposés sont perceptibles dans les précipitations totales annuelles ainsi que durant les saisons différentes. Il est à noter que ces signaux opposés sont également statistiquement importants sur le 95e niveau de confiance.

Toutefois, il reste que la taille de la base de données pour le test statistique diffère considérablement selon les deux ensembles de données.

Au cas où le même sous-ensemble de modèles de prévision est comparé à l'ensemble total du GIEC-RE4 dans divers scénarios, la conclusion peut être différente. Dans le cas du scénario d'émission plus modéré A1B et d'émission faible (B1), par exemple, les différences entre l'ensemble complet et les changements prévus du sous-ensemble sont plus faibles (précipitation totale) ou inexistantes (température moyenne).

En comparant le résultat des cinq meilleurs modèles de performance de l'ensemble des données du GIEC RE4 à l'ensemble des 77 prévisions analysées dans ce rapport (par exemple Zone 3 dans la Figure 21) les cinq BPM semblent prévoir la baisse la plus grande en terme de précipitations totales annuelles alors que la grande majorité des prévisions des modèles disponibles (y compris les BPM du CMIP5) présentent tendance pour une croissance des chutes de pluie totales. Par conséquent, même si le choix des BPM pour les prochaines études est justifié, il tient lieu d'être conscient du fait qu'ils peuvent se grouper à une extrémité de la répartition. Par ailleurs, l'indépendance requise d'un ensemble de quelques BPM uniquement est discutable.

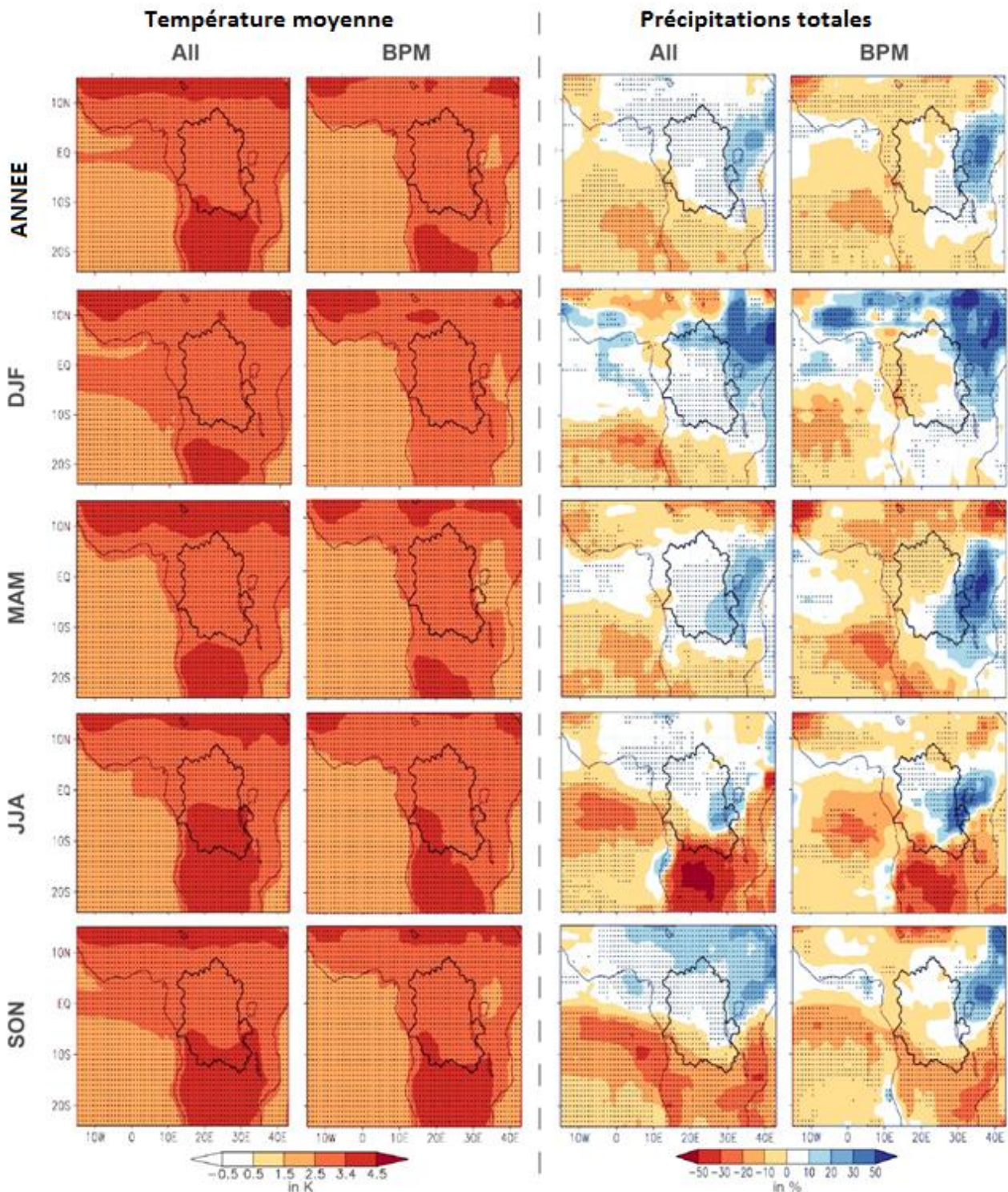


Figure 22 : Comparaison des changements projetés des cinq meilleurs modèles de performance (BPM) de l'ensemble des données du GIEC-RE4 comparé à toutes les projections de l'ensemble des données du GIEC-RE4 sur la température moyenne (partie gauche) et les précipitations totales (partie droite) dans le scénario de forte (A2) émission pour la fin du siècle. Les zones en pointillé indiquent les régions ayant des signaux de changement climatique statistiquement significatif pour le 95e niveau de confiance grâce au test *Mann-Whitney U non paramétrique*.

Le sous-ensemble parfait des prévisions des modèles serait donc, un ensemble qui d'une part, agit de façon raisonnablement convenable aux données climatiques observées, mais également, dispose du potentiel pour représenter de façon adéquate la marge des changements prévus pour tous les paramètres, les délais, les scénarios et ceci sur l'ensemble de la région. Il est évident qu'un tel sous-ensemble de prévisions n'existera jamais. Alors, la priorité revient au sous-ensemble dont la performance sur la période de contrôle ou les marges des changements prévus est la plus importante. Pour la plupart des modèles d'évaluation de l'impact, plus tôt ils sont utilisés, plus importants ils sont. La raison en est que seules les données d'entrée

qui représentent bien les observations permettent de juger la performance des modèles d'impact.

Au cours du projet « Scénarios de changements climatiques pour le bassin du Congo », le sous-ensemble des données WATCH corrigées avec justesse et d'échelle réduite a été utilisé comme donnée pour les prochaines études (voir Beyene et coll., 2013 ; Ludwig et coll., 2013 et Van Garderen & Ludwig, 2013 pour plus de détails). Cet ensemble de données comprend trois prévisions pour le scénario de faible émission et trois simulations pour le scénario de forte émission. En raison du fait que l'ensemble de données est corrigé de justesse, il agit pour la plupart des variables en comparaison aux observations (par exemple section 4).

Dans la prochaine section cependant, une évaluation sera faite de la représentativité des changements prévus de l'ensemble des données WATCH, comparée à la marge totale des changements prévus de l'ensemble entier. Pour cela, les histogrammes des modifications prévues de tous les modèles ont été calculés pour toutes les zones et tous les paramètres. Ces histogrammes définissent d'une part la marge totale des changements prévus (en abscisse) et d'autre part la fréquence d'un signal de changement prévu (en ordonnée). Les changements prévus des simulations de l'ensemble des données (trois prévisions pour le scénario de faible et de forte émission chacune) sont intégrés par les flèches bleues (faible) et rouges (forte). Pour les zones et les variables suivantes, ces histogrammes sont représentés dans la Figure 23. Il est à noter que les histogrammes résument les changements prévus à la fin du siècle comparés à la période de contrôle. Une collection complète de Figures représentant les histogrammes des changements prévus de l'ensemble total et les changements correspondants dans le sous-ensemble de la prévision WATCH, pour toutes les zones, les variables et les deux futures périodes de temps, est disponible dans « Document interactif de rapport final » (disponible en ligne sur [http : //www.climate-service-center.de](http://www.climate-service-center.de)).

Pour les changements prévus de température annuelle moyenne, les prévisions des données du sous-ensemble WATCH s'étendent sur une marge plus grande. Par conséquent, elles représentent la marge totale des changements disponibles de façon plutôt satisfaisante, quoique le sous-ensemble soit légèrement excentré vers l'extrémité des histogrammes. Pour le nombre des jours froids, la marge des changements prévus du sous-ensemble WATCH est centrée autour du maximum de l'histogramme, indiquant que le sous-ensemble concorde bien avec la majorité des changements prévus, même si les extrêmes ne sont pas représentés. Pour les changements prévus des précipitations totales annuelles, le sous-ensemble des prévisions WATCH s'étendent du maximum de sa fréquence vers l'extrémité supérieure de l'histogramme pour les Zones 1 et 3. Dans ces zones, le sous-ensemble des changements prévus représente convenablement l'ensemble total des changements prévus. Dans le cas de la Zone 4, les changements prévus du sous-ensemble choisi sont tous rassemblés à l'extrémité supérieure de l'histogramme (indépendant du scénario), surestimant probablement ainsi la croissance prévue des précipitations totales annuelles. Les résultats des changements prévus des précipitations annuelles totales peuvent directement être transférés dans la représentation des changements prévus de l'intensité des fortes pluies. Pour le nombre des périodes sèches durant la saison pluvieuse, les changements prévus de l'ensemble total s'étendent sur une vaste marge d'une baisse de 50 % à une augmentation à hauteur de 140 %. Cette marge importante est causée par le plus petit nombre d'occasions de périodes sèches durant la période de contrôle. Par conséquent, il n'est pas surprenant que le sous-ensemble des prévisions choisies ne représente pas la marge totale des changements prévus. Pour la Zone 1, le sous-ensemble des changements prévus représente la marge de la majorité des changements de l'ensemble total. Pourtant les zones 3 et 4, les sous-ensembles sont plus représentatifs des limites inférieures de l'ensemble total de marge. Si toutes les variables sont considérées (voir la collection des Figures dans la version digitale), les changements prévus du sous-ensemble des prévisions pour la fin du siècle sont presque tous ceux des zones et des variables relevant bien de la marge de l'ensemble totale des changements prévus. La plupart des changements du sous-ensemble s'étendent également sur une marge suffisamment grande pour représenter correctement la majorité des changements prévus dans l'ensemble total de l'ensemble des données. Les exceptions sont des changements prévus des précipitations totales (annuelles et durant la saison pluvieuse) dans la zone 4 sur laquelle les changements prévus par le sous-ensemble sont toutes regroupés à l'extrémité supérieure de l'histogramme de l'ensemble total. Un autre cas de disparité entre l'ensemble total et les prévisions du sous-ensemble est la fréquence des fortes pluies. Les changements prévus du sous-ensemble dans ce cas sont considérablement importants sur toutes les zones.

En résumé, pour plusieurs paramètres les changements prévus des simulations de l'ensemble de données WATCH représentent correctement l'ensemble total des changements prévus. Cependant, il existe des

régions où l'ensemble de données WATCH représente un cas isolé. Ce fait doit être relevé lors de l'interprétation des résultats des prochaines études compilées dans ce projet. Notamment dans la zone 4, l'augmentation des précipitations prévues dans l'ensemble de données WATCH est notamment plus grande que toutes les autres prévisions. Cette disparité pourrait être liée à la correction de justesse appliquée. Il a été montré que le WFD surestime énormément les précipitations totales annuelles dans cette région, comparée aux données de la station. Par conséquent ces données corrigées de justesse peuvent amplifier grandement les prochaines précipitations prévues des trois MCG de l'ensemble WATCH.

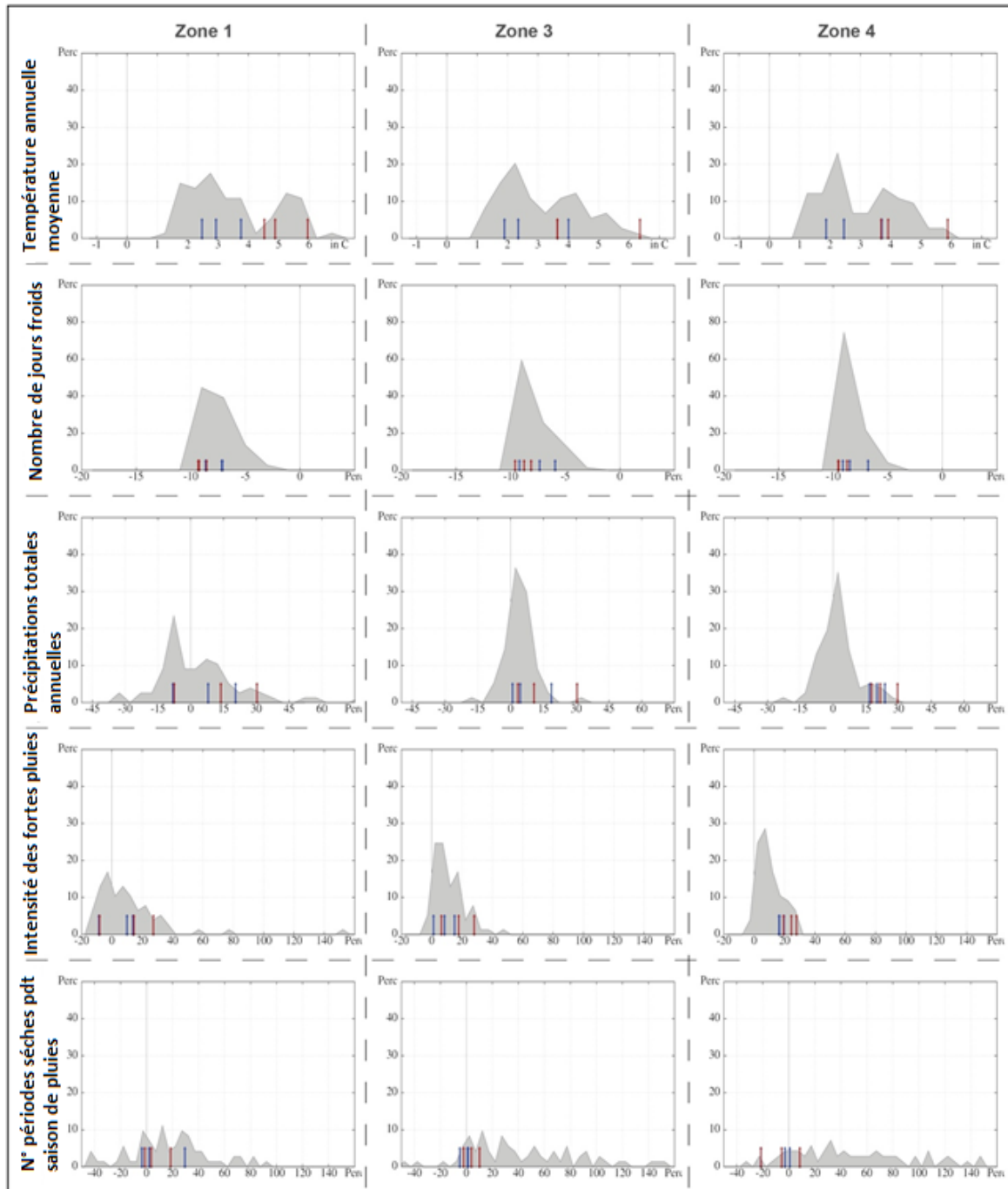


Figure 23 : Histogrammes de tous les changements prévus en cas de scénarios d'émissions faibles ou élevées. Les flèches bleues et rouge indiquent les changements prévus des sous-ensembles choisis pour les scénarios d'émissions faibles et élevées respectivement.

## 7. Résumé et conclusion

L'évaluation des changements climatiques présentée dans ce rapport repose sur un grand ensemble unique de prévisions émises à partir de modèles climatiques globaux du projet CMIP3 (base de données du 4<sup>e</sup> rapport d'évaluation du GIEC) et du projet CMIP5 (base des données du 5<sup>e</sup> rapport d'évaluation du GIEC attendu en 2013). Par ailleurs, les prévisions du projet EU-WATCH corrigées par biais et d'échelle statistique réduite ont été insérées, ainsi que celles des modèles climatiques régionaux. En dépit du fait que la plupart des prévisions climatiques régionales sont conçues dans le cadre de ce projet, quelques simulations des données d'archives préliminaires du CORDEX sont également prises en compte pour l'analyse.

Pour l'analyse des changements climatiques potentiels, deux éventualités ont été considérées, à savoir, un scénario d'émission « élevée » (associant les prévisions climatiques des scénarios d'émissions SRES A2 et RCP8.5) et un scénario d'émission « faible » (associant les prévisions climatiques des scénarios d'émissions SRES B1, RCP4.5 et RCP2.6). En somme, un ensemble de 46 prévisions différentes a été analysé pour le cas du scénario d'émission faible et de 31 prévisions pour celui d'émission élevée. Ce grand ensemble unique de bases de données de prévisions de divers types (modèles climatiques globaux, prévisions climatiques régionales et prévisions globales statistiquement corrigées par biais et d'échelle réduite) favorise pour la première fois l'identification des profils et des marges de changements climatiques qui y sont liées.

Les principaux résultats de l'évaluation des changements climatiques peuvent être résumés ainsi qu'il suit : pour ce qui est de la température à proximité de la surface, tous les modèles d'évaluation justifient un réchauffement général vers la fin du siècle pendant toutes les saisons, indépendamment du scénario sous-jacent. Sur une base annuelle, la probabilité d'un réchauffement de l'ordre de +1,5 à +3 C pour le scénario d'émission faible et +3,5 à +6 C peut être envisagée vers la fin du 21<sup>e</sup> siècle. En général l'augmentation de la température prévue est légèrement supérieure à la moyenne dans les parties nord de la région et légèrement inférieure à la moyenne dans les zones centrales. De même, pour ce qui est des extrêmes de température (fréquence des jours et les nuits froids/chauds), tous les modèles convergent vers une baisse/hausse dans le futur. Plus précisément, des jours et des nuits chauds sont prévus beaucoup plus fréquemment à l'avenir, particulièrement dans le cas de scénario d'émission élevée. Étant donné que pour les paramètres relatifs à la température toutes les 77 projections analysées convergent vers les changements projetés, ces changements peuvent être considérés comme étant très robustes.

Pour le total des précipitations, les résultats des évaluations conjointes des prévisions ne sont pas aussi précis que pour la température. Dans toutes les zones, certains modèles prévoient une augmentation des précipitations totales annuelles et d'autres, une baisse. Au cas où toute la marge des changements prévus dans le total annuel des précipitations est considérée, tous les modèles prévoient un changement inférieur ou égal à  $\pm 30\%$  vers la fin du 21<sup>ème</sup> siècle pour la plupart des zones du domaine avec une tendance générale pour une légère croissance dans le total annuel des précipitations futures. Cependant, dans les zones du nord plus arides, une forte hausse des précipitations annuelles (marge totale à hauteur d'environ + 75 %) est prévue, notamment en rapport avec l'expansion au nord de la zone de convection tropicale, expansion déjà décrite plus haut. Ces résultats sont indépendants des scénarios d'émission sous-jacents. Si seule la marge probable est considérée, les changements prévus des précipitations totales annuelles sont compris entre  $\sim -10$  et  $+10\%$  ( $-10$  à  $+30\%$  au nord) et entre  $-5$  et  $+10\%$  ( $-10$  à  $+15\%$  au nord) pour les scénarios d'émission élevée et faible respectivement. Ce constat une fois de plus, nous oriente vers la conclusion selon laquelle, sur la base du grand ensemble des projections des changements climatiques évaluées, il n'est pas probable que des changements drastiques de la pluviométrie totale annuelle se produisent à l'avenir dans la région du grand bassin du Congo.

Certes le volume des précipitations totales annuelles peut ne pas changer de façon dramatique ; cependant, il est prévu des changements substantiels des caractéristiques de la pluviométrie. Un exemple est la hausse probable de l'intensité des prochains épisodes de forte pluviométrie (la marge probable pour la plupart des zones est positive, à hauteur de  $\sim +30\%$ ). En outre, les projections révèlent une forte augmentation future de la fréquence des épisodes de sécheresse durant la saison des pluies dans la plupart des parties du domaine. Ce fait indique une répartition plus sporadique des pluies à l'avenir.

En résumé, l'évaluation des changements climatiques pour le grand bassin du Congo révèle qu'il est improbable que les changements projetés dans la pluviométrie entraînent une pénurie d'eau dans la



région. Cependant, l'occurrence de certaines périodes sèches plus longues et plus fréquentes serait plus probable dans le futur. Cette conclusion est indépendante des scénarios d'émission sous-jacents. En termes de projections pour la température de l'air à proximité de la surface, le réchauffement projeté est substantiellement plus important dans le scénario d'émission élevée, et pourrait par conséquent avoir un plus large impact sur l'environnement dans la région.

## Références bibliographiques

Aguilar E., Barry A.A., Brunet M., Ekan L., Fernandes A., Massoukina M., Mbah J., Mhanda A., do Nascimento D.J., Peterson T.C., Umba O., Tomou M., Zhang X. (2009): Changes in temperature and precipitation extremes in western central Africa, Guinea Conakry, and Zimbabwe, 1955-2006. In: *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 114, D02115, doi: 10.1029/2008JD011010.

Arnell N.W. (2004): Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios. In: *Global Environmental Change*, 14 (1), 31–52.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2003.10.006>.

Balas N., Nicholson S.E., Klotter D. (2007): The relationship of rainfall variability in West Central Africa to sea-surface temperature fluctuations. In: *International Journal of Climatology*, 27, 10, 1335-1349, doi: 10.1002/joc.1456.

Beyene T., Ludwig F., Franssen W. (2013): The potential consequences of climate change in the hydrology regime of the Congo River Basin. In: *Climate Change Scenarios for the Congo Basin*. [Haensler A., Jacob D., Kabat P., Ludwig F. (eds.)]. Climate Service Centre Report No. 11, Hamburg, Germany, ISSN: 2192-4058.

Bultot F. and Griffiths J.F. (1972): The equatorial wet zone. In: *World Survey of Climatology*, 10, *Climates of Africa*, 259-311.

Clarke L., Edmonds J., Jacoby H., Pitcher H., Reilly J., Richels R. (2007): Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations. Sub-report 2.1A of Synthesis and Assessment Product 2.1 by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. Department of Energy, Office of Biological & Environmental Research, Washington, 7 DC., USA, 154 pp.

Cubasch U., Meehl G. A., Boer G. J., Stouffer R. J., Dix M., Noda A., Senior C. A., Raper S. and Yap K. S. (2001): Projections of future climate change. In: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton, J. T., Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C. I. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, ISBN 0521 01495 6.

Djomou Y.Z., Monkam D., Lenouo, A. (2009): Spatial variability of rainfall regions in West Africa during the 20th century. In: *Atmos. Sci. Let.* 10: 9–13 DOI: 10.1002/asl.202.

Fowler H.J., Ekström M., Blenkinsop S. and Smith A.P. (2007): Estimating change in extreme European precipitation using a multimodel ensemble. In: *J. Geophys. Res.*, 112, D18104, doi:10.1029/2007JD008619

Fujino J., Nair R., Kainuma M., Masui T., Matsuoka Y. (2006): Multi-gas mitigation analysis on stabilization scenarios using AIM global model. *Multigas Mitigation and Climate Policy*. In: *The Energy Journal*, 3 (Special Issue).

Giorgi F., Jones C. and Asrar G. R. (2009): Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. In: *WMO Bulletin*, 58, 3, 175 – 183.

Gleckler P.J., Taylor K.E., Doutriaux C. (2008): Performance metrics for climate models. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012)*, 113, D6, DOI: 10.1029/2007JD008972.

Hagemann S., Chen C., Haerter J.O., Heinke J., Gerten D., Piani C. (2011): Impact of a Statistical Bias Correction on the Projected Hydrological Changes Obtained from Three GCMs and Two Hydrology Models. *J. Hydrometeorol* 12, 4: 556-578.

Harding R., Best M., Blyth E., Hagemann S., Kabat P., Tallaksen L.M., Warnaars T., Wiberg D., Weedon G.P.,

- van Lanen H., Ludwig F., Haddeland I. (2011): WATCH: Current Knowledge of the Terrestrial Global Water Cycle. In: *Journal of Hydrometeorology*, 1, 3-10.
- Hawkins E. and Sutton R. (2009): The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions. In: *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 90, 1095-1107.
- IPCC (2007): *Climate Change 2007 – The Physical Science Basis*. In: Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K., Tignor M., Miller H.. [ed]: *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jacob D. (2001): A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. In: *Meteorology and Atmospheric Physics* 77, 61-73.
- Johnson F., Westra S., Sharma A., Pitman A.J. (2011): An Assessment of GCM Skill in Simulating Persistence across Multiple Time Scales. In: *J. Climate*, 24, 3609–3623. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2011JCLI3732.1>.
- Koster R.D., Dirmeyer P.A., Guo Z., Bonan G., Chan E., Cox P., Gordon C.T., Kanae S., Kowalczyk E., Lawrence D., Liu P., Lu C.-H., Malyshev S., McAvaney B., Mitchell K., Mocko D., Oki T., Oleson K., Pitman A., Sud Y.C., Taylor C.M., Versegny D., Vasic R., Xue Y., Yamada T. (2004): Regions of Strong Coupling Between Soil Moisture and Precipitation. In: *Science* 305 5687, 1138-1140.
- Leggett J., Pepper W.J., Swart R.J. (1992): Emissions Scenarios for IPCC: an update. In *Climate Change 1992. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment* eds Houghton, J.T., B.A. Callander & S.K. Varney. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 69–95.
- Leroux M. (2001): *The Meteorology and Climate of Tropical Africa*, Springer, ISBN 978-3-540-42636-3.
- Liebmann B., Blade I., Kiladis G.N., Carvalho L.M.V., Senay G.B., Allured D., Leroux S., Funk C. (2012): Seasonality of African Precipitation from 1996 to 2009. In: *Journal of Climate*, 25, 12, 4304-4322 doi: 10.1175/JCLI-D-11-00157.1.
- Ludwig F., Franssen W., Jans W., Beyenne T., Kruijt B., Supit I. (2013): Climate change impacts on the Congo Basin region. In: *Climate Change Scenarios for the Congo Basin*. [Haensler A., Jacob D., Kabat P., Ludwig F. (eds.)]. Climate Service Centre Report No. 11, Hamburg, Germany, ISSN: 2192-4058.
- Masson D., Knutti R. (2011): Climate model genealogy. In: *Geophysical Research Letters* 38, 8.
- Mastrandrea M.D., Field C.B., Stocker T.F., Edenhofer O., Ebi K.L., Frame D.J., Held H., Kriegler E., Mach K.J., Matschoss P.R., Plattner G., Yohe G.W., Zwiers F.W. (2010): Guidance note for lead authors of the IPCC Fifth Assessment Report on consistent treatment of uncertainties. IPCC. Available online at [www.ipcc-wg2.gov/meetings/CGCs/index.html](http://www.ipcc-wg2.gov/meetings/CGCs/index.html).
- McGregor, G.R., King J.C., Harangozo S.A. (1998): Climate anomaly wave-train patterns linking southern low and high latitudes during south Pacific warm and cold events. In: *International Journal of Climatology*, 18, 11, 1181-1193, doi: 10.1002/(SICI)1097-0088(199809)18:11<1181::AID-JOC332>3.0.CO;2-X.
- Moss R. H., Edmonds J.A., Hibbard K.A., Manning M.R., Rose S.K., van Vuuren D.P., Carter T.R., Emori S., Kainuma M., Kram T. (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. In: *Nature* 463, p. 747-756.
- Nakićenović, N., Swart R. (2000): *IPCC Special Report on Emissions Scenarios*, 599 pp., Cambridge Univ. Press, New York.
- New M., Lister D., Hulme M., Makin I. (2002): A high-resolution data set of surface climate over global land areas. In: *Climate Research*, 21, 1, doi:10.3354/cr021001.
- Nicholson S.E. (1996): A review of climate dynamics and climate variability in Eastern Africa. In: Johnson

- T.C., Odada E.O. [eds.]: *The Limnology, Climatology and Paleoclimatology of the East African Lakes*. Gordon and Breach, Amsterdam, pp. 25–56.
- Nicholson S.E. (2001): Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries. In: *Climate Research*, August 15, Vol 14, 123-144.
- Nicholson S.E., Grist J.P. (2003): The seasonal evolution of the atmospheric circulation over West Africa and equatorial Africa. In: *Journal of Climate*, 16, 7, 1013-1030.
- Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A. (2007): Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1633–1644.
- Perkins S.E. et al. (2007): Evaluation of the AR4 Climate Models' Simulated Daily Maximum Temperature, Minimum Temperature, and Precipitation over Australia Using Probability Density Functions. In: *J. Clim.*, Vol. 20, pp. 4356–4376.
- Piani C., Weedon G., Best M., Gomes S., Viterbo P., Hagemann S., Haerter J.O. (2010): Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. *Journal of Hydrology* 395, 34, 199-215.
- Riahi K., Gruebler A., Nakicenovic N. (2007): Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. In: *Technological Forecasting and Social Change* 74, 7, 887-935.
- Samuelsson P., Jones C.G., Willen U., Ullersti, A., Gollvik S., Hansson U., Jansson C., Kjellstrom E., Nikulin G., Wyser K. (2011): The Rossby Centre Regional Climate model RCA3: model description and performance. *Tellus Series A – Dynamic Meteorology and*, 63, 1, 4-23, doi: 10.1111/j.1600-0870.2010.00478.x.
- Trenberth, K.E., Jones P.D., Ambenje P., Bojariu R., Easterling D., Klein Tank A., Parker D., Rahimzadeh F., Renwick J.A., Rusticucci M., Soden B. and Zhai P. (2007): Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- van Garderen, Ludwig F. (2013): Climate change adaptation options for the Congo Basin countries. In: *Climate Change Scenarios for the Congo Basin*. [Haensler A., Jacob D., Kabat P., Ludwig F. (eds.)]. Climate Service Centre Report No. 11, Hamburg, Germany, ISSN: 2192-4058.
- van Vuuren D.P., Den Elzen M.G.J., Lucas P. L., Eickhout B., Strengers B.J., van Ruijven B., Wonink S., van Houdt R. (2007): Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. In: *Climatic Change*, 81,2, 119-159, doi: 10.1007/s10584-006-9172-9.
- van Vuuren D.P., Edmonds J., Thomson A., Riahi K., Kainuma M., Matsui T., Hurtt G.C., Lamarque J-F., Meinshausen M., Smith S. (2011): Representative concentration pathways: an overview. In: *Climatic Change*, 109, 5-31.
- Wanji S., Tanke T., Atanga S.N., Ajonina C., Nicholas T., Fontenille D. (2003): Anopheles species of the mount Cameroon region: biting habits, feeding behaviour and entomological inoculation rates. In: *Tropical Medicine & International Health*, 8, 7, 643–649, DOI: 10.1046/j.1365-3156.2003.01070.x
- Weedon G.P., Gomes S., Viterbo P., Shuttleworth W.J., Blyth E., Osterle H., Adam J.C., Bellouin N., Boucher O., Best M. (2011): Creation of the WATCH Forcing Data and Its Use to Assess Global and Regional Reference Crop Evaporation over Land during the Twentieth Century. In: *Journal of Hydrometeorology*, 12, 823–848.

# Scénarios des changements climatiques dans le bassin du Congo

## Impacts potentiels des changements climatiques sur le régime hydrologique du bassin du fleuve Congo

Tazebe Beyene  
Fulco Ludwig  
Wietse Franssen



On behalf of



Federal Ministry for the  
Environment, Nature Conservation  
and Nuclear Safety

of the Federal Republic of Germany

**giz**



WAGENINGEN UNIVERSITY  
WAGENINGEN UR

**CSC**  
Climate Service Center  
Germany



Eine Einrichtung der GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH



# Impacts potentiels des changements climatiques sur le régime hydrologique du bassin du fleuve Congo

Tazebe Beyene  
Fulco Ludwig  
Wietse Franssen

**Le présent rapport doit être cité comme suit :**

Beyene T., Ludwig F., Franssen W. (2013): The potential consequences of climate change in the hydrology regime of the Congo River Basin. *In: Climate Change Scenarios for the Congo Basin.* [Haensler A., Jacob D., Kabat P., Ludwig F. (eds.)]. Climate Service Centre Report No. 11, Hamburg, Germany, ISSN: 2192-4058.

« *Impacts potentiels des changements climatiques sur le régime hydrologique du bassin du fleuve Congo* »

Partie de la série : *Scénarios des changements climatiques dans le bassin du Congo*

Auteurs: Tazebe Beyene, Fulco Ludwig, Wietse Franssen

Mise en page et édition: Linda van Garderen

Date: Février 2013

Ministère fédéral allemand de l'Environnement, de la Conservation de la nature et de la Sûreté nucléaire (BMU) / Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), Allemagne / Université de Wageningen, Pays-Bas / Centre de service climatologique (CSC), Allemagne.

Photo de couverture: «Vue aérienne d'un fleuve en zone tropicale»@ thobo/ fotolia.de



## RÉSUMÉ

Les changements climatiques futurs pourront avoir un impact majeur sur les systèmes hydrologiques. En effet, le réchauffement de la planète pourrait accentuer l'évaporation et modifier les régimes pluviaux. Une simulation des régimes hydrologiques actuel et futur, du bassin du fleuve Congo, a été effectuée à l'aide du modèle hydrologique VIC à grande échelle. Les analyses ont été réalisées sur la base d'un sous-ensemble de 6 scénarios climatiques différents. Ces scénarios ont été élaborés à partir des résultats à biais corrigé de trois MCG, combinés à ceux d'un scénario pessimiste (A2) et d'un scénario optimiste d'émissions de gaz à effet de serre (B1). S'agissant de l'ampleur des changements au niveau du régime des précipitations, des différences ont été observées entre les MCG et les scénarios d'émissions. Cependant, les trois MCG prévoient un scénario oscillant entre pluies modérées et fortes précipitations pour le 21<sup>e</sup> siècle. La simulation des modèles a révélé que les changements climatiques induiraient une augmentation du taux d'évaporation sur toute l'étendue du bassin. D'ici à la fin du 21<sup>e</sup> siècle, on enregistre, en moyenne, une augmentation du taux d'évaporation de 10%, pour le scénario A2, et de 8%, pour le scénario B1. Par ailleurs, le bassin du Congo connaîtra, en moyenne, d'ici au milieu du siècle, une augmentation du ruissellement de 15% pour le scénario A2, et de 10% pour le scénario B1, (cf. tableau 3). Par ailleurs, le bassin du Congo connaîtra, en moyenne, d'ici à la fin du siècle, une augmentation du ruissellement de 27% pour le scénario A2, et de 23% pour le scénario B1. Les 3 modèles climatiques ont donné à voir des différences significatives, en termes de variations du ruissellement. On note une augmentation du ruissellement, particulièrement au centre et à l'ouest du bassin du Congo. Les résultats obtenus, pour les régions frontalières du nord, du sud et de l'ouest, présentent des différences considérables. Ici, on enregistre des hausses négligeables et parfois une baisse du niveau de ruissellement. En raison de l'élévation du niveau de ruissellement, le débit du fleuve augmente. Près de l'embouchure du fleuve, il est à prévoir, à la fin du 21<sup>e</sup> siècle, une augmentation moyenne multimodèle du débit (27% pour le scénario B1 et 28% pour le scénario A2). Cependant, il existe une marge élevée d'incertitude, s'agissant des changements que le débit du fleuve pourra connaître à l'avenir. Le modèle climatique ECHAM5 prévoit, vers la fin du siècle, des augmentations de débit, avec un pic de 73% pour le scénario A2. Le modèle IPSL, quant à lui, indique une augmentation allant jusqu'à 18%. Les changements de débit varient en fonction des saisons. Tous les modèles climatiques révèlent une augmentation du débit pendant la saison pluvieuse. Cependant, deux modèles climatiques prévoient une baisse du débit en saison sèche, au cours du 21<sup>e</sup> siècle. Tous les modèles montrent que, par rapport au climat actuel, la différence entre la saison sèche et la saison pluvieuse va s'accroître. En effet, on observera une recrudescence et une intensification des précipitations extrêmes. En conclusion, la variabilité du régime hydrologique sera accrue, en raison de l'intensification de la variabilité climatique. La différence entre les saisons et entre les années est appelée à s'accroître à l'avenir. Par conséquent, il est nécessaire de se préparer à une recrudescence de phénomènes hydrologiques extrêmes.

**Mots-clés:** Ressources en eau, Lac Tchad, climat futur, scénarios, disponibilité, changements climatiques

---

## Table des matières

<b>RÉSUMÉ</b> .....	
<b>1.0 INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>2.0. DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE</b> .....	<b>3</b>
2.1. LE BASSIN DU FLEUVE CONGO .....	<b>3</b>
2.2. DONNÉES CLIMATIQUES HISTORIQUES ET PRÉVISIONNELLES.....	<b>4</b>
2.3. APERÇU DU MODÈLE DE SIMULATION HYDROLOGIQUE .....	<b>5</b>
2.3.1. VIC –MODÈLE HYDROLOGIQUE DE SURFACE TERRESTRE .....	<b>6</b>
<b>3.0 RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION</b> .....	<b>7</b>
3.1. CHANGEMENTS AU NIVEAU DU RÉGIME HYDROLOGIQUE .....	<b>8</b>
3.1.1. VARIATIONS DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE.....	<b>8</b>
3.1.2. VARIATIONS DE LA MOYENNE DES PRÉCIPITATIONS .....	<b>10</b>
3.1.3. VARIATIONS DES CONDITIONS CLIMATIQUES EXTRÊMES.....	<b>12</b>
3.1.4. ÉVAPORATION.....	<b>16</b>
3.1.5. RUISSELLEMENT .....	<b>18</b>
3.1.6. DÉBIT .....	<b>21</b>
<b>4.0. RÉSUMÉ ET CONCLUSION</b> .....	<b>23</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	<b>24</b>
<b>ANNEXES</b> .....	<b>28</b>
<b>ANNEXE 1</b> DEBITS NATURALISES ET OBSERVES DU FLEUVE DU CONGO .....	<b>II</b>
<b>ANNEXE 2</b> SERIES CHRONOLOGIQUES DE LA TEMPERATURE ANNUELLE MOYENNE ET NIVEAU DES ANOMALIES DES PRECIPITATIONS .....	<b>V</b>
<b>ANNEXE 3</b> CYCLES MOYENS SAISONNIERS ET STATISTIQUES RELATIFS AU BASSIN DU FLEUVE CONGO ..	<b>VI</b>
<b>ANNEXE 4</b> DISTRIBUTION SPATIALE DES PREVISIONS MULTIMODELES DES VARIATIONS DE LA MOYENNE DES PRECIPITATIONS .....	<b>IX</b>
<b>ANNEXE 5</b> ANOMALIES DE LA MOYENNE ANNUELLE DES TEMPERATURES ET DES PRECIPITATIONS.....	<b>X</b>
<b>ANNEXE 6</b> TENDANCES DES TEMPERATURES .....	<b>XIVV</b>

## 1.0 INTRODUCTION

Les effets néfastes des changements climatiques, notamment la distribution irrégulière des précipitations dans le temps et dans l'espace, occupent une place importante dans la définition des caractéristiques hydrologiques d'un bassin fluvial. D'après les prévisions, le réchauffement de la planète entraînera, d'ici à 2080, une élévation de la température moyenne de la Terre, de l'ordre de 3°C (GIEC, 2007). La hausse des températures aura un impact majeur sur les processus hydrologiques, qui, à leur tour, auront une incidence sur le niveau des précipitations. Les progrès récents en matière de modélisation hydrologique des systèmes climatiques et de la surface de la terre ont contribué, de manière significative, aux études d'impact des changements climatiques, à l'échelle régionale et mondiale, à travers des scénarios tendanciels d'émissions (GIEC (2001, 2007). D'après les études d'impact des changements climatiques, menées sur la base de scénarios de changements climatiques au cours du 21<sup>e</sup> siècle, le continent africain enregistrera le niveau le plus élevé de réchauffement, avec des conséquences dramatiques sur les moyens de subsistance (Arnell, 2004, Hulme *et al.*, 2005). Cependant, en termes de changements saisonniers et de variabilité, tous les scénarios ne prévoient pas une variation du niveau des précipitations sur l'ensemble du continent (Conway 2011; Conway et Schipper 2011; GIEC, 2001).

Parmi les premières études des changements climatiques menées en Afrique, à l'aide de données expérimentales, on peut citer: Hernes *et al.* (1995) et Ringius *et al.* (1996), qui ont élaboré des scénarios de changements climatiques pour le continent africain. Leurs études prévoient, à l'horizon 2050, une hausse des températures (1,6°C dans le Sahara et dans les régions semi-arides de l'Afrique australe; 1,4°C dans les pays de l'Afrique équatoriale). Ces études, tout comme celles de Joubert *et al.* (1996), prévoient, à l'horizon 2050, une élévation du niveau de la mer, de l'ordre de 25 cm, sur les côtes africaines. Une approche plus sélective, en matière d'utilisation d'expériences avec MCG, a été mise au point par Hulme *et al.* (1999, 2001). Cependant, ces études n'offrent qu'une vision globale de l'impact des changements climatiques futurs à travers le continent. Par conséquent, elles ne permettent pas de prendre la mesure des conséquences des changements climatiques à venir sur le système hydrologique et sur les ressources en eau du bassin du fleuve Congo.

L'incidence des changements climatiques futurs sur les réseaux hydrographiques d'eau douce viendra exacerber les problèmes engendrés par d'autres contraintes telles que la croissance démographique, le changement de l'activité économique, les changements au niveau de l'utilisation des sols et l'urbanisation (Goulden *et al.*, 2009). Les besoins en eau (irrigation, consommation des ménages, production hydroélectrique) vont augmenter dans les prochaines décennies. Cette augmentation sera due, pour l'essentiel, à la croissance démographique et au développement économique de la région de l'Afrique équatoriale (GIEC, 2007). Au regard de l'incertitude qui entoure les prévisions de changements climatiques, l'on s'interroge sur l'impact des changements climatiques sur le bassin du fleuve Congo. Le fleuve Congo subit les effets néfastes des changements climatiques. En effet, l'étude des changements climatiques responsables de l'avancée, vers l'équateur, des déserts du Sahara et du Sahel (au nord), ainsi du Kalahari (au sud), révèle un rétrécissement du bassin du Congo. Ce phénomène est réel au nord-ouest du bassin, où les niveaux d'eau du bassin hydrographique de l'Oubangui, un des sous-bassins du fleuve Congo, ont baissé considérablement (Yolande Munzimi, 2008).

Par ailleurs, outre la moyenne des changements annuels au niveau des variables climatiques, il est nécessaire de concevoir des modèles de circulation générale applicables aux projections

climatiques, en exigeant que les simulations de conditions climatiques extrêmes actuelles présentent un certain niveau de certitude. Pour des études de changements climatiques à l'échelle régionale, l'analyse porte généralement sur les moyennes mensuelles ou saisonnières des modèles climatiques. L'analyse de ces moyennes n'est pas nécessairement la plus indiquée pour l'évaluation de l'impact des changements climatiques. Les conditions climatiques extrêmes sont plus sensibles, en matière d'évaluation des changements climatiques à l'échelle mondiale. En dépit de l'importance des changements des moyennes climatiques à long terme, les conditions climatiques extrêmes continuent d'avoir l'impact le plus grand et le plus direct sur notre vie quotidienne, sur la communauté et l'environnement. C'est pourquoi la détection des variations des conditions climatiques extrêmes occupe, aujourd'hui, une place de choix dans les travaux de recherche sur le climat (Vincent et Mekis, 2006). Des indices basés sur des prévisions météorologiques journalières ont été développés, afin de donner un aperçu des variations des conditions climatiques extrêmes (Peterson *et al.*, 2002). Ces indices sont très utiles pour l'étude des impacts des changements climatiques sur les activités régionales, l'agriculture et l'économie. Ils permettent également de faire un suivi des changements climatiques, et peuvent servir de référence pour l'évaluation des scénarios de changements climatiques.

Les changements climatiques pourraient modifier considérablement les régimes de ruissellement. C'est la raison pour laquelle des études sont en cours, à l'effet de concevoir des stratégies de gestion des ressources en eau, l'objectif final étant l'atténuation de l'impact de ces changements et de la vulnérabilité de la région. Seules des évaluations fiables de l'impact des changements climatiques sur le régime hydrologique futur du bassin du fleuve Congo permettront d'élaborer ces stratégies d'adaptation. La présente étude évalue l'impact des prévisions de changements climatiques sur le régime hydrologique et les conditions climatiques extrêmes du bassin du fleuve Congo. Parallèlement, il faudrait noter que, malgré l'importance capitale et l'énorme incidence du bassin du Congo sur le cycle hydrologique régional, ce bassin reste, à ce jour, la région la moins couverte par les études d'impact des changements climatique en Afrique (Wolf *et al.*, 1999). Des simulations historiques et prévisionnelles des régimes hydrologiques ont été réalisées. Pour ce faire, les chercheurs ont eu recours à la modélisation hydrologique de la surface terrestre, à l'aide de données climatiques (à biais corrigé et à échelle réduite) tirées de trois MCG (CNM3, IPSL et ECHAM5) et de deux scénarios d'émissions (A2 et B1).





Figure 1 Le bassin du fleuve Congo et les pays riverains qui se partagent ses ressources en eau

Le Congo est le seul grand fleuve à traverser l'équateur deux fois. Le bassin s'étend, ainsi, de l'hémisphère nord à l'hémisphère sud et reçoit, par conséquent, des précipitations tout au long de l'année. Cet état des choses est dû à une migration de la Zone de convergence intertropicale (ZCIT) (Kundzewicz *et al.*, 2007). Après la saison des pluies, qui intervient, dans le nord, au printemps et pendant l'été, la ZCIT migre vers le sud. La partie méridionale du bassin est alors arrosée par des pluies abondantes; d'où la faible variabilité saisonnière du débit du cours principal du Congo. Le cœur du bassin du fleuve Congo est caractérisé par un climat équatorial sans saison sèche, tandis que l'extrême-nord et le sud se caractérisent par un climat tropical. En fonction de la situation géographique des sous-bassins, la moyenne annuelle des précipitations varie entre 1500 et 2000 mm, dans le bassin du fleuve Congo. Étant donné que les eaux du bassin s'écoulent essentiellement dans cette partie de l'Afrique équatoriale, le cours principal se distingue des autres grands fleuves d'Afrique par un débit moyen plus constant, soit  $45\ 000\text{m}^3/\text{s}$ . Il présente un certain degré de variabilité interannuelle, avec une période d'étiage (juillet et août) et une période de crue (décembre). Les affluents du sud, à l'instar du Kasai, ont deux périodes d'étiage et deux périodes de crue, tandis que ceux du nord, comme l'Oubangui, ont une seule période de crue. Par conséquent, le régime du cours principal varie d'une région à l'autre (Shashin, 2002).

## 2.2. DONNÉES CLIMATIQUES HISTORIQUES ET PRÉVISIONNELLES

Les observations historiques de référence de la nouvelle Veille mondiale (<http://www.waterandclimatechange.eu/>) et l'ensemble des données de forçage (désormais désignées par l'abréviation WFD) (Weedon *et al.*, 2011; Haddeland *et al.* 2011) ont permis de simuler l'état actuel du régime hydrologique du bassin du fleuve Congo. Les données couvrent la période 1958-2001 et sont issues de la réanalyse, sur 40 ans (ERA40), du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ERA40; Hagemann *et al.*, 2011). Les données de la réanalyse ERA40 ont été interpolées à  $0,5^\circ$  de latitude par  $0,5^\circ$  de longitude, et considérées uniquement pour les points terrestres dotés d'un masque terre-mer TS2.1, de l'Unité de recherche sur le climat (CRU). Un coefficient correcteur a été appliqué pour calculer la différence d'altitude entre ERA40 et CRU. Pour les températures moyennes de 2m, un

coefficient correcteur des moyennes mensuelles a été appliqué, sur la base des données de la CRU. S'agissant des précipitations, un coefficient correcteur des moyennes mensuelles a été appliqué sur la base de la version 4 (intégrale) de la série des données du Centre mondial de climatologie des précipitations. Par ailleurs, à partir des travaux d'Adam et Lettenmaier (2003), un coefficient correcteur des valeurs sous-estimées du fait de la jauge a été appliqué. Il tient compte de la sous-estimation systématique des mesures des précipitations ayant une marge d'erreur comprise entre 10 et 50%. Ainsi, les données WFD ont permis de combiner les statistiques journalières de la réanalyse ERA40, les caractéristiques des températures moyennes mensuelles de la CRU et les hauteurs de précipitations du GPCC, pour lesquelles un coefficient correcteur des valeurs sous-estimées du fait de la jauge a été appliqué.

La comparaison avec les données (<http://www.fluxnet.ornl.gov/fluxnet/>) a permis d'établir une corrélation étroite (pour toutes les variables) entre les mesures prises sur le terrain et les données du WFD 180 (Weedon *et al.*, 2011). Les données ERA-40 ont été utilisées dans différentes études limitées à l'Afrique, dans l'optique de caractériser l'hydroclimatologie du continent et de réaliser des modèles climatiques régionaux. Afiesimama *et al.* (2006) et Anyah et Semazzi (2007) se sont servis du modèle climatique RegCM3 pour réduire la résolution spatiale de la réanalyse NCEP, en Afrique de l'Ouest et en Afrique de l'Est respectivement. Galle'e *et al.* (2004) ont utilisé les données ERA-15 pour appliquer un modèle atmosphérique régional (MAR) à l'Afrique de l'Ouest. Hudson et Jones (2002) et Tadross *et al.* (2006) ont utilisé les modèles climatiques régionaux MM5 et PRECIS pour réduire la résolution spatiale ERA-15 en Afrique du Sud. Pal *et al.* (2007) ont utilisé des données ERA-40 pour une application du modèle RegCM3 à l'ensemble du domaine africain. Cependant, les résultats de ces réanalyses présentent des écarts considérables en ce qui concerne la région Afrique (Trenberth *et al.*, 2001; Diongue *et al.*, 2002; Tadross *et al.*, 2006). En outre, les erreurs causées par la réanalyse à grande échelle se répercutent sur le MCR (Noguer *et al.*, 1998; Giorgi et Mearns 1999; Wang *et al.*, 2004).

Les modèles de circulation générale (MCG) ont des résolutions spatiales très approximatives (en moyenne 3,5° lat X 3,5° long), qui diffèrent de la plupart des résolutions des modèles hydrologiques et des modèles hydrologiques de surface terrestre. Dès lors, pour que les projections de points de grille des MCG soient utiles ou offrent une représentation réaliste des champs climatiques (précipitations et températures), une correction de biais et une réduction de la résolution spatiale doivent être effectuées (Hagemann *et al.*, 2011). Pris individuellement, les résultats des modèles de MCG produisent souvent des résultats très différents voire contradictoires, que ce soit pour le contrôle ou pour des projections climatiques futures. C'est le cas, notamment, des contradictions qui existent entre les résultats et les observations. Ainsi, afin de réduire les incertitudes inhérentes aux données climatiques obtenues à partir des MCG, nombre d'études d'impact des changements climatiques ont démontré la nécessité d'utiliser un ensemble multimodèle de MCG, afin d'obtenir une représentation fiable de l'ampleur des changements à l'échelle régionale et des marges d'incertitude qui s'ensuivent (GIEC, 2007).

Dans le cadre de la présente étude hydrologique, nous avons utilisé un sous-ensemble des scénarios climatiques analysés au chapitre 1. Au total, nous avons utilisé 6 scénarios climatiques. Les scénarios formaient une combinaison de 3 modèles de circulation générale et de 2 scénarios d'émissions. Deux scénarios d'émissions SRES ont été sélectionnés: un scénario optimiste (B1) et un scénario pessimiste d'émissions (A2).

Les statistiques de contrôle et des projections climatiques futures des MCGD ont révélé des écarts considérables, au niveau des précipitations en particulier. Les statistiques des simulations de précipitations sont généralement influencées par un écart positif au niveau du nombre de journées pluvieuses. Cette situation est en partie compensée par une forte

recrudescence de fines pluies, un écart dans la moyenne, un écart type (variabilité) et une incapacité à reproduire des phénomènes météorologiques extrêmes (Piani *et al.*, 2010). Ainsi, tous les avis s'accordent sur la nécessité de corriger le biais des données relatives aux précipitations, avant leur utilisation. Des projections de données du changement climatique futur ont été réalisées à une résolution de 0,5° de latitude x 0,5° de longitude et un pas de temps journalier a été utilisé, sur la base de la méthode de correction de biais statistique mise au point par Piani *et al.* (2010), dans le cadre du projet EU-WATCH. Des séries chronologiques quotidiennes de trois modèles de circulation générale et des données historiques ont été utilisées pour le modèle hydrologique VIC, dans l'optique de compléter une analyse hydrologique régionale. Afin de mesurer l'ampleur de l'écart et/ou des changements du régime hydrologique à l'avenir, à partir du climat historique, nous avons adopté la méthode de l'ensemble multimodèle.

## 2.3. APERÇU DU MODÈLE DE SIMULATION HYDROLOGIQUE

Une simulation du régime hydrologique (actuel et futur) du bassin du fleuve Congo, a été effectuée à l'aide du modèle VIC, un modèle hydrologique conçu pour les grandes surfaces. La simulation a par la suite été évaluée. La description et la mise en œuvre du modèle sont présentées au point 2.1.1.

### 2.3.1. VIC –MODÈLE HYDROLOGIQUE DE SURFACE TERRESTRE

Le modèle hydrologique à capacité d'infiltration variable (VIC) est un modèle hydrologique conçu pour de grandes surfaces, qui permet de régler le problème des bilans énergétique et hydrique (Liang *et al.* 1994; Nijssen *et al.* 2001). Le modèle est très souvent utilisé pour des analyses de simulations hydrologiques, sur des échelles spatiales allant du bassin hydrographique à l'ensemble de la planète (Beyenne *et al.* 2009; Van Vliet *et al.* 2013). Outre la simulation hydrologique historique, le modèle VIC a été utilisé dans plusieurs projets de recherche à l'échelle régionale et mondiale, à l'effet d'évaluer l'impact et les conséquences des changements climatiques sur les ressources en eau. Suite au troisième rapport d'évaluation du GIEC (GIEC, 2001), ce modèle a été utilisé par Payne *et al.* (2004), qui ont étudié les effets des changements climatiques sur le fleuve Columbia. Christensen *et al.* (2004) s'en sont servis pour étudier les effets des changements climatiques sur le fleuve Colorado, tandis que Van Rheenen *et al.* (2004) l'ont utilisé pour analyser des phénomènes similaires sur la Californie. De même, plusieurs études récentes, nécessitant la mise en œuvre du modèle VIC, ont été menées afin d'analyser l'impact des projections du 4<sup>e</sup> rapport du GIEC sur les systèmes hydrologiques. Cuo *et al.* (2011) se sont intéressés au bassin du Puget Sound, Christensen and Lettenmaier (2007) au fleuve Colorado, et Beyene *et al.* (2009) au bassin du Nil. Le modèle a été calibré pour le bassin du fleuve Congo et les débits naturalisés ont été comparés aux débits observés dans trois stations hydrométriques. Une quantité suffisante de données ont été prélevées, aux fins d'une comparaison plausible.

Une procédure de calibrage similaire à celle décrite par Nijssen *et al.* (1997) et Payne *et al.* (2004) a été appliquée, en vue d'une adéquation entre les débits simulés et les débits observés, pour la période au cours de laquelle des observations de débits historiques étaient disponibles (cf. annexe 1). Le modèle VIC a été calibré en ajustant les paramètres concernant l'infiltration et la baisse du débit de base, pour une adéquation avec le débit historique simulé. Le débit naturalisé observé a été obtenu, pour les différents délais impartis, sur la base des données observées du GRDC, dans trois stations hydrométriques, à savoir le Congo Kinshasa, le Congo Brazzaville et Ouesso. La période de chevauchement entre les débits (naturalisé et



observé) de chaque station hydrométrique est illustrée dans l'annexe 1. Le Tableau 1 résume le niveau d'écart dans chaque station hydrométrique. Cet écart résulte, pour l'essentiel, de ce que les débits simulés étaient des débits naturels, qui ont été mesurés sans que ne soient pris en compte les effets de réservoir et de régulation.

Pour les scénarios futurs, seules les données climatiques d'entrée ont été modifiées. L'utilisation des sols a été considérée comme une constante. Il est peu probable que des changements affectent l'utilisation des sols à l'avenir. En outre, il n'existe pas, pour l'heure, de scénario régional fiable.

**Tableau 1** Statistiques des débits mesurés et simulés, recueillies auprès de trois stations hydrométriques du bassin du fleuve Congo

<b>Station hydrométrique</b>	<b>Débit moyen observé (m<sup>3</sup>/sec)</b>	<b>Débit moyen simulé (m<sup>3</sup>/sec)</b>	<b>Biais (%)</b>
Congo Kinshasa	46520	52260	12,5
Congo Brazzaville	45670	50024	9,5
Ouesso (Congo Brazzaville)	1838	2168	17,9

### 3.0 RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

Les impacts des changements climatiques sur le régime hydrologique du bassin du fleuve Congo ont été évalués sur la base des données climatiques de trois MCG et de deux scénarios d'émissions. Les changements en termes de ruissellement et d'évaporation ont été simulés à l'aide du modèle VIC élaboré sur la base de critères physiques. Le modèle VIC a été appliqué à un pas de temps journalier, avec des conditions météorologiques historiques (1960-2000) et des scénarios de changements climatiques futurs pour le 21<sup>e</sup> siècle. Les changements en termes de températures, de précipitations, de ruissellement et de débit fluvial sont analysés sur une période de 30 ans, avec un moyen terme intervenant en 2050 (pour la période 2036-2065) et en 2080 (pour la période 2071-2100). Les moyennes et les extrêmes multimodèles (en termes de températures et de précipitations) des différents MCG et scénarios d'émissions ont été calculés en tenant compte de la simulation historique (1960-2000). Les taux d'évapotranspiration, de ruissellement et de débit fluvial ont été calculés en tenant compte de la période historique (1960-2000) et des projections futures. L'analyse a été menée à des intervalles de temps mensuel, saisonnier et annuel.

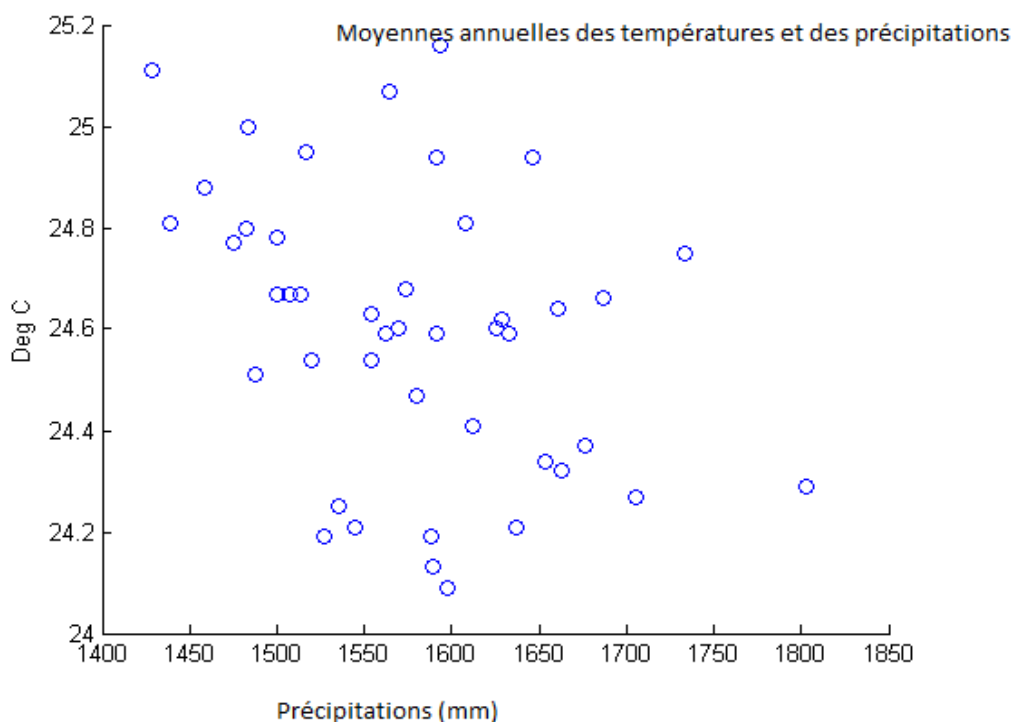


Figure 2 Diagramme de dispersion des moyennes annuelles des températures et des précipitations, élaboré sur la base des données de forçage de EU-WATCH, pour la période 1958-2001

### 3.1. CHANGEMENTS AU NIVEAU DU RÉGIME HYDROLOGIQUE

Ci-dessous, une description de possibles variations du régime hydrologique du bassin du fleuve Congo. Elles sont présentées en termes de variations annuelles moyennes des facteurs climatiques hydrologiques (températures et précipitations) et en termes de paramètres hydrologiques dérivés. Des indices des extrêmes de températures et de précipitations y sont également inclus, afin de permettre une visualisation des tendances futures, en termes de variables du climat et de composantes hydrologiques dérivées. Des signatures de changement de régime sont résumées sous forme de tableaux et de graphiques. Pour quantifier ces changements, l'approche de l'ensemble multimodèle a été utilisée.

#### 3.1.1. VARIATIONS DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE

Figure 2 (page 7) illustre un diagramme de dispersion de la moyenne annuelle des températures et des précipitations au cours de la période historique (1960-2000), sur toute l'étendue du bassin du fleuve Congo. La température moyenne annuelle s'élève à environ 25 °C st.div. 0.28 °C et la moyenne annuelle des précipitations se situe à 157 cm st.div. 8cm. L'année 1987 est la plus pluvieuse (182cm) et 1998 la plus sèche (142 cm). L'année la plus chaude est 1987 (25 °C) et la plus froide est 1964 (24 °C), ce qui illustre une absence de corrélation entre les précipitations et les températures annuelles. Les MCG et les scénarios d'émissions du 4<sup>e</sup> rapport d'évaluation du GIEC (cf. Tableau 2) visant à reproduire les cycles saisonniers et le réchauffement au cours du 20<sup>e</sup> siècle, dans le bassin du fleuve Congo, et prévoient une accentuation du réchauffement au cours du 21<sup>e</sup> siècle. Un diagramme de dispersion du biais annuel moyen des températures et des précipitations est présenté dans l'annexe 2.

Tableau 2 Liste des simulations MCGAO basées sur les scénarios A1B et 20C3M du SRES

Nom du modèle	Organisme concepteur	Nom du modèle
CNRM-CM3 (CNRM3)	Météo-France/Centre national de recherches météorologiques, France	T42L45
ECHAM5/MPI-OM (ECHAM5)	Institut de météorologie Max Planck, Allemagne	T63L31
IPSL-CM4 (IPSL)	Institut Pierre Simon Laplace, France	2,5 X 3,75L19

S'agissant de la moyenne globale, plusieurs modèles simulent un taux de réchauffement de 0,6°C observé au cours du 20<sup>e</sup> siècle. À l'échelle d'une région ou d'un bassin comme celui du fleuve Congo, le taux de réchauffement pourrait être influencé plus par des variations de la circulation atmosphérique que par le forçage de l'effet de serre. Néanmoins, les modèles de MCG utilisés dans le cadre de la présente étude simulent un réchauffement de l'ordre de 0,5°C au cours du 20<sup>e</sup> siècle, qui est comparable à la tendance globale de la température pour le 20<sup>e</sup> siècle (cf. tableau 3).

La comparaison, par modèle, des projections futures de températures, révèle une variation du degré de réchauffement. Cependant, on observe une tendance haussière constante pour le

21<sup>e</sup> siècle. Les taux de réchauffement oscillent entre 0,5°C, pour les projections minimales, et 2°C pour les projections maximales.

Les trois MCG indiquent une élévation de la température de l'air de surface tout au long du 21<sup>e</sup> siècle. Le modèle IPSL indique la plus forte accentuation du réchauffement, d'après les scénarios d'émissions A2 et B1, avec un réchauffement dramatique prévu dans le scénario A2. Le réchauffement moyen du multimodèle, comparé à la moyenne historique de 1960 - 2000 se situe à 1,8°C (A2) 1,5°C (B1) en 2050 et à 4,0°C (A2) 2,4°C (B1) en 2080.

Les températures du climat historique culminent à 26°C en mars et retombent à 23°C en août, avant de remonter à 25°C en novembre. S'agissant du contrôle du climat, tous les MCG ont reproduit à merveille le cycle annuel, avec une amplitude et un réglage parfaitement simulés et des coefficients de corrélation supérieurs à 0,9. Le modèle IPSL est légèrement plus chaud (biais chaud) que l'observation historique (cf. annexe 3).

Les projections climatiques futures de l'annexe 3 présentent des variations mensuelles homogènes. Tous les modèles prévoient une élévation de la température moyenne annuelle, comprise entre 0,9°C et 6,3°C. Cependant, l'ampleur de l'augmentation saisonnière de la température varie d'un modèle à l'autre. À titre d'illustration, dans le modèle climatique IPSL le plus chaud, il existe une différence de 1,2°C et de 3,0°C au cours des mois de novembre et avril, pour le scénario d'émissions A2 et de 1,0°C et de 2,9°C au cours des mois de juillet et mars, pour le scénario d'émissions B1.

Bien qu'il n'existe aucune étude comparable approfondie sur le bassin du fleuve Congo, l'examen des prévisions de température des modèles de circulation générale (MCG) montre que, dans l'ensemble, les scénarios prévoient une hausse de température sur le continent (GIEC, 2007; Bates *et al.*, 2008). Les prévisions de réchauffement du continent prévoient un réchauffement oscillant entre 0,2°C et 0,5°C par décennie (Hulme *et al.*, 2001). Ce réchauffement sera optimal aux confins semi-arides du Sahara et du centre de l'Afrique australe. Dans son rapport de 2007, le GIEC conclut que, d'après les différents scénarios d'émissions, de vastes régions du continent africain (en particulier le Sahel et une partie de l'Afrique australe) connaîtront, d'ici à 2100, un réchauffement compris entre 3 et 6°C. Ainsi, l'Afrique du Nord, le Sahel et l'Afrique australe subiront de plein fouet la hausse des températures et les variations majeures de précipitations. Les précipitations pourraient baisser de plus de 20%, par rapports aux niveaux de 1990. En fonction du scénario utilisé, la température moyenne annuelle mondiale de l'air de surface, pour la période 2080-2099, pourra connaître une hausse de 3 - 4°C, par rapport à la période 1980-1999. Même s'il est à prévoir un réchauffement de moindre ampleur dans les zones équatoriale et côtière (Christensen *et al.*, 2007), les autres régions du continent pourraient enregistrer une hausse de température allant jusqu'à 9°C (par exemple, l'Afrique du Nord pendant l'été).

La distribution des températures basée sur les MCG, pour les scénarios d'émissions A2 et B1, a reproduit une configuration spatiale du bassin du fleuve Congo, qui est comparable aux données historiques. Les modèles illustrent une distribution spatiale des températures similaire pour les deux scénarios d'émissions, par rapport aux données historiques, à l'exception de la bande des températures chaudes, entre le 5<sup>e</sup> et le 10<sup>e</sup> parallèle nord.

Tableau 3 Récapitulatif des variations de précipitations, d'évapotranspiration et de ruissellement dans le bassin du fleuve Congo, basé sur les scénarios de changements climatiques (changements moyens sur 30 ans non pondérés) pour les années 2050 et 2080, pour les scénarios SRES A2 (pessimiste) et B1 (optimiste) exprimées sous forme de taux de variation de simulation de la base historique (1960 – 2000).

MCG	Précipitations				Évapotranspiration				Ruissellement			
	A2		B1		A2		B1		A2		B1	
	2050	2080	2050	2080	2050	2080	2050	2080	2050	2080	2050	2080
<b>CNCH-CM3</b>	8	12	10	6	8	11	8	9	12	15	10	9
<b>(ECHAM5)</b>	6	21	8	15	13	17	3	5	16	60	24	42
<b>IPSL4</b>	11	9	5	13	9	12	9	11	19	6	-3	20
<b>Moy.</b>	8	14	8	11	10	10	7	8	15	27	10	23

### 3.1.2. VARIATIONS DE LA MOYENNE DES PRÉCIPITATIONS

Malgré l'uniformité des tendances relatives à l'élévation des températures dans le bassin du fleuve Congo, les prévisions de précipitations sont extrêmement variables et incertaines. Les précipitations se caractérisent par différents modes de saisonnalité et une variabilité interannuelle, en fonction de la situation géographique de certains sous-bassins de l'équateur. L'annexe 2 illustre une série chronologique des anomalies annuelles des précipitations (20<sup>e</sup> et 21<sup>e</sup> siècles). En dépit d'une plus grande dispersion inter-modèle des prévisions de MCG pour le 21<sup>e</sup> siècle (IPSL éloignées (sèches) et CNCM3 (humides), les faits démontrent, à suffisance, une augmentation du niveau des précipitations au cours du 21<sup>e</sup> siècle. Comme l'illustre le tableau 3, il y a une tendance positive des variations de la moyenne des précipitations de l'ensemble multimodèle, d'ici aux années 2050 et 2080. Toutes les variations sont d'importance, par rapport aux niveaux observés de variabilité décennale. Par rapport à la moyenne annuelle historique de la période 1960-2000, le multimodèle prévoit, pour les scénarios d'émissions [A2, B1], une augmentation, d'ici à 2050, des précipitations moyennes annuelles de [15%(24cm), 12%(20cm)], et de [23%(37cm), 18%(28cm)], d'ici à 2080. Afin de permettre une interprétation concise des données spatiales, une évaluation sommaire du profil spatial des prévisions de variations et des cartes spatiales de la distribution des variables hydrologiques sont présentées aux annexes 4.5 et 6. On y retrouve également le taux des variations de précipitations dans la moyenne historique de la période de chaque panel, pour les scénarios d'émissions A2 et B1. La forte augmentation des précipitations dans le bassin du fleuve Congo intervient au début du 21<sup>e</sup> siècle et, d'après la plupart des scénarios, elle serait un revers des conditions plus sèches enregistrées vers la fin du 20<sup>e</sup> siècle (ERA40). Il faudrait noter que la tendance observée se dégage des données historiques ERA40 de la dernière décennie du 20<sup>e</sup> siècle; elle est en contradiction avec la tendance à long terme obtenue après simulation des MCG. Cette situation pourrait résulter de la variabilité décennale, qui est contraire à la tendance à long terme affichée par les MCG ou alors des insuffisances des MCG en matière de simulation des caractéristiques hydroclimatologiques propres à la région. Les modèles actuels montrent que, sous les tropiques, les maxima des précipitations augmentent généralement avec des températures plus élevées. Dans l'ensemble, le multimodèle prévoit, au cours du 21<sup>e</sup> siècle, une tendance vers des anomalies très largement positives des précipitations.

Bien que les trois MCG simulent parfaitement la distribution spatiale des précipitations sur toute l'étendue du bassin (cf. annexe 4), cette situation dénote une forte corrélation lorsqu'on compare le cycle annuel aux données d'observation issues de la réanalyse ERA40. Les précipitations mensuelles observées dans le bassin du fleuve Congo indiquent deux pics vers octobre et novembre et un minimum relatif en juin et juillet (cf. annexe 3). Ce minimum, d'après Adegoke et Lamptey (2000), résulte d'une baisse de la température à la surface de la mer et d'un écart d'humidité spécifique. Les deux pics sont liés à un système de basse pression

consécutives à la migration de la ZCIT, ce qui entraîne, pendant ces périodes, une instabilité dans la région de l'Afrique équatoriale.

Les deux MCG indiquent deux pics, mais dans certains cas (e.g. ECHAM5), le second pic intervient en novembre, contrairement au maximum historique d'octobre. Au regard de cette disparité, il y a lieu de conclure à une forte corrélation entre la variabilité mensuelle des précipitations des MCG et les observations de la réanalyse ERA40. Les études régionales et globales par observation et par modélisation prévoient, toutes, une augmentation de la vapeur atmosphérique à intégration verticale, étant donné que le climat tropical humide continue de se réchauffer (Trenberth *et al.*, 2005; Zveryaev et Allan 2005). Il est également prévu une forte augmentation du niveau des précipitations au cœur des tropiques, qui irriguent la majeure partie de la forêt tropicale humide de l'Afrique de l'Est et de l'Afrique équatoriale (Zhang *et al.*, 2007). L'augmentation annuelle des précipitations dans le bassin du fleuve Congo est de l'ordre de 10% par °C dans les deux scénarios. Elle se rapproche, ainsi, des prévisions d'augmentation de l'ordre de 7% par °C, dans l'eau précipitable, qui ont été établies d'après la relation Clausius-Clapeyron (Vecchi and Soden 2007).

**Tableau 4 Définitions des indices des extrêmes des températures froides et chaudes, ainsi que des indices des extrêmes des précipitations utilisés dans la présente étude. Les abréviations et définitions sont conformes aux normes du Groupe de travail mixte CCI/CLIVAR de la détection des changements climatiques (Peterson *et al.*, 2002)**

<b>Indices</b>	<b>Définition</b>	<b>Unités</b>
Txq10	10 <sup>e</sup> centile de la Tmax	°C
Txq90	90 <sup>e</sup> centile de la Tmax	°C
Tnq10	10 <sup>e</sup> centile de la Tmin	°C
Tnq90	90 <sup>e</sup> centile de la Tmin	°C
Pq10	10 <sup>e</sup> centile du niveau des précipitations	mm/jour
Pq90	90 <sup>e</sup> centile du niveau des précipitations	mm/jour
Px3j	Niveau maximal de précipitations en 10 jours	mm
Pn10mm	Nombre de jours (par an) avec des précipitations <10 mm	Jours

### 3.1.3. VARIATIONS DES CONDITIONS CLIMATIQUES EXTRÊMES

Dans la présente section, il est question de décrire les prévisions de variations des phénomènes extrêmes de températures et de précipitations, d'après les scénarios d'émissions SRES de trois MCG. Les variations de températures extrêmes élevées et basses sont comparées aux variations correspondantes des maxima et des minima du cycle annuel, c'est-à-dire à la température moyenne des saisons les plus chaudes et les plus froides, d'un point de vue climatologique. Les changements relatifs, en termes de précipitations extrêmes, sont comparés aux changements de précipitations annuelles moyennes. Les variations saisonnières et annuelles des températures et des précipitations extrêmes pourraient avoir un plus grand impact sur un ensemble de systèmes biophysiques et sur la surface terrestre. Seize des 27 indices recommandés par l'équipe ETCCDMI ont trait aux températures et onze aux précipitations. Ces indices sont recueillis à partir des températures journalières maximales et minimales, ainsi que des précipitations journalières. Une liste descriptive complète des indices peut être consultée à l'adresse ci-après: [http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/list\\_27\\_indices.html](http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/list_27_indices.html).

Dans le cadre de la présente étude, nous avons retenu quatre indices de températures et de précipitations (cf. tableau 4). Ces indices ont surtout été choisis pour une évaluation des variations climatiques régionales de trois MCG, qui inclut des aspects tels que les variations d'intensité, de fréquence et de durée des précipitations. Outre l'analyse des variations moyennes du multimodèle, l'analyse des phénomènes météorologiques extrêmes se révèle également importante pour les régions présentant une plus grande vulnérabilité aux changements climatiques. La section suivante revient en détail sur cette question. Ci-dessous, une présentation de la probabilité de la portée et de la fréquence des précipitations, de l'évapotranspiration, des températures et du ruissellement, pour l'ensemble du bassin du fleuve Congo.

#### A) ANALYSE DES TEMPÉRATURES EXTRÊMES

Pour l'analyse des températures extrêmes, nous avons utilisé des indices basés sur le centile, qui incluent le 10<sup>e</sup> centile de la température minimale (Tn10), le 90<sup>e</sup> centile de la température minimale quotidienne (Tn90), le 10<sup>e</sup> centile de la température maximale quotidienne (Tx10), et le 90<sup>e</sup> centile de la température maximale quotidienne (Tx90) (cf. tableaux 5 et 6). Les indices de température basés sur le centile permettent de faire un prélèvement des déciles les plus froids et les plus chauds, pour les températures maximales et minimales. Ainsi, il devient possible d'évaluer l'ampleur des variations des extrêmes. Dans l'ensemble, presque tous les indices de température prélevés sur l'étendue du bassin du fleuve Congo indiquent des variations considérables au cours de la période historique 1960-2000.

Il est plus difficile d'évaluer les variations des indices de températures absolues, étant donné qu'ils n'apparaissent pas nécessairement sous forme de décalage simple dans la distribution. Cependant, en général, la période future apparaît plus chaude et plus humide que la période 1960-2000. Par ailleurs, nous sommes en mesure d'évaluer les variations des valeurs saisonnières, et ce, pour cinq des indices de température et pour quatre des indices de précipitations. On observe un réchauffement minimum des températures extrêmes en toute saison, bien qu'on signale des variations plus prononcées en JJA et des variations marginales en DJF. Tous les indices de température évalués ont révélé une variabilité saisonnière et annuelle. Comme pour l'élévation de la température annuelle moyenne sur l'étendue du bassin, il a été constaté que (par jour) les températures minimales annuelle et saisonnière

deviennent extrêmes, par rapport à la température maximale journalière indiquée à l'annexe 5.

**Tableau 5 Indices moyens de deux périodes futures sur les périodes de référence 1960-2000, pour les anomalies décelées sur l'étendue du bassin du fleuve Congo. Les seuils de température sont représentés en (°C), Px3j en mm et Px10mm journaliers pour les scénarios d'émissions A2**

Indices	DJF		JJA		ANN	
	2050	2080	2050	2080	2050	2080
Tx10	1,32	2,98	1,6	3,55	1,36	3,44
Tx90	1,31	3,24	1,44	3,5	1,40	3,58
Tnq10	1,40	3,57	1,90	4,3	1,77	4,10
Tn90	2,05	4,31	2,18	4,6	2,18	4,54
Pq10	0,2	0,06	0,12	0,03	0,01	0,00
Pq90	3,5	2,34	3,32	2,28	4,9	3,00
Px3j	34,43	47,3	37,40	43,0	21,42	34,71
Pn10mm	1,93	3,5	7,69	11,29	5,23	7,37

D'ici à 2080, l'augmentation maximale moyenne du 90<sup>e</sup> centile de la température maximum journalière a été observée pendant l'été (JJA), 3,5 °C (A2) et 2,3 °C (B1) (cf. tableaux 5 et 6). Pendant l'été (JJA) le 90<sup>e</sup> centile de la température maximale journalière a enregistré une hausse plus importante (4,6 °C et 2,8 °C), d'après le scénario d'émissions A2, au cours de la même période. Pareillement, le 10<sup>e</sup> centile de la température minimale journalière a connu une hausse plus importante pendant l'été, par rapport à l'hiver, soit 3,6 °C (A2) et 2,1 °C (B1). L'annexe 5 présente les anomalies hivernale (DJF), estivale (JJA) et annuelle (ANN) du 90<sup>e</sup> centile des températures minimale et maximale journalières, puis du 10<sup>e</sup> centile des températures minimales et maximales journalières, pour la période 2071-2100, d'après le scénario A2.

**Tableau 6 Indices moyens de deux périodes futures sur les périodes de référence 1960 - 2000, pour les anomalies décelées sur l'étendue du bassin du fleuve Congo. Les seuils de température sont représentés en (°C), Px3j en mm et Px10mm journaliers pour les scénarios d'émissions B1.**

Indices	DJF		JJA		ANN	
	2050	2080	2050	2080	2050	2080
Tx10	1,44	1,82	2,26	2,26	1,19	2,12
Tx90	1,05	1,87	2,07	2,07	1,26	2,06
Tn10	1,05	2,10	2,41	2,41	1,49	2,32
Tn90	1,76	2,76	2,77	2,77	1,83	2,86
Pq10	0,00	0,15	0,05	0,05	0,00	0,03
Pq90	2,22	2,90	2,61	2,89	2,92	3,85
Px3j	34,43	41,5	43,0	37,4	20,4	21,8
Pn10mm	1,93	2,02	7,6	10,7	3,71	4,51

Le tableau 7 résume l'analyse de la tendance linéaire, effectuée au moyen du test de Kendall, avec le seuil de signification y afférent, pour les indices de températures extrêmes analysés dans le cadre de la présente étude. En toute saison (DJF et JJA) et sur une échelle de temps annuelle, le 10<sup>e</sup> et le 90<sup>e</sup> centiles des températures minimale et maximale journalières ont révélé des tendances haussières pour le 21<sup>e</sup> siècle (niveau de confiance: 95%). Par ailleurs, en



2080, on note que l'ampleur des tendances est généralement plus grande pour la température minimale, en JJA et à l'échelle de temps annuelle (cf. tableau 7). L'annexe 6 montre les résultats (par saison) de la moyenne annuelle des tendances de variations des températures minimale et maximale, pour l'ensemble de la période future (2010-2100) et indique une augmentation significative de la température minimale par rapport à la température maximale. Les températures maximales présentent une courbe de variation analogue, bien que l'ampleur du réchauffement soit considérable par rapport à la température minimale. Cette situation entraîne une baisse sensible de la DTR tout au long du 21<sup>e</sup> siècle (cf. annexe 6). Les tendances des indices de température sont présentées dans le tableau 7.

**Tableau 7 Calcul de la signification statistique des extrêmes de température à l'aide du test de Kendall**

Indices de températures	DJF		JJA		ANN	
	A2	B1	A2	B1	A2	B1
Txq10	0,74 (12)	0,61 (11)	0,78 (12)	0,67 (11)	0,81 (12)	0,72 (11)
Txq90	0,76 (11)	0,62 (10)	0,85 (11)	0,66 (11)	0,80 (11)	0,74 (10)
Tnq10	0,82 (19)	0,72 (17)	0,85 (20)	0,72 (17)	0,88 (19)	0,79 (17)
Tnq90	0,77 (17)	0,77 (15)	0,82 (18)	0,74 (16)	0,91 (16)	0,80 (15)

Avec le réchauffement des extrêmes chauds et le refroidissement des extrêmes froids, ces chiffres indiquent clairement un réchauffement substantiel. La journée et la nuit les plus chaudes se réchauffent à un rythme qui se rapproche de la moyenne mondiale. De même, la journée et la nuit les plus froides, dans le bassin du fleuve Congo, se réchauffent à un rythme qui se rapproche de la moyenne mondiale. Ici également, l'amplitude thermique diurne décroît à un rythme légèrement inférieur à celui observé à l'échelle mondiale (cf. annexe 6).

Peu d'études sur les événements climatiques extrêmes induits par les variations climatiques futures ont été menées, à l'aide de scénarios SRES, dans la région du bassin du fleuve Congo. L'étude menée sur le climat historique par Aguilar *et al.* (2009), à l'aide de données de stations hydrométriques, figure parmi les travaux phares dans ce domaine. Les auteurs concluent, au regard de la majorité des indices de température, que la région de l'Afrique centrale affiche le plus fort taux de réchauffement. Les tendances, en termes d'indices de centile trimestriels, calculées en fonction des saisons classiques, soulignent quelques différences au cours de l'année. S'agissant des quatre indices, le centre affiche des tendances importantes pour les quatre saisons, avec des pentes moyennes plus fortes pendant les mois de juin, juillet et août (JJA). En Guinée, les tendances sont plus fortes entre juin et novembre, s'agissant des prélèvements diurnes, et plus fortes en mars, avril et mai (MAM), pour les prélèvements nocturnes. On n'observe aucune tendance significative en décembre, en janvier et en février (DJF).

En résumé, les valeurs moyennes, maximales et minimales des températures journalières maximales et minimales révèlent, dans l'ensemble, des tendances à la hausse. Parallèlement l'on a observé une baisse sensible de la DTR, à partir de la fin du 20<sup>e</sup> siècle. Depuis les années 1990, la température maximale augmente considérablement. La température minimale, pour sa part, a commencé à s'élever de façon constante à la fin des années 1970, et cette tendance s'accroît à la fin des années 1990 et tout au long du 21<sup>e</sup> siècle. Du fait de l'asymétrie des

variations des températures maximales et minimales, la DTR enregistre une forte baisse à la fin du 20<sup>e</sup> siècle et tout au long du 21<sup>e</sup> siècle (cf. annexe 6).

## B) ANALYSE DES PRÉCIPITATIONS EXTRÊMES

Les indices de température basés sur le centile permettent de faire un prélèvement des déciles des températures maximales et minimales, mais également d'évaluer l'ampleur de la variation de ces extrêmes. Les indices de précipitations de cette catégorie représentent le niveau des précipitations au-dessus du 90<sup>e</sup> décile (qui indique les journées les plus humides) ou le 90<sup>e</sup> centile des niveaux de précipitations (Pq90), le 10<sup>e</sup> représentant la limite maximum des journées sèches ou le 10<sup>e</sup> centile des niveaux de précipitations (Pq10), le total des précipitations maximales pour trois jours (Px3j) et le nombre de jours enregistrant un seuil de précipitations supérieur à 10mm. D'après les scénarios SRES A2 et B1, le bassin du fleuve Congo connaîtra, pendant les deux périodes futures axées sur 2050 et 2080, les changements suivants: Pq10 indique des variations modérées en toute saison (DJF et JJA) et sur une échelle de temps annuelle; Pq90 révèle des augmentations significatives par rapport à la moyenne des données climatiques historiques. Px3j et P10mm indiquent des augmentations sensibles en DJF et JJA, avec des variations relativement plus élevées enregistrées en JJA, par rapport à DJF ; ce qui signifie que le bassin du fleuve Congo enregistre des précipitations plus fortes pendant l'été (JJA) et que le risque d'inondations s'accroît.

Les séries chronologiques et les tendances des indices de précipitations des fortes pluies (Px3j et P10mm), pour le bassin du Congo, en DJF JJA et ANN, d'après le scénario SRES A2, sont présentées dans l'annexe 5. L'écart croissant au niveau des projections futures des modèles (pour le 21<sup>e</sup> siècle) est dû à la sensibilité de l'écart type aux valeurs aberrantes (en particulier pour le modèle CNRM-CM3). Néanmoins, on note une tendance haussière remarquable projetée par une majorité d'études réalisées à travers le bassin de fleuve Congo, à l'aide de la méthode de l'ensemble multimodèle. En effet, d'après les prévisions du scénario d'émissions A2 d'ici à 2080, on observe une tendance haussière du niveau total des précipitations pour trois jours (Px3j), en JJA; des précipitations au-dessus du seuil de 10mm (P10mm), et un signal relativement faible en DJF. Les tendances des indices de précipitations présentent deux caractéristiques distinctes: d'une part, une diminution des jours consécutifs secs (CDD) et, d'autre part, un accroissement des jours consécutifs humides (CWD). Les indices de fortes précipitations indiquent, sur la base des centiles, des augmentations nettes du 90<sup>e</sup> de centile contenu dans les tableaux et les chiffres (95% et 99%) et du 90<sup>e</sup> de centile qui n'y figure pas; ainsi que des indices d'intensité Px3j et P10mm, qui correspondent aux projections des moyennes mondiales multimodèles (GIEC, 2007). Certes nos résultats diffèrent de ceux d'E. Aguilar *et al.*, (2009), qui ont effectué des analyses à l'aide de données historiques; néanmoins, ils correspondent aux projections mondiales. Aguilar *et al.*, 2009 expliquent pourquoi il est probable que les indices calculés soient en rapport avec la diminution des précipitations totales, et concluent que la longueur du nombre maximum de jours consécutifs secs augmente en Guinée; tandis que la longueur du nombre maximum de jours consécutifs humides connaît une baisse sensible dans le Centre..

La tendance annuelle est, à dominance, manifestement haussière en JJA (cf. annexe 5). Le scénario B1 présente des résultats analogues, avec des tendances futures ayant un signal relativement faible, malgré des augmentations de la distribution moyenne de Px3j et P10mm (tableaux 4 et 5). Par conséquent, l'état actuel des précipitations abondantes et des inondations en été (JJA), dans le bassin du fleuve Congo, varie considérablement à l'avenir. En hiver (DJF), par contre, il est à prévoir des précipitations moins abondantes. Les valeurs

moyennes des deux indices (Px3d et P10mm) connaissent un décalage significatif par rapport aux valeurs moyennes historiques 1960-2000 (cf. tableaux 4 et 5).

### 3.1.4. ÉVAPORATION

Le modèle VIC, combiné à six différents scénarios climatiques, a été utilisé pour estimer l'incidence des changements climatiques sur l'évaporation. Comme expliqué ci-haut, nous avons utilisé, pour les scénarios climatiques, des données à biais corrigé de trois modèles climatiques reposant sur des scénarios d'émissions pessimiste (B1) et optimiste (A2) (cf. tableau 2). La simulation des modèles révèle que les changements climatiques induiraient une augmentation du taux d'évaporation sur toute l'étendue du bassin (cf. figure 3). La variation est assez uniforme sur toute l'étendue du bassin. Cependant, l'évaporation connaîtra une hausse modérée aux confins du bassin du Congo, par rapport aux régions du centre. D'ici à la fin du 21<sup>e</sup> siècle, on enregistra, en moyenne, une augmentation du taux d'évaporation de 10%, pour le scénario A2, et de 8%, pour le scénario B1 (cf. tableau 1). Les différents modèles produisent des résultats semblables (voir figure 4) et tous les six scénarios indiquent une accentuation du phénomène d'évaporation.

L'augmentation de l'évaporation, du fait des changements climatiques, est soulignée par nombre d'études, en particulier, dans le cas où il y a augmentation des précipitations. En raison de la hausse des températures atmosphériques, la capacité de rétention d'eau de l'atmosphère s'accroît, ce qui entraîne une hausse de la demande en évaporation (Bates *et al.*, 2008). L'augmentation de la demande en évaporation ou de l'évaporation potentielle entraîne un accroissement de l'évaporation dans le bassin du Congo, dans la mesure où l'humidité du sol dépend des précipitations (cf. tableau 3). Il est à noter que le cadre de modélisation du modèle VIC utilisé pour les besoins de la présente évaluation n'inclut pas l'impact direct de l'enrichissement en CO<sub>2</sub> sur la transpiration des plantes. Une concentration élevée en CO<sub>2</sub> réduit la transpiration des plantes, car, dans le processus de photosynthèse, les stomates des feuilles, à travers lesquels la transpiration se produit, s'ouvrent moins pour absorber la même quantité de CO<sub>2</sub> (Lambers *et al.*, 1998). Il est probable que le modèle VIC surestime l'impact des changements climatiques sur l'ensemble du processus d'évaporation. Le modèle LPJml, utilisé au chapitre 3, inclut l'impact direct du CO<sub>2</sub> sur l'évaporation des plantes et, par conséquent, le niveau estimé d'évaporation, dans un contexte de changements climatiques, tend à être plus faible pour ce type de modèle que pour le modèle VIC.

## VARIATION MOYENNE DE L'ÉVAPORATION DU MULTIMODÈLE

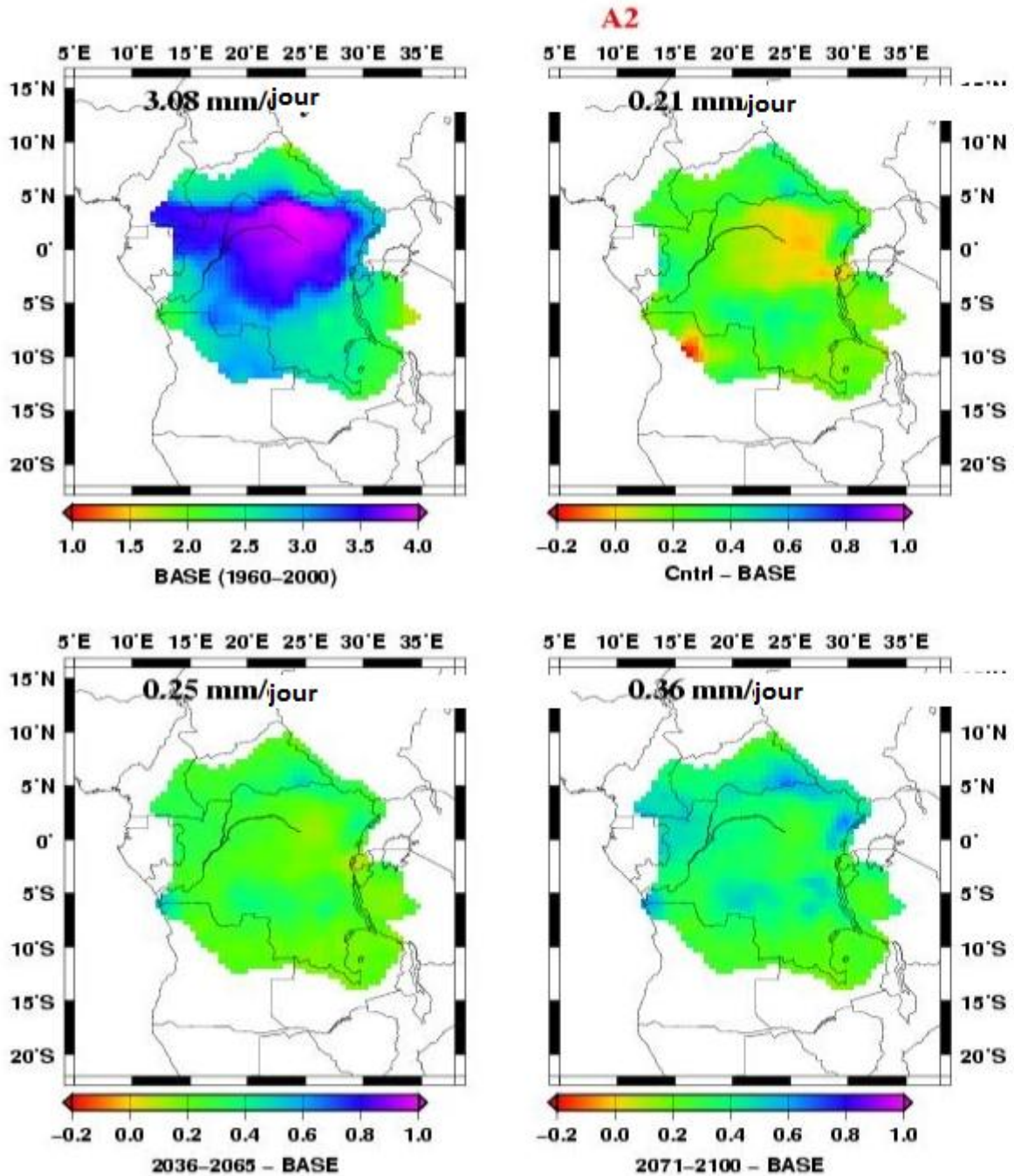


Figure 3 Distribution spatiale de l'évaporation simulée à l'aide de données historiques (panneau supérieur) et projection de la moyenne des variations de taux d'évaporation futurs. Les résultats affichés sont issus des périodes de contrôle des modèles climatiques par rapport aux analyses de référence réalisées au moyen des données de forçage WATCH (panneau en haut à gauche). Les résultats des périodes futures sont affichés dans le panneau inférieur, à gauche, et dans le panneau inférieur, à droite (2071-2100). Pour les analyses futures, le scénario d'émissions A2 a été utilisé.

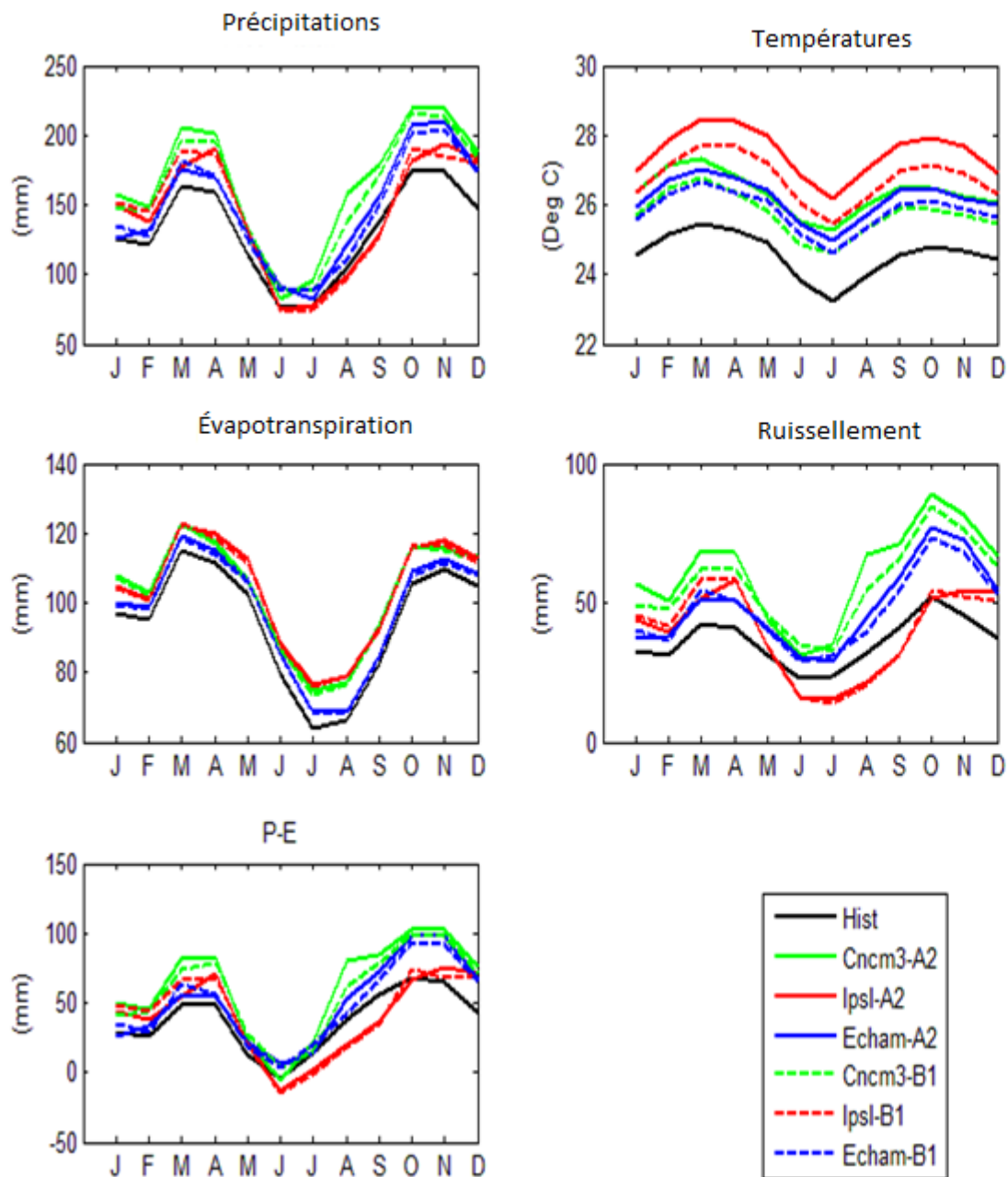


Figure 4 Cycle moyen saisonnier des précipitations, de la température, de l'évapotranspiration, du ruissellement, P-E, pour chacun des six scénarios climatiques. Toutes les données moyennées prélevées sur toute l'étendue du bassin du fleuve Congo pendant la période 2071-2100 (pour la période historique, bien vouloir vous reporter à l'annexe..).

### 3.1.5. RUISSELLEMENT

Tous les six scénarios climatiques utilisés dans le présent chapitre, pour des besoins d'analyse, indiquent une augmentation moyenne des précipitations et de l'évaporation (cf. tableau 3). Cependant, l'accroissement total des précipitations est plus élevé que la hausse de l'évaporation et, par conséquent, dans la majorité des scénarios, le ruissellement est en hausse. L'augmentation du ruissellement n'est pas uniforme dans tout le bassin (cf. figure 5). On note une augmentation du ruissellement, particulièrement au centre et à l'ouest de la RDC, ainsi qu'au Congo Brazzaville. La partie camerounaise du bassin du Congo connaît également

une hausse assez sensible du ruissellement. Les résultats obtenus, pour les régions frontalières du nord, du sud et de l'ouest, présentent des différences considérables. Ici, on enregistre des hausses négligeables et parfois une baisse du niveau de ruissellement (cf. figure 5).

## MULTI-MODEL AVERAGE ANNUAL RUNOFF CHANGI

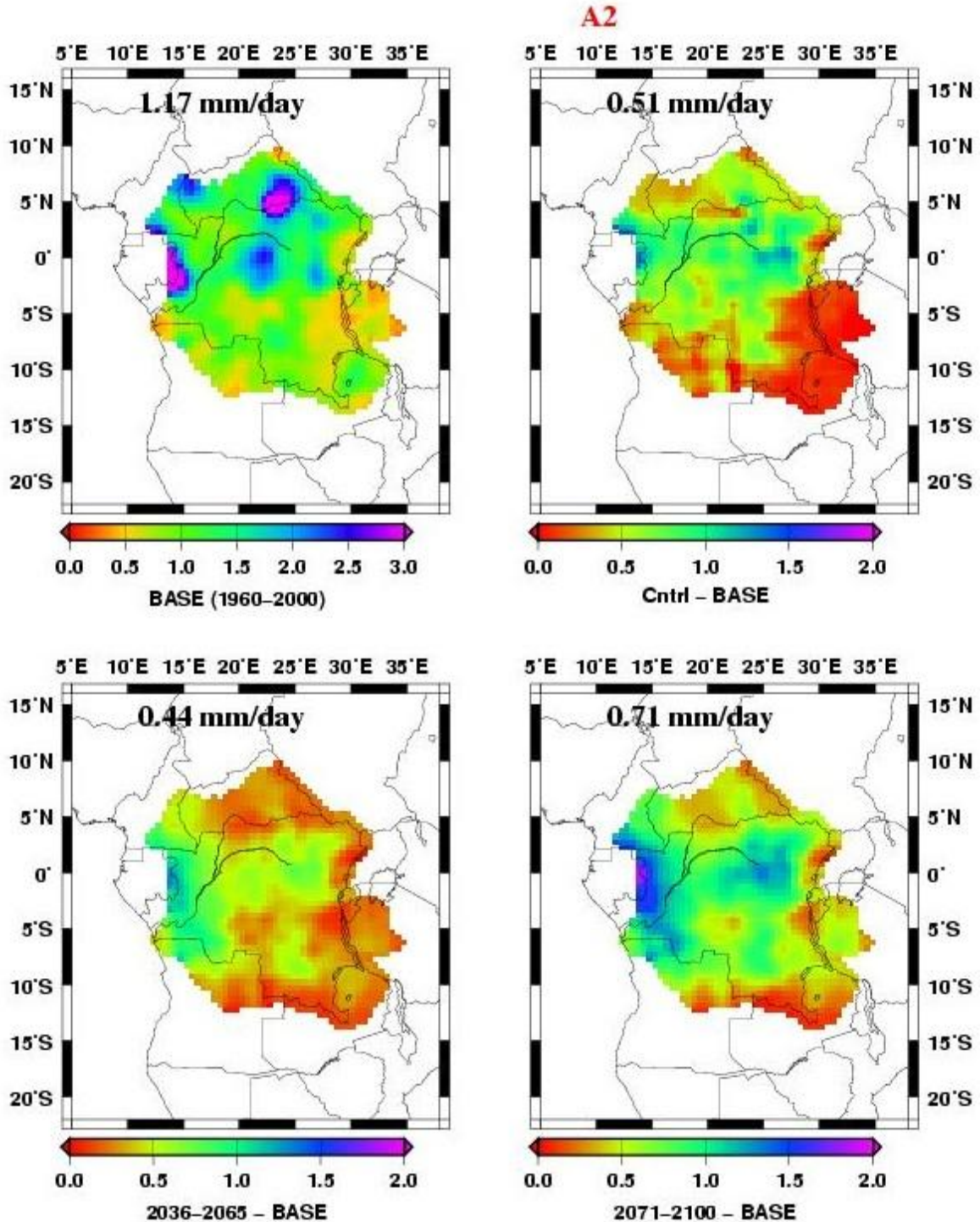


Figure 5 Distribution spatiale de l'évaporation simulée à l'aide de données historiques (panneau supérieur) et projection de la moyenne des variations de taux d'évaporation futurs. Les résultats affichés sont issus des périodes de contrôle des modèles climatiques par rapport aux analyses de référence réalisées au moyen des données de forçage WATCH (panneau en haut à gauche). Les résultats des périodes futures sont affichés dans le

panneau inférieur, à gauche, et dans le panneau inférieur, à droite (2071-2100). Pour les analyses futures, le scénario d'émissions A2 a été utilisé.

En moyenne, l'ensemble du bassin du Congo connaîtra, d'ici à un demi-siècle, une augmentation du ruissellement de 15%, pour le scénario A2, et de 10% pour le scénario B1 (cf. tableau 3). Il est à prévoir, d'ici à la fin du siècle, une augmentation du ruissellement de 27%, pour le scénario A2, et de 23% pour le scénario B1. S'agissant des variations du ruissellement, on a observé un écart considérable entre les 3 modèles climatiques utilisés aux fins de l'évaluation de l'impact hydrologique (cf. tableau 3, figure 4). L'utilisation des résultats du modèle ECHAM 5 entraîne la plus forte augmentation du ruissellement (jusqu'à 60%), d'ici à la fin du siècle, pour le scénario A2. Le modèle IPSL4 montre, cependant, une augmentation bien plus modérée du niveau de ruissellement. Les résultats du modèle IPSL4 révèlent qu'en fonction du temps et des scénarios d'émissions, le ruissellement pourrait augmenter jusqu'à 20%. Cependant, les projections relatives au milieu du siècle, à partir des scénarios B1, prévoient une légère baisse du niveau de ruissellement, pour le modèle climatique IPSL4 (cf. tableau 3).

Les variations de ruissellement changent en fonction des saisons. Pendant la saison pluvieuse, tous les trois modèles climatiques prévoient une augmentation du ruissellement et une relative augmentation des maxima (cf. figure 4). Les modèles IPSL4 et CNCM3 prévoient, au cours de la saison sèche, une diminution du ruissellement. Le modèle ECHAM 5 indique également une augmentation du ruissellement en saison sèche. Toutefois, en termes relatifs et absolus, le niveau d'augmentation du ruissellement en saison sèche est inférieur au niveau observé pendant la saison des pluies. Pour les trois modèles climatiques, la différence de ruissellement entre la saison sèche et la saison pluvieuse s'accroît, ce qui dénote un régime hydrologique plus variable. On note également une augmentation de la variabilité de l'échelle spatiale. Dans les régions plus humides du centre et du l'ouest du bassin, le ruissellement augmente, tandis que dans les zones frontalières, plus sèches, le ruissellement enregistre une hausse modérée, d'après certains scénarios, et une baisse, d'après d'autres.

D'autres études antérieures relatives à l'impact des changements climatiques sur les caractéristiques hydrologiques du bassin du fleuve Congo présentent des résultats variés. Arnell (2003) souligne une éventuelle baisse de la moyenne des variations du ruissellement dans le bassin du fleuve Congo, d'ici à 2050, au moyen d'un ensemble de modèles différents. Aerts *et al.* (2006) décrivent une augmentation du ruissellement de 12%, dans le bassin du fleuve Congo, d'ici à 2050, par rapport aux simulations historiques. Le continent détient le facteur de conversion le plus bas, en matière de précipitations en ruissellement, soit 15% en moyenne. Bien que la région équatoriale et les zones côtières de l'Afrique de l'Est et de l'Afrique australe soient humides, dans le reste du continent, le climat varie entre le type subhumide sec et le type aride (GIEC, 2007). D'après les prédictions, les changements climatiques auront pour impact majeur une baisse de l'humidité du sol dans les zones subhumides et une baisse du ruissellement. Par ailleurs, les tendances actuelles dans les plus grands bassins fluviaux indiquent une baisse du ruissellement de l'ordre de 17%, au cours de la dernière décennie (Arnell, 2004; GIEC, 2007).

**Tableau 8 Projection des changements relatifs de la moyenne annuelle du débit du fleuve au Congo-Kinshasa, au cours de deux périodes futures, exprimés en termes de taux de variation, par rapport à la période historique (1960-2000). Dans le cadre de cette analyse, trois modèles climatiques différents ont été utilisés, auxquels on a ajouté un scénario d'émissions pessimiste (A2) et un scénario d'émissions optimiste (B1).**

Modèle climatique	2036-2065		2071-2100	
	A2	B1	A2	B1
(CNM3)	20%	5%	27%	17%

(ECHAM5)	23%	28%	73%	46%
IPSL4	8%	1%	14%	18%
Moyenne multimodèle	17%	11%	38%	27%

### 3.1.6. DÉBIT

Les projections de variations de débit ou d'écoulement fluvial diffèrent des projections de variations de ruissellement, car le ruissellement est une quantité d'eau à distribution spatiale qui fait partie intégrante du bilan hydrique de chaque maille d'un modèle hydrologique et ne tient pas compte des effets du temps de latence. L'écoulement fluvial, pour sa part, désigne la culmination des processus hydrologiques évalués à un lieu, dans un intervalle de temps (Maurer *et al.*, 2008). Le modèle hydrologique VIC à grande échelle, qui a été utilisé dans le cadre de la présente étude, a raisonnablement bien reproduit les débits observés dans le bassin du fleuve Congo, dans les trois stations hydrométriques sollicitées pour les besoins de l'étude (cf. annexe 1). Les signatures moyennes à long terme des débits naturalisés sont supérieures aux observations du GRDC. Ces écarts résultent, en partie, du fait que le modèle hydrologique de surface terrestre, qui a été utilisé, permet de calculer les débits naturalisés, mais ne tient pas compte de l'utilisation (aux fins d'irrigation ou à d'autres fins) de l'eau des réservoirs de régulation ou des barrages. Les résultats de notre simulation hydrologique, à l'aide du modèle VIC, vont dans le même sens que d'autres études d'envergure mondiale et régionale dans lesquelles le bassin du fleuve Congo figure comme bassin hydrologique. L'étude menée par Sperna Weiland *et al.* (2010) fait état d'un débit moyen naturalisé de 46 990 m<sup>3</sup>/s, avec un biais de 8% calculé à partir des données du 20<sup>e</sup> siècle (données des changements climatiques).

Avant d'analyser les impacts à venir, nous avons comparé les résultats à biais historique corrigé des modèles climatiques aux simulations réalisées à l'aide d'un ensemble de données climatologiques de forçage du modèle WATCH. Ces analyses montrent que l'utilisation de l'ensemble de données à biais corrigé des modèles ECHAM5 et IPSL4 permet de représenter les analyses de débit à partir de l'ensemble de données WFD (cf. figure 6). Cependant, s'agissant des données du modèle CNCM3, la correction du biais produit un débit supérieur à celui des analyses menées à l'aide de données WFD.



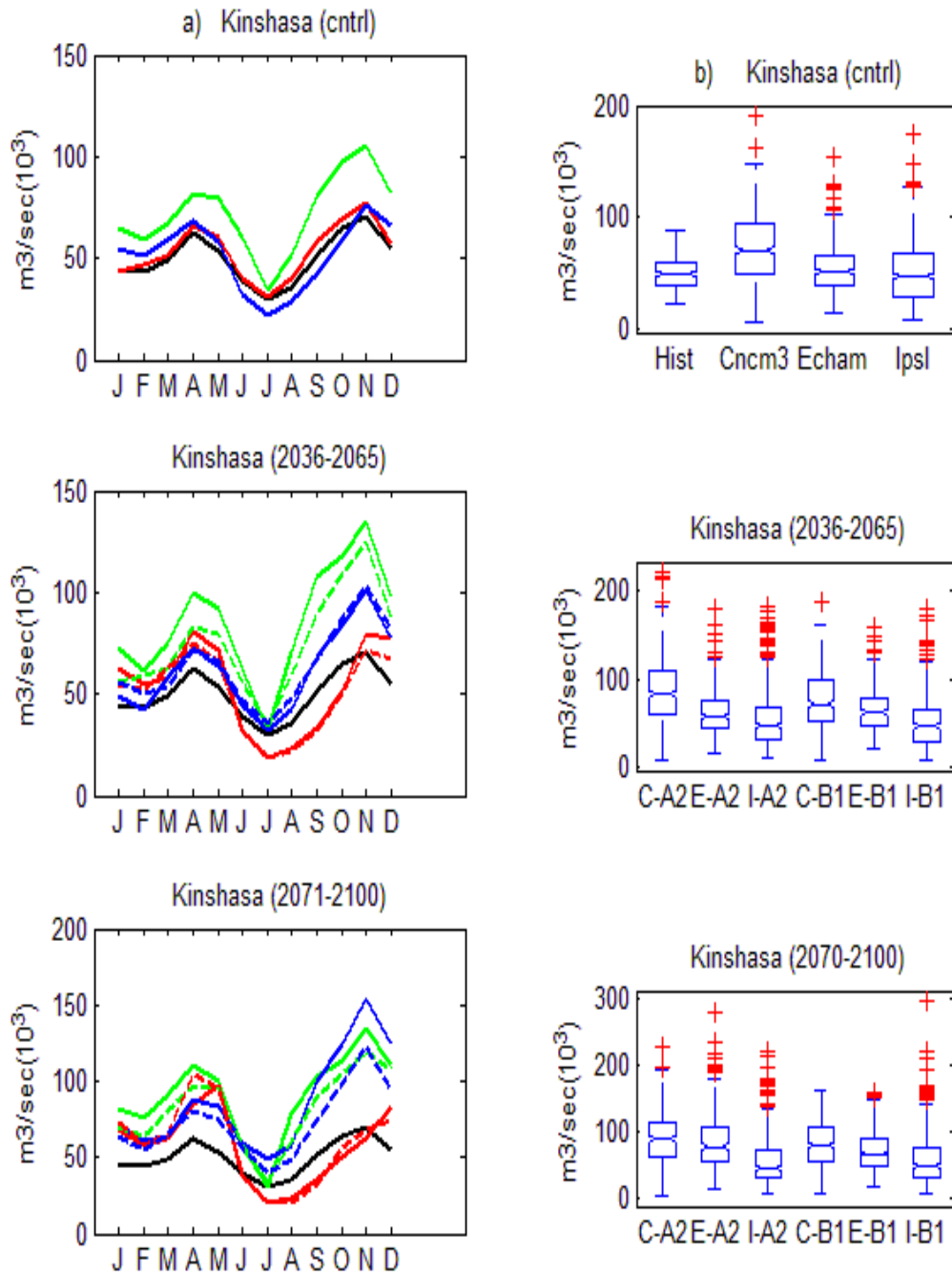


Figure 6 : Simulation du débit naturalisé historique et futur du fleuve Congo à Kinshasa. Panneaux supérieurs: débit obtenu à partir des données de changements climatiques et à partir des simulations de 3 MCG, pour la période 2036-2065, panneaux inférieurs pour la période 2071-2100. Débit observé issu des données du GRDC et servant de débit de référence. Les lignes droites représentent le scénario d'émissions A2 et les traits discontinus le scénario d'émissions B1. Voir figure 4 pour une interprétation des couleurs des lignes.

Conformément aux prévisions de variations de ruissellement, il est prévu, à l'horizon 2050, une augmentation annuelle du débit moyen multimodèle de [17%, 11%], pour les scénarios d'émissions [A2, B1], et de [(38%, 27%)], à l'horizon 2080, pour les scénarios d'émissions A2 et B1, par rapport à la période (1960-2000) (cf. tableau 8). On a observé un écart considérable entre les modèles climatiques et les projections des variations de débit. Le modèle climatique IPSL prévoit la plus faible augmentation de débit d'ici à la fin du siècle, avec des pointes

pouvant aller jusqu'à 18%. Le modèle climatique ECHAM5, quant à lui, prévoit la plus forte augmentation d'ici à la fin du siècle, avec un pic de 73% pour le scénario A2.

L'augmentation des variations de débit est ressentie surtout en saison pluvieuse. Les scénarios analysés indiquent systématiquement une hausse du débit en novembre et décembre. Cependant, deux modèles climatiques prévoient, au cours du 21<sup>e</sup> siècle, une baisse du débit en saison sèche. Le modèle IPSL prévoit notamment une baisse de débit importante, de juin à octobre. D'après ces résultats, il est à prévoir une augmentation des débits des cours d'eau en saison sèche. Pendant la saison sèche, cependant, les résultats semblent plus incertains et les débits pourraient autant augmenter que baisser. S'il est à prévoir une augmentation de la disponibilité des ressources en eau, ceci n'implique pas, en revanche, une baisse de la fréquence des épisodes de sécheresse ou des débits minimums. Tous les scénarios indiquent une augmentation de la différence de débit entre les saisons sèche et pluvieuse. Par conséquent, les précipitations et les sécheresses extrêmes pourraient connaître une hausse à l'avenir.

#### 4.0. RÉSUMÉ ET CONCLUSION

Les changements climatiques auront un impact réel sur le cycle hydrologique du bassin du Congo. Les scénarios des changements climatiques prévoient une hausse des températures de l'ordre de 2 à 4 degrés, d'ici à la fin du siècle. Les scénarios climatiques utilisés aux fins d'analyses hydrologiques révèlent une augmentation des précipitations à travers le bassin. Cependant, la marge d'incertitude des scénarios des précipitations est bien plus élevée que celle de scénarios des températures. Par ailleurs, certains scénarios prévoient une baisse des précipitations en saison sèche, dans les régions frontalières du nord, du sud et de l'est du bassin. Les changements climatiques ont également un impact sur les précipitations extrêmes. En effet, celles-ci augmenteront avec les changements climatiques qui affectent le bassin.

Les changements prévus, en termes de précipitations et de températures entraîneront des changements majeurs dans l'hydrographie du bassin du Congo. L'élévation des températures entraînera également une augmentation de l'évaporation. Cependant, étant donné que le niveau des précipitations augmente plus que celui de l'évaporation, le ruissellement pourrait connaître une hausse allant jusqu'à 50%. On notera une hausse du ruissellement et du débit fluvial, pendant la saison pluvieuse en particulier. Par conséquent, il est à prévoir une augmentation considérable des risques d'inondation, sur toute l'étendue du bassin. On notera une recrudescence des inondations, particulièrement au centre et à l'ouest du bassin.

S'il est clairement établi que le ruissellement et le débit des cours d'eau connaîtront une hausse pendant la saison des pluies, les scénarios de saison sèche, en revanche, présentent des résultats contradictoires. Certains modèles climatiques indiquent une saison sèche plus rude, tandis que d'autres donnent à voir des débits plus élevés pendant la saison sèche. Tous les modèles montrent que, par rapport au climat actuel, la différence entre la saison sèche et la saison pluvieuse va s'accroître. En effet, on observera une recrudescence et une intensification des précipitations extrêmes.

En conclusion, la région doit se préparer à faire face à une plus grande variabilité du climat et du régime hydrologique. Par ailleurs, la différence entre les saisons et les années pourra s'accroître à l'avenir. De toute évidence, la région doit se préparer à faire face à des précipitations plus intenses et, éventuellement, à des inondations pendant la saison pluvieuse. La saison sèche pourrait devenir plus humide et plus sèche. Il y a une plus forte probabilité pour que les précipitations de saison sèche baissent dans les régions les plus sèches du bassin, par rapport aux régions humides.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adam, J.C. & D.P. Lettenmaier, 2003. Adjustment of global gridded precipitation for systematic bias, *Journal of Geophysical Research*, 108, 1-14, doi:10.1029/2002JD002499.
- Adegoke, J. O., & B. L. Lamptey, 2000. Intraseasonal variability of summertime precipitation in the Guinea coastal region of West Africa. *Proceedings of the workshop on the West African monsoon variability and predictability*. WMO-TD. No. 1003.
- Aerts, J., Renssen, H., Ward, P. J., de Moel, H., Odada, E., Bouwer, L. M. & Goosse, H., 2006. Sensitivity of global river discharges under Holocene and future climate conditions. *Geophysical Research Letters* 33, L19401. doi:10.1029/2006GL027493.
- Afiesimama, A.E., Pal, J.S., Abiodun, B.J., Gutowski, W.J., Adedoyin, A., 2006. Simulation of West African monsoon using the RegCM3.Part I: model validation and interannual variability. *Theoretical and Applied Climatology*, 86, 23–37.
- Aguilar, E., A. A. Barry, M. Brunet, L. Ekan, A. Fernandes, M. Massoukina, J. Mbah, A. Mhanda, D. do Nascimento, & T. Peterson, 2009. Changes in temperature and precipitation extremes in western central Africa, Guinea Conakry, and Zimbabwe, 1955–2006, *Journal of Geophysical Research*, 114, D02115.
- Anyah, R.O., Semazzi, F.H.M., 2007. Variability of East African rainfall based on multiyear RegCM3 simulations. *International Journal of Climatology*, 27:357–371.
- Arnell, N. W., 2004. Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environ. Change—Human and Policy Dimensions* 14(1), 31–52.
- Arnell, N.W., 2003. Effects of IPCC SRES emissions scenarios on river runoff: a global perspective. *Hydrology and Earth System Sciences* 7, 619-641.
- Barnett, T.P., Pierce, D.W., Hidalgo, H.G., Bonfils, C., Santer, B.D., Das, T., Bala, G., Wood, A.W., Nozawa, T., Mirin, A., Cayan, D.R. and Dettinger, M.D., 2008. Human-induced changes in the hydrology of the western United States. *Science* 319, 1080-1083.
- Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu & J.P. Palutikof, eds., 2008: *Le changement climatique et l'eau*, document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Secrétariat du GIEC, Genève, 236 p.
- Beyene, T., Lettenmaier, D.P. & Kabat, P., 2009. Hydrologic impacts of climate change on the Nile River basin: Implications of the 2007 IPCC climate scenarios. *Climatic Change online*. doi:10.1007/s10584-009-9693-0.
- Christensen, N.S. & Lettenmaier, D. P., 2007. A multimodel ensemble approach to assessment of climate change impacts on the hydrology and water resources of the Colorado River Basin. *Hydrology and Earth System Sciences* 11, 1417–1434.
- Christensen, N.S., Wood, A.W., Voisin, N., Lettenmaier, D.P. & Palmer, R.N., 2004. Effects of Climate Change on the Hydrology and Water Resources of the Colorado River Basin. *Climatic Change* 62, 337-363.
- Christensen, N.S., Wood, A.W., Voisin, N., Lettenmaier, D.P. & R.N. Palmer, 2004. Effects of Climate Change on the Hydrology and Water Resources of the Colorado River Basin, *Climatic Change* 62, 337-363.

- Conway, D. and Schipper, E.L.F., 2011. Adaptation to climate change in Africa: Challenges and opportunities identified from Ethiopia. *Global Environmental Change* 21:227–237, doi:10.1016/j.gloenvcha.2010.07.013
- Conway, D., 2011. Adapting climate research for development in Africa. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2011 doi: 10.1002/wcc.115.
- Cuo, L., T.K. Beyene, N. Voisin, F. Su, D.P. Lettenmaier, M. Alberti, & J.E. Richey, 2011. Effects of mid-twenty-first century climate and land cover change on the hydrology of the Puget Sound basin, Washington. *Hydrological Processes*, 25, 1729–1753, doi: 10.1002/hyp.7932.
- Diongue, A., Lafore, J.P., Redelsperger, J.L., Rocca, R., 2002. Numerical study of a Sahelian synoptic weather system: initiation and mature stages of convection and its interactions with the large scale dynamics. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 128, 1899-1927.
- Gallée, H., Moufouma-Okia, W., Bechtold, P., Brasseur, O., Dupays, I., 2004. A high-resolution simulation of a West African rainyseason using a regional climate model. *Journal of Geophysical Research* 109, D05108. doi:10.1029/2003JD004020.
- Giorgi, F., Mearns, L.O., 1999. Introduction to special section: regional climate modelling revisited. *Journal of Geophysical Research* 104, 6335–6352.
- Goulden, M., Conway, D. and Persechino, A., 2009. Challenges of adaptation to climate change in trans boundary river basins in Africa. *Hydrological Sciences Journal* 54, 805-828.
- Haddeland, D. Clark, W. Franssen, F. Ludwig, F. Voß, N. W. Arnell, N. Bertrand, M. Best, S. Folwell, D. Gerten, S. Gomes, S.N. Gosling, S. Hagemann, N. Hanasaki, R. Harding, J. Heinke, P. Kabat, S. Koirala, T. Oki, J. Polcher, T. Stacke, P. Viterbo, G. P. Weedon, & P. Yeh Multi-Model Estimate of the Global Water Balance: Setup and First Results. *Journal of Hydrometeorology*, 12, 869–884, doi: 10.1175/2011JHM1324.
- Hagemann, S., Chen, C., Haerter, J. O., Heinke, J., Gerten, D., & Piani, C. 2011. Impact of a statistical bias correction on the projected hydrological changes obtained from three GCMs and two hydrology models. *Journal of Hydrometeorology*, 12, 556-578.
- Hernes, H., Dalfelt, A., Berntsen, T., Holtmark, B., Otto Naess, L., Selrod, R. & Aaheim, A., 1995. Climate strategy for Africa CICERO Report 1995:3, University of Oslo, Norway, 83pp.
- Hudson, D.A., Jones, R., 2002. Regional Climate Model simulations of present—day and future climates of southern Africa. Technical note 39, Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Met Off Bracknell, England.
- Hulme, M, R., Doherty, T. Ngara, M. New, and D. Lister, 2001. African climate change: 1900-2100. *Climate Research*, 17, 145–168.
- Hulme, M., 1994. Regional climate change scenarios based on IPCC emissions projections with some illustrations for Africa. *Area*, 26, 33-44.
- Hulme, M., E. M. Barrow, N. W. Arnell, P. A. Harrison, T. C. Johns, & T. E. Downing, 1999. Relative impacts of human-induced climate change and natural climate variability. *Nature*, 397, 688–691
- Hulme, M., R. Doherty, T. Ngara, M. New, & D. Lister, 2005. Global warming and African climate change: A re-assessment. *Climate Change in Africa*, P. S. Low, Ed., Cambridge University Press, 29–40.
- GIEC 2001: Changements climatiques 2001: Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au Troisième rapport d'évaluation du GIEC. Cambridge: Cambridge University Press.

- GIEC 2007. Résumé à l'intention des décideurs: Changements climatiques 2007: Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor & H.L. Miller (eds.)] Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États-Unis d'Amérique.
- Joubert, A.M. & Hewitson, B.C., 1997. Simulating present and future climates of southern Africa using general circulation models *Progress in Physical Geography*, 21, 51-78.
- Kundzewicz, Z. W., Mata, L. J., Arnell, N., Döll, P., Kabat, P., Jiménez, B., Miller, K., Oki, T., Şen, Z. & Shiklomanov, I. 2007. Ressources d'eau douce et leur gestion. Changements climatiques 2007: Conséquences, adaptation et vulnérabilité. Contribution du Groupe de travail II au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, P. J. van der Linden & C. E. Hanson (eds.)], 173–210. Cambridge University Press, Royaume-Uni.
- Lambers H., Chapin, F.S. and Pons T.L. 1998 *Plant physiological ecology*. Springer New York.
- Liang, X., Lettenmaier, D.P., Wood, E.F., Burges, S.J. (1994) A Simple Hydrologically Based Model of Land-Surface Water and Energy Fluxes for General-Circulation Models. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 99, 14415-14428.
- Maurer, E.P., Adam, J.C. and Wood, A.W., 2009. Climate model based consensus on the hydrologic impacts of climate change to the Rio Lempa basin of Central America. *Hydrology and Earth System Sciences* 13, 183-194.
- Nijssen, B., D.P. Lettenmaier, X. Liang, S. W. Wetzel, and E.F. Wood, 1997: Streamflow simulation for continental-scale river basins. *Water Resources Research*, 33, 711-724.
- Nijssen, B., O'Donnell, G.M., Hamlet, A. F. and Lettenmaier, D.P., 2001. Hydrological sensitivity of global rivers to climate change. *Climatic Change* 50, 143-175.
- Noguer, M., Jones, R.G., Murphy, J.M., 1998. Sources of systematic errors in the climatology of a nested regional climate model (RCM) over Europe. *Climate Dynamics*, 14, 691–712.
- Pal, J.S., Giorgi, F., Bi, X., Elguindi, N., Solomon, F., Gao, X., Francisco, R., Zakey, A., Winter, J., Ashfaq, M., Syed, F., Bell, J.L., Diffanbaugh, N.S., Kamacharya, J., Konare, A., Martinez, D., da Rocha, R.P., Sloan, L.C., Steiner, A., 2007. The ICTP RegCM3 and RegCNET: regional climate modeling for the developing world. *Bulletin of the American Meteorological Society* 88, 1395–1409.
- Payne, J.T., A.W. Wood, A.F. Hamlet, R.N. Palmer & DP. Lettenmaier, 2004. Mitigating the effects of climate change on the water resources of the Columbia River basin. *Climatic Change* Vol. 62, Issue 1-3, 233-256.
- Peterson, T. C., M. A. Taylor, R. Demeritte, D. L. Duncombe, S. Burton, F. Thompson, A. Porter, M. Mercedes, E. Villegas, & R. S. Fils, 2002. Recent changes in climate extremes in the Caribbean region, *Journal of Geophysical Research*, 107, 4601.
- Piani, C., Weedon, G.P., Best, M., Gomes, S.M., Viterbo, P., Viterbo, S., & Haerter, J.O., 2010. Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. *Journal of Hydrology*, 395, 199–215.
- Ringius, L., Downing, T.E., Hulme, M., Waughray, D. & Selrod, R., 1996. Climate change in Africa - issues and regional strategy CICERO Report No.1996:8, CICERO, Oslo, Norway, 154pp.

- Rost, S., D. Gerten, A. Bondeau, W. Lucht, J. Rohwer, & S. Schaphoff, 2008: Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system. *Water Resources Research*, 44, W09405, doi: 10.1029/2007WR006331.
- Sperna Wieland, F. C., L. P. H. van Beek, J. C. J. Kwadijk, & M. F. P. Bierkens, 2010. The ability of a GCM-forced hydrological model to reproduce global discharge variability. *Hydrology and Earth System Sciences* 14, 1595-1621
- Tadross, M.A., Gutowski, W.J., Hewitson, B.C., Jack, C., New, M., 2006. MM5 simulations of interannual change and the diurnal cycle of southern African regional climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 86, 63–80.
- Trenberth, K. E., J. Fasullo, & L. Smith, 2005. Trends and variability in column integrated atmospheric water vapour. *Climate Dynamics* 24, 741-758.
- Trenberth, K.E., Stepaniak, D.P., Hurrell, J.W., 2001. Quality of reanalyses in the tropics. *Journal of Climate* 14, 1499–1510
- Van Rheenen, N.T., A.W. Wood, R.N. Palmer & D.P. Lettenmaier, 2004. Potential Implications of PCM Climate Change Scenarios for Sacramento - San Joaquin River Basin Hydrology and Water Resources. *Climatic Change* 62, 257-281.
- Vecchi, G. P. & B. J. Soden, 2007. Global warming and the weakening of the tropical circulation. *Journal of Climate*, 20, 4316-4340.
- Vincent, L. A., & E. Mekis, 2006. Changes in daily and extreme temperature and precipitation indices for Canada over the twentieth century. *Atmosphere Ocean*, 44, 177-193.
- Wang, Y., Leung, L.R., McGregor, J.L., Lee, D.K., Wang, W.C., Ding, Y., Kimura, F., 2004. Regional climate modeling: progress, challenges and prospects. *Journal of the Meteorological Society Japan* 82, 1599–1628.
- Washington, R., & T. E. Downing, 1999. Seasonal forecasting of African rainfall: Prediction, responses and household food security. *Geography Journal* 165, 255–274.
- Yolande Munzimi, 2008. Agronomy Sciences Department derived Rainfall Estimates (TRMM products) used for Hydrological Predictions of the Congo River flow: Overview and Preliminary Results. University of Kinshasa.
- Zhang, X., F. W. Zwiers, G. C. Hegerl, F. H. Lambert, N. P. Gillett, S. Solomon, P. A. Stott and T. Nozawa, 2007. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. *Nature* 448, 461-465. doi:10.1038/nature06025.
- Zveryaev, I. I. and R. P. Allan, 2005. Water vapour variability in the tropics and its links to dynamics and precipitation. *Journal of Geophysical Research* 110, D21112, doi:10.1029/2005JD006033.

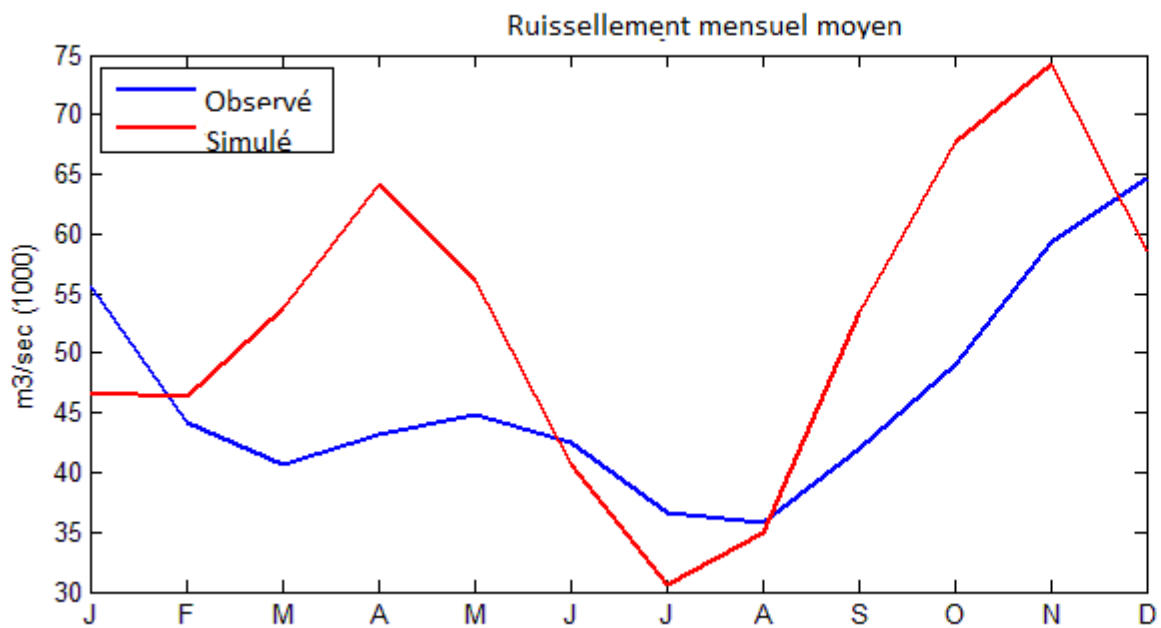
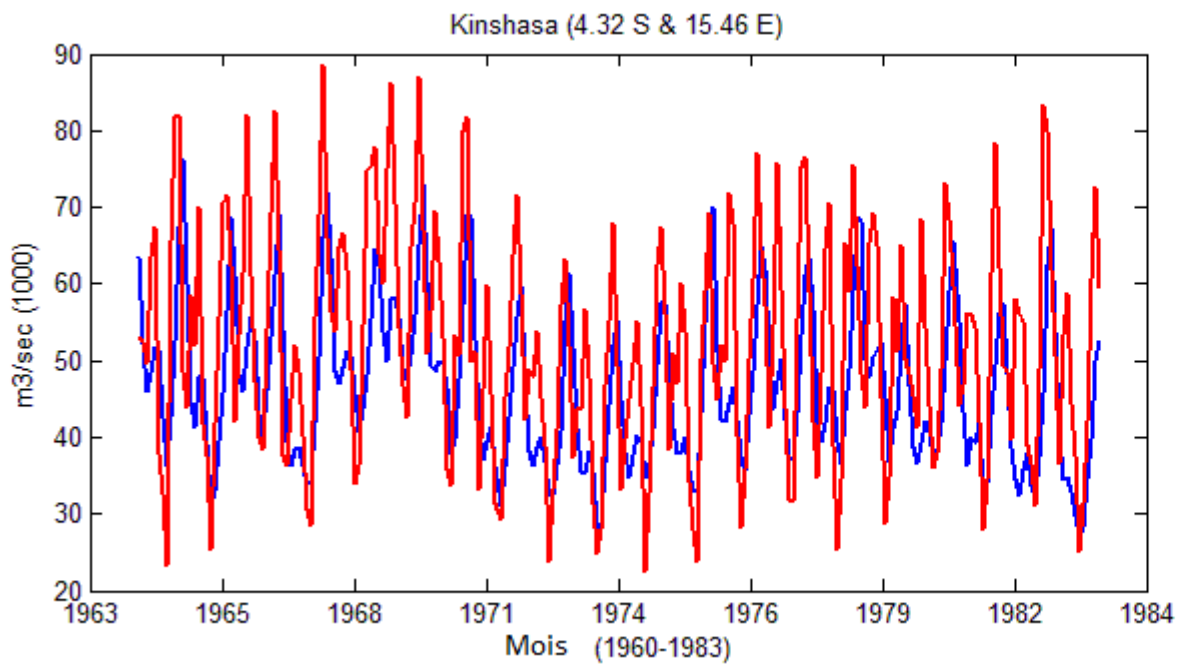
[http://www.eoearth.org/article/Central\\_Africa\\_and\\_freshwater\\_resources](http://www.eoearth.org/article/Central_Africa_and_freshwater_resources)

## ANNEXES

Annexe 1 : Débits naturalisés et observés du fleuve du Congo	I
Annexe 2 : Séries chronologiques de la température annuelle moyenne et niveau des anomalies des précipitations	IV
Annexe 3 : Cycles moyens saisonniers et statistiques relatifs au bassin du fleuve Congo	V
Annexe 4 : Distribution spatiale des prévisions multimodèles des variations de la moyenne des précipitations	IX
Annexe 5 : Anomalies de la moyenne annuelle des températures et des précipitations	XII
Annexe 6 : Tendances des températures	XVI

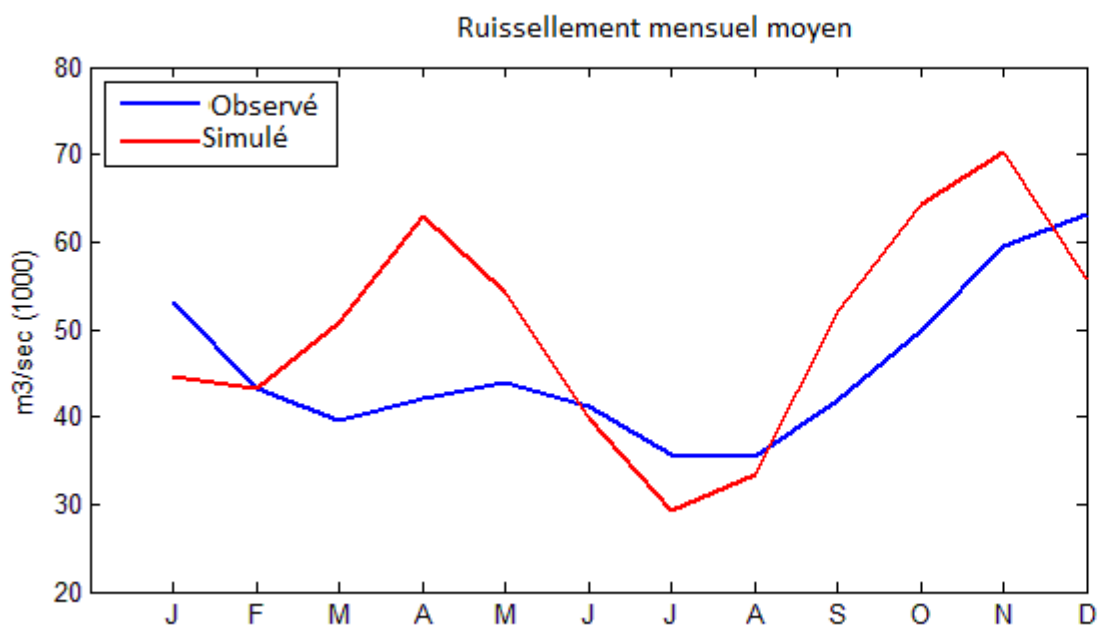
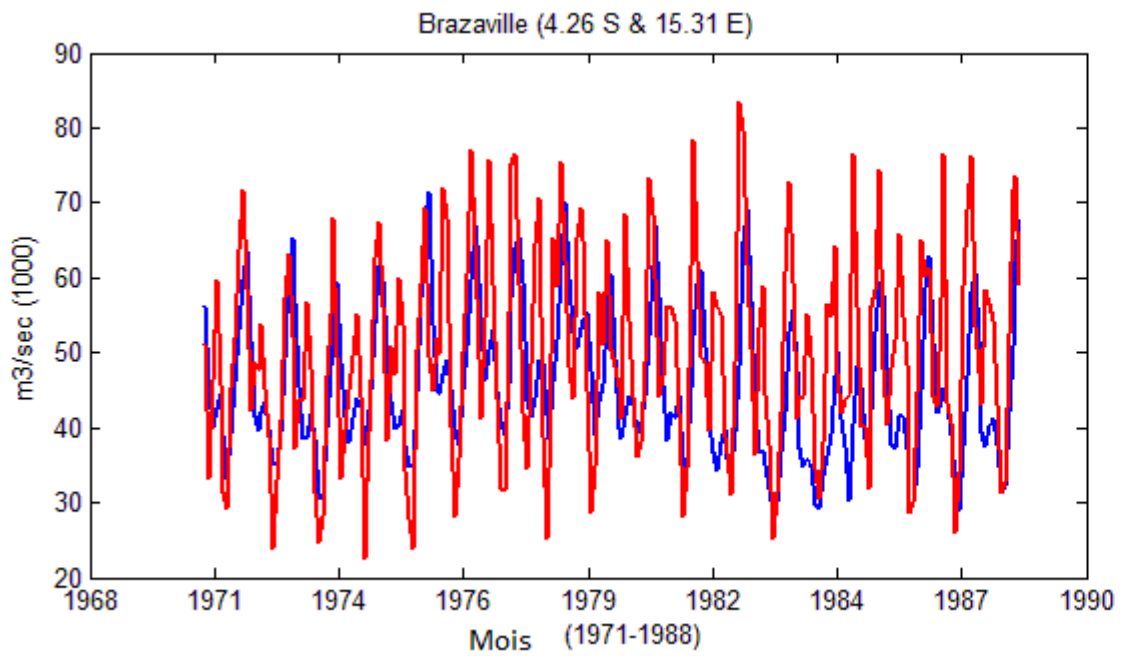
## Annexe 1 Débits naturalisés et observés du fleuve du Congo

Débits naturalisés et observés du fleuve Congo, dans les stations hydrométriques de Kinshasa, pour la période 1962-1983.

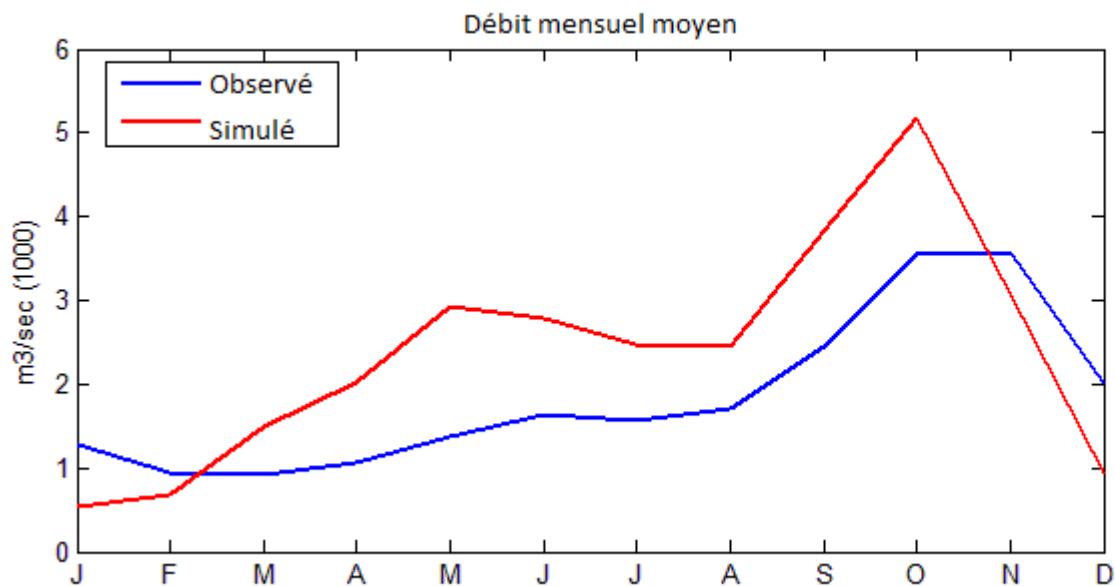
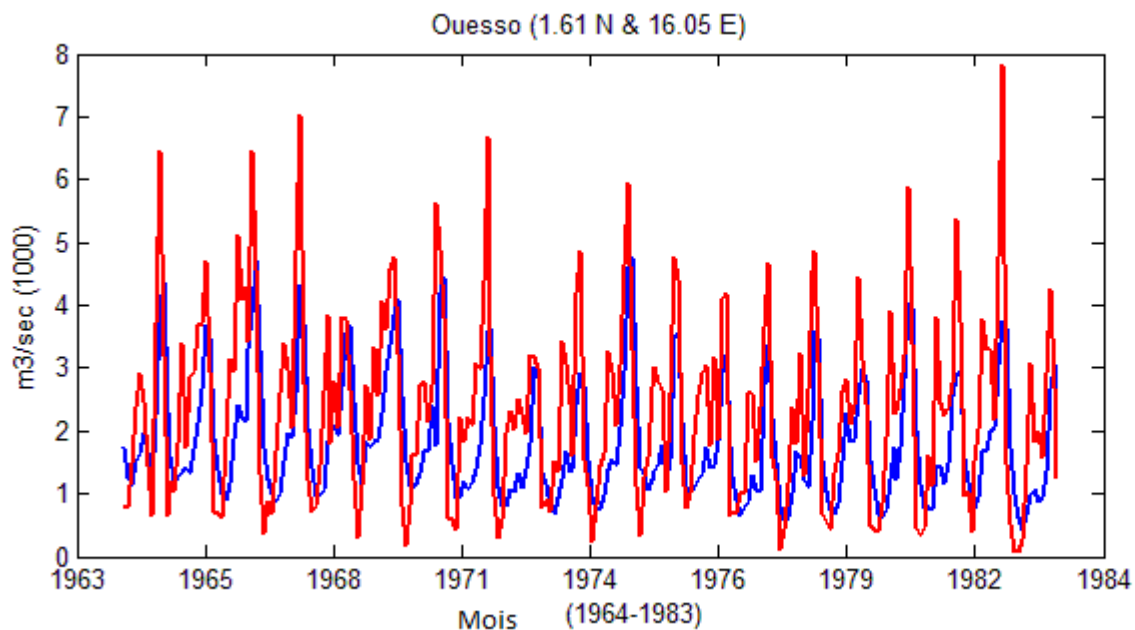




Débits naturalisés et observés du fleuve Congo, dans les stations hydrométriques de Brazzaville, pour la période 1970-1988.

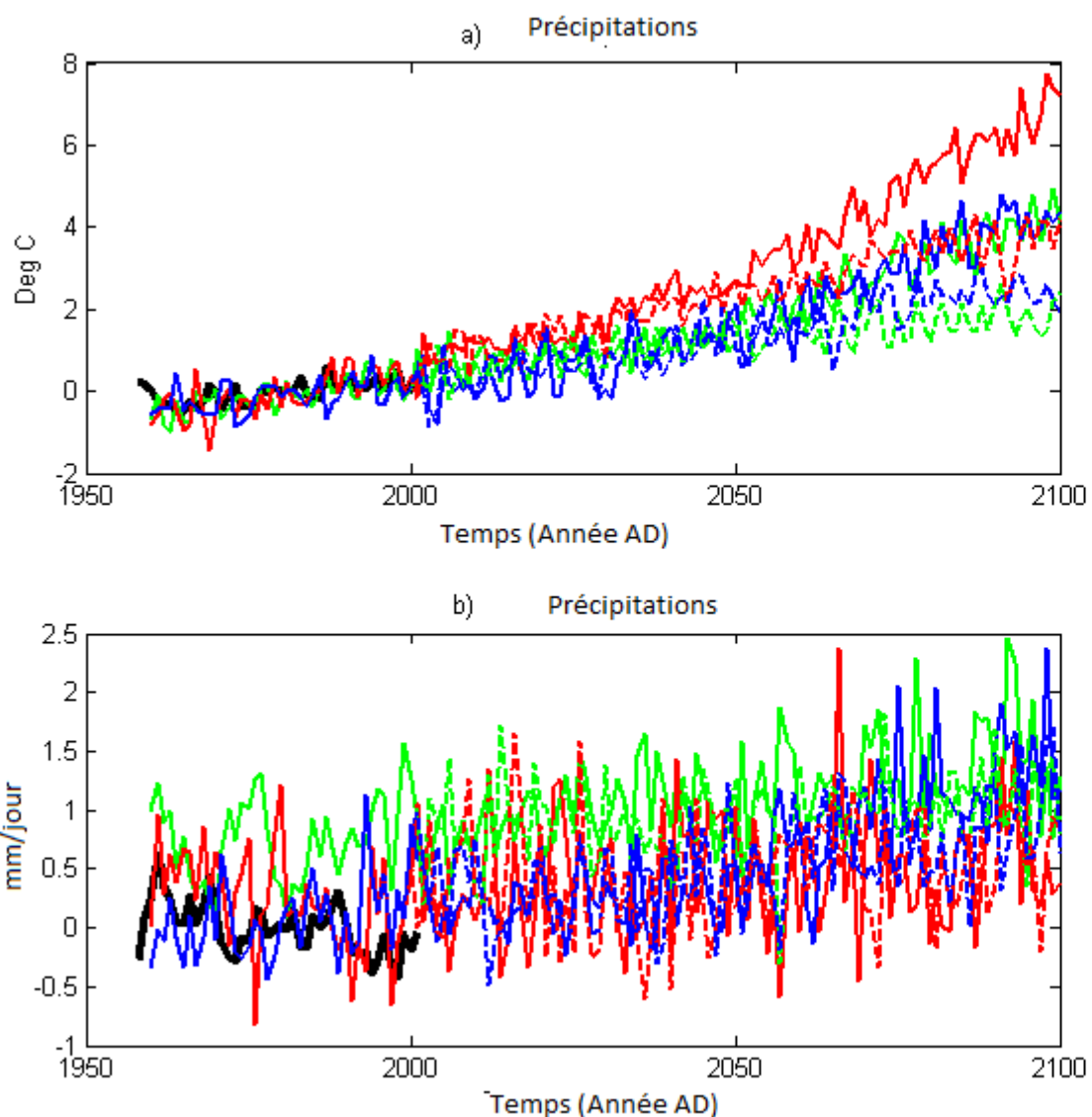


Débits naturalisés et observés du fleuve Congo, dans les stations hydrométriques d'Ouessou, pour la période 1965-1983. La période de validation indiquée ne tient pas compte de la période 1964-1983, utilisée pour le calibrage du modèle.



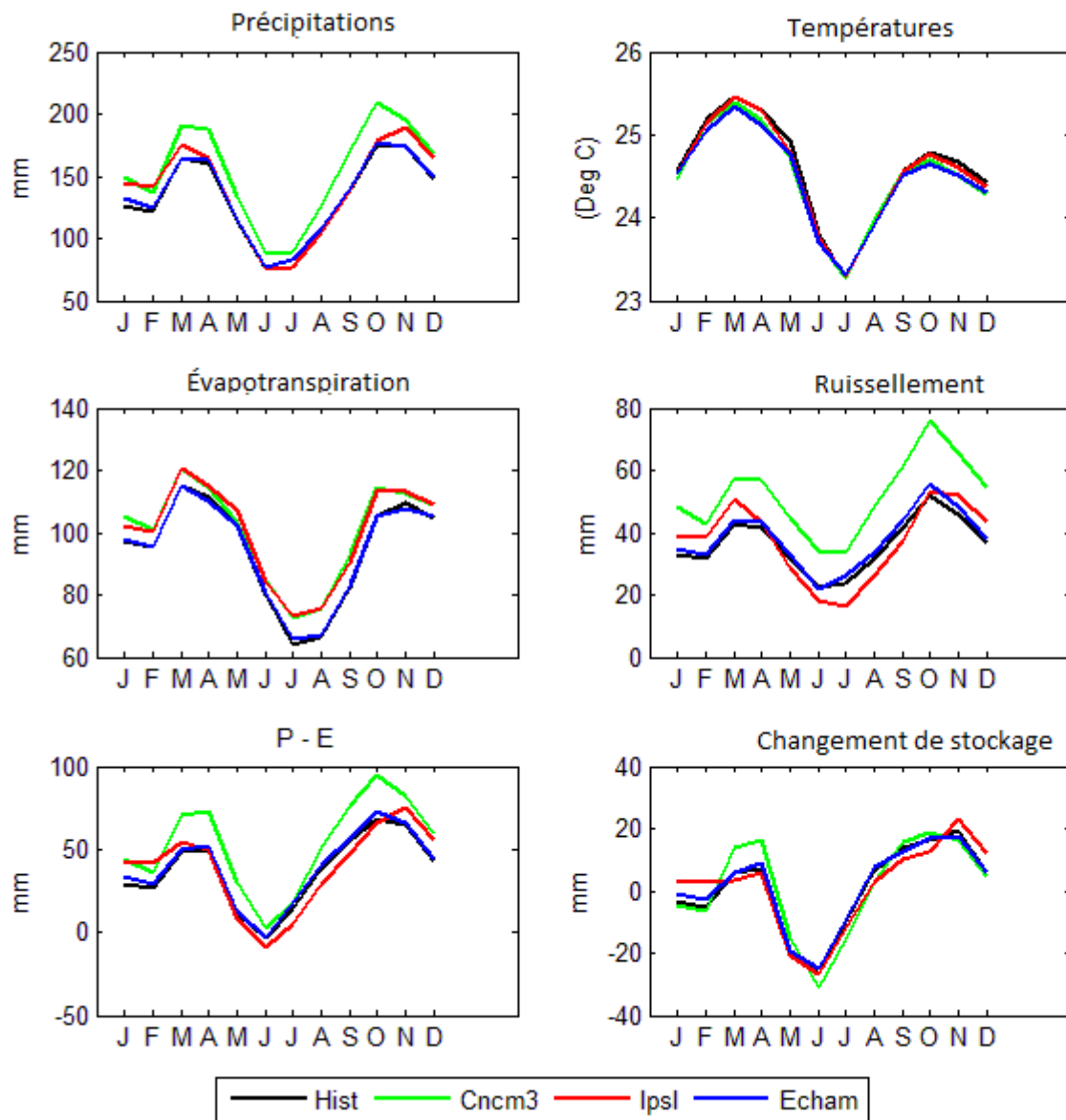
## Annexe 2 Séries chronologiques de la température annuelle moyenne et niveau des anomalies des précipitations

Séries chronologiques de la température moyenne annuelle (a) et niveau annuel moyen des précipitations (mm/j) (b) anomalie des trois MCG et deux scénarios d'émissions. Note: Tandis que les prévisions de hausse des températures divergent vers la fin du siècle, tous les modèles indiquent clairement une tendance haussière. Un des MGC présente des parcours historiques différents, de 1960 à 2000. La ligne noire épaisse indique une série chronologique de la moyenne annuelle observée, en termes d'anomalie du climat historique (1960-2000).

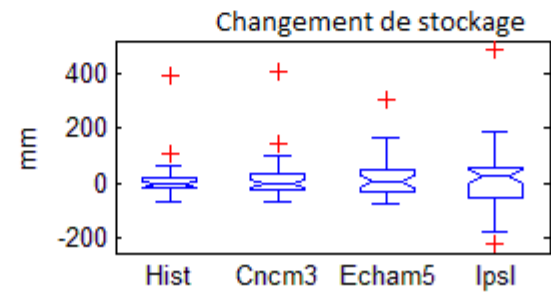
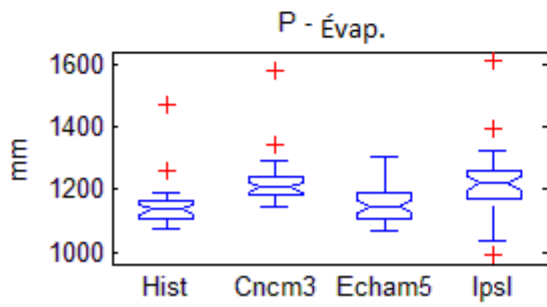
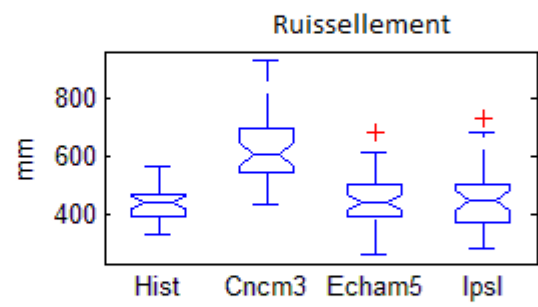
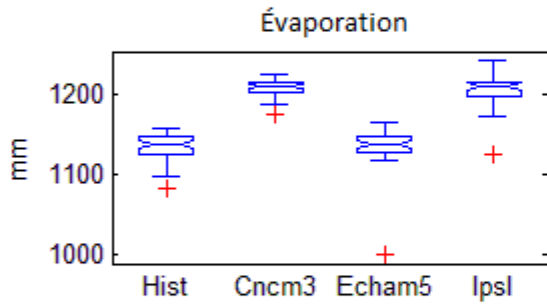
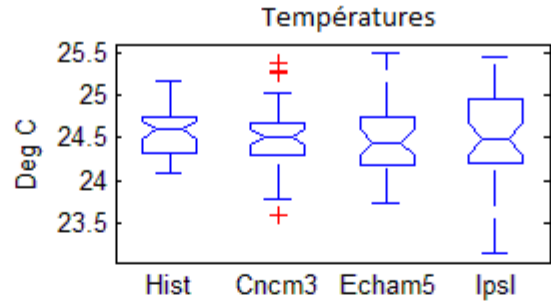
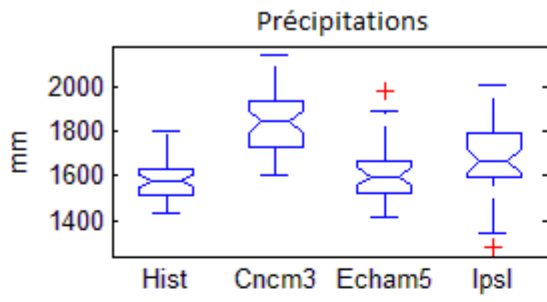


## Annexe 3 Cycles moyens saisonniers et statistiques relatifs au bassin du fleuve Congo

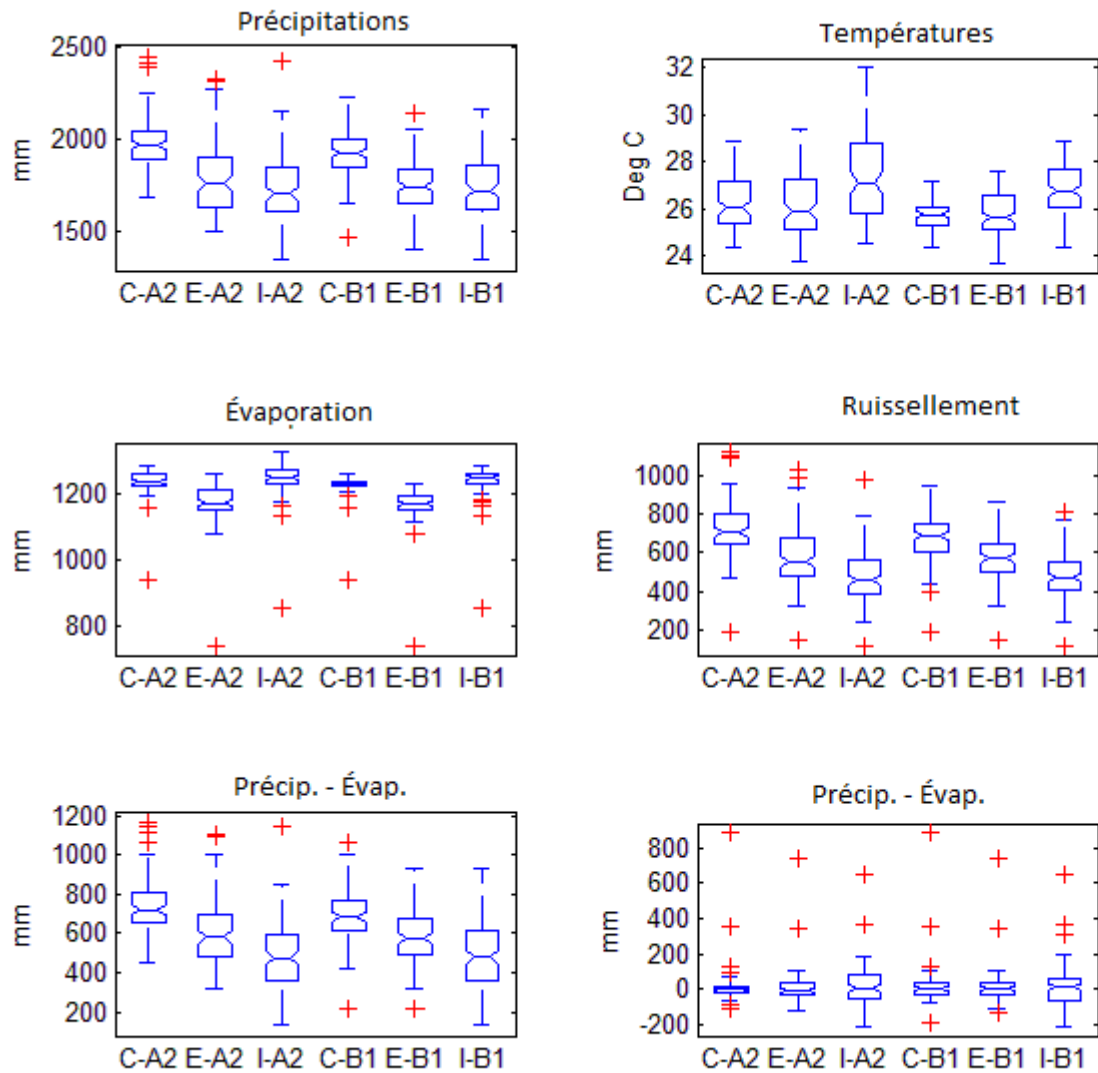
Cycles saisonniers moyens des précipitations, des températures, de l'évapotranspiration, du ruissellement, de P-E et changement de stockage pour chaque simulation de MCG au 20<sup>e</sup> siècle, dans le bassin du fleuve Congo.



Tracés en boîtes des statistiques annuelles (précipitations, températures, évapotranspiration, ruissellement, P-E et changement de stockage) à partir de trois MCG et de deux scénarios d'émissions prospectifs.

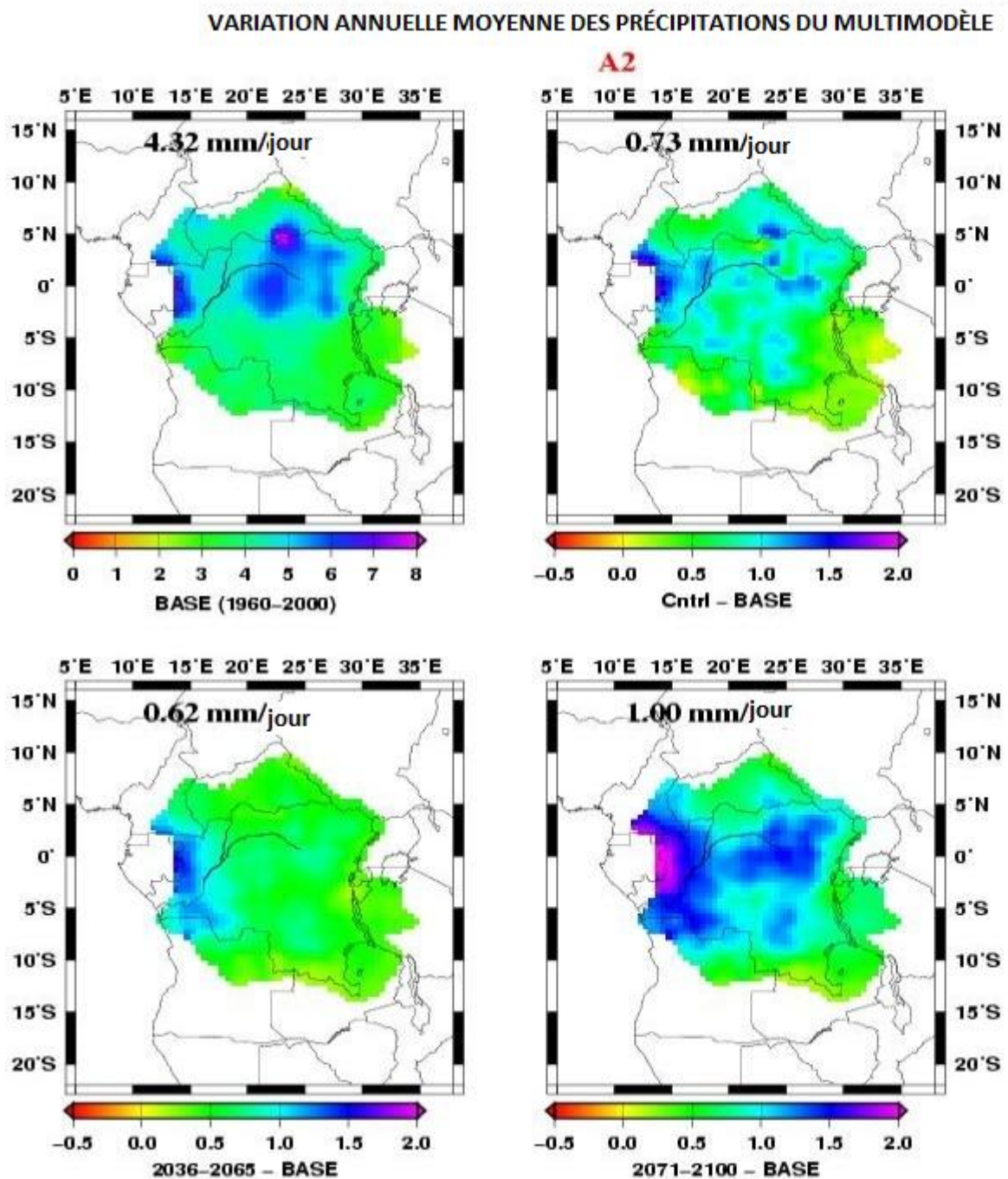


Tracés en boîtes des statistiques annuelles (précipitations, températures, évapotranspiration, ruissellement, P-E et changement de stockage) à partir de trois MCG et de deux scénarios d'émissions prospectifs.



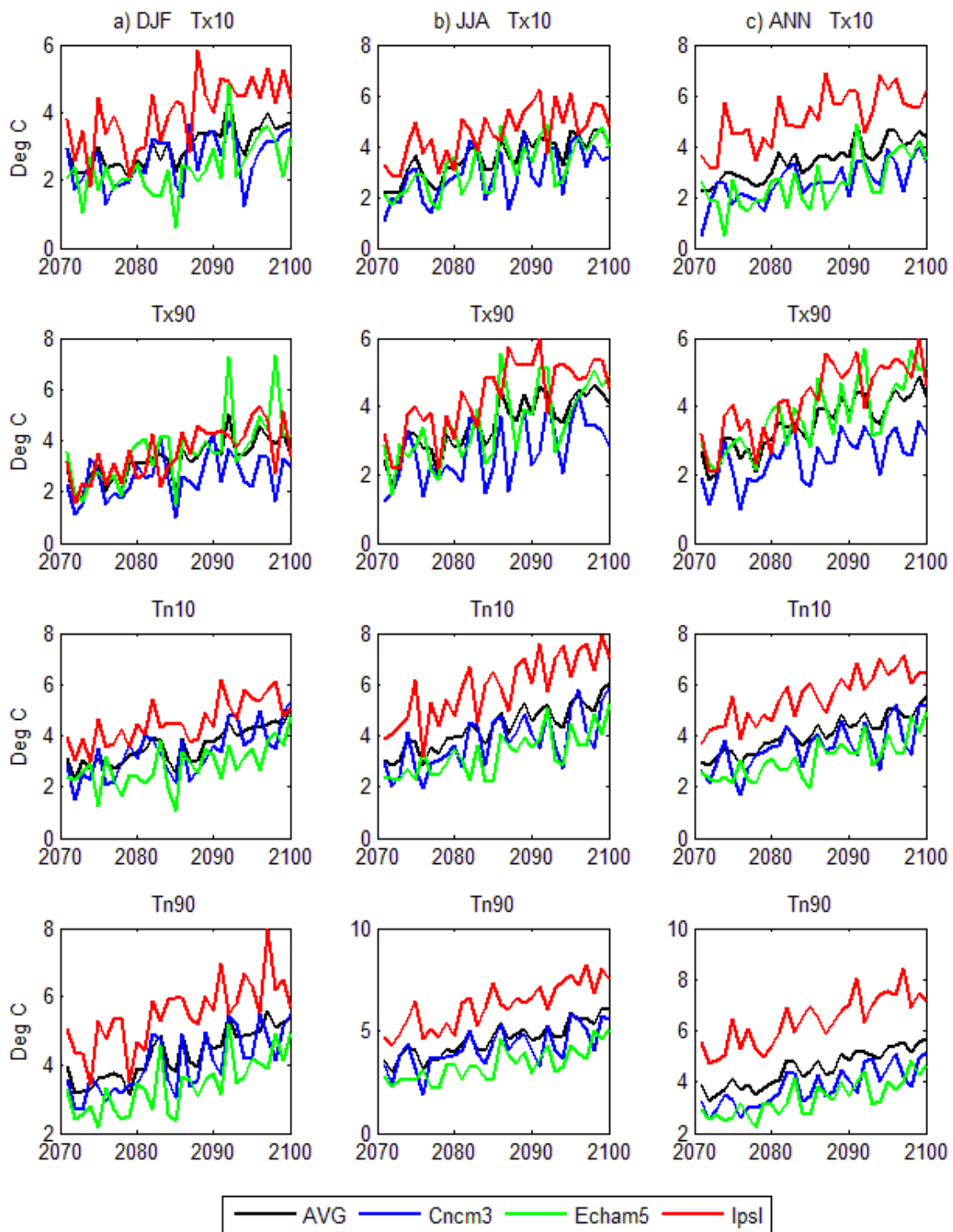
## Annexe 4 Distribution spatiale des prévisions multimodèles des variations de la moyenne des précipitations

Distribution spatiale des prévisions multimodèles des variations de la moyenne des précipitations, pour les périodes 2036-2065 et 2071-2100, d'après le scénario d'émissions A2. Panneau supérieur, à gauche (base), panneau supérieur droit (contrôle), panneau inférieur, à gauche (2036-2065) et panneau inférieur, à droite (2071-2100)



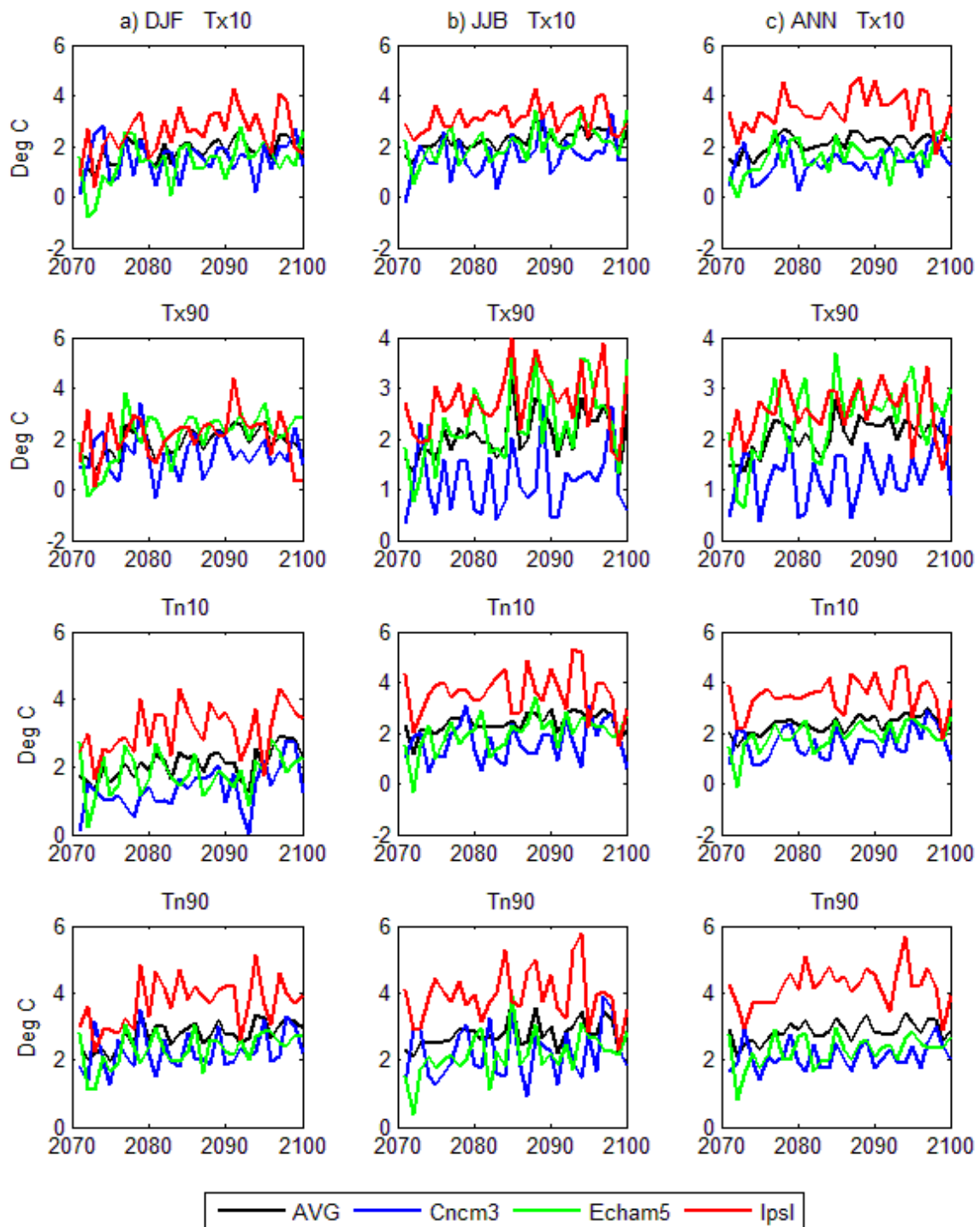
## Annexe 5 Anomalies de la moyenne annuelle des températures et des précipitations

Anomalies de la moyenne annuelle de (Tx10 et Tx90) dans le bassin du Congo; 10<sup>e</sup> et 90<sup>e</sup> centiles de la température maximale, et (Tn10 et Tn90); 10<sup>e</sup> et 90<sup>e</sup> centiles de la température minimale pour la période 2070-2100, à l'aide du scénario d'émissions A2. Les anomalies ont trait aux valeurs moyennes de 1960 à 2000.

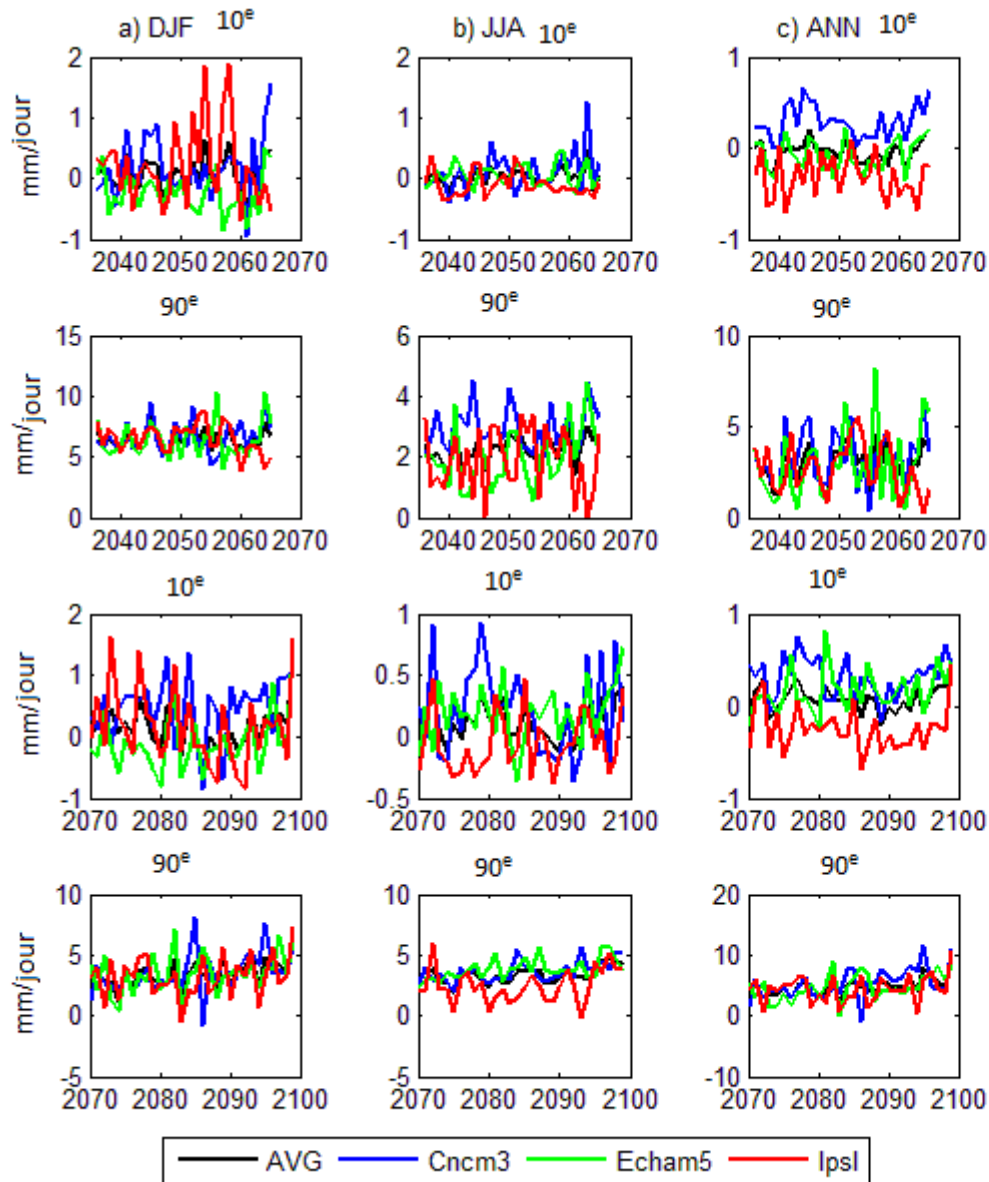




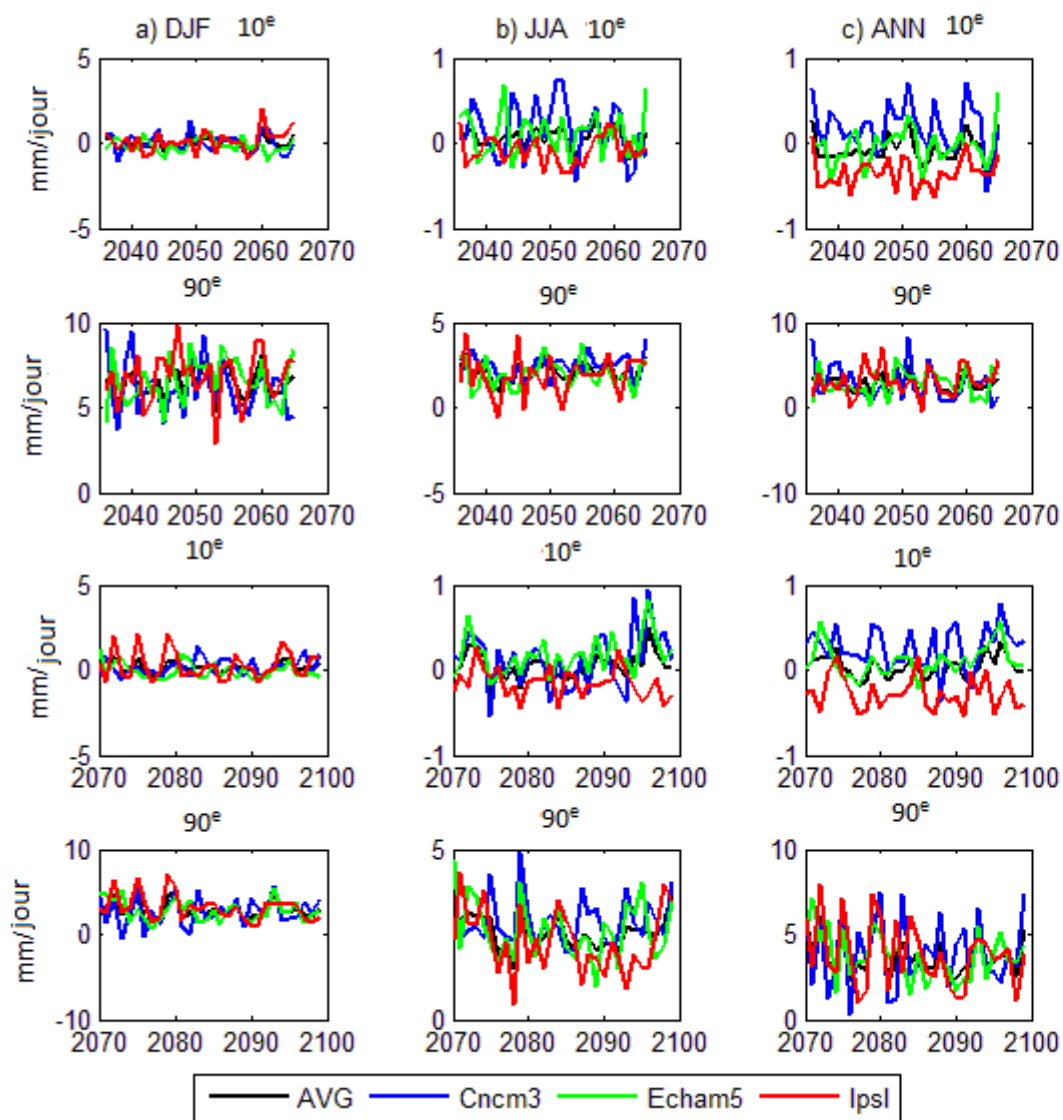
Anomalies de la moyenne annuelle de (Tx10 et Tx90) dans le bassin du Congo; 10<sup>e</sup> et 90<sup>e</sup> centiles de la température maximale, et (Tn10 et Tn90); 10<sup>e</sup> et 90<sup>e</sup> centiles de la température minimale pour la période 2070-2100, à l'aide du scénario d'émissions A2. Les anomalies ont trait aux valeurs moyennes de 1960 à 2000.



Anomalies des séries chronologiques des précipitations extrêmes pour trois saisons (DJF, JJA et ANN), dans les 10<sup>e</sup> et 90<sup>e</sup> centiles de deux périodes, au moyen du scénario d'émissions A2. Les anomalies ont trait aux valeurs moyennes de 1960 à 2000.

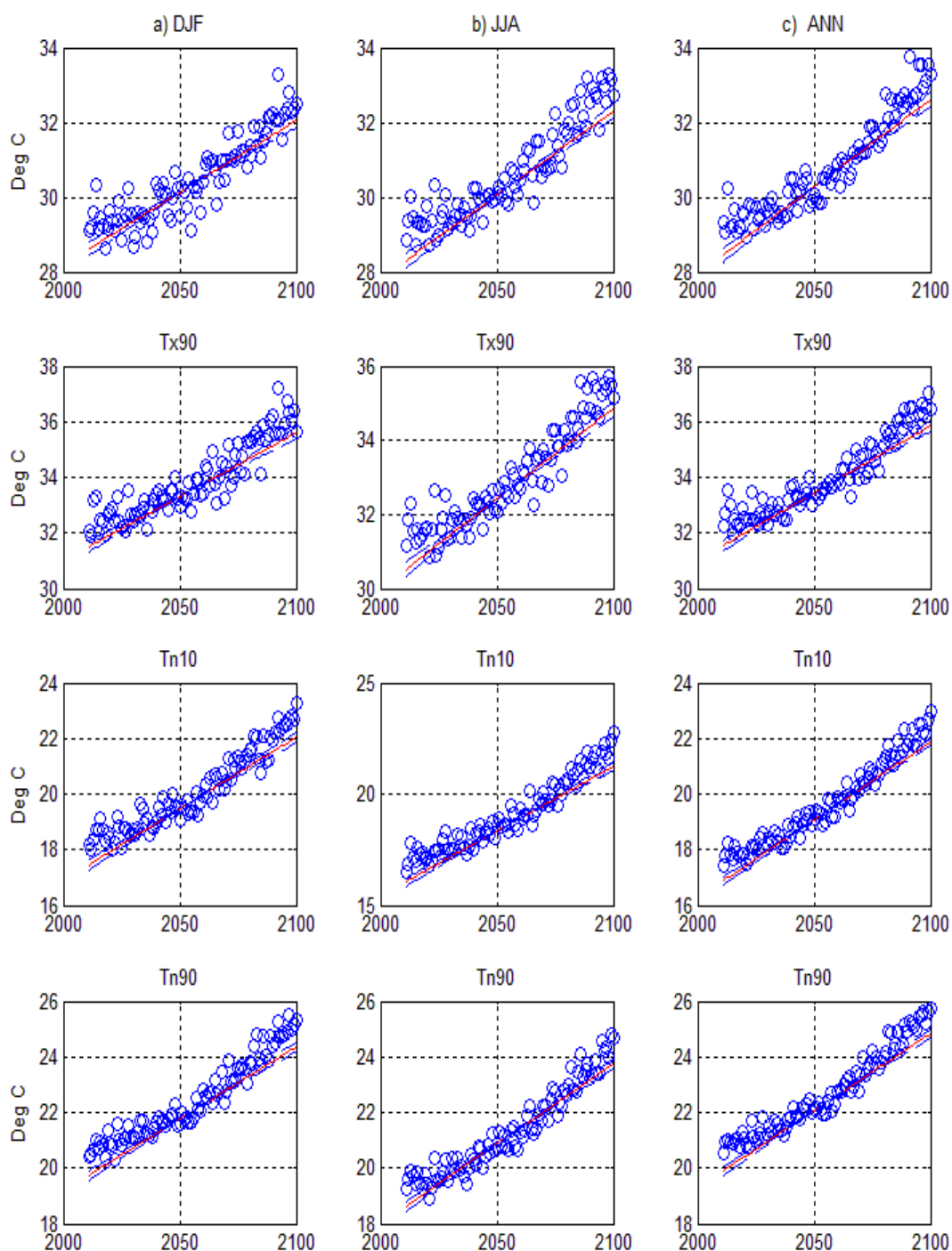


Anomalies des séries chronologiques des précipitations extrêmes pour trois saisons (DJF, JJA et ANN), dans les 10<sup>e</sup> et 90<sup>e</sup> centiles de deux périodes, au moyen du scénario d'émissions B1. Les anomalies ont trait aux valeurs moyennes de 1960 à 2000.

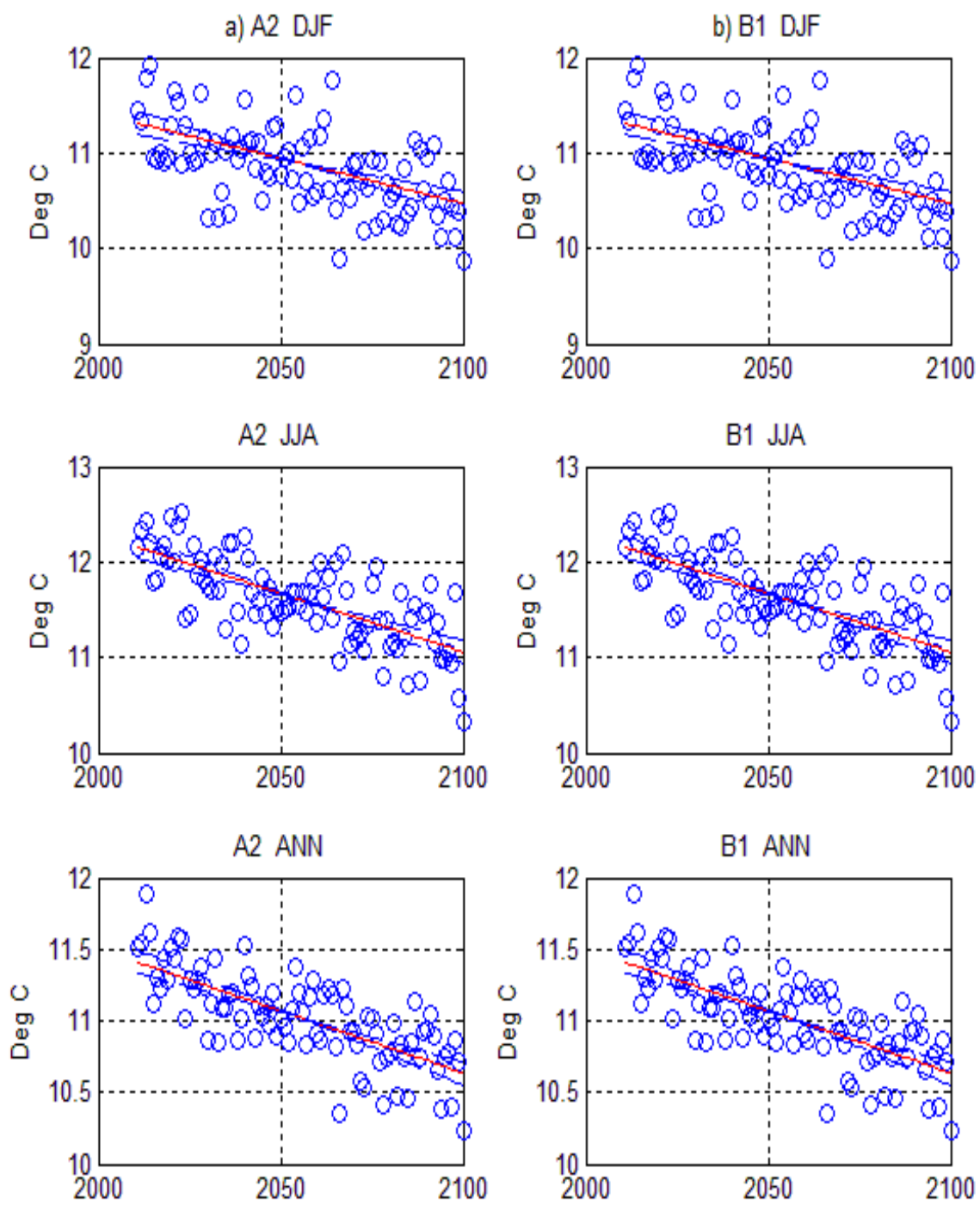


## Annexe 6 Tendances des températures

Tendances des extrêmes de température en (DJF, JJA et ANN), en 10<sup>e</sup> de Tmax et en 90<sup>e</sup> de centile; en 10<sup>e</sup> de Tmin et en 90<sup>e</sup> de centile, pour la période comprise entre 2010-2100, à l'aide de scénarios d'émissions A2. Les lignes rouges indiquent des tendances linéaires.



Les tendances enregistrées dans le bassin du Congo, pour la période 2010-2100, en termes d'échéance de la température diurne (DTR), à l'aide des scénarios A2 et B1. Les lignes rouges indiquent des tendances linéaires.



# Scénarios des changements climatiques dans le bassin du Congo

## Impacts des changements climatiques sur la région du bassin du Congo

Fulco Ludwig  
Wietse Franssen  
Wilma Jans  
Bart Kruijt  
IwanSupit



On behalf of



Federal Ministry for the  
Environment, Nature Conservation  
and Nuclear Safety

of the Federal Republic of Germany

**giz**



WAGENINGEN UNIVERSITY  
WAGENINGENUR

**CSC**  
Climate Service Center  
Germany



Eine Einrichtung der GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH



# Impacts des changements climatiques sur la région du bassin du Congo

Fulco Ludwig  
Wietse Franssen  
Wilma Jans  
Bart Kruijt  
Iwan Supit

**Le présent rapport doit être cité comme suit :**

Ludwig F., Franssen W., Jans W., Beyenne T., Kruijt B., Supit I. 2013: Climate change impacts on the CongoBasin region. *In: Climate Change Scenarios for the CongoBasin*. [Haensler A., Jacob D., Kabat P., Ludwig F. (eds.)]. Climate Service Centre Report No. 11, Hamburg, Germany, ISSN: 2192-4058.



*«Impacts des changements climatiques sur la région du bassin du Congo»*

Partie de la série : «Scénarios des changements climatiques dans le bassin du Congo»

Auteurs : Fulco Ludwig, Wilma Jans, WietseFranssen, Bart Kruijt, IwanSupit

Mise en page et édition : Linda van Garderen

Date : Février 2013

Ministère fédéral allemand de l'Environnement, de la Protection de la nature et de la Sûreté nucléaire (BMU) / Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), Allemagne / Earth System Science and Climate Change group (Groupe sur le système des sciences de la Terre et le changement climatique), Université de Wageningen, Pays-Bas / Climate Service Centre (CSC), Allemagne.

Photo de couverture : “La forêt de brouillard sempervirente sur les pentes du Mt. Rwenzori”

@GuenterGuni/ istockphoto.com

## RÉSUMÉ

Ce rapport présente les analyses des impacts du changement climatique dans le bassin du Congo sur l'eau pour l'agriculture, l'hydroélectricité, le fonctionnement des écosystèmes forestiers et le stockage du carbone ainsi que les impacts de la variabilité du climat et du changement climatique sur le futur développement économique. Pour quantifier les impacts des futurs changements climatiques, nous avons élaboré un cadre de modélisation qui associe des modèles de climats à différents modèles d'impacts. Les résultats des modèles climatiques corrigés du biais ont été utilisés pour le forçage du modèle macro-hydrologique VIC. L'utilisation de modèles numériques est donc nécessaire. Pour ce projet, nous avons élaboré un cadre de modélisation rendant possible l'association de modèles climatiques aux modèles hydrologique, agricole et écosystémique.

En général, nos analyses montrent qu'il aura suffisamment d'eau pour l'hydroélectricité dans l'avenir. Ainsi, en moyenne, le changement climatique aura un impact positif sur la capacité de production électrique. Cependant, le débit des fleuves deviendra également plus variable, ce qui augmentera les risques de crues et pourrait rendre la production d'énergie moins fiable. La hausse de la variabilité du débit rendra la gestion des barrages plus compliquée car, l'équilibre entre la prévention des crues et la production optimale d'énergie sera plus difficile à gérer.

Le changement climatique aura des impacts différents sur les écosystèmes forestiers. Les fortes concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub> pourraient accroître la croissance des forêts et le captage du carbone. Cependant, les fortes températures auront des impacts négatifs sur la croissance des forêts et réduiront la quantité de carbone dans les forêts. Les analyses des impacts montrent que suite au changement climatique, le bassin du Congo pourrait subir une baisse de la croissance des forêts comme c'est parfois le cas prévu pour le bassin de l'Amazonie. Par contre, le carbone des écosystèmes pourrait légèrement augmenter. En fonction de la manière dont le climat changera, la couverture du sol pourra être modifiée dans les différents écosystèmes. Selon les analyses, le scénario futur le plus probable est une expansion modérée, vers le nord et le sud des forêts sempervirentes en savanes et prairies.

En général, les conditions climatiques ne limitent pas la production agricole dans la région du bassin du Congo à l'heure actuelle. Ce n'est qu'aux confins (plus secs) de la région que la limitation d'eau réduit parfois la capacité de production agricole. Dans les climats tropicaux, une très forte pluviométrie et une humidité élevée limitent la production agricole à cause du lessivage des nutriments et de la croissance fongique. L'impact du changement climatique sur la production agricole sera toutefois réduit dans la région. Dans plusieurs endroits, le stress hydrique augmentera légèrement dans le futur. Cependant, l'agriculture ne souffrira pas des pénuries structurelles en eau. Seule l'agriculture dans les régions de savane environnant le bassin du Congo pourrait éventuellement faire face aux pénuries d'eau dans le futur. Dans les savanes situées au sud, les analyses indiquent que des sécheresses de plus en plus fréquentes auront un impact sur la production agricole et le stress hydrique.

Dans la plupart des pays de la COMIFAC, il existe une corrélation claire entre pluviométrie annuelle et croissance du PIB. Les taux de croissance du PIB et du PIB agricole ont tendance à être plus élevés

---

les années où les précipitations sont supérieures à la moyenne plutôt que les années de sécheresse. L'impact de la variabilité du climat sur la croissance du PIB est plus perceptible pendant les années de sécheresse. Pendant les années où les précipitations sont inférieures à la moyenne, la croissance est parfois gravement réduite et généralement plus l'année est sèche, plus le taux de croissance du PIB est faible. Toutes les années où les précipitations sont supérieures à la moyenne ont tendance à avoir des taux de croissance économique relativement similaires. La corrélation entre pluviométrie et taux de croissance du PIB est plus forte dans les pays avec une pluviométrie plus faible ou plus variable. Dans la plupart des pays, les taux de croissance du PIB agricole sont plus affectés par la variabilité du climat que les taux globaux de croissance du PIB. En ce qui concerne les impacts des futurs changements climatiques sur le développement économique, notre analyse montre que les pays de la COMIFAC sont particulièrement vulnérables à une réduction de la pluviométrie et une augmentation considérable de la variabilité interannuelle des précipitations. Nos résultats montrent qu'à l'échelle continentale, le changement climatique pourrait avoir un impact négatif sur le développement de l'Afrique. Toutefois, les économies des pays de l'Afrique centrale sont susceptibles d'être moins touchées par le changement climatique en comparaison aux pays de l'Ouest, de l'Est et du Sud de l'Afrique. De même, au niveau macro, les scénarios climatiques semblent donner la part belle à l'Afrique centrale en comparaison au reste de l'Afrique. Cependant, certains scénarios de changement climatique montrent de fortes hausses de la variabilité du climat et celles-ci pourraient avoir un impact négatif sur le développement.

En conclusion, les impacts du changement climatique sur les différents secteurs montrent que les principaux impacts seront causés par une condition climatique plus variable. Il n'existe pas d'impacts majeurs en termes de disponibilité de l'eau pour l'agriculture et du stockage du carbone dans les forêts tropicales. De même, la capacité moyenne de production d'énergie à base de l'énergie hydraulique ne baissera pas. Les impacts les plus graves résulteront d'un régime hydrologique plus variable. La conséquence étant une hausse de la fréquence des crues et la complication de la gestion future des barrages.

**Mots clés : Changement climatique ; ressources en eau ; agriculture ; foresterie ; stocks de carbone ; PIB**

---

# Table des matières

RÉSUMÉ.....	
LISTE DES ACRONYMES.....	
<b>1.0 INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>2.0. CADRE DE MODÉLISATION .....</b>	<b>3</b>
2.1 LE MODELE LPJML (LUND-POTSDAM-JENA MANAGED LANDS) .....	4
2.11 Analyses de l'eau agricole .....	4
2.12 Cycle du carbone.....	5
2.2 MODELE DE CAPACITE D'INFILTRATION VARIABLE (VIC).....	6
2.3 MODELE DE LAMINAGE PAR RESERVOIR.....	7
2.3 SIMULATION DU MODELE ET RESERVOIRS FOCALUX. ....	8
<b>3.0 SCÉNARIOS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE .....</b>	<b>9</b>
3.1 MODELES ET SCENARIOS CLIMATIQUES.....	9
3.2 FUTURS CHANGEMENTS DE LA TEMPERATURE .....	10
3.3 FUTURS CHANGEMENTS DES PRECIPITATIONS .....	11
<b>4.0. IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'UTILISATION DE L'EAU AGRICOLE .....</b>	<b>14</b>
4.1 METHODOLOGIE .....	14
4.2 ANALYSES .....	14
4.2.1 Évapotranspiration .....	14
4.2.2 Consommation d'eau verte.....	17
4.2.3 Stress hydrique.....	18
4.3 RESUME .....	20
<b>5.0 IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RESSOURCES HYDRIQUES ET LA CAPACITÉ DE PRODUCTION HYDROÉLECTRIQUE .....</b>	<b>24</b>
5.1 IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES DEBITS ET LA VARIABILITE DES FLEUVES. ....	24
5.2 BARRAGES HYDROELECTRIQUES. ....	26
<b>6.0 IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES FORÊTS ET LE CYCLE DU CARBONE .....</b>	<b>28</b>
6.1 SIMULATIONS ET ANALYSES.....	29
6.2 RESULTATS ET DISCUSSION .....	30
6.3 CONCLUSIONS.....	39
<b>7.0 IMPACT DE LA VARIABILITÉ ET DU CHANGEMENT CLIMATIQUES SUR LE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUE .....</b>	<b>40</b>
<b>8.0 DISCUSSION ET CONCLUSIONS.....</b>	<b>50</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>52</b>

---

## LISTE DES ACRONYMES

ACO	Afrique centrale et de l'ouest
BC	Bassin du Congo
BFC	Bassin du fleuve Congo
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
CEPMMT	Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme
CNRM-MC3	Centre national de recherches météorologiques - modèle couplé 3
CRU	Unité de recherche sur le climat
ECHAM	Modèle du centre européen de Hambourg
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental pour l'évolution du climat
GPCC	Centre mondial de climatologie des précipitations
GPCP	Projet mondial de climatologie des précipitations
IPSL-MC4	Institut Pierre Simon Laplace - modèle couplé 4
LPJml	Modèle dynamique global de végétation LPJml
MCG	Modèle de circulation générale
MGVD	Modèle global de végétation dynamique
MPIOM	Max-Planck-Institut für Meteorologie
PFT	Traits fonctionnels des végétaux
PIB	Produit intérieur brut
PIB agricole	Produit intérieur brut agricole
PPN	Productivité primaire nette
RCA	République centrafricaine
RE4	Rapport d'évaluation 4
REDD	Réduction du déboisement et de la dégradation Réduction du déboisement et de la dégradation plus conservation de la biodiversité
REDD+	
RSSE	Rapport spécial sur les scénarios d'émissions
SLA	Surface foliaire spécifique
VIC	Capacité d'infiltration variable
WATCH	Eau et changement climatique
WFD	Données de forçage WATCH

---

## 1.0 INTRODUCTION

En raison des concentrations accrues d'émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, le climat de la planète change. Au cours des dernières décennies, le climat a considérablement changé et les températures mondiales ont augmenté d'environ 0,7 C au cours du dernier siècle. Le GIEC (2007) a conclu qu'au moins une partie de l'augmentation de la température peut être attribuée à l'émission de gaz à effet de serre causée par l'activité humaine. Non seulement les températures changent mais, les paramètres de pluviométrie changent également. La pluviométrie est réduite dans certaines régions alors que dans d'autres zones, elle a augmenté. En Afrique, particulièrement au Sahel, il existe une grande variabilité décennale des précipitations ; les longues périodes de sécheresse supérieures à la moyenne sont suivies par des périodes relativement pluvieuses. La manière dont le changement climatique affectera cette variabilité est encore inconnue.

Dans le futur, le réchauffement climatique pourrait s'intensifier. En fonction du scénario d'émission, les températures augmenteront entre 1 et 6°C au siècle prochain mais, elle pourrait être de 2 et 4 °C (GIEC 2007). L'augmentation de la température ne sera pas uniforme à travers le monde et les régions tropicales telles que le bassin du Congo subiront un réchauffement moins important que les régions autour des pôles. Les hausses de températures auront un impact sur le cycle hydrologique conduisant à des changements au niveau de l'évaporation, des précipitations et du ruissellement (Ludwig 2009). Ces changements pourraient avoir un grand impact sur les secteurs de l'eau, de l'agriculture et de l'énergie.

L'Afrique est généralement perçue comme le continent le plus vulnérable au changement climatique. La variabilité actuelle du climat a déjà un grand impact sur les économies des pays en développement. Des secteurs essentiels de l'économie africaine notamment l'agriculture, l'infrastructure et l'eau sont hautement sensibles au climat. De même, les moyens de subsistance en Afrique sont largement dépendants de ressources naturelles sensibles au climat telles que l'agriculture en milieu aride, les forêts et les ressources d'eau locales. En outre, il existe souvent peu de protection contre les catastrophes comme les tempêtes et les crues et la capacité d'adaptation est limitée dans plusieurs pays africains.

Ces conclusions sont pour la plupart basées sur des recherches effectuées à l'Ouest, à l'Est et au Sud de l'Afrique. On sait peu de choses sur les impacts du changement climatique sur la région de l'Afrique centrale. Le projet «Scénarios de changement climatique pour le bassin du Congo» a pour objectif de combler cette lacune. Cette région pourrait éventuellement être très vulnérable au changement climatique. Par exemple, les ressources naturelles telles que l'agriculture, les forêts et l'hydroélectricité sont très importantes pour l'économie locale. Les changements climatiques auront un impact sur le fonctionnement des écosystèmes forestiers, la production hydroélectrique et les systèmes agricoles.

Les forêts sont non seulement importantes pour la population locale mais, ils jouent également un rôle essentiel en fonction de leur impact sur le changement climatique global. Le défrichement et la dégradation des forêts, causés par l'expansion de terres agricoles, le développement urbain, l'exploitation du bois et les incendies sont responsables d'environ 20% des émissions globales de gaz à effet de serre. Il est extrêmement important de réduire la déforestation en vue d'atténuer le changement climatique. Pour encourager les pays en développement à réduire les émissions causées par les forêts, le programme pour la Réduction des émissions liées au déboisement et à la dégradation des forêts dans les pays en développement (REDD) a été mis sur pied. Le REDD vise à attribuer une valeur monétaire au carbone stocké

dans les forêts, offrant ainsi des mesures d'incitation aux pays en développement pour les amener à réduire leurs émissions provenant de terres boisées.

Toutefois, non seulement l'utilisation des terres affecte les émissions de gaz à effet de serre mais, le changement climatique affecte les écosystèmes forestiers et la quantité de carbone stockée dans les forêts tropicales. Ainsi, le changement climatique pourrait éventuellement accroître ou réduire les stocks de carbone des forêts du bassin du Congo. Par conséquent, il est important de connaître le degré de vulnérabilité des systèmes forestiers de l'Afrique centrale face au changement climatique et la manière dont cela pourrait affecter la quantité de carbone émise ou absorbée par ces systèmes.

Le changement climatique aura un impact majeur sur le cycle hydrologique. À cause du changement climatique, les configurations des nuages, des concentrations atmosphériques de vapeur d'eau, les paramètres de la pluviométrie et du ruissellement changeront. Les impacts du changement climatique sur le cycle de l'eau du bassin du Congo sont abordés en détail dans un précédent rapport de ce projet (Beyene et al 2013). Ces changements du cycle hydrologique peuvent éventuellement avoir des grandes conséquences sur les secteurs de l'énergie et de l'agriculture.

À cause des changements de la pluviométrie et de l'évaporation, le ruissellement et l'écoulement fluvial changeront. Cela affectera le volume d'eau disponible au niveau des barrages hydroélectriques et pourrait influencer sur la quantité d'énergie à produire. Non seulement l'écoulement fluvial changera mais, les modèles saisonniers et la variabilité pourraient changer. Cela aura également un impact sur la capacité de production des centrales hydroélectriques.

L'eau est essentielle pour la production alimentaire aussi bien pour l'agriculture en milieu aride que pour l'agriculture irriguée. Le changement climatique aura à la fois un impact sur la demande et la disponibilité de l'eau agricole. L'eau disponible pour l'agriculture en milieu aride dépend principalement de la pluviométrie et de l'évaporation du sol. Les futures hausses de températures pourraient entraîner une augmentation de l'évaporation du sol causant ainsi la baisse de la disponibilité de l'eau. Les variations de la pluviométrie sont différentes autour de la région du bassin du Congo. Sur les bords du bassin, où la pluviométrie est relativement faible, certains scénarios indiquent une réduction des précipitations. Au centre de la région et le long de la côte atlantique, la pluviométrie va probablement augmenter. Il est également probable que les précipitations s'intensifient dans la région. Cela entraînera une hausse relative du ruissellement et une infiltration plus faible. Les effets du changement climatique sur la quantité d'eau disponible pour l'irrigation dépendent essentiellement des changements de modèles de ruissellement.

Ce rapport présente une analyse détaillée des impacts du changement climatique dans le bassin du Congo sur l'eau pour agriculture, l'énergie hydraulique, le fonctionnement des écosystèmes forestiers et le stockage du carbone. Afin de quantifier les impacts des futurs changements climatiques, il est nécessaire d'utiliser des modèles numériques. Pour ce projet, un cadre de modélisation rendant possible l'association de modèles climatiques aux modèles hydrologique, agricole et écosystémique a été élaboré. La partie suivante du rapport porte sur ce cadre de modélisation et explique ses différents composants. Ensuite, nous étudierons les scénarios de changement climatique, et présenterons les résultats des analyses des impacts.

## 2.0. CADRE DE MODÉLISATION

Pour étudier les impacts du changement climatique sur les différents secteurs dans le bassin du Congo, nous avons utilisé un ensemble de plusieurs modèles et de groupes de données (Figure 1). Les bases du cadre de modélisation sont les modèles LPJml et VIC. Le LPJml est un modèle couplé d'hydrologie, d'agriculture et de végétation dynamique (Bondeau et al., 2007; Sitch et al., 2003) Le LPJml intègre une représentation de modèles couplés de cycle hydrologique terrestre et de cycle du carbone, ce qui en fait un outil très utile pour l'étude de la relation entre la disponibilité de l'eau et la production des cultures. Le LPJml est également un modèle de végétation dynamique, ce qui le rend très adapté à la simulation des changements de cycle du carbone.

Le VIC (Variable Infiltration Capacity i.e capacité d'infiltration variable) (Liang et al., 1994) est un modèle hydrologique à macro-échelle sur grille. Ce modèle permet de résoudre à la fois les équations d'énergie de surface et de bilan hydrique. Le modèle représente la variabilité de la végétation, de l'altitude et des sols en partitionnant chaque cellule de grille en plusieurs classes de végétation (couverture du sol) et d'altitude. La colonne réservée au sol est généralement divisée en trois couches de sols différentes. Le ruissellement en surface et le débit de base sont acheminés à travers le réseau fluvial vers l'exutoire du bassin à l'aide d'un modèle de laminage autonome. Le modèle a récemment été élargi grâce à un réseau de barrages et de réservoirs (Haddeland et al. (2006). Le réseau de réservoir a ultérieurement été amélioré en vue d'évaluer l'impact du changement climatique sur la capacité de production hydroélectrique.

Le résultat des différents modèles d'impact (VIC et LPJml) a servi à l'analyse de l'impact sur l'eau, l'agriculture, l'hydroélectricité et le stockage de carbone. Le modèle LPJml a été utilisé pour l'évaluation de l'eau agricole et le stockage du carbone forestier. Le modèle hydrologique à macro-échelle VIC a été utilisé pour l'évaluation de l'hydroélectricité (Liang et al. 1994).

Ces deux modèles (VIC et LPJml) utilisent les données climatiques comme entrée. Pour simuler l'état actuel du bassin du Congo, nous avons utilisé le groupe de données de forçage (Forcing Dataset) WATCH (ci-après désignée sous le nom de WFD) (Weedon et al., 2011). Ce groupe de données couvre la période de 1958 à 2001. Il est basé sur une nouvelle analyse (de 40 ans) du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT) et combiné aux données de mesure de la température du groupe de données TS2.1 de l'URC et la version 4 du groupe de données du GEIC sur la pluviométrie. Pour plus d'informations sur ce groupe de données, consultez notre précédent rapport (Beyene et al. 2013, Wheedon et al. 2011). Il est important de mentionner ici que les données disponibles sur la pluviométrie pour ces régions est quasi-inexistante; ce qui rend le groupe de données pour le bassin du Congo moins fiable en comparaison aux autres régions du globe.

Pour étudier les impacts du changement climatique, les résultats différents modèles climatiques corrigés du biais ont été utilisés comme données d'entrée des modèles d'impact. Il existe encore beaucoup d'incertitudes sur la manière dont le changement climatique se produira. Tout d'abord, il est difficile de connaître le niveau des prochaines émissions. Ensuite, la manière dont le système climatique réagira face aux futurs changements des gaz atmosphériques à effet de serre demeure inconnue. Afin d'apporter un élément de réponse à certaines de ces incertitudes, nous avons utilisé trois modèles climatiques différents et deux scénarios d'émissions différents.



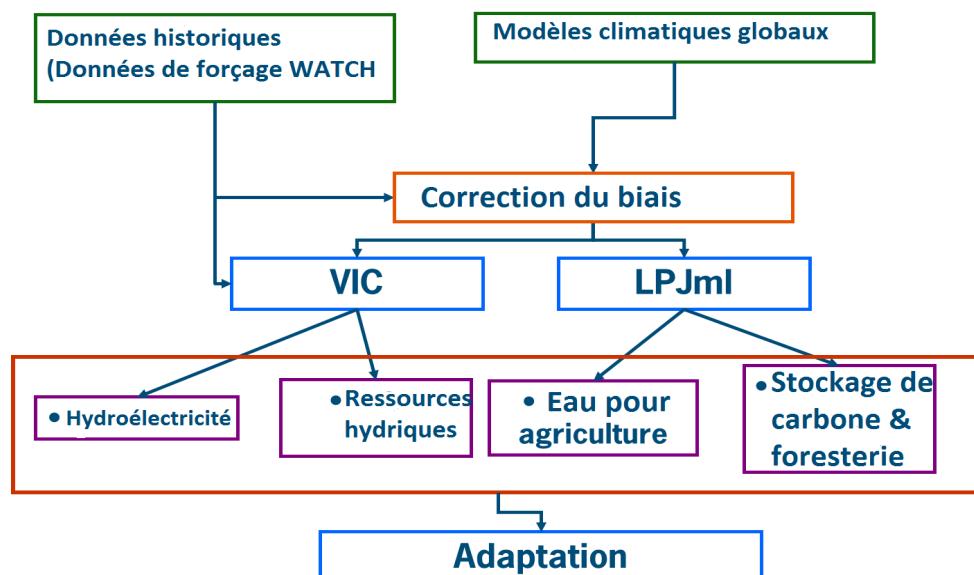


Figure 1. Cadre de modélisation utilisé pour les scénarios de changement climatique pour le projet du bassin du Congo

## 2.1 Le modèle LPJml (Lund-Potsdam-Jena managed lands)

### 2.1.1 Analyses de l'eau agricole

Nous avons utilisé les résultats des modèles de circulation planétaire CNRM et ECHAM comme données d'entrée pour le LPJml. En outre, nous avons utilisé les scénarios A2 et B1 du RSSE du GIEC. Le scénario A2 décrit un monde très hétérogène où les schémas de fécondité entre régions convergent très lentement, l'accroissement de la population mondiale est continu et le développement économique a une orientation principalement régionale. Les concentrations de CO<sub>2</sub> augmentent de 369 ppm en 2000 à 771 ppm en 2090. Le scénario B1 décrit un monde plus convergent et plus écologique. L'accent est mis sur la recherche de solutions mondiales à la stabilité économique, sociale et environnementale. Les augmentations de concentrations de CO<sub>2</sub> sont inférieures à celles du scénario A2, de 369 ppm en 2000 à 545 en 2090.

L'évapotranspiration, la consommation d'eau verte, le stress hydrique et les précipitations ont été utilisés dans cette étude. Pour les périodes 1990-2010, 2035-2064 et 2071-2100, les valeurs moyennes ont été calculées. Les résultats de ces périodes ont été par la suite comparés entre eux.

L'augmentation de la température et la hausse des concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub> ont un effet positif sur la végétation. L'augmentation de la température entraîne l'augmentation de l'évaporation du sol alors que la hausse de la concentration de CO<sub>2</sub> réduit la transpiration des végétaux, notamment les végétaux de type C4. Dans les régions tropicales humides, les régions avec une couverture végétale abondante, la contribution de la transpiration à l'évapotranspiration est grande en comparaison à l'évaporation du sol et les effets de l'augmentation des températures sont annulés par la hausse de la concentration du CO<sub>2</sub>. Dans la savane et les régions sahéliennes, la végétation est moins abondante et l'évaporation du sol contribue davantage à l'évapotranspiration. Ainsi, l'augmentation des températures conduira à une hausse de l'évapotranspiration.

Il faut mentionner que le LPJml permet de calculer l'évapotranspiration réelle. Avec l'augmentation de la disponibilité de l'eau (suite à l'augmentation des précipitations), l'évapotranspiration réelle s'accroît. Cependant, cela n'entraîne pas la réduction du stress hydrique. Il se pourrait que le stress hydrique augmente. L'augmentation des températures entrainera une demande plus forte de l'eau atmosphérique qui pourrait être supérieure à la hausse de la disponibilité des ressources hydriques.

## 2.12 Cycle du carbone

Pour modéliser les éventuels changements du cycle régional du carbone suite au changement climatique, nous avons également utilisé le cadre de modélisation LPJml. La configuration générale a été décrite précédemment et dans cette section l'accent sera mis sur les aspects de modélisation du cycle du carbone.

Le modèle global de végétation dynamique (MGVD) LPJml (Lund-Potsdam-Jena-managed-land, Sitch et al., 2003; Gerten et al., 2004) permet de simuler les composants du cycle de carbone des écosystèmes de manière explicite à l'aide d'équations orientées sur le processus. Ces composants sont : la photosynthèse du couvert, la respiration des plantes, l'allocation des photosynthétats sur les feuilles, les parties et les racines ligneuses, la litière et la mortalité et la respiration hétérotrophe.

### Productivité

La simulation de la photosynthèse repose sur la formulation adoptée par Farquhar et les publications ultérieures (Farquhar et al., 1980). En résumé, la photosynthèse dépend principalement du rayonnement absorbé et de la concentration de CO<sub>2</sub> dans les feuilles, modulés par une capacité photosynthétique et la température. La concentration de CO<sub>2</sub> dans les feuilles est déterminée par le degré du stress hydrique dans le couvert végétal. Ce stress hydrique, à son tour, dépend de l'équilibre entre la demande en vapeur d'eau atmosphérique et la fourniture de l'eau par le sol. Par ailleurs, cet équilibre permet également de déterminer la quantité d'eau utilisée par les végétaux.

La capacité photosynthétique est un paramètre crucial. En principe, elle dépend de la concentration de nutriment (azote) dans les feuilles, mais le modèle estime la capacité de l'ensemble du couvert à partir de la quantité totale de lumière absorbée. Cette conception trouve son origine dans l'idée qu'à un certain niveau de luminosité, les végétaux peuvent atteindre une capacité photosynthétique optimale, et cette hausse de capacité pourrait conduire à une hausse des coûts de maintenance. Cette quantité de lumière absorbée ne dépend uniquement pas de la lumière provenant directement du soleil mais, également de la surface foliaire, qui à son tour dépend de la photosynthèse de l'écosystème dans le passé. Mais, à cause de la quantité élevée de la lumière absorbée au niveau de la surface foliaire, le principe de ce modèle permet d'obtenir des capacités photosynthétiques stables et plus réalistes.

Il faut remarquer que la dépendance de la photosynthèse sur la température est incertaine. Il existe en particulier peu de connaissances empiriques sur la température à partir de laquelle la photosynthèse décline. Par conséquent, les simulations avec des hautes températures doivent être évaluées avec précaution.

De même, il a été démontré que la sensibilité à la disponibilité en eau du sol est incertaine car, les informations sur la profondeur d'enracinement et l'activité des racines sont rares.

Toutefois, il existe une incertitude qui se démarque de l'ensemble. Le modèle de productivité est sensible aux concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub>, avec une augmentation de la photosynthèse en cas de hausse du CO<sub>2</sub>. Cependant, de nombreuses recherches dans les régions tempérées, ainsi que la «théorie de l'écosystème», montrent que cette réaction positive au CO<sub>2</sub> ne se produit pas toujours dans la réalité. Cela est probablement dû aux apports insuffisants en nutriments et à la durée de vie limitée du carbone (c-à-d le renouvellement minimal) dans les écosystèmes. Pour les biomes tropicaux, on dispose de très peu d'informations pour estimer cette insuffisance, mais il est probable que des insuffisances s'y produisent également. Par conséquent, il serait prudent de simuler les effets du changement climatique avec et sans prise en considération de la hausse du CO<sub>2</sub>, et évaluer ensuite la différence entre les deux simulations.

La respiration de la plante est simulée comme une proportion fixe de la capacité photosynthétique, multipliée à un facteur qui s'accroît avec la température. La Productivité primaire nette (PPN) est donc la différence entre la photosynthèse et la respiration de la plante.

#### Allocation, litière et décomposition

Le modèle permet de simuler l'allocation du carbone sur une base annuelle de manière dynamique, en maintenant un équilibre entre la surface foliaire et l'aubier, entre les racines et les feuilles et en augmentant l'assimilation de l'eau et des nutriments dans les environnements où les ressources sont rares. La surface foliaire spécifique (SLA) est fixée par groupes d'espèces (PFT, voir ci-après) et détermine l'investissement en carbone dans le feuillage.

La chute de la litière est déterminée par la simulation de la surface foliaire, de la longévité foliaire et du taux de renouvellement de la racine, alors que l'établissement et la mortalité sont déterminés par des règles et facteurs de stress spécifiques au PFT.

La décomposition de la litière et des matières organiques dans le sol permet de déterminer la respiration hétérotrophe et dépend de la température, de l'humidité du sol et de sa teneur en matière organique.

Le total du carbone de la végétation est déterminé comme le résultat net cumulé net du PPN, de la mortalité et de la chute de litière. Le total du carbone du sol est calculé comme la somme accumulée de la litière, des matières mortes et de la décomposition

#### Traits fonctionnels des végétaux

Le modèle contient un certain nombre de paramètres tels que ceux permettant de déterminer la sensibilité à la température et à l'humidité, l'allocation et le renouvellement. Ces paramètres varient en fonction des traits fonctionnels des végétaux ou des groupes d'espèce. Pour les biomes tropicaux, il s'agit des : 'forêts sempervirentes tropicales' (généralement, les forêts denses), 'forêts tropicales vertes' (généralement, les savanes) et des 'prairies tropicales' (généralement, les herbages de type C4). Il existe plusieurs traits de végétation et d'écosystèmes plus importants mais, il est presque impossible de bien définir les paramètres de tous ces différents types car, les mesures des paramètres essentiels sont rares, parce qu'il serait approprié de procéder à cet affinement si de telles données étaient disponibles pour la majorité ou l'ensemble de ces traits et également parce que malgré les différences physiologiques évidentes, les différences physiologiques seront telles qu'elles ne conduiraient pas à des écarts importants dans la dynamique du carbone.

## **2.2 Modèle de Capacité d'infiltration variable (VIC)**

Le modèle de Capacité d'infiltration variable (VIC) est un modèle hydrologique de surface à macro-échelle réparti spatialement, qui permet de résoudre les bilans énergétiques et hydrologiques de surface (Liang et al. (1994, 1996 et 1999). Il a été largement utilisé dans les analyses de simulation de bilan hydrologique de surface sur des échelles spatiales allant du bassin versant au domaine global (Abdulla et al., 1996; Maurer, 2007; Maurer et Lettenmaier, 2003; Nijssen et al., 1997; Wood et al., 2002). Outre la simulation historique de l'hydrologie, le modèle VIC (Liang et al. 1994, 1996; Nijssen et al. 1997) a servi à évaluer l'impact et les implications du changement climatique sur les ressources en eau dans plusieurs projets de recherches au niveau régional et à l'échelle mondiale. Selon le troisième rapport d'évaluation du GIEC (GIEC, 2001), Payne et al. (2004) ont étudié les effets du changement climatique sur le fleuve Columbia, Christensen et al. (2004) ont étudié les effets sur le fleuve Colorado River et Van Rheeën et al. (2004) ont étudié les effets sur la Californie. Par ailleurs, plusieurs études récentes se sont inspirés du modèle VIC pour analyser les

effets des projections du scénario AR4 du GIEC sur les systèmes hydrologiques notamment; Cuo et al. (2010) dans le bassin de Puget Sound, Christensen et Lettenmaier (2007) sur le fleuve Colorado River et Hayhoe et al. (2007) au nord-est des États-Unis, Beyene et al. (2009) dans le bassin du Nil. Le modèle a été étalonné pour le bassin de fleuve Congo et les débits naturalisés ont été comparés aux débits observés à trois stations de jaugeage avec des données suffisantes pour une éventuelle comparaison. Une procédure d'étalonnage similaire à celle décrite par Nijssen et al. (1997) et Payne et al. (2004) a été adoptée pour assurer une correspondance entre les débits simulés par le modèle et les débits observés pour la période pendant lesquelles les observations historiques du débit étaient disponibles. Le VIC a été étalonné en ajustant les paramètres régissant l'infiltration et la décrue du débit de base pour faire correspondre le débit historique simulé au débit observé et naturalisé obtenu par le GRDC à trois points de jaugeage (Congo Kinshasa, Brazzaville et Ouesses) pendant des durées différentes sur la base de la disponibilité des données observées. La période de chevauchement des données entre le débit simulé et le débit observé et naturalisé à chaque station de jaugeage.

### 2.3 Modèle de laminage par réservoir

Une opération de réservoirs est un élément important de la planification et la gestion des ressources hydriques. Elle consiste en plusieurs variables de contrôles définissant les stratégies de fonctionnement permettant de diriger une séquence de publications visant à satisfaire un grand nombre de demandes provenant de parties prenantes avec des objectifs différents tels que le contrôle des crues, la production d'hydroélectricité et l'allocation de l'eau à différentes fins telles que la demande en l'eau pour l'irrigation. Une difficulté majeure de l'opération de réservoirs est parfois dans la divergence des objectifs. Il est donc nécessaire d'améliorer l'opération de réservoirs lorsqu'on veut trouver des solutions à des objectifs et des demandes divergents.

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé des scénarios de changement climatique anciens et futurs pour évaluer l'effet du changement climatique sur l'hydrologie et les ressources hydriques et les implications intrinsèques de l'opération de réservoirs dans le BFC. Nous avons appliqué le modèle de réservoir de Haddeland et al. (2006a, b, c) qui est destiné à être utilisé dans des régions comme le BFC où les informations sur le fonctionnement et les politiques de gestion de l'eau sont manquantes. Le modèle de réservoir est appliqué à 18 réservoirs listés dans le Tableau 1, certains entre d'eux sont actuellement fonctionnels et d'autres sont en cours de construction. Tous les réservoirs sont principalement utilisés pour la production d'énergie hydroélectrique. Dans le modèle de réservoir, la production d'énergie hydroélectrique est maximisée pendant chaque année de fonctionnement à l'aide d'un plan d'optimisation basé sur l'algorithme SCEM-UA (Vrugt et al. 2003). Cette approche basée sur la maximisation de l'énergie hydrologique pour une seule année de fonctionnement n'est pas totalement applicable aux réservoirs qui sont régulés sur une base pluriannuelle. Nonobstant cette déficience, le modèle permet de comprendre les effets de l'opération de réservoir sur les débits en aval.

L'année de fonctionnement de chaque réservoir est identifiée et commence le mois où le débit mensuel moyen simulé naturalisé devient inférieur au débit annuel moyen (selon Hanasaki et al. 2006). Le modèle de réservoir fonctionne selon un pas de temps journalier et permet de déterminer les rejets, la capacité de stockage et le niveau du réservoir. L'évaporation du réservoir est calculée à l'aide de l'équation Penman utilisée pour évaluer l'évaporation, dont la valeur est retranchée à la capacité de stockage journalière du réservoir. Pour maintenir l'équilibre de l'eau dans le réservoir, les précipitations journalières sont ajoutées à la surface du réservoir. Pour améliorer le paramétrage du modèle, nous avons apporté les modifications suivantes à la configuration de Haddeland et al. (2006a,b,c) :

- (a) Rejet maximal : Une des limites du plan d'optimisation univalent de la mise en œuvre originale du modèle de laminage par réservoir était que le contrôle des crues n'était pas exécuté en tant que contrainte, ce qui était très problématique au vu des problèmes de crues dans la région du bassin inférieur du Congo, consécutifs aux opérations dans le bassin supérieur. Dans nos modifications, les crues deviennent une contrainte applicable aux rejets combinés de tous les réservoirs.
- (b) Rejet minimal admissible du réservoir : Pour estimer le rejet minimal de chaque réservoir, Haddeland et al. (2006a,b,c) utilise l'indicateur 7Q10, (faible débit moyen pendant 7 jours consécutifs, avec un intervalle de récurrence moyen d'une fois tous les dix ans) qui est calculé à partir du débit simulé naturalisé de chaque barrage. En fonction de la disponibilité des données sur le débit observé, nous avons défini le débit minimal comme le débit observé au milieu de la saison sèche (décembre-mai) après la construction du réservoir.
- (c) Remplissage du réservoir : Nous devons installer de nouveaux réservoirs avant le début de chaque année de fonctionnement. Pendant la période de remplissage, le débit du réservoir est maintenu à son débit minimal et le reste de l'apport au réservoir est utilisé pour le remplissage du réservoir jusqu'à ce qu'il atteigne sa capacité maximale de stockage. Cela implique une période de remplissage de 9 à 15 mois pour la plupart des réservoirs.

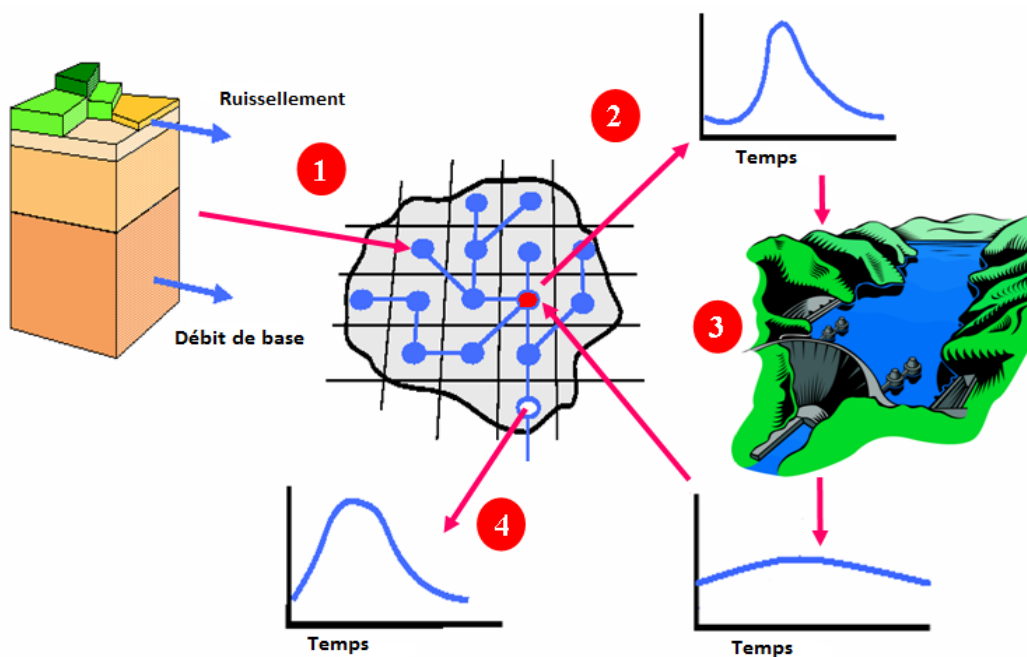


Figure 2. Couplage schématique de modèles 1) d'hydrologie (Liang et al. 1994, Cherkauer et al. 1999, Su et al. 2005, Adam et al. 2007), 2) de laminage (Lohmann et al. 1998), et 3) de réservoir (Haddeland et al. 2006a,b,c).

### 2.3 Simulation du modèle et réservoirs focaux.

Le modèle VIC a premièrement été forcé avec les données de référence des données de forçage Watch (Wheedon et al. 2011) et ultérieurement avec 6 scénarios de climatiques différents (voir la section 3.1 pour les informations sur les scénarios climatiques). Les scénarios ont été exécutés de 1961 à 2100. Le modèle VIC a été exécuté pour l'ensemble de la région COMIFAC pour y inclure les bassins autour du Congo qui sont importants pour la région. Pour étudier l'impact du changement climatique sur la production hydroélectrique, nous avons sélectionné cinq barrages focaux dans la région. Ces barrages ont été sélectionnés pendant l'atelier de lancement du projet en novembre 2011 à Douala au Cameroun. Ces barrages sont : Inga, Song Loulou, N'Zilo, Imboulou et Moukouloulou.

## 3.0 SCÉNARIOS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE

### 3.1 Modèles et scénarios climatiques

Pour ce projet, nous avons utilisé trois différents modèles de circulation générale : ECHAM5/MPIOM, CNRM-CM3 et IPSL-CM4. Ces trois MCG ont été sélectionnés à cause de la disponibilité des résultats archivés relatifs aux pas de temps journalier. Les trois modèles de changement climatique ont été exécutés avec différents scénarios d'émissions du RSSE (Nakicenovic, 2000). Pour ce projet, nous avons utilisé un scénario d'émission élevé (A2) et scénario d'émission faible (B1). Cependant, il faut noter que les résultats de tous les MCG n'ont été utilisés que pour les analyses des impacts sur l'hydroélectricité (section 5) et sur le développement économique (section 7). Pour l'analyse du cycle de carbone des forêts (section 6), seuls les résultats du modèle climatique ECHAM5/MPIOM ont été utilisés. Pour l'analyse de l'utilisation de l'eau agricole (section 4), les données des modèles ECHAM5/MPIOM et CNRM ont été prises en compte. La divergence des chiffres des entrées du MCG dans les différentes évaluations vient du fait que les différentes applications (eau, ruissellement, carbone) ont des sensibilités différentes face au climat. Par conséquent, certaines des entrées du MCG n'ont pas donné des résultats acceptables dans certaines des évaluations effectuées avec les modèles d'impact. Ces différences dans les entrées des données climatiques (voir Beyene et al. 2013 pour plus de détails) engendrent des limitations à cette étude, et celles-ci doivent être prises en compte lorsqu'on compare les différentes évaluations entre elles. Mais, les différences entre les impacts en rapport à A2 et B1 *dans* la même évaluation *peuvent* être comparées de manière fiable.

À cause d'importantes erreurs systématiques dans la capacité des modèles climatiques à simuler la température et les précipitations observés, le résultat des modèles climatiques est corrigé de justesse. Cette correction de justesse est nécessaire pour garantir la fiabilité des données d'entrées à utiliser dans les modèles d'impacts VIC et LPJml. Dans ce projet, nous avons utilisé la méthode de correction de justesse élaborée pour le projet FP6 Eau et changement climatique (WATCH) (Hagemann et al., 2011). La méthode est basée sur des fonctions de transfert qui décrivent la relation entre les séries chronologiques modélisées et observées. Ces fonctions de transfert sont mises dans une grille et sont utilisées pour ajuster la probabilité de fonction de distribution de l'intensité des variables simulées (Piani et al., 2010). Néanmoins, cette méthode ne corrige pas certains changements des paramètres saisonniers comme les changements du temps de la mousson (Haddeland et al., 2012; Hagemann et al., 2011). Le groupe de données de forçage WATCH (WFD) est utilisé comme les données de référence (observées) pour la correction de justesse. La fonction de correction de justesse de chaque grille est dérivée de la période 1960-1999 et a ultérieurement été appliqué à la période 1960-2100, en considérant que les erreurs des résultats du GCM pour la période future sont similaires à la période de contrôle. Avant la correction de justesse des précipitations et de la température de l'air en surface, une réduction d'échelle statistique a été effectuée sur toutes les variables de forçage pour produire des champs d'une résolution spatiale de 0,5° x 0,5° (pour plus de détails, voir Hagemann et al. (2011)).

### 3.2 Futurs changements de la température

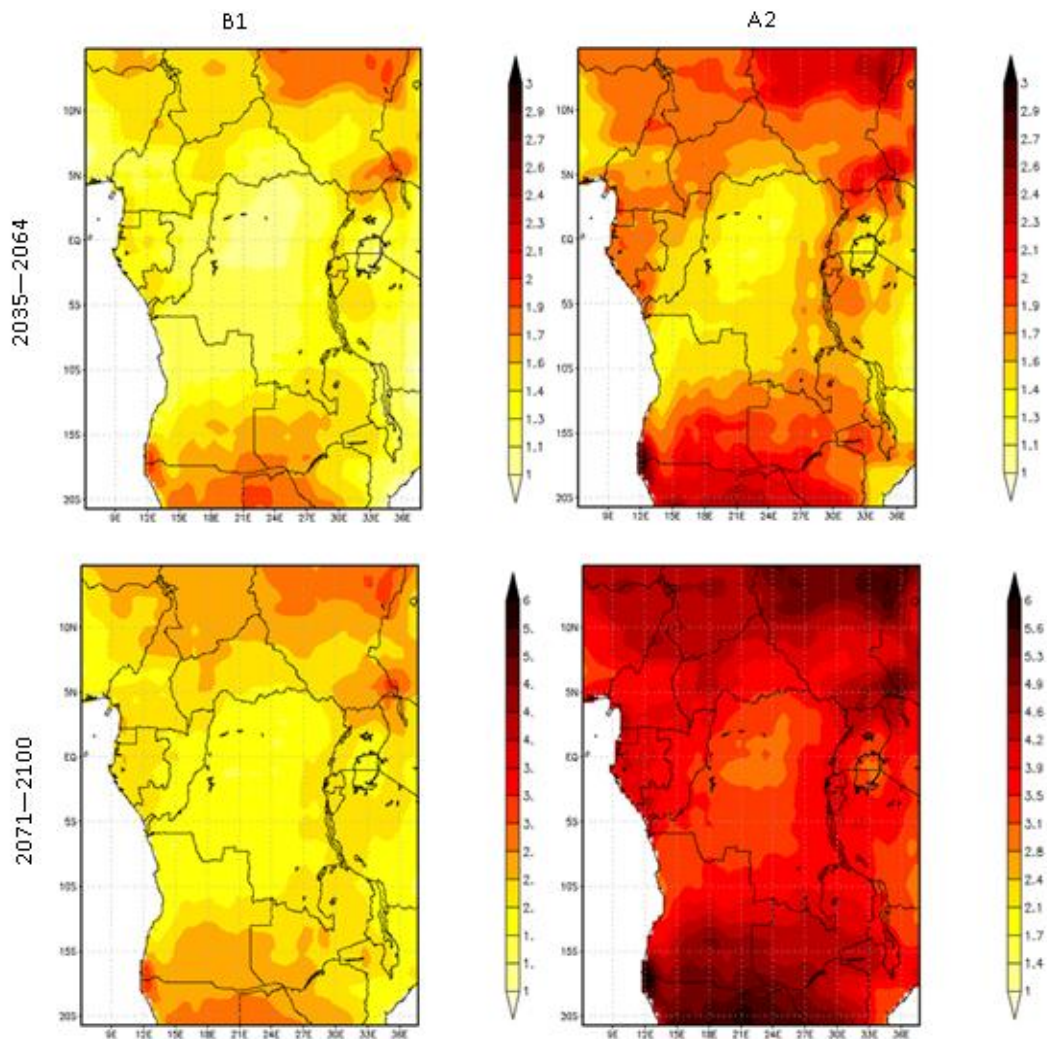


Figure 3. Changement de la température [°C] en comparant les années 1971 – 2000 aux années 2035 – 2064 et 2071 – 2100 pour les scénarios A2 et B1.

À cause du changement climatique, les températures vont augmenter dans l'ensemble de la région. Généralement, les températures sont au plus haut dans l'arctique et au plus bas dans les tropiques. Dans le scénario d'émission faible B1, l'augmentation de la température dans la région se situera entre 1 et 2°C en 2050 et 1,5 et 3°C à 2100 (Figure 3). Dans le scénario d'émission élevée A2, les augmentations de température sont plus alarmantes. En 2050, les températures augmenteront de 2,5°C dans les limites nord et sud de la région. À la fin du siècle, les augmentations de températures se situeront entre 3 et 5 °C selon le scénario d'émission élevée.

Les augmentations de températures seront les plus basses dans la partie centrale à climat tropical de la région. Dans les régions avec un climat plus semi-aride comme le Tchad, les augmentations de température seront plus élevées. Les augmentations de température seront également plus élevées sur les hautes terres comparées aux basses terres. Ainsi, les augmentations de températures au Rwanda et au Burundi pourraient être supérieures à la moyenne dans la région (Figure 3).

### 3.3 Futurs changements des précipitations

En général, la pluviométrie pourrait s'accroître dans le bassin du Congo (Figure 4). Cette augmentation est particulièrement perceptible au centre et à l'ouest de la région. Précisément près de l'embouchure du fleuve Congo. À la fin du siècle, il est prévu une augmentation moyenne de la pluviométrie de 20 à 30%.

Dans les limites sud, nord et est de la région, les impacts du changement climatique sur les précipitations demeurent inconnus. Plus précisément, il est prévu une baisse des précipitations au centre et au nord du Tchad. Pour le Burundi et le Rwanda, les changements sont incertains. Certains scénarios prévoient une hausse alors que d'autres prévoient une baisse.

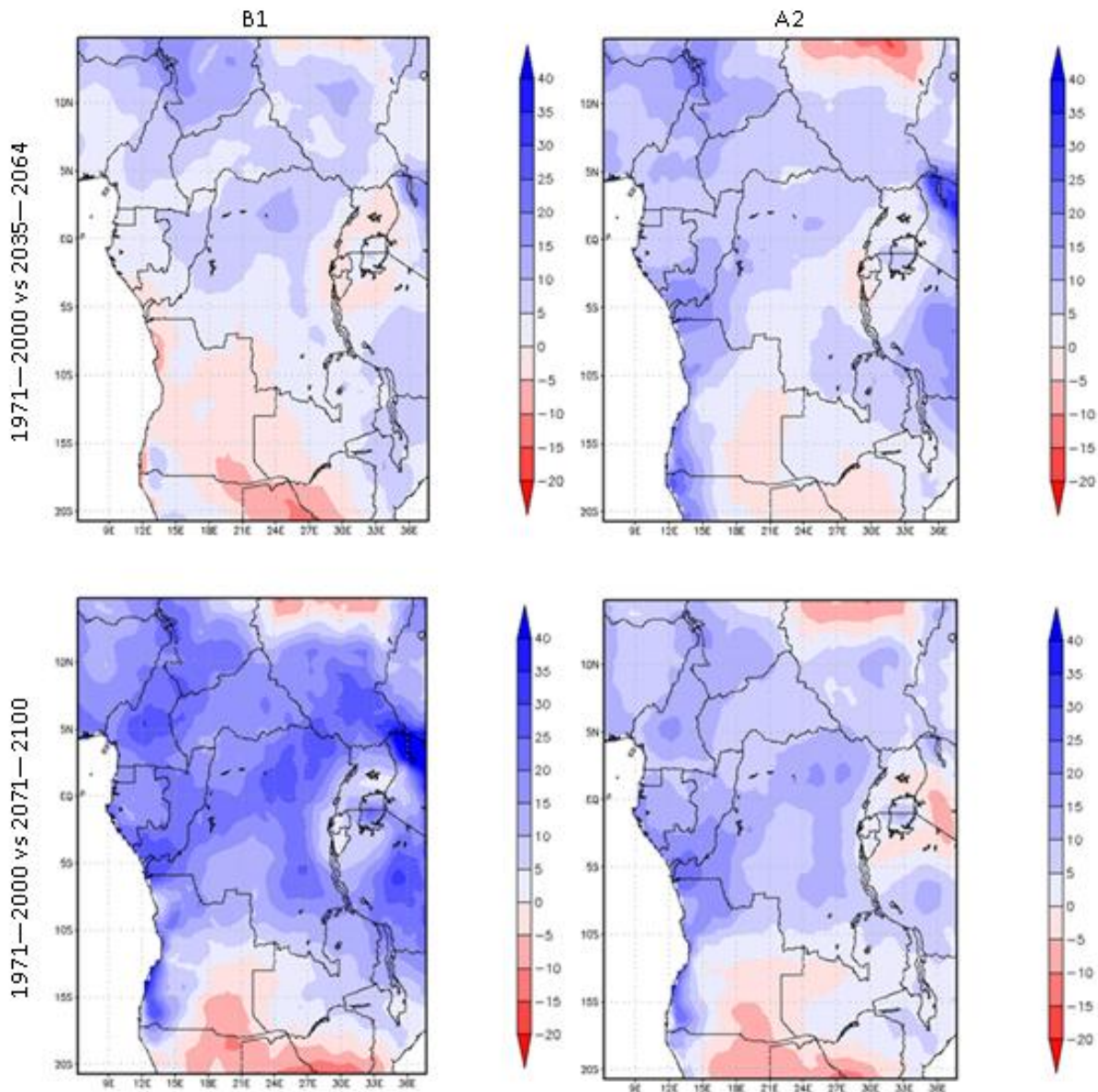


Figure 4. Changements des précipitations (en %) pour le scénario B1 (à gauche) et A2 (à droite) pour les périodes 2035-2064 (en haut) et 2071-2100 (en bas) comparé à la base de référence 1971-2000.



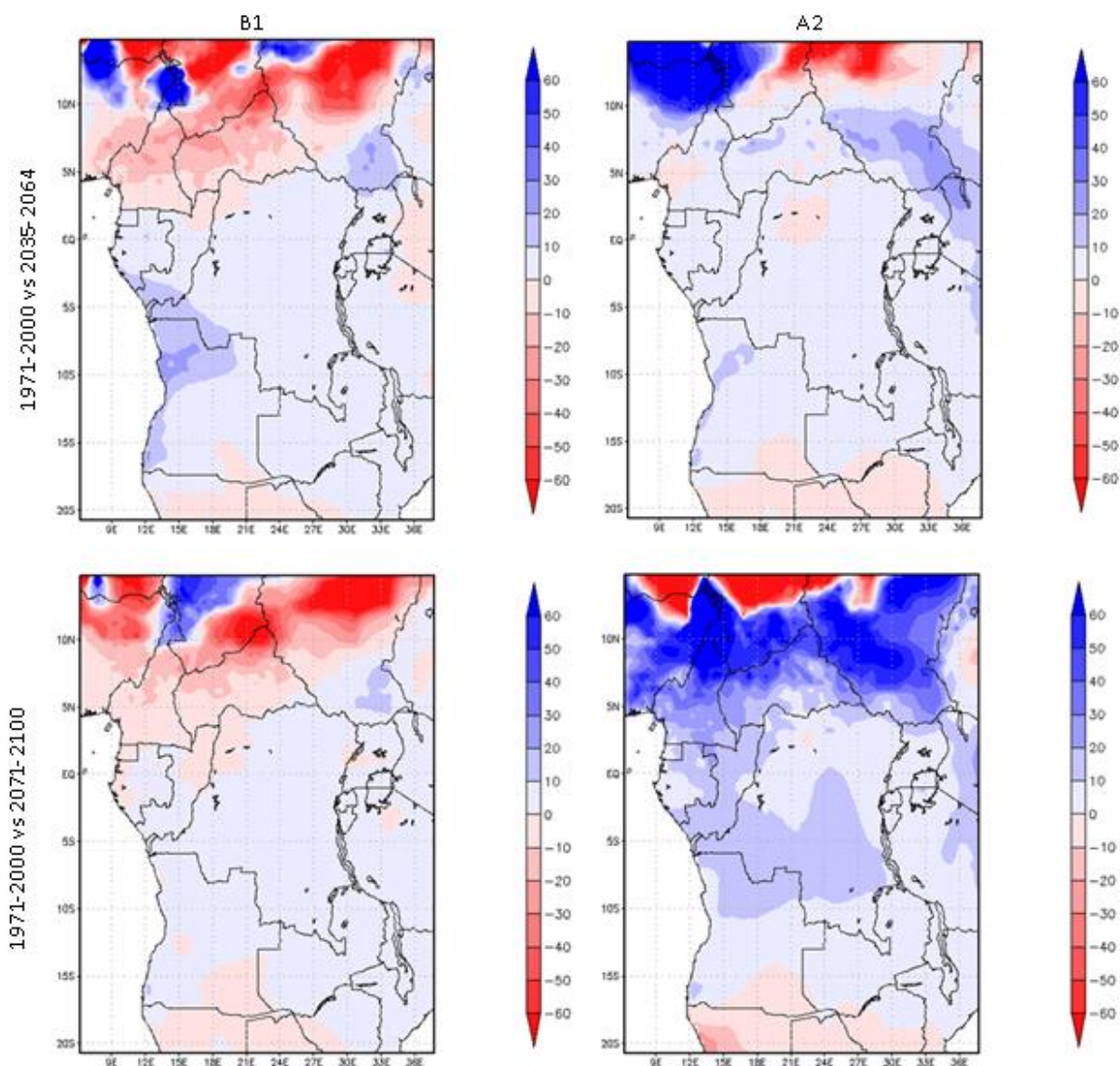


Figure 5. Changements (en %) des précipitations en décembre, janvier et février pour le scénario B1 (à gauche) et A2 (à droite) pour les périodes 2035-2064 (en haut) et 2071-2100 (en bas) comparé à la base de référence 1971-2000.

Les changements de la pluviométrie ne sont pas identiques pendant la saison. Généralement, la pluviométrie baisse pendant la saison sèche. De décembre à février, la pluviométrie baisse considérablement au nord de la région (Figure 5) alors que pendant la période de juin à août, la pluviométrie est en baisse au sud (Figure 6). La tendance selon laquelle les saisons sèches deviennent plus sèches et les saisons pluvieuses deviennent plus humides s'observe partout sur la planète. Cela indique que le climat deviendra plus extrême. De même, l'augmentation des températures rendra la saison sèche plus sèche à cause de la hausse de l'évaporation. Au centre de la région, la pluviométrie augmentera de manière particulière pendant les périodes de décembre à février.

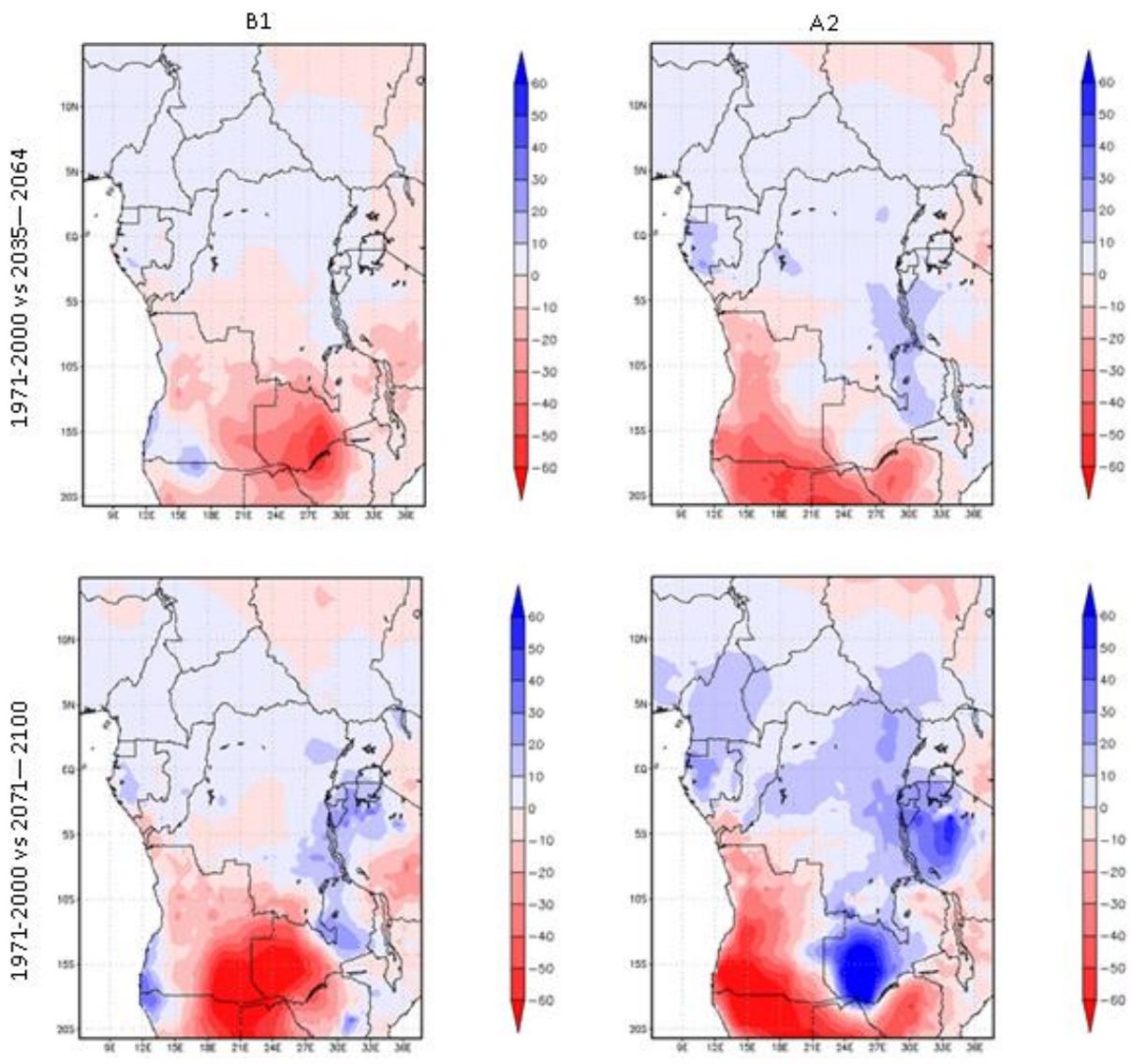


Figure 6. Changements (en %) des précipitations en juin, juillet et août pour le scénario B1 (à gauche) et A2 (à droite) pour les périodes 2035-2064 (en haut) et 2071-2100 (en bas) comparé à la base de référence 1971-2000.

## 4.0. IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'UTILISATION DE L'EAU AGRICOLE

### 4.1 Méthodologie

Pour évaluer l'utilisation de l'eau agricole, nous avons utilisé les résultats suivants de LPJml : évapotranspiration, consommation d'eau verte, stress hydrique et précipitations. Les Figures 7 à 9 montrent les changements de l'évapotranspiration, de la consommation d'eau verte et du stress hydrique. Ces paramètres donnent un bon aperçu des possibles changements de l'utilisation de l'eau agricole. Les valeurs moyennes de chaque paramètre ont été calculées pour les périodes : 1990-2010, 2035-2064 et 2071-2100.

L'augmentation de la température et la hausse des concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub> ont un effet positif sur la végétation. L'augmentation de la température entraîne l'augmentation de l'évaporation du sol alors que la hausse de la concentration de CO<sub>2</sub> réduit la transpiration des végétaux. Dans les régions tropicales humides, les régions avec une couverture végétale abondante, la contribution de la transpiration à l'évapotranspiration est grande en comparaison à l'évaporation du sol et les effets de l'augmentation des températures sont annulés par la hausse de la concentration du CO<sub>2</sub>. Dans la savane et les régions sahéliennes, la végétation est moins abondante et l'évaporation du sol contribue davantage à l'évapotranspiration. Ainsi, l'augmentation des températures conduira à une hausse de l'évapotranspiration.

Il faut mentionner que le LPJml permet de calculer l'évapotranspiration réelle. Avec l'augmentation de la disponibilité de l'eau (suite à l'augmentation des précipitations), l'évapotranspiration réelle s'accroît aussi. Cependant, cela n'entraîne pas la réduction du stress hydrique. Il se pourrait que le stress hydrique augmente. L'augmentation des températures entraînera une demande plus forte en eau atmosphérique qui pourrait être supérieure à la hausse de la disponibilité des ressources hydriques.

### 4.2 Analyses

#### 4.2.1 Évapotranspiration

L'évaporation est le processus par lequel l'eau liquide est converti en vapeur d'eau (vaporisation)) et enlevé de la surface d'évaporation (retrait de la vapeur). L'eau s'évapore de plusieurs surfaces tels que les lacs, les rivières, les chaussées, les sols et la végétation humide (FAO: <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e04.htm>).

#### Scénario A2

De 2000 à 2100, la température et la concentration de CO<sub>2</sub> augmenteront. Toutefois, l'évapotranspiration dans le bassin du Congo, ainsi que dans certaines régions au nord et au sud des tropiques humides (par ex., la République Centrafricaine, le Cameroun, le Nigeria, le centre de l'Angola) baisse de 2,5 à 2,7%. Pour la région centrale du bassin du Congo, on assiste à une baisse évidente de la moyenne de l'évapotranspiration dans la région. Puisque l'évaporation du sol dans les tropiques humides est faible en comparaison à la transpiration, cela indique que la transpiration pourrait baisser dans le siècle prochain suite à la hausse de la concentration de CO<sub>2</sub>. Les effets de la hausse de concentration de CO<sub>2</sub> atténuent les effets de la hausse de température. La baisse de l'évapotranspiration pourrait aussi signaler baisse de la disponibilité de l'eau

cependant, La figure 4 indique que pendant la période allant de 1990 à 2100, la pluviométrie de la région du bassin central du Congo augmentera.

L'évapotranspiration augmentera dans les régions limitrophes à la région tropicale humide, à savoir : la savane et les zones côtières de l'Angola. Dans les savanes, la végétation est moins dense que dans les tropiques humides et par conséquent, la contribution de l'évaporation à l'évapotranspiration est plus élevée.

Les plus grandes hausses sont situées dans les zones autour de la région de l'Afrique centrale telles que la Namibie, le Botswana, le sud de la Zambie et la région frontalière de l'Éthiopie, du Kenya et du Soudan du sud. La Figure 11 illustre la moyenne annuelle de l'évapotranspiration pour le sud de la région pour la période allant de 2000 à 2100. Dans cette région, l'évapotranspiration est plus faible comparée au bassin central du Congo. La variabilité interannuelle de l'évapotranspiration est également plus élevée. À partir du milieu du 21<sup>e</sup> siècle jusqu'en 2100, la pluviométrie de la région augmentera et entraînera une hausse de l'évapotranspiration. La Figure 12 illustre la moyenne annuelle de l'évapotranspiration pour le nord de la région, entre le Soudan du sud et le Kenya, pour la période allant de 2000 à 2100. Il faut noter que l'évapotranspiration dans cette région est supérieure à celle du Sud (Figure 11), ce qui indique que la disponibilité en eau est élevée et la tendance à la hausse indique que la quantité d'eau disponible augmente avec la hausse temporelle de la pluviométrie.

Dans la région sahélienne à l'ouest (Niger, Ouest du Tchad), l'évapotranspiration augmente jusqu'au milieu du 21<sup>e</sup> siècle avec la hausse de la pluviométrie. À partir de 2050, l'évapotranspiration continue d'augmenter mais, les fréquences des augmentations baissent. Dans la région sahélienne à l'est, la pluviométrie baisse dans un premier temps puis, elle augmente graduellement à la fin du siècle. Il en est de même pour l'évapotranspiration car, elle est limitée par la pluviométrie.

#### Évapotranspiration dans B1

En général, dans la première moitié du 21<sup>e</sup> siècle, l'évapotranspiration baisse dans le bassin du Congo. Dans certaines régions, l'évapotranspiration augmente mais, ces augmentations sont faibles, moins de 3%. La tendance de l'évapotranspiration est à la baisse, cependant vers 2050, les effets de la température sur la végétation sont plus fortes que l'influence du CO<sub>2</sub> mais, la tendance change de direction et devient positive (voir Figure 10).

De la savane jusqu'au nord du bassin du Congo et dans la région sahélienne, jusqu'au milieu du 21<sup>e</sup> siècle, la disponibilité en eau augmente comme le montre La Figure 4. Il s'ensuit une augmentation de l'évapotranspiration réelle. Toutefois, avec le temps, la disponibilité en eau baisse et entraîne la baisse de l'évapotranspiration.

De la savane au Sud de la région du bassin du Congo, l'évapotranspiration baisse au début du siècle suite à la baisse de la pluviométrie. Il existe néanmoins des zones dans cette région (région frontalière Angola - Namibie) qui n'affichent pas une tendance à la baisse. (Figure 11).

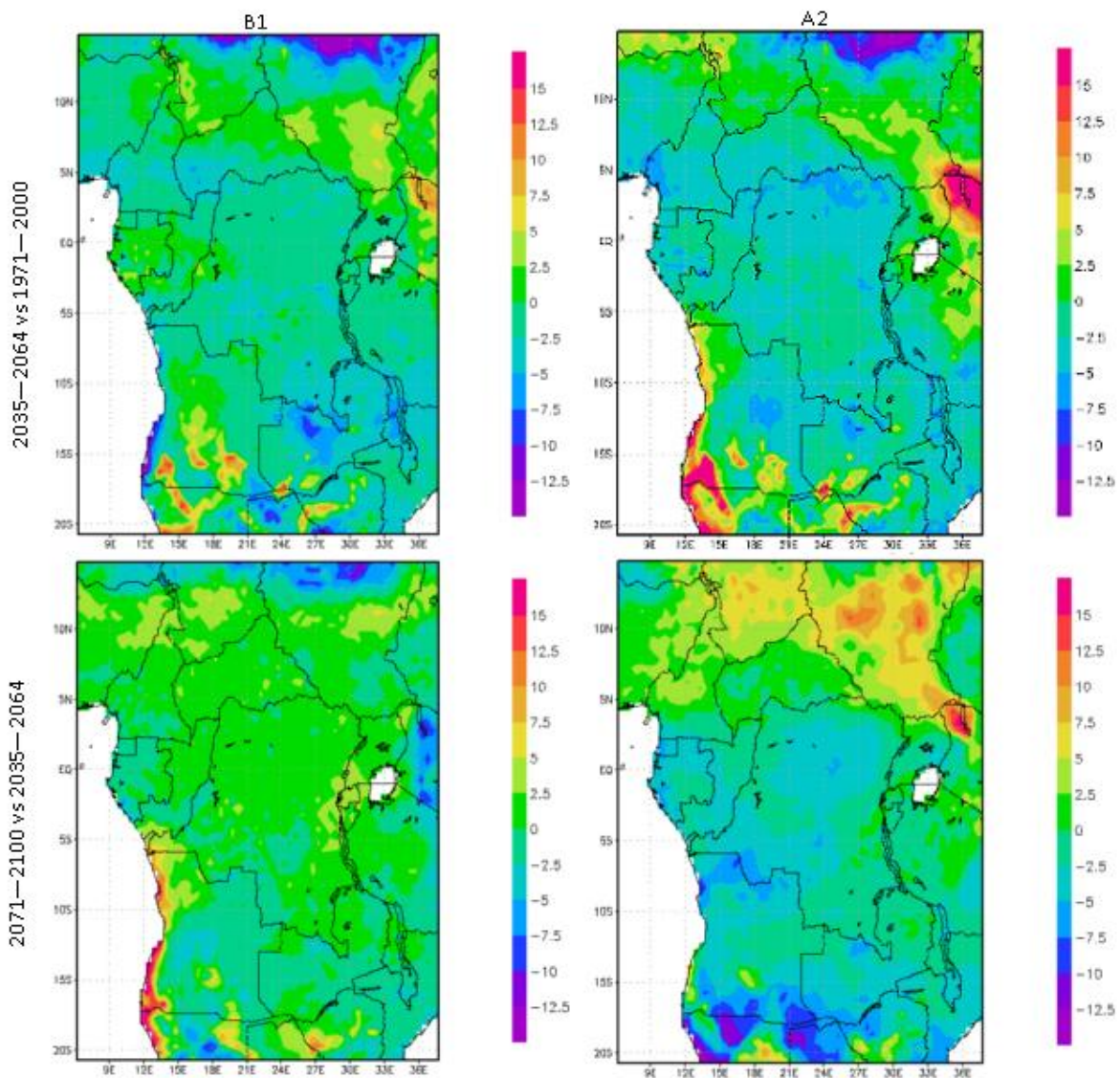


Figure 7. Changements relatifs de l'évapotranspiration pour les périodes (2035-2064) – (1971-2000) et (2071-2100) – (2035-2064) respectivement pour les scénarios B1 et A2.

#### 4.2.2 Consommation d'eau verte

L'eau verte est définie comme une fraction de l'eau éliminée par évapotranspiration, c.-à-d. l'alimentation en eau de toute la végétation non irriguée. L'eau verte peut être défini comme productive en rapport à la production végétale (si elle provient de la transpiration des plantes cultivées ou de la végétation naturelle) ou non productive si elle s'évapore du sol ou d'une eau libre. (Source: <http://www.tropentag.de/2002/proceedings/node34.html>). Pour cette étude, la consommation d'eau verte agricole est définie comme la quantité totale d'eau éliminée par évapotranspiration par les plantes cultivées.

##### *Scénario A2*

Il existe malheureusement peu d'informations sur l'utilisation des terres agricoles dans le centre du bassin du Congo. Pour les régions où l'information est disponible, on observe une hausse de la consommation d'eau de 2000 à 2050. Ces hausses sont faibles, de l'ordre de 0,5 à 0,5%. On assiste à des hausses plus élevées, de 5 à 10%, dans les régions de savane au nord-est et au sud du bassin du Congo, ce qui indique une hausse de la disponibilité en eau (Figure 8). Comme le montre La Figure 3, pendant la première moitié du 21<sup>e</sup> siècle, la pluviométrie augmente légèrement. Au nord du bassin du Congo et dans la région sahélienne à l'est (Soudan), la consommation d'eau verte diminue suite à la baisse de la pluviométrie (voir Figure 4.) Dans la région sahélienne à l'ouest, la consommation de l'eau agricole augmente.

Dans la deuxième moitié du 21<sup>e</sup> siècle, la température et la concentration de CO<sub>2</sub> augmentent encore mais, la consommation d'eau verte n'augmente plus. En fait, dans plusieurs régions du bassin du Congo, une baisse est clairement visible. Dans les savanes au nord, au Tchad et au Soudan du sud, la consommation d'eau verte continue d'augmenter. Cependant, dans les savanes au sud, l'eau disponible diminue suite à la baisse de la pluviométrie.

##### *Scénario B1*

À partir du début du 21<sup>e</sup> siècle, à l'exception des régions côtières du bassin central du Congo, la consommation d'eau verte augmente légèrement (0-5%) suite à une légère hausse des précipitations. La hausse continue jusqu'à la fin du 21<sup>e</sup> siècle. Dans les savanes du sud du bassin du Congo, la consommation d'eau verte augmente, cependant, avec le temps, cette consommation devient nulle ou baisse dans certaines zones. Cette situation est causée par une baisse des précipitations, couplée à la hausse de la concentration de CO<sub>2</sub>. Dans les savanes de l'est et du nord du bassin du Congo, la consommation d'eau verte augmente dans la première moitié du siècle mais, dans la deuxième moitié, cette hausse est de plus en plus faible (0-5%) Dans la première moitié du 21<sup>e</sup> siècle, les précipitations baissent dans la région sahélienne entraînant une baisse de la consommation d'eau verte. Cette baisse continue pendant la deuxième moitié du 21<sup>e</sup> siècle.

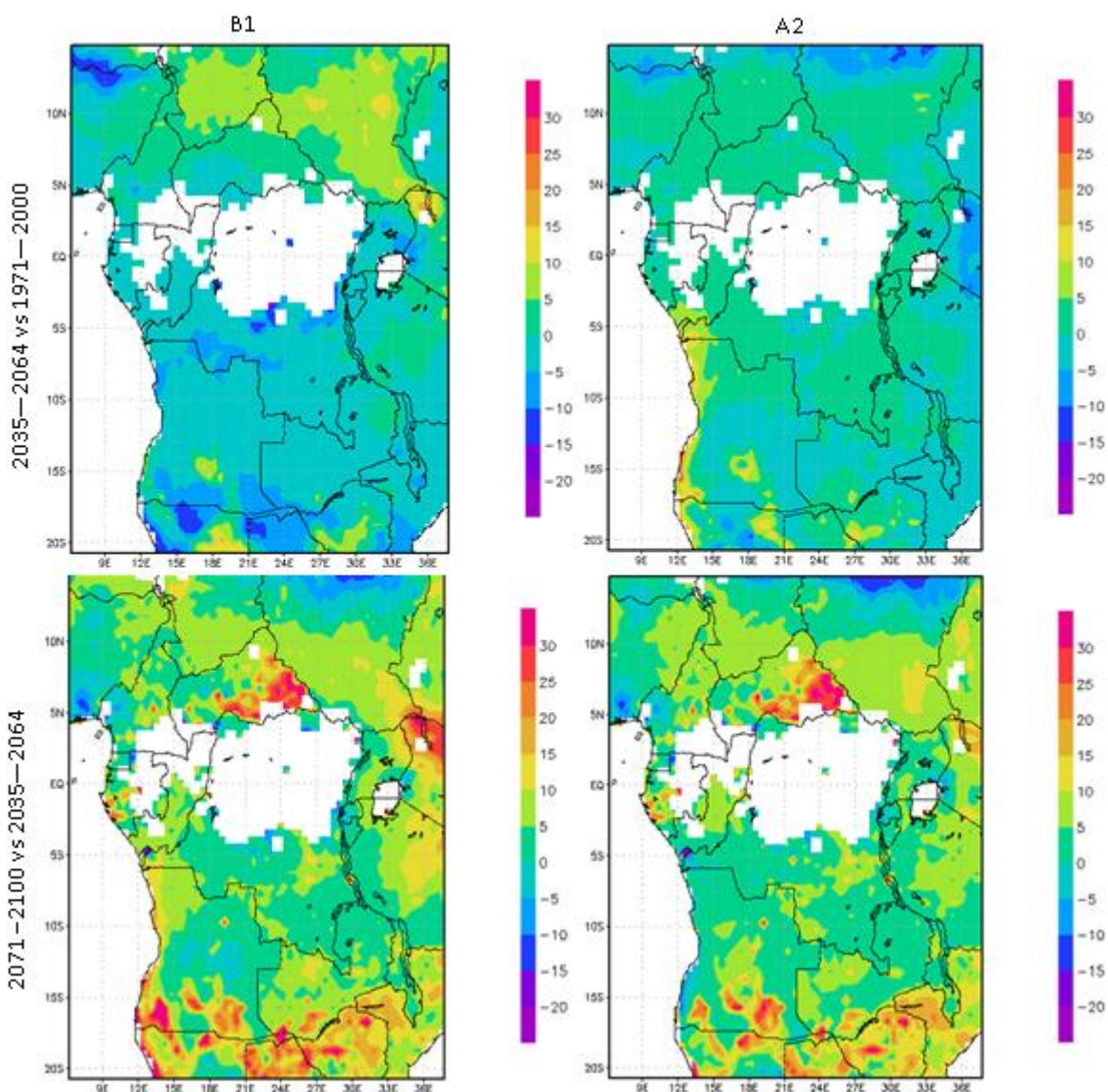


Figure 8. Changements relatifs de la consommation d'eau verte pour les périodes (2035-2064) – (1971-2000) et (2071-2100) – (2035-2064) respectivement pour les scénarios B1 et A2.

#### 4.2.3 Stress hydrique

Le stress hydrique est défini comme la fraction de la quantité d'eau dont la végétation a besoin et la quantité pouvant être fournie par le sol. Le stress hydrique est associé à l'efficacité de l'utilisation de l'eau qui est définie comme les unités de plantes cultivées par unité d'eau.

##### Scénario A2

Dans la première moitié du 21<sup>e</sup> siècle, le stress hydrique augmentera de 5 à 5 % dans le bassin du Congo cependant, vers la fin du siècle, l'augmentation du stress hydrique deviendra plus faible et se situera autour de 0 à 5% (voir Figure 9). La baisse de cette tendance est causée par la hausse de la concentration en CO<sub>2</sub> qui entraîne une baisse de la transpiration. Dans les savanes autour du bassin du Congo, le stress hydrique augmentera de manière considérable dans la première moitié du 21<sup>e</sup> siècle. Dans la deuxième moitié du siècle, l'évapotranspiration, la consommation d'eau verte et le volume des précipitations baissera.

Toutefois, suite à la hausse de l'efficacité de l'utilisation de l'eau (dû à la hausse de la concentration de CO<sub>2</sub>), La hausse du stress hydrique est plus faible dans cette région.

### Scénario B1

Dans ce scénario, l'augmentation de la température et de la concentration de CO<sub>2</sub> concentration est plus faible que dans le scénario A2. Dans les savanes du Sud, le stress hydrique augmente considérablement (Figure 9) dans la première moitié du 21<sup>e</sup> siècle. Dans les autres régions de savane autour du bassin du Congo, le stress hydrique augmente également cependant, il est plus faible que dans les savanes du Sud. Dans le bassin du Congo, le stress hydrique est similaire à celui observé dans le scénario A2 dans la même période, de l'ordre de 10 à 15%. Dans le bassin du Congo et les savanes de l'est et du nord, la hausse du stress hydrique est plus faible dans la deuxième moitié du 21<sup>e</sup> que dans la première. On observe même une baisse du stress hydrique dans certaines régions. Il n'y a que dans la savane au sud du bassin du Congo que le stress hydrique continue à augmenter. Toutefois, les zones où se manifeste ce phénomène sont plus réduites que dans le scénario A2.

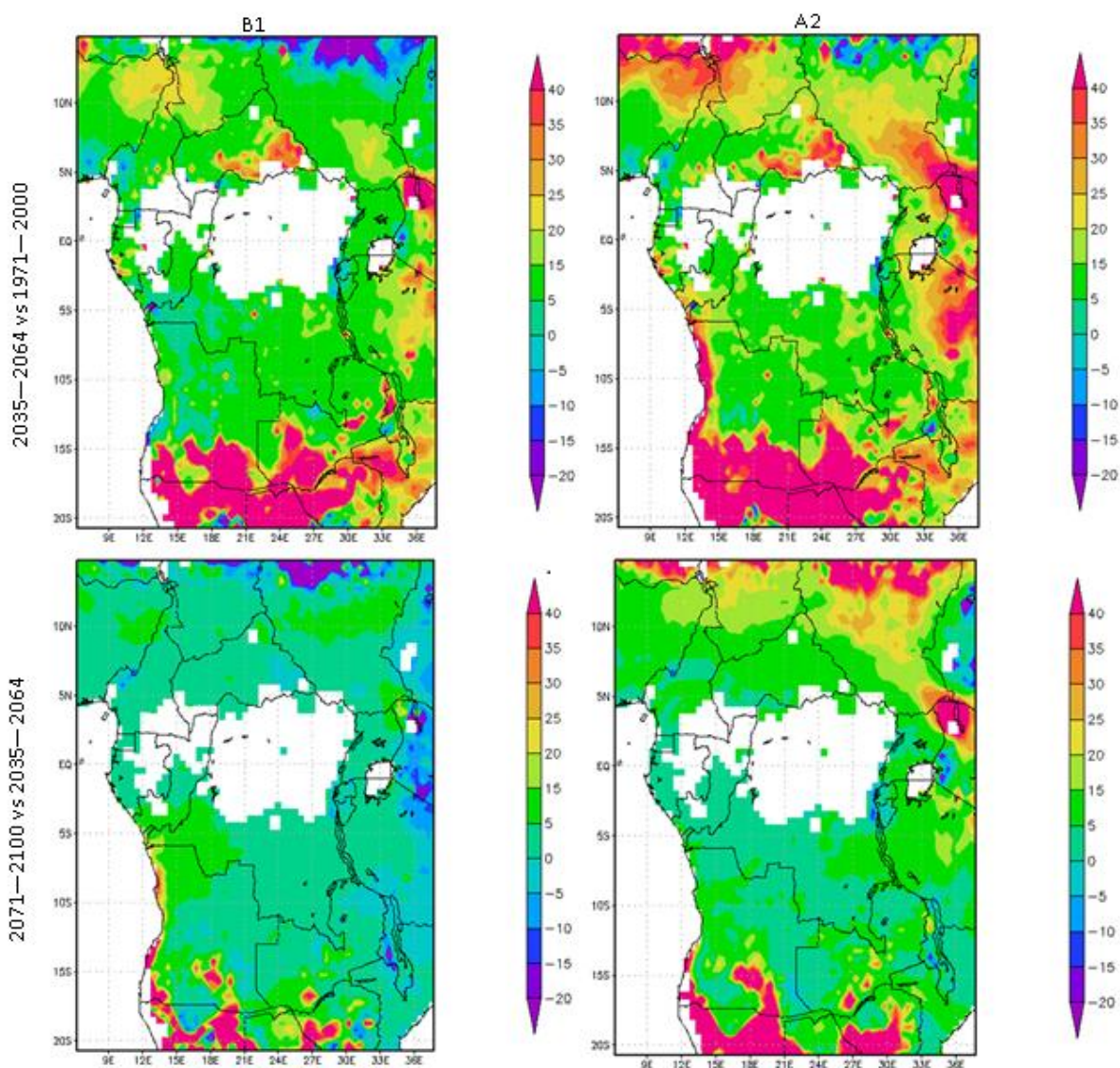
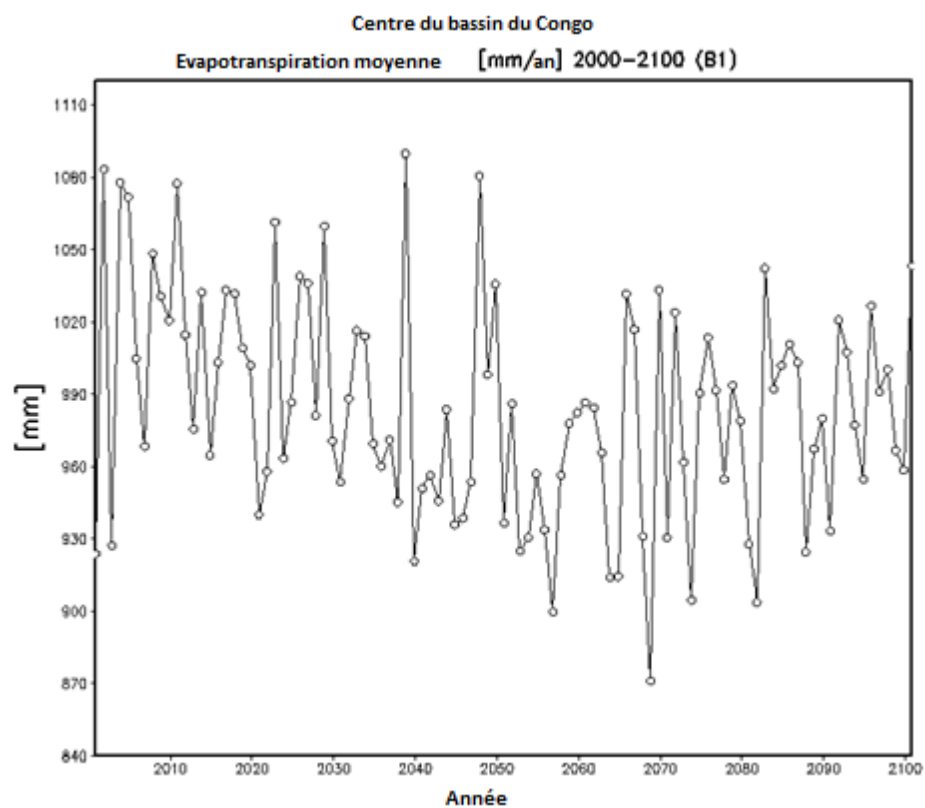
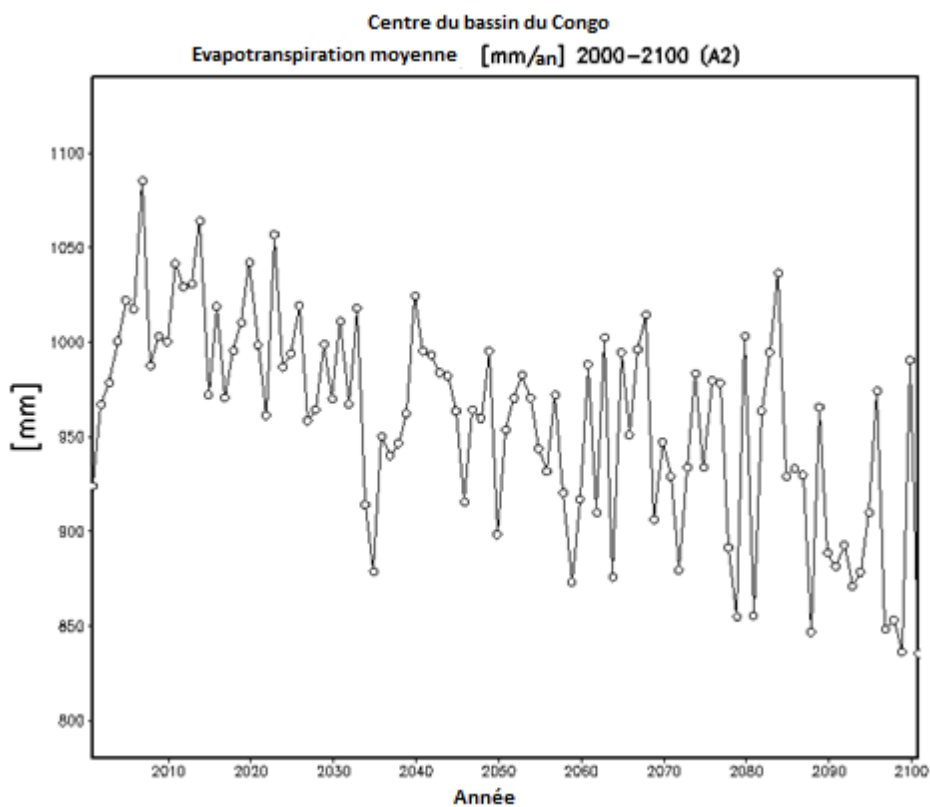


Figure 9. Changements relatifs du stress hydrique pour les périodes (2035-2064) – (1971-2000) et (2071-2100) – (2035-2064) respectivement pour les scénarios B1 et A2.

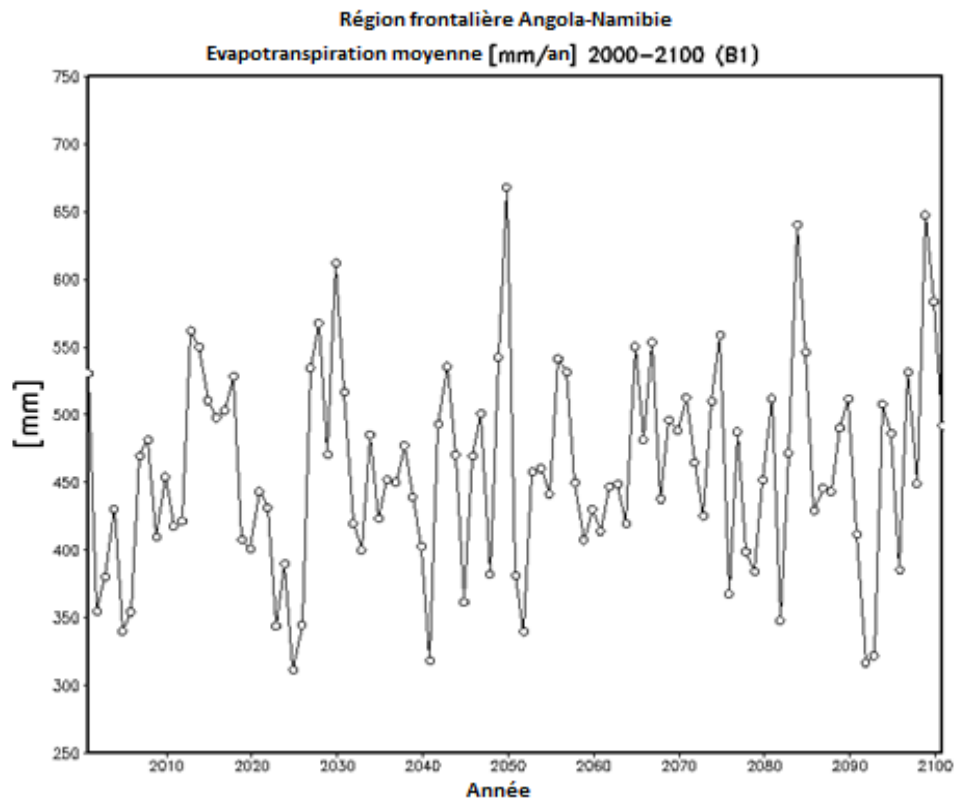
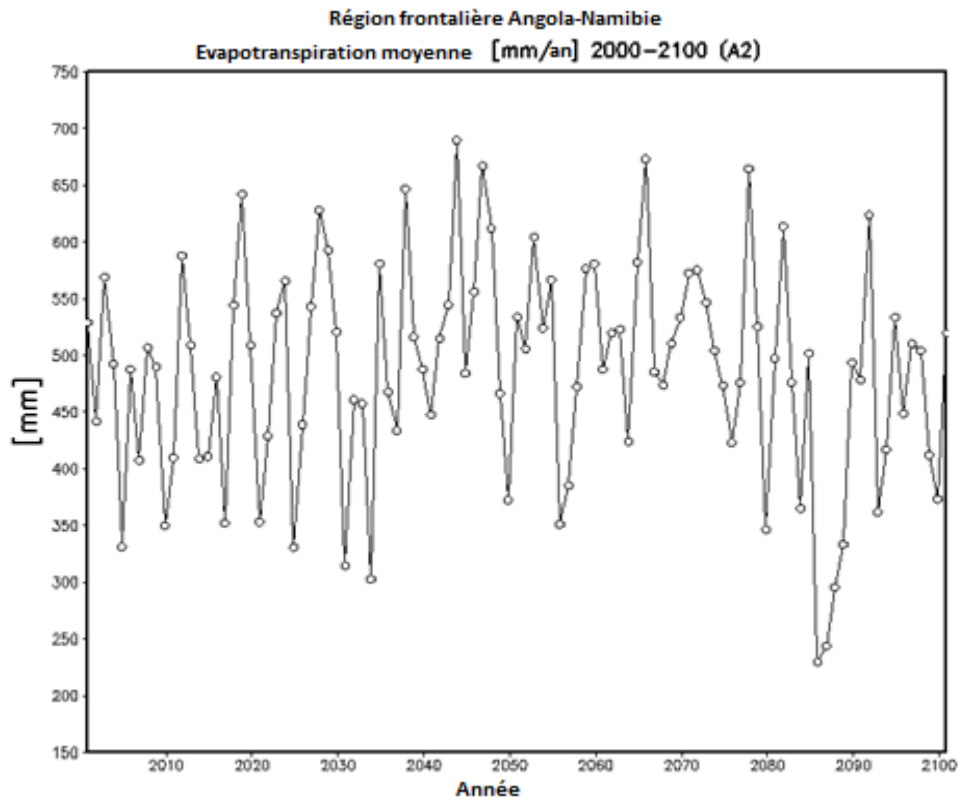


### 4.3 Résumé

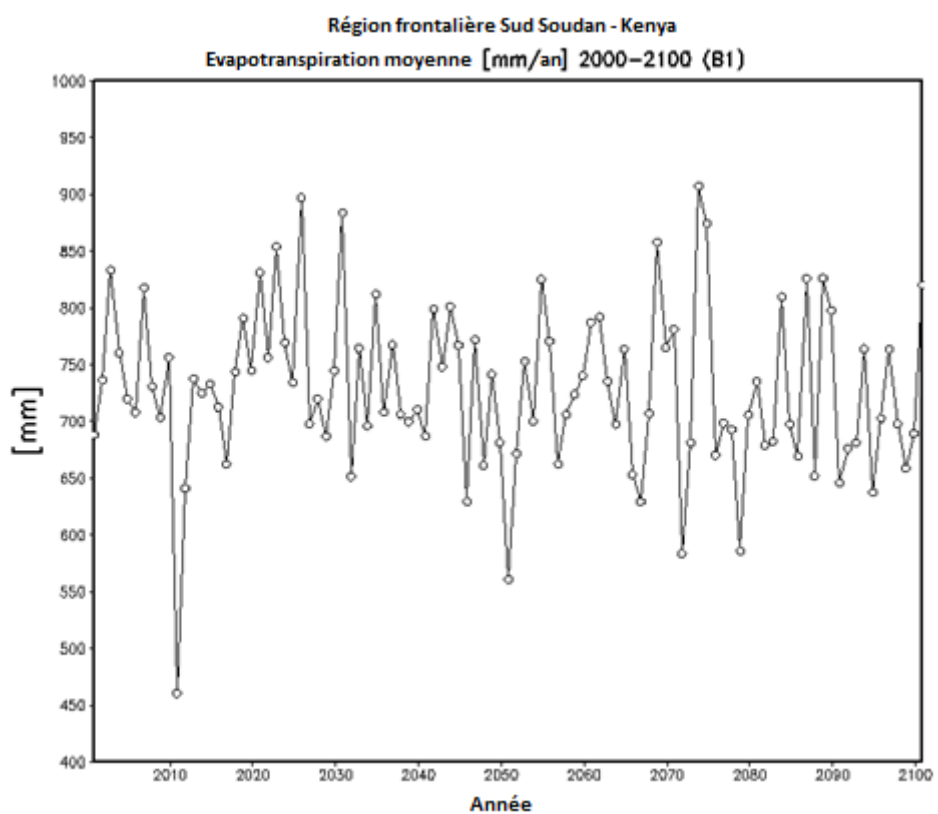
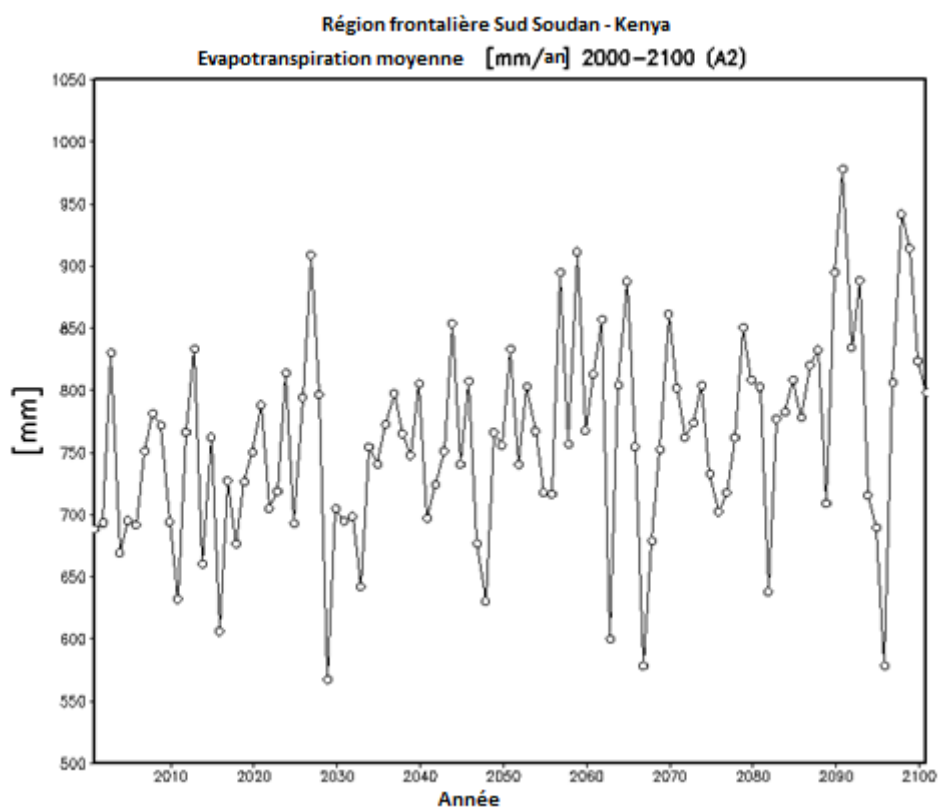
Dans les deux scénarios, le bassin du Congo devient plus sec au cours du 21<sup>e</sup> siècle. Le stress hydrique augmente légèrement. Cependant, l'agriculture ne souffrira pas des pénuries structurelles en eau. La hausse de CO<sub>2</sub> entraînera la hausse de l'efficacité de l'utilisation de l'eau par la végétation naturelle et les plantes agricoles. L'agriculture dans les savanes autour du bassin du Congo subiront initialement des pénuries d'eau toutefois, avec le temps, ces pénuries seront de moins en moins sérieuses. Ce n'est que dans les savanes au sud que la sécheresse affectera l'agriculture. Il faut noter que les sécheresses du scénario A2 sont plus sérieuses que celles du scénario B1.



Dessin 10. Valeurs moyennes de l'évapotranspiration dans la région du centre du bassin du Congo pour les scénarios A2 et B1 respectivement.



Dessin 11. Valeurs moyennes de l'évapotranspiration dans la région du centre de la région frontalière Angola-Namibie pour les scénarios A2 et B1 respectivement.



Dessin 12. Valeurs moyennes de l'évapotranspiration dans la région du centre de la région frontalière Soudan du sud-Kenya pour les scénarios A2 et B1 respectivement.

## 5.0 IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RESSOURCES HYDRIQUES ET LA CAPACITÉ DE PRODUCTION HYDROÉLECTRIQUE

### 5.1 Impacts du changement climatique sur les débits et la variabilité des fleuves.

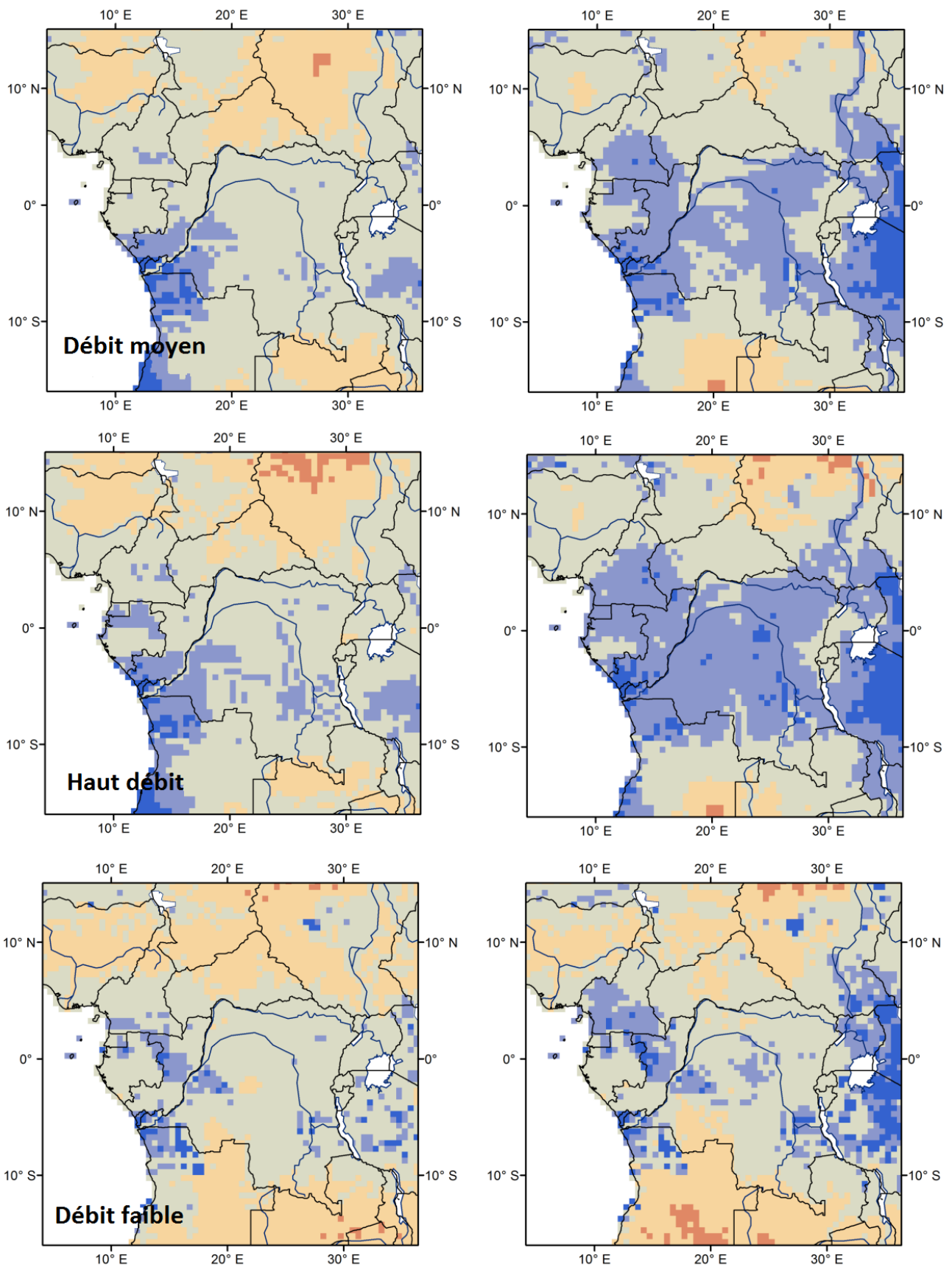
Le changement climatique a un impact réel sur les débits futurs des fleuves dans la région de l'Afrique centrale. Les débits moyens des fleuves augmenteront dans plusieurs zones de la région (Figure 13). De fortes augmentations de débits sont prévues pour les régions proches de la côte Atlantique, dans des zones comme l'ouest de la RDC et le sud du Congo Brazzaville. Les zones où l'on observe une augmentation des débits sont similaires pour les scénarios d'émissions faibles (B1) et élevées (A2). Des débits en dessous de la moyenne sont prévus dans les zones se trouvant aux confins de la région. Dans les pays de la COMIFAC, particulièrement au Tchad et au nord de la république Centrafricaine, il est prévu une baisse des débits des rivières. Pour ces pays, les différents modèles climatiques donnent des résultats divergents. Certains modèles affichent des débits élevés alors que d'autres montrent une baisse évidente. Ces résultats indiquent la disponibilité en eau augmentera dans une grande partie de la région. Ils indiquent aussi que la capacité totale de production hydroélectrique augmentera.

Outre l'analyse des débits moyens, nous avons également examiné les changements des hauts débits (Q95) et des faibles débits (Q13) (Figure 13). La hausse des hauts débits est supérieure aux débits moyens dans une grande partie de la région. Cette augmentation est de plus de 25% pour les scénarios d'émissions élevées (A2) dans certaines zones de la région. L'impact dans les scénarios d'émissions faibles est moins grave mais, dans ces scénarios, on observe une augmentation des hauts débits dans l'ensemble de la région.

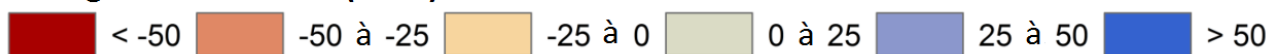
Les faibles débits baissent, en particulier, au nord et sud de la région. En comparaison au débit moyen, la baisse des faibles débits s'étend à une zone plus grande (Figure 13). Dans les zones limitrophes du bassin du Congo, on assiste à une baisse des faibles débits et à une hausse de hauts débits. Par ailleurs, la majorité des scénarios climatiques indiquent une augmentation des débits pendant la saison pluvieuse alors qu'en saison sèche, la majorité des scénarios montrent des débits plus faibles (voir aussi Beyene et al. 2013).

La variabilité du débit augmente dans l'ensemble de la région. Même dans les zones où on observe une augmentation des hauts et des bas débits, on assiste à une augmentation accrue des hauts débits. Cette hausse de la variabilité a un impact sur la production hydroélectrique. La variabilité des débits pourrait rendre la capacité de production hydroélectrique moins fiable. Alors que la capacité totale de production pourrait augmenter dans plusieurs zones, des hauts et bas débits plus fréquents pourraient toujours entraîner des situations plus fréquentes lorsque la disponibilité en eau réduirait la production électrique.

L'augmentation de la variabilité du débit a également un impact sur la gestion des barrages. Des hauts débits plus fréquents augmenteront le risque de remplissage excédentaire des réservoirs hydroélectriques. Le risque de recourir aux rejets d'urgence pourrait augmenter si aucun changement n'est fait au niveau de la gestion des barrages. Pour éliminer ce risque, il serait nécessaire de rejeter plus d'eau que nécessaire pour la production hydroélectrique avant la saison pluvieuse afin de réduire les risques de crues en aval. Toutefois, si pendant la saison pluvieuse, les précipitations sont plus faibles que prévues, cela entraînera à une baisse de la production électrique.



**Changement du débit (en %)**



Dessin 13. Prévisions du changement du débit moyen (a) du haut débit (b) et du faible débit (Q10) (c) pour 2071-2100 relative à la moyenne de 1971-2000 pour trois modèles climatiques différents (MCG) pour les scénarios d'émissions élevées (A2) et faibles (B1).

## 5.2 Barrages hydroélectriques.

Le changement climatique augmente l'apport d'eau dans tous les barrages focaux analysés (Tableau 1). Toutefois, l'ampleur des changements est variable. Pour le barrage Nzilo, le débit moyen n'augmente que légèrement. L'augmentation moyenne dans les scénarios d'émissions faibles avoisine zéro. À la fin du siècle, les augmentations de débit ne sont que de 13% pour le scénario d'émission élevée. Les augmentations de débit sont au plus haut pour la Barrage de Song Loulou, avec une augmentation moyenne des débits allant jusqu'à 55% pour les scénarios d'émissions faibles à la fin du 21<sup>e</sup> siècle. Les autres trois barrages ont des augmentations de débits d'environ 10% pour le scénario d'émission faible pour la période 2035-2064 et de 30% à la fin du siècle pour le scénario d'émission élevée.

**Tableau 1. Changement relatif moyen du débit des fleuves pour les cinq barrages hydroélectriques de la région de la Comifac au milieu du siècle et à la fin du 21<sup>e</sup> siècle pour deux scénarios d'émissions différents. Les résultats sont la moyenne de trois modèles climatiques différents (le changement maximal et minimal sont dans les parenthèses)**

Barrage	Scénarios d'émissions faibles (B1)		Scénarios d'émissions élevées (A2)	
	2035 – 2064	2071-2100	2035 – 2064	2071-2100
Moukoulou	10% (1 – 17%)	17% (7 – 29%)	13% (11 – 14%)	30% (16 – 53%)
N'Zilo	0,3% (-4,4 – 3,5%)	9% (6 – 15%)	6% (-2,5 – 14%)	13% (10 – 17%)
Song Loulou	18% (-6 – 45%)	50% (32 – 83%)	36% (20 – 51%)	55% (40 – 73%)
Inga	10% (1 – 18%)	18% (7 – 29%)	13% (12 – 83%)	30% (17 – 53%)
Imboulou	10% (3 – 19%)	15% (6 – 29%)	13% (11 – 16%)	30% (16 – 57%)

Les changements de débit ne sont pas identiques pendant toutes les saisons (Figure 14). Généralement, le débit augmente uniquement pendant la saison pluvieuse. Pendant la saison sèche, l'augmentation moyenne du débit est minimale et certains modèles climatiques indiquent une baisse du débit pendant la saison sèche. Les barrages de Moukoulou, Inga et Imboulou indiquent une augmentation du débit pendant les mois d'avril et mai et la période de novembre à décembre. Pendant la période de faible débit, à peu près en août, l'augmentation moyenne est à son plus bas. Les modèles climatiques IPSL indiquent une baisse des débits, notamment en août et en novembre. Cependant, le modèle CNRM indique une baisse du débit en juillet. De même, pendant les mois de février et mars, certains modèles climatiques indiquent une baisse du débit.

Pour le barrage de Nzilo, il est prévu une baisse des débits pour la saison sèche alors que les débits moyens augmentent pendant la saison pluvieuse. Pendant la saison de débit de pointe (janvier), tous les scénarios climatiques prévoient une augmentation. Pendant la saison sèche, tous les modèles climatiques prévoient une augmentation. Pour les mois séparant le débit de pointe et la saison sèche, les résultats sont associés à d'autres modèles climatiques indiquant une baisse de débit et à d'autres indiquant une augmentation.

En conclusion, des six modèles climatiques utilisés pour les analyses d'impact, il semble improbable que le changement climatique aura un impact négatif sur la capacité de production hydroélectrique. La hausse de la variabilité du débit rendra la gestion des barrages plus difficile. À cause de l'intensité de l'augmentation de la pluviométrie (voir Haensler et al. 2013) et des débits de pointe élevés, les risques de crues pourraient augmenter. Pour réduire ces risques, la gestion des barrages doit être améliorée.

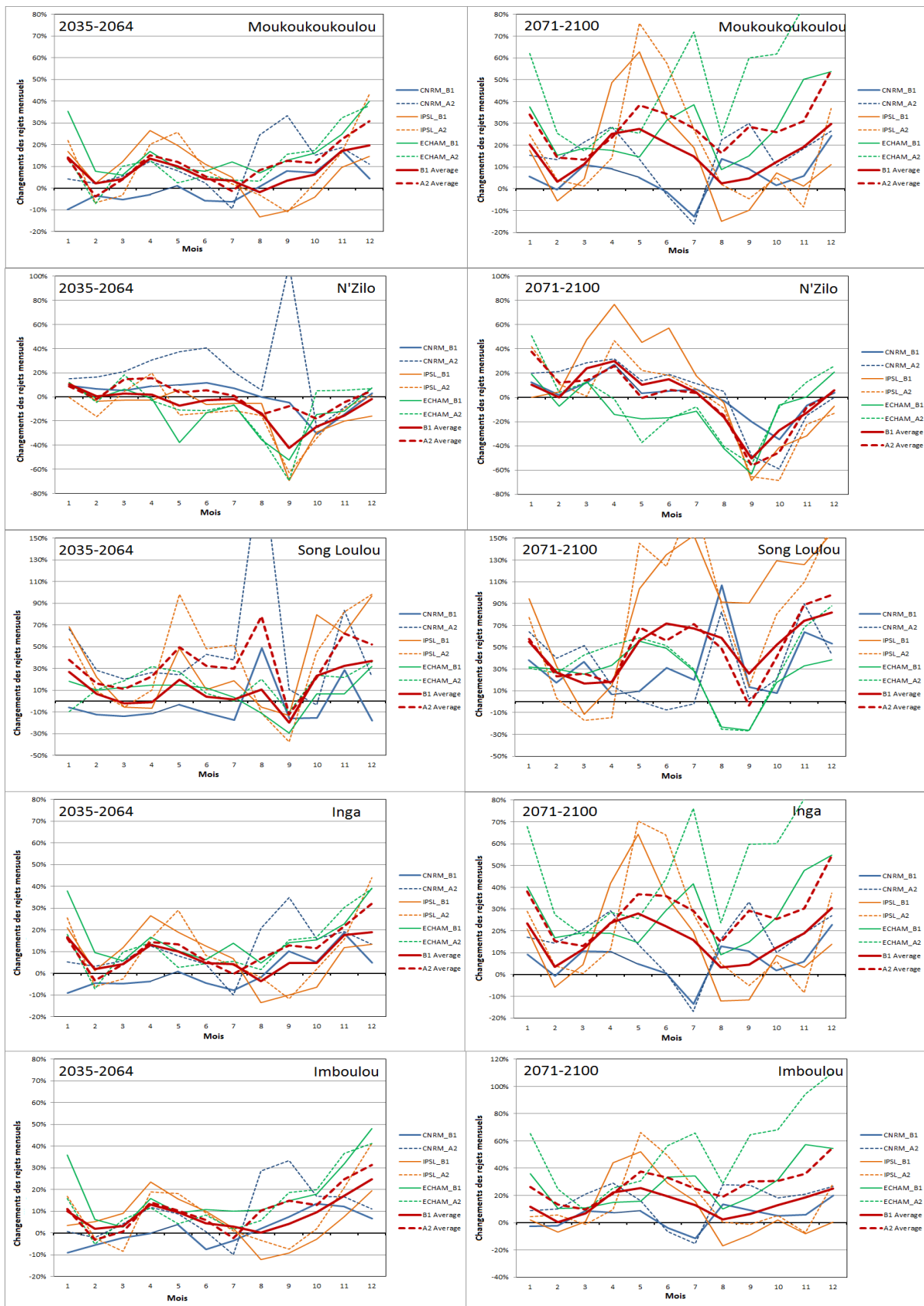


Figure 14. Changements relatifs du débit des fleuves dans les réservoirs hydroélectriques de cinq différents barrages en Afrique centrale pour la moitié du 21<sup>e</sup> siècle (colonne de gauche) et à la fin du siècle (colonne de droite). Chaque ligne (excepté la ligne rouge) indique le résultat d'un modèle climatique spécifique. Les lignes rouges indiquent la moyenne des trois modèles climatiques. Les lignes en pointillés indiquent un scénario d'émission élevée (A2) et les lignes droites indiquent un scénario d'émission faible (B1).



## 6.0 IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES FORÊTS ET LE CYCLE DU CARBONE

Dans cette section, nous faisons une analyse des possibles conséquences du changement climatique sur le cycle du carbone pour la région du bassin du Congo. Elle comprend une analyse de la taille et de la stabilité des stocks de carbone dans la végétation naturelle de cette région pour le siècle prochain. Nous avons également étudié les éventuels décalages des classes générales de types de végétation suite au changement climatique.

Il est important de connaître la taille, le type et la stabilité des stocks de carbone dans le siècle prochain car, ces stocks constituent une opportunité importante pour atténuer les effets des changements climatiques. Ainsi, si ces stocks sont relâchés, ils causeront une hausse substantielle des concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub> et s'ils sont conservés, ils ont la capacité d'absorber le CO<sub>2</sub> supplémentaire de l'atmosphère. Outre leur rôle dans la rétention du CO<sub>2</sub> atmosphérique, les forêts tropicales représentent une suite de services écosystémiques sur le plan local, régional et à l'échelle mondiale grâce à leur rôle dans le maintien des ressources en eau, la lutte contre l'érosion, la provision de nourriture et plusieurs produits chimiques naturels rares, la conservation de la biodiversité, la stabilisation du climat, etc. Les stocks de carbone et les taux de consommation annuelle de carbone sont énormes mais, ce sont des bons indicateurs de la vitalité des forêts tropicales.

Il existe plusieurs mécanismes qui font l'objet de discussions au sein des traités internationaux et dans le CCNUCC pour associer la conservation des forêts et l'atténuation des effets du changement climatique, à travers la gestion et la commercialisation des crédits de carbone. Un des mécanismes prometteurs dont il en est actuellement question est le REDD+ (Réduction du déboisement et de la dégradation plus conservation de la biodiversité), dans lequel, au niveau des pays, des incitatifs seront créés pour réduire la déforestation et conserver ainsi la carbone. Un aspect crucial de ces mécanismes, pour être acceptable sur n'importe quel 'marché' international, est la durabilité du carbone présent dans les forêts conservés. Si pour une raison ou une autre les forêts venaient à disparaître ou se dégradent, cela mettrait à risque la viabilité et la valeur des mesures prises pour les conserver. Cela inclut les forêts et la biomasse de forêts menacées par les changements climatiques tels que l'augmentation des températures et la baisse de la pluviométrie. Dans le cas contraire, si les forêts parviennent à accaparer des quantités supplémentaires de carbone, cela augmenterait la viabilité et la valeur des mécanismes tels que REDD+.

Plusieurs études ont montré qu'un autre biome de la forêt tropicale humide, le bassin de l'Amazone, peut être menacé par une dégradation due au changement climatique (Cox et al., 2000; Nobre et Borma, 2009). Pour ce bassin, certains (pas tous) modèles couplés de climat-végétation prévoient qu'après une hausse initiale de la biomasse, les forêts de l'Amazone pourraient rapidement se dégrader suite à de graves sécheresses et un cycle progressif des émissions de CO<sub>2</sub>, une accélération du changement climatique et l'augmentation de la température. Des études scientifiques approfondies sont actuellement en cours pour savoir si cela se produira réellement. De toute évidence, il est important de se poser la question de savoir si les simulations par ordinateur donneraient un résultat similaire pour le bassin du Congo.

À l'exception de la dégradation causée par l'homme, les stocks de carbone des forêts tropicales sont principalement sensibles au changement de la pluviométrie et aux régimes des précipitations (sécheresses), aux changements de température (entraînant des modifications de la photosynthèse et une augmentation de la décomposition des matières organiques) et de la modification du CO<sub>2</sub> (causant éventuellement une

hausse de la productivité). Nous sommes conscients que les modèles de végétation pourraient également être sensibles à l'augmentation du rayonnement. Si on considère que le rayonnement ne devrait pas subir de modification substantielle, nous examinerons des changements de stocks de carbone du bassin du Congo dans un contexte plus large pour le siècle prochain en prenant principalement en compte les changements de la pluviométrie, de la température et du CO<sub>2</sub>.

## 6.1 Simulations et analyses

Pour l'analyse, nous avons utilisé le modèle LPJml, appliqué à la région de l'Afrique centrale et de l'Ouest (Lon 6-32; Lat -15-15), à l'aide d'un forçage climatique tiré d'un des trois modèles climatiques, généré dans le cadre du scénario AR4 - A2 du GIEC (Haensler et al., 2013). Les calculs de prévision les années 2000 - 2100 ont été effectués. Les paramètres ont été adoptés en vertu des traits fonctionnels standards des végétaux du modèle. Pour plus d'informations sur la configuration et l'exécution du modèle, nous nous référerons à d'autres sections de ce rapport.

Pour commencer, les modèles de stocks de carbone et les changements des stocks de carbone ont été validés à l'aide des données mesurées. Pour cela, nous avons utilisé les séries de données de la représentation graphique de biomasse collectées à des intervalles variables en Afrique de l'Ouest et aux confins du bassin du Congo, publiées par Lewis et al. (2009). Le modèle LPJml a été utilisé pour calculer les prévisions de la biomasse et son augmentation pendant les mêmes périodes pour chacune des représentations graphiques.

Sur la base de ces validations et selon l'avis des experts sur les changements prévus pour la végétation et le carbone du sol, nous avons sélectionné les résultats associés à un seul modèle climatique (modèle ECHAM).

Ensuite, les changements du carbone de la végétation et du sol ont été analysés pour les scénarios et périodes spécifiés. Pour chaque analyse, deux domaines spatiaux ont été sélectionnés : l'Afrique de l'Ouest et Centrale (AOC, Lon 6-32; Lat -15-15) et le bassin du Congo (BC, Lon 9-28; Lat -5-5). Pour chacun de ces domaines, les paramètres du changement et les totaux régionaux de stocks de carbone ont été analysés

Pour permettre l'incertitude fondamentale associée à l'effet des changements des concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub> (effet fertilisant du CO<sub>2</sub>, voir la section méthodologie), les simulations ont, à chaque fois, été effectuées conformément à deux ensembles de conditions : alors qu'il était prévu que le climat (température, précipitation, rayonnement) change selon les prévisions du modèle de climat, il était prévu que le CO<sub>2</sub> change dans un cas mais, demeure constant dans un autre cas.

En utilisant des conditions et des simulations similaires, le modèle a prévu des changements dans la distribution spatiale de la productivité par trait fonctionnel de végétaux. Cela peut être interprété à peu près comme la viabilité de l'existence de chacun de ces types. Ces distributions ont également été analysées.

## 6.2 Résultats et Discussion

La Figure 15 montre les résultats de la validation à l'aide de données de biomasse. Il est évident que le modèle dans sa configuration actuelle donne une sous-estimation de la biomasse mesurée. Cela est préoccupant car, on ne comprend pas bien la cause de cette divergence. Toutefois, le modèle ECHAM montre une corrélation raisonnable entre les stocks modélisés et observés de sorte qu'on est en droit de supposer que ce modèle analyse relativement bien les sensibilités. Lorsque les changements temporels des modèles et des données sont comparés, il n'existe aucune corrélation évidente. Même si cela paraît décourageant, il faut remarquer que le modèle et les données renvoient à des échelles très différentes. Lorsque les données sont valides pour les représentations graphiques dans un paysage très varié, le modèle génère des nombres pour les principales classes de végétation et les conditions moyennes sur de larges points de grille. Cela rend très improbable le fait que le modèle et les données s'accordent sur tous les points, en particulier si l'on prend les différences de temps en considération.

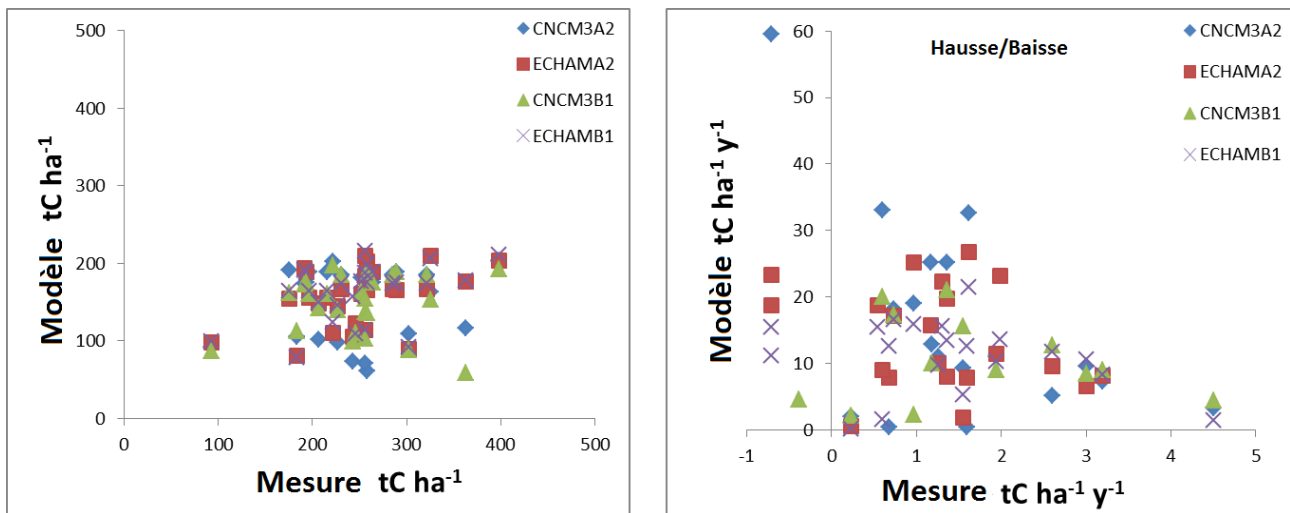


Figure 15. (à gauche) Comparaison de la biomasse sur pied prévu et mesuré dans les représentations graphiques de biomasse sélectionnées telles que publiées par Lewis et al (2009), à l'aide de deux modèles différents et de deux modèles de changements climatiques divergents. (à droite) la même comparaison, mais cette fois pour le changement de biomasse tel que mesuré et modélisé sur les intervalles de mesure de chaque représentation graphique.

Le Figure 15 montre que les simulations prévoient une augmentation générale du carbone de la végétation en particulier dans le bassin central du Congo. Si on exclut l'effet de la hausse du  $\text{CO}_2$  du modèle, les simulations prévoient, au contraire, une baisse générale du carbone de la végétation dans la même région. Cette tendance est la même dans La Figure 16, on remarque la hausse du carbone de la végétation pendant les premières décennies du 21<sup>e</sup> siècle, probablement avec une augmentation modérée de la température mais, pour le reste de cette période on assiste une baisse du niveau constant du  $\text{CO}_2$ , avec un déclin plus rapide dans le bassin central. Les informations sur les résultats des simulations du scénario d'émission faible se trouvent dans la section carte/Figure de la version numérique (interactive) du rapport final.

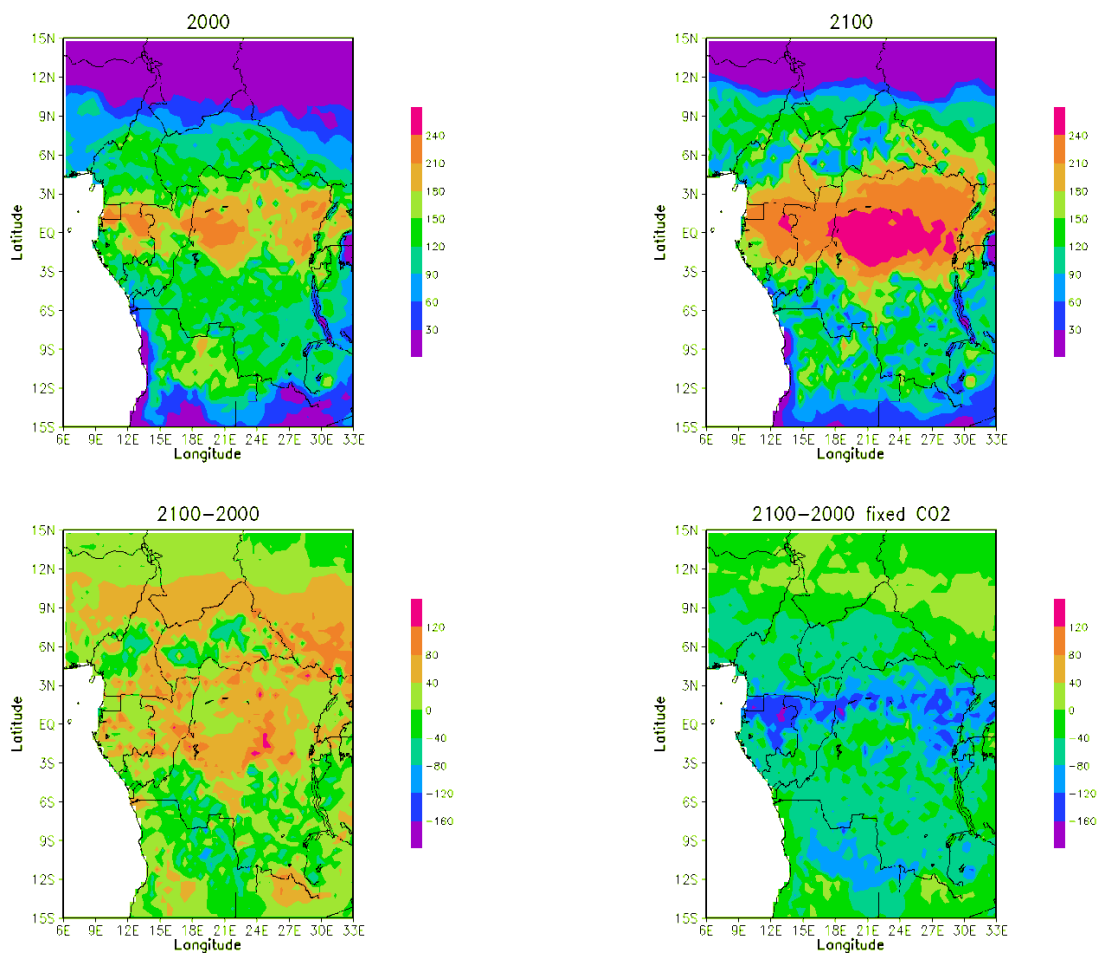


Figure 16. Cartes du carbone végétal ( $tC\ ha^{-1}$ ) selon le modèle du scénario d'émission élevé (A2) pour les années 2000 et 2100 ainsi que les changements observés pendant cette période avec ou sans prise en compte de la hausse des concentrations de  $CO_2$ . REMARQUER que la mise à l'échelle des couleurs est différente; les stocks dans la ligne du haut et les changements dans la ligne du bas.

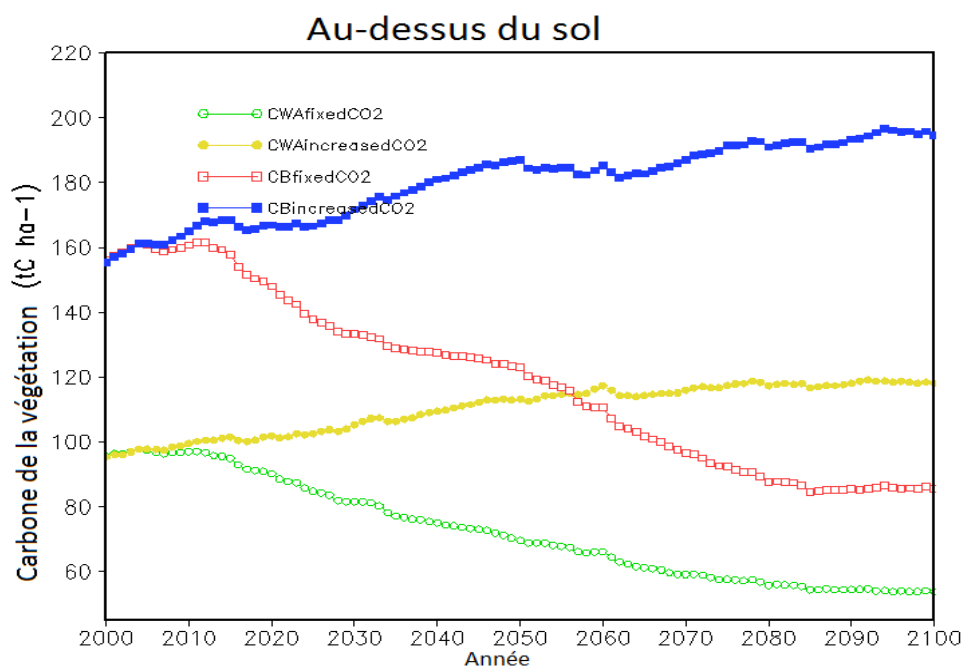


Figure 17. Modélisation de l'évolution temporelle à l'aide du scénario d'émission élevé (A2) du carbone végétal pendant le 21<sup>e</sup> siècle. Les éléments affichés sont les séries chronologiques pour la zone de l'Afrique centrale et de l'Ouest (les zones pleines affichées dans la carte) ainsi que les séries chronologiques pour la zone rectangulaire du bassin du Congo, tel que défini dans la méthodologie. Le graphique illustre également les mêmes séries chronologiques dans les cas où la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> est constante.

La Figure 18 montre une possible hausse du carbone du sol du au changement climatique et à l'augmentation des concentrations de CO<sub>2</sub> mais, cette hausse ne se produit pas dans l'ensemble du bassin. Pour la zone de transition savane du nord-Sahel, la simulation montre une baisse du carbone du sol malgré la hausse de la concentration de CO<sub>2</sub>. Si les effets du CO<sub>2</sub> ne sont pas pris en compte, la simulation montre une baisse générale du carbone du sol. La Figure 19 montre également ces changements généraux à l'échelle centennale mais, ils exposent également un paramètre plus compliqué dans l'évolution temporelle du carbone du sol. Avec l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub>, la simulation montre précisément que le total du carbone du sol dans le bassin central doit atteindre son plus haut niveau dans la deuxième moitié du siècle, suivi par une baisse. Pour les simulations ne prenant pas en compte des effets du CO<sub>2</sub>, on note une forte poussée dans la première moitié du siècle, suivi par une forte baisse. Ce comportement non linéaire est probablement causé par la simulation du transfert de l'augmentation de la litière végétale et du matériel ligneux mort au sol. Si la baisse commence dans la végétation, cela entrainera d'abord une accumulation du carbone dans le sol, suivie d'une décomposition. Même dans le cas où la simulation prévoit une augmentation du CO<sub>2</sub>, la productivité végétale entrainera une hausse de la chute et du renouvellement de la litière, conduisant à des pics du carbone du sol qui s'équilibreront plus tard. Enfin, La Figure 19 résume les augmentations escomptées, avec la hausse de concentrations de CO<sub>2</sub>, du carbone dans les deux composants, montrant que les augmentations du carbone dans la végétation sont dominantes dans tous les cas. Les informations sur les résultats des simulations du scénario d'émission faible se trouvent dans la section carte/Figure de la version numérique (interactive) du rapport final.

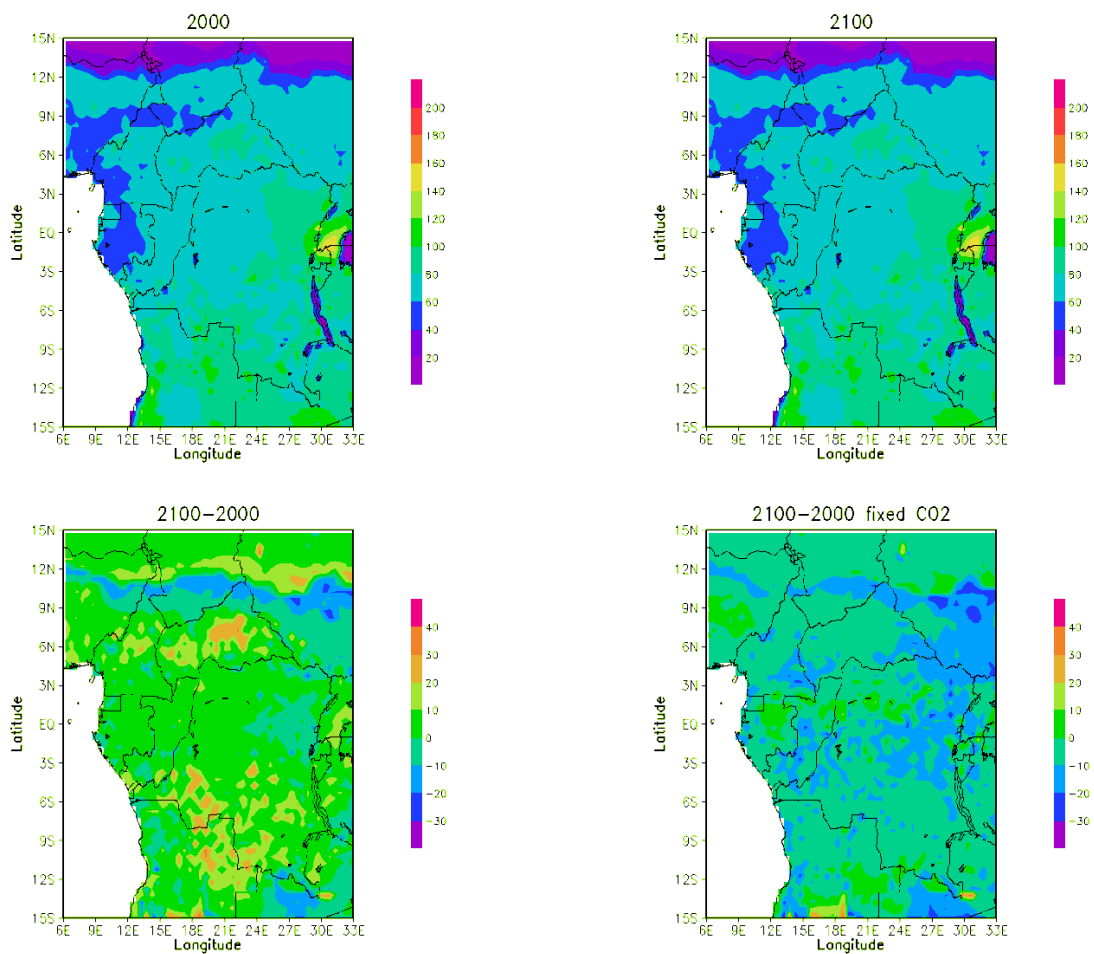


Figure 18. Cartes du carbone du sol (tC ha<sup>-1</sup>) selon le modèle du scénario d'émission élevé (A2) pour les années 2000 et 2100 ainsi que les changements observés pendant cette période avec ou sans prise en compte de la hausse des concentrations de CO<sub>2</sub>. REMARQUER que la mise à l'échelle des couleurs est différent; les stocks dans la ligne du haut et les changements dans la ligne du bas.

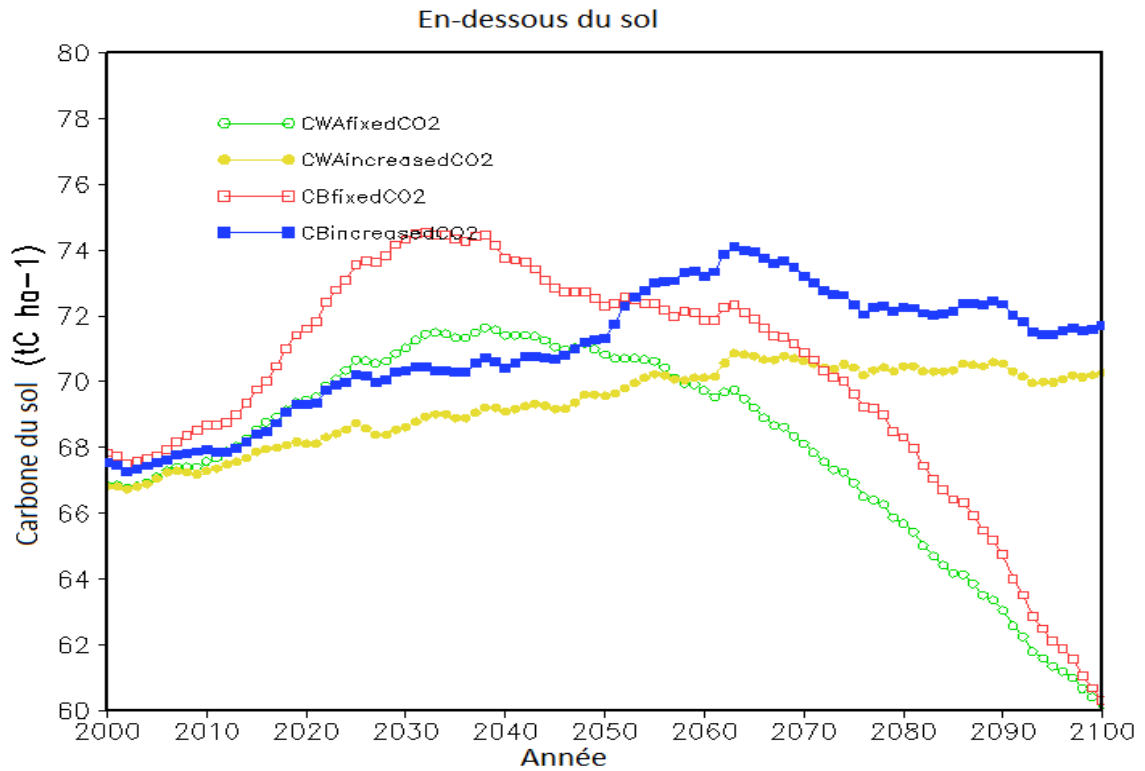


Figure 19. Modélisation de l'évolution temporelle à l'aide du scénario d'émission élevé (A2) du carbone du sol pendant le 21<sup>e</sup> siècle. Les éléments affichés sont les séries chronologiques pour la zone de l'Afrique centrale et de l'Ouest (les zones pleines affichées dans la carte) ainsi que les séries chronologiques pour la zone rectangulaire du bassin du Congo, tel que défini dans la méthodologie. Le graphique illustre également les mêmes séries chronologiques dans les cas où la concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub> est constante.

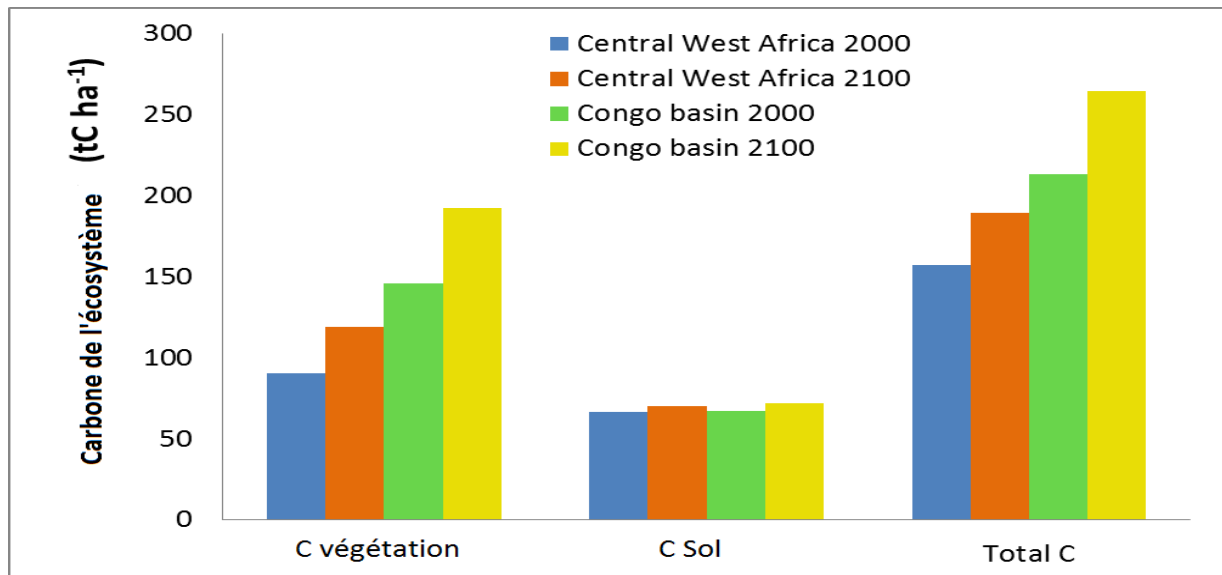


Figure 20. Diagramme à barres résumant la simulation des changements pour le 21<sup>e</sup> siècle des totaux intégrés de la végétation, du sol et la quantité totale du carbone des écosystèmes dans la région large et restreinte, en prenant en compte la hausse de concentration de CO<sub>2</sub>.

Les Figures 21 à 23 montrent la possibilité des modifications des traits de végétation, exprimés en tant que changements du PPN dans les trois traits fonctionnels de végétaux dominants du modèle LPJml : La forêt tropicale sempervirente, la forêt tropicale saisonnière et les herbages tropicaux (prairies). Les simulations montrent que les hausses du PPN dans les simulations sont principalement causées par l'expansion du domaine de la forêt sempervirente. Pour la forêt saisonnière, les simulations montrent également une hausse du PPN dans la région équatoriale mais, la principale caractéristique est une massive expansion vers le nord. Pour les herbages, le PPN est presque négligeable pour les régions du centre du Congo mais, le modèle montre clairement une progression des herbages vers le nord. Lorsque les effets du CO<sub>2</sub> ne sont pas pris en compte, le modèle montre une baisse de la superficie des forêts tropicales sempervirentes, ainsi qu'une baisse des forêts saisonnières dans cette zone mais, on observe une expansion des régions de savane du nord et du sud, doublée du remplacement de la forêt sempervirente par la forêt saisonnière. Un tel effet de « remplacement » est plus perceptible dans les herbages dans le cas où les effets du CO<sub>2</sub> ne sont pas pris en compte, lorsque la régression de la forêt tropicale sempervirente dans la région centrale du Congo est suivie par un remplacement modeste par les herbages.

Finalement, La Figure 24 montre qu'en cas de hausse du CO<sub>2</sub>, il est prévu que la productivité de toutes les forêts augmente alors que les herbages (prairies) régressent légèrement. Dans le dernier cas, il faut remarquer que les herbages pourraient sortir du domaine du modèle. Ainsi, malgré l'augmentation de la productivité totale dans ce domaine, il se peut que la productivité dans le domaine des herbages soit en hausse. Les informations sur les résultats des simulations du scénario d'émission faible se trouvent dans la section carte/Figure de la version numérique (interactive) du rapport final.



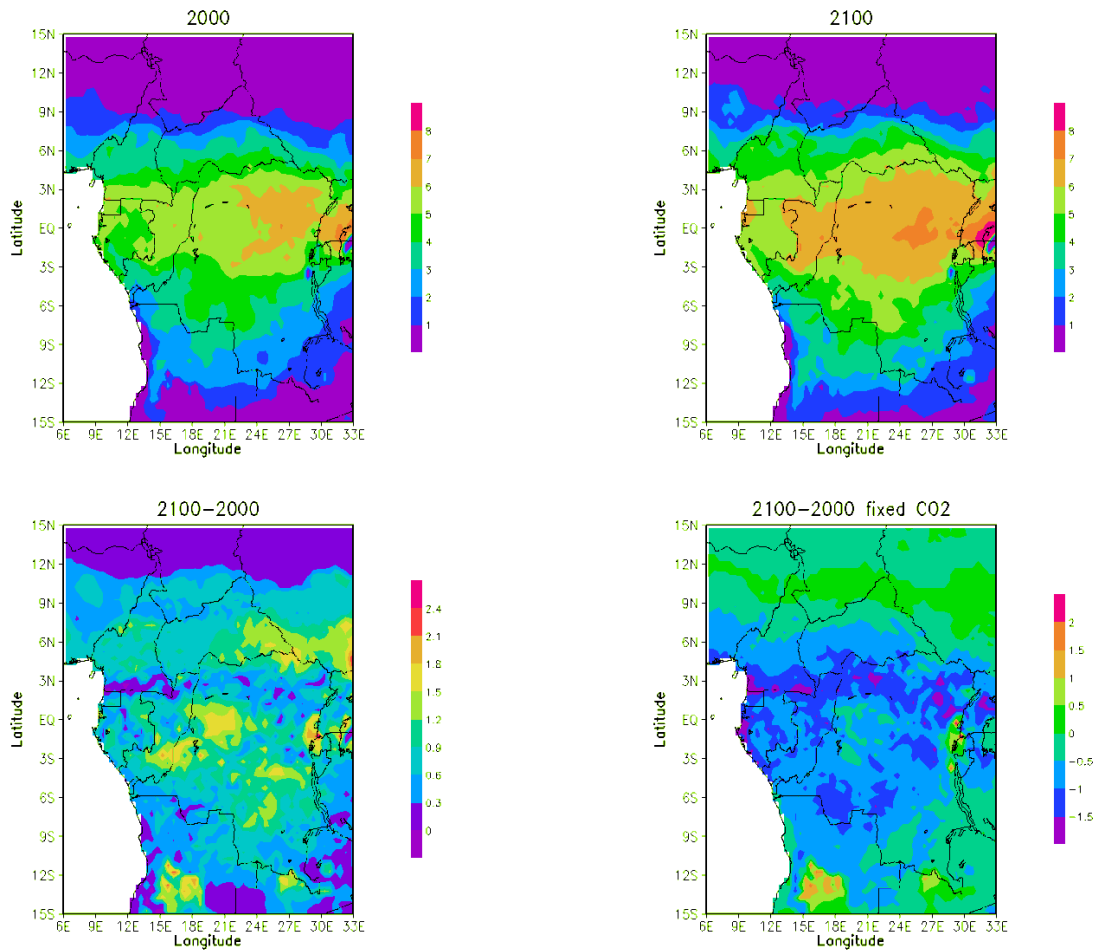


Figure 21. Cartes de la productivité primaire nette (PPN,  $\text{gC m}^{-2}$ ) pour le trait fonctionnel *Forêt tropicale sempervirente* selon le modèle du scénario d'émission élevé (A2) pour les années 2000 et 2100 ainsi que les changements observés pendant cette période avec ou sans prise en compte de la hausse des concentrations de  $\text{CO}_2$ . REMARQUER que la mise à l'échelle des couleurs est différent; les stocks dans la ligne du haut et les changements dans la ligne du bas.

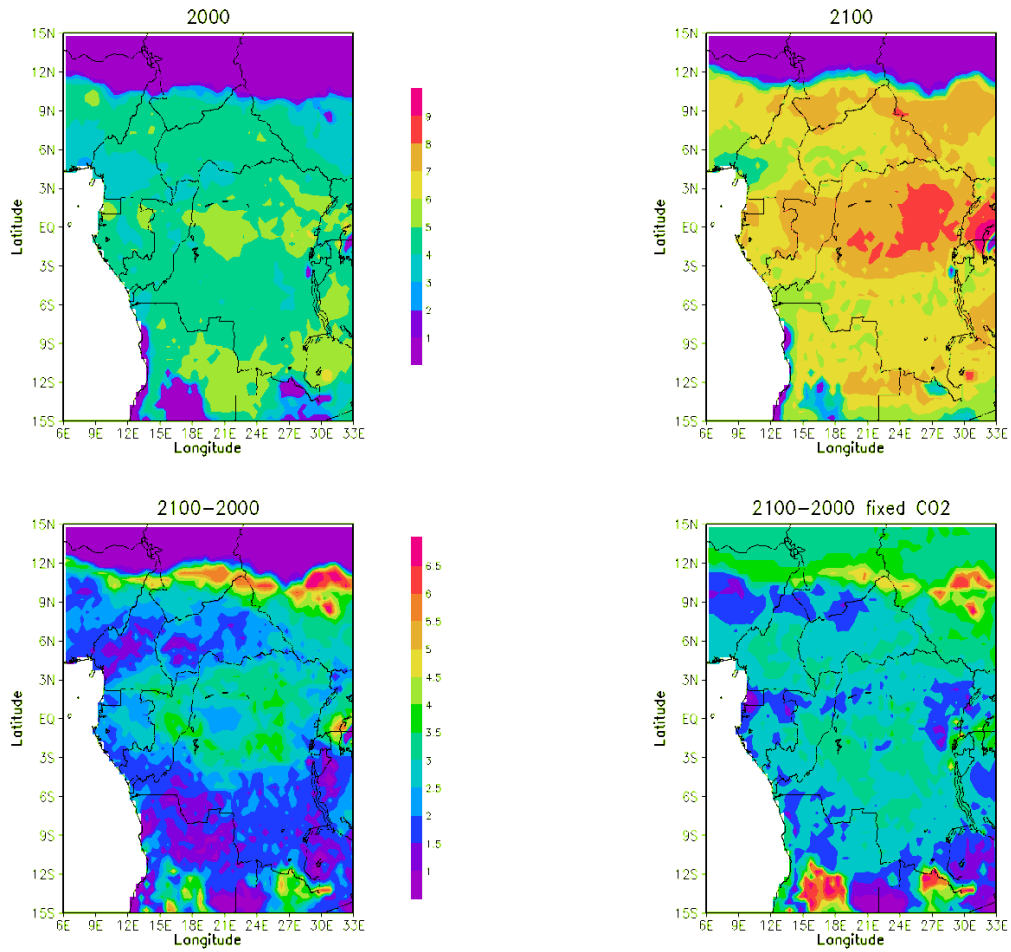


Figure 22. Cartes de la productivité primaire nette (PPN,  $\text{gC m}^{-2}$ ) pour le trait fonctionnel *Forêt saisonnière* selon le modèle du scénario d'émission élevé (A2) pour les années 2000 et 2100 ainsi que les changements observés pendant cette période avec ou sans prise en compte de la hausse des concentrations de  $\text{CO}_2$ . REMARQUER que la mise à l'échelle des couleurs est différente ; les stocks dans la ligne du haut et les changements dans la ligne du bas.

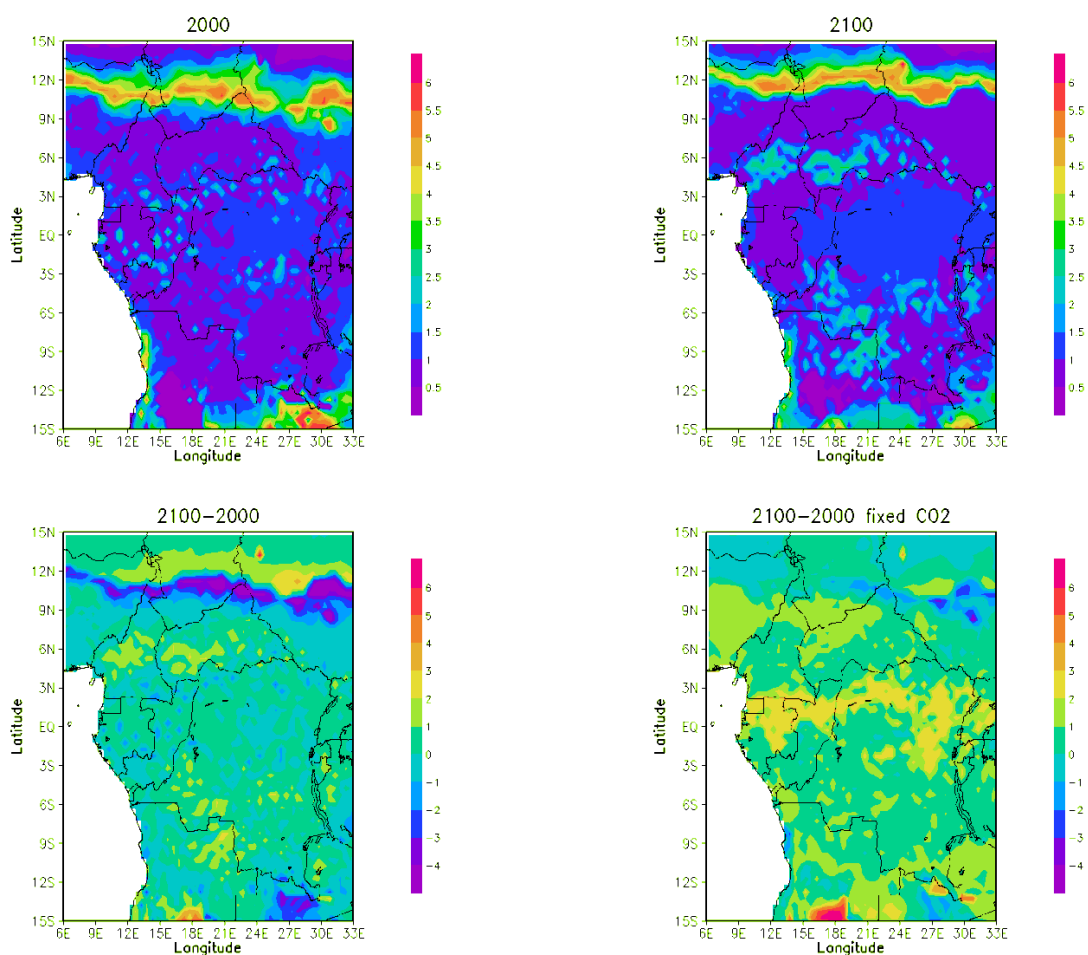


Figure 23. Cartes de la productivité primaire nette (PPN,  $gC\ m^{-2}$ ) pour le trait fonctionnel *Prairies naturelles* selon le modèle du scénario d'émission élevé (A2) pour les années 2000 et 2100 ainsi que les changements observés pendant cette période avec ou sans prise en compte de la hausse des concentrations de  $CO_2$ . REMARQUER que la mise à l'échelle des couleurs est différente ; les stocks dans la ligne du haut et les changements dans la ligne du bas.

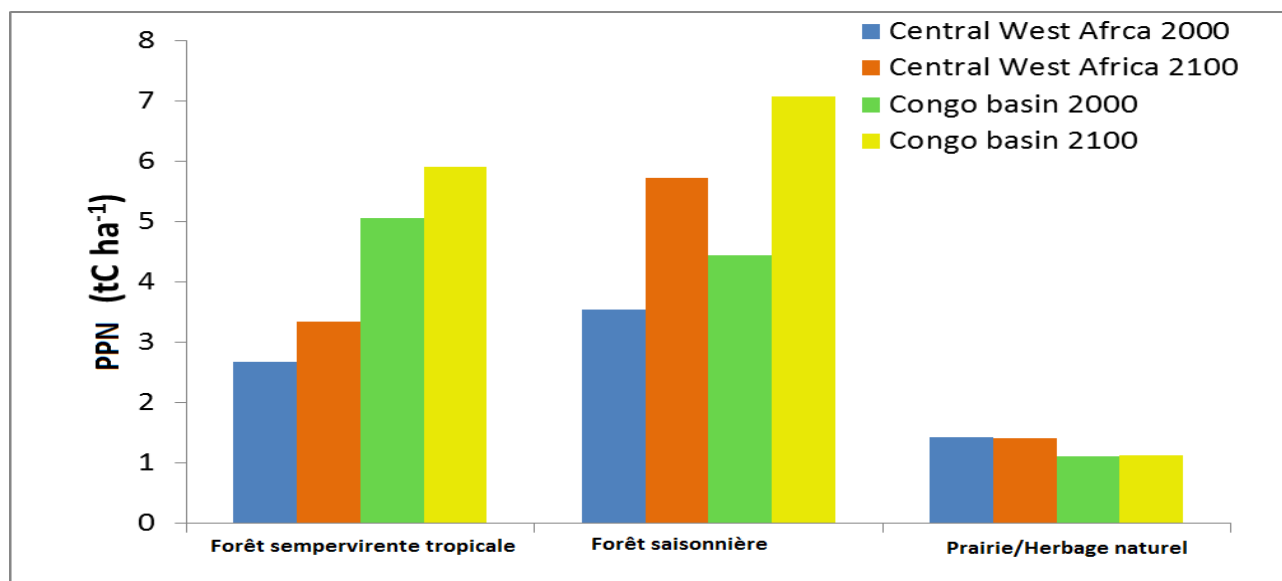


Figure 24. Diagramme à barres résumant la simulation des changements pour le 21<sup>e</sup> siècle du total intégré du PPN pour les trois traits fonctionnels de végétaux les plus importants dans la région large et restreinte.

### 6.3 Conclusions

Il convient de souligner que les résultats du modèle pour le carbone et la végétation ne dépendent que : de toutes les hypothèses et des erreurs que pourraient contenir le modèle utilisé, et de la capacité des modèles climatiques sous-tendant les scénarios de forçage utilisés. Il existe, néanmoins, une conclusion évidente : l'incompréhension des effets du CO<sub>2</sub> est la cause d'une incertitude majeure. Lorsque les effets du CO<sub>2</sub> sont pris en compte, les simulations montrent une croissance des forêts. Sans ces effets, elles montrent une baisse. On ne sait pas laquelle de ces hypothèses est plus proche de la vérité. Il est raisonnable de penser que la hausse du CO<sub>2</sub> aura un effet modéré, voire temporaire. Il serait donc logique de penser que les hausses réelles de la biomasse se trouvent quelque part au milieu du champ affiché ici.

Outre le CO<sub>2</sub>, il est probable que la baisse de la biomasse soit principalement le résultat d'une augmentation de la température largement supérieure à celle prescrite dans le modèle. Par ailleurs, Il existe peu de preuves empiriques disponibles pour appuyer pour la spécification des optima de température dans les forêts tropicales, il se peut donc que la baisse soit irréaliste. Ces résultats, ainsi ceux relatifs à la dépendance au CO<sub>2</sub>, sont très semblables à ceux de l'analyse de Jupp et al. (2010) pour le bassin de l'Amazonie.

En résumé, en se basant sur ces résultats, on pourrait prévoir que la conséquence du changement climatique pour le bassin du Congo serait une probable baisse, similaire à celle prévue pour le bassin de l'Amazonie cependant, on observera une hausse modérée du carbone des écosystèmes, une expansion des forêts sempervirentes au nord et au sud, associée à des progressions similaires en ce qui concerne les savanes et les prairies (herbages). Il reste malgré tout beaucoup à faire pour valider les hypothèses qui sous-tendent le modèle et réduire les incertitudes de ces simulations.

Ces conclusions permettent d'affirmer le potentiel de mise en œuvre de projets CCNUCC-REDD+ dans la région est incertain, il demeure viable et réalisable. Les résultats du modèle ne prévoient pas une dégradation à grande échelle de la forêt et de la biomasse attribuable aux changements climatiques par conséquent, les risques de pertes de carbone attribuable aux changements climatiques dans un projet REDD+ sont faibles. Au même moment, les simulations suggèrent que les forêts saisonnières (savanes) sont à risque à proximité de leurs frontières climatiques. Combinés aux risques généralement associés à une déforestation incontrôlée, facteur qui n'était pas prise en compte dans nos simulations, cela exige un investissement bien planifié et solide dans la conservation et la gestion durable. Cette région a véritablement l'énorme potentiel de servir comme un puits de carbone et en même temps, il présente également des opportunités d'investissement pour la production de biocarburant forestier.

## 7.0 IMPACT DE LA VARIABILITÉ ET DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUE

Les pays en développement semblent être ceux qui souffrent le plus du changement climatique. Les pays africains subissent déjà les pires conséquences du changement climatique, ainsi qu'en témoignent l'imprévisibilité des précipitations et les changements climatiques futurs augmenteront les stress hydrique et rendra la disponibilité de l'eau et la production agricole moins viables. Pour évaluer l'impact des futurs changements climatiques sur le développement économique des pays africains, il est important de connaître dans quelle mesure la croissance économique est affectée par la variabilité du climat. Certains rapports récents ont indiqué que la variabilité du climat pourrait avoir une grave conséquence sur la croissance économique. Par exemple, les crues de 2000 au Mozambique ont réduit la croissance économique, qui est passée de 8,2% en 1999 à 2% seulement en 2000. (Banque mondiale, 2001) Un autre rapport de la Banque mondiale indique que la série de crues et de sécheresses qui a eu lieu au Kenya pendant le cycle El-Nino/La Nina de 1997 à 2000 a causé des dégâts d'une valeur de 22% du PIB annuel (Banque mondiale, 2004). Ces exemples, ainsi que d'autres analyses nationales (Grey and Sadoff 2006), indiquent que le développement économique et agricole des pays en développement dépendent de la variabilité du climat. Les études précédentes ne s'étaient pas intéressées à la région de l'Afrique centrale où la variabilité du climat est différente et pourrait avoir un impact différent sur le développement économique.

Pour étudier la relation entre la variabilité du climat et le développement, nous avons utilisé les données annuelles de la pluviométrie et les taux de croissance du PIB annuel total et la PIB agricole annuel total de 1979-2001 pour la majorité des pays sub-sahariens. Nous avons utilisé la base de données de pluviométrie décrite par Miguel et al. 2004. La base du groupe de données est la base de données de pluviométrie du Projet mondial de climatologie des précipitations (GPCP) relatif aux estimations mensuelles de pluviométrie. Cette base de données contient des estimations mensuelles de la pluviométrie à 2,5 degrés de longitude et de latitude. Les estimations sont basées sur les données réelles de chaque station et sur la densité de la couverture de nuage froid. Les estimations de la pluviométrie annuelle sont la somme des données de pluviométrie mensuelle. La pluviométrie annuelle de chaque pays est calculée comme la moyenne des toutes les estimations de pluviométrie à 2,5 degrés de longitude et de latitude dans chaque pays. Les données sur le PIB agricole et total, la croissance du PIB et le PIB par habitant ont été extraites des bases de données de la Banque mondiale.

Dans la plupart des pays de la COMIFAC, il existe une corrélation entre pluviométrie annuelle et croissance du PIB. Cette corrélation est plus forte dans les pays avec une pluviométrie plus faible et plus variable. Pour le Tchad par exemple, les années sèches coïncident le plus souvent avec les années de faible croissance du PIB (Figure 25). Pour analyser si les années avec des apports d'eau inférieurs à la moyenne (sécheresse) et les années avec des apports d'eau supérieurs à la moyenne (éventuelles crues) ont un effet sur la croissance du PIB, nous avons divisé les années en trois groupes. 33% des années les plus humides, 33% des années les plus sèches et un groupe médian. Pour chacun de ces trois groupes, nous avons calculé les totaux moyens du taux de croissance du PIB et du PIB agricole. Dans la plupart des pays, les taux de croissance du PIB agricole et total étaient plus faibles pendant les saisons sèches en comparaison aux années de pluviométrie moyenne ou élevée. (Figure 26). Par exemple, dans la République démocratique du Congo.

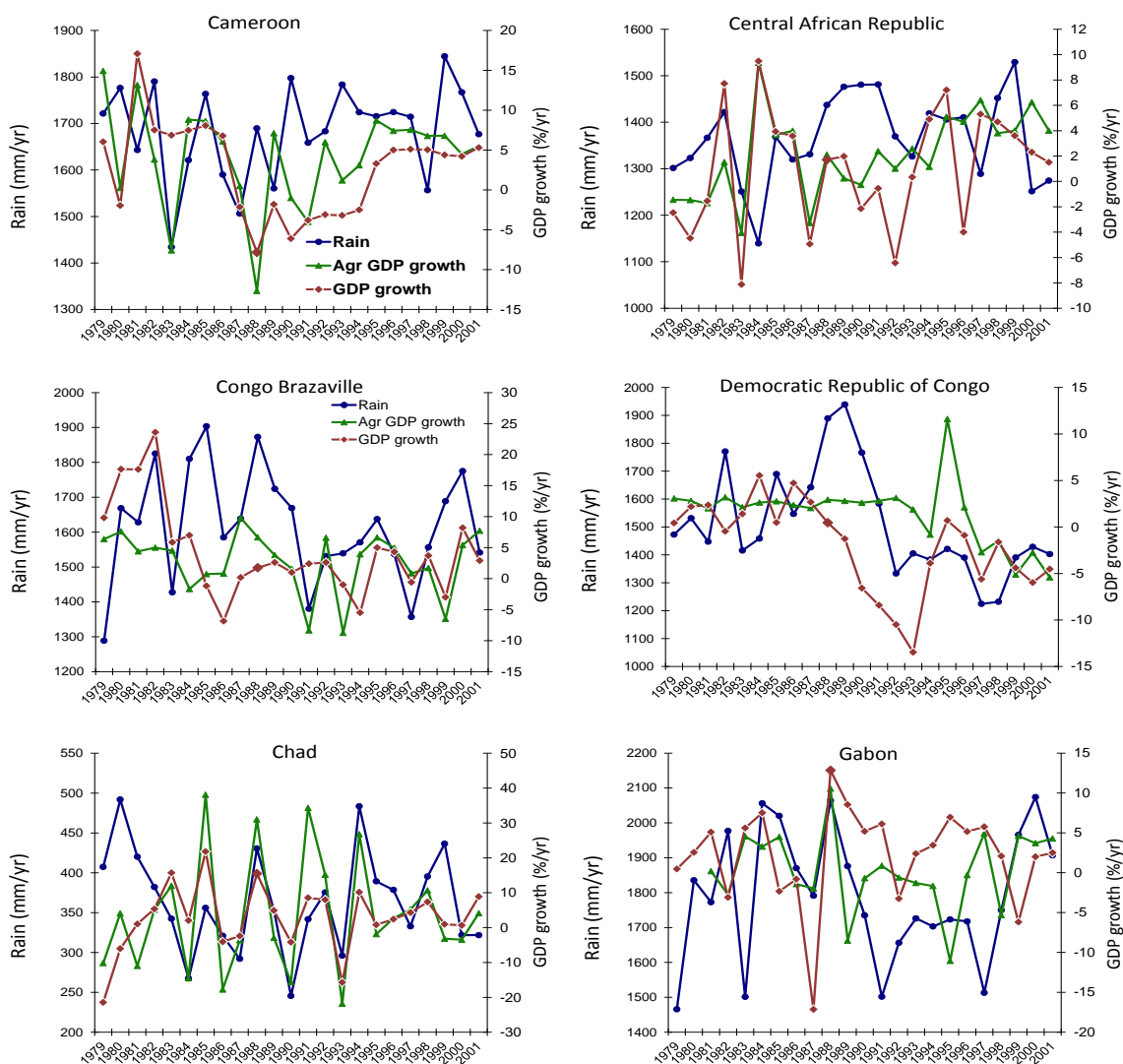


Figure 25. Relation entre la pluviométrie (ligne bleue), la croissance économique totale (ligne rouge) et la croissance agricole (ligne verte) pour les six pays la COMIFAC.

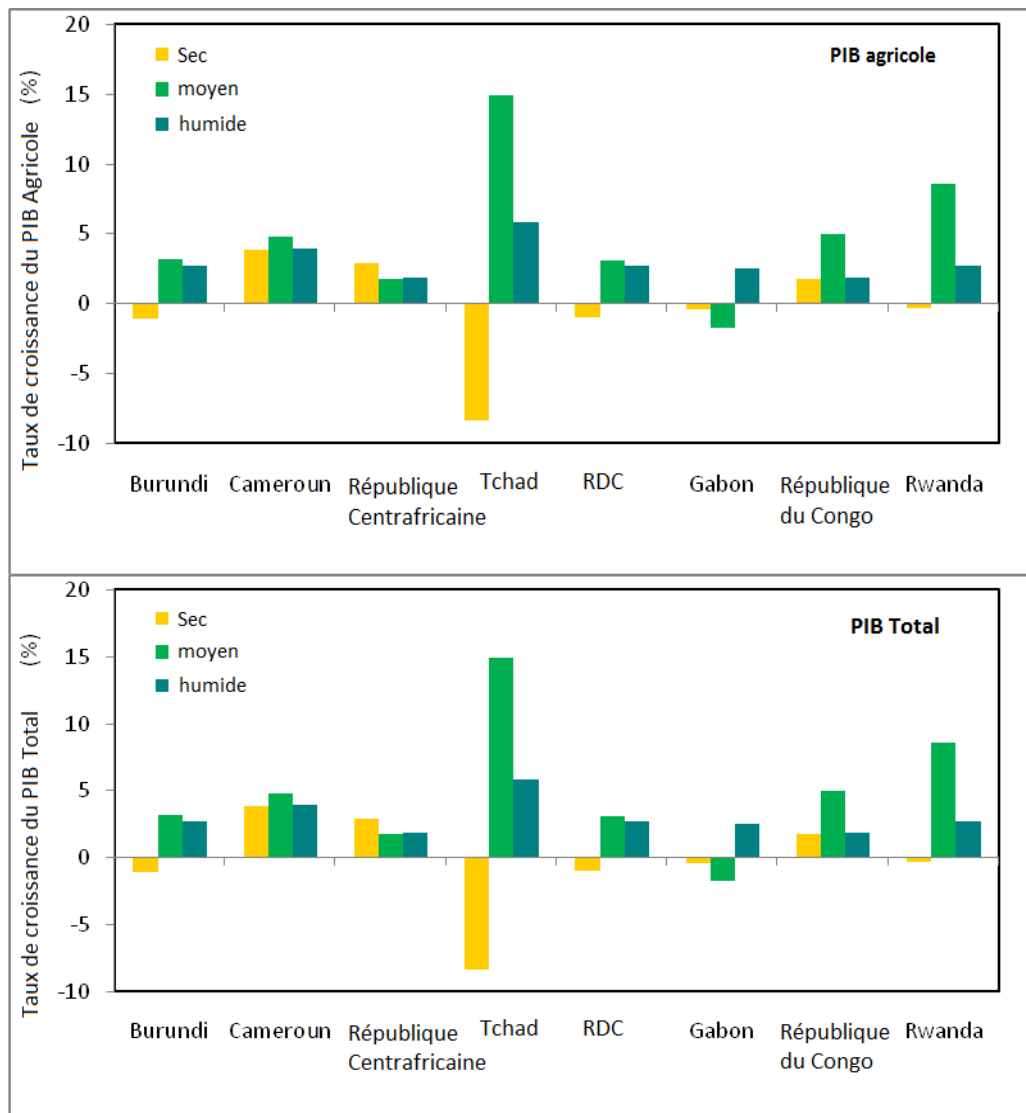


Figure 26. Croissance moyenne de l'économie totale et agricole pour la période 1979-2001 pour les années sèches, médianes et humides. Les années humides, médianes et sèches sont déterminées sur la base de la pluviométrie moyenne annuelle totale. Par exemple, pour la croissance du PIB pendant les années sèches, les chiffres du PIB sont la moyenne des 33% des années les plus sèches.

En résumé, les analyses des données historiques ont montré que la variabilité du climat a un impact évident sur les taux de croissance du PIB dans certains pays. Les taux de croissance du PIB et du PIB agricole ont tendance à être plus élevés les années où les précipitations sont supérieures à la moyenne plutôt que les années de sécheresse. L'impact de la variabilité du climat sur la croissance du PIB est plus perceptible pendant les années de sécheresse. Pendant les années avec des précipitations inférieures à la moyenne, la croissance est souvent gravement réduite et généralement plus l'année est sèche, plus petit est le taux de croissance du PIB. Toutes les années avec des précipitations supérieures à la moyenne ont tendance à avoir des taux de croissance relativement similaires.

Pour la majorité des pays de l'Afrique centrale, l'agriculture pluviale demeure un moteur important de l'économie. Dans les pays à forte variabilité interannuelle de la pluviométrie, les années sèches entraînent un déficit des récoltes et conduisent à la baisse d'autres activités économiques à travers, par exemple, la baisse de l'énergie hydroélectrique disponible et de l'eau nécessaire aux activités industrielles. Les précipitations supérieures à la moyenne ont un impact positif sur le développement grâce à une amélioration de la production agricole. Toutefois, au cours des années très humides, la pluviométrie réduit

la croissance Cette réduction est particulièrement évidente pour la croissance du PIB total et non pour la production agricole. L'impact négatif de la forte pluviométrie se fait généralement pas les crues qui endommagent les infrastructures (Banque mondiale, 2001) et font probablement plus de mal aux secteurs industriel et des services de l'économie qu'à l'agriculture. Il ne fait aucun doute que les crues ont également un impact sur la production agricole mais, probablement parce qu'elles ont tendances à être locales, leurs impacts négatifs sur la production agricole sont compensés par la production élevée dans les zones non inondées.

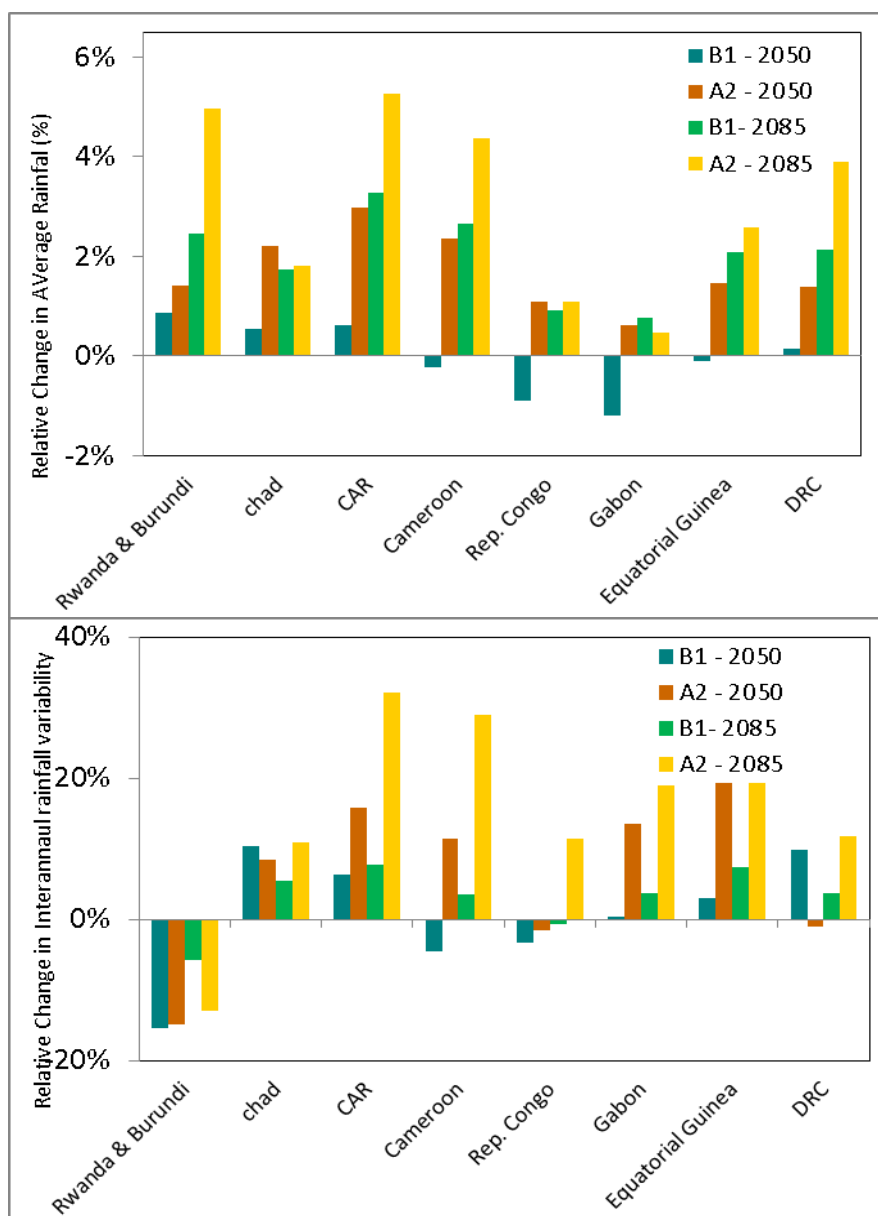
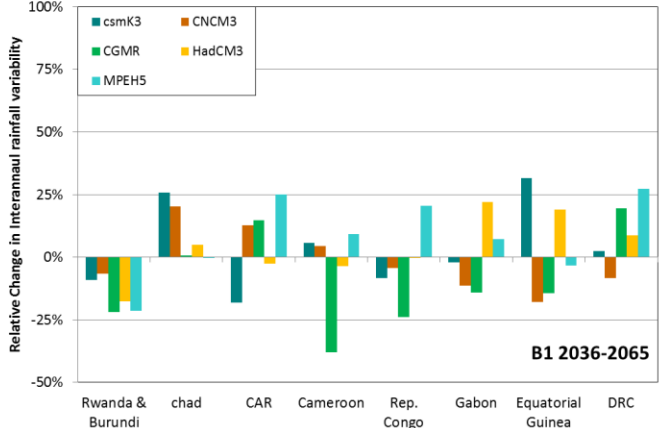
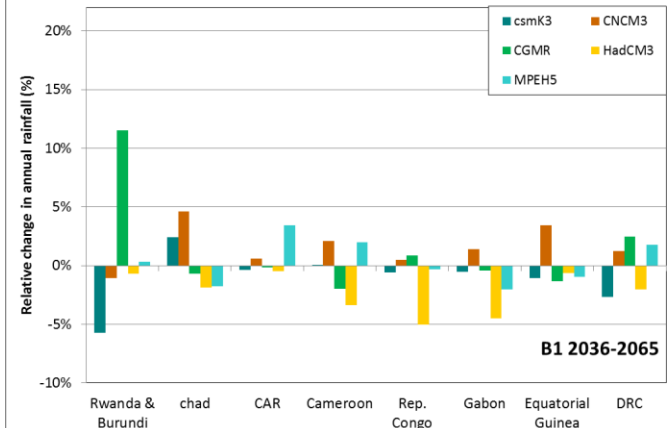
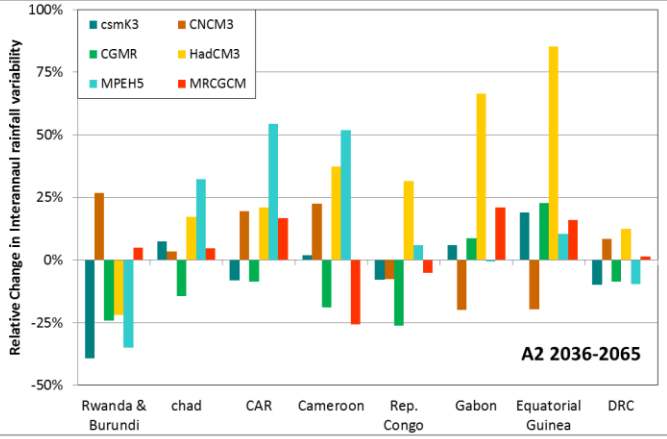
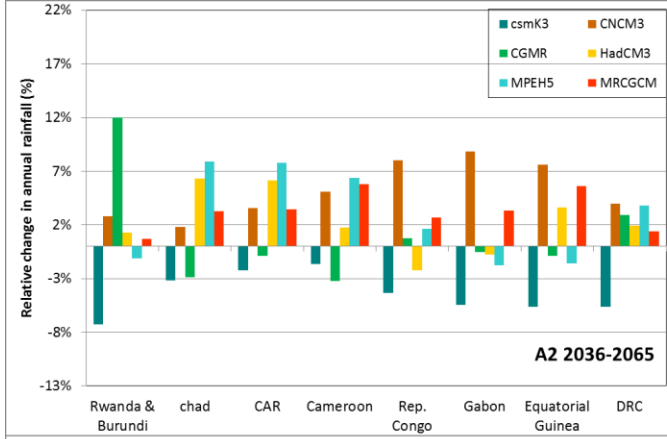
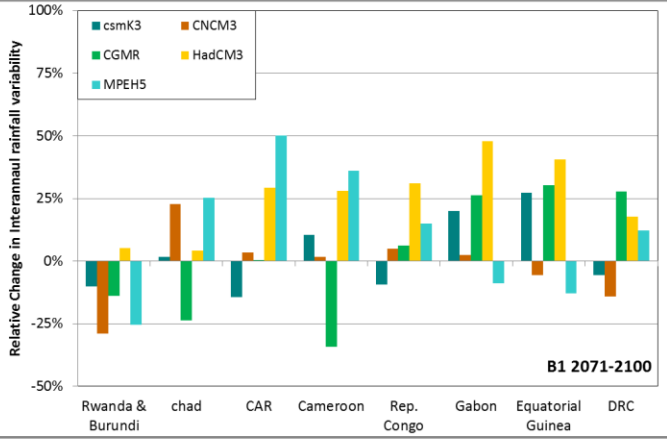
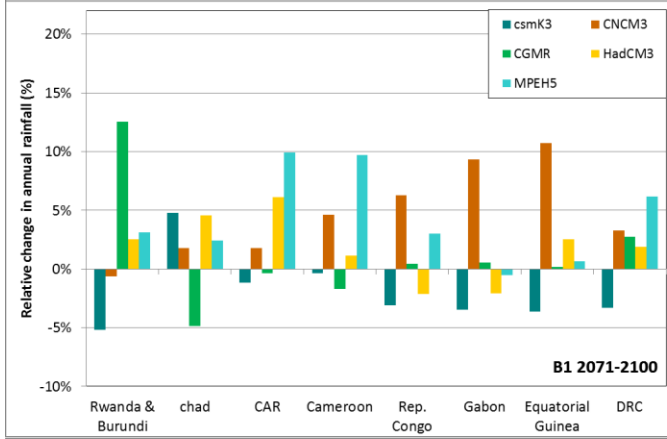
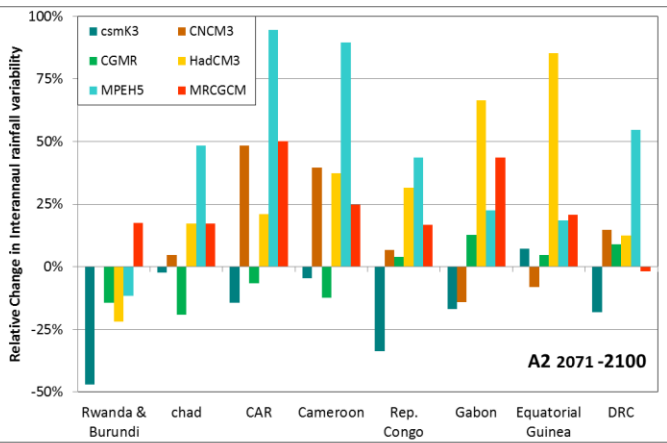
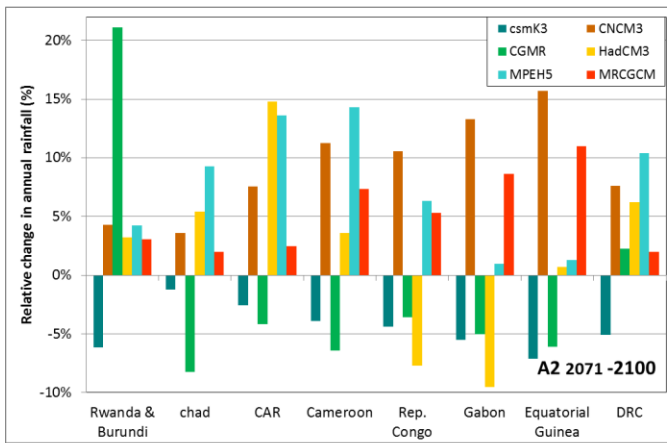


Figure 24. Changements futurs relatifs de la pluviométrie moyenne totale et de la variabilité interannuelle de la pluviométrie pour les différents pays de la COMIFAC. Les changements affichés concernent deux périodes différentes : 2036-2065 (2050) et





2071-2100 (2085) et deux scénarios d'émissions différents. Les changements affichés sont la moyenne de 5 ou 6 modèles climatiques différents.

Figure 25. Changements futurs relatifs de la pluviométrie moyenne totale et de la variabilité interannuelle de la pluviométrie pour les différents pays de la COMIFAC. Les changements affichés concernent deux périodes différentes : 2036 - 2065 (2050) et 2071 - 2100 (2085) et deux scénarios d'émissions différents. Les changements affichés sont la moyenne de 5 ou 6 modèles climatiques différents.

Afin de déterminer si les changements climatiques futurs auront un impact sur le développement économique, nous avons analysé les futures modifications de la pluviométrie totale et de la variabilité de la pluviométrie interannuelle des différents pays. Pour le faire, nous avons utilisées 6 modèles climatiques différents et deux scénarios d'émissions. Un scénario d'émission élevée (A2) et un scénario d'émission faible (B1).

La pluviométrie moyenne augmente dans tous les pays pour presque tous les scénarios (Figure 24). Seuls les scénarios B1 montrent une faible baisse dans certains pays au milieu du 21<sup>e</sup>. La moyenne des augmentations dans les 5 ou 6 modèles climatiques n'est pas très élevée dans la plupart des cas. La hausse de la pluviométrie atteint les 5% pour le scénario A2 à la fin du siècle. Bien que selon les modèles la pluviométrie augmente dans la région, il existe des différences considérables entre les différents modèles climatiques (Figure 25). Par exemple, pour le Tchad, le changement de la pluviométrie annuelle se situe entre -8% et +9%. Pour le Gabon, il se situe entre -10% et 13%. Les signes du changement par pays ne sont pas identiques dans tous les scénarios. Il y a toujours un ou plusieurs modèles qui prévoient une baisse ou une hausse. Cela indique qu'il existe une grande incertitude relative aux changements futurs de la pluviométrie dans la région (voir aussi Haensler et al. 2013).

Le changement climatique n'affecte pas seulement la pluviométrie moyenne mais, elle modifie également la variabilité. Vers la fin du siècle, on observe une hausse de la variabilité interannuelle dans l'ensemble de la région de l'Afrique centrale (Figure 25). De tous pays analysés, la variabilité interannuelle n'est en baisse qu'au Burundi et au Rwanda. L'impact du changement climatique sur la variabilité interannuelle de la pluviométrie est plus grave que l'impact sur la pluviométrie totale. Selon la moyenne des différents modèles climatiques, la variabilité de la pluviométrie augmente de 30% au Tchad et dans la République Centrafricaine pour les scénarios d'émissions A2. Certains modèles climatiques spécifiques prévoient même une augmentation de la variabilité de la pluviométrie allant jusqu'à 100% dans certains pays. De même qu'avec les changements observés dans la pluviométrie totale, il existe une grande différence entre les différents modèles climatiques. Certains modèles prévoient de faibles baisses de la variabilité de la pluviométrie interannuelle tandis que d'autres montrent un doublement de la variabilité (Figure 25)

La question majeure est de savoir comment les changements de la pluviométrie annuelle totale et de la variabilité interannuelle de la pluviométrie affecteront le développement économique. Pour y répondre, nous avons élargi notre groupe de données pour y inclure presque tous les pays de l'Afrique subsaharienne. Cela nous a permis d'avoir un groupe de données plus large pour évaluer les paramètres nécessaires à notre modèle.

Les analyses de régression des données de l'historique du climat ont montré que la variabilité du climat a un impact évident sur la production agricole et les taux de croissance du PIB sur l'ensemble du continent africain. Les résultats des analyses de vulnérabilité ont montré que dans l'ensemble de l'Afrique, un climat avec une variabilité élevée de la pluviométrie réduirait la croissance du PIB. La région du Sahel est la région la plus vulnérable au changement de la variabilité de la pluviométrie, une hausse de 50% de l'écart-type de la pluviométrie annuelle réduirait la croissance du PIB de 35%. À l'Est et dans la région côtière de l'Afrique de l'Ouest, une hausse de 50% de l'écart-type de la pluviométrie annuelle entraînerait une baisse de la croissance d'environ 35%. Dans le Sud de l'Afrique, l'impact de la variabilité de la pluviométrie est relativement faible, une hausse de 50% de l'écart-type réduirait la croissance de 35%. En général, les économies africaines seront plus vulnérables à un climat plus sec plutôt qu'à une hausse de la pluviométrie. Une baisse de 10% de la pluviométrie entraînerait une réduction de 12% du taux de PIB dans le Sud de l'Afrique et de 43% dans la région du Sahel. De manière spécifique, une combinaison d'un climat plus sec et plus variable et aura un large impact sur la croissance du PIB. Une baisse de 10% de la pluviométrie annuelle combinée à une hausse de 25% de l'écart-type ne réduira le taux de croissance que de 1% dans la

région du Sahel. À l'Est et dans la zone côtière de l'Afrique de l'Ouest, ce scénario plus sec et plus variable entrainera une baisse de 30% à 40% des taux de croissance du PIB.

Une faible augmentation de la pluviométrie a généralement un impact positif sur la croissance économique. Une hausse moyenne de la pluviométrie de 10% conduirait à une hausse des taux de PIB dans l'ensemble de l'Afrique. Toutefois, les impacts ne sont pas linéaires et une hausse de 20% de la pluviométrie annuelle aurait pour conséquence des taux de croissance du PIB plus bas que les taux de croissance historiques en Afrique de l'Ouest. Au Sahel et en Afrique de l'Est, les prévisions des taux de croissance pour une hausse de 20% de la pluviométrie sont similaires comparées au scénario avec 10% de pluviométrie en plus (Figure 25).

En se servant des changements prévus dans la variabilité moyenne et interannuelle de la pluviométrie et du modèle de circulation générale couplé atmosphère-océan ECHAM5/MPIOM pour la simulation, on observe une baisse du taux de croissance au Sud et à l'Est de l'Afrique et dans les régions du Sahel et presque aucun changement pour l'Afrique de l'Est (Tableau 1). Au Sud de l'Afrique, la baisse de la croissance du PIB est causée par la baisse prévue de la pluviométrie. En Afrique de l'Ouest, une pluviométrie plus variable entrainera la baisse de la croissance du PIB. Il est prévu une baisse de la croissance du PIB pour tous les pays se trouvant au Sud de l'Afrique. Pour les autres régions, il existe des différences claires entre les pays. Par exemple, au sud de l'Afrique de l'Ouest (Malawi et Mozambique), il est prévu une baisse de la pluviométrie qui entrainera une baisse de la croissance du PIB. Par contre, au Nord de l'Afrique de l'Ouest, il est prévu une faible hausse de la pluviométrie combinée à une variabilité plus faible de la pluviométrie. Cette combinaison entrainera une hausse du taux de croissance du PIB pour les pays comme l'Éthiopie et le Kenya. Dans la région côtière de l'Afrique de l'Ouest, en particulier les pays sur la limite occidentale du continent, il est prévu une baisse de la pluviométrie moyenne et une hausse de la variabilité. Cela entrainera une baisse de la croissance du PIB. Pour les pays situés à l'est de l'Afrique de l'Ouest, il est prévu une hausse de la pluviométrie qui aurait un impact positif sur la croissance du PIB.

Les analyses des données historiques montrent que la variabilité du climat aura un impact évident sur les taux de croissance historiques du PIB. Dans la majorité des pays hors de la zone tropicale d'Afrique centrale, les taux de croissance du PIB et du PIB agricole sont plus élevés les années où la pluviométrie est supérieure à la moyenne par rapport aux années sèches. Pendant les années avec des précipitations inférieures à la moyenne, la croissance est gravement réduite et généralement plus l'année est sèche, plus le taux de croissance du PIB est faible. Toutes les années avec des précipitations supérieures à la moyenne ont tendance à avoir des taux de croissance relativement similaires. Pour la majorité des pays de l'Afrique, l'agriculture pluviale demeure un des principaux moteurs de l'économie. Dans les pays à forte variabilité interannuelle des précipitations, les années sèches entraînent un déficit des récoltes et conduisent à la baisse d'autres activités économiques à travers la baisse de l'énergie hydroélectrique disponible et de l'eau nécessaire aux activités industrielles. Par exemple, la sécheresse au Kenya pendant La Nina de 1998 à 2000 a entraîné une réduction de l'hydroélectricité d'une valeur de 640 millions de dollars US (Banque mondiale, 2004) Les précipitations supérieures à la moyenne ont un impact positif sur le développement grâce à une amélioration de la production agricole. Toutefois, au cours des années très humides, la pluviométrie réduit la croissance. Cette réduction est particulièrement évidente pour la croissance du PIB total et non pour le PIB agricole. L'impact négatif de la forte pluviométrie se fait généralement pas les crues qui endommagent les infrastructures (Banque mondiale, 2001) et font probablement plus de mal aux secteurs industriel et des services de l'économie qu'à l'agriculture. Il ne fait aucun doute que les crues ont également un impact sur la production agricole mais, probablement parce qu'elles ont tendances à être locales, leurs impacts négatifs sur la production agricole sont compensés par la production élevée dans les zones non inondées.

En termes d'impacts des futurs changements climatiques, nos analyses ont montré que la croissance du PIB est particulièrement vulnérable aux baisses relativement faibles de la pluviométrie. Une baisse de 10% de la pluviométrie pourrait considérablement réduire la croissance sans aucune adaptation. De même, un climat plus variable pourrait réduire les taux de croissance moyens du PIB. Une pluviométrie plus variable aura pour conséquence des années sèches et humides plus extrêmes où la croissance économique aura

tendance à être plus faible et très peu d'années avec une pluviométrie moyenne qui sera optimale pour le développement économique.

Les résultats du modèle MCG ECHAM ont montré que les futurs changements climatiques pourraient réduire la croissance du PIB en Afrique due aux changements des paramètres de pluviométrie. À l'Ouest et au Sud de l'Afrique, le modèle de projection montre une réduction de la croissance du PIB. Dans les régions côtières de l'Afrique de l'Ouest et le Sahel, cette réduction est due à une pluviométrie plus variable alors que dans le Sud de l'Afrique, elle est due à une baisse de la pluviométrie annuelle. Nous n'avons utilisé que les résultats des modèles MCG car, différents modèles ont tendance à donner des résultats différents pour le continent africain. Toutefois, le résultat du modèle ECHAM5 est représentatif de la moyenne des résultats par modèle. Plusieurs modèles MCG prévoient un climat futur plus sec pour le Sud de l'Afrique (Christensen et al. 2007). Pour l'Afrique de l'Est, les résultats du modèle ECHAM5 sont constitués des moyennes de l'ensemble du modèle notamment, la hausse de la pluviométrie dans la corne de l'Afrique et au Kenya et la baisse de pluviométrie dans les pays du Sud-est comme le Mozambique et le Malawi. Pour l'Afrique de l'Ouest et le Sahel, les résultats ont été associés à d'autres modèles qui prévoient des hausses de la pluviométrie et à d'autres qui prévoient une tendance à l'assèchement. Par ailleurs, les résultats du modèle ECHAM5 n'ont pas permis d'avoir une idée claire en ce qui concerne l'Afrique de l'Ouest. Pour certains pays, on assiste à une faible hausse de la pluviométrie alors que pour certains pays limitrophes, il est prévu une baisse de la pluviométrie.

Un postulat important de nos analyses est que les impacts de la variabilité historique du climat sont semblables aux impacts d'une variabilité future. Si tel est le cas ou pas, cela dépendra de chaque pays et des mesures d'adaptation prises. Du fait de la croissance continue de la population, il est probable que les demandes en eau augmentent dans le futur. De même, les hausses de températures pourront éventuellement augmenter les demandes en eau pour l'irrigation et le refroidissement industriel. Cependant, au cours des dernières décennies, certains pays ont amélioré leur rendement économique dans les secteurs industriel et des services, ce qui les rend potentiellement moins vulnérables à la variabilité du climat que l'agriculture (Vincent 2007). Par contre, certains composants de ces secteurs tels que l'hydroélectricité, le tourisme et le transport, pourraient être vulnérables à la variabilité du climat.

Nos résultats ne montrent que l'impact de la hausse de la variabilité interannuelle de la pluviométrie. La variabilité de la pluviométrie peut provoquer une hausse des concentrations de gaz à effet de serre, c'est à dire que les périodes de pluies deviennent plus concentrées et la fréquence et la durée des périodes sèches augmentent (GIEC 2012). Cela ajoute une contrainte supplémentaire à la production agricole car, les cultures en terres arides dépendent d'une pluviométrie régulière pour une production optimale.

Pour la région de l'Afrique centrale, le modèle a montré que la croissance économique est particulièrement vulnérable à une baisse de la pluviométrie et une hausse considérable de la variabilité interannuelle de la pluviométrie. Lorsqu'on l'associe aux scénarios de changements climatiques dans le futur, les résultats montrent que l'impact du changement climatique est relativement faible en Afrique centrale en comparaison aux autres régions de l'Afrique. La raison en est que plusieurs scénarios montrent une faible hausse de la pluviométrie annuelle dans la région. Au même moment, la variabilité temporelle augmente également. Au Cameroun et au Tchad, cela a un impact négatif sur le développement économique. Toutefois, ces impacts négatifs du changement climatique ne se révèlent très évidentes que lorsqu'on utilise les scénarios climatiques de la fin du siècle. À ce moment, les économies auraient certainement changé et leur sensibilité au changement climatique serait différente. Au Rwanda et au Burundi, du fait de la baisse prévue de la variabilité du climat et d'une faible hausse de la pluviométrie annuelle, le changement climatique a un impact positif sur le développement économique.



Tableau 2. Impact du changement climatique sur les changements relatifs futurs des taux de croissance du PIB. Les changements des taux de croissance du PIB sont basés sur les changements de la moyenne et de la variabilité de la pluviométrie annuelle à l'aide de paramètres basés sur les analyses statistiques des données historiques.

Période de temps Scénario d'émission	2036-2064		2071-2100	
	B1	A2	B1	A2
Burundi	2,1%	5,1%	6,1%	19,9%
Cameroun	-1,3%	2,4%	2,6%	-18,2%
Tchad	-1,0%	2,3%	0,3%	-8,2%
Rwanda	3,8%	9,4%	3,1%	15,9%
République centrafricaine RDC Gabon République du Congo	Aucun signal détectable de changement climatique			

Nos résultats montrent qu'à l'échelle continentale, le changement climatique pourrait avoir un impact négatif sur le développement de l'Afrique. Toutefois, les économies des pays de l'Afrique centrale sont moins touchées par le changement climatique en comparaison aux pays de l'Ouest, de l'Est et du Sud de l'Afrique. De même, à l'échelle macro, les scénarios de changement climatique semblent donner la part belle à l'Afrique centrale. Toutefois, certains scénarios de changement climatique montrent des fortes hausses de la variabilité du climat. Dans cette région de l'Afrique centrale, c'est précisément la hausse de la variabilité suite au changement climatique qui aura les conséquences les plus graves sur le développement économique.

## 8.0 DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Pour effectuer l'analyse des impacts des changements climatiques ci-dessus, nous avons utilisé un sous-ensemble de tous les scénarios climatiques analysés par Haensler et al. (2013). Il n'était pas possible d'utiliser tous les scénarios disponibles pour l'analyse des impacts. Le sous-ensemble des scénarios de changement climatique utilisé est le plus représentatif de tous les scénarios disponibles. L'utilisation d'un ensemble plus large de scénarios de changement climatique aurait pu améliorer les résultats. Toutefois, un nombre de scénarios plus grand ne changerait pas de manière considérable les conclusions des analyses d'impact.

Les résultats ont montré que suite au changement climatique, la disponibilité en eau de la région diminuera. Dans plusieurs parties de la région, le ruissellement et les débits des rivières seront élevés dans le futur. Par contre, dans des endroits plus secs, notamment le Tchad, le rejet des rivières baisseront. Non seulement les débits moyens augmenteront mais, les débits de pointe seront plus élevés. C'est le résultat d'une combinaison de la hausse de la pluviométrie moyenne et l'augmentation de l'intensité de la pluviométrie. Les principaux impacts de la hausse des débits de pointe est l'augmentation des risques de crues, qui aura un effet sur la gestion des barrages hydroélectriques.

En général, les conditions climatiques ne limitent pas la production agricole dans la région du bassin du Congo à l'heure actuelle. Les analyses de l'eau agricole ont montré qu'il est peu probable que la production agricole soit limitée par l'eau en Afrique centrale avec le changement climatique à venir. Ce n'est qu'aux confins (plus secs) de la région que la limitation d'eau réduit parfois la capacité de production agricole. L'agriculture dans les savanes environnant le bassin du Congo pourrait éventuellement faire face à de fortes pénuries d'eau dans le futur. Dans les savanes situées au sud, les analyses indiquent que des sécheresses de plus en plus fréquentes auront un impact sur la production agricole et le stress hydrique.

Les principaux impacts des changements climatiques sur le secteur agricole viendront d'une pluviométrie plus variable et de la hausse de la température. Les températures de la région sont déjà élevées et une hausse des températures pourrait avoir un impact négatif sur la production des cultures. Dans la zone tropicale de l'Afrique centrale, une très forte pluviométrie et une humidité élevée réduisent actuellement la production agricole à cause du lessivage des nutriments et de la croissance fongique. La hausse de températures pourrait augmenter les risques de maladie et d'infections fongiques en particulier si l'humidité reste élevée ou augmente. Une hausse des précipitations pourrait éventuellement augmenter le lessivage des nutriments et l'érosion.

Nos analyses montrent que l'eau disponible pour l'hydroélectricité pourrait augmenter dans le futur. Pour tous les barrages analysés, la disponibilité moyenne en l'eau augmentera. En moyenne, le changement climatique aura un impact positif sur la capacité de production électrique. En particulier, pendant la saison des pluies ou les apports d'eau dans les réservoirs augmenteront. L'impact du changement climatique sur les débits de saison sèche demeure inconnu. Cependant, avec le changement climatique, le débit des rivières deviendra plus variable avec des périodes plus fréquentes de débit élevé et de faible débit. Cela augmentera les risques de crues et pourrait rendre la production d'énergie moins fiable. L'accroissement de la variabilité du débit rendra la gestion des barrages plus compliquée car, l'équilibre entre la prévention des crues et la production optimale d'énergie sera plus difficile à gérer.

Le changement climatique aura des impacts différents sur les écosystèmes forestiers. Les fortes concentrations atmosphériques en CO<sub>2</sub> vont éventuellement accroître la croissance des forêts et le captage du carbone. Cependant, les fortes températures auront des impacts négatifs sur la croissance des forêts et réduiront la quantité de carbone dans les forêts. Les analyses d'impacts démontrent que, suite aux changements climatiques, le bassin du Congo pourrait subir une baisse de la croissance des forêts provoquée par le climat, comme c'est parfois le cas prévu pour le bassin de l'Amazonie. Par contre, le carbone des écosystèmes pourrait légèrement augmenter. En fonction de la manière dont le climat changera, la couverture du sol pourra être modifiée dans les différents écosystèmes. Selon les analyses, le scénario futur le plus probable est une expansion modérée, vers le nord et le sud des forêts sempervirentes

en savanes et prairies. Les évaluations du modèle montrent une grande marge d'incertitude, qui met en évidence le fait que la collecte de nouvelles données *par exemple*, la biomasse dans le bassin central du Congo et les réponses des forêts aux changements climatiques et aux concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub>, pourrait améliorer notre compréhension des impacts des changements climatiques dans le bassin du Congo.

Nos résultats indiquent que le potentiel de mise en œuvre de projets CCNUCC-REDD+ dans la région est incertain mais, il demeure viable et réalisable. Les résultats du modèle ne prévoient pas une dégradation à grande échelle de la forêt et de la biomasse attribuable aux changements climatiques par conséquent, les risques de pertes de carbone attribuables aux changements climatiques dans un projet REDD+ sont faibles. Au même moment, les simulations prévoient que les forêts saisonnières (savanes) sont à risque à proximité de leurs frontières climatiques. Combinés aux risques généralement associés à une déforestation incontrôlée, facteur qui n'était pas prise en compte dans nos simulations, cela exige un investissement bien planifié et solide dans la conservation et la gestion durable. Cette région a véritablement l'énorme potentiel de servir comme un puits de carbone et en même temps, il présente également des opportunités d'investissement pour la production de biocarburant forestier (du feu de bois à l'énergie provenant des déchets forestiers).

Dans la plupart des pays de la COMIFAC, on observe une corrélation claire entre pluviométrie annuelle et croissance du PIB. Les taux de croissance du PIB et du PIB agricole sont plus élevés les années où les précipitations sont supérieures à la moyenne plutôt que les années de sécheresse. Les années de sécheresse ont plus d'impact sur les taux de croissance du PIB que les années de pluies. Les sécheresses ont tendance à avoir un impact plus grand sur l'agriculture alors que les crues ont plutôt tendance à détruire les infrastructures. Ainsi, avec le développement des infrastructures, la vulnérabilité de l'économie aux crues pourrait éventuellement augmenter. Rendre les infrastructures à l'épreuve du climat en garantissant leur résistance aux futures crues pourrait réduire les impacts des crues sur le développement économique.

Nos analyses des impacts des futurs changements climatiques sur le développement économique ont montré que les pays de la COMIFAC sont particulièrement vulnérables à une baisse future des précipitations et une hausse considérable de la variabilité interannuelle de la pluviométrie. Nos résultats montrent qu'à l'échelle continentale, le changement climatique pourrait un impact négatif sur le développement de l'Afrique. Toutefois, les économies des pays de l'Afrique centrale sont susceptibles d'être moins touchées par le changement climatique en comparaison aux pays de l'Ouest, de l'Est et du Sud de l'Afrique. Les pays de la COMIFAC sont moins vulnérables dû à la relative hausse de la pluviométrie dans la région, ce qui rend leurs économies moins sensibles aux futures changements climatiques. De même, au niveau macro, les scénarios de changement climatique semblent donner la part belle à l'Afrique centrale en comparaison au reste de l'Afrique. Dans certaines régions de l'Afrique, en particulier au Sud, la pluviométrie et la disponibilité de l'eau pourrait baisser et devenir plus variable (Christensen et al. 2007).

En conclusion, les impacts du changement climatique sur les différents secteurs montrent que les principaux impacts seront causés par une condition climatique plus variable. Il n'existe pas d'impact majeur en termes de disponibilité totale de l'eau pour l'agriculture et de stockage total du carbone dans les forêts tropicales. De même, la capacité moyenne de production d'énergie à base de l'énergie hydraulique ne baissera pas. Les impacts les plus graves résulteront d'un régime hydrologique plus variable. Cela entraînerait de fréquents épisodes de sécheresse et de périodes sèches pendant la saison de croissance. Le changement climatique augmentera la fréquence des futures crues et éventuellement leur sévérité. La gestion future des barrages sera plus compliquée en raison de la hausse de la variabilité du climat et la hausse de la fréquence des jours de très fortes précipitations.



## BIBLIOGRAPHIE

- Beyene, T., Ludwig, L. and Franssen, W., 2013. The potential consequences of climate change in the Congo river basin. In: *Climate Change Scenarios for the Congo Basin*. [Haensler A., Jacob D., Kabat P., Ludwig F. (eds.)]. Climate Service Centre (Centre de Service Climatologique) Rapport N°. 11, Hambourg, Allemagne, ISSN : 2192-4058.
- Bondeau, A., Smith, P., Zaehle, S., Schaphoff, S., Lucht, W., Cramer, W., Gerten, D., Lotze-Campen, H., Müller, C., Reichstein, M., Smith, B., 2007. Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. *Global Change Biology* 13, 679–706.
- Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioac, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C.G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr and P. Whetton, 2007: *Regional Climate Projections*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Cox, P.M., Betts, R.A., Jones, C.D., Spall, S.A., Totterdell, I.J., 2000. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature* 408, 184-187. Doi:10.1038/35041539.
- FAO: <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e04.htm>)
- Farquhar, G.D., von Caemmerer, S., and Berry, J.A., 1980. A Biochemical Model of Photosynthetic CO<sub>2</sub> Assimilation in Leaves of C3 Species. *Planta* 149, 78-90.
- Gerten, D., Schaphoff, S., Haberlandt, U., Lucht, W., Sitch, S., 2004. Terrestrial vegetation and water balance - hydrological evaluation of a dynamic global vegetation model. *Journal of Hydrology* 286, 249-270.
- D. Grey, C. Sadoff, "Water for Growth and Development: A theme document for the Fourth World Water Forum" (The World Bank, 2006).
- Haddeland, I., Heinke, J., Voss, F., Eisner, S., Chen, C., Hagemann, S. and Ludwig, F., 2012. Effects of climate model radiation, humidity and wind estimates on hydrological simulations. *Hydrology and earth system sciences*, 16(2), 305-318. DOI: 10.5194/hess-16-305-2012 Published: 2012.
- Hagemann, Stefan, Cui Chen, Jan O. Härter, Jens Heinke, Dieter Gerten and Claudio Piani, 2011. Impact of a statistical bias correction on the projected hydrological changes obtained from three GCMs and two hydrology models. *Journal of Hydrometeorology* (accepted).
- Haensler, A., Saeed, F. and Jacob, D., 2013. Assessment of projected climate change signals over central Africa based on a multitude of global and regional climate projections. In: *Climate Change Scenarios for the Congo Basin*. [Haensler A., Jacob D., Kabat P., Ludwig F. (eds.)]. Climate Service Centre (Centre de Service Climatologique) Rapport N°. 11, Hambourg, Allemagne, ISSN : 2192-4058.
- IPCC, 2012: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K.

- Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.
- Jupp, T.E., Cox, P.M., Rammig, A., Thonicke, K., Lucht, W. and Cramer, W., 2010. Development of probability density functions for future South American rainfall. *New Phytologist*, 187, 682–693. doi: 10.1111/j.1469-8137.2010.03368.x.
- Lewis Simon, Gabriela Lopez-Gonzalez, Bonaventure Sonke, Kofi Affum-Baffoe, Timothy R. Baker, Lucas O. Ojo, Oliver L. Phillips, Jan M. Reitsma, Lee White, James A. Comiskey, Marie-Noel, Djuikouo K., Corneille E. N., Ted R. Feldpausch, Alan C. Hamilton, Manuel Gloor, Terese Hart, Annette Hladik, Jon Lloyd, Jon C. Lovett, Jean-Remy Makana, Yadvinder Malhi, Frank M. Mbago, Henry J. Ndangalasi, Julie Peacock, Kelvin S.-H., Douglas Sheil, Terry Sunderland, Michael D. Swaine, James Taplin, David Taylor, Sean C. Thomas, Raymond Votere & Hannsjorg Woll, 2009. Increasing carbon storage in intact African tropical forests. *Nature*, 457, doi: 10.1038/nature07771.
- Liang, X., Lettenmaier, D.P., Wood, E.F., Burges, S.J., (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *J. Geophys. Res.* 1994; 99.
- F. Ludwig and M. Moench, 2009. *The Impacts of Climate Change on Water in: Climate Change Adaptation in the Water Sector* (Eds. F. Ludwig, Pavel Kabat, H. van Schaik and M. van der Valk). Earthscan, London.
- Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver and Z.-C. Zhao, 2007. *Global Climate Projections*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Miguel et al. 2004
- Nakicenovic, N., J. Alcamo, G. Davis, H.J.M. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grubler, T.Y. Jung, T. Kram, E.L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Papper, H. Pitcher, L. Price, K. Riahi, A. Roehrl, H.-H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor, Z. Dadi, 2000. *Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, p. 570.
- Nobre, C.A. and Borma, L.D., 2009. “Tipping points” for the Amazon forest. *Current opinion in environmental sustainability*, 1(1), 28-36.
- Piani, C., Haerter, J. O., Coppola, E., 2010. Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Climatic change*. DOI 10.1007/s00704-009-0134-9.
- Randall, D.A., R.A. Wood, S. Bony, R. Colman, T. Fichet, J. Fyfe, V. Kattsov, A. Pitman, J. Shukla, J. Srinivasan, R.J. Stouffer, A. Sumi and K.E. Taylor, 2007: *Climate Models and Their Evaluation*. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- Sitch, S., Smith, B., Prentice, I.C., Arneth, A., Bondeau, A., Cramer, W., Kaplan, J.O., Levis, S., Lucht, W., Sykes, M.T., Thonicke, K. Venevsky, S., 2003. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 9, 161-185.
- Weedon, G. P.; Gomes, S.; Viterbo, P., , Shuttleworth, W.J., Blyth, E., Österle, H., Adam, J.C., Bellouin, N., Boucher, O. and Best, M., 2011, Creation of the WATCH Forcing Data and Its Use to Assess Global and Regional Reference Crop Evaporation over Land during the Twentieth Century. *Journal of Hydrometeorology*: 12(5), 823-848. DOI: 10.1175/2011JHM1369.1

# Scénarios des changements climatiques dans le bassin du Congo

## Options d'adaptation aux changements climatiques dans les pays du bassin du Congo

Linda van Garderen  
Fulco Ludwig



On behalf of



Federal Ministry for the  
Environment, Nature Conservation  
and Nuclear Safety

of the Federal Republic of Germany

**giz**



WAGENINGEN UNIVERSITY  
WAGENINGENUR

**CSC**  
Climate Service Center  
Germany



Eine Einrichtung der GKSS-Forschungszentrum Geesthacht GmbH



# OPTIONS D'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES DANS LES PAYS DU BASSIN DU CONGO

Linda van Garderen  
Fulco Ludwig

**Le présent rapport doit être cité comme suit :**

Van Garderen, Ludwig F. (2013): Climate change adaptation options for the Congo Basin countries.  
In: Climate Change Scenarios for the Congo Basin. [Haensler A., Jacob D., Kabat P., Ludwig F. (eds.)].  
Climate Service Centre Report No. 11, Hamburg, Germany, ISSN: 2192-4058.

«Options d'adaptation aux changements climatiques dans les pays du bassin du Congo»

Partie de la série : *Scénarios des changements climatiques dans le bassin du Congo*

Auteurs: Garderen, Linda van, Fulco Ludwig

Mise en page et édition: Linda van Garderen

Date: Février 2013

Ministère fédéral allemand de l'Environnement, de la Protection de la nature et de la Sécurité nucléaire (BMU) /  
Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), Allemagne / Université de Wageningen, Pays-Bas /  
Climate Service Centre (CSC), Allemagne.

Photo de couverture: «Paysan arrosant son champ de canne à sucre»@ AlidaVanni/istockphoto.com

## RÉSUMÉ

Ces dernières décennies, l'ampleur et la gravité des changements climatiques, ainsi que les effets de ce phénomène, ont été de mieux en mieux compris. Le climat subit déjà des changements auxquels il faut s'adapter. Comme le reste du monde, l'Afrique centrale doit s'adapter aux changements climatiques. Le présent rapport porte sur les pays de la COMIFAC ou les pays du bassin du fleuve Congo: le Cameroun, la Guinée équatoriale, Sao Tomé-et-Principe, le Gabon, la République du Congo, la République Centrafricaine, la République démocratique du Congo, le Rwanda et le Burundi. Sur la base des études d'impact présentées dans le chapitre précédent, le présent chapitre traite des mesures d'adaptation les plus indiquées pour la région. Il explique les concepts fondamentaux relatifs à la vulnérabilité aux changements climatiques et à l'adaptation, à l'instar de la capacité d'adaptation, des formes d'adaptation, du cycle d'adaptation, de la maladaptation, du déficit d'adaptation, et des options d'adaptation sans regret, avec peu de regret ou grand regret.

La deuxième partie du rapport porte sur les différentes options d'adaptation aux changements climatiques pour l'Afrique centrale, dans quatre secteurs, à savoir l'agriculture, la foresterie, l'eau et l'énergie. Bien que chacun de ces secteurs ait été présenté individuellement, ceux-ci s'imbriquent parfaitement. Au total, une liste de 52 mesures d'adaptation aux changements climatiques est fournie en annexe et commentée dans le rapport. La plupart de ces mesures d'adaptation correspondent à un nombre limité de principes d'adaptation aux changements climatiques:

- la répartition des risques par la diversification;
- la création de zones tampon par le reboisement/l'agroforesterie;
- la préparation aux phénomènes météorologiques extrêmes, aux sécheresses et aux inondations;
- la promotion de la sécurité alimentaire et de l'eau;
- la promotion de la fourniture durable d'énergie;
- l'éducation et la sensibilisation;
- la gestion efficace.

La plupart des pays membres de la COMIFAC sont encore confrontés à d'énormes problèmes de développement. Ici, les revenus des populations sont généralement bas, et les taux de pauvreté de ces pays sont encore élevés. Ces besoins de développement urgents sont, dans l'ensemble, bien plus importants que l'adaptation aux changements climatiques. Cependant, même avec le développement futur, l'adaptation sera nécessaire. Ainsi, pour éviter de se lancer dans des investissements risqués et de réduire le coût de l'adaptation dans l'avenir, l'adaptation aux changements climatiques doit être intégrée aux plans de développement futurs.

**Mots clés:** Changements climatiques, COMIFAC, Congo, fleuve, bassin, adaptation, Afrique, agriculture, eau, énergie, foresterie



## ACRONYMES

BC	Bassin du fleuve Congo
CCNUCC	Convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
CEP	Collecte des eaux de pluie
CN	Communications nationales
COMIFAC	Commission des forêts d'Afrique centrale
CWP	Productivité de l'eau des cultures
FICR	Fédération internationale des sociétés de la Croix-Rouge et du Croissant Rouge
LBM	La Banque mondiale
MTS	Système Taungya modifié
ONG	Organisation non gouvernementale
PANA	Programme d'action national pour l'adaptation
PIB	Produit intérieur brut
RAP	Réseau d'aqueduc public
REDD	Réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts des pays en développement
UKCIP	Programme du Royaume-Uni sur l'impact du changement climatique

---

## Table des matières

RÉSUMÉ.....	
ACRONYMES.....	
<b>1.INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>2. CHANGEMENTS CLIMATIQUES FUTURS ET IMPACTS POTENTIELS .....</b>	<b>1</b>
<b>3. VULNÉRABILITÉ AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET ADAPTATION ....</b>	<b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</b>
3.1. QU'EST-CE QUE L'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES? .....	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
3.2. MESURES D'ADAPTATION .....	<b>10</b>
3.3. PRINCIPES DE L'ADAPTATION.....	<b>11</b>
<b>4. MÉTHODES.....</b>	<b>12</b>
<b>5. OPTIONS D'ADAPTATION POUR L'AFRIQUE CENTRALE .....</b>	<b>13</b>
5.1. FORESTERIE .....	<b>13</b>
5.2. AGRICULTURE .....	<b>15</b>
5.3. EAU .....	<b>16</b>
5.4. ÉNERGIE.....	<b>19</b>
5.5. AMÉLIORATION DE LA CAPACITÉ D'ADAPTATION .....	<b>20</b>
5.6. INTEGRATION ET FINANCEMENT DE L'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES .....	<b>23</b>
<b>6. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....</b>	<b>24</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>25</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>26</b>

---



## 1. INTRODUCTION

Même si des mesures d'atténuation hautement efficaces sont prises dans un proche avenir, le climat continuera à subir des changements dans le siècle prochain. L'adaptation s'impose donc pour réduire les impacts négatifs de ces changements futurs. Le GIEC (2007) définit l'adaptation comme un ensemble «d'initiatives et mesures prises pour réduire la vulnérabilité des systèmes naturels et humains aux effets des changements climatiques réels ou prévus». De nombreux rapports antérieurs soulignent la nécessité de prendre des mesures d'adaptation sur le continent africain en particulier. Cependant, la majorité des travaux menés dans le domaine de l'adaptation en Afrique concernent uniquement les zones semi-arides et la partie méditerranéenne du continent. Beaucoup plus de zones d'ombre subsistent en matière d'adaptation dans la zone tropicale de l'Afrique, notamment, en ce qui concerne la question suivante: Quelles sont les mesures d'adaptation aux changements climatiques les plus efficaces et les plus facilement applicables à la région du bassin du Congo? L'objectif du présent chapitre consiste, d'une part, à dresser un état des lieux des publications relatives à l'adaptation aux changements climatiques dans la région du bassin du Congo et, d'autre part, à faire la synthèse des connaissances pertinentes tirées des études sur l'adaptation aux changements climatiques, qui ont été menées en dehors de cette région. Le premier chapitre présente, tout d'abord, un cadre d'adaptation, puis diverses options d'adaptation. La revue de la littérature offre une synthèse des mesures d'adaptation applicables au sein et en dehors de la COMIFAC, et qui sont applicables dans la région. Par la suite, une explication de ces mesures et divers exemples pratiques sont présentés.

## 2. CHANGEMENTS CLIMATIQUES FUTURS ET IMPACTS POTENTIELS

L'adaptation doit être axée sur la réduction des effets néfastes de changements climatiques futurs. Les scénarios de changements climatiques et leurs effets potentiels sont présentés en détail dans les chapitres précédents. Ces analyses montrent que les changements climatiques se traduiront, pour l'essentiel, par une variation future des caractéristiques des précipitations, avec une augmentation de l'intensité des pluies abondantes et une recrudescence de périodes de sécheresse en saison pluvieuse. De plus, la température moyenne et les extrêmes de températures connaîtront une augmentation dans l'avenir. Ces changements thermiques et pluviométriques entraîneront une intensification du cycle hydrologique, avec, comme conséquence, davantage de phénomènes hydrologiques extrêmes (inondations et sécheresses).

Les six scénarios climatiques étudiés dans l'évaluation hydrologique ont montré que les débits des eaux de ruissellement et des fleuves augmenteront particulièrement en saison pluvieuse. Par contre, plusieurs scénarios prévoient une baisse des débits fluviaux pendant la saison sèche. Ces changements n'entraîneront pas une baisse du potentiel hydroélectrique. En revanche, la production d'énergie hydroélectrique de la région sera moins fiable. Les baisses de débit deviendront plus fréquentes, entraînant, de ce fait, des périodes de baisse du potentiel hydroélectrique. En outre, les risques de rupture de barrages et les besoins de déstockage d'urgence seront accrus, en raison de l'intensification des pluies extrêmes et des périodes de débit fluvial élevé.

Les systèmes de production agricole seront surtout affectés par la hausse des températures. Dans la partie tropicale de la région, les changements climatiques n'accentueront pas le manque d'eau de cultures. Dans les savanes des frontières nord et sud du bassin, les changements climatiques futurs pourraient entraîner une augmentation du stress hydrique, avec, comme effet, une baisse du potentiel agricole de ces zones. Les systèmes agricoles seront, par ailleurs, affectés par la grande variabilité du climat futur. En effet, l'augmentation de l'intensité des précipitations provoque des risques d'érosion et d'inondation accrus. De plus, une période de sécheresse en saison pluvieuse est susceptible d'entraîner une baisse des récoltes.

Les besoins d'adaptation les plus urgents pour les différents secteurs, mais également pour l'économie toute entière, concerneront la gestion de la grande variabilité du climat futur.

### 3. VULNÉRABILITÉ AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET ADAPTATION

Ces dernières décennies, on assiste à une prise de conscience rapide quant à l'éventuelle gravité des changements climatiques et de leurs effets. Il y a dix à vingt ans, l'adaptation était associée à l'abandon des efforts de lutte contre les changements climatiques. De nos jours, ce concept est largement reconnu comme essentiel, tant il est de plus en plus probable que le climat va changer inexorablement dans l'avenir. Ainsi, outre la réduction des émissions de gaz à effet de serre, qui s'inscrit en droite ligne de la lutte contre les changements climatiques, il est question de s'adapter à ces changements et de réduire la vulnérabilité qu'ils entraînent.

#### 3.1. Qu'est-ce que l'adaptation aux changements climatiques?

Pour comprendre le concept d'adaptation, il est nécessaire de comprendre la notion de vulnérabilité aux changements climatiques. La vulnérabilité peut être considérée comme le risque d'exposition à un danger quelconque. Les pays, les régions ou les secteurs sont exposés à divers types de menaces. Par exemple, le risque d'inondation due à l'élévation du niveau de la mer est plus élevé au Cameroun qu'au Burundi, pays sans littoral.

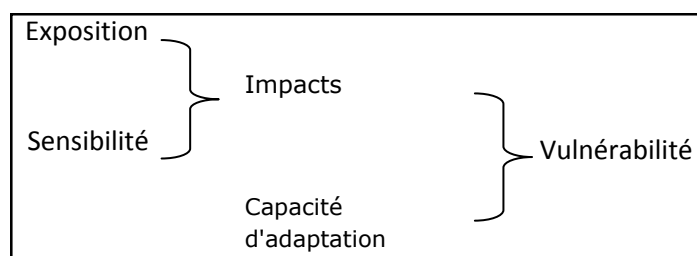


Figure 1 Schéma de la vulnérabilité

Le niveau de vulnérabilité se dégage de la somme des impacts et de la capacité d'adaptation (voir Figure 1). Ainsi, le niveau de vulnérabilité peut être élevé ou bas, selon que les impacts sont élevés et/ou que la capacité d'adaptation est faible. Si une région confrontée à un péril quelconque réussit à y faire face, en modifiant son comportement, ses ressources ou ses technologies, alors, cette zone sera considérée comme ayant une capacité d'adaptation suffisante. En fait, c'est grâce à cette capacité que la région parvient à se protéger de cette menace particulière. Cependant, si la capacité d'adaptation d'une zone est insuffisante ou nulle, alors, cette zone est considérée comme vulnérable (Parry et le Groupe d'experts intergouverneemental sur l'évolution du climat, 2007). Chaque région possède une capacité d'adaptation précise, qui lui permet de faire face aux menaces. En effet, si l'on dit d'un pays A qu'il possède une forte capacité d'adaptation, cela signifie, par exemple, qu'il a des solutions pour faire face à de fortes précipitations. A contrario, l'absence de capacités en la matière, dans un pays B, rendra celui-ci vulnérable aux inondations et à l'érosion. En définitive, la capacité d'adaptation d'une région est fonction du contexte (Smit et Wandel, 2006).

L'impact est la somme de l'exposition et de la sensibilité. L'exposition désigne le changement absolu survenu dans un indice climatique, par exemple, une saison pluvieuse plus courte, des températures minimales plus élevées ou l'élévation du niveau de la mer. Ces changements ne génèrent d'impact que si la zone concernée est sensible à l'exposition. Un pays sans littoral ne peut être sensible à l'augmentation du niveau de la mer. Moins une zone est sensible, moins importants sont les impacts.

Par contre, si la zone est très sensible à une certaine exposition (ou changement), l'impact sera assez sévère. Par exemple, les systèmes agricoles sont hautement sensibles aux variations de la pluviosité.

Néanmoins, une zone ne peut être vulnérable que si sa capacité d'adaptation aux situations engendrées par les impacts est insuffisante ou nulle (**Error! Reference source not found.**). La richesse, les infrastructures, l'équité, etc. constituent des indicateurs de la capacité d'adaptation. L'adaptation, elle, peut se traduire par des actes (construction de barrages) ou des enseignements sur les actions à mener (éducation). Dans les nombreux pays d'Afrique, la capacité d'adaptation est relativement fragile, eu égard à l'insuffisance des ressources économiques, la faiblesse du système d'éducation et des institutions. Toutefois, au sein des communautés, on observe, parfois, un niveau particulièrement élevé de résilience à diverses conditions climatiques extrêmes. En effet, les différentes communautés développent des compétences leur permettant de faire face à la sécheresse à long terme. De plus, elles peuvent réagir, avec promptitude, aux variations du climat.

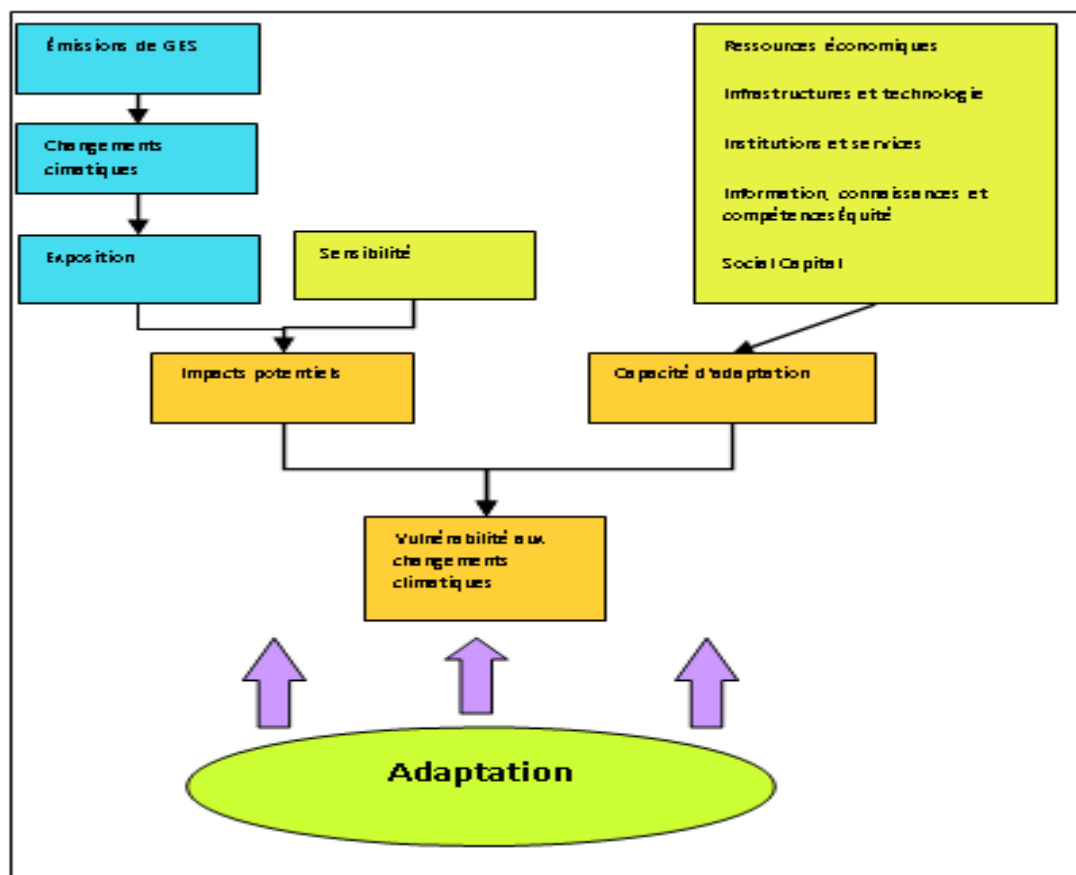


Figure 2. Cadre d'adaptation

Traditionnellement, la vulnérabilité est étudiée selon deux approches: l'approche en amont et l'approche en aval (voir Figure 2). L'approche en aval est le plus souvent utilisée pour la recherche en sciences sociales, avec un accent sur la vulnérabilité des sociétés ou des communautés. Cette approche permet de produire des données à partir de l'étude des capacités existantes d'adaptation de la population locale aux changements climatiques. Sur la base de ces données, les options d'adaptation sont envisagées et la vulnérabilité de la zone est évaluée. Cette approche est souvent utilisée par les ONG, au sein des communautés. L'approche en amont, quant à elle, est couramment utilisée dans le cadre des politiques d'adaptation aux changements climatiques. Elle met l'accent sur les éléments scientifiques des changements climatiques et la vulnérabilité biophysique. Afin de collecter les données relatives au type de changement climatique attendu, des projections globales sur

les changements du climat se limitent à la zone ciblée par l'étude. Sur la base de cette information, une étude d'impact est réalisée et la vulnérabilité physique de la zone est évaluée (voir figure 3).

Les deux approches d'étude doivent être considérées comme complémentaires et non contradictoires. Pour adopter une politique d'adaptation, les vulnérabilités physique et sociale doivent, toutes, être prises en compte, de sorte qu'un ensemble efficace de mesures d'adaptation soient prises (Dessai and Hulme, 2003). Parfois, il est difficile d'appliquer une étude à grande échelle au processus d'adaptation au niveau local, d'où l'élaboration d'une approche en aval pour le cas d'espèce. Dans le cadre du projet d'élaboration de «Scénarios de changements climatiques dans le bassin du Congo», l'approche en amont est utilisée, l'objectif étant d'effectuer une analyse à grande échelle des changements climatiques dans cette zone. Pour la région Afrique centrale, les données relatives aux changements climatiques sont insuffisantes et le projet entend remédier à cette situation. Les études menées dans le cadre du projet serviront à identifier les principales variations subies par le système climatique et les éventuels impacts futurs sur une région vaste. Pour des études à grande échelle, l'approche en amont est souvent la plus indiquée.

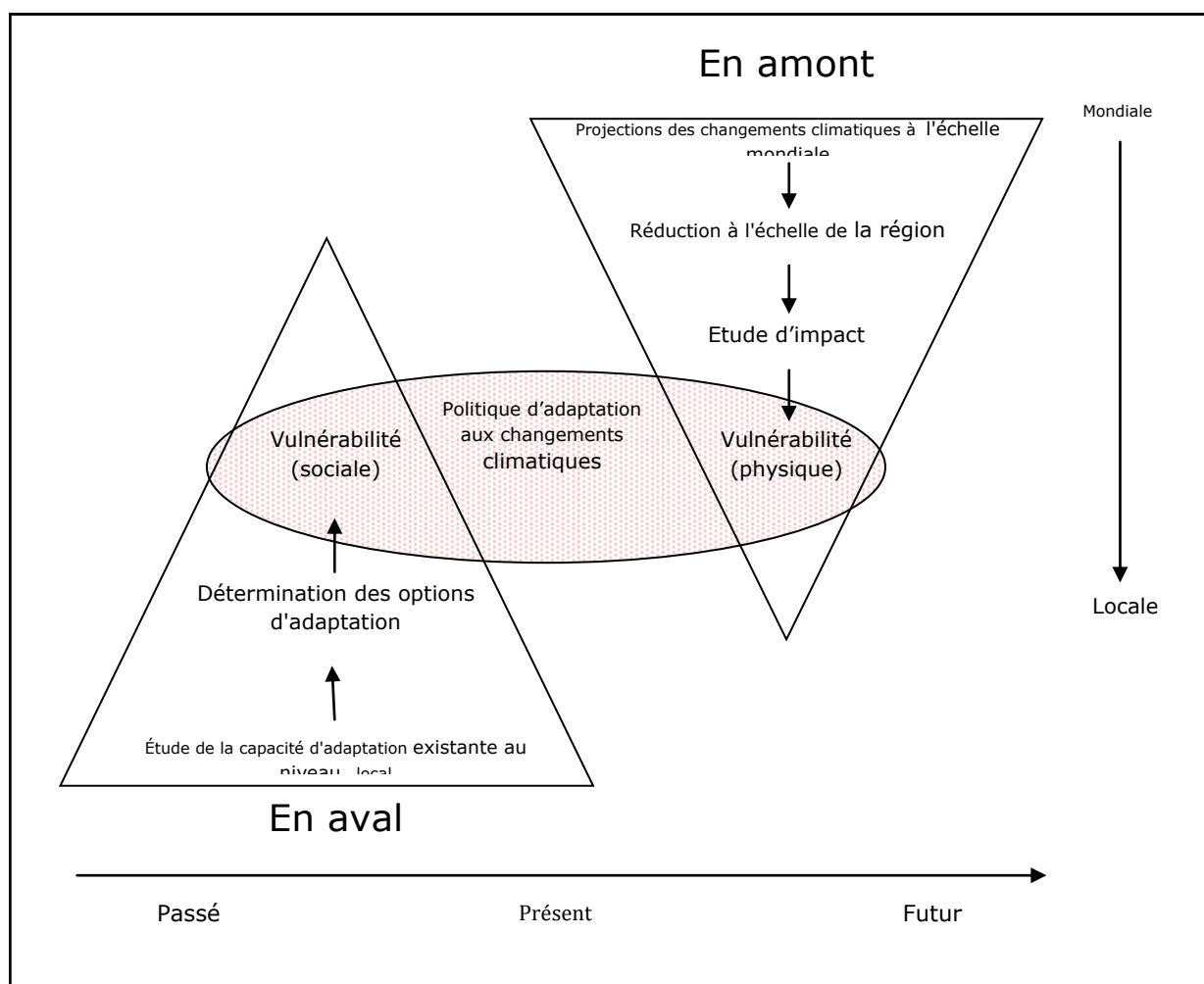


Figure 2. Approches en amont et en aval d'évaluation de la vulnérabilité, en vue de l'adoption de politiques d'adaptation aux changements climatiques (Dessai et Hulme, 2003)

Pour confirmer la vulnérabilité d'une zone, la fourchette et la capacité d'adaptation de celle-ci doivent être déterminées.

Figure 3 schématise la vulnérabilité, puis la fourchette et la capacité d'adaptation. Prenons, par exemple, la température comme la variable climatique illustrée. Tant que cette température ne déborde pas la ligne pointillée, elle est considérée comme «normale ». Si elle déborde la ligne



pointillée et reste en dessous du trait continu qui représente la « limite de la capacité d'adaptation », on pourrait parler d'anomalies. Néanmoins, la population ou l'écosystème peuvent y faire face, en s'y adaptant. Si les ressources et les connaissances relatives à l'adaptation sont disponibles et utilisées, ce type de variations ne devrait pas avoir un impact nuisible. Si le niveau de température excède la capacité d'adaptation, la population ou l'écosystème ne pourra plus y faire face avec les connaissances et /ou les ressources disponibles; dès lors, les effets néfastes seront inévitables.

S'il est prévu qu'une situation extrême de cette nature va se produire ou si la population ayant vécu pareille situation réalise qu'elle pourrait se reproduire, elle peut décider de se préparer en conséquence et de s'informer/ ou trouver les ressources adéquates en vue d'une adaptation. De cette façon, la capacité d'adaptation de la région va s'accroître. Les lignes continues s'écartent davantage les unes des autres (voir

Figure 3). Cette courbe montre que les changements climatiques peuvent excéder les limites de la capacité d'adaptation. L'adaptation aux changements climatiques vise donc à repousser ces limites, afin d'éviter ou de réduire le risque de débordement de ces capacités (Vincent, 2004). En définitive, le renforcement de la capacité d'adaptation permettra d'éviter des impacts sévères.

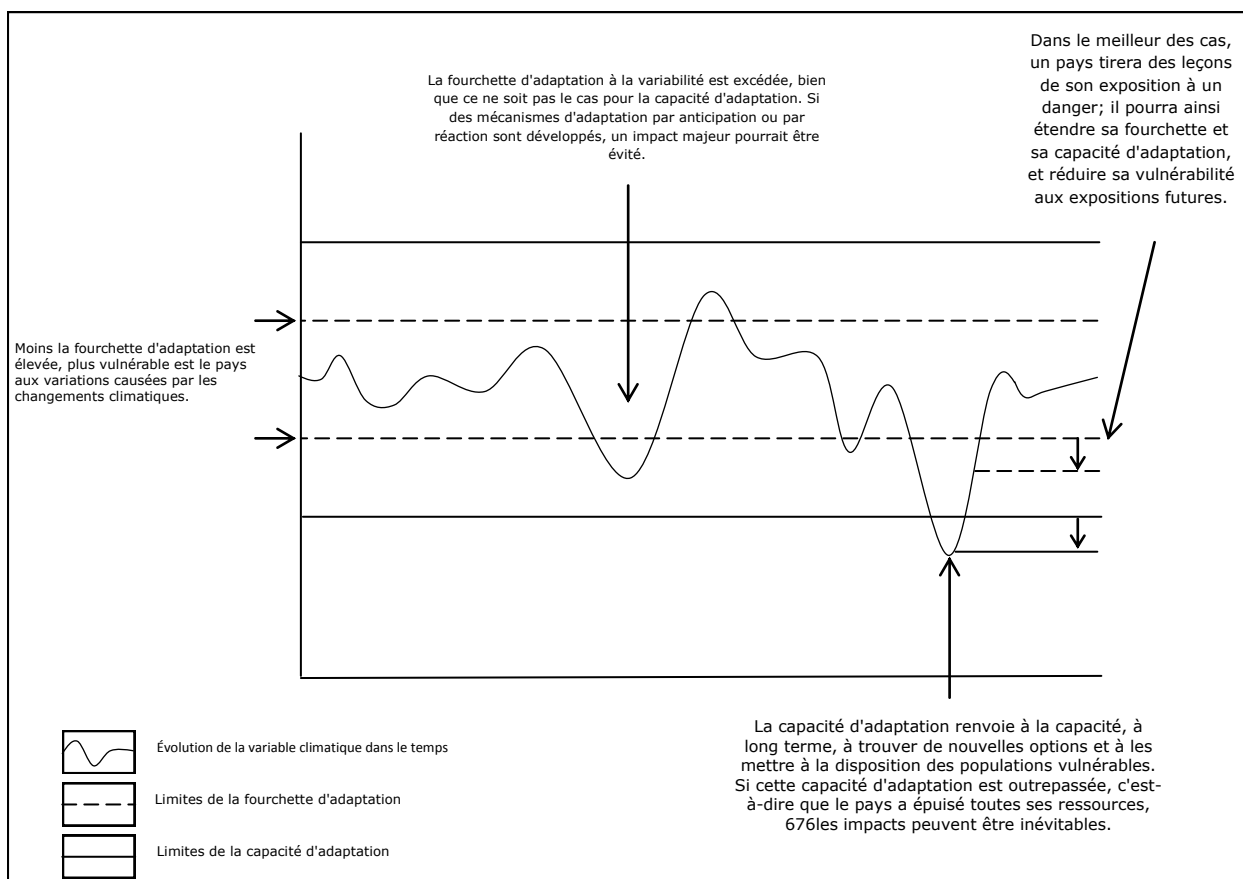


Figure 3. Cadre de la vulnérabilité, de la fourchette et de la capacité d'adaptation (Vincent, 2004)

L'adaptation aux changements climatiques est un processus complexe. Il touche aux facteurs sociaux, culturels et économiques, lesquels doivent être rattachés à la science naturelle de changements climatiques, et de changements d'ordre physique (Sullivan and Huntingford, 2009). Aujourd'hui, nombre de communautés, d'entreprises et d'institutions étatiques ont compris le besoin de s'adapter aux changements climatiques. Toutefois, la façon dont ils s'y prennent manque souvent de précision. C'est dans ce sillage que le cycle d'adaptation a vu le jour. L'initiative vise à soutenir les efforts d'adaptation des institutions gouvernementales et des entreprises (Figure 5). En effet, pour une adaptation réussie, il est nécessaire de déterminer les facteurs auxquels il faut s'adapter. À travers une

«évaluation des impacts et de la vulnérabilité aux changements climatiques», les variations prévues et leurs impacts sur l'état actuel du système, sur la communauté ou la région peuvent être cartographiés. Une fois que les impacts et la vulnérabilité d'une région aux changements climatiques sont connus, les options d'adaptation peuvent être déterminées. C'est la deuxième étape du cycle d'adaptation. Par la suite, les mesures d'adaptation choisies doivent être évaluées. Afin de d'enrayer la vulnérabilité résiduelle, le cycle d'adaptation peut être répété après la mise en œuvre des mesures d'adaptation.

### Le cycle d'adaptation

- Conception et sélection des options d'adaptation
- Mise en œuvre et évaluation des options d'adaptation
- Évaluation des impacts/de la vulnérabilité aux changements climatiques

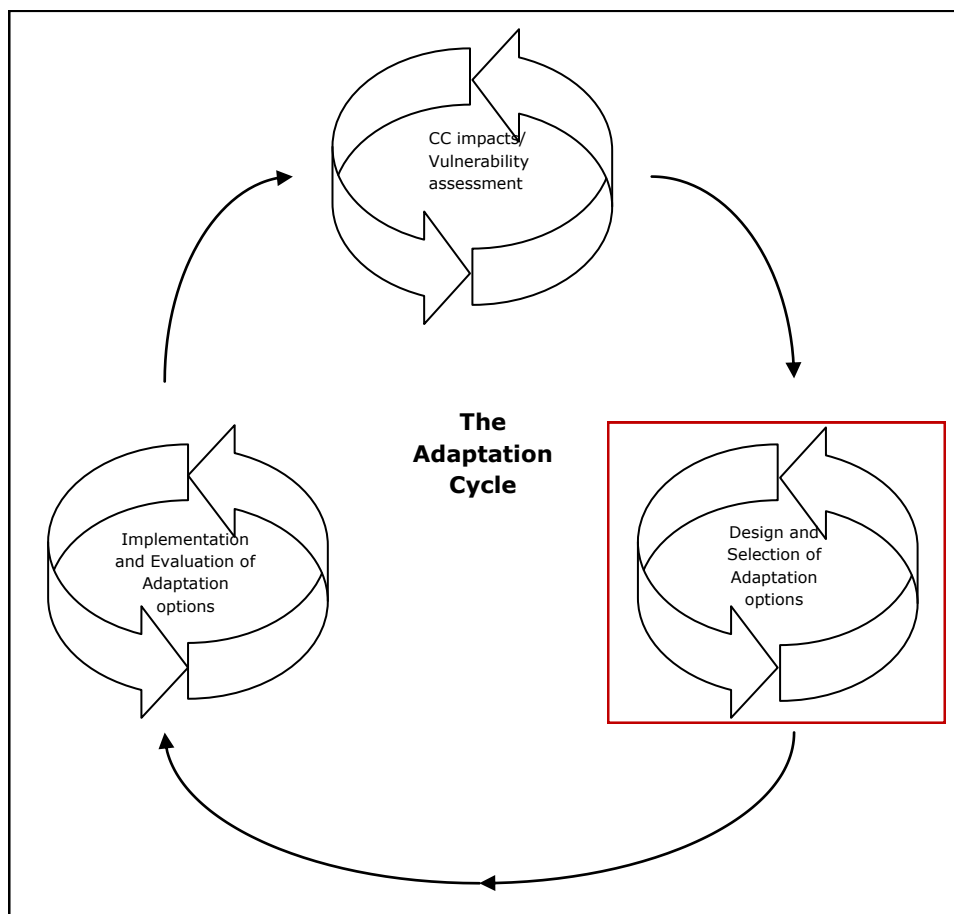


Figure 4. Cycle d'adaptation inspiré de Goossen et al., 2011

Les résultats de la première étape du cycle d'adaptation sont présentés dans les chapitres précédents (Beyene et al., 2013; Haensler et al., 2013; Ludwig et al., 2013). Dans le présent rapport, un accent est mis sur la deuxième étape du cycle d'adaptation (encadré dans Figure 5). Le présent rapport pourrait faciliter la sélection des mesures d'adaptation aux changements climatiques en fournissant une liste d'options tirées de la zone du bassin du fleuve Congo (cf. chapitre 4) et au-delà (cf. chapitre 5), susceptibles d'être mises en œuvre dans la région ciblée.

On peut s'adapter aux changements de différentes façons. Il existe, à cet effet, des activités simples et d'autres complexes. Au fil du temps, divers schémas de catégorisation de ces options d'adaptation ont été conçus. On peut choisir de renforcer les capacités d'adaptation par l'adoption de politiques, l'éducation, des incitations financières, etc. Une autre stratégie consiste à mener des actions d'adaptation qui relèvent des «mesures d'adaptation dures» (construction de barrages, changement

du système d'irrigation, etc.) et des «mesures d'adaptation douces» (élaboration de plans d'évacuation, et prévisions climatiques saisonnières)(Tompkins et al., 2009). Dans la pratique, l'expérience a montré qu'il est plus judicieux de combiner ces deux stratégies.(De Loë et al., 2001)publiées, basées sur (Kates et al., 1985) et une version plus élaborée dans (Feenstra et al., 1998)). Les mesures d'adaptation aux changements climatiques peuvent être organisées en trois principales catégories.

### 1. *Accepter les pertes*

Il s'agit, essentiellement, de la stratégie «passive». Dans le cadre des évaluations de l'adaptation aux changements climatiques, les mesures prévues ou mises en œuvre peuvent être comparées à ce scénario. Par exemple, si les risques d'inondation s'accroissent, la stratégie passive voudrait que l'on accepte la perte des cultures, des moyens de subsistance, voire des vies humaines, sans qu'aucun dispositif de prévention ne soit mis en place.

### 2. *Prévenir les effets*

Il s'agit d'adopter des mesures destinées à prévenir ou à atténuer les effets des changements; des initiatives sont prises pour protéger et maintenir les activités existantes telles quelles, prévenir les pertes et autres dommages dus aux changements climatiques. Par exemple, si le risque d'inondation augmente, cette stratégie consistera en la construction de digues et d'autres infrastructures. Si, au contraire, le problème de raréfaction d'eau s'accroît, la stratégie consistera à renforcer l'approvisionnement en eau des systèmes agricoles, de façon à les protéger d'éventuels changements.

### 3. *Modifier les usages et/ou changer de site.*

Si, pour cause de changements climatiques, les activités menées sur un site ne peuvent plus l'être, comme par le passé, alors cette zone peut être affectée à d'autres usages. De même, les activités peuvent être délocalisées vers d'autres sites ou tout simplement remplacées par d'autres. Par exemple, en cas de risque accru d'inondation, cette stratégie peut consister en la délocalisation de l'activité économique des berges du fleuve vers un site moins exposé. Si, par contre, le problème est la raréfaction de l'eau ou la recrudescence d'épisodes de sécheresse, la stratégie pourrait consister à modifier l'utilisation des terres en abandonnant l'agriculture ou une culture particulière.(Feenstra et al., 1998, Tompkins et al., 2009, UKCIP, 2011, Goulden et al., 2009)

Même si l'adaptation aux changements climatiques se révèle être un processus bien pensé, nombre de mesures d'adaptation n'ont rien à voir avec les changements climatiques. Cette forme intuitive d'adaptation est appelée adaptation autonome ou adaptation non planifiée. En effet, lorsque, même en saison sèche, l'on emporte, avec soi, un parapluie, de peur qu'il pleuve, il s'agit d'une mesure d'adaptation aux changements climatiques. Pourtant, l'individu qui a pensé à emporter un parapluie ne tenait pas précisément compte des changements climatiques. L'adaptation autonome est spontanée, réactive. L'adaptation planifiée, quant à elle, consiste à intervenir de façon consciente par rapport aux changements climatiques ou à s'y préparer en conséquence. Elle se traduit par l'adoption de politiques d'adaptation (Feenstra et al., 1998; Tompkins et al., 2009; La Banque mondiale, 2009; Goulden et al., 2009).

Relevons que des opérations assimilées à de l'adaptation spontanée à un certain niveau peuvent être perçues, à d'autres, comme de l'adaptation planifiée. Au niveau étatique, sont considérées comme adaptation autonome des actions menées par la population, sans l'intervention de l'État. Pourtant, au niveau des populations mêmes, les mêmes actions pourraient être considérées comme des mesures d'adaptation planifiées et mises en œuvre, au terme d'une évaluation méthodique des impacts des changements climatiques dans leurs propres vies (Feenstra et al., 1998).

La différence entre ces deux approches peut être considérée comme la différence entre l'adaptation par des initiatives privées et l'adaptation par des initiatives publiques. En effet, si l'adaptation est envisagée par des particuliers, des ménages ou des entreprises privées, alors elle est privée. En revanche, si elle est envisagée par toute structure de l'État, elle est publique (MacCarthy et le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2001; La Banque mondiale, 2009).

Lorsque les mesures d'adaptation aux changements climatiques ne sont pas soumises à un processus rigoureux de conception et de mise en œuvre, de sorte que les impacts en soient contrôlés, il survient un déficit ou un fossé d'adaptation (Figure 6). Ce déficit induit un effort supplémentaire, qui s'impose si l'on veut corriger les manquements de l'adaptation aux changements climatiques. Avec l'accélération des changements climatiques, le déficit peut s'intensifier au fil du temps, ce qui va, par ricochet, majorer le coût des mesures d'adaptation (La Banque mondiale, 2009; Schipper et al., 2008).

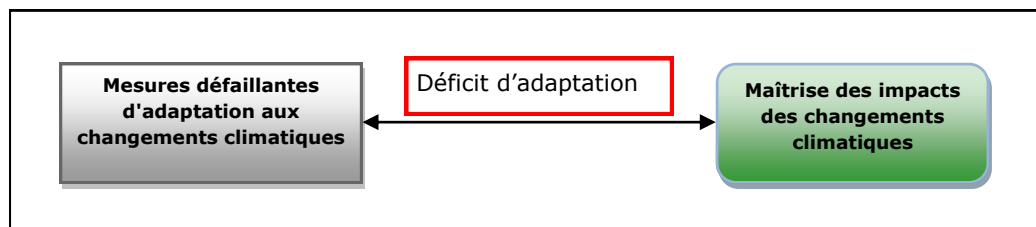


Figure 5. Illustration schématique du déficit d'adaptation

Il peut arriver qu'une mesure prise initialement afin de juguler la vulnérabilité aux dangers des changements climatiques devienne, à terme, un facteur d'accroissement de la vulnérabilité. C'est la maladaptation (De Loë et al., 2001; Schipper et al., 2008; La Banque mondiale, 2009; Barnett et O'Neill, 2010). En effet, la plupart de ces mesures sont conçues pour procurer des avantages à court terme, mais elles ont un impact négatif à long terme. Prenons le cas de l'utilisation de la climatisation pour combattre les effets des vagues de chaleur sur la santé. Les avantages de ce type d'adaptation sont immédiats. Malheureusement, plus on utilise d'énergie pour assurer la climatisation, plus on aura rejeté de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère à terme, accentuant, de ce fait, le réchauffement de la terre, d'où la maladaptation. La maladaptation peut être définie de 5 façons (Barnett et O'Neill, 2010):

1. L'augmentation des émissions de gaz à effet de serre (voir exemple ci-dessus).
2. Les plus vulnérables payent un trop lourd tribut  
Il s'agit d'une situation où la mesure d'adaptation aggrave la vulnérabilité des populations à risque (minorités, ménages pauvres, etc.) Prenons le cas où, dans une vallée fluviale, les quartiers huppés sont situés en hauteur, tandis que les bidonvilles sont situés dans la vallée du fleuve. Avec l'augmentation du risque d'inondation, l'État envisage de mettre en œuvre une mesure d'adaptation, afin de protéger la population. Un barrage de protection est construit au centre de la vallée. Ce barrage protège les beaux quartiers des inondations, mais aggrave le risque d'inondation dans les bas quartiers. Par conséquent, la zone pauvre de la vallée, qui est pourtant la plus vulnérable, se retrouve disproportionnellement affectée.
3. Un manque à gagner élevé  
Il survient quand les coûts (économiques, sociaux et environnementaux) sont supérieurs à la facture d'une mesure alternative.
4. Une baisse de l'engouement pour l'adaptation  
Elle survient lorsque les mesures prises n'incitent pas les populations à l'adaptation (par exemple, les premiers acteurs ont été pénalisés). À titre d'illustration, les pouvoirs publics décident souvent de soutenir financièrement les agriculteurs dont la survie est menacée en période de sécheresse, à travers des programmes d'aide contre ce phénomène. Certaines entreprises, qui auraient fait faillite même sans la survenue de la sécheresse, parviennent alors à se maintenir en activité, grâce aux financements de ces programmes, aux dépens des meilleurs agriculteurs, qui se préparent convenablement contre la sécheresse et qui, de ce fait, ne bénéficient pas de ce système d'aide. Dans ce cas de figure, des agriculteurs sont encouragés, non pas à s'adapter, mais à bénéficier des financements octroyés par l'État.
5. La contrainte des engagements  
Elle survient lorsqu'une mesure d'adaptation d'envergure requiert, par exemple, un engagement financier ne pouvant faire l'objet de quelque modification, à l'avenir. Cette situation réduit la flexibilité, c'est-à-dire la capacité à faire face aux effets néfastes imprévus.

Ainsi, pendant la procédure de sélection des mesures d'adaptation, les effets néfastes éventuels doivent être soigneusement recherchés, afin que soit évitée la maladaptation.

### 3.2. Mesures d'adaptation

Pendant le choix des mesures d'adaptation, la mesure la plus efficace présentant le moins de risques est souvent privilégiée. Ces mesures peuvent être classées comme des options sans regret, avec faible regret, gagnant-gagnant, flexible/à gestion évolutive et à haut regret. Chacune de ces catégories comporte des avantages et des inconvénients, à examiner méticuleusement (voir les exemples du tableau 1).

Les options sans regret: Il s'agit de mesures d'adaptation qui rapportent déjà un bénéfice socioéconomique net, indépendamment des changements climatiques. Cette forme d'adaptation ne comporte aucune incertitude liée aux changements climatiques futurs. En effet, les mesures prises permettent de gérer la variabilité du climat actuel tout en renforçant la capacité d'adaptation aux changements à venir. Ainsi, ces mesures sont justifiées (coût-avantages) aussi bien pour les changements climatiques actuels que pour ceux futurs. Ce sont, essentiellement, des actions à moyen terme qui peuvent être mises en œuvre parce que, au moins, elles sont sans incidence sur les coûts.

Les options avec faible regret: Elles concernent les mesures d'adaptation avec des coûts relativement bas, susceptibles d'avoir un rendement très élevé. Ces mesures visent un retour sur investissement maximal, malgré la grande incertitude qui entoure les prévisions relatives aux changements climatiques futurs.

Les options gagnant-gagnant: Les mesures qui rentrent dans cette catégorie présentent également d'autres avantages. Elles peuvent donner lieu à l'adaptation et à la réduction. Elles peuvent également être mises en œuvre pour d'autres raisons, tout en fonctionnant comme mesures d'adaptation. Les mesures sans regret ou avec faible regret peuvent également être des mesures gagnant-gagnant, dans le cas où elles s'ajoutent à d'autres retombées.

Les options flexibles/à gestion évolutive: Il s'agit d'options d'adaptation à mesures progressives, qui s'opposent aux vastes programmes dont la mise en œuvre se fait d'un trait. Cette forme de gestion évolutive permet de réduire le «risque erroné». En effet, si certaines mesures se révèlent non bénéfiques, elles peuvent être modifiées, car elles font partie d'une (large) gamme de petites mesures. Le processus de toute la gestion évolutive peut même être modifié, avec l'arrivée de connaissances, d'expériences et de technologies nouvelles.

Les options à haut regret: Elles sont considérées comme des options à grande échelle. Il s'agit, par exemple, du recasement de certaines populations ou de la construction d'un grand barrage. Du fait de l'incertitude liée aux prévisions de changements climatiques, ces options expansives et essentiellement irréversibles devraient être envisagées avec précaution, en tenant compte des risques qu'elles comportent. Néanmoins, même si elles comportent des risques, elles peuvent, dans certains contextes, constituer la meilleure solution envisageable (UKCIP, 2011; La Banque mondiale, 2009).

Il est important de relever que les différences entre les options sans regret, avec faible regret ou à haut regret ne sont pas permanentes; elles varient dans le temps et dans l'espace. Ainsi, une certaine mesure peut être sans regret dans une partie du monde, et être avec faible regret dans une autre. De plus, avec le temps, les regrets peuvent muter d'une forme à l'autre, et vice versa (La Banque mondiale, 2009).

Tableau 1 les options de regret des mesures d'adaptation (UKCIP et LBM)

Option de regret	Description	Exemples
<b>Sans regret</b>	Options rapportant des bénéfices avec ou sans la survenue du phénomène de changements climatiques.	Polyculture, Agriculture mixte et systèmes d'élevage, Conservation et utilisation durable des ressources naturelles (p. ex., conservation des terres)
<b>Avec faible regret</b>	Options rapportant des bénéfices considérables et présentant des risques minimales	Prévisions météorologiques / saisonnières,
<b>À haut regret</b>	Options généralement irréversibles et coûteuses, si la mesure adoptée se révèle inutile ou non fonctionnelle	Réseau d'infrastructures de collecte d'eau Recasement d'une communauté
<b>Gagnant-gagnant</b>	«Situation où une option renforce la capacité d'adaptation tout en permettant d'autres retombées»	Renforcement de la biodiversité, Réduction de l'exposition globale au risque
<b>Gestion flexible</b>	«Basée sur l'adaptation progressive; permet, ainsi, de réduire les risques liés aux erreurs»	Diversification des activités économiques, Réduction de la pression sur les régions et les systèmes en danger, Adoption d'un plan de viabilité flexible et à long terme

### 3.3. Principes de l'adaptation

Il existe quelques principes courants d'adaptation dont découlent une multitude de mesures d'adaptation. La diversification est un principe appliqué dans presque tous les secteurs relatifs aux changements climatiques. On peut citer, à titre d'exemple, la diversification des revenus, la diversification des cultures, etc. Ce principe a le mérite de répartir les risques. En effet, si une forme de revenu se révèle précaire, l'autre ou les autres pourront soutenir la famille ou l'entreprise. Par exemple, si, à cause des changements climatiques, la récolte d'une culture est mauvaise, une autre spécification pourra assurer la subsistance de l'agriculteur. De ce fait, l'application judicieuse du principe de diversification peut aider à assurer un revenu. La diversification constitue une mesure d'adaptation majeure, en raison de l'incertitude liée aux changements climatiques futurs, et de la variabilité accrue qui accompagne souvent ce phénomène. Généralement, plus la diversité d'un système est grande, moins vulnérable il sera face à la forte variabilité climatique.

*Le reboisement*, dans sa forme la plus simple, désigne le fait de planter des arbres. L'importance de ce principe et les multiples possibilités de mise en œuvre qu'il offre ne devraient pas être négligées. Les forêts apportent la sécurité alimentaire et d'autres moyens de subsistance; les arbres protègent des orages et constituent une source d'énergie.

*La gestion* de l'utilisation des terres, de l'eau, de l'énergie, des forêts, etc. aide à renforcer la capacité d'adaptation. La connaissance de l'actualité relative aux secteurs évoqués ci-dessus, la planification de l'utilisation des ressources naturelles et la prévision des impacts des changements climatiques, par secteur, permettent de développer la résilience d'un pays. Par exemple, en matière de gestion de l'eau, on peut construire une infrastructure d'acheminement de l'eau d'une zone irriguée vers une zone sèche. La gestion des terres permet, par exemple, de déterminer les zones où la coupe des arbres

est interdite, de façon à protéger les terres agricoles des orages, etc. En somme, il est capital d'adopter une gestion adéquate et efficace.

*L'éducation et la sensibilisation* sont aussi importantes, particulièrement en matière de renforcement de la capacité d'adaptation. Même avec l'adoption de mesures d'adaptation, si les populations ne sont pas conscientes des dangers liés aux changements climatiques, elles ne peuvent adopter des comportements nouveaux ou être réceptives à la mise en œuvre de ces mesures d'adaptation. De même, si les professionnels désireux de soutenir le processus d'adaptation aux changements climatiques ne sont pas éduqués et outillés, leur efficacité sera limitée.

*L'aide financière* est un principe appliqué notamment par les organisations régionales ou mondiales et par les pays développés, dans le but de promouvoir les initiatives d'adaptation aux changements climatiques. Entre autres types d'aide financière, on peut citer la micro-assurance, les microcrédits, etc. L'insuffisance des ressources financières entrave le processus de mise en œuvre des mesures d'adaptation. Comme autre flux majeur d'aide financière, on pourrait citer les transferts de fonds de l'administration centrale vers les collectivités locales. Ce flux d'aide doit être sécurisé, de sorte que les collectivités locales appliquent intégralement les mesures d'adaptation dans leurs propres régions.

## 4. MÉTHODES

La région du bassin du fleuve Congo est essentiellement couverte de forêts et de terres agricoles; la population et l'économie de cette région sont essentiellement tributaires des activités liés à ces deux secteurs. La région connaît une croissance démographique rapide, particulièrement en milieu urbain.

Toutes ces populations ont besoin d'eau potable, d'énergie et d'un milieu de vie sain. Leurs villes, leurs villages et leurs terres doivent être «sains»; les populations doivent être protégées des impacts environnementaux des changements climatiques. C'est la raison pour laquelle le présent rapport est axé sur ces quatre secteurs: l'eau, la foresterie, l'agriculture et l'énergie. Ces secteurs ont été choisis en fonction de leur envergure et leur rôle dans la satisfaction des besoins fondamentaux de la population de cette région. Par ailleurs, la situation actuelle de certains secteurs comme celui de l'eau (fourniture d'eau potable, par exemple) rappelle l'urgence de trouver les moyens de réagir aux changements climatiques à venir.

Le présent rapport ne couvre pas d'autres secteurs. Tous n'ont pas la même importance dans la région du bassin du fleuve Congo. En outre, au regard de la conjoncture financière et politique actuelles de la région, ces autres secteurs sont moins rentables, d'où leur non-prise en compte. Par exemple, travailler avec les mesures financières n'est possible que si les fonds sont disponibles. Or cette condition n'est pas toujours remplie, d'où la non-prise en compte du secteur financier. Les changements d'ordre institutionnel peuvent être effectués, sauf qu'ils sont très complexes, pas seulement sur le plan pratique, mais davantage sur le plan culturel. De plus, pour changer les institutions, celles-ci doivent exister et être opérationnelles. Or, la mise en place de nouvelles institutions nécessite des moyens. Le rapport consacre une petite rubrique aux institutions et à la gestion, deux paramètres importants, mais qui s'intègrent dans les quatre secteurs retenus.

Une revue de la littérature a permis de mettre en lumière les mesures les plus efficaces d'adaptation aux changements climatiques. Ces mesures ont été regroupées en deux catégories: les mesures déjà appliquées dans le BC et celles qui, bien que applicables, ne le sont pas encore dans la région. Les mesures d'adaptation aux changements climatiques ont été sélectionnées sur la base d'ouvrages et de la littérature scientifique ou grise, disponibles en ligne.

Ces mesures sont énumérées dans le «tableau de l'adaptation aux changements climatiques» (voir annexe et chapitre 4). Chaque mesure est assortie d'une description, des raisons de son applicabilité et, le cas échéant, d'un lien vers un exemple pratique.

Pendant la recherche documentaire, il a été constaté que peu d'études ont été menées sur les changements climatiques dans la région. On dénombre juste quelques publications portant notamment sur la région Afrique centrale. Une bonne partie des travaux menés au sein de la région proviennent des documents des PANA et des CN disponibles sur le site Internet de la CCNUCC, mais également des publications de la Banque mondiale et des ONG.

## 5. OPTIONS D'ADAPTATION POUR L'AFRIQUE CENTRALE

Les études des scénarios de changements climatiques futurs en Afrique centrale révèlent que ce phénomène entraînera une hausse des températures et une pluviosité à variabilité accrue, avec une recrudescence des extrêmes (Haensler et al., 2013). L'adaptation doit être principalement orientée vers les phénomènes extrêmes tels que les fortes précipitations et les vagues de chaleur. Les périodes sèches seront plus longues; tandis que les saisons pluvieuses pourront devenir plus courtes, mais plus intenses. Ces changements, dont seule la principale caractéristique est décrite dans le présent rapport, auront des conséquences sur le fonctionnement de la région. Les études d'impact montrent que la hausse des températures entraînera des effets néfastes sur la croissance des plantes/des cultures. L'augmentation de la pluviosité pourra entraîner des inondations plus fréquentes. En outre, la variabilité des débits des fleuves sera accrue. Le présent chapitre porte sur la description des mesures d'adaptation possibles, en vue de la lutte contre les impacts des changements climatiques futurs dans les secteurs retenus: l'agriculture, la foresterie, l'eau, l'énergie et la capacité d'adaptation. Parfois, il existe une interaction entre ces secteurs. On voit, par exemple, que l'eau est utilisée pour les besoins agricoles et énergétiques) et que la déforestation affecte les systèmes fluviaux. Un aperçu complet de toutes les options d'adaptation suggérées figure dans le tableau de l'adaptation (voir annexe 1).

### 5.1. Foresterie

Dans le BC, il existe encore quelque 2 millions de km<sup>2</sup> de forêts tropicales et saisonnières. Les forêts abritent 30 millions de personnes issues de 150 groupes ethniques. Même si ces forêts abritent, également, près de 4000 espèces dont 70% sont endémiques, environ 60% de ces étendues sont considérés comme industriellement exploitables (CBFP, 2006). Il est possible que les impacts de changements climatiques aggravent la pression exercée sur ces écosystèmes. Les changements climatiques et la mauvaise gestion des forêts peuvent avoir des impacts considérables sur les écosystèmes des forêts et sur l'industrie du bois, ainsi que sur les populations qui dépendent de la forêt pour leur subsistance. Les variations de température et du régime des précipitations peuvent entraîner une poussée de la forêt équatoriale vers le nord et vers le sud. De même, le piégeage du carbone de l'écosystème peut s'accroître, ce qui, en soi, constitue un impact potentiellement positif de changements climatiques (Ludwig et al., 2013).

Le reboisement est un aspect majeur de l'atténuation des changements climatiques et de l'application des pratiques d'adaptation. Cette mesure contribue à l'amélioration et à la diversification des moyens de subsistance; elle empêche l'érosion du sol et les éboulements/glissements de terrains. Le reboisement renforce la fertilité des sols. Les arbres peuvent protéger les terres agricoles environnantes des orages. Grâce au reboisement, on peut équilibrer l'hydrologie des bassins versants, notamment en améliorant l'infiltration de l'eau et en limitant la perte des sols due à l'érosion. Le fait d'imposer le reboisement aux compagnies forestières préserve les forêts naturelles et génère des revenus et de l'énergie pour les parties prenantes. Pendant le reboisement, les espèces d'arbres adaptées aux changements climatiques futurs peuvent être plantées, ce qui renforce la résilience des forêts aux changements climatiques. En mettant sur pied un centre régional des forêts et de semences agroforestières, les espèces existantes et celles dont les perspectives de croissance/ récolte seront optimales avec les changements climatiques futurs (dans chaque région) peuvent être cultivées/collectées et conservées. Ainsi, des espèces peuvent être choisies pour chaque milieu spécifique, puis utilisées pour les besoins de reboisement. Le contexte local détermine le besoin de



mettre en terre des plants (ou semences) ou de jeunes arbres. Des banques de semences existent dans différents pays africains (Afrique du Sud, Éthiopie, Niger, Kenya, etc.). Elles peuvent avoir une portée nationale. Toutefois, de plus petites banques (à caractère communautaire) peuvent contribuer, de façon significative, au renforcement de la capacité d'adaptation, à travers la préservation du patrimoine génétique des arbres, la conservation et l'amélioration de la diversité IN SITU, la protection des ressources génétiques locales et l'amélioration de la sécurité des semences, etc. Les banques de semences ne sont pas créées uniquement pour la foresterie. Elles satisfont également les besoins de l'agriculture, de l'agroforesterie, de la conservation de la nature, etc. (Worede, 2011; Albrecht et Monodi Oloo, 1993; Vercoe et Midgely, 1993) . La banque de semences peut jouer un rôle majeur dans le processus de diversification de la forêt, à travers la diversification des espèces d'arbres, notamment (voir paragraphe précédent). C'est également le cas de la diversification qui allie l'agriculture à la foresterie: l'agroforesterie. Les banques de semences sont importantes pour le secteur agricole; elles le seront davantage si le climat change, vu qu'elles facilitent l'introduction de nouvelles variétés.

L'agroforesterie est une méthode vieille et éprouvée de diversification des revenus et de répartition des risques; elle permet d'augmenter les revenus et de renforcer la sécurité alimentaire. En mettant en œuvre le MTS, le Système Taungya modifié, par exemple, le même agriculteur combine les méthodes agricole et forestière. Le MTS porte sur le mélange des arbres et des cultures agricoles (cf. Figure 6). Durant les trois premières années de la mise en œuvre du MTS, le système relève purement de l'agroforesterie. Les arbres croissent et forment une voûte épaisse et l'agriculteur s'emploie à les suivre jusqu'à leur maturité. Il peut ensuite les exploiter pour produire du bois de grume, de l'énergie, etc. Notons que les cultures et les arbres se complètent, au lieu d'être en compétition. L'agriculteur peut mener diverses activités complémentaires comme le petit commerce, l'aviculture, l'apiculture et les fermes d'élevage. Pour faire face aux changements climatiques, le MTS procure une sécurité alimentaire, permet la lutte contre l'érosion (en maintenant la stabilité des sols et des arbres et en limitant le niveau d'érosion). Par ailleurs, il renforce la fertilité des sols (les arbres ont un effet fertilisant sur leur environnement) et le bilan hydrique, en plus de fournir un autre combustible (bois). Tous ces éléments sont importants pour l'adaptation aux changements climatiques, car ils permettent à l'environnement local d'en amortir les effets. Le MTS a été mis en œuvre avec succès dans la circonscription forestière d'Offinso, au Ghana, où la production agricole a été renforcée de façon significative (Kalame et al., 2011).



Figure 6, exemple de plantation du MTS au Ghana ([www.fcghana.org](http://www.fcghana.org))

Les pouvoirs publics devraient également s'intéresser au niveau actuel de gestion forestière. Afin de dresser un état des lieux de la forêt et des goulots d'étranglement, un inventaire forestier peut être réalisé. La plupart de ces opérations peuvent être réalisées par la télédétection, à travers des images-satellite. On pourrait y ajouter la surveillance au sol d'une partie de la forêt. L'existence d'un plan viable de gestion forestière combiné à la législation forestière, peut faire une grande différence, et même plus si la gestion est basée sur un inventaire forestier réalisé avec précision et suivi en

permanence. Un suivi adéquat permet d'observer et de prendre, à temps, des mesures adaptées aux impacts des changements climatiques.

L'adaptation de la gestion forestière aux changements climatiques permettra de garantir l'offre énergétique, les moyens de subsistance, etc. Il est impossible de gérer un système dont l'état, les forces et les faiblesses demeurent inconnus. De plus, l'étendue de la forêt peut poser une contrainte à la gestion. Par conséquent, un plan équilibré et bien pensé doit être conçu. Il permettra de faire un inventaire et un suivi plus efficaces des forêts; en tenant comptes des capacités présentes. Différents systèmes de suivi ont déjà été mis au point. Ils peuvent, toutefois, faire l'objet d'améliorations, en tenant compte des impacts potentiels des changements climatiques (CBFP, 2006).

## 5.2. Agriculture

Plus de 80% des communautés rurales du bassin du fleuve Congo vivent de l'agriculture et des activités forestières, contribuant, de façon significative, à l'économie totale de la région (Sonwa et al., 2012). Les changements climatiques s'annoncent comme une source de contraintes supplémentaires pour le secteur agricole. En effet, une variabilité interannuelle accrue des précipitations, la concentration des gaz à effet de serre, et des saisons pluvieuses plus intenses, combinées à des épisodes de sécheresse plus longs, exerceront une forte pression sur les cultures sèches et pluviales. Les longues périodes de sécheresse entraînent une raréfaction de l'eau, tandis qu'une pluviosité irrégulière pourra causer des inondations graves, avec des dégâts importants sur les cultures et les pâturages, ce qui provoquera un affaiblissement de l'économie (Ludwig et al., 2013). Le présent paragraphe comporte des propositions d'adaptation aux effets de changements climatiques sur l'agriculture.

La diversification est un principe répandu et éprouvé d'adaptation à ces changements. (cf. §2.2). Dans le secteur agricole en particulier, il existe de nombreuses méthodes de répartition du risque. On peut citer, à titre d'exemple, la diversification des cultures. Ici, au lieu de cultiver une seule espèce, un agriculteur peut en introduire davantage, en fonction du temps idéal pour chaque espèce. Ainsi, le risque de récolte déficitaire est réduit car, si une culture échoue, d'autres pourraient bien réussir.

Cette forme particulière de diversification permet de faire face aux aléas climatiques: durée des précipitations, températures, heures d'ensoleillement/d'obscurité, etc. Toutefois, elle réduit également la probabilité d'une récolte abondante pour toutes les spéculations. Étant donné que toutes les cultures n'auront pas le même rendement, les cultures sont sélectionnées en fonction de leurs capacités de rendement optimal dans des conditions climatiques légèrement différentes. Le choix des cultures doit être minutieux; les conditions climatiques actuelles et futures doivent être prises en compte, de même que les limites de temps idéales pour chaque culture. La diversification se décline également sous forme de diversification des revenus. Les revenus peuvent être diversifiés à travers l'adoption d'un système agro-sylvo-pastoral. Dans certaines régions, il peut être efficace d'allier l'élevage et les cultures. Afin d'assurer un revenu, même en cas d'échec des cultures, l'agriculteur ou les membres de la famille peuvent choisir de mener des activités non agricoles. Cette initiative permet de sécuriser les revenus financiers de la famille, mais, elle peut également avoir un impact sur le temps consacré à la famille et la répartition des tâches (Qui va se charger des tâches de celui qui est allé travailler, etc.).

Dans la région du bassin du fleuve Congo, la plupart des champs et des fermes n'enregistrent pas des performances à la hauteur de leur potentiel agricole. L'amélioration de la gestion des terres, des intrants, de la lutte contre les ravageurs et les mauvaises herbes, peut contribuer, de façon significative, à l'augmentation de la production agricole dans les régions. Les opérations de développement du secteur agricole doivent inclure l'adaptation aux changements climatiques et le renforcement de «la résilience de la région aux changements climatiques». Il est important de mieux intégrer l'adaptation aux changements climatiques des programmes des différents instituts agricoles, puis, d'intégrer les besoins d'adaptation aux changements climatiques dans les initiatives de développement (et vice versa).

L'adaptation peut également prendre la forme de petites modifications apportées aux pratiques en cours. En effet, un agriculteur peut décider de produire une nouvelle variété, tout en demeurant agriculteur et en opérant comme par le passé. Si la durée de la saison de pluies change, l'agriculteur peut, en conséquence, décider de modifier les temps des semis et de la récolte. Si les cultures n'arrivent pas normalement à maturité, celui-ci peut choisir d'utiliser plus d'engrais, afin de les renforcer. Afin d'améliorer le rendement du pâturage, la technique du zéro-pâturage peut être mise en œuvre. Avec cette technique, les animaux ne vont pas dans le pâturage, mais sont nourris au fourrage qui y est récolté. On obtient, ainsi, une meilleure production fourragère, la sécurité alimentaire pour les animaux, et des revenus pour les fermiers. Il faut signaler, toutefois, que cette technique est chronophage. Cependant, avec ou sans mutation du climat, la production agricole doit être améliorée, à travers une gestion optimisée.

Afin de réduire la dépendance vis à vis de l'eau de pluie et de réduire l'effet de la pluviosité irrégulière, l'eau de pluie peut être collectée pendant la saison des pluies et réutilisée en temps de sécheresse.

Cette approche est appelée collecte des eaux de pluie. Dans le même ordre d'idées, le recours aux techniques d'irrigation réduit la dépendance vis à vis des eaux de pluie, et, par ricochet, le risque de mauvaises récoltes causées par le manque de pluies.

Les techniques décrites permettent de répartir les risques et d'améliorer la sécurité alimentaire et la sécurité des revenus. La modification des pratiques actuelles peut se révéler insuffisante. Des mesures d'adaptation à plus grande échelle devraient, ainsi, être envisagées. Par exemple, on peut délocaliser une zone de cultures afin de privilégier l'agriculture sur les sols argileux. En effet, les sols argileux conservent l'eau plus longtemps, et contiennent donc plus de nutriments. On peut également construire des infrastructures d'irrigation afin d'acheminer l'eau des zones irriguées vers les zones sèches. Les techniques améliorées d'entreposage des récoltes permettent de survivre en temps de pénurie. À ce moment, la gestion adéquate et la sécurisation des réserves empêche le vol ou les pertes dues à des erreurs. Des services vétérinaires et phytosanitaires peuvent être créés, afin d'aider les fermiers à protéger la santé de leurs animaux et de minimiser la perte des cultures due aux maladies. Ces services peuvent également offrir des formations afin, par exemple, d'optimiser les techniques d'élevage.

En fait, le secteur agricole peut être considéré comme flexible; il présente de nombreuses opportunités d'adaptation aux changements climatiques. Comme il a été expliqué, toutes les mesures proposées ne présentent pas des risques ou un coût financier élevé; mais leur mise en œuvre nécessite des études préalables approfondies. Si, au nom de la réduction des dépenses, on choisit l'option la moins coûteuse, on peut, à terme, obtenir un résultat contraire, à cause des pertes et des dommages qu'on aurait évités par d'autres options plus coûteuses. Il convient, néanmoins, de savoir que les situations varient d'un contexte à l'autre, d'où l'importance de mener des études minutieuses afin de déterminer les meilleures options, en fonction des régions. En matière de choix des options d'adaptation, le libre-choix des agriculteurs de s'adapter ou non ne doit pas être négligé. En effet, la majorité des agriculteurs sont réticents à l'application des mesures d'adaptation dans leurs exploitations, s'ils ne sont pas informés des changements climatiques et de leurs dangers futurs, et s'ils n'ont pas été consultés pendant la sélection des mesures d'adaptation. En prenant en compte leur connaissance du terroir et de leurs pratiques agricoles, on peut enrichir, de façon considérable, le processus de sélection des mesures d'adaptation, et susciter l'adhésion et la participation des agriculteurs à la mise en œuvre des mesures sélectionnées.

### 5.3. Eau

Le fleuve Congo est connu pour être une source stable et fiable d'eau de surface. Les changements climatiques ne causeront pas un assèchement de ce fleuve. En revanche, l'inverse est possible. Le débit annuel du fleuve pourrait augmenter, rendant le réseau fluvial plus sollicité. L'extension des périodes de sécheresse et l'augmentation des précipitations irrégulières peuvent rendre le fleuve plus dynamique. Avec l'augmentation du débit du fleuve, la dégradation des sols sera accélérée, avec des effets néfastes sur la fertilité des sols puis, sur la sécurité alimentaire. Pour protéger les humains et

l'élevage, la fourniture de l'eau potable doit être garantie. De nos jours, ce besoin constitue déjà un problème dans certaines zones qui subissent une pression démographique. Les effets de changements climatiques tels le rallongement des périodes de sécheresse augmenteront davantage cette pression. Le prochain paragraphe sera consacré à la gestion de l'eau, à la prévention des inondations, à la gestion de la sécheresse et à la fourniture d'eau potable.

En effet, pour mettre en œuvre les différentes mesures d'adaptation et assurer l'adaptation du secteur de l'eau aux changements climatiques, il est nécessaire d'améliorer la gestion de l'eau à travers la région. Le secteur de l'eau requiert une gestion solide, qui peut se faire de diverses manières. Des organismes locaux peuvent être mis en place, avec, comme mission, la prévention et l'étude des problèmes d'eau et l'élaboration des solutions à cet effet. Ils pourraient commencer par collecter des données sur l'eau et sensibiliser les autorités et les populations au sujet de la situation actuelle de l'eau potable, de l'eau de surface et des eaux souterraines. Sur la base des données collectées, un plan de gestion des ressources en eau peut être élaboré. Ces organismes pourraient, ainsi, agir comme des agents de mise en œuvre de la législation et des programmes étatiques, mais également comme des courroies de transmission, qui relaient les préoccupations des populations sur les questions d'eau, de gestion et de législation. Les tâches précises et le cadre d'action peuvent être décidés selon les besoins et les possibilités de chaque pays.

Afin de prévenir la pénurie d'eau pendant la sécheresse, une gamme variée de techniques de conservation des eaux du sol peut être utilisée. Ces techniques peuvent inclure le paillage, la formation des bourrelets de niveau, l'aménagement de terrasses, etc. (voir Figure 8) De cette façon, l'eau est maintenue plus longtemps à la surface du sol, et augmente la productivité de l'eau des cultures (PEC). L'amélioration de la capacité de rétention d'eau du sol réduit les risques d'assèchement des sols.

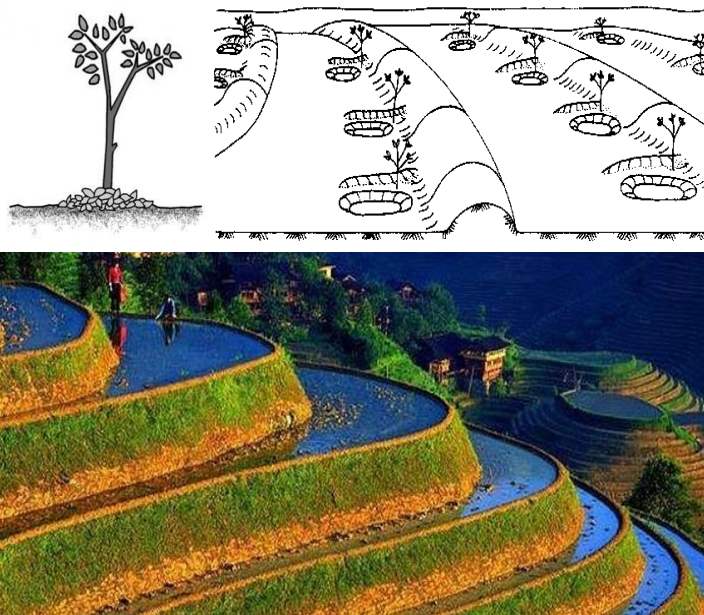


Figure 7 Techniques de conservation de l'eau du sol. en haut à gauche (paillage du sol autour de la plante), en haut à droite: paillage, en bas: photo illustrant la technique d'aménagement des terrasses.

Les techniques d'économie d'eau du sol peuvent être insuffisantes si la période de sécheresse se prolonge. La relance de la collecte d'eau de pluie (CEP), une technique simple mais efficace, assure les besoins annuels en eau (voir figure 9). Cette technique est applicable sur les projets à petite ou à grande échelle. Les agriculteurs peuvent, par exemple, utiliser cette eau pour irriguer leurs cultures, en particulier les fruits et les légumes.



Figure 8. CEP de petite échelle en Éthiopie ([www.waterworld.com](http://www.waterworld.com))

Pendant les périodes de sécheresse, la fourniture en eau potable devient beaucoup plus difficile qu'à l'accoutumée. Des solutions à ce problème peuvent être aussi simples que l'aménagement de puits d'eau potable supplémentaires, creusés en fonction du niveau des eaux de fonds en temps de sécheresse futur, et capables d'assurer les besoins en eau potable des communautés. Il est facile de constituer des réserves d'eau en temps d'abondance, ce qui permet de sauver de nombreuses vies en palliant le manque d'eau potable en période de sécheresse. La constitution des réserves peut être organisée par village, par communauté ou par zone. Cette activité peut, ainsi, se déployer à des échelles différentes. Le réseau d'aqueduc public (RAP) constitue un moyen efficace d'acheminer l'eau vers les zones non desservies. Il représente un investissement lourd, dont la gestion est parfois complexe, même si de nombreux pays y ont recours, en partie. Le message essentiel de l'adaptation aux changements climatiques dans le secteur de l'eau voudrait qu'à la phase de conception des systèmes d'adduction d'eau, l'on anticipe un ensemble de scénarios de changements climatiques futurs. Les systèmes conçus doivent également assurer la fourniture d'eau, en quantité suffisante, en périodes de sécheresse. En outre, ils doivent être maintenus et protégés de la pollution pendant les inondations.

Pendant la petite saison de pluie, le niveau journalier des précipitations est censé être élevé, ce qui augmente les risques d'inondation. Afin de renforcer la résilience des fleuves et des dragues aux débits élevés, on peut procéder à des dragages supplémentaires ou à des élargissements, de sorte que le surplus d'eau s'écoule librement. Les systèmes fluviaux devraient drainer plus d'eau pendant les débits de pointe. De cette façon, les périodes de débits minimums qui suivent, seront plus longues. Dans les zones à risque, des techniques de stabilisation du fleuve peuvent être utilisées (par exemple l'aménagement des berges du fleuve, la construction des digues, des barrages, des déversoirs, etc.). Un accent particulier doit être mis sur la sécurité des hommes et sur la prise en compte de la dynamique du fleuve dans les années à venir.

Les moyens logistiques d'acheminement de l'eau revêtent une importance particulière, même si l'intérêt primordial peut être la bonne qualité de cette eau qui doit être utilisée pour la consommation humaine. Afin de limiter la rétropollution de l'eau, la construction des stations de traitement des eaux

permet d'améliorer la disponibilité de l'eau potable. Cette mesure est bénéfique pour la santé et la productivité des populations.

#### 5.4. Énergie

La biomasse et l'énergie hydroélectrique constituent les principales sources d'énergie qui seront affectées par les changements climatiques dans les pays de COMIFAC. Nos études montrent que les changements climatiques n'entraîneront pas une baisse du potentiel hydroélectrique total, mais une baisse de la fourniture en énergie due à l'augmentation de la variabilité des débits du fleuve (Ludwig et al., 2013). De même, la production totale de la biomasse sera maintenue, malgré les changements climatiques. Cependant, l'augmentation de la variabilité du climat augmentera la pression exercée sur les écosystèmes forestiers (Ludwig et al., 2013).

Avec la croissance démographique continue et le développement de la région, la demande en énergie va connaître une hausse. En renforçant la fourniture en énergie de la région, il serait important de tenir compte de changements climatiques. L'énergie hydroélectrique constitue une source d'énergie attractive dans la région. Elle présente, par ailleurs, un potentiel certain. Il est, toutefois, important de prendre conscience de la baisse de la disponibilité de l'eau dans le futur, une situation qui rendra moins sûre la fourniture de l'énergie hydroélectrique. Pour cette raison, il est important d'élaborer un système de fourniture énergétique plus diversifié, capable de satisfaire les besoins en énergie, même en temps de sécheresse.

L'énergie hydroélectrique ne doit pas provenir uniquement de grands systèmes. Au niveau local, il est également possible de construire de petites centrales hydroélectriques. Ces centrales peuvent assurer les besoins en énergie d'un nombre important de ménages. De plus, elles pourraient aider à réduire la consommation de la biomasse et du charbon. Des microcentrales peuvent être construites en banlieue de petites villes, afin d'assurer l'approvisionnement de ces villes en énergie. Les communautés locales peuvent opter pour une gestion autonome de leurs barrages; ils ont besoin, à cet effet, d'éducation et de formation. L'exploitation d'autres sources d'énergie renouvelable comme le soleil et le vent devraient également être encouragée. En effet, elles peuvent constituer une source excellente d'énergie au niveau local. Afin de déterminer la source d'énergie la plus efficace pour une zone, on peut lancer un projet pilote d'exploitation de diverses sources d'énergie renouvelable. On évite ainsi d'investir dans de grands projets, sans essai préalable.

Outre les sources d'énergie renouvelable, le recyclage des déchets permet également la production d'énergie. À titre d'illustration, on peut citer la fabrication de «briquettes» (voir Figure 10) à partir des déchets (www.gvepinternational.org). Les briquettes sont fabriquées à partir de la sciure calcinée, des déchets agricoles ou des déchets de charbon. La sciure est un déchet qui peut être acheté bon marché ou même ramasser gratuitement sur les sites de coupe du bois. La formation des «briquettes » ne nécessite pas toujours des investissements trop importants ou des technologies trop avancées (la production mécanisée ne permet pas d'optimiser le rendement). Ainsi, cette activité permet la création d'emplois et génère des revenus pour les populations.



Figure 9, Petite activité de vente des «briquettes»  
(www.gvepinternational.org).

Il importe de limiter l'exploitation du bois aux fins de production de l'énergie de la biomasse. De cette façon, on réduirait les dégâts subis par les forêts et l'écosystème, mais aussi de juguler les effets délétères de cette pratique sur la santé humaine. Il est nécessaire de d'élaborer et de mettre en œuvre un programme de bois-énergie qui comprenne des mesures législatives axées sur la gestion forestière, afin de minimiser la destruction de la forêt vierge, mais qui permettent également de mettre des cuiseurs à bois sécurisés à la disposition des populations qui dépendent des feux ouverts ou d'autres types de dispositif non sécurisés ( ou de fortune). Ces mesures pourraient également aider à encourager les populations ou à les éduquer à l'utilisation d'autres sources d'énergie.

Pour faire face à la demande sans cesse croissante en énergie, du fait de la croissance démographique, on peut envisager de sensibiliser les populations aux meilleures options d'économie d'énergie. Ces plans peuvent être mis en œuvre à travers les écoles locales, des émissions de radio et de télévision, et d'autres canaux de communication. Il est utile de recenser les tenanciers de petits commerces (vendeurs de briquettes, par exemple), et de leur attribuer des fonctions, dont la participation à un système d'information destiné à sensibiliser les populations au sujet de l'utilisation efficace et sécurisée de l'énergie. Il est, tout aussi important de susciter la motivation personnelle des individus à promouvoir le changement.

En matière de gestion des barrages, il existe une grande relation ente les secteurs de l'eau et de l'énergie. Pour une production optimale d'énergie, il faut disposer de réservoirs d'eau aussi pleins que possible. Toutefois, si les réservoirs sont totalement pleins et qu'il y a des précipitations abondantes en amont, des quantités importantes d'eau doivent être évacuées du barrage, avec le risque d'inondation à grande échelle en aval. Par exemple, en septembre 2012, l'évacuation du réservoir de Lagdo, au Cameroun, a entraîné des inondations massives au Nigeria. Afin de réduire le risque d'inondation, les réservoirs ne doivent pas être pleins avant les crues. Cependant, cette mesure est susceptible d'entraîner une baisse de la fourniture en énergie, au cas où la pluviométrie est faible pendant la saison des pluies. Dans l'avenir, les changements climatiques rendront plus difficile la conciliation des mesures de réduction du risque avec l'optimisation de la production d'énergie; les changements causeront un accroissement de la variabilité des débits fluviaux. Néanmoins, l'amélioration des plans de gestion des barrages pour une adaptation aux changements climatiques est un impératif absolu.

## 5.5. Amélioration de la capacité d'adaptation

Lorsque des changements surviennent, la manière et la capacité à y faire face déterminent la vulnérabilité et les conséquences (cf. chapitre 2). La capacité d'adaptation du BC est généralement faible. Même si la population est consciente des problèmes causés par les changements climatiques et affiche une volonté de les combattre, nombre d'autres obstacles entravent le processus d'adaptation. À côté de l'instabilité politique qui caractérise la région, viennent directement le manque de moyens matériels et financiers, des insuffisances en termes de gestion, d'éducation et de bonne gouvernance, toutes choses qui sapent les efforts d'amélioration de la capacité d'adaptation. Le climat connaît déjà des variations, et les déficits d'adaptation ont des effets sur la région. Dans le présent paragraphe, quelques exemples de mesures d'adaptation sont présentés; ils touchent à l'éducation, à l'adoption de systèmes d'alerte rapide, à la construction des infrastructures, à la gestion et à la sensibilisation, une série de mesures qui renforcent la capacité totale d'adaptation aux changements climatiques.

### Systeme d'alerte rapide

*«Il est beaucoup plus efficace d'évacuer les populations avant la survenue d'une inondation que de faire du sauvetage .... Il est beaucoup plus efficace d'aider les agriculteurs à trouver des moyens de subsistance alternatifs que de leur apporter une aide alimentaire après de mauvaises récoltes.» (IFRC, 2008)*

Un agriculteur averti peut décider de cultiver une spécification, une fois qu'il est informé de l'inadéquation entre sa première culture et les conditions climatiques de la saison attendue. Les communautés peuvent recevoir un appui en vue de leur évacuation, après qu'elles sont informées d'une inondation imminente du fleuve environnant, en raison de fortes pluies tombées en amont. Des vies peuvent être sauvées, des revenus sécurisés, s'il est mis en place un système d'alerte rapide fonctionnel qui permet la communication efficace et l'action.

Grâce aux progrès scientifiques, l'humanité est, aujourd'hui, en mesure de mieux prévoir le climat futur et les phénomènes extrêmes. Lorsqu'on est informé par rapport aux événements futurs, on a l'avantage de se préparer en conséquence. Le système d'alerte rapide ne sert pas uniquement à prévoir les événements. Il sert également à organiser la communication autour et à réagir avec efficacité aux savoirs acquis. Un système d'alerte rapide efficace allie recherche, résolution des problèmes et communication; il nécessite une coordination entre différents secteurs, spécialistes et organisations.

Les systèmes d'alerte rapide existent sous diverses formes, et servent à divers niveaux (local, national, régional, global). Il existe de nombreux systèmes particuliers d'alerte rapide: alerte à l'ouragan, au tsunami, à la sécheresse, etc. Le choix du type de système est fonction de la zone cible, et des paramètres d'opérationnalisation de ce système.

En Afrique centrale, l'agriculture constitue l'une des principales sources de revenus. Les populations en dépendent pour leur sécurité alimentaire, leurs revenus et leurs moyens de subsistance. Les systèmes agricoles dépendent des conditions climatiques saisonnières. De ce fait, la mise en place d'un système d'alerte rapide destiné aux prévisions météorologiques pour le secteur agricole (un système d'alerte hydro-agro-météorologique) permet de réduire les risques d'échec des cultures et les conséquences qui s'en suivent. La communication la plus efficace possible dépend surtout du type de média utilisé. Selon les besoins, on peut avoir recours à la télévision, à la radio, au téléphone mobile, à la presse mais, également, à la prospection menée par des volontaires afin d'avertir les populations et de leur proposer des solutions ou leur porter assistance en cas d'évacuation (PANA Rép. du Burundi, 2007; NAPA Rép. du Rwanda, 2006).



Les systèmes d'alerte rapide ne sont pas une nouveauté. Depuis plusieurs années, les États et des structures internationales mettent au point des systèmes et en assurent le suivi. L'Afrique centrale n'est pas en reste, malgré la crise socioéconomique et d'autres formes d'instabilité politique qui font échouer la plupart de telles initiatives ou les entravent sérieusement. La relance du processus de création des systèmes d'alerte rapide et l'amélioration de ces systèmes devrait constituer une priorité de premier ordre, afin que soit réduite la vulnérabilité aux phénomènes futurs extrêmes.

### Éducation et sensibilisation

La sensibilisation de la population au phénomène des changements climatiques et à leurs impacts, puis aux opportunités qu'ils offrent, est de la plus haute importance. En effet, si l'on ignore les conséquences possibles d'un certain phénomène, on ne pourrait jamais songer à s'y adapter ou à favoriser l'implantation changements proposés par les pouvoirs publics ou d'autres organes de décision. Au fil du temps, les hommes ont fait preuve de créativité en matière de gestion des problèmes. S'ils sont informés des changements climatiques futurs et de leurs impacts dans leurs vies, alors ils laissent libre cours à cette créativité et peuvent donc concevoir des options personnelles d'adaptation. Lorsque les populations ne sont pas éduquées aux opportunités et aux conséquences de certains choix, elles ont généralement tendance à pencher pour des solutions à court terme (ou des solutions qui se révèlent être des options de maladaptation) ou encore remettent à plus tard la résorption des déficits d'adaptation.

### Gestion et intégration

Pour une adaptation réussie aux changements climatiques, dans les secteurs de l'eau, de l'énergie, de la foresterie et de l'agriculture, il est nécessaire d'améliorer la gestion à divers niveaux. Toutefois, ces secteurs doivent être gérés en synergie. En effet, les changements climatiques et le développement futur rapprocheront davantage ces différents domaines. La demande en ressources hydriques, agricoles et énergétiques s'accroîtra. Parallèlement, les changements climatiques accentueront la pression exercée sur ces ressources. La mauvaise gestion des barrages hydroélectriques peut causer de graves inondations. De même, l'utilisation abusive de l'eau par le secteur agricole est susceptible d'entraîner une baisse de la production en énergie. Dans un projet de construction d'un grand barrage hydroélectrique, les acteurs du secteur énergétique ne doivent pas être les seuls impliqués. Des projets d'autres secteurs peuvent causer des dommages sur les installations d'eau potable, les écosystèmes et les moyens de subsistance situés en aval. Dans le cadre de la gestion forestière, une certaine aire de la forêt peut être entourée, afin que son écosystème soit protégé. Cependant, si cette forêt constituait le principal moyen de subsistance d'un petit village, la mesure prise pourrait avoir des conséquences désastreuses sur la vie des populations locales. La conception de projets intégrés revêt une importance capitale en matière d'élaboration et de mise en œuvre des mesures d'adaptation aux changements climatiques.

La gestion des terres et la planification de leur utilisation n'ont pas encore été abordées dans le texte, même si l'adaptation de l'utilisation future de la terre aux changements climatiques présente un intérêt majeur. Par ailleurs, l'amélioration des infrastructures aux niveaux local, national ou international aide au renforcement de la capacité d'adaptation, car cette mesure rend possible le transport des aliments, de l'eau et d'autres ressources. De même, si un besoin d'évacuation se pose, un réseau routier de qualité rend l'opération possible et rapide, ce qui renforce la sécurité des hommes et réduit les pertes économiques. La lutte contre l'érosion devra s'intensifier, car la recrudescence des phénomènes extrêmes entraînera un accroissement des risques d'érosion. Les exemples ci-dessus présentés illustrent l'importance de l'intégration des différents secteurs dans le processus d'adaptation aux changements climatiques.

Parfois, les mesures relatives à l'adaptation aux changements climatiques et les plans de développement ne sont pas coordonnées, alors qu'il existe parfois une grande similarité entre les objectifs de ces initiatives. Les plans de développement et d'adaptation aux changements climatiques sont élaborés séparément. Pourtant, l'adaptation aux changements climatiques ne doit pas être la seule responsabilité du ministère chargé de l'environnement. Le phénomène de changements climatiques est capable d'affecter l'ensemble de l'économie, du secteur agricole, des infrastructures, de la sécurité d'un pays, de la sécurité alimentaire ou de l'approvisionnement en eau. Pour cette raison, la lutte contre les changements climatiques doit occuper une place importante dans les différents départements ministériels. Si l'adaptation aux changements climatiques est prise en compte dans les initiatives de développement, celles-ci deviennent une mesure forte d'adaptation. Les projets n'offrant pas de résilience aux changements climatiques peuvent se révéler être des investissements à perte. En définitive, l'approche intégrée est fortement recommandée.

## 5.6 Intégration et financement de l'adaptation aux changements climatiques

La plupart des pays membres de la COMIFAC sont encore confrontés à des problèmes de développement énormes. Ici, les revenus des populations sont généralement bas, et les taux de pauvreté de ces pays sont encore élevés. Pour satisfaire les besoins alimentaires d'une population sans cesse croissante, la production agricole doit être améliorée considérablement. En outre, la gestion de l'eau de la région pose encore de nombreux défis, mais également, présente des opportunités. Par exemple, l'augmentation de la production d'énergie hydroélectrique dans le bassin du Congo peut constituer, dans l'avenir, un levier de la croissance économique. Les besoins de développement urgents ci-dessus énoncés sont de loin plus importants que l'adaptation aux changements climatiques. Cependant, même avec le développement futur, l'adaptation sera nécessaire. Afin d'éviter des investissements hasardeux et de réduire le coût de l'adaptation, les questions d'adaptation aux changements climatiques doivent être intégrées aux plans de développement futur. Il s'agit notamment des secteurs de l'eau, de l'énergie, de l'agriculture et de la foresterie. Dans l'idéal, l'adaptation aux changements climatiques doit être intégrée dans les initiatives de développement durable. Malheureusement, tout ceci est plus facile à dire qu'à faire. En effet, même les pays les plus développés, disposant de budgets de R&D, ont encore de la peine à intégrer des changements climatiques à d'autres programmes. Aujourd'hui, la complexité du problème de l'adaptation aux changements climatiques, les objectifs à long terme et les incertitudes qui entourent ce concept ne facilitent pas sa prise en compte dans les instances décisionnelles étatiques.

Vu que l'idéal serait de faire l'adaptation aux changements climatiques une préoccupation intersectorielle, il serait contradictoire d'élaborer des projets d'adaptation séparés. Seulement, nous vous mettons au défi de nous prouver le contraire. Il est important de mettre sur pied des projets d'adaptation afin de satisfaire les besoins les plus urgents en termes d'adaptation et, plus important encore, de trouver les moyens d'intégrer l'agenda de l'adaptation dans les initiatives de développement durable. À cet effet, l'une des activités les plus importantes du processus consisterait en la conception de projets d'adaptation qui puissent être financés par différents programmes de donateurs. Les rapports du présent projet offrent une base en vue de la conception de ces autres projets financés par les donateurs. Les capacités, les connaissances et l'expérience en matière d'adaptation aux changements climatiques sont limitées. Un objectif majeur du projet doit être le renforcement des capacités et des savoir-faire en matière de lutte contre les changements climatiques au sein de la région. Cet objectif est peut-être aussi important que les bénéfices immédiats des projets (en termes d'adaptation).

## 6. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Dans la région du bassin du fleuve Congo, la littérature et l'expérience relatives à l'adaptation aux changements climatiques sont limitées. Cependant, de nombreuses options d'adaptation testées et présentées dans d'autres régions du monde sont mises en œuvre dans les pays de la COMIFAC. Il est impératif d'améliorer les connaissances relatives à l'adaptation aux changements climatiques dans la région. Les activités en cours devraient être mieux documentées. Il importe, par ailleurs, de développer l'expérience, le savoir-faire et les capacités en matière d'adaptation aux changements climatiques.

Vu l'inexistence d'une littérature en matière d'adaptation, dans la région, nous nous sommes limités à prodiguer des conseils généraux de mise en œuvre des mesures d'adaptation au sein de la région.

La plupart des impacts des changements climatiques se traduiront par une variabilité accrue du climat. Par conséquent, l'adaptation devrait être orientée sur la réduction de la vulnérabilité due à cette variabilité. L'adaptation à la variabilité future du climat peut très bien être coordonnée avec l'amélioration de la variabilité actuelle du climat. Ce processus peut être assuré, par exemple, à travers la répartition des risques par diversification et par amélioration du niveau de préparation aux phénomènes climatiques extrêmes, aux sécheresses et aux inondations.

Dans le secteur de la *foresterie*, les mesures d'adaptation les plus importantes devraient être axées sur la prévention de la dégradation des forêts. Il s'agit de reboiser les zones où la forêt a disparu suite à des phénomènes naturels ou à l'activité de l'homme. De même, la promotion de l'agroforesterie doit être renforcée, afin que l'érosion recule.

Dans le secteur de l'*eau*, l'adaptation doit consister en la réduction de la vulnérabilité aux inondations. Il faudra, à cet effet, mettre sur pied des systèmes de prévention des inondations, éviter de mener des activités de développement dans des zones inondables, et bâtir, le cas échéant, des infrastructures de prévention des inondations (digues et levadons). En outre, il est important d'adapter les politiques de gestion des barrages. Si les régimes fluviaux deviennent plus variables et extrêmes, les barrages doivent retenir moins d'eau, afin d'éviter les ruptures de barrage et les évacuations d'urgence, qui sont susceptibles de provoquer des inondations en aval.

Dans le secteur *agricole*, l'adaptation doit être axée sur la réduction de la vulnérabilité causée par la hausse des températures futures, et à la variabilité accrue du climat. De nouvelles variétés adaptées à des températures élevées doivent être mises au point et/ou introduites. Par ailleurs, la lutte contre les parasites et les maladies doit être intensifiée dans les climats les plus chauds. En vue de l'adaptation à la variabilité future du climat, des programmes doivent être lancés, afin d'améliorer la gestion de la variabilité actuelle de ce climat. Ce processus peut être assuré à travers, par exemple, la diversification des systèmes agricoles et la gestion améliorée des eaux et des nutriments.

Dans le secteur de l'*énergie*, il est important de se préparer à la baisse, dans le futur, du potentiel hydroélectrique. Pour ce faire, le secteur de l'énergie doit être diversifié. En plus des grandes centrales hydroélectriques, il est nécessaire de multiplier les dispositifs locaux de production d'énergie. Par exemple, les biocarburants, l'énergie solaire et les microcentrales hydroélectriques peuvent être utilisées.

Les changements climatiques futurs auront des effets sur les ressources en eau et en énergie, ainsi que sur la sécurité alimentaire. De nombreuses mesures d'adaptation doivent être adoptées, pour une meilleure sécurité de ces ressources. Avant même la survenue de changements climatiques, de nombreux pays de la COMIFAC sont déjà confrontés aux problèmes d'eau, d'énergie, et/ou de disponibilité des aliments. Il est nécessaire que les mesures adoptées afin d'améliorer la disponibilité de ces ressources tiennent compte de la variabilité du climat et des changements climatiques.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALBRECHT, J. & MONODI OLOO, W. 1993. Keny Forestry Seed Centre A Project Concept And Its Contribution Towards Development. *Forest Genetic Resources Bulletin*, 21.
- ASHTON, P. 2002. Avoiding conflicts over Africa's water resources. *Ambio*, 31, 236-242.
- BARNETT, J. & O'NEILL, S. 2010. Maladaptation. *Global Environmental Change*, 20, 211-213.
- BEYENE, T., LUDWIG, F. & FRANSSSEN, W. 2013. The Potential Consequences of Climate Change in the Hydrology Regime of the Congo River Basin. In: *Climate Change Scenarios for the Congo Basin*. [Haensler A., Jacob D., Kabat P., Ludwig F. (eds.)]. *Climate Service Centre Report No. 11, Hamburg, Germany, ISSN: 2192-4058*.
- CBFP 2006. The Forests of the Congo Basin: State of the Forest 2006. In: DEVERS, D. & VANDE WEGHE, J. P. (eds.). Kinshasa.
- DE LOË, R., KREUTZWISER, R. & MORARU, L. 2001. Adaptation options for the near term: Climate change and the Canadian water sector. *Global Environmental Change*, 11, 231-245.
- DESSAI, S. & HULME, M. 2003. Does climate adaptation policy need probabilities? *Tyndall Working Paper 34*. Norwich: Tyndall Centre.
- FEENSTRA, J. F., BURTON, I., SMITH, J. B. & TOL, R. S. J. 1998. *Handbook on methods for climate change impact assessment and adaptation strategies*, [S.l.], UNEP [etc.].
- GOULDEN, M., CONWAY, D. & PERSECHINO, A. 2009. Adaptation to climate change in international river basins in Africa: A review. *Hydrological Sciences Journal*, 54, 805-828.
- HAENSLER, A., SAEED, F. & JACOB, D. 2013: Assessment of projected climate change signals over central Africa based on a multitude of global and regional climate projections. In: *Climate Change Scenarios for the Congo Basin*. [Haensler A., Jacob D., Kabat P., Ludwig F. (eds.)]. *Climate Service Centre Report No. 11, Hamburg, Germany, ISSN: 2192-4058*.
- IFRC 2008. *Early warning > Early action*, Geneva, International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies
- KALAME, F. B., AIDOO, R., NKEM, J., AJAYIE, O. C., KANNINEN, M., LUUKKANEN, O. & IDINOBA, M. 2011. Modified taungya system in Ghana: A win-win practice for forestry and adaptation to climate change? *Environmental Science and Policy*, 14, 519-530.
- KATES, R. W., AUSUBEL, J. H. & BERBERIAN, M. 1985. *Climate impact assessment : studies of the interaction of climate and society*, Chichester [etc.], Wiley.
- LUDWIG, F., FRANSSSEN, W., JANS, W., BEYENNE, T., KRUIJT, B. & SUPIT, I. 2013. Climate Change Impacts on the Congo Basin Region. In: *Climate Change Scenarios for the Congo Basin*. [Haensler A., Jacob D., Kabat P., Ludwig F. (eds.)]. *Climate Service Centre Report No. 11, Hamburg, Germany, ISSN: 2192-4058*.
- MACCARTHY, J. J. & INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE 2001. : *Impacts, adaptation, and vulnerability*, Cambridge [etc.], Cambridge University Press.
- NAPA REP. OF BURUNDI 2007. NAPA Republic of Burundi. In: MINISTRY FOR LAND MANAGEMENT TOURISM AND ENVIRONMENT (ed.). Bujumbura.
- NAPA REP. OF RWANDA 2006. NAPA Republic of Rwanda. In: MINISTRY OF LANDS ENVIRONMENT FORESTRY WATER AND MINES (ed.). PNUE.
- PARRY, M. & INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE, C. 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 [etc.], Cambridge University Press.
- SCHIPPER, L. F., PAZ CIGARÁN, M. & MCKENZIE HEDGER, M. 2008. Adaptation to climate change: the new challenge for development in the developing world. UNDP.
- SMIT, B. & WANDEL, J. 2006. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global Environmental Change*, 16, 282-292.
- SONWA, D. J., NKEM, J. N., IDINOBA, M. E., BELE, M. Y. & JUM, C. 2012. Building Regional Priorities in Forests for Development and Adaptation to Climate Change in the Congo Basin. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 17, 441-450.
- SULLIVAN, C. A. & HUNTINGFORD, C. Water resources, climate change and human vulnerability. 2009. 3984-3990.
- THE WORLD BANK 2009. Identifying Appropriate Adaptation Measures to Climate Change. *Guidance Notes: Mainstreaming Adaptation to Climate Change in Agriculture and Natural Resources Management Projects*. Washington.
- TOMPKINS, E. L., BOYD, E., NICHOLSON-COLE, S. A., WEATHERHEAD, K., ARNELL, N. W. & ADGER, W. N. 2009. An inventory of adaptation to climate change in the UK: challenges and findings. Norwich: Tyndall Centre for Climate Change Research, University of East Anglia.
- UKCIP. 2011. *Identifying adaptation options (AdOpt)* [Online]. Oxford: UKCIP. Available: <http://www.ukcip.org.uk/adopt/>.
- VERCOE, T. & MIDGELY, S. 1993. Australian tree seed centre - an update on current programs and information on seed procurement for researchers. *Forest Genetic Resources Bulletin*.
- VINCENT, K. 2004. Creating an index of social vulnerability to climate change for Africa. *Tyndall Centre Working Paper 56*. Norwich: Tyndall Centre for Climate Change Research.
- WOREDE, M. 2011. Establishing a community seed supply system: community seed bank complexes in Africa. In: CHING, L. L., EDWARDS, S. & EL-HAGE SCIALABBA, N. (eds.) *Climate Change and food systems resilience in sub-saharan Africa*. Rome: FAO.

## ANNEXES

### Annexe 1 Tableau des mesures d'adaptation élaborées pour la région

**Tableau d'adaptation** Mesures d'adaptation existantes et publiées antérieurement

**Légende:**

**Mesure d'adaptation** Titre/désignation de la mesure proposée

**secteur:**

**A** *Agriculture*

**F** *Foresterie*

**E** *Eau*

**É** *Énergie*

**G** *Gestion*

**Description** Descriptif de la mesure proposée

**Justification** Raison de l'efficacité de cette mesure. Contextes possibles d'application de cette mesure

**Référence** Sources

N°	Mesure d'adaptation	secteur	Description	Justification	Exemples (CCNUCC et autres)	Référence
1	Agriculture					
1.1	Choix de la culture (l'espèce)	A	Produire les cultures les plus adaptées aux nouvelles conditions climatiques Par exemple, des variétés qui mûrissent plus ou moins vite, en fonction des changements survenus dans la saison des pluies. Cultures xérophiles ou résistantes à la chaleur	Les aliments utilisés d'habitude pourraient ne plus croître ou produire une récolte suffisante, en raison du changement des conditions climatiques. Ainsi, avec le changement du contexte climatique, l'adoption des cultures qui produisent une récolte satisfaisante représente un moyen de réduire les risques d'échec des cultures, donc de renforcer la sécurité alimentaire.		PANA Burundi, PANA Rwanda, Schulte-uebbing 2011, Feenstra et al., 1998
1.2	Introduction de variétés d'espèces	A	Diversification des cultures par la production de plusieurs espèces, qui comportent, toutes, une légère différence dans leurs conditions climatiques idéales	La diversification des cultures constitue un moyen d'étaler les risques liés aux dégâts causés par les changements climatiques		PANA Rwanda, Lipper et al., 2010
1.3	Élaboration du calendrier des cultures	A	Changement des saisons de culture, des périodes de semis Modification des dates de semis hâtifs et de semis tardifs	Adaptation du temps des labours aux nouvelles conditions climatiques, en vue de l'augmentation de la probabilité d'obtenir de bonnes récoltes	<u>Cultures mixtes au Burkina Faso</u>	Schulte-uebbing 2011, Feenstra et al., 1998
1.4	Changement de la zone des cultures	A / F	Transfert des cultures vers une zone où le climat futur leur sera plus favorable	Avec cette mesure, les pertes de cultures dues aux changements climatiques peuvent être évitées, en raison du choix d'une zone qui sera ou restera favorable à l'espèce cultivée		Schulte-uebbing 2011, Bwalya & Friedrich 2002
1.5	Extension de la zone des cultures	A / F	Extension de la zone des cultures, en vue de l'introduction d'autres spécifications non cultivées antérieurement	Les conditions climatiques nouvelles permettent l'introduction de nouvelles espèces, en complément des espèces déjà produites Cette mesure permet la diversification des espèces cultivées et, par ricochet, d'obtenir de meilleures récoltes et d'augmenter les revenus.		Schulte-uebbing 2011
1.6	Optimisation de l'activité agricole sur les sols argileux	A / E	Les sols argileux ont une forte capacité de retenue d'eau, dont on peut tirer parti pendant les sécheresses et les périodes de sécheresse prolongée	Plus la capacité de retenue d'eau des sols est élevée, plus efficace est l'utilisation de l'eau, moins il y a de perte en eau due à l'évaporation ou au lessivage, et plus longtemps les plantes résistent aux longues périodes de sécheresse, ce qui n'est pas le cas avec les autres types de sol.		Schulte-uebbing 2011, Dinar et al., 2008
1.7	Promotion des techniques de stockage des produits agricoles après la récolte	A	Permet le stockage sécurisé des aliments, loin de la pourriture et des parasites, pour la sécurité en temps de pénurie	Avec l'utilisation des techniques de stockage qui préviennent l'invasion par les parasites et/ou la pourriture des récoltes, ces ressources peuvent être gardées plus longtemps et en bon état, et assurer les besoins en temps de pénurie.	<u>Stockage des récoltes en Égypte</u>	PANA Rwanda
1.8	Augmentation des engrais (N)	A	Augmentation de la quantité d'engrais utilisée, réutilisation du fumier, ou de l'engrais inorganique, ou renforcement d'autres méthodes de fertilisation	Le renforcement de la fertilisation augmente les récoltes. Les cultures sont mieux protégées des effets des changements climatiques et sont plus robustes grâce aux suppléments nutritifs des engrais, par rapport aux plantes non engraisées.	<u>Trous de semis de neuf semences de maïs au Kenya</u>	Schulte-uebbing 2011, Lipper et al., 2010

N°	Mesure d'adaptation	secteur	Description	Justification	Exemples (CCNUCC et autres)	Référence
<b>2</b>	<b>Élevage</b>					
2.1	promotion de l'élevage à zéro pâturage	A	Gestion des pâturages: les animaux ne vont pas dans le pâturage, mais sont nourris au fourrage qui y est récolté. Cette technique permet d'améliorer l'utilisation du foin	Les animaux nourris au foin sont mieux protégés en temps de sécheresse. De plus, leur productivité est accrue et leur résistance renforcée.	<u>Élevages caprins au Maroc et à Nakapiripirit, Ouganda</u>	PANA Burundi, Morrison 2003, Lipper et al., 2010
2.3	Promotion des systèmes agro-sylvo-pastoraux	A / F	Diversification des sources de revenu par la promotion des systèmes agro-sylvo-pastoraux: combinaison de l'agriculture et de l'élevage au sein des ménages, en fonction des nouvelles conditions climatiques.	Diversification des sources de revenu, répartition des risques. Permet à l'éleveur de produire également des cultures, et vice versa, augmente la possibilité de renforcer la sécurité alimentaire et des revenus pendant les phénomènes climatiques extrêmes et les changements du climat.		PANA Rwanda, Lipper et al., 2010
2.4	Promotion des services vétérinaires et phytosanitaires	A	«Amélioration de la santé animale à travers la fourniture de services vétérinaires et le traitement des épizooties» Pour les plantes, on vise les mêmes objectifs grâce aux services phytosanitaires	«Avec l'amélioration de la santé des animaux, on augmente la production laitière». «L'amélioration de l'efficacité permet d'augmenter la production et les revenus mais surtout, on utilise un cheptel moins important, et on exploite moins les ressources» Les services phytosanitaires devraient être mis en place pour les cultures résistantes aux parasites	<u>Amélioration de la production laitière à Cajamarca, Pérou (Site internet en espagnol)</u>	PANA Rwanda, Lipper et al., 2010
2.5	Amélioration des techniques d'élevage	A	Amélioration des techniques d'élevage utilisées, en vue du renforcement de la santé des animaux, et, par ricochet, du taux de survie aux épizooties, ainsi que du revenu des agriculteurs	Enseignement et promotion de nouvelles techniques de production du fourrage, des techniques de zéro pâturage, construction/entretien des abris pour animaux, fourniture d'eau, etc., aux fins d'amélioration de la santé et de la vie des animaux, ainsi que du revenu des agriculteurs. Les animaux en bon état résistent mieux aux changements climatiques que ceux qui sont mal entretenus	<u>Élevages caprins au Maroc et à Nakapiripirit, Ouganda</u>	Schulte-uebbing 2011
<b>3</b>	<b>Agroforesterie</b>					
3.1	Système Taungya modifié (MTS)	F / A	Le MTS est une technique d'agroforesterie qui permet la plantation intercalaire des arbres (fruitiers) et d'autres cultures. Garantie de la sécurité alimentaire, réduction de l'érosion et apport de sources supplémentaires de bois de chauffage/bois/engrais/etc.	"Le mélange des arbres et des arbustes avec les cultures constitue, pour les agriculteurs, un moyen d'améliorer leur sécurité alimentaire". La diversification des revenus permet la répartition des risques. Les arbres améliorent la fertilité et l'humidité des sols, à travers l'augmentation de leur matière organique	<u>Système taungya modifié dans la zone transitoire du Ghana</u>	Schulte-uebbing 2011 --> Kalame et al., 2011, Roberts 2009, Lipper et al., 2010
3.2	Maintien des arbres comme brise-vent/boucliers	F / A	Plantage et culture des arbres à des endroits stratégiques, afin de protéger les cultures des dégâts	«Diminue les effets des phénomènes climatiques extrêmes tels les fortes précipitations, les sécheresses et les tempêtes». En plus de protéger les cultures, les arbres constituent également un engrais naturel pour les plantes; elles renforcent la matière organique des sols et les protègent contre l'érosion		Schulte-uebbing 2011, Lipper et al., 2010

N°	Mesure d'adaptation	secteur	Description	Justification	Exemples (CCNUCC et autres)	Référence
4	Foresterie					
4.1	Massifs montagneux avec des bandes de forêts	F	Reboisement en vue de la réduction de l'érosion, la protection contre la sécheresse et l'aridité, la fertilisation naturelle du sol et la production des aliments ou du bois.	En dehors des effets d'atténuation du reboisement, cette technique permet également l'adaptation car elle apporte la stabilité nécessaire à l'augmentation des ressources alimentaires et du revenu		PANA Burundi
4.2	Rechercher les espèces locales ou exotiques d'arbres qui soient résistantes à la sécheresse et aux épiphyties	F	Adaptation aux conditions climatiques attendues, à travers le choix d'espèces bien appropriées pour ces conditions et disponibles sur place, ou à rechercher ailleurs pour être introduites	Les espèces cultivées d'habitude pourraient ne plus croître ou produire une récolte suffisante, en raison du changement des conditions climatiques. Ainsi, avec la variation du contexte climatique, l'adoption des espèces d'arbres qui produisent une récolte satisfaisante représente un moyen de réduire les risques de perte dans ce secteur.	<u>Domestication des arbres fruitiers sauvages au Botswana</u>	PANA Burundi, Roberts 2009
4.3	Reconstitution des ressources forestières existantes	F	Utilisation des graines ou des boutures d'arbres ou d'arbustes naturels morts à cause de la déforestation ou d'autres facteurs, aux fins de restauration des ressources naturelles utiles à la production des aliments et d'autres moyens de subsistance.	La reconstitution des ressources naturelles permet d'apporter, aux communautés, un ensemble de sources de nourriture. Une alimentation variée aidera à maintenir la communauté en bonne santé, et renforcera sa capacité à résoudre les problèmes dûs aux changements climatiques. La reconstitution des ressources naturelles permet de renforcer l'écosystème (la biodiversité), et sa capacité à faire face aux changements climatiques.	<u>Arbres de moringa au Sénégal</u>	PANA Burundi
4.4	Restauration des terrains boisés existants	F/E	«Renouveau des terrains boisés détruits»	Reboisement en vue de la production du bois, du bois-énergie, et de la protection de la source d'approvisionnement des communautés et des entreprises en bois Cette mesure permet de préserver les terrains boisés naturels, et d'assurer le revenu, ainsi que de fournir de l'énergie à la communauté		PANA Burundi
4.5	Reboisement des zones de captage des eaux	F/E	«Reboisement des zones de captage des eaux aux fins de restauration du système de l'écoclimat»	Le reboisement des zones de captage des eaux permet de prévenir l'érosion et l'appauvrissement des sols, ainsi que de compenser l'évaporation de l'eau. Cette mesure renforce également la capacité d'adaptation aux précipitations irrégulières, et à d'autres phénomènes climatiques extrêmes.		PANA Burundi
5	Eau de boisson					



5.1	Création de réseaux d'aqueducs publics (RAP)	E	Construction d'un système d'adduction d'eau potable pour les villages et les communautés (aqueducs, fontaines, etc.), afin d'assurer la fourniture en eau potable	Avec la construction d'un système d'adduction d'eau potable, cette eau peut être acheminée des sources d'eau vers les zones sans points d'eau ou disposant d'un nombre limité de points d'eau pendant la sécheresse.		PANA RCA, Sao Tomé et Príncipe
5.2	Construction de forages d'eau potable	E	Augmentation de la fourniture en eau potable à travers la multiplication des forages d'eau potable	On peut supporter les périodes de sécheresse, et de sécheresse prolongée, etc., en renforçant la fourniture en eau potable aux communautés.		PANA Rép. du Congo
5.3	Développement des méthodes de constitution des réserves en eau	E	Constitution des réserves en eau captées de diverses sources, afin d'assurer la fourniture en eau; mais aussi, de prévenir les inondations dues aux précipitations irrégulières	Le stockage de l'eau dans des bassins ou des zones de captage (eaux de pluie, eaux souterraines, etc.) permet d'assurer la fourniture en eau pendant la sécheresse et peut protéger des dégâts dus aux précipitations irrégulières.	<u>Bassins d'eau peu profonds à Turkana, Kenya</u>	Schulte-uebbing 2011, NAPA Congo rep

N°	Mesure d'adaptation	secteur	Description	Justification	Exemples (CCNUCC et autres)	Référence
6	Eau pour agriculture					
6.1	Promotion de l'agriculture non dépendante des pluies	A	Afin d'assurer l'autonomie par rapport à la saison de pluies, l'emploi d'autres techniques telles les techniques d'irrigation, la collecte des eaux de pluie, etc., peut être encouragé en vue de l'obtention de bonnes récoltes.	Le calendrier et la configuration de la/les saison(s) de pluie peuvent subir des changements. Afin de réduire sa dépendance vis à vis de cette saison de pluie, l'agriculture par irrigation aide à produire la nourriture et à générer des revenus		NAPA Rwanda, CAB international 2009
6.2	Extension de la zone d'irrigation	A	Réduction des parcelles arrosées par l'eau de pluie et pratique de l'irrigation en saison sèche. L'eau destinée à l'irrigation peut provenir, par ex., des fleuves environnants, des eaux de pluie collectées; l'irrigation au goût à goût est également bénéfique.	En assurant les besoins en eau des plantes, on peut améliorer les récoltes, car le stress hydrique dû aux changements climatiques est empêché.		Schulte-uebbing 2011
6.3	Relance des activités de collecte des eaux de pluie	A / E	Collecte et stockage des eaux de pluie afin d'assurer l'irrigation et l'élevage en temps de sécheresse.	«Cette mesure permet de réduire la vulnérabilité à la sécheresse, la pression exercée sur les points d'eau potable et les conflits liés à l'utilisation de l'eau potable.»	<u>Dispositifs de collecte des eaux dans le nord du Kenya</u>	Schulte-uebbing 2011, Partow 2011, NAPA Rwanda, NAPA Burundi
6.4	Construction des infrastructures d'irrigation	A / E	«Répartition des eaux d'irrigation sur les zones présentant une diversité sur les plans agro-écologique et hydro-écologique»	La construction des infrastructures d'irrigation permet d'assurer les besoins en eau des zones arides ; les agriculteurs sont confiants quant à leurs besoins en eau, et la capacité d'adaptation est renforcée sous forme de sécurité alimentaire. De même, les conflits liés à l'eau peuvent être réduits si l'eau est acheminée des points les mieux irrigués vers celles (éventuellement) en manque.		Schulte-uebbing 2011, Rosegrant et al., 2010

N°	Mesure d'adaptation	secteur	Description	Justification	Exemples (CCNUCC et autres)	Référence
<b>7</b>	<b>Eau de surface</b>					
7.1	Techniques de conservation de l'eau de surface	E	Paillage, formation des bourrelets de niveau, construction de terraces	Les techniques telles le paillage, la formation des bourrelets de niveau et la construction de terraces permettent l'amélioration de la Productivité de l'eau des cultures (PEC) Le renforcement de l'efficacité permet la réduction des risques		Schulte-uebbing 2011
7.2	Prévention de la pollution et traitement des eaux polluées	E	Souci de réduction, au maximum, de la pollution de l'eau et installation de stations de traitement des eaux afin de rendre l'eau potable et de la réutiliser	séparation systématique des eaux polluées et des eaux sales, traitement de l'eau polluée pour réutilisation Mise en place d'un système de production de l'eau plus stable		PANA Burundi
7.3	Stabilisation de la dynamique des cours du fleuve	E	Protection des fleuves qui entourent le paysage, les communautés et les infrastructures en stabilisant le fleuve et en écartant les risques/dangers sur certaines de ses parties. Entre autres, travaux d'entretien, élévation de terres, i.e.	les précipitations irrégulières peuvent entraîner une augmentation du débit des fleuves qui coulent près de la communauté, des infrastructures et des paysages protégés. En effectuant des travaux d'entretien et de nettoyage sur les parties vulnérables du fleuve, on évite l'inondation		PANA Burundi
7.4	Élargissement et dragage du lit du fleuve	E	Application de la <b>mécanique fondamentale des fleuves</b> en vue de l'augmentation du débit du fleuve	L'augmentation du débit du fleuve permet de prévenir ou de repousser les inondations		CN Congo
<b>8</b>	<b>Énergie</b>					
8.1	Promotion de l'utilisation des énergies nouvelles et des énergies renouvelables	E	Mise en œuvre des programmes d'utilisation d'autres formes d'énergie telles la bio-énergie (biomasse, biocarburant (bagasse et autres)), énergies solaire et éolienne, énergie hydroélectrique, etc.	Remplacement du bois-énergie par d'autres formes d'énergie, en vue de la réduction de la déforestation, mais aussi du renforcement de la sécurité énergétique, et des sources de revenu, etc.	<u>GVEP International</u>	PANA Burundi, PANA Sao Tomé et Principe, site Internet de GVEP
8.2	Promotion de la construction des (micro) centrales hydroélectriques	E/E	Renforcement de la fourniture en énergie par la multiplication des centrales hydroélectriques. Construction de petites centrales hydroélectriques en vue de l'amélioration des conditions de vie des populations villageoises	Le fleuve Congo est un cours d'eau stable; il peut être exploité, à diverses échelles, comme source d'énergie. Des centrales hydroélectriques de petite taille peuvent assurer les besoins en énergie d'un village ou d'une zone. «Sans électricité, il est impossible de produire et d'améliorer les moyens de subsistance de la population»		PANA Burundi, PANA Sao Tomé et Principe
8.3	Conception et construction de barrages/digues	E/E	Protection de la ligne de côte/du bassin du fleuve de l'élévation du niveau de la mer, par la construction de barrages/digues	Protection des communautés, des infrastructures, etc. des inondations, par la construction de digues et de barrages Possibilité de combiner ces initiatives avec la promotion de la construction des centrales hydroélectriques		PANA Burundi, CN Gabon

8.4	Promotion de l'utilisation, comme combustible, des déchets de bois issus des compagnies forestières (briquettes)	F/E	Fabrication des briquettes à partir de la sciure de bois ou d'autres déchets exploitables	Le remplacement du bois-énergie et du charbon permet de combattre la déforestation et la pollution. Les briquettes fabriquées à partir de déchets de bois constituent une source d'énergie durable et exploitable à faible coût (selon l'échelle d'exploitation)	PANA RCA, site Internet de GVEP
-----	--	-----	---	--	---------------------------------

N°	Mesure d'adaptation	secteur	Description	Justification	Exemples (CCNUCC et autres)	Référence
<b>9</b>	<b>Gestion des terres</b>					
9.1	Préparation des zones antérieurement marécageuses pour la production du maïs en contre-saison	A/F	En cas de sécheresse prolongée, certaines zones marécageuses peuvent être utilisées pour les cultures	On peut prendre les changements à son avantage en exploitant les zones devenues arides pour la production de cultures telles le maïs		Schulte-uebbing 2011
9.2	Lutte contre l'érosion	A/E	Boisement des zones (avec des arbres et des arbustes) et reboisement des terrains boisés détruits Cette mesure permet de réduire la vulnérabilité causée par l'érosion des sols, après, par exemple, des précipitations irrégulières et des inondations. Les arbres et les arbustes sélectionnés sont ceux adaptés aux nouvelles conditions climatiques	Le paillage des plantes permet de prévenir l'érosion. En réduisant la vitesse des gouttes de pluie, l'écoulement est ralenti et la surface de la terre reste poreuse.	<u>Ngare ou Mhindu ridging au Mozambique et au Zimbabwe</u>	PANA Burundi, PANA Rép. du Congo, PANA Rwanda
9.3	Construction des courbes de relief en vue de la lutte contre l'érosion	F/E/A	Prévention de l'érosion et de la déforestation par les cultures sur les courbes de relief	Les courbes de relief permettent de fixer les terres et les pentes instables De même, le labourage des courbes de relief situées dans les champs, et perpendiculaires aux pentes douces (valable pour les pentes douces uniquement) permet de prévenir l'érosion, car, les solides contenant de l'eau sont retenus.		PANA Burundi, Roose 1996
9.4	Amélioration des infrastructures locales et (inter)nationales	A/F./E	Amélioration de l'accès au marché et à d'autres services par la réhabilitation ou la construction de routes, de chemins de fer, etc.	L'amélioration des infrastructures permet aux agriculteurs d'écouler le surplus de leurs récoltes La nourriture, le bois et d'autres nécessités de base peuvent être transportés sur de plus longues distances et plus rapidement qu'au paravent. Améliore la capacité d'adaptation Les populations pourront, désormais, se rendre plus rapidement dans les hôpitaux ou dans d'autres services.		PANA Rép. du Congo, Feenstra et al 1998, CN Congo, Foster & Briceño-Garmendia 2010
<b>10</b>	<b>Gestion agricole</b>					
10.1	Promotion des activités non agricoles	A	Élaboration et mise en œuvre d'un plan d'appui aux populations, afin que celles-ci identifient et/ou développent d'autres compétences utiles à l'exercice d'activités non agricoles, et génèrent des revenus issus de secteurs autres que l'agriculture.	La diversification des sources de revenu améliore la capacité d'adaptation. Si les récoltes sont insuffisantes, la deuxième source de revenu peut continuer à assurer les nécessités de base.		PANA Rwanda

N°	Mesure d'adaptation	secteur	Description	Justification	Exemples (CCNUCC et autres)	Référence
<b>11</b>	<b>Gestion de l'eau</b>					
11.1	Mise en place d'un organe technique de coordination du secteur de l'eau	G E	Création d'un office de l'eau qui sera chargé de la gestion de l'eau de surface et des aspects sécuritaires de l'adaptation aux changements climatiques et du développement. Les objectifs sont la fourniture de l'eau potable à tous les habitants et le souci d'instaurer et de préserver la sécurité contre les inondations, i.e., Mise en place d'un cadre international de collaboration pour la propreté et la sécurité du bassin du fleuve Congo.	La création des organes de gestion et de surveillance des mesures prioritaires permettra d'accélérer le processus d'exécution du projet. Les bonnes pratiques de gestion doivent recevoir une attention soutenue. Ce principe est également valable pour la mécanique du fleuve et la mise en œuvre des plans de gestion de l'eau. Voir aussi les points 7.3 et 7.4 sur l'adaptation	<u>Le Rand Water Board, Afrique du sud</u>	PANA Burundi, Ashton 2002
11.2	Création de bases de données nationales de l'eau	G E	Organisation des données relatives à l'eau afin d'éveiller les consciences quant aux besoins en eau et aux zones nécessaires Utilisations possibles de l'eau (boisson, irrigation).	Des bases de données de l'eau peuvent être créées et gérées par l'office de l'eau, aux fins d'études scientifiques et de sensibilisation sur les actions à mener, ainsi que de mise en œuvre du plan de gestion de l'eau	<u>Projet régional d'élaboration de la banque des données de l'eau, Moyen Orient</u>	PANA Burundi
11.3	Élaboration et mise en œuvre des plans de protection des sources des lignes de partage des eaux	E	Élaboration et mise en œuvre de plans de gestion selon les principes fondamentaux du zonage, les zones de protection démarquées, les limites de terrain, les mesures de contrôle Présentation d'une vision et d'une stratégie élargies de développement de la ligne de partage des eaux de la région.	Les mauvaises pratiques d'utilisation de la terre représentent une menace pour les sources d'eau potable. En élaborant et en mettant en œuvre un plan adéquat de gestion des terres et de l'eau ( par l'office de l'eau par exemple), l'extension anarchique des zones urbaines, donc, les débordements progressifs, peuvent être freinés. Cette mesure permettra de sauvegarder la santé publique et de renforcer les investissements dans le secteur de l'eau.		Partow 2011
<b>12</b>	<b>Gestion forestière</b>					
12.1	Inventaire forestier	G F	Documentation de la situation actuelle des forêts	Pour comprendre, à partir de la déforestation et de la biodiversité, les changements survenus dans la forêt et adopter des mesures d'adaptation, l'état actuel de la forêt doit être connu et documenté avec précision.		PANA Burundi
12.2	Conception/amélioration des plans de gestion forestière durable	G F	Mise en place ou amélioration de dispositifs de gestion forestière Allocation contrôlée ou par contrat de la gestion de la forêt, en fonction de la superficie de la forêt Opérations de gestion, notamment suivi de l'état de la forêt, sauvegarde des aires protégées et des zones de reboisement, certification et vérification des concessions forestières et des produits forestiers non ligneux, promotion de l'agroforesterie, gestion des cultures sur brûlis, utilisation des déchets du bois, promotion de l'efficacité énergétique, etc.	La gestion forestière efficace permet de garantir la fourniture future en énergie, tout en protégeant les ressources naturelles et en mettant fin à l'abattage abusif du bois.		PANA Burundi, PANA Rép. du Congo, de Wasseige et al., 2010

12.3	Développement du centre de semences forestières et agroforestières	GA/F	Organisation en vue de l'enrichissement du patrimoine génétique, de la collecte des ressources génétiques, de la collaboration avec d'autres centres de semences à travers le monde, de l'appui aux activités de recherche telles la sylviculture, la variation génétique, l'étude des systèmes de reproduction, la climatologie, etc.	Le centre de semences soutient la préparation et la lutte contre les changements climatiques; il met au point des semences adaptées aux nouvelles conditions climatiques, tout en conservant les variétés génétiques d'origine de la zone, grâce aux bases de données génétiques/ sur les semences. Le centre peut apporter la sécurité des semences aux communautés locales et mettre en place une variation génétique également utile à la résistance des cultures et des arbres aux épiphyties.	<u>Gestion des inondations dans le district de Xai-Xai, Mozambique</u>	PANA Burundi, Vercoe&Midgley 1993, Worede, 2011
------	--	------	--	--	--	---

N°	Mesure d'adaptation	secteur	Description	Justification	Exemples (CCNUCC et autres)	Référence
<b>13</b>	<b>Gestion de l'énergie</b>					
13.1	Mise sur pied d'un programme national du bois-énergie	G F./E	Élaboration d'un programme d'éducation, puis, d'adoption d'habitudes différentes et plus efficaces de gestion du bois-énergie. Garantie d'utilisation du bois-énergie au sein des communautés, etc.	Éducation et promotion (mise à disposition), par exemple, de cuiseurs sécurisés (plus efficaces et plus sûrs que le feu nu	<u>Practical Action Programme de l'Afrique de l'est</u>	PANA Burundi
13.2	Élaboration de programmes d'économie d'énergie	G E	Promotion de l'efficacité énergétique auprès des états, de entreprises, des ménages, etc. Adoption d'objectifs avec délais	Moins on utilise d'énergie pour la même activité, moins on gaspille d'énergie, et plus grandes sont la durabilité et la capacité d'adaptation		PANA Burundi
13.3	Conception et mise en œuvre de projets pilotes d'utilisation des énergies renouvelables pour les installations conventionnelles d'eau, et les systèmes d'aqueducs communautaires	G E/E	«Évaluation technique en vue de l'identification des technologies adéquates d'exploitation des énergies renouvelables devant assurer le fonctionnement des stations traditionnelles de traitement des eaux. Application, sur la base de cette évaluation technique, de la solution d'énergie renouvelable la plus simple et la plus indiquée».	«Cette mesure permet de «réduire les coûts de carburant utilisé dans les stations de traitement des eaux». Avec les énergies renouvelables, la pollution recule, et la capacité d'adaptation est renforcée, car, les sources d'énergie non renouvelable seront autonomes.		Partow 2011
<b>14</b>	<b>Éducation</b>					
14.1	Formation aux techniques de base de gestion de l'eau	G E	Formation, à divers niveaux, aux techniques de gestion de l'eau.	Dotation des autorités et des experts, d'outils de mise en œuvre de la gestion durable de l'eau axée sur les changements climatiques		PANA Burundi
14.2	Formation et sensibilisation de la population sur l'importance économique de l'eau et de l'énergie	E /E	Élaboration et mise en œuvre d'un plan d'éducation de la population aux question d'efficacité énergétique et de l'eau	Avec le renforcement de l'utilisation efficace de l'eau et de l'énergie par la population, la capacité d'adaptation est également renforcée car, on utilise moins d'eau/d'énergie pour les mêmes activités. En cas de diminution des ressources due à des facteurs climatiques, l'effet de cette situation sur la population sera moins grave que précédemment		PANA Burundi

14.3	Promotion de la sensibilisation contre les risques de feux de brousse	F	Organisation d'émissions radiophoniques ou télévisées sur les effets des changements climatiques et les conséquences de la déforestation dans le présent et le futur proche	En informant les populations et en les sensibilisant quant aux risques de feux de brousse, ceux-ci seront plus conscients des actes qu'ils posent et des conséquences de ces actes. Cette mesure permet de réduire les cas de feux de brousse et d'autres formes de déforestation		Schulte-uebbing 2011, PANA Burundi
<b>15</b>	<b>Système d'alerte rapide</b>					
15.1	Mise en place d'un système d'alerte rapide hydro-agro-météorologique	A / F./ E /E	«Installation ou réhabilitation d'une station hydrologique et météorologique, en vue de la maîtrise des données météorologiques, et des systèmes d'alerte rapide, dans le but de combattre les risques liés aux changements climatiques », notamment, un protocole de communication pour la diffusion des résultats des travaux auprès des nécessiteux.	Les prédictions aident, par exemple, les agriculteurs à adopter des mesures d'adaptation précises contre les effets néfastes de changements climatiques. Ainsi, le facteur de «surprise» des effets de changements climatiques est évité, et les populations se préparent par rapport aux phénomènes annoncés. Cette mesure constitue une source de grand renforcement de la capacité d'adaptation, si les résultats sont communiqués avec efficacité.	<u>Radio point à point à Isiolo, Kenya</u>	PANA Rwanda, PANA Burundi



<b>Tableau de la documentation sur l'adaptation</b>
ASHTON, P. 2002. Avoiding conflicts over Africa's water resources. <i>Ambio</i> , 31, 236-242.
BWALYA, M. & FRIEDRICH, T. 2002. Conservation Agriculture in Development: The Case of Africa.
CABINTERNATIONAL 2009. Rainfed Agriculture: Unlocking the Potential. In: WANI, S., ROCKSTRÖM, J. & OWEIS, T. (eds.) Comprehensive assessment of water management in agriculture. Wallingford: CAB international.
CARLOS, D. W., PAYA, D. M., BAYOL, N., FRANÇOIS, H. H., MAYAUX, P., DESCLÉE, B., NASI, R., BILLAND, A., DEFURNY, P. & RICHARD, E. A. 2010. The Forests of the Congo Basin: State of the Forest 2010. Luxembourg: OFAC.
Cofie, O. O., R. v. Veenhuizen, et al. (2003). Contribution of Urban and Peri-Urban Agriculture to Food Security in Sub-Saharan Africa. Africa session of 3rd WWF. Kyoto, International Water Management Institute.
DINAR, A. 2008. Climate change and agriculture in Africa : impact assessment and adaptation strategies, London, Earthscan.
FEENSTRA, J. F. 1998. Handbook on methods for climate change impact assessment and adaptation strategies, [S.l.], UNEP [etc.].
FOSTER, V. & BRICEÑO-GARMENDIA, C. 2010. Africa's Infrastructure: A Time for Transformation, Washington, World Bank.
KALAME, F. B., AIDOO, R., NKEM, J., AJAYIE, O. C., KANNINEN, M., LUUKKANEN, O. & IDINOBA, M. 2011. Modified taungya system in Ghana: A win-win practice for forestry and adaptation to climate change? <i>Environmental Science and Policy</i> , 14, 519-530.
LIPPER, L., MANN, W., MEYBECK, A., SESSA, R., BAKER, D., BATELLO, C., BESSY, C., BRAATZ, S., CAPALDO, J., CHOPIN, F., COLLETTE, L., CUSTOT, J., DUBOIS, O., YOUNG, C. D., FRIEDRICH, T., GAUTHIER, M., GERBER, P., GITZ, V., GHOSH, K., GUEI, R. G., HENDERSON, B., HOFFMANN, I., HOLMGREN, P., KASSAM, A., COENT, P. L., MANZUR, C. L., LUTALADIO, N., MAKKAR, H., NJIE, D. N., OSBORN, T., OTTE, J., CORTES, J. P. & SOTO, D. 2010. "Climate-Smart" Agriculture: Policies, Practices and Financing for Food Security, Adaptation and Mitigation. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
MORRISON, V. 2003. Zero Grazing. In: GREENMOUNT COLLEGE (ed.). Department of Agriculture and Rural Development.
PARTOW, H. 2011. Water Issues in the Democratic Republic of the Congo. Post-Conflict Environmental Assessment of the Democratic Republic of the Congo. Nairobi: UNEP.
ROBERTS, G. 2009. Current Adaption Measures and Policies. In: SEPPÄLÄ, R., BUCK, A. & KATILA, P. (eds.) Adaptation of forests and people to climate change - A global Assessment Report. Vienna: IUFRO.
ROOSE, E. 1996. Land husbandry : components and strategy, Rome, FAO.
ROSEGRANT, M., RINGLES, C. & DEJONG, I. 2010. Irrigation: Tapping Potential. In: FOSTER, V. & BRICEÑO-GARMENDIA, C. (eds.) Africa's Infrastructure: A Time for Transformation. Washington: World Bank.
SCHULTE-UEBBING, L. 2011. Climate Change Adaptation for Agriculture in the Congo Basin. BSc Thesis, Wageningen University and Research Centre.
VERCOE, T. & MIDGELY, S. 1993. Australian tree seed centre - an update on current programs and information on seed procurement for researchers. <i>Forest Genetic Resources Bulletin</i> .
Worede, M. (2011). Establishing a community seed supply system: community seed bank complexes in Africa. Climate Change and food systems resilience in sub-saharan Africa. L. L. Ching, S. Edwards and N. El-HageScialabba. Rome, FAO: 18.
Zeeuw, H. d. and M. Dubbeling (2008). Cities, Food en Agriculture: Challenges and the Way Forward. Working Paper, RUAF foundation. 3: 34.

<b>PANA - CN</b>
MINISTÈRE DE DÉVELOPPEMENT DURABLE DE L'ÉCONOMIE FORESTIÈRE ET DE L'ENVIRONNEMENT 2009. Seconde Communication Nationale de la République du Congo Brazaville.
MINISTÈRE DE L'ÉCONOMIE FORESTIÈRE DES EAUX DE LA PÊCHE 2005. Communication National sur les Changements Climatiques Gabon.
MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT 2006. NAPA République Démocratique du Congo.
MINISTÈRE DES EAUX FORETS CHASSE & PÊCHE ET DE L'ENVIRONNEMENT 2008. PANA République Centre Africaine.
MINISTÉRIO DOS RECURSOS NATURAIS E AMBIENTE 2006. PANA S. Tomé E Príncipe.
MINISTRY FOR LAND MANAGEMENT TOURISM AND ENVIRONMENT 2007. NAPA Republic of Burundi. Bujumbura.
MINISTRY OF LANDS ENVIRONMENT FORESTRY WATER AND MINES 2006. NAPA Republic of Rwanda. PNUE.



**Contact:**

Climate Service Center  
Fischertwiete 1  
20095 Hamburg  
Germany

Phone +49(0)40-226 338-424  
Fax +49(0)40-226 338-163

[www.climate-service-center.de](http://www.climate-service-center.de)

ISSN 2192-4058

SPONSORED BY THE



Federal Ministry  
of Education  
and Research