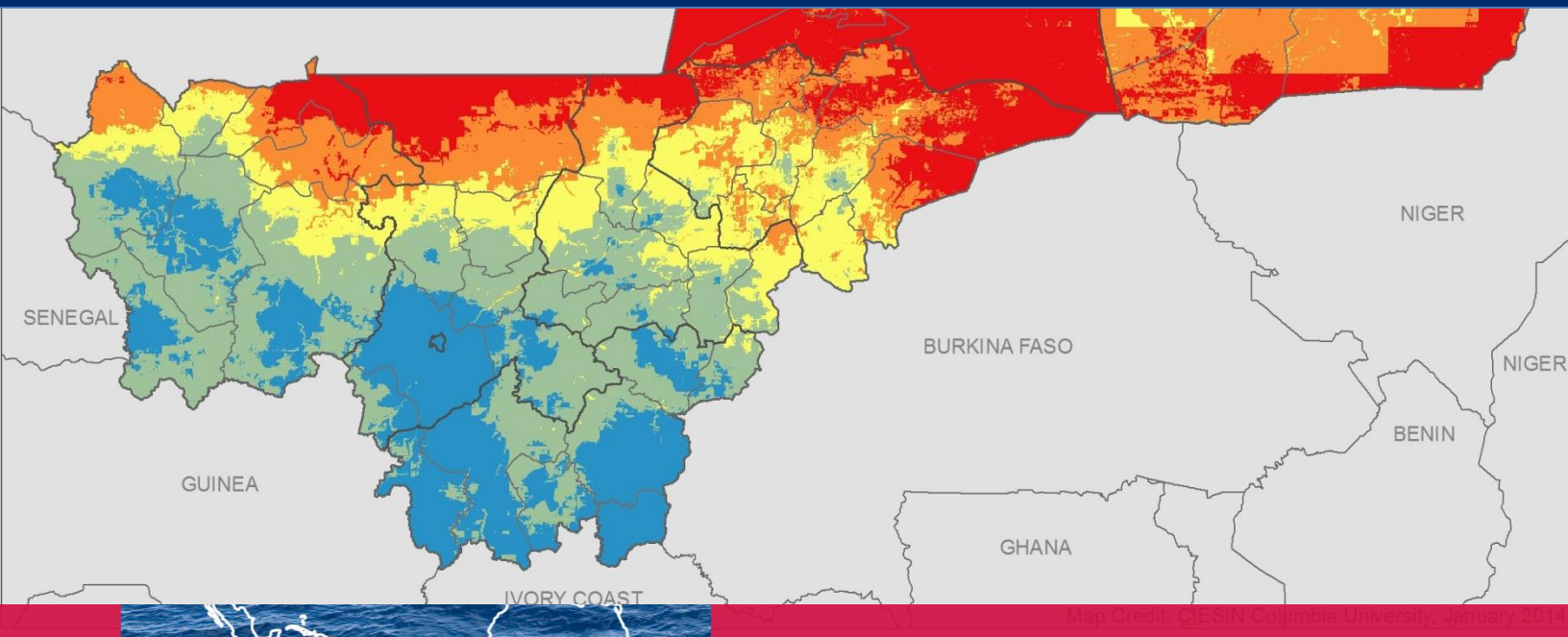
# CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE CLIMATIQUE DU MALI

JANVIER 2014

La rédaction du présent rapport a été rendue possible grâce au soutien du peuple américain par le biais de l'Agence des Etats-Unis pour le développement international (USAID). Son contenu relève de la seule responsabilité de Tétra Tech ARD et ne représente pas nécessairement les points de vue de l'USAID ou du gouvernement américain.




Map Credit: CIESIN Columbia University, January 2014

ARCC

African and Latin American Resilience to Climate Change Project

Ont collaboré à la rédaction du présent rapport : Alex de Sherbinin[1], Tricia Chai-Onn[1], Alessandra Giannini[2], Malanding Jaiteh[1], Marc Levy[1], Valentina Mara[1], Linda Pistolesi[1], and Sylwia Trzaska[1] à travers les sous-traitants de Tetra Tech ARD.

[1] Center for International Earth Science Information Network (CIESIN), l'Earth Institute de l'Université de Columbia

[2] Institut international de recherche sur le climat et la société (IRI), l'Earth Institute l'Université de Columbia

Photo de couverture : Carte de la vulnérabilité globale du Mali (légende de carte quintile), CIESIN, 2013.

La présente publication a été réalisée pour l'Agence des Etats-Unis pour le développement international par Tetra Tech ARD dans le cadre du Contrat à Quantité Indéterminée Prospérité, Moyens de subsistance et Conservation des écosystèmes [Prosperity, Livelihoods, and Conserving Ecosystems (PLACE)], contrat USAID No. AID-EPP-I-00-06-00008, ordre de service No. AID-OAA-TO-11-00064).

**Contacts Tech ARD :**

**Patricia Caffrey**
Chef d'équipe
Résilience africaine et latino-américaine au changement climatique (ARCC)
Burlington, Vermont
Tél.: 802.658.3890
Patricia.Caffrey@tetratech.com

**Anna Farmer**
Chef de mission
Burlington, Vermont
Tél.: 802-658-3890
Anna.Farmer@tetratech.com

# CARTOGRAPHIE DE LA VULNERABILITE CLIMATIQUE DU MALI

RESILIENCE AFRICAINE ET LATINO-AMERICAINE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE (ARCC)

JANVIER 2014

# TABLE DES MATIERES

**ACRONYMES ET ABREVIATIONS** ..... iii
**A PROPOS DE CETTE SERIE** ..... v
**RAPPORT SOMMAIRE** ..... vi
**1.0 INTRODUCTION** ..... 1
**2.0 CADRE, DONNEES ET METHODES** ..... 3
**3.0 RESULTATS** ..... 7
3.1 LA COMPOSANTE EXPOSITION ..... 8
3.2 LA COMPOSANTE SENSIBILITE ..... 10
3.3 COMPOSANTE MANQUE DE CAPACITE D'ADAPTATION ..... 11
3.4 VULNERABILITE GLOBALE ..... 12
3.5 VULNERABILITE FUTURE ..... 15
**4.0 ANALYSE ET CONCLUSIONS** ..... 21
4.1 PROBLEMES LIES A L'APPROCHE DE L'INDICE SPATIAL ..... 21
4.2 CONCLUSION ..... 22
**5.0 SOURCES** ..... 24
**ANNEXE I. SCENARIOS CLIMATIQUES FUTURS** ..... 26
**ANNEXE II. ANALYSE DES COMPOSANTES PRINCIPALES** ..... 36
**ANNEXE III. ANALYSE DE LA SENSIBILITE** ..... 44

# ACRONYMES ET ABREVIATIONS

| | |
|---|---|
| ACLED | Armed Conflict Location and Event Dataset |
| ACP | Analyse des composantes principales |
| AIS | Enquête sur les indicateurs du SIDA |
| ARCC | Résilience africaine et latino-américaine au changement climatique |
| ASACO | Associations de santé communautaires |
| ASC | Agent de santé communautaire |
| AVHRR | Radiomètre perfectionné à très haute résolution |
| CIAT | Centre international d'agriculture tropicale |
| CIESIN | Center for International Earth Science Information Network, Université de Columbia |
| CILSS | Comité Inter-Etats pour la lutte contre la sécheresse au Sahel |
| CP | Composantes principales |
| CSCOM | Centres de santé communautaires |
| CSREF | Centres de santé de référence |
| CSV | Valeurs séparées par des virgules |
| CV | Coefficient de variation |
| DEWA | Division de l'alerte précoce et de l'évaluation |
| DFO | Dartmouth Flood Observatory |
| EDS | Enquête sur la démographie et la santé |
| EROS | Earth Resources Observation and Science |
| FEWSNET | Réseau de systèmes d'alerte précoce contre la famine |
| GAR | Rapport mondial d'évaluation sur la réduction des risques |
| GIEC | Groupe intergouvernemental d'experts pour l'évolution du climat |
| GIMMS | Global Inventory Modeling and Mapping Studies |
| GPS | Système mondial de localisation |
| GRID | Base de données sur les ressources mondiales |
| GRUMP | Projet de cartographie rural-urbain mondial |
| IER | Institut de l'économie rurale |

| | |
|---|---|
| IFPRI | Institut international de recherche sur les politiques alimentaires |
| ISRIC | Centre international de référence et d'information pédologiques |
| IVDN | Indice de végétation par différence normalisée |
| IVS | Indice de vulnérabilité sociale |
| MCG | Modèle de circulation générale |
| NCHS | National Center for Health Statistics |
| NIMA | National Imagery and Mapping Agency |
| NOAA | National Oceanic and Atmospheric Administration |
| OCHA | Bureau de coordination des affaires humanitaires |
| ODHD | Observatoire du développement durable humain |
| OMS | Organisation mondiale de la santé |
| PNUE | Programme des Nations unies pour l'environnement |
| RCP | Voies de concentration représentatives |
| SEDAC | Socioeconomic Data and Applications Center |
| TMI | Taux de mortalité infantile |
| TTREND | Tendance de la température |
| UNICEF | Fonds des Nations unies pour l'enfance |
| USAID | Agence des Etats-Unis pour le développement international |
| USGS | Service géologique des Etats-Unis |
| VMAP0 | Carte vectorielle de niveau 0 |

# A PROPOS DE CETTE SERIE

## INFORMATIONS RELATIVES AUX ETUDES SUR LA VULNERABILITE ET L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE EN AFRIQUE DE L'OUEST

Le présent document fait partie d'une série d'études publiées par le projet Résilience africaine et latino-américaine au changement climatique (ARCC) visant à répondre aux besoins d'adaptation au changement climatique en Afrique de l'Ouest. Dans le cadre des études ARCC pour l'Afrique de l'Ouest, le présent document fait partie de la sous-série portant sur le Changement climatique au Mali. L'ARCC a également produit une sous-série sur le Changement climatique et les ressources en eau d'Afrique de l'Ouest, le Changement climatique et les conflits en Afrique de l'Ouest et l'Adaptation de l'agriculture au changement climatique dans le Sahel.

## SOUS-SERIE SUR L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE AU MALI

A la demande de l'Agence des Etats-Unis pour le développement international (USAID), l'ARCC a entrepris une série d'études sur le Sahel à l'effet d'améliorer la compréhension des impacts potentiels du changement climatique dans la zone rurale du Mali et d'identifier les moyens d'appui à l'adaptation à ces impacts. Entre autres documents de la série sur le Changement climatique au Mali, l'on compte : Impacts prévus sur les ravageurs et les maladies des cultures, Impacts prévus sur les ravageurs et les maladies du bétail, Modélisation de l'impact des pratiques agricoles adaptatives, Cartographie de la vulnérabilité climatique, Problème fondamentaux en matière de ressources en eau, Conclusions relatives à l'adaptation et Evaluation institutionnelle de l'Agence de l'environnement et du développement durable (AEDD) et de l'Agence nationale de la météorologie (Mali-Météo).

# RAPPORT SOMMAIRE

Le présent rapport présente les résultats d'un exercice cartographique de la vulnérabilité climatique destiné à assister l'Agence des Etats-Unis pour le développement international (USAID)/Mali à travers une planification stratégique. Cette approche utilise un indice de vulnérabilité spatiale qui comprend 18 indicateurs regroupés en trois composantes de vulnérabilité : exposition aux risques climatiques, sensibilité climatique et capacité d'adaptation. Les résultats sont présentés sous forme de cartes, la carte de la vulnérabilité globale étant présentée à la figure 5.

A cause du niveau élevé de pauvreté, tout le territoire malien et la population pourraient être considérés comme fortement vulnérables aux futurs changements climatiques. Malgré le fait que le Mali, comme ses voisins du Sahel, a un long passé quant aux moyens permettant de faire face à la variabilité du climat - et ses moyens de subsistance sont diversifiés de manière à réduire les risques - le pays connaît des niveaux élevés de vulnérabilité globale comparé aux autres pays dont les revenus sont plus élevés et les climats plus stables/humides. L'objectif de cet exercice cartographique est de mettre en exergue les zones sensibles d'une vulnérabilité *relative* particulièrement élevée à l'*intérieur* du Mali du fait des constellations de stress climatique élevé, de la sensibilité (ou susceptibilité) élevée, et de la faible capacité d'adaptation.

Les résultats relatifs à la vulnérabilité actuelle montrent que les andains d'envergure relative du nord du Mali sont des zones sensibles. Cependant ces régions sont à peine peuplées avec seulement 6 pourcent de la population malienne. Du fait de sa forte capacité et sa sensibilité relativement faible, Bamako est considérée comme zone à faible vulnérabilité, de même que la région située immédiatement aux environs de Sikasso. La région agricole la plus densément peuplée au sud-est du Mali présente généralement une vulnérabilité moyenne ou moyennement élevée. Environ 75 pourcent de la population malienne réside dans ces catégories de zones vulnérables. L'indice global pourrait certes capter la plus grande attention, cependant la richesse du présent rapport repose essentiellement sur l'analyse des schémas spatiaux de vulnérabilité concernant les 18 indicateurs et composantes.

Nous avons également tenu compte de deux futurs scénarios climatiques à échelle statistiquement réduite, des voies de concentration représentatives (RCP) 4.5 et 8.5, représentant les scénarios d'émissions faibles et élevés respectivement pour les périodes centrées sur 2030 et 2050. Les résultats pour la période de 2030 prévoient des changements relativement faibles dans la vulnérabilité globale tandis que ceux pour 2050 montrent que les vastes régions du nord du Mali évolueront de vulnérabilité moyennement élevée à vulnérabilité élevée. La frontière nord des cultures pluviales de millet et sorgho s'est déjà déplacée vers le sud d'environ 50 km au cours des soixante dernières années, et continuera probablement à se déplacer, étant donné que l'élévation des températures a une incidence sur la disponibilité de l'humidité pour l'agriculture. En plus, notre analyse ne pouvait pas saisir les changements futurs dans la variabilité des précipitations, qui pourraient avoir autant de répercussions sur les moyens de subsistance que les tendances à long terme.

Même si la cartographie de la vulnérabilité peut identifier des vastes régions susceptibles d'être plus vulnérables aux facteurs de stress climatique, toute communauté donnée située dans cette région pourrait être plus ou moins vulnérable que la moyenne de la région, pour un éventail de raisons propres au contexte. En plus, comme pour toute approche fondée sur l'indice de vulnérabilité spatiale, les résultats dépendent de la robustesse des données sous-jacentes et sont également sensibles à un ensemble d'hypothèses méthodologiques. Il existe de multiples sources d'incertitudes, allant des données climatiques et socioéconomiques à la nature des mécanismes de causalité sous-jacents qui

créent la vulnérabilité. Une analyse de la sensibilité démontre cependant que les résultats de l'indice de vulnérabilité sont relativement solides, avec une potentielle baisse ou hausse maximale entre chacune des cinq classes de vulnérabilité limitée à un échelon inférieur ou supérieur pour tout emplacement sur la carte. Nous recommandons aux usagers de réviser l'autre approche de l'agrégation présentée en Annexe II (analyse des composantes principales) et l'analyse de la sensibilité présentée en annexe III et de comprendre le caractère limité des données présentées dans les métadonnées sur les indicateurs (Annexe IV).

# 1.0 INTRODUCTION

Dans le cadre du programme de Résilience africaine et latino-américaine au changement climatique (ARCC), le Center for International Earth Science Information Network (CIESIN) de la Columbia University a élaboré des cartes sur la vulnérabilité climatique à utiliser par l'USAID/Mali pour orienter ses programmes d'adaptation au climat et de développement global. Cette approche utilise un indice de vulnérabilité spatiale qui comprend 18 indicateurs regroupés en trois composantes de vulnérabilité : exposition aux risques climatiques, sensibilité climatique et capacité d'adaptation. Les résultats sont synthétisés sous forme de cartes accompagnées de commentaires. Le présent rapport est structuré comme suit : la section 2 résume notre approche, y compris le cadre, les données et les méthodes ; la section 3 présente les résultats et les cartes ; la section 4 présente les conclusions ; l'annexe I décrit les résultats des prévisions climatiques ; l'annexe II décrit les résultats de l'analyse des composantes principales (ACP) ; l'annexe III décrit l'analyse de la sensibilité et l'annexe IV les cartes d'indicateur et les données pour la documentation (métadonnées).

En termes de conclusions de haut niveau, les deux approches utilisées pour élaborer une carte de la vulnérabilité agrégée, l'approche additive et l'approche ACP (de Sherbinin, 2014), ont produit des résultats largement similaires. Ces résultats montrent une vulnérabilité plus élevée dans la région du nord, où les précipitations sont les plus faibles et la variabilité climatique plus élevée ; une vulnérabilité plus faible dans les régions du sud et du sud-ouest avec la plus faible vulnérabilité autour de Bamako. Une bonne part de la richesse de cette étude repose cependant sur l'analyse des caractéristiques spatiales pour les composantes sous-jacentes et l'étude des cartes des indicateurs individuels, présentées en annexe IV.

Les résultats doivent être qualifiés comme étant largement indicatifs de schémas de vulnérabilité. A cet égard, il convient de relever quatre points :

- Les cartes de la vulnérabilité et les "zones sensibles" qui en découlent reposent sur des hypothèses concernant les mécanismes qui créent la vulnérabilité et les couches de données d'exactitude variable. Bien que nous ayons prévu une section justification pour chaque couche d'indicateurs apparaissant dans les métadonnées, où nous posons nos hypothèses sous-jacentes, idéalement, nous devrions être en mesure de vérifier ces hypothèses en les confrontant aux mesures de résultats (par exemple la morbidité, la mortalité, les pertes de récoltes ou pertes économiques) liées à des évènements climatiques spécifiques (par exemple les inondations ou les sécheresses).

- Nous avons assemblé les meilleures informations infranationales disponibles sur le Mali, qui s'est avéré un environnement remarquablement riche en informations pour un pays comptant parmi les moins avancés. Néanmoins, les limites des données aux niveaux mondial, régional et national indiquent qu'il existe une incertitude sur les résultats. En d'autres termes, les cartes doivent être utilisées en combinaison avec les validations sur le terrain lorsque les résultats doivent être appliqués dans des localités particulières. Bien que nous ayons essayé de maintenir nos couches d'indicateurs en un groupe réduit, évitant certains ensembles de données peu fiables, certaines couches d'indicateur de données de cette analyse présentent des degrés d'incertitude inconnus. Nous avons pu définir le degré d'incertitude uniquement dans 7 des 18 couches de données. Nous avons cherché à traiter la question de la qualité des données connues dans la section limitations des métadonnées.

- Si les cartes peuvent sembler fournir des indications claires sur les éléments où notre attention doit être centrée, l'interprétation des cartes doit être guidée par des textes d'accompagnement décrivant les incertitudes sous-jacentes étant donné que les moindres changements sur les données et les méthodes pourraient produire des résultats différents. Nous proposons une analyse préliminaire de la sensibilité en Annexe III à l'effet d'étudier l'incidence de nos hypothèses sous-jacentes concernant la construction de la vulnérabilité sur la carte globale de la vulnérabilité.
- L'élaboration des cartes serait améliorée par des données plus fiables ainsi qu'une meilleure compréhension de la forme fonctionnelle sous-jacente de la relation existant entre les indicateurs (comment l'augmentation d'une unité au niveau d'un indicateur implique l'augmentation d'une unité au niveau d'un autre en termes d'impacts sur la vulnérabilité), la fongibilité (la mesure dans laquelle un point faible d'un indicateur est compensé par les points élevés d'un autre) ainsi que les effets de seuil pour certains indicateurs. Nous revenons sur ces questions au niveau de la conclusion (Section 4.1)

Une discussion supplémentaire sur les défis relatifs à la mesure de la vulnérabilité à travers les indices agrégés est abordée par Baptista (2014) et Hinkel (2011).

# 2.0 CADRE, DONNEES ET METHODES

Pour cet exercice de cartographie, nous utilisons le cadre conceptuel du Groupe intergouvernemental d'experts pour l'évolution du climat (GIEC), qui distingue la vulnérabilité en trois composantes : exposition, sensibilité et capacité d'adaptation aux facteurs climatiques (Parry et al., 2007). Ce cadre et les variantes y afférentes sont communément utilisés dans les exercices de cartographie en Afrique et à l'échelle mondiale (par exemple Midgley et al., 2011; Yusuf et Francisco, 2009 ; Thow et De Blois, 2008). Notre approche a consisté à dresser la cartographie de la vulnérabilité générique de la population et non à développer des couches de vulnérabilité différentes pour des systèmes individuels (par exemple les écosystèmes) ; des secteurs (par exemple l'eau et l'agriculture) ; ou des sous-groupes de population (par exemple les éleveurs). Nous référant à la recommandation de Fussel (2009) selon laquelle chaque évaluation quantitative de la vulnérabilité doit clairement identifier son point focal, l'attribut de valeur, les dangers externes préoccupants ainsi que son système de référence temporelle, nous définissons la carte de vulnérabilité comme suit :

- Point focal : vulnérabilité des populations à l'insécurité alimentaire et à celle des moyens de subsistance
- Attribut de valeur : sécurité alimentaire, santé et bien-être
- Danger externe : les variations des précipitations et l'élévation des températures qui menacent les systèmes de production agricole
- Système de référence temporelle : les années 2010, 2030 et 2050

Les indicateurs spatiaux que nous avons utilisés sont présentés au tableau 1. Une documentation complète pour chaque indicateur est jointe en Annexe IV. Notre approche directrice consistait à identifier un nombre limité d'ensembles de données spatiales de haute qualité qui représentent le mieux la composante d'intérêt tout en évitant la tentation d'ajouter des données de mauvaise qualité (données d'un degré d'incertitude élevé ou de résolution spatiale grossière), pouvant de ce fait "contaminer" les résultats.[1] Notre niveau de confiance dans la validité et la fiabilité de chaque ensemble de données est certes élevé, cependant nous revenons sur les limites au niveau des métadonnées.

Notre démarche procède comme suit : nous avons converti toutes les couches de données spatiales (brutes) d'origine en des grilles d'une résolution usuelle de l'ordre de 30 secondes d'arc (environ 1 km²). Nous avons choisi cette taille de cellule de grille parce qu'elle correspondait à la résolution de nos ensembles de données de meilleure résolution (fréquence des inondations et carbone organique du sol) et nous avons estimé que les surfaces interpolées pour plusieurs séries de données ponctuelles (par

[1] Pour un exemple d'approche "grand filet" de la sélection des indicateurs, voir la liste des indicateurs de Midgley et al. (2011) pour les initiatives en faveur de la cartographie de la vulnérabilité en Afrique australe. Leur approche inclut huit indicateurs d'exposition, 23 de sensibilité et 12 de capacité d'adaptation. Par contre, nous avons choisi six indicateurs d'exposition, sept de sensibilité et cinq de capacité d'adaptation.

exemple les données en grappes de l'Enquête sur la démographie et la santé), les données sur les conflits et les données sur les centres sanitaires) pourraient mieux représenter la variabilité spatiale à 1 km². Cependant, il convient de noter que les couches de données relatives au climat et aux biomes anthropiques sont à une résolution spatiale de 5 à 6 minutes d'arc (environ 10-11 km d'un côté de l'équateur) et l'indice de pauvreté et le taux de mortalité infantile ne sont disponibles que pour les unités administratives (communes et cercles). Par conséquent, bien que nous ayons fait tout notre possible pour utiliser les ensembles de données des meilleures résolutions disponibles - les données climatiques étant un exemple remarquable[2] — il est important de garder à l'esprit que la résolution nominale de 1 km² des résultats est prend en compte des intrants de résolutions diverses.

**TABLEAU 1. INDICATEURS UTILISES PAR COMPOSANTE DE VULNERABILITE**

| Composante | Code de l'indicateur | Couche de données |
|---|---|---|
| Exposition | PRCP | Précipitations moyennes annuelles (1950-2009) |
| | IACV | Coefficient de variation interannuelle des précipitations (1950-2009) |
| | DCVAR | Pourcentage de la variance des précipitations expliquée par la composante décennale (1950-2009) |
| | NDVICV | Coefficient de variation de l'Indice de végétation par différence normalisée (IVDN) (1981-2006) |
| | TTREND | Tendance de la température à long terme en juillet-août-septembre (1950-2009) |
| | FLOOD | Fréquence des inondations (1999-2007) |
| Sensibilité | HHWL | Richesse des foyers (2006) |
| | STNT | Retard de croissance infantile (2006) |
| | IMR | Taux de mortalité infantile (TMI) (2006) |
| | POVI | Indice de pauvreté par commune (2008) |
| | CONF | Conflits/violence politique (1997-2012) |
| | CARB | Carbone organique du sol/qualité du sol (1950- 2005) |
| | MALA | Indice de stabilité du paludisme |
| Capacité d'adaptation | EDMO | Niveau d'éducation de la mère (2006) |
| | MARK | Accessibilité du marché (temps de déplacement vers les principales villes) |
| | HEALTH | Indice des infrastructures de santé (2012) |

[2] Les données climatiques historiques sont disponibles uniquement en cellules de grille de résolution d'un demi-degré à un degré. Nous avons pu utiliser les données climatiques fournies par le Réseau de systèmes d'alerte précoce contre la famine (FEWSNET), de plus grande résolution, grâce à une initiative spéciale de développement des données utilisant un plus grand ensemble de stations au sol et des données satellitaires (Funk et al.; 2012).

| Composante | Code de l'indicateur | Couche de données |
|---|---|---|
| | ANTH | Biomes anthropiques (2000) |
| | IRRI | Zones irriguées (zone équipée pour l'irrigation) (1990-2000) |

Le développement d'indices agrégés nécessite une certaine normalisation (réduction d'échelle) des valeurs de données brutes (OCDE, 2008). Nous avons choisi de calculer les valeurs des indicateurs sur une échelle de 0 à 100, où 0 représente la plus faible vulnérabilité et 100 la vulnérabilité la plus élevée (voir les cartes à droite au niveau des métadonnées, Annexe IV).[3] Nous avons inversé les indicateurs où des valeurs élevées dans les données brutes étaient associées à une faible vulnérabilité : précipitations moyennes annuelles (exposition), carbone organique du sol, retard de croissance infantile, richesse des foyers (sensibilité) et niveau d'éducation de la mère, centres de santé communautaires, zones irriguées (capacité d'adaptation). Les détails des transformations opérées au niveau de chaque indicateur sont donnés à la section "système de notation" des métadonnées. Pour la majorité des indicateurs, nous avons simplement créé une version percentile des données brutes en maintenant la distribution des données d'origine. Les distributions de plusieurs indicateurs étaient fortement faussées sur l'échelle brute : précipitations annuelles, coefficient de variation de l'IVDN, fréquence des inondations, carbone organique du sol et accessibilité du marché. Pour ces indicateurs, nous avons réduit les queues de distribution et les valeurs de seuil (ou méthode d'estimation de Winsor) sont enregistrées dans les métadonnées.

Un avis d'expert a été sollicité lors du traitement d'un nombre d'indicateurs, y compris le développement de surfaces continues pour les ensembles de données à deux points (conflits et infrastructures de santé) et pour le recodage des catégories de biomes anthropiques en notes de vulnérabilité. Dans le processus de normalisation, nous avons exclu de l'analyse toutes les régions au nord de 17.2 degrés de latitude nord, qui sont très peu peuplées. Nous avions deux raisons pour ce faire, la première étant que les résultats de la vulnérabilité sont moins significatifs pour une région très peu peuplée et où la variabilité et le changement climatique pourraient avoir moins d'impacts du fait des conditions déjà difficiles. La deuxième raison est d'ordre méthodologique : l'inclusion des valeurs de données des indicateurs pour cette région pourraient fausser les résultats (à cause des valeurs extrêmes) pour le reste du Mali, la première région d'étude.[4]

Une moyenne des indicateurs a été faite pour produire les cartes de composante pour l'exposition, la sensibilité et la capacité d'adaptation. Nous avons désigné cette méthode par le terme "approche additive" à la construction de l'indice (à la différence des ACP en Annexe II. Pour plus de détails sur l'approche additive, voir de Sherbinin [2014]). Il convient de noter que la capacité d'adaptation a été modifiée en "manque de capacité d'adaptation" aux fins de la cartographie afin de conserver le sens standard sur toutes les composantes, selon lequel les valeurs élevées correspondent à une vulnérabilité élevée. La même valeur de pondération a été donnée à tous les indicateurs sauf pour les trois indicateurs dérivés des données en grappes de l'Enquête sur la démographie et la santé (EDS) : richesse des foyers, retard de croissance infantile et niveau d'éducation de la mère. Cette pondération se justifiait

---

[3] Avant la conversion, les grilles ont été converties en fichiers CSV tabulaires en utilisant un système de référence commun des grilles. Toutes les transformations et agrégations des données ont été effectuées dans le progiciel statistique R et les données ont été réexportées sur ArcGIS pour la cartographie.

[4] Pour des informations supplémentaires relatives à l'incidence du choix de la région étudiée sur les résultats de la cartographie de la vulnérabilité, voir Abson et al. (2012), où les résultats de différentes écorégions en Afrique australe étaient différents de ceux de la région entière. Dans le même sens, de Sherbinin (2014) présente une explication plus complète à ce sujet.

du fait que ces indicateurs ont été jugés plus proches de notre intérêt pour la sécurité alimentaire et celle des moyens de subsistance, et parce que les données sont d'une résolution spatiale plus élevée que la plupart des autres indicateurs de sensibilité et de manque de capacité d'adaptation. A la dernière étape, étant donné que les écarts des points des composantes en résultant étaient très variables, nous avons réduit ces points de sorte qu'ils variaient entre 0 et 100. Nous avons ensuite fait la moyenne des trois composantes pour créer une carte de la vulnérabilité globale.

La référence temporelle pour la cartographie de la vulnérabilité de base est la période actuelle (circa 2010), bien que des indicateurs individuels aient pour références temporelles de base les années comprises entre 2000 et 2010. Les indicateurs climatiques font référence à des périodes plus longues. La section 3.5 et l'annexe I traitent la question de la vulnérabilité future à partir des projections de deux indicateurs, à savoir, les tendances des précipitations et des températures, pour la période comprise entre 2030 et 2050. A cause de contraintes de temps et de ressources, nous n'avons pas pu développer les futurs scénarios pour les indicateurs de sensibilité et de capacité d'adaptation.

# 3.0 RESULTATS

Passons maintenant aux résultats, d'abord par composante et ensuite selon la vulnérabilité globale suivant les tendances et la variabilité climatiques passées. Les cartes sont présentées en classes de vulnérabilité de 0-20 (faible) ; 21-40 (moyennement faible) ; 41-60 (moyenne) ; 61-80 (moyennement élevée) ; et 81-100 (élevée). L'utilisation de cartes d'intervalles égaux avec des catégories fixées signifie que les régions (ou nombre de cellules de grille) comprises dans chaque classe varient selon la distribution statistique sous-jacente des composantes. Les cartes peuvent être utilisées pour comprendre les composantes de vulnérabilité en un lieu donné (comment chaque composante contribue à la notation globale) et identifier les régions dont l'exposition, la sensibilité, le manque de capacité d'adaptation ainsi que la vulnérabilité globale sont relativement élevés et qui pourraient appeler à des interventions programmatiques. Des exemples de ces deux applications sont présentés ci-après :

1. Un analyste aimerait avoir une connaissance plus approfondie du profil de la vulnérabilité d'une région donnée. Si cet analyste s'intéresse au profil de la vulnérabilité de la région de Kayes par exemple, (l'unité administrative située dans la région la plus à l'ouest du Mali), il/elle se rendra compte que son exposition varie de moyennement faible (au sud) à moyennement élevée (au nord) ; sa sensibilité de moyenne (sud-ouest) à moyennement élevée (au nord-est et au nord-ouest), avec des poches de sensibilité élevée à l'extrême nord-est ; le manque de capacité d'adaptation est moyen près de la ville de Kayes et à l'ouest de Bamako, mais moyennement élevé ailleurs ; et sa vulnérabilité globale est moyenne au sud et moyennement élevée au nord, avec des poches de vulnérabilité élevée à l'extrême nord-est. Une information supplémentaire serait que la partie la plus septentrionale de Kayes a été frappée au cours des 60 dernières années par une baisse de la fiabilité des précipitations atteignant le seuil pour l'agriculture pluviale de subsistance (par exemple la production de millet ou de sorgho) et, une ceinture traversant le centre de la région a connu une baisse de fiabilité des précipitations pour la production de coton (Figure 2). Enfin, l'analyse des composantes principales (Annexe II, Figure A2-5) montre que la plus grande partie de la région de Kayes se trouve dans le quintile de vulnérabilité le plus bas, mais comme pour la carte de la vulnérabilité globale, la vulnérabilité est plus élevée au nord.

2. Dans l'optique de cibler les ressources, un autre analyste pourrait s'intéresser à la région de Tombouctou, où la vulnérabilité globale est très élevée (en particulier à cause de la sensibilité élevée), et où il existe des besoins évidents en matière de reconstruction post-conflit et de développement. Ou encore, en tenant compte à la fois des informations sur la vulnérabilité et de la carte de la population présentée à la figure 6, cet analyste pourrait identifier la région de Ségou (région en forme L au centre du Mali, à cheval sur les deux rives du fleuve Niger) comme hautement prioritaire, étant donné sa vulnérabilité moyennement élevée dans des vastes zones, sa sensibilité élevée dans la région de l'est (le Plateau de Dogon) ainsi que sa grande population de presque 2,3 millions d'habitants (soit ~16 pourcent de la population totale du Mali).

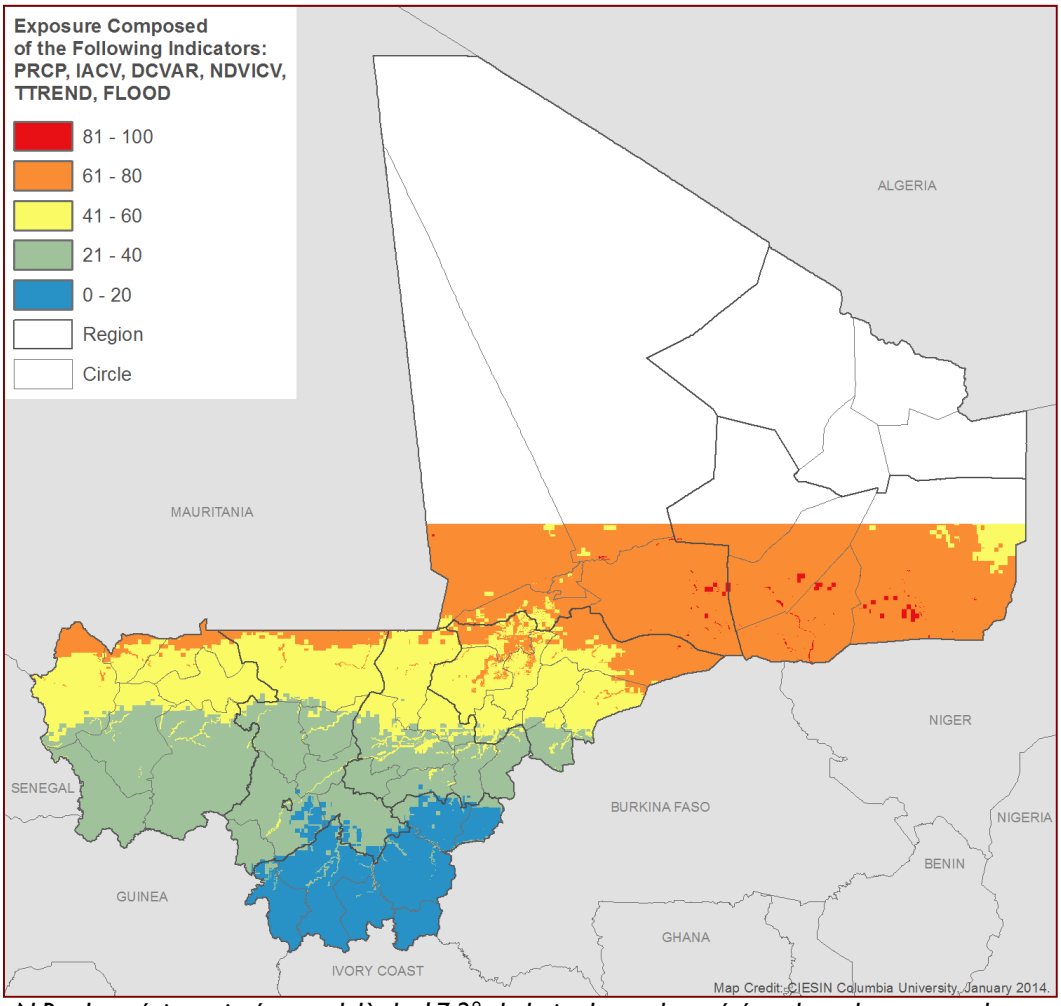
Telles sont les deux principales approches d'utilisation des cartes mais d'autres informations ancillaires pourraient être utiles pour cibler les ressources (comme les cartes topographiques, réseaux routiers, agglomérations secondaires ou les cartes de programmation actuelle des bailleurs de fonds [Figure 7]).

Dans une dernière section (3.5), la future vulnérabilité est présentée en utilisant deux scénarios climatiques projetés sur deux périodes centrées sur 2030 et 2050.

## 3.1 LA COMPOSANTE EXPOSITION

La composante exposition (figure 1) est assez simple à interpréter. Elle reflète le gradient du sud vers le nord de la baisse des précipitations et la variabilité accrue de celles-ci. Certains des éléments plus linéaires jaune, orange et rouges dans les régions présentant des schémas étendus de plus faible exposition reflètent l'incidence de l'exposition au risque d'inondations le long des méandres des principaux fleuves comme le Niger et ses affluents.

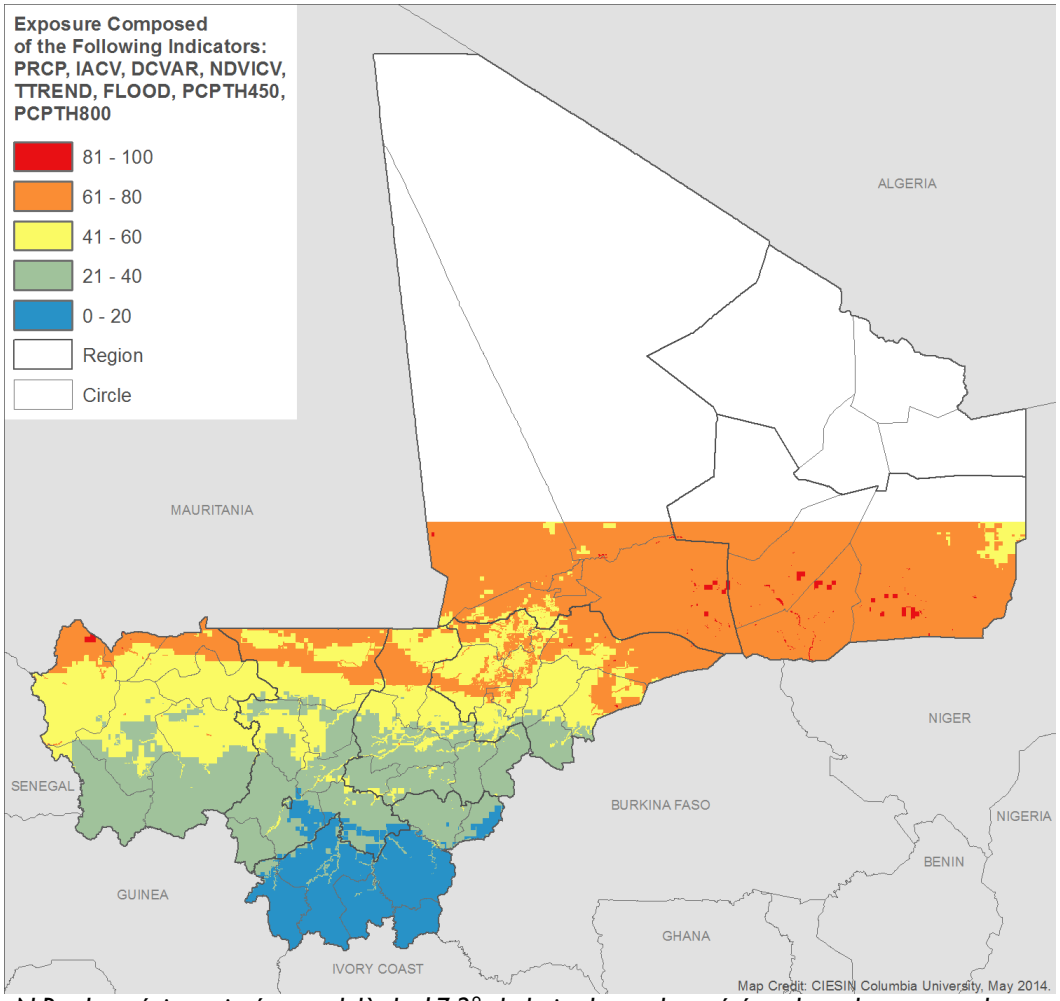
**FIGURE 1. EXPOSITION**




*N.B. : Les régions situées au-delà de 17,2° de latitude nord ont été exclues de cette analyse pour des raisons précisées dans les commentaires de la figure 5.*

Au début, nous avions étudié un indicateur qui observe les changements du nombre d'années au cours de deux périodes (1990-2009 comparée à 1950-1969), pendant lesquelles les précipitations annuelles totales ont franchi certains seuils importants pour la production du sorgho/millet (450mm) et les cultures de rente/coton (800mm). Cette approche a créé deux bandes - 450 mm au nord et 800 mm au sud - avec des niveaux plus élevés d'exposition (Figure 2). Il en ressort que des changements dans la fiabilité des précipitations le long de ces deux ceintures pourraient avoir des répercussions importantes sur les moyens de subsistance dans ces régions. Cette notion aurait besoin d'être validée par une collecte de données sur le terrain. En définitive, nous avons décidé de ne pas inclure cette information dans les indicateurs de la composante exposition ou la carte de vulnérabilité globale.

**FIGURE 2. COMPOSANTE EXPOSITION INCLUANT LES DONNEES DU SEUIL DES PRECIPITATIONS**

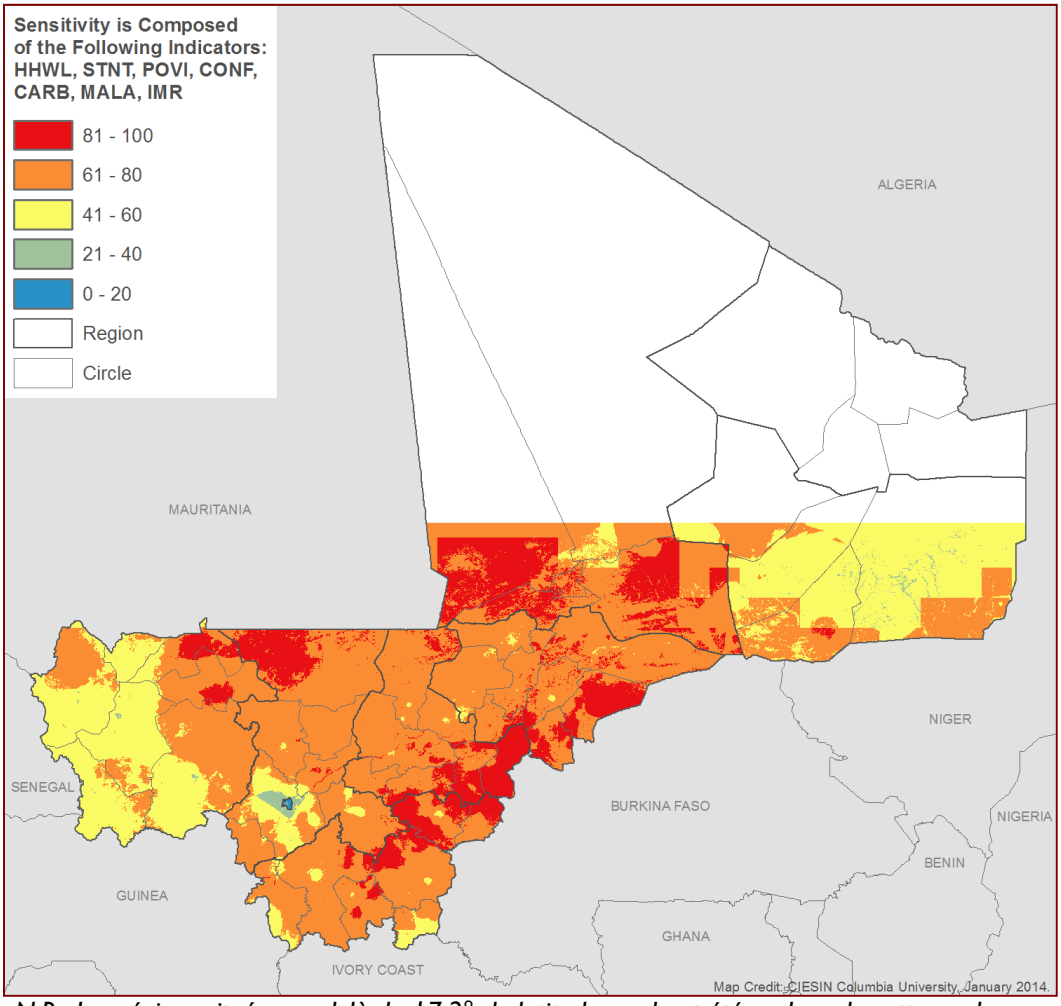



*N.B. : Les régions situées au-delà de 17,2° de latitude nord ont été exclues de cette analyse pour des raisons précisées dans les commentaires de la figure 5.*

## 3.2 LA COMPOSANTE SENSIBILITE

La composante sensibilité (Figure 3) indique un schéma généralisé de sensibilité élevée à modérément élevée à travers la majeure partie du Mali, avec des poches de plus faible vulnérabilité à l'Est et à l'Ouest ainsi qu'aux environs de Bamako. La sensibilité élevée dans le sud-est du Mali indique l'impact de la mortalité infantile élevée dans cette région. Cette région est également relativement plus densément peuplée (voir Figure 7).

**FIGURE 3. SENSIBILITE**

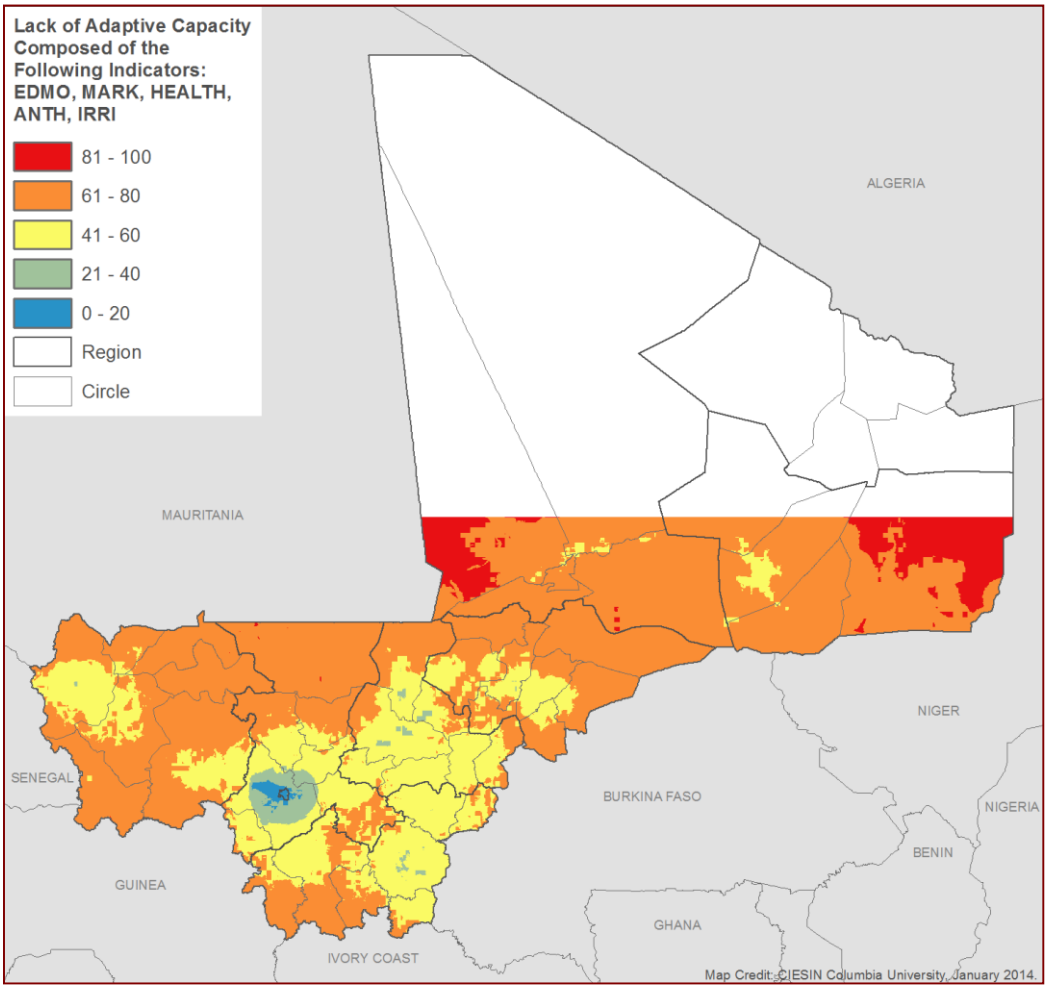



*N.B.: Les régions situées au-delà de 17,2° de latitude nord ont été exclues de cette analyse pour des raisons précisées dans les commentaires de la figure 5.*

## 3.3 COMPOSANTE MANQUE DE CAPACITE D'ADAPTATION

La composante manque de capacité d'adaptation (Figure 4) présente un gradient assez clair, avec une diminution de la capacité d'adaptation à mesure que l'on s'éloigne de Bamako et du fleuve Niger. Ici, les résultats ne sont pas très surprenants puisqu'ils reflètent la densité des postes sanitaires et des infrastructures routières (et donc l'accessibilité du marché) dans les régions environnantes de Bamako et au sud-est du Mali. Des parties du fleuve Niger au nord du Mali présentent également une accessibilité élevée et une plus grande densité des infrastructures sanitaires (par exemple aux environs de Tombouctou et Gao). A l'Ouest, la région autour de Gao présente une capacité d'adaptation plus élevée.

**FIGURE 4. MANQUE DE CAPACITE D'ADAPTATION**

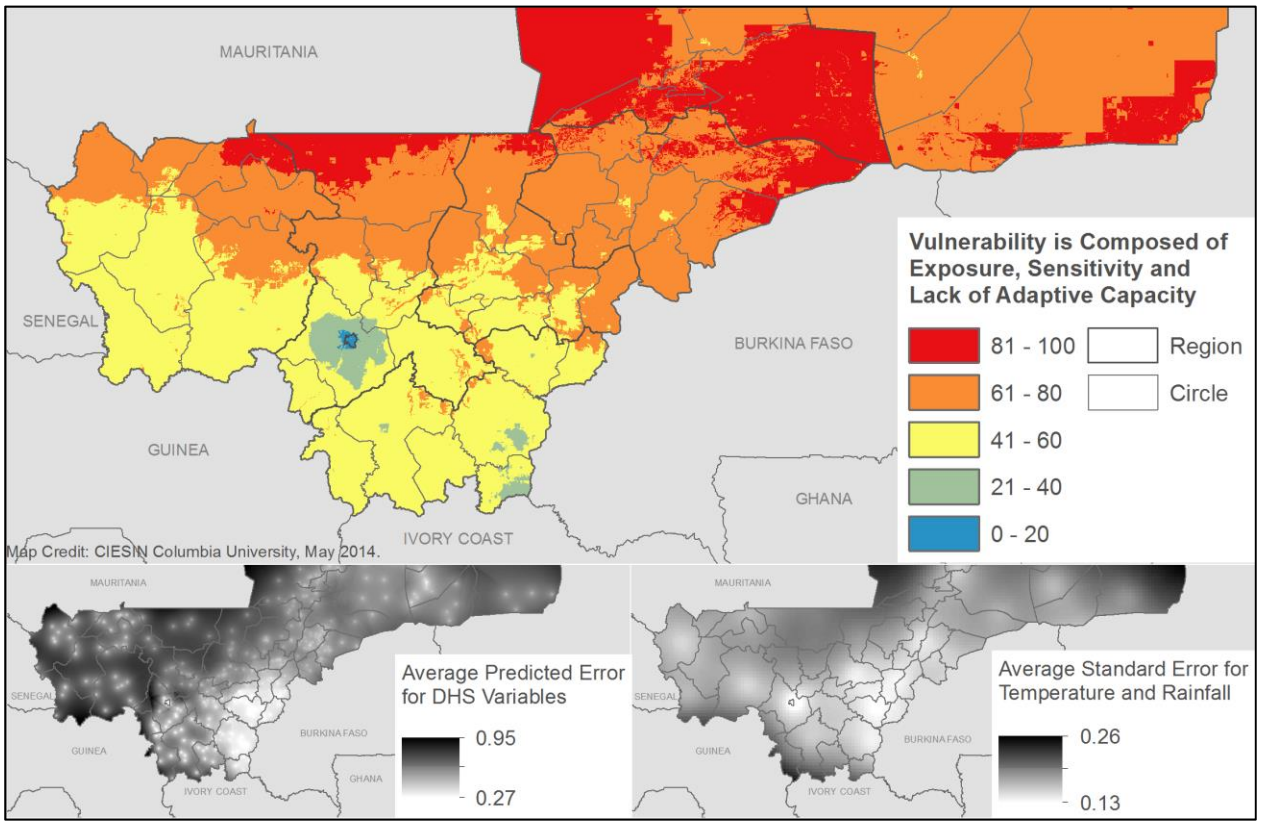



*N.B. : Les régions situées au-delà de 17,2° de latitude nord ont été exclues de cette analyse pour des raisons précisées dans les commentaires de la figure 5.*

## 3.4 VULNERABILITE GLOBALE

La figure 5 présente la carte de la vulnérabilité globale, qui fait la moyenne des valeurs dont l'échelle a été réduite à partir des composantes exposition, sensibilité et manque de capacité d'adaptation. (La figure A2-7 à l'annexe II présente la même carte mais avec des points regroupés en cinq quintiles, chacun représentant une aire égale sur la carte au lieu de cinq intervalles égaux) En général, la vulnérabilité se présente sur un gradient du sud vers le nord, avec la plus faible vulnérabilité à l'extrême sud et autour de Bamako, et augmente progressivement en allant vers le nord, à l'exception de certaines régions à vulnérabilité modérément faible dans le Delta du Niger et le long du fleuve Niger. Sur cette carte nous avons également inclus des cartes en cartouche (Figure 5, en bas) renseignant sur les degrés d'incertitude des données de l'EDS et des données climatiques à la base de sept des 18 indicateurs. Bien que les degrés d'incertitude ne puissent être évalués pour tous les ensembles de données, ces cartouches indiquent que les niveaux d'erreur des données de l'EDS et des données climatiques sont élevés dans les régions à l'ouest de Bamako et dans le Nord du fait de différences spatiales des mesures de ces deux sources de données (à savoir, les échantillons en grappe de l'EDS et les stations météorologiques). Les résultats sont plus solides dans les régions en blanc ou légèrement ombrées sur les deux cartouches. A l'inverse, les utilisateurs devraient être plus prudents concernant les régions sombres sur les deux cartes. Il convient de noter que ces cartes reflètent des différences spatiales des mesures plutôt que des erreurs de mesure à proprement parler (par exemple les problèmes de plan d'enquête ou d'instruments).

**FIGURE 5. INDICE DE VULNERABILITE GLOBALE**




*N.B. : Dans le processus de normalisation, nous avons exclu de l'analyse toutes les régions au nord de 17,2 degré de latitude nord, qui sont très peu peuplées. Nous avons eu recours à cette mesure pour deux raisons : (1) les résultats de la vulnérabilité sont moins significatifs pour une région peu peuplée où la variabilité et les*

*changements climatiques pourraient avoir moins d'impacts du fait des conditions déjà difficiles, et (2) l'inclusion des valeurs de données des indicateurs de cette région pourrait fausser les résultats (à cause des valeurs extrêmes) pour le reste du Mali, la principale région d'étude.*

Il convient de noter que les densités de la population et les chiffres de population varient considérablement dans chacune des cinq classes de vulnérabilité (Tableau 2). Environ 40 pourcent de la population du Mali vit dans des régions de vulnérabilité moyenne et 32 pourcent dans des régions de vulnérabilité moyennement élevée. Seulement six pourcent de la population vit dans des régions de vulnérabilité la plus élevée, et la densité de la population dans ces régions pour la plupart septentrionales est de 7 habitants au km² par comparée à une densité de plus de 3 600 habitants au km² dans la catégorie de faible vulnérabilité. La région de la plus faible catégorie a une superficie de 600 km² seulement et se limite à Bamako et ses environs. La catégorie moyennement élevée comprend la région la plus vaste de presque 310 000 km², soit à peu près un quart de la superficie du Mali. Deux des indicateurs de la capacité d'adaptation, à savoir l'indice des infrastructures sanitaires et l'accessibilité du marché, sont étroitement liés à la densité de la population. Ainsi, il est à noter que l'indice de vulnérabilité n'est pas complètement indépendant de la répartition de la population.

**TABLEAU 2. STATISTIQUES DE LA SUPERFICIE ET DE LA POPULATION POUR CHAQUE CATEGORIE DE VULNERABILITE**

| Catégories de l'indice de vulnérabilité | Surface (km²) | Densité moyenne de la population (hbt. /km²) | Chiffre de population | % de la population |
|---|---|---|---|---|
| Faible (0-20) | 600 | 3 623 | 2 116 524 | 14,2 |
| Moyennement faible (21-40) | 11 034 | 104 | 1 107 342 | 7,4 |
| Moyenne (41-60) | 194 493 | 32 | 6 073 534 | 40,8 |
| Moyennement élevée (61-80) | 307 357 | 16 | 4 727 328 | 31,8 |
| Elevée (81-100) | 133 711 | 7 | 849 869 | 5,7 |

Dans les figures 6 et 7, nous présentons deux cartes de référence qui aident à l'analyse des résultats. La figure 6 présente la carte de la densité de la population pour l'année 2010. La figure 7 est la "Supermap 2.0" régionale du Sahel des programmes d'assistance humanitaire et de développement de l'USAID qui sert de référence en vue d'une comparaison entre les programmes actuels de l'USAID et la cartographie de la vulnérabilité climatique. En général, il est évident que les programmes de développement sont concentrés dans le sud plus peuplé, où la vulnérabilité climatique semble la plus faible. Il est concevable que les programmes de l'USAID et des autres bailleurs de fonds aient contribué à réduire la vulnérabilité dans cette région, ce qui n'aurait pas été le cas sans ces programmes.

**FIGURE 6. CARTE DE LA POPULATION DU MALI**

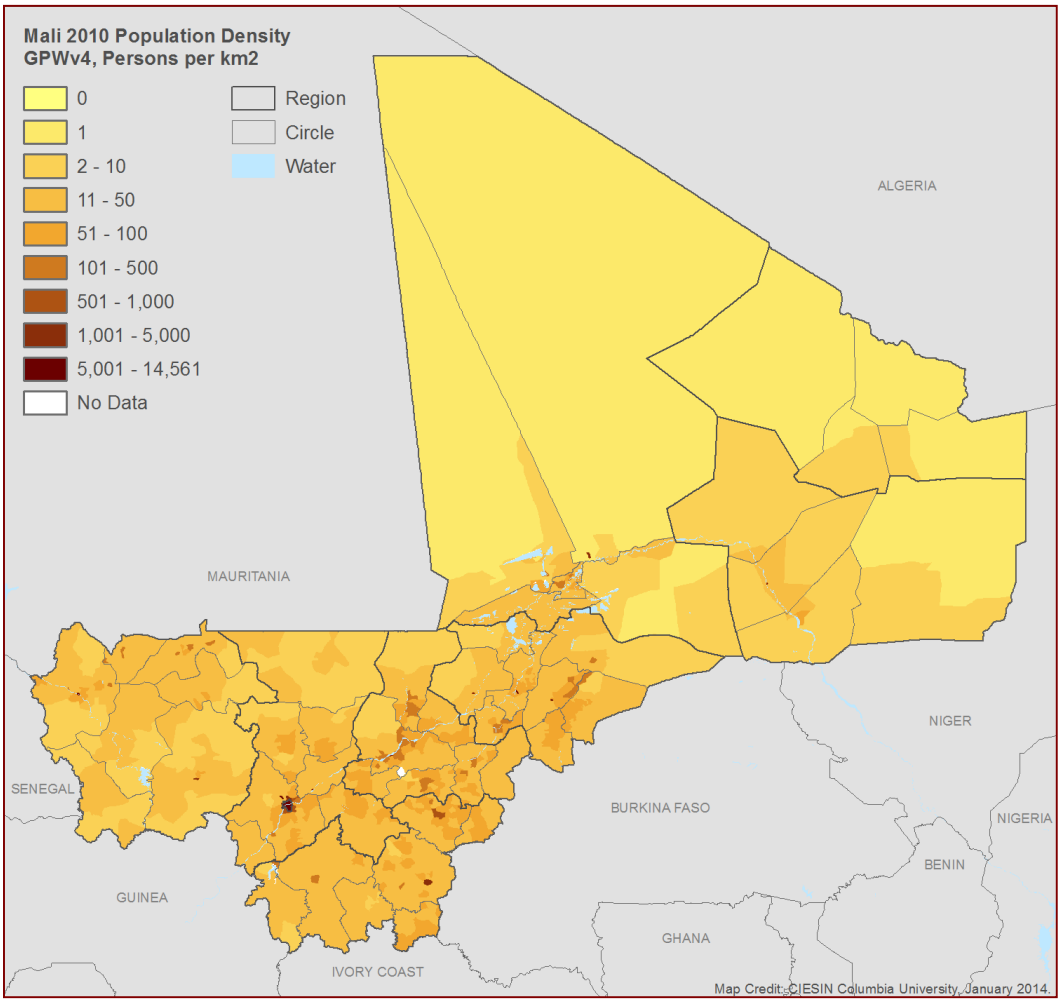
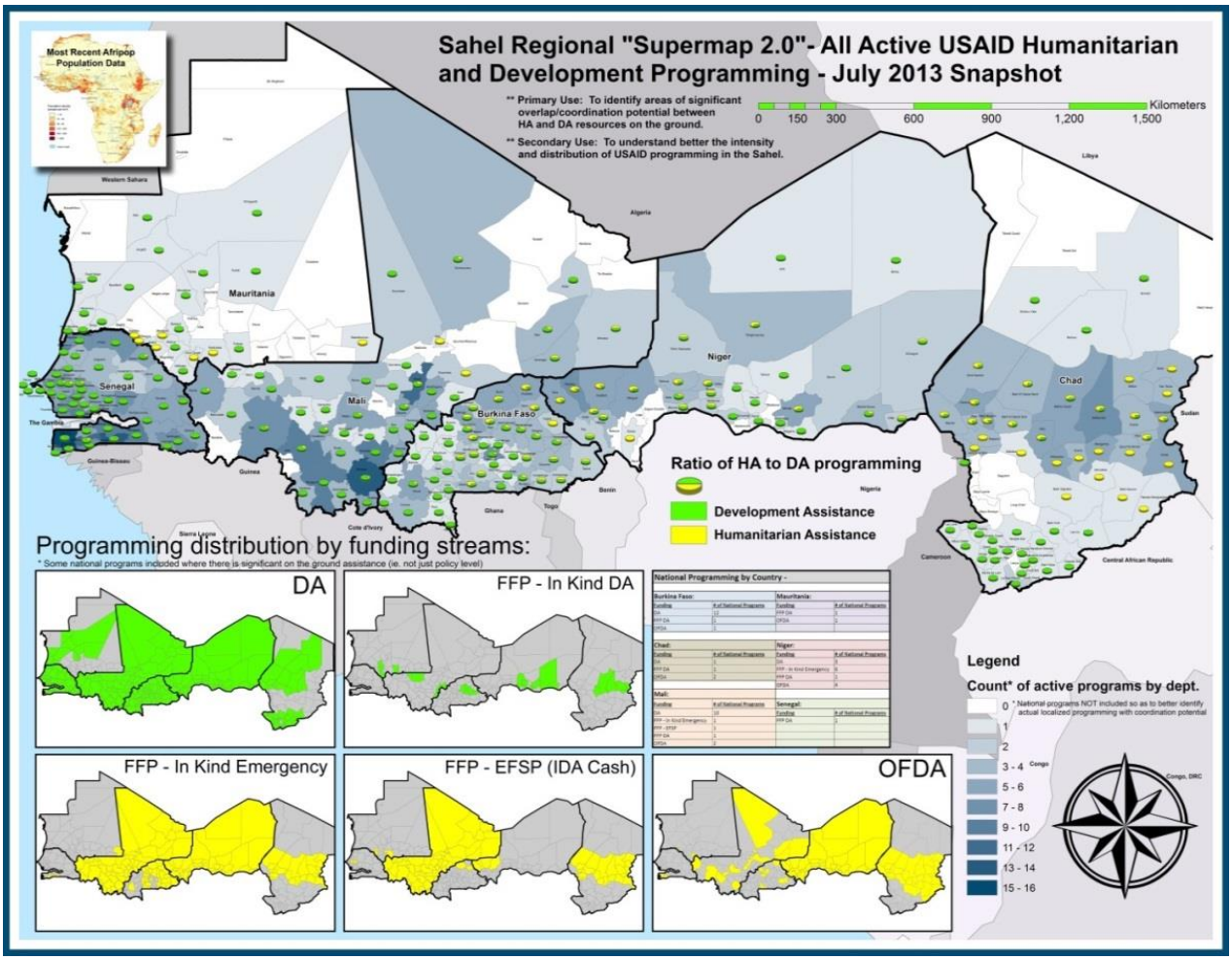


**FIGURE 7. "SUPERMAP" DU SAHEL POUR LES PROGRAMMES DE L'USAID**




*Source : Carte reproduite avec l'autorisation de Jeremy Chevrier, USAID Dakar*

## 3.5 VULNERABILITE FUTURE

Les futurs scénarios ont été élaborés pour la tendance de la température (TTREND) et les précipitations moyennes annuelles (PRCP) à partir des RCP 4.5 et 8.5,[5] et pour les deux périodes de 30 ans centrées sur 2030 et 2050. Les détails concernant les données et les méthodes des scénarios climatiques, y compris la justification ainsi que les approches de réduction d'échelle et de correction des biais, sont inclus en annexe II. Il n'a pas été possible de projeter les autres indicateurs d'exposition au climat du fait que la variabilité et les extrêmes sont difficiles à saisir avec les Modèles de circulation générale (MCG). Il n'a pas été possible non plus de développer de futurs scénarios pour les indicateurs inclus dans les composantes sensibilité et manque de capacité d'adaptation étant donné les contraintes de temps et de ressources.

Les valeurs projetées pour TTREND et PRCP ont été définies de manière à ce qu'elles puissent être inférieures ou supérieures à l'échelle de la période historique 0-100, indiquant une exposition réduite ou

[5] Ces scénarios RCP tiennent leur nom d'une série de valeurs de forçage radiatif pour l'année 2100 par rapport aux valeurs préindustrielles de +4,5 et +8,5 W/m². RCP 8.5 représente un monde plus chaud que la valeur RCP 4.5.

accrue sur la période de référence (1950-2009). L'approche appliquée à cet effet était la suivante : étant donné que les valeurs élevées représentent une vulnérabilité élevée pour la tendance de la température (TTREND), dans la période historique nous avons calculé la valeur de l'indicateur transformé pour un pixel donné comme suit :

Valeur de l'indicateur en pixel = ((Valeur brute en pixel - Y)/(X - Y))*100

Où X = valeur maximale observée et Y= valeur minimale observée dans les données brutes.

Etant donné que les valeurs élevées des précipitations représentent une faible vulnérabilité, nous avons calculé la valeur de l'indicateur transformée pour un pixel comme suit (voir aussi Tableau 3) :

Valeur de l'indicateur en pixel = 100-(((Valeur brute en pixel - Y)/(X - Y))*100)

Pour les indicateurs projetés, nous avons souhaité prendre en compte une *augmentation* ou une *baisse progressive* de la vulnérabilité suite au changement climatique, par conséquent les indicateurs transformés ont été calculés à l'aide des minimum et maximum historiques et l'on a fait varier les valeurs des indicateurs futurs entre inférieures à 0 et supérieures à 100 (voir la moitié inférieure du tableau 3). Ensuite la moyenne des points de ces futurs indicateurs TTREND et PRCP a été calculée avec les points des autres indicateurs qui n'ont pas pu être projetés.

**TABLEAU 3. CALCUL DES POINTS DES INDICATEURS TRANSFORMES POUR LA VULNERABILITE HISTORIQUE ET FUTURE (EXEMPLE DES PRCP)**

| Valeur pixel (mm) | Maximum historique (mm) | Minimum historique (mm) | Indicateur transformé |
|---|---|---|---|
| Valeurs historiques | | | |
| 200 | 1 200 | 200 | 100 |
| 400 | 1 200 | 200 | 80 |
| 500 | 1 200 | 200 | 70 |
| 800 | 1 200 | 200 | 40 |
| 1 200 | 1 200 | 200 | 0 |
| Projections futures | | | |
| 100 | 1 200 | 200 | 110 |
| 300 | 1 200 | 200 | 90 |
| 400 | 1 200 | 200 | 80 |
| 900 | 1 200 | 200 | 30 |
| 1 300 | 1 200 | 200 | -10 |

Les indicateurs projetés normalisés pour TTREND et PRCP ont ensuite été agrégés selon les méthodes décrites à la section 2.1, d'abord dans la composante exposition puis dans l'indice de vulnérabilité globale. Dans l'optique de faire des comparaisons avec la vulnérabilité actuelle et de mettre en exergue les changements causés par le stress climatique supplémentaire, la composante exposition et l'indice de

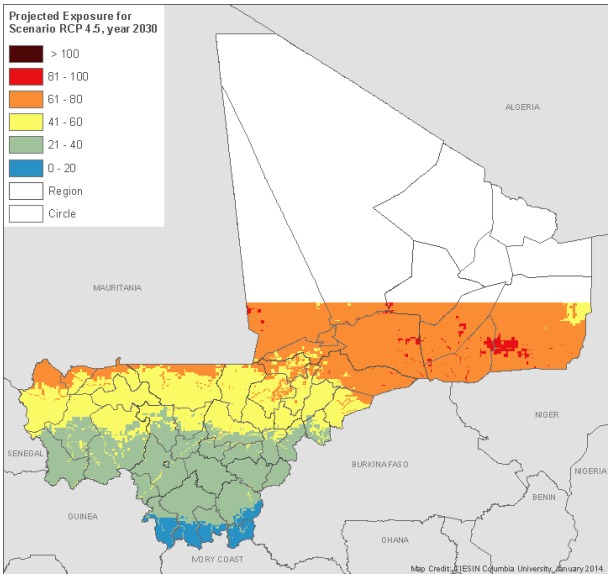
vulnérabilité ont également été normalisés de manière à ce qu'ils puissent être supérieurs à 100. Bien que l'Annexe I présente les résultats projetés pour la moyenne du multimodèle et les modèles "pluvieux" et "sec", ici nous présentons seulement les résultats de la moyenne multimodèle qui est considérée comme la projection la plus probable. En tout, comme résultat nous avons obtenu quatre indices d'exposition et de vulnérabilité :

- Indice d'exposition et de vulnérabilité pour le scénario RCP 4.5, an 2030
- Indice d'exposition et de vulnérabilité pour le scénario RCP 4.5, an 2050
- Indice d'exposition et de vulnérabilité pour le scénario RCP 8.5, an 2030
- Indice d'exposition et de vulnérabilité pour le scénario RCP 8.5, an 2050

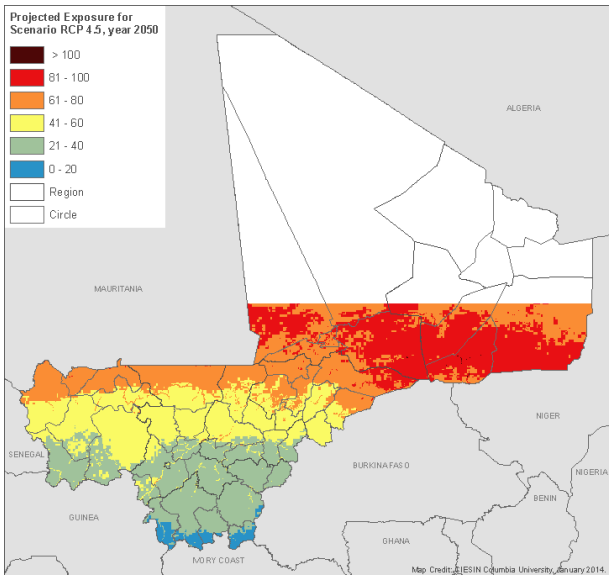
Les figures 8 et 9 présentent ces résultats. Les configurations globales de l'exposition et de la vulnérabilité ne changent pas, avec l'exposition et la vulnérabilité les plus élevées dans le Nord, et les plus faibles dans le Sud et autour de Bamako. Les niveaux d'exposition et de vulnérabilité estimés pour la période de 2030 selon les deux scénarios ne sont pas très différents des niveaux actuels, sauf pour les niveaux d'exposition accrus dans le Sud. Pour la période de 2050, plusieurs régions connaîtront une exposition accrue avec l'extension des niveaux élevés plus au sud et des niveaux élevés maximum au nord. Cette situation est particulièrement marquée selon le scénario RCP 8.5, où la catégorie d'exposition la plus faible a pratiquement disparu. L'on retrouve également cette situation au niveau de la vulnérabilité globale pour la période 2030, où les changements sont légers sauf pour les régions du sud-est du Mali. Il est prévu une plus grande augmentation de la vulnérabilité pour 2050, avec une très forte vulnérabilité pour les régions plus vastes du Nord Mali et la catégorie moyennement élevée couvrant presque le pays entier selon le scénario RCP 8.5, sauf la région environnant Bamako.

La figure 10 présente une carte différentielle pour le scénario 8.5 en 2050 comparée à la carte de la vulnérabilité de référence (figure 5), qui peut être interprétée comme la vulnérabilité supplémentaire résultant du scénario climatique le plus extrême.

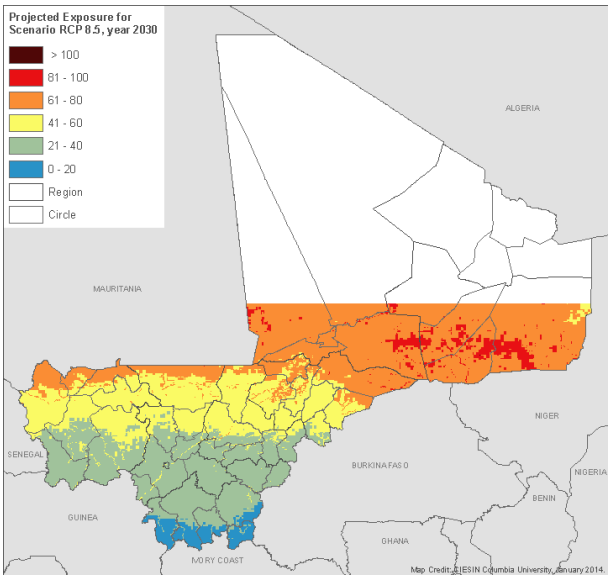
## FIGURE 8. EXPOSITION SELON LE SCENARIO RCP 4.5 (A) AN 2030, (B) AN 2050 ET LE SCENARIO RCP 8.5 (C) AN 2030, (D) AN 2050



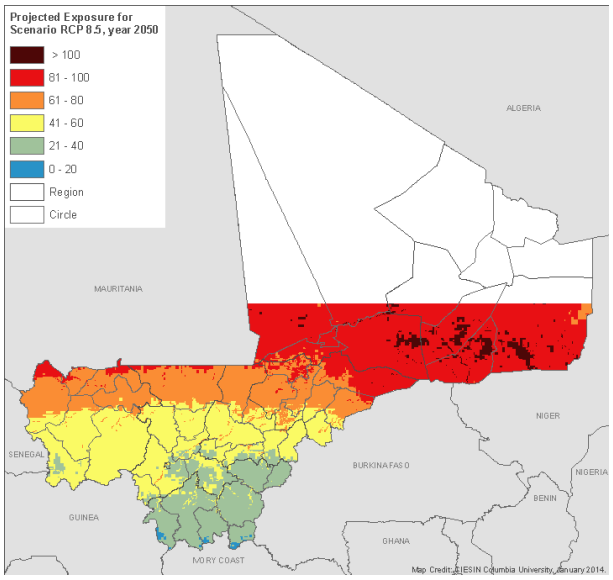

**(a)**




**(b)**




**(c)**




**(d)**

## FIGURE 9. INDICE DE VULNERABILITE SELON LE SCENARIO RCP 8.5 (A) AN 2030, (B) AN 2050 ET LE SCENARIO RCP 8.5 (C) AN 2030 ET (D) AN 2050

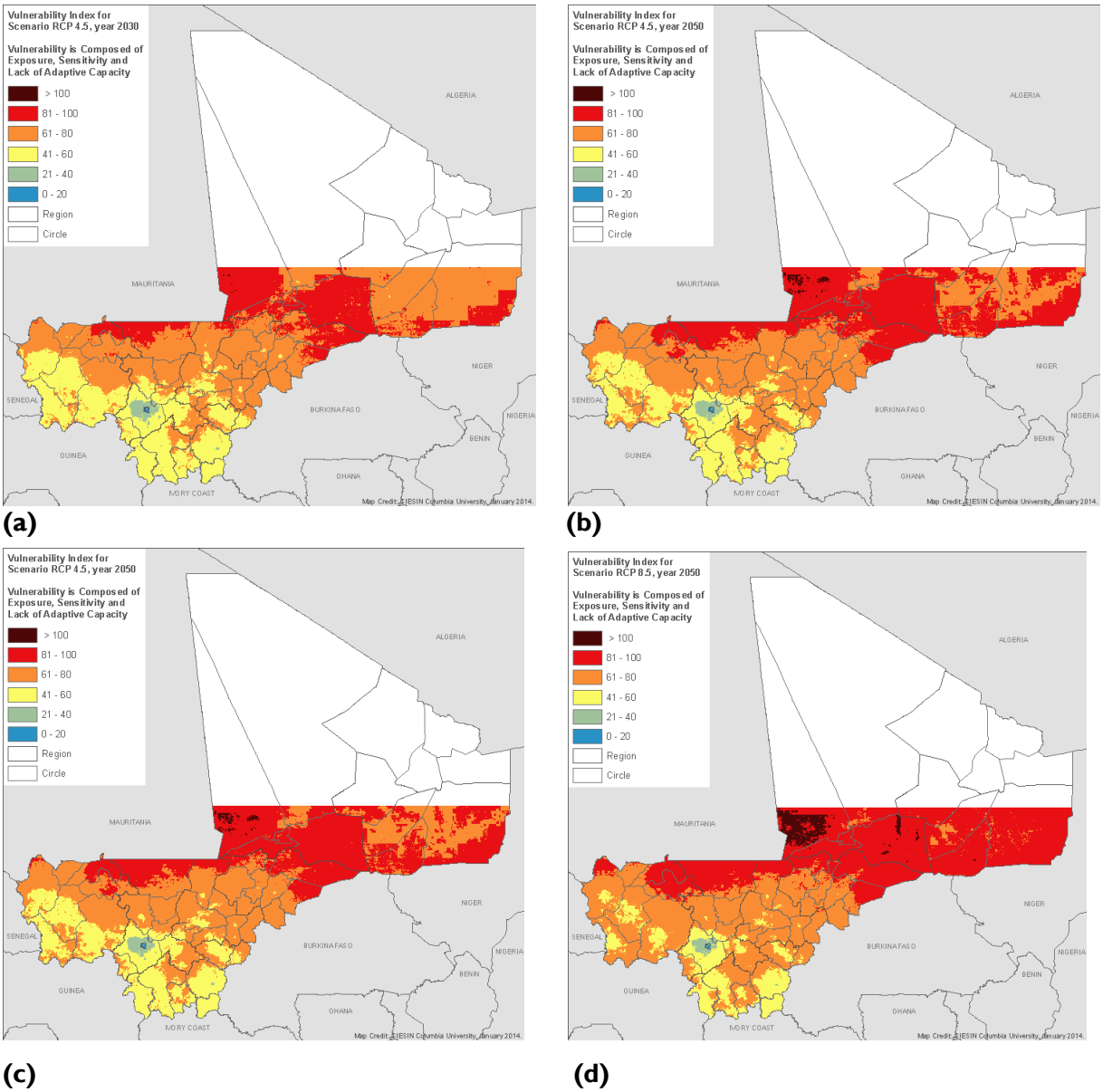
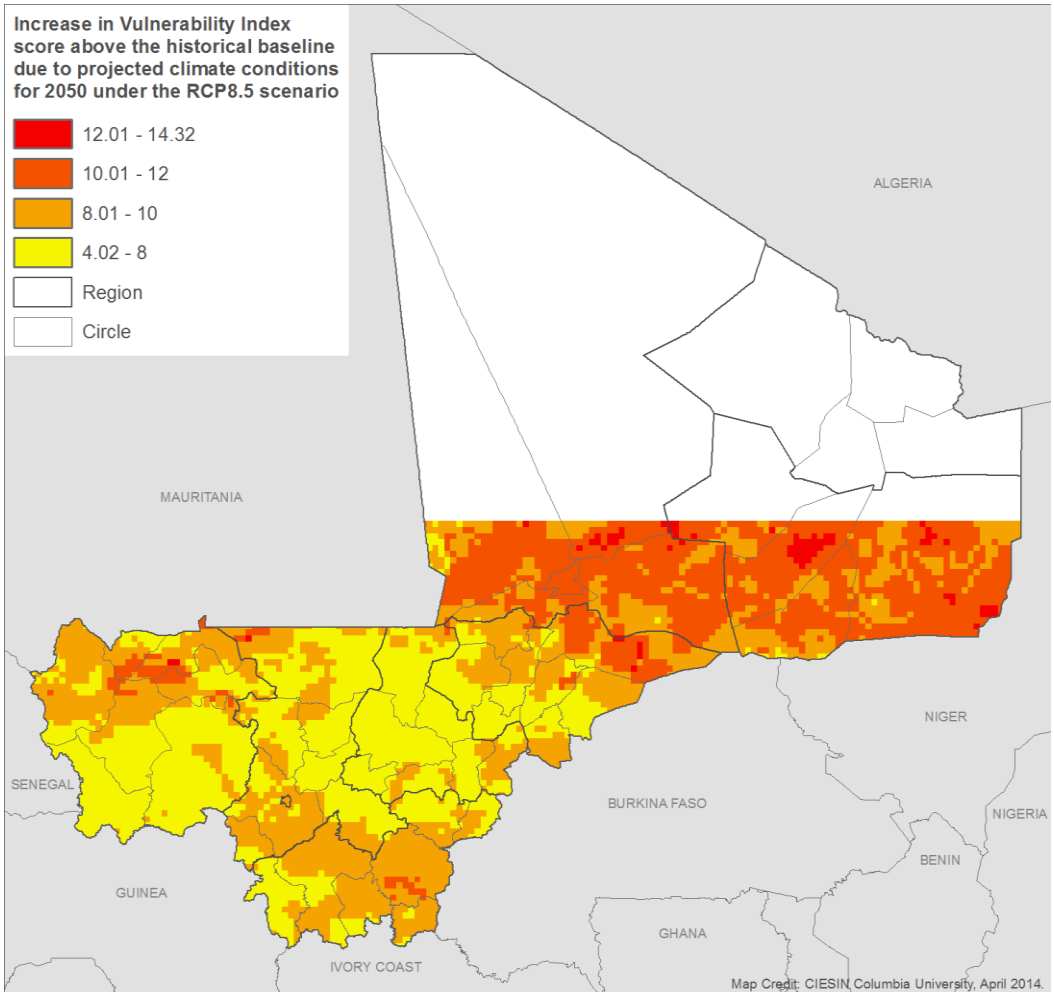


**FIGURE 10. VULNERABILITE SUPPLEMENTAIRE CAUSEE PAR LE SCENARIO CLIMATIQUE LE PLUS EXTREME (SCENARIO RCP 8.5 AN 2050)**




Il est à noter que les changements projetés pour les indicateurs d'exposition n'incluent pas les changements dans la variabilité et, que l'indicateur d'exposition défini n'a pas tenu compte des paramètres les plus utiles à l'agriculture comme les seuils de température pour les cultures, le début de la saison de pluie retardée ou les séquences sèches prévues au cours de la saison de pluie. Par conséquent, les changements projetés pour l'exposition sont très probablement sous-estimés. L'élévation des températures va probablement avoir des impacts considérables sur la potentielle évapotranspiration, rendant improductives les régions déjà marginalisées en termes d'agriculture pluviale. Dans un contexte de changement climatique, il est ainsi probable que la vulnérabilité globale future change plus que ne le décrivent ces cartes.

# 4.0 ANALYSE ET CONCLUSIONS

## 4.1 PROBLEMES LIES A L'APPROCHE DE L'INDICE SPATIAL

Plus largement, il existe un nombre de problèmes liés à la construction de l'indice de vulnérabilité ayant une incidence sur les résultats (pour d'amples informations, voir de Sherbinin [2014]). Ces problèmes sont étudiés dans cette partie par souci de transparence en vue d'une meilleure interprétation des résultats.

Le premier problème concerne les relations entre indicateurs. La réalité est que la communauté des chercheurs ne comprend pas complètement la forme fonctionnelle de la relation entre les indicateurs ou bien entre les composantes qui contribuent à la vulnérabilité (Hinkel, 2011). Par exemple, dans notre méthode actuelle qui adhère à la pratique standard, nous supposons que les valeurs minimales ou maximales observées (ou leur équivalent en estimation Winsor) ont les mêmes significations sur les couches d'intrants. Par exemple, cette méthode suppose qu'un temps de déplacement de 36 heures (2 160 minutes) vers l'agglomération la plus proche a autant d'impact sur la sensibilité et la capacité d'adaptation qu'un taux de mortalité infantile (TMI) de 135 décès pour 1 000 naissances vivantes étant donné que les deux ont une note de 100 points transformés. Cependant, il est probable qu'une région qui a un TMI de 135 soit bien plus vulnérable. Un autre facteur simple excluant la comparaison entre les deux extrêmes est que pour certains indicateurs, les valeurs s'appuient sur une surface interpolée avec une haute précision dans l'espace, qui génère plus de valeurs extrêmes ou des "longues queues" dans la distribution des données (par exemple l'accessibilité du marché). D'autres (par exemple le TMI et l'indice de pauvreté par commune) sont calculés en moyenne au sein d'unités spatiales, qui réduisent artificiellement les extrêmes.[6] Bien que nous ayons réduit les queues des surfaces matricielles continues de manière à augmenter les points de la vulnérabilité pour les faibles valeurs sur l'échelle brute, nous n'avons pas la preuve empirique qui nous permettrait de comparer deux indicateurs quelconques à n'importe quel niveau de vulnérabilité "absolue". La vulnérabilité est une construction, le résultat d'interactions complexes dans le système homme-environnement et non un état objectif.[7]

Se référant aux pratiques courantes, une autre hypothèse que nous avons posée est de supposer une relation linéaire entre les couches d'intrants et les catégories conceptuelles mesurées. Cependant, la relation fonctionnelle pourrait être très différente. Ce pourrait être une fonction échelonnée, sigmoïde ou asymptotique si des seuils critiques sont atteints ; ou ce pourrait être une fonction exponentielle si des valeurs élevées déclenchent une série de problèmes qui n'apparaissent pas à des niveaux plus faibles. Nous avons examiné la possibilité de prendre les logarithmes naturels des données brutes comme éléments du processus de transformation de certains indicateurs mais n'avions pas une justification théorique à cet effet.

L'interaction entre les composantes constitue un autre problème. Actuellement nous utilisons une approche additive mais l'interaction pourrait être multiplicative. Par exemple, si la capacité d'adaptation est assez élevée, il pourrait importer peu que la sensibilité ou l'exposition soit très élevée. En d'autres

---

6 La majorité de nos indicateurs dérivés des résultats de l'EDS étaient fondés sur les surfaces interpolées entre les points de l'enquête en grappe, qui évitaient le problème de la moyenne spatiale au niveau régional. Tel que décrit à la section 2, nous avons doublé la valeur pondérale pour ces indicateurs.

7 La littérature présente la vulnérabilité comme un phénomène émergent (Birkmann et Fernando, 2008). Elle se révèle lorsque le système est stressé par le climat, l'économie ou d'autres chocs et perturbations.

termes, l'hypothèse selon laquelle les trois composantes sont fongibles - que de bons niveaux d'une composante compensent les mauvais d'une autre, sur une série de valeurs - ne serait pas avérée. Par exemple, il serait possible qu'à terme, une région donnée évolue du 60e au 80e percentile pour l'indicateur exposition, entraînant des impacts tellement considérables sur la vulnérabilité globale que cela ne ferait pratiquement aucune différence si la même région évoluait du 30e au 10e percentile pour l'indicateur capacité d'adaptation. Même si la relation essentielle est additive, nous adoptons les mêmes valeurs pondérales pour toutes les composantes. Cependant la relation avec la vulnérabilité globale pourrait être différente. Par exemple, il serait possible qu'une unité d'exposition ait le même effet que 10 unités de sensibilité sur la vulnérabilité.

Les ACP lèvent certaines des limites de l'approche additive en évitant de poser l'hypothèse de relations préalables entre les indicateurs mais en permettant à ces relations d'émerger des analyses. Comme Abson et al. (2012) l'indiquent :

> La génération d'un unique indice de vulnérabilité composite à l'aide de l'approche additive/de normalisation est problématique étant donné que les informations importantes concernant les relations entre les variables d'origine sont masquées dans l'indice agrégé sans unité en résultant (de plusieurs indicateurs à un indice unique). En plus, lorsqu'une cartographie socioécologique de la vulnérabilité est dressée sur de vastes étendues d'espaces (et donc à travers divers systèmes socioécologiques), il est probable que les facteurs de vulnérabilité varient considérablement dans l'espace. (p.516)

Pour cette raison, nous présentons les ACP comme méthode d'agrégation alternative (Annexe II). Les résultats globaux sont assez similaires à ceux de l'approche additive bien que des indicateurs reflétant la proximité des établissements humains, l'accessibilité du marché et des infrastructures de santé semblent jouer un rôle plus important.

## 4.2 CONCLUSION

Les cartes du présent rapport donnent d'amples informations pour la prise de décisions concernant l'adaptation au changement climatique au Mali. Bien que la prise de décision déterminée par les données utilisant des cartes comme celles présentées ici soit préférable à la prise de décision s'inspirant uniquement de l'intuition, des convenances ou de considérations politiques, il est important de se rappeler les avertissements susmentionnés concernant les limites de ce type d'exercice. Bien que la carte de la vulnérabilité globale (Figure 5) donne des informations utiles pour la programmation, bon nombre d'informations supplémentaires peuvent être glanées en examinant les cartes de composantes, les cartes ACP (annexe II) et les cartes d'indicateurs individuels en annexe IV.[8] Des analyses plus approfondies pourraient être faites à l'aide d'un sous-ensemble de couches de données jugées les plus pertinentes pour une programmation particulière de développement ou de répartition des ressources.

Globalement, les résultats ne sont pas très surprenants étant donné que les régions du nord sont réputées plus marginalisées en matière de climat et moins économiquement développées. L'incidence du conflit récent au nord du Mali, qui se reflète uniquement dans l'indicateur conflit (s'étendant sur l'année 2012), a probablement augmenté la vulnérabilité climatique globale de la région. La carte de la sensibilité (figure 3) montre une sensibilité relativement élevée (ou "vulnérabilité sociale") au sud-est du Mali, une région relativement densément peuplée qui bénéficie d'une grande partie de la programmation USAID.

---

8 Une étude critique des relations statistiques entre les indicateurs est présentée en Annexe II. Bon nombre d'indicateurs sont fortement auto-corrélés dans l'espace, y compris les indicateurs d'exposition et les indicateurs biophysiques comme le carbone organique du sol et l'endémicité du paludisme, qui sont hautement influencés par les précipitations.

La sensibilité plus faible à l'est du Mali (autour de Gao) et à l'ouest (sud de Kayes) est influencée par les données du TMI d'une résolution relativement grossière mais elle est confirmée par nombre d'autres indicateurs de sensibilité comme le retard de croissance infantile, la richesse des foyers et l'indice de pauvreté. Il serait intéressant d'étudier si les résultats de l'EDS pour 2012 confirment de plus faibles TMI et indicateurs de pauvreté dans ces deux régions.[9]

Un accent particulier devrait être mis sur les régions déjà en marge de l'agriculture, tel que décrit dans la figure 3 section 3.1 (voir les textes d'accompagnement) et présenté à la fin de la section 3.5. Il est probable que la limite nord de l'agriculture pluviale se soit déplacé vers le sud à cause d'un accroissement de la température et qu'elle continuera à se déplacer avec l'élévation des températures.

[9] Les résultats de l'EDS 2012 n'étaient pas prêts pour la publication au moment où nous effectuions cet exercice de cartographie.

# 5.0 SOURCES


Abson, D.J., A.J. Dougill, et L.C. Stringer. (2012). Using Principal Component Analysis for information-rich socio-ecological vulnerability mapping in Southern Africa. *Applied Geography*, 35:515-524.

Baptista, S. (2014). *Design and Use of Composite Indices in Assessments of Climate Change Vulnerability and Resilience*. Document technique pour le projet de Résilience africaine et latino-américaine au changement climatique (ARCC). Washington, DC: USAID.

Baptista, S., L. Brottem, A. de Sherbinin, M. Edquist, A. Fischer, M. Levy, E. Schnarr, C. Simon, P.V. Sundreshwar, et S. Trzaska. (2013). *Vulnérabilité au changement climatique : document de référence pour l'évaluation régionale ARCC*. Document technique pour le projet de Résilience africaine et latino-américaine au changement climatique (ARCC). Washington, DC: USAID.

Birkmann, J., & N. Fernando. (2008). Measuring revealed and emergent vulnerabilities of coastal communities to tsunami in Sri Lanka. *Disasters*, 32(1):82-105. doi: 10.1111/j.1467-7717.2007.01028.x.

de Sherbinin, A. (2014). *Spatial Climate Change Vulnerability Assessments: A Review of Data, Methods and Issues*. Document technique pour le projet de Résilience africaine et latino-américaine au changement climatique (ARCC). Washington, DC: USAID.

de Sherbinin, A. (2009). The Biophysical and Geographical Correlates of Child Malnutrition in Africa. *Population, Space and Place,* 15. Disponible sur : http://dx.doi.org/10.1002/psp.599.

Funk, C., Michaelsen, J., et Marshall, M. (2012). Mapping recent decadal climate variations in precipitation and temperature across Eastern Africa and the Sahel, chap. 14 *in* Wardlow, B., Anderson, M., et Verdin, J., eds., *Remote sensing of drought—Innovative monitoring approaches*. Londres, Royaume-Uni : Taylor et Francis.

Füssel, H.-M. (2009). *Review and quantitative analysis of indices of climate change exposure, adaptive capacity, sensitivity, and impacts*. Note de référence pour le Rapport mondial sur le développement 2010 Washington, DC: Banque Mondiale

Hinkel, J. (2011). "Indicators of vulnerability and adaptive capacity": Towards a clarification of the science–policy interface. *Global Environmental Change*, 21, 198-208.

Midgley, S. J. E., R. A. G. Davies & S. Chesterman. (2011). Climate risk and vulnerability mapping in southern Africa: status quo (2008) and future (2050). Rapport dressé par le Programme régional sur les changements climatiques (PRCC), Ministère britannique du développement international (DFID). Cape Town, Afrique du Sud : OneWorld Sustainable Investments.

OCDE (2008). *Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide*. Paris: Organisation pour la coopération et le développement économique

Thow, A., & M. de Blois. (2008). *Climate change and human vulnerability: Mapping emerging trends and risk hotspots for humanitarian actors*. Bath, Royaume Uni et Genève Suisse : Maplecroft, and CARE International.

Wikipedia. (2014). Région de Kayes. Disponible sur : http://en.wikipedia.org/wiki/Kayes_Region

Yusuf, A.A., & H. Francisco. (2009). *Climate Change Vulnerability Mapping for Southeast Asia.* Singapour : EEPSEA.

# ANNEXE I. SCENARIOS CLIMATIQUES FUTURS

## AI.1 JUSTIFICATION DE LA REDUCTION D'ECHELLE ET LA CORRECTION DU BIAIS

Les conditions climatiques futures sont prévues à l'aide des Modèles de circulation générale (MCG), qui sont des représentations numériques de pointe des processus chimiques et physiques internes au système climatique. Les MCG sont utilisés pour simuler les effets des émissions de gaz à effet de serre sur la composition atmosphérique et ensuite pour prévoir les effets des changements de la composition atmosphérique sur la circulation atmosphérique et océanique, la température et les précipitations. D'après nos connaissances actuelles et nos capacités technologiques, ces modèles représentent certes les processus internes au système climatique, cependant ils demeurent une représentation imparfaite du système et reproduisent mieux les caractéristiques générales des grands systèmes climatiques, tels que les systèmes de mousson, que les conditions climatiques d'un lieu donné. Plus particulièrement, il est bien établi que dans leur représentation de la mousson ouest africaine, principal système qui détermine le climat d'Afrique de l'Ouest, les MCG reproduisent raisonnablement bien l'évolution vers le nord entre mai et octobre et la retraite vers le sud entre novembre et avril. Cependant, l'amplitude et le moment exacts de cette évolution et la quantité exacte des précipitations produites peuvent être sur/sous-estimées. Cette situation est en partie due à une résolution relativement grossière des modèles qui ne peuvent pas reproduire nombre de caractéristiques locales comme les plans d'eau, les chaînes de montagne et les changements dans l'occupation des sols. En plus, au Sahel les modèles sous-estiment la variabilité interannuelle et décennale et ne sont pas capables de reproduire la période mouillée au cours des années 50 ou la sécheresse des années 70 et 80 (Biasutti, 2013)

Par conséquent, il est généralement recommandé de corriger ces biais systématiques a posteriori, soit en 1) utilisant des modèles régionaux qui couvrent seulement des petites parties du globe et reproduisent nombre de caractéristiques locales ; soit en 2) ajustant statistiquement les volumes de précipitations, la température moyenne et les autres variables climatiques reposant sur les observations locales. Cette dernière méthode réduit l'échelle des changements climatiques à grande échelle produits par les MCG à n'importe quelle résolution/emplacement, alors que les modèles régionaux demeurent limités à des résolutions supérieures à 10x10 km et portent certains biais systématiques des MCG. Dans la présente étude, nous avons choisi d'utiliser une méthode statistique de réduction d'échelle afin d'obtenir des prévisions relatives aux caractéristiques climatiques (précipitations et température) pour chacune des cellules de la grille des données historiques de température et de précipitations observées au départ.

En plus de la réduction de l'échelle, l'analyse des prévisions suppose l'évaluation de l'incertitude dans les prévisions en tenant compte des sorties de plusieurs modèles, chacun ayant des caractéristiques distinctes et des biais systématiques.

## AI.2 DONNEES ET METHODES

Des résultats des MCG à une résolution nominale comprise entre 100x100km et 300x300km ont été obtenus à partir de la Phase de projet de la comparaison de modèles couplés n°5 (CMIP5), l'archive

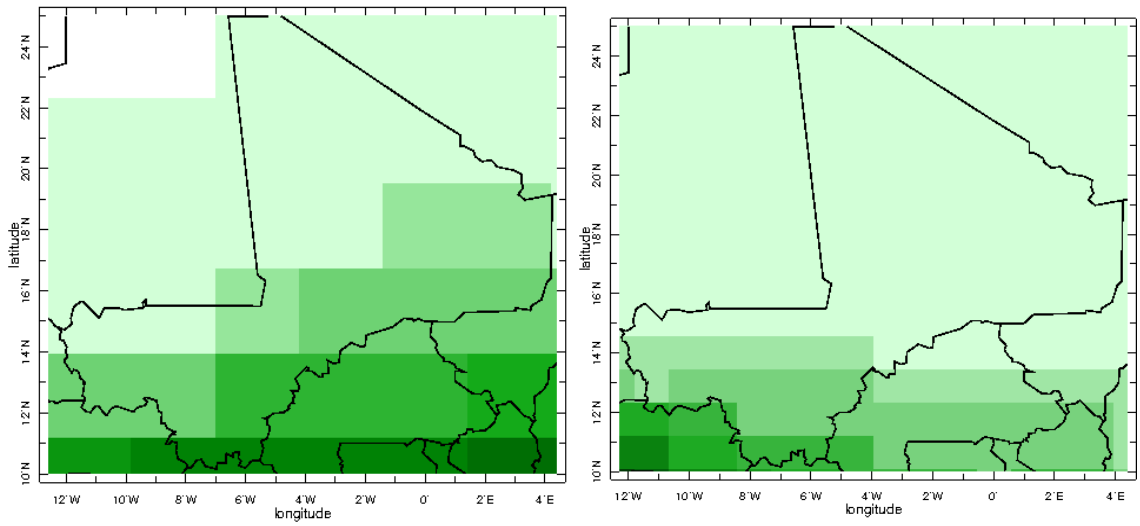
officielle de l'évaluation GIEC la plus récente. Nous avons extrait des données à partir de 10 modèles différents et sous deux scénarios d'émission à savoir le RCP4.5 (correspondant à un 'état stationnaire' des niveaux d'émission actuels) et le RCP8.5 (correspondant à l'augmentation des émissions au fil du temps). Le tableau A1-1 résume les modèles utilisés. Les prévisions des précipitations et de la température extraites pour la période 2015-2065 ont été subdivisées en deux périodes de 30 périodes, 2015-2045 et 2035-2065, avec des périodes médianes correspondantes de 2030 et 2050 respectivement. Les périodes de trente ans sont des périodes standard pour l'évaluation des caractéristiques climatiques moyennes. En outre, pour prévoir des valeurs, les valeurs des MCG pour la période historique 1971-2005 ont également été obtenues et utilisées dans les corrections de biais et la réduction d'échelle.

### TABLEAU A1-1 : LES MCG UTILISES POUR OBTENIR LES PREVISIONS, Y COMPRIS LE PAYS ET L'INSTITUTION QUI ONT DEVELOPPE LE MODELE ET LES RESOLUTIONS DU MODELE

| Modèle | CanESM2 | CCSM4 | CNRM-CM5 | CSIRO-Mk3-6-0 | GISS-E2-R | Had GEM 2-ES | MIROC-ESM | MIROC 5 | MPI-ESM-LR | MRI-CGCM3 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Lab | CCCMA | NCAR | CNRM-CERFACS | CSIRO-QCCCE | NASA GISS | MOHC | MIROC | MIROC | MPI | MRI |
| Pays d'origine | Canada | Etats-Unis | France | Australie | Etats-Unis | Royaume-Uni | Japon | Japon | Allemagne | Japon |
| Résolution en degrés (lat. x long.) | 2,8x2,8 | 0,9x1,25 | 1,4x1,4 | 1,87x1,87 | 2x2,3 | 1,25x1,87 | 2,81x2,81 | 1,4x1,4 | 1,8x1,8 | 1,125x1,125 |

*N.B. : A l'équateur, 1 degré de latitude ou de longitude correspond à 110 km.*

### FIGURE A1-1. ILLUSTRATION DE LA RESOLUTION DU MODELE : (A) EST UN MODELE DE FAIBLE RESOLUTION, ET (B) EST UN MODELE DE HAUTE RESOLUTION




**(a)** **(b)**

L'échelle des résultats bruts des MCG ont été statistiquement réduits avec un accent particulier sur les corrections des biais sur le début de la saison des pluies, l'envergure des précipitations et de la

température et d'autres variables ainsi que l'amplitude de leur variabilité interannuelle (que les modèles tendent à sous-estimer). Pour réaliser cette réduction d'échelle, une procédure à plusieurs étapes a été appliquée en utilisant les tableaux mensuels des précipitations et de la température observée au Mali, de Funk et al. (2012) :

1. Pour chaque point de grille dans les observations et dans chaque modèle, un point de grille dans le cycle saisonnier des précipitations qui correspond le mieux au cycle saisonnier moyen observé a été déterminé.

2. Les régressions linéaires entre les valeurs des précipitations mensuelles observées et simulées dans le couplage des points de grille sur la période historique ont été calculées pour chaque mois calendaire (de janvier à décembre) en utilisant des valeurs classées en rang.[10] Ces équations de régressions ont ensuite été utilisées pour prédire des valeurs corrigées des biais des prévisions, avec des prévisions brutes utilisées comme indicateurs. En d'autres termes, les précipitations et la température prévues par les MCG sont utilisées comme prédicteurs pour obtenir des valeurs plus réalistes prenant appui sur les relations prédictives établies à l'aide des observations et simulations du climat historique. Le cycle saisonnier historique moyen corrigé des biais à l'aide de ces régressions correspond parfaitement au cycle saisonnier observé moyen (non illustré).

Une moyenne multimodèle semble être le futur scénario climatique plus probable (GIEC 2007). Par conséquent, les caractéristiques moyennes calculées sur les deux périodes de 30 ans centrées sur 2030 et 2050 ont été calculées pour la moyenne de tous les modèles. Les variations dans les conditions prévues entre les modèles sont présentées comme modèles "sec" et "pluvieux" classés respectivement, 2e et 8e sur 10 modèles en termes de précipitations annuelles dont la moyenne a été calculée sur l'encadré qui inclut le Mali. Seules les tendances des précipitations annuelles et de la température sont présentées. D'autres variables telles que le coefficient de variation ou la variance décennale ne sont pas fiables dans les modèles.

## AI.3 RESULTATS

La figure A1-2 à la fin de cette section présente le volume des précipitations historiques et les tendances de la température pour information tandis que les figures allant d'A1-3 à A1-6 présentent les cartes pour les résultats prévus en matière de précipitations et de température. Il convient de noter qu'il n'est pas toujours question d'une simple association entre les modèles les plus secs et les plus chauds ou entre les modèles les plus pluvieux et les plus frais. D'une part, le phénomène produisant de fortes pluies, la mousson ouest africaine, est déterminé par la différence de température entre l'océan au sud (plus frais) et l'intérieur (plus chaud). Sa force dépend de la force de cette différence. D'autre part, les pluies rafraîchissent la surface de la terre à travers l'évaporation et les effets d'ombre des nuages. Par conséquent plus la saison est pluvieuse plus la température est fraîche. Ainsi, certains modèles produiraient des températures plus fraîches à cause de plus fortes précipitations tandis que d'autres produiraient de plus fortes précipitations du fait des températures plus chaudes à l'intérieur. Tous ces mécanismes sont possibles et devraient être interprétés comme des scénarios possibles d'évolution des précipitations et des températures au Mali.

---

[10] Les MCG ne sont pas censés reproduire les séries de périodes historiques des précipitations, de la température et d'autres variables observées en un lieu donné. Seules les caractéristiques statistiques telles que les précipitations mensuelles et ses écarts standard sont censées coïncider avec les observations. Ainsi, les modèles de régression ne peuvent pas être construits en associant les valeurs simulées dans le temps. Nous avons choisi de construire les relations à partir des valeurs classées des plus petites aux plus grandes dans les séries historiques et simulées. Ainsi, les écarts dans l'amplitude peuvent également être corrigés.

Concernant les précipitations, les volumes annuels en mm/an sont précités en utilisant la même échelle que celle des observations. L'on prévoit que la structure globale des précipitations, en diminution du sud vers le nord, reste la même à l'avenir. En général peu de changements sont prévus, indépendamment du scénario d'émission et de l'horizon prévisionnel. L'écart entre les modèles n'est pas très grand, en particulier concernant les prévisions des précipitations pour la période représentée par le point médian 2030. Les différences entre les modèles "sec" et "pluvieux" sont plus apparentes pour la période représentée par le point médian 2050 selon les deux scénarios RCP.

Comme il a été fait pour les conditions climatiques historiques, les tendances linéaires de la hausse en degré Celsius par décennie ont été calculées. Selon les scénarios 4.5, la tendance moyenne sur les trois prochaines décennies est similaire aux tendances actuelles en termes d'amplitude et de répartition spatiale ; elles augmentent légèrement au cours des décennies suivantes. Le modèle le plus sec prévoit des élévations de température légèrement plus lentes que le taux actuel, mais le multimodèle et le modèle pluvieux indiquent une élévation légèrement plus rapide. Cependant, même dans ces conditions de réchauffement lent, la demande en évapotranspiration des plantes augmentera, avec des répercussions sur la durabilité de l'agriculture, en particulier dans les zones à réchauffement pus rapide au nord, qui sont également plus sèches.

Selon les scénarios RCP8.5, le réchauffement prévu est plus rapide partout mais en particulier dans les zones sèches. Les taux de réchauffement les plus lents sont prévus par le modèle le plus pluvieux dans la moitié sud du pays, où le réchauffement est prévu à un taux similaire à celui des tendances actuelles. Cependant, il est prévu selon ce scénario que les régions les plus sèches se réchauffent plus rapidement que selon le scénario RCP4.5. La moyenne multimodèle indique un réchauffement trois fois supérieur à l'actuel pour la période 2050, avec un réchauffement plus rapide dans les parties nord que dans le sud. La seule exception est le modèle qui prévoit des conditions les plus sèches pour la période 2050, avec des tendances au réchauffement plus rapide dans les parties sud du pays du fait des conditions plus sèches. Par ailleurs, le modèle le plus pluvieux, prévoit des tendances au réchauffement les plus lentes dans les mêmes régions. L'écart entre les résultats pour la période 2050 selon le scénario RCP8.5 est légèrement plus élevé que l'écart dans d'autres scénarios pluvieux et secs.

## AI.4 CONCLUSIONS

Les résultats de 10 modèles de résolution différente dont les biais ont été corrigés et les échelles réduites indiquent de légers changements dans les précipitations au Mali, avec le modèle le plus pluvieux prédisant des conditions légèrement plus pluvieuses et le modèle le plus sec des conditions plus sèches. Cependant, tous les modèles prévoient un réchauffement constant avec des taux variant des taux actuels à trois fois plus. Dans la plupart des cas, le réchauffement le plus rapide est prévu dans les régions plus sèches du nord. Cette situation pourrait avoir une incidence négative sur la production agricole étant donné que la demande en évapotranspiration des cultures pourrait ne plus être satisfaite. En outre, le seuil de température supérieur pourrait être atteint pour certaines cultures. Des études plus approfondies pourraient être nécessaires dans l'optique d'étudier de manière plus précise l'impact potentiel de l'élévation de la température sur l'agriculture dans ces régions.

## AI.5 SOURCES

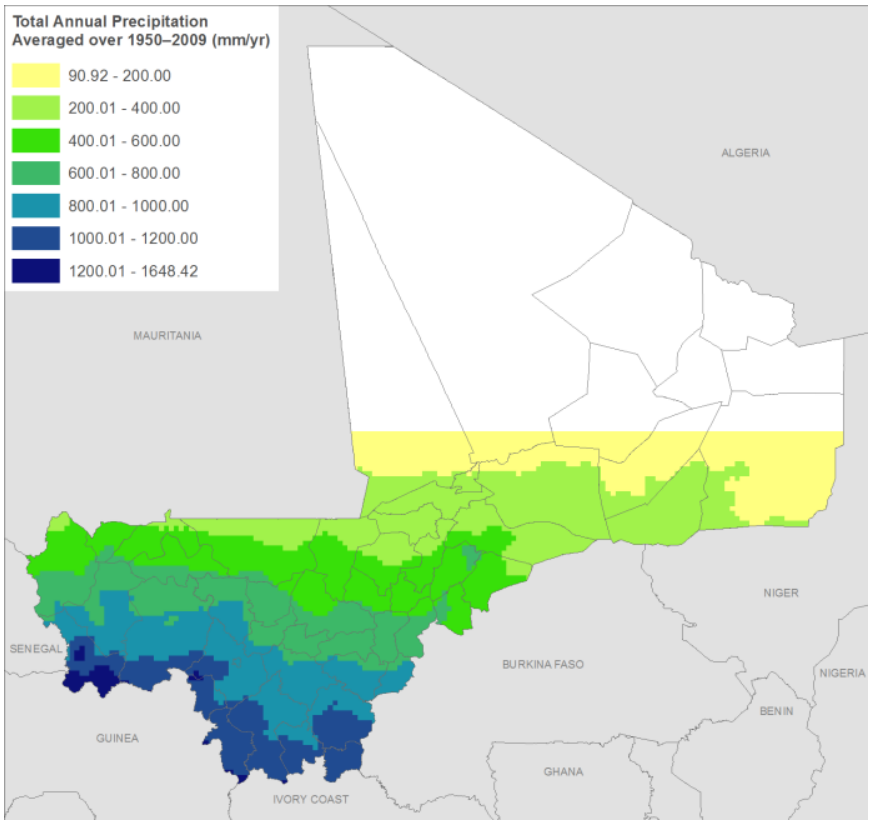
Biasutti, M. (2013). Forced Sahel rainfall trends in the CMIP5 archive, *Journal of Geophysical Research on the Atmosphere*, 118, 1613–1623.

Funk, C., Michaelsen, J., et Marshall, M. (2012). Mapping recent decadal climate variations in precipitation and temperature across Eastern Africa and the Sahel, chap. 14 *in* Wardlow, B., Anderson, M.,

and Verdin, J., eds., *Remote sensing of drought—Innovative monitoring approaches*. Londres, Royaume-Uni : Taylor et Francis.

Groupe intergouvernemental d'experts pour l'évolution du climat (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution du groupe de travail I au quatrième rapport d'évaluation du Groupe intergouvernemental d'experts pour l'évolution du climat [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, et H.L. Miller (eds.)]. Presses universitaires de Cambridge, Cambridge, Royaume-Uni ; et New York, NY, Etats-Unis.

**FIGURE A1-2. PRECIPITATIONS ANNUELLES ET TENDANCES DE LA TEMPERATURE OBSERVEES**



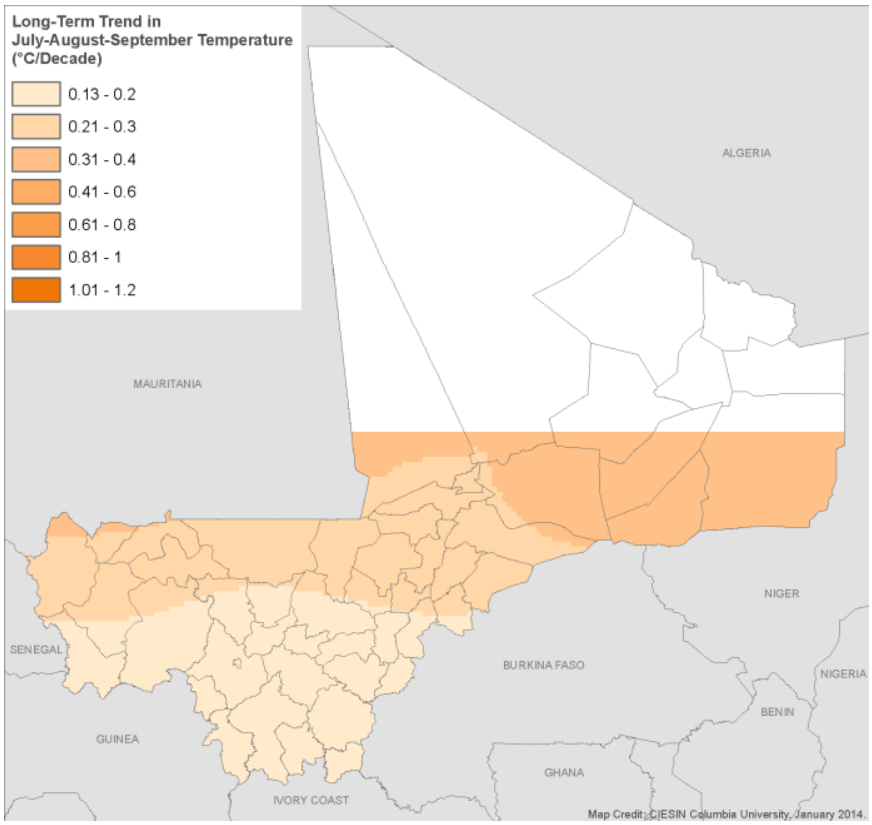

Long-Term Trend in
July-August-September Temperature
(°C/Decade)
0.13 - 0.2
0.21 - 0.3
0.31 - 0.4
0.41 - 0.6
0.61 - 0.8
0.81 - 1
1.01 - 1.2
ALGERIA
MAURITANIA
NIGER
SENEGAL
BURKINA FASO
NIGERIA
BENIN
GUINEA
GHANA
IVORY COAST
Map Credit: CIESIN Columbia University, January 2014.

**FIGURE AI-3: PRECIPITATIONS ANNUELLES ET TENDANCES DE LA TEMPERATURE PREVUES POUR LA PERIODE 2030 (2015-2045) SELON LE SCENARIO RCP4.5**

**(COLONNE DE GAUCHE : MODELE SEC ; COLONNE DU MILIEU : MOYENNE MULTIMODELE ; COLONNE DE DROITE : MODELE PLUVIEUX)**

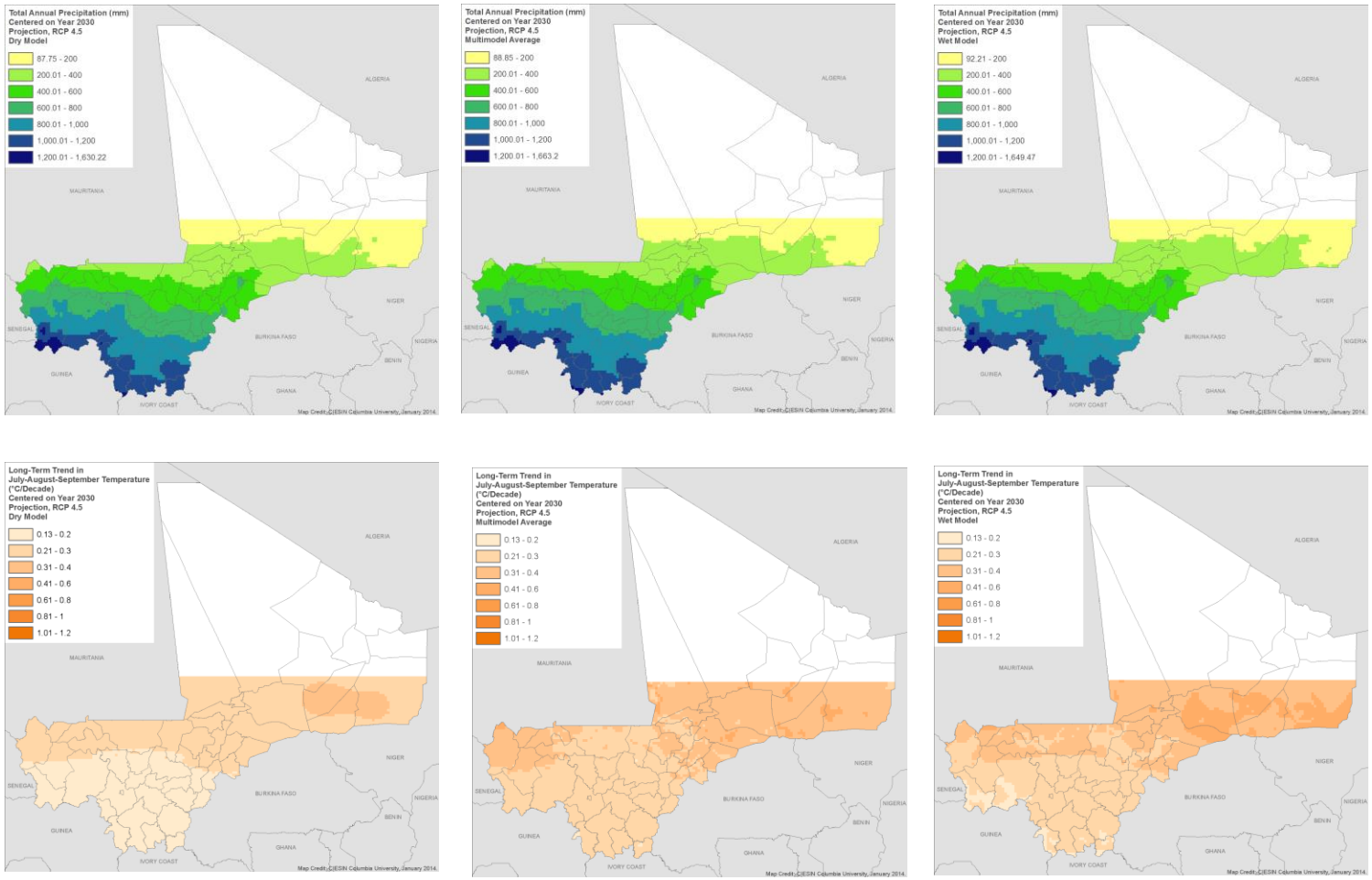


**FIGURE AI-4. PRECIPITATIONS ANNUELLES ET TENDANCES DE LA TEMPERATURE PREVUES POUR LA PERIODE 2050 (2045-2065) SELON LE SCENARIO RCP4.5.**
**(COLONNE DE GAUCHE : MODELE SEC ; COLONNE DU MILIEU : MOYENNE MULTIMODELE ; COLONNE DE DROITE : MODELE PLUVIEUX)**

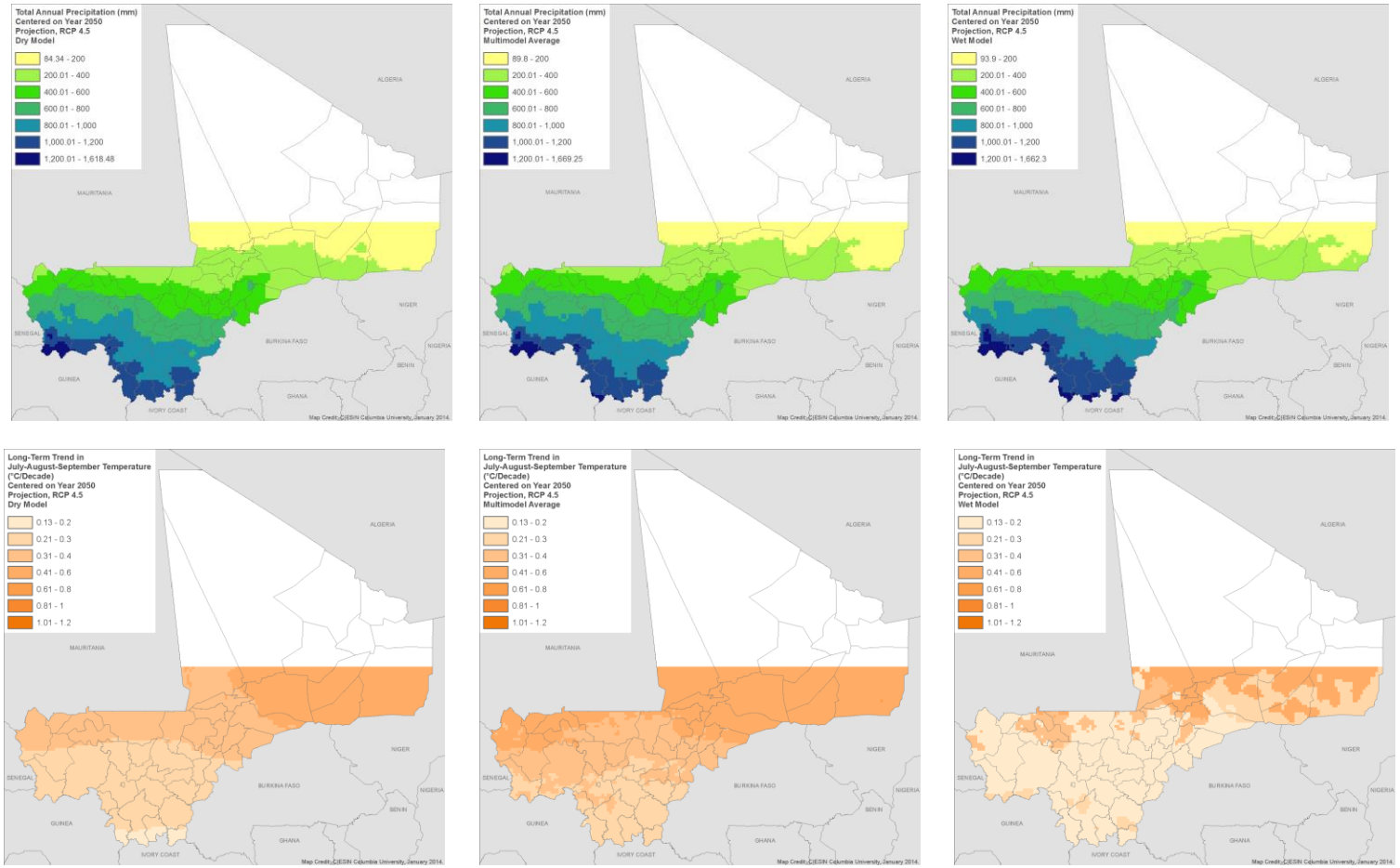


**FIGURE A1-5. PRECIPITATIONS ANNUELLES ET TENDANCES DE LA TEMPERATURE PREVUES POUR LA PERIODE 2030 (2015-2045) SELON LE SCENARIO RCP8.5.**

**(COLONNE DE GAUCHE : MODELE SEC ; COLONNE DU MILIEU : MOYENNE MULTIMODELE ; COLONNE DE DROITE : MODELE PLUVIEUX)**

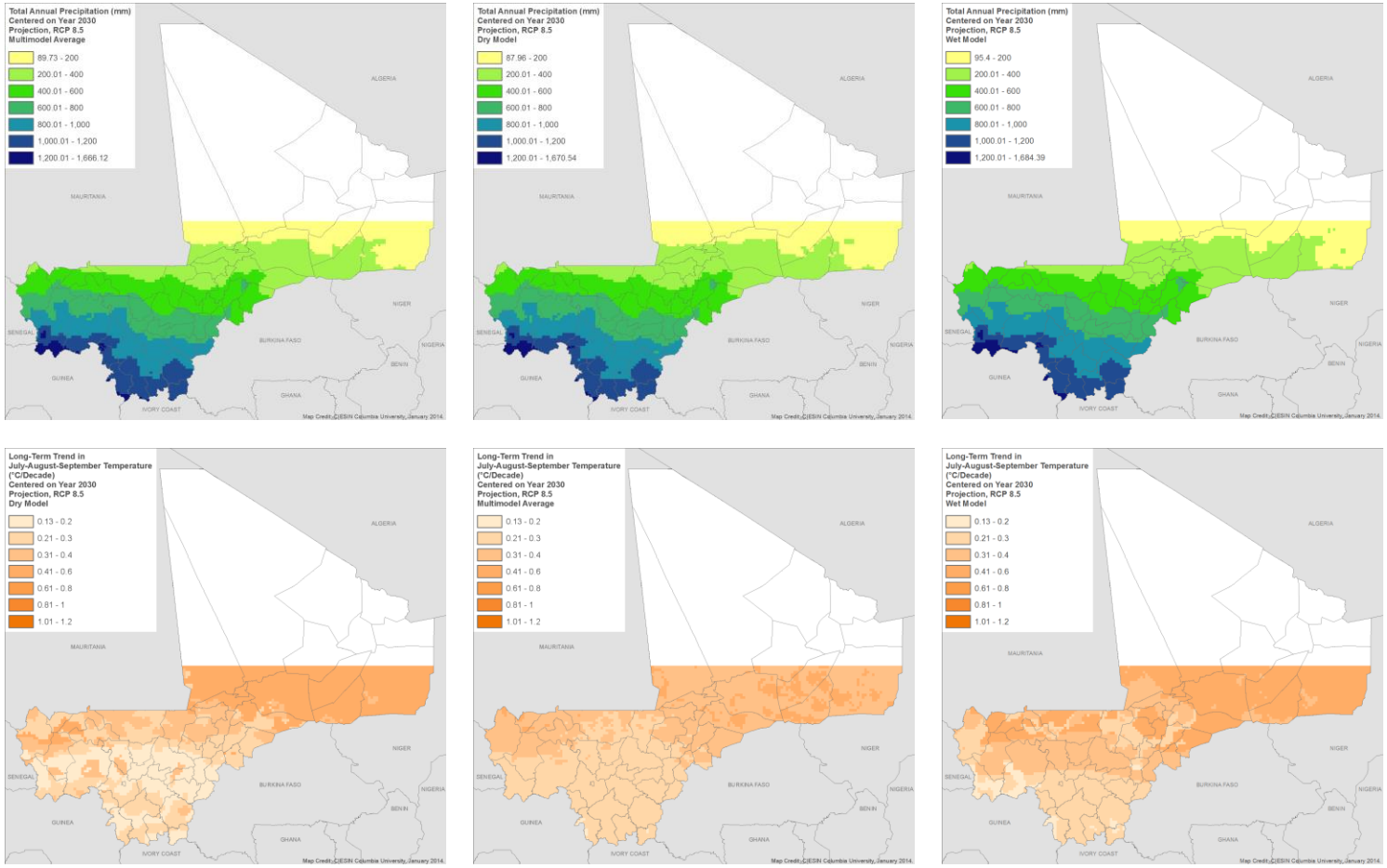
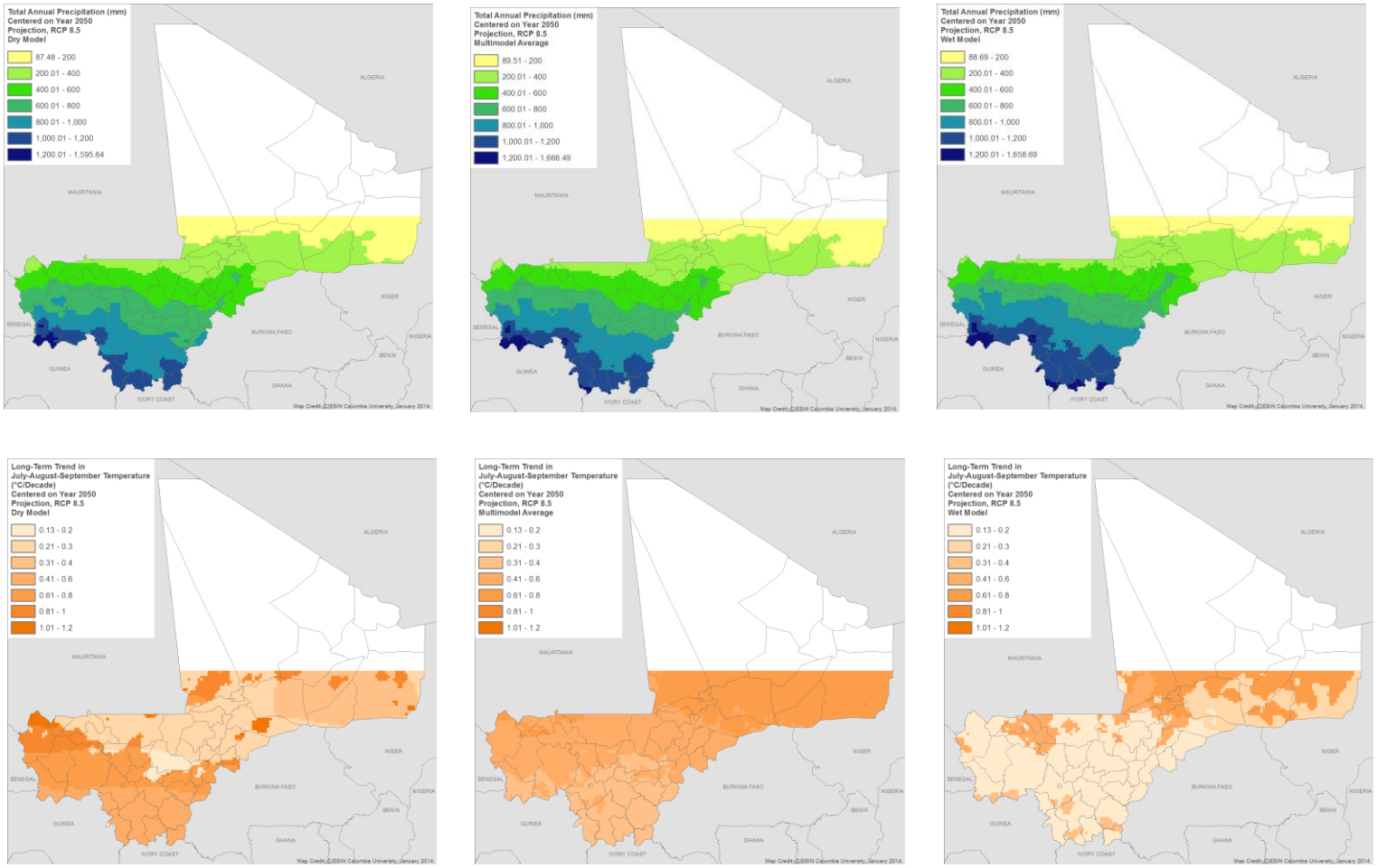


**FIGURE A1-6. PRECIPITATIONS ANNUELLES ET TENDANCES DE LA TEMPERATURE PREVUES POUR LA PERIODE 2050 (2045-2065) SELON LE SCENARIO RCP8.5**

**(COLONNE DE GAUCHE : MODELE SEC ; COLONNE DU MILIEU : MOYENNE MULTIMODELE ; COLONNE DE DROITE : MODELE PLUVIEUX)**



# ANNEXE II. ANALYSE DES COMPOSANTES PRINCIPALES

## AII.1 APERÇU

L'objectif fondamental de la construction de l'indice est la réduction des données. Comme Abson et al. (2012 : 516) le notent, "les indices réduisent le volume et la complexité des informations à communiquer tout en présentant un élément de l'interaction entre multiples ... indicateurs à travers un seul "point" de vulnérabilité agrégé." Une alternative à l'approche additive couramment utilisée est l'analyse des composantes principales (ACP). Dans cette approche, les indicateurs ne sont pas regroupés a priori en composantes de vulnérabilité, mais ce sont les relations statistiques entre les indicateurs qui sont plutôt utilisées pour les regrouper selon les similitudes dans leur distribution statistique (donc spatiale). L'idée est de diviser la nébuleuse de relations à n dimensions (où n représente le nombre d'indicateurs) entre les indicateurs en ensembles plus réduits de composantes principales (CP) non corrélées qui sont des combinaisons linéaires des variables d'entrée. Etant donné que les CP ne sont pas corrélées, les points associés à chaque CP constituent un aspect unique de la vulnérabilité socioécologique globale représentée par l'ensemble des indicateurs de vulnérabilité d'origine (Abson et al., 2012).

Le nombre de CP est égal au nombre de variables, mais chaque CP successive explique moins la variation générale totale. Ainsi, l'information principale est en général saisie de manière significative par quelques-unes des CP principales. Le développeur doit décider du nombre de CP à retenir. Une méthode courante de sélection des composantes, le critère Keiser, suggère qu'on garde toutes les composantes ayant une valeur propre (produite avec d'autres statistiques CPA dans les progiciels statistiques courants) supérieure à 1.

Avant de commencer une ACP, les données sont normalisées en z-score en soustrayant la moyenne et en divisant par l'écart standard, de sorte que toutes les variables sont présentées à la même échelle avec l'écart standard de chaque variable égal à 1. Ainsi, un z-score de 2 représente une valeur d'écarts standard de 2 au-dessus de la moyenne, et un z-score de -2 représente une valeur d'écarts standard de 2, en dessous de la moyenne. Chaque CP peut alors être interprétée comme un z-score, bien que le sens (qu'un z-score positif représente une vulnérabilité faible ou élevée) doit être testé par rapport aux données sous-jacentes. Il est souvent utile, pour des raisons analysées ci-après, d'inverser les CP avant de les associer.

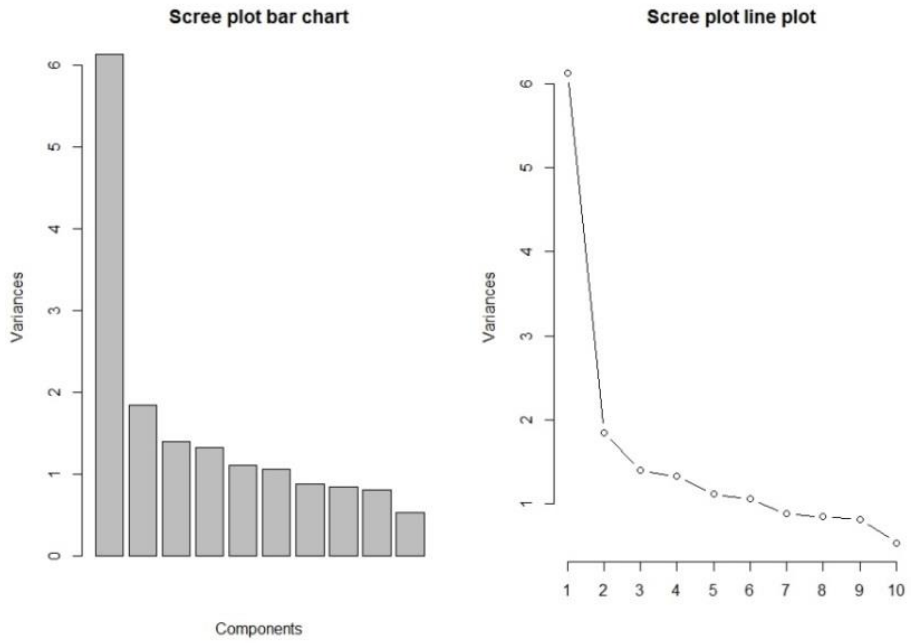
L'un des avantages de l'ACP est qu'elle permet d'éclaircir les relations statistiques entre les indicateurs utilisés dans l'évaluation de la vulnérabilité spatiale. Chaque CP capture la covariance spatiale ou la corrélation entre les indicateurs, et différents CP reflètent des schémas non corrélés. Les indicateurs ayant des poids factoriels les plus élevés (équivalents aux coefficients de corrélation) pour une CP donnée peuvent être regroupés de manière fonctionnelle pour décrire cette composante. Cette approche permet au développeur d'identifier où tous les différents aspects de la vulnérabilité sont le plus intensément présents. Même si l'approche additive permet le développement de sous-indices de composante, ces sous-indices sont développés à partir de relations théoriques et non statistiques entre les indicateurs. Ainsi, une approche ACP peut être utilisée en complément de l'approche

additive/approche de la moyenne, mettant ainsi à la disposition des usagers des informations supplémentaires.

## AII.2 METHODES

Nous avons utilisé tous les 18 indicateurs dans une ACP, indépendamment de leur attribution à des composantes de vulnérabilité particulières. Nous avons extrait six composantes qui expliquent 68 pourcent de la variation totale. A l'aide d'une méthode courante de sélection des composantes, le critère Keiser, nous présentons les poids factoriels de toutes les composantes ayant une valeur propre supérieure à 1 (Tableau A2-1). Les diagrammes (Figure A2-1) montrent que les valeurs propres des six premières composantes sont supérieures à 1. Bien que chaque indicateur inclus dans l'ACP ait une variance de 1 (du fait de la standardisation du z-score), la première composante (CP1) a une variance six fois supérieure (valeur propre = 6,12), ce qui signifie qu'elle reproduit considérablement une plus grande variance dans la nébuleuse à n-dimension des relations entre les valeurs des indicateurs bien plus que les CP (trois fois supérieures à CP2 et presque six fois supérieures PC3-PC6).

**FIGURE A2-1. GRAPHIQUE DES EBOULIS DES CP**




Le tableau A2-1 montre les poids factoriels de chaque indicateur pour chaque composante principale. Les poids sont équivalents aux coefficients de corrélation de sorte que les valeurs élevées (négatives ou positives) correspondent à des corrélations élevées. Nous mettons en exergue les variables ayant des poids élevés pour chaque composante (supérieurs à une valeur absolue de ~0.250). Les poids positifs élevés (indicateurs positivement corrélés avec les CP) sont en bleu ; les poids négatifs élevés (indicateurs négativement corrélés avec les CP) sont en rouge. Les poids proches de 0 ne sont pas significatifs.

Dans l'étape suivante, nous utilisons les poids factoriels les plus élevés (en valeur absolue) pour attribuer une interprétation à chaque CP. Pour CP1, compte tenu des poids négatifs très élevés de quatre indicateurs d'exposition au climat et de carbone organique du sol (qui est fortement associé aux niveaux des précipitations), nous l'appelons composante d'exposition au climat. Il est intéressant de noter que le schéma spatial d'une mortalité infantile élevée est l'inverse de ces indicateurs d'exposition au climat,

indiquant qu'une mortalité infantile élevée est propre aux régions à pluviosité relativement élevée et plus faible variabilité des précipitations (telle que mesurée par le coefficient de variation des précipitations et l'IVDN), ainsi qu'à des régions de forte prévalence du paludisme. Dans l'ACP, il est légitime d'inverser les composantes où des poids négatifs élevés sont associés à une vulnérabilité élevée.[11] Nous appliquons cela au cas de CP1 et dressons la carte de la composante principale inversée en résultant (Figure A2-2a), qui montre le gradient nord-sud caractéristique de la composante exposition de l'approche additive.

CP2 (Figure A2-2b) est déterminée par deux indicateurs de l'EDS à savoir, la richesse des foyers et le niveau d'éducation de la mère dont les saturations sont >0.500. Ces éléments, associés à l'indice de pauvreté (également en corrélation étroite avec CP2) sont étroitement liés à la vulnérabilité sociale du niveau des foyers. Ainsi CP2 pourrait représenter une composante de sensibilité ou de capacité d'adaptation.

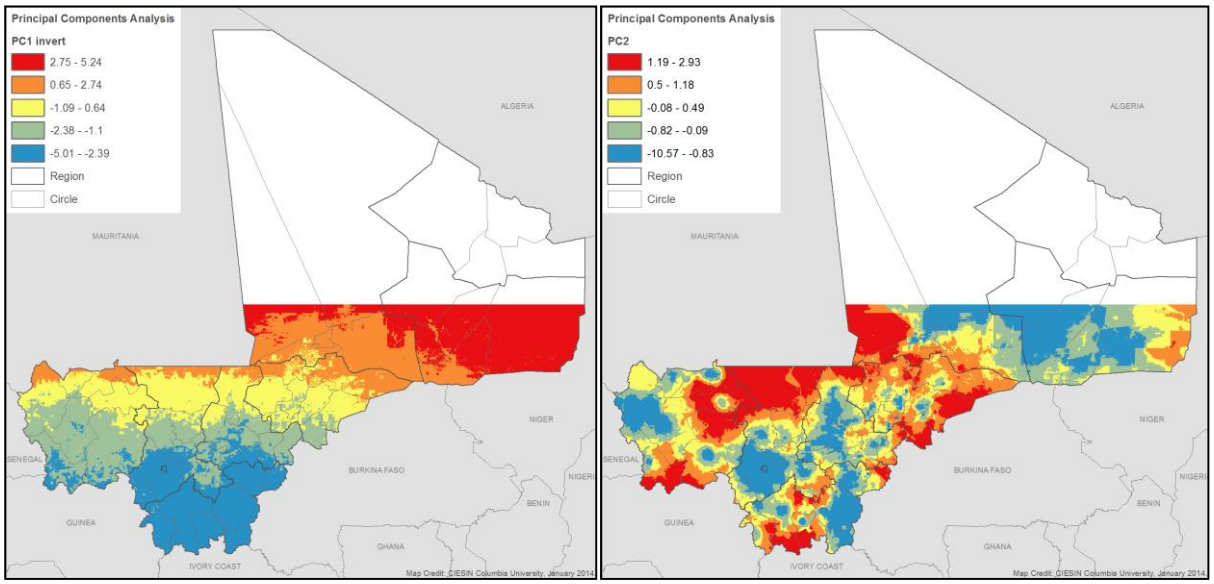
### TABLEAU A2-1. POIDS FACTORIELS PAR COMPOSANTE PRINCIPALE (CP)

| | CP1 | CP2 | CP3 | CP4 | CP5 | CP6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| PRCP - Précipitations annuelles moyennes | -0,376 | 0,010 | 0,062 | -0,216 | 0,045 | 0,019 |
| IACV - Coefficient de variation (CV) des précipitations | -0,377 | -0,026 | -0,065 | -0,036 | 0,074 | -0,080 |
| DCVAR - Composante décennale des précipitations | -0,113 | -0,018 | -0,593 | -0,024 | -0,159 | 0,267 |
| NDVICV - CV d'IVDN | -0,280 | 0,066 | -0,078 | -0,381 | 0,105 | 0,147 |
| TTREND - Tendance de la température | -0,367 | 0,040 | -0,138 | -0,218 | -0,022 | 0,022 |
| FLOOD - Fréquence des inondations | 0,049 | -0,031 | 0,090 | -0,368 | -0,201 | -0,491 |
| HHWL - Richesse des foyers | 0,136 | 0,525 | 0,230 | -0,115 | -0,176 | 0,058 |
| STNT - Retard de croissance infantile | -0,117 | -0,076 | 0,555 | -0,013 | -0,288 | 0,311 |
| TMI - Taux de mortalité infantile | 0,247 | 0,146 | 0,194 | -0,274 | 0,253 | 0,202 |
| POVI - Indice de pauvreté | -0,082 | 0,241 | 0,162 | -0,040 | 0,377 | 0,273 |
| CONF - Conflits | -0,058 | -0,232 | 0,045 | -0,087 | -0,619 | 0,216 |
| CARB – Carbone organique du sol | -0,343 | -0,103 | 0,123 | -0,099 | 0,055 | 0,010 |
| MALA - Indice de stabilité du paludisme | 0,232 | 0,245 | -0,285 | -0,394 | 0,096 | 0,086 |
| EDMO - Niveau d'éducation de la mère | -0,055 | 0,578 | -0,012 | 0,007 | -0,375 | -0,179 |
| MARK - Accessibilité du marché | -0,224 | 0,168 | 0,080 | 0,414 | 0,153 | -0,376 |
| HEALTH -Indice d'infrastructures sanitaires | -0,259 | 0,333 | -0,169 | 0,167 | -0,125 | -0,041 |
| ANTH - Biomes anthropiques | -0,305 | 0,052 | 0,208 | -0,035 | 0,139 | 0,051 |

[11] Selon l'Indice de vulnérabilité sociale (IVS), un indicateur ACP largement utilisé pour l'évaluation des risques de catastrophe, des ajustements peuvent être faits à la "cardinalité des composantes (positive [+] ou négative [-]) afin de s'assurer que les poids des composantes positives sont associés à la vulnérabilité en hausse, et les poids ces composantes négatives à la vulnérabilité en baisse." Pour plus d'informations, veuillez visiter le site de Hazards & Vulnerability Research Institute à : http://webra.cas.sc.edu/hvri/products/sovi.aspx.

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| IRRI - Zones irriguées | -0,025 | 0,178 | -0,075 | 0,400 | -0,038 | 0,459 |

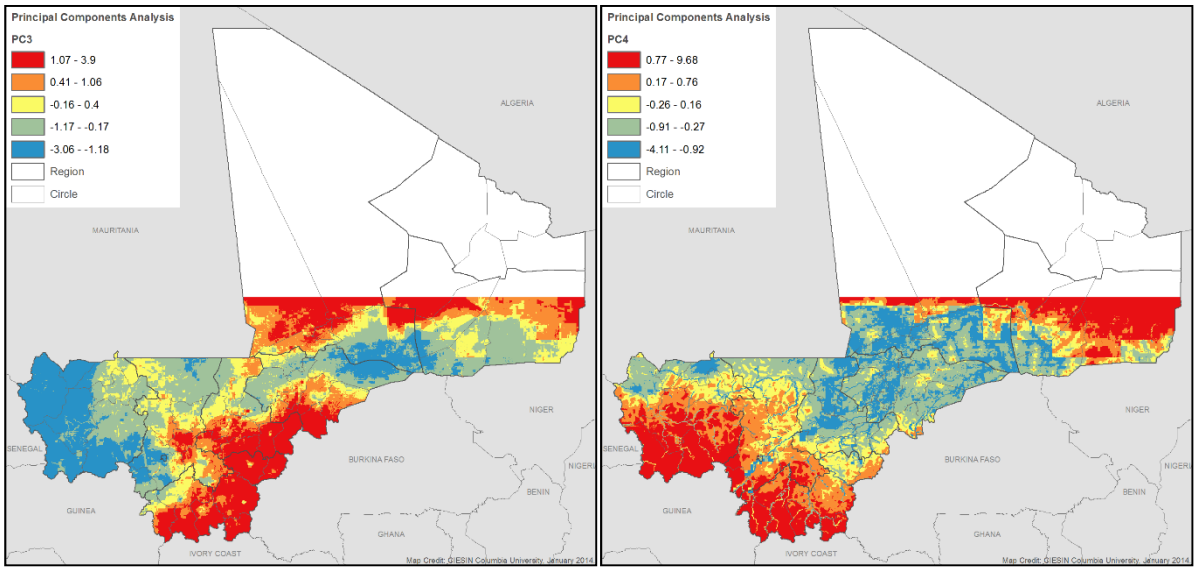
**FIGURE A2-2. CARTES DE (A) CP1 (INVERSEE) ET (B) CP2**




**(a)** **(b)**

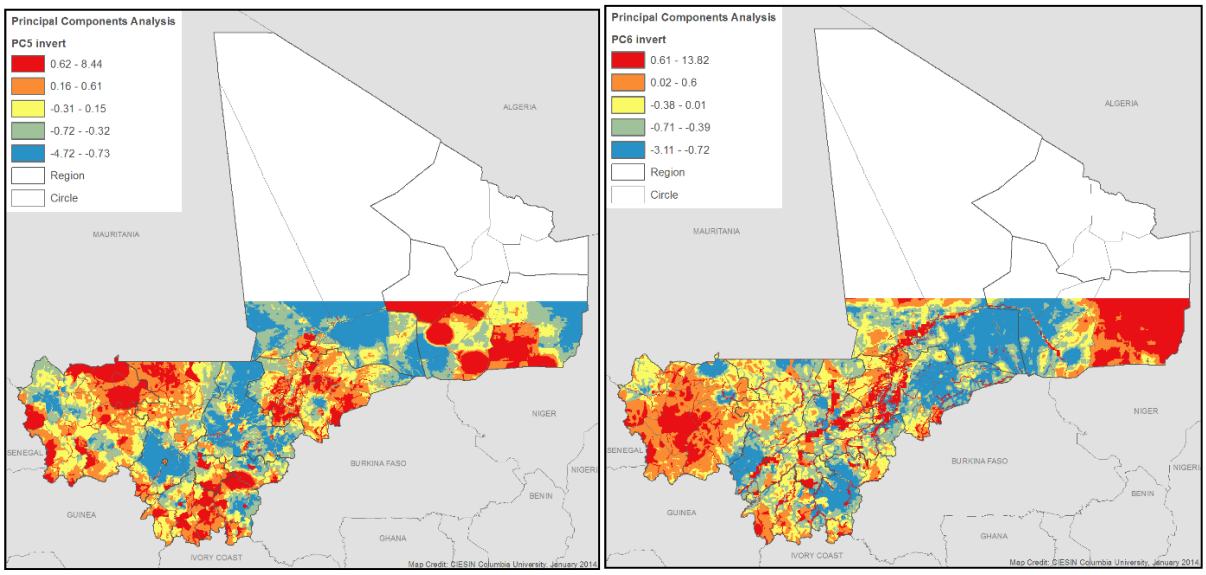
CP3 (Figure A2-3a) est essentiellement caractérisé par le retard de croissance infantile et semble presqu'identique à la carte du retard de croissance infantile présentée à l'annexe IV. Chose intéressante, le pourcentage de la variance de précipitations expliquée par la composante décennale, qui reflète des conditions sèches ou pluvieuses persistantes (DCVAR) susceptibles d'avoir une grande incidence sur la sécurité alimentaire, est en corrélation négative avec cette CP. L'indicateur DCVAR suggère une exposition élevée aux anomalies climatiques persistantes, en particulier la sécheresse prolongée. Nous n'avons pas d'explication valable quant à la raison pour laquelle un indicateur climatique qui est normalement en corrélation étroite avec le retard de croissance infantile est en fait anticorrélé. Il serait possible que depuis que l'EDS a été menée en 2006, et qu'une période de précipitations moyennes à précipitations au-dessus de la moyenne l'ayant précédée, l'indicateur du retard de croissance de cette enquête ne reflète tout simplement pas la variabilité climatique. Il serait possible que l'association intuitive entre le retard de croissance et la persistance des séquences de mauvaises ou bonnes années n'est pas correcte et que ce sont les régions qui connaissent de plus importants chocs au cours des années prises séparément qui sont plus exposées au retard de croissance. C'est un exemple où une étude plus approfondie doit être menée concernant la causalité des relations statistiques. CP4 (Figure A2-3b) a deux indicateurs positifs forts - accessibilité du marché et irrigation - mais le paludisme, la fréquence des inondations et le coefficient de variation de l'IVDN sont tous négativement corrélés. Il n'est pas surprenant que les zones irriguées et inondées se retrouvent au même lieu. Somme toute, ceci semble être également un indicateur de capacité d'adaptation étroitement lié au réseau fluvial (les fleuves sont aussi un facteur d'accessibilité du marché au Mali, avec un trafic maritime très dense sur le Niger).

## FIGURE A2-3. CARTES DE (A) CP3 ET (B) CP4




**(a)** **(b)**

## FIGURE A2-4. CARTES DE (A) CP5 INVERSEE ET (B) CP6 INVERSEE




**(a)** **(b)**

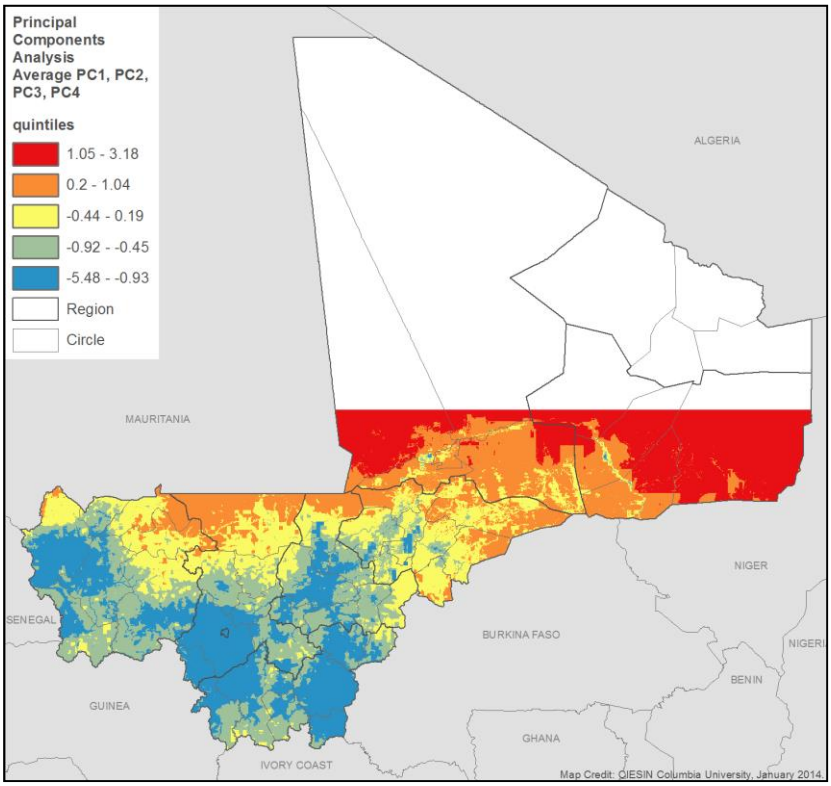
Pour CP5 et CP6, une fois de plus nous pensons d'un point de vue théorique et à cause du poids négatif élevé des composantes conflits (CP5) et fréquence des inondations (CP6), que ces deux composantes devraient être inversées. CP5 (Figure A2-4a) est en grande partie une mesure liée aux conflits qui, chose intéressante, est inversement corrélée à l'indice de pauvreté. CP6 (Figure 12-4b) est en grande partie caractérisée par la vulnérabilité aux inondations et la faible accessibilité au marché.

Compte tenu de leurs valeurs propres élevées, nous avons calculé la moyenne des quatre premières CP (en doublant la valeur pondérale de la CP1 inversée selon sa valeur propre la plus élevée) pour créer

une carte globale ACP de la vulnérabilité (Figure A2-5).[12] Il est intéressant de superposer sur la carte globale ACP les lieux de peuplement et les routes de niveau plus élevé (Figure A2-6). Il devient clair que la vulnérabilité la plus faible est associée à la proximité avec les principales zones de peuplement et les routes, et la vulnérabilité la plus élevée est étroitement liée à l'inaccessibilité et aux facteurs de stress climatiques. En comparant les résultats ACP à la carte de vulnérabilité générée par l'approche additive, nous constatons que la répartition de la vulnérabilité est globalement similaire. Dans l'optique de rendre la comparaison plus efficace, nous avons recartographié l'indice de vulnérabilité (voir document principal, Figure 12) en catégories de quintiles (de sorte que chaque catégorie contient un nombre égal de pixels (Figure A2-7). Cette information est plus directement comparable aux cartes des figures A2-5 et A2-6.

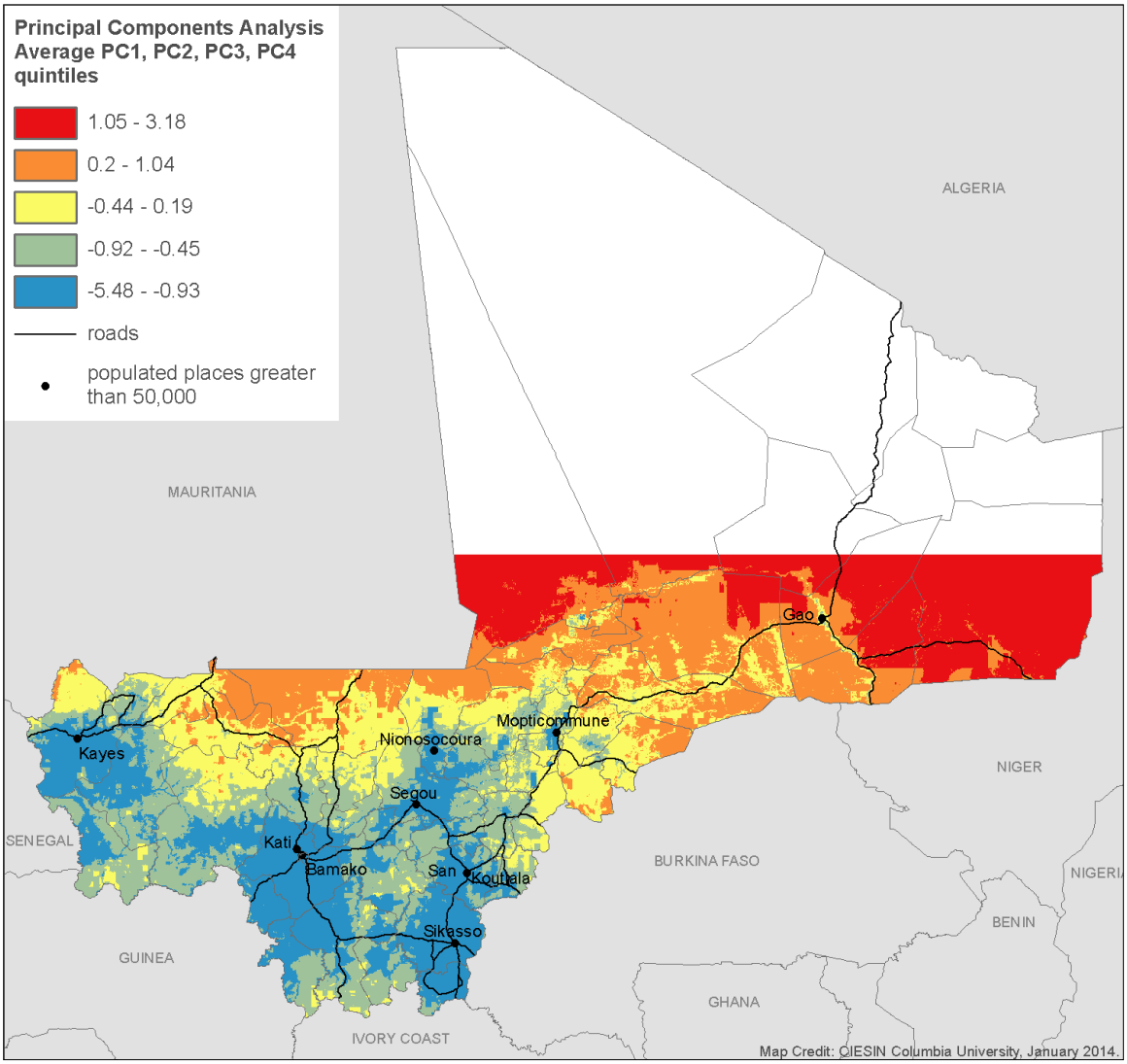
De manière générale, l'approche ACP fournit de nouvelles explications quant aux schémas de la vulnérabilité climatique au Mali fondées sur les corrélations entre les indicateurs. Cette approche indique d'intéressants regroupements dérivés statistiquement entre les indicateurs qui n'étaient pas prévus a priori dans l'attribution des indicateurs aux composantes, indiquant dans certains cas la dualité potentielle de certains indicateurs, c'est-à-dire, qu'ils contribuent à la fois à la sensibilité et à la capacité d'adaptation.

**FIGURE A2-5. CARTE GLOBALE DES DE LA VULNERABILITE DRESSEE A PARTIR DE L'ACP**

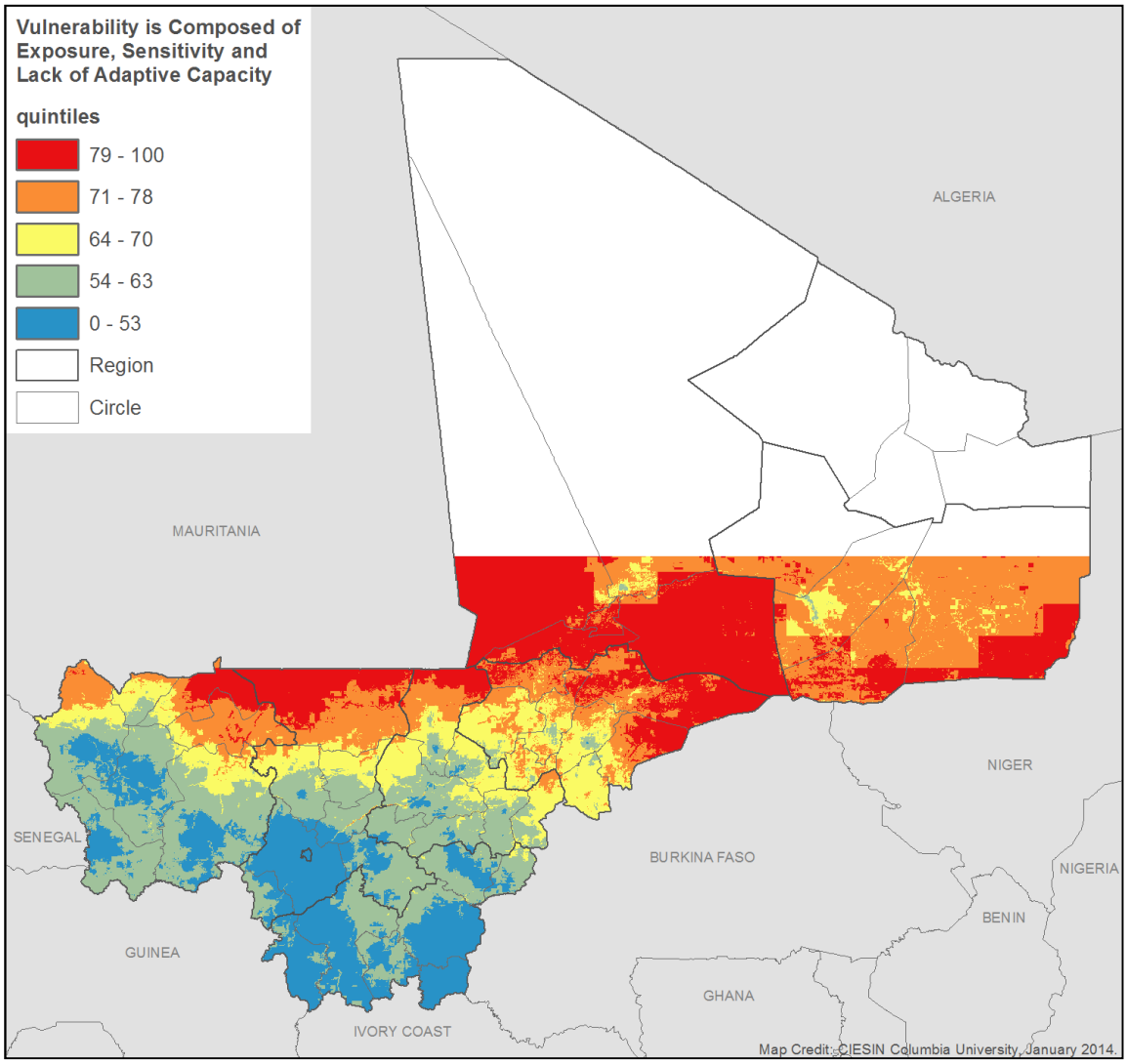



[12] Nous étions moins convaincus de l'inversion des CP5 et CP6 que nous ne l'étions pour l'inversion de CP1. En outre, les deux dernières CP ont des valeurs propres relativement faibles de 1,12 et 1,06 respectivement. On note une baisse des valeurs propres après la quatrième CP, laquelle a contribué à notre décision d'inclure uniquement les quatre premières CP dans la carte de la vulnérabilité globale. Nous avons effectivement testé les résultats d'une agrégation utilisant six CP et les différences dans les schémas généraux de la vulnérabilité étaient négligeables.

## FIGURE A2-6. CARTE GLOBALE DE VULNERABILITE DRESSEE A PARTIR DE L'ACP (AVEC LE PEUPLEMENT ET LE RESEAU ROUTIER)



## FIGURE A2-7. CARTE DE LA VULNERABILITE ADDITIVE (REPRESENTEE EN QUINTILE)



# ANNEXE III. ANALYSE DE LA SENSIBILITE

## AIII.1 INTRODUCTION

Tel qu'il a été étudié à la section Méthodes, plusieurs décisions subjectives sont prises pendant le processus de construction de l'indice. Ainsi, il est important de tester la sensibilité des résultats par rapport à d'autres méthodes de construction de l'indice. L'objectif global de l'analyse de la sensibilité est d'étudier la solidité des résultats de l'indice par rapport aux hypothèses émises sur la construction de la vulnérabilité, la contribution relative des indicateurs pris séparément et les schémas de pondération et d'agrégation.

L'accent a été mis sur deux principales sources d'incertitude : la sélection de la pondération et l'inclusion d'indicateurs spécifiques. Les pondérations différentielles sont souvent utilisées dans la création de l'indice pour rendre compte de l'importance relative des indicateurs. Cependant, la sensibilité des résultats aux besoins en pondération différentielle doit être testée. Dans notre analyse, nous attribuons deux valeurs pondérales aux indicateurs extraits de l'EDS de 2006 qui étaient disponibles au niveau du groupe (données tirées de Jankowska et al., 2012) pour un nombre de raisons. La première étant que ces données sont de haute exactitude et résolution spatiale et ont des niveaux d'incertitude relativement plus faibles, comparées à d'autres indicateurs de sensibilité et de capacité d'adaptation.[13] Deuxièmement, les données sont des agents étroitement liés aux composantes sensibilité et capacité d'adaptation. En termes d'inclusion des indicateurs, nous retirons les indicateurs un à un pour évaluer l'impact du retrait d'un indicateur donné sur les résultats.

L'objectif de l'analyse est d'identifier là où l'indice de vulnérabilité augmente ou baisse en termes de pourcentage suivant les changements dans la méthodologie.

## AIII.2 PONDERE VS. NON PONDERE

Nous avons évalué l'impact de la pondération différentielle sur les points de vulnérabilité en soustrayant l'indice de vulnérabilité, où des valeurs pondérées égales avaient été attribuées à chaque indicateur, de notre indice de vulnérabilité d'origine construit en utilisant des valeurs pondérées différentielles. La version non pondérée a été construite à l'aide d'une simple moyenne de tous les indicateurs par composante, en redéfinissant l'échelle (étendant) des points des composantes à 0-100 et ensuite en calculant la moyenne des trois composantes de sensibilité, capacité d'adaptation et exposition.

L'indice de vulnérabilité pondéré a été calculé en utilisant la moyenne des trois composantes : capacité d'adaptation, sensibilité et exposition.

*Indice de vulnérabilité pondéré = (Exposition + Sensibilité + Capacité d'adaptation)/3*

[13] MEASURE/DHS est largement connu pour mener des recherches en matière d'enquête et de nettoyage des données de la plus haute qualité..

L'exposition est une simple moyenne non pondérée des six indicateurs : précipitations moyennes annuelles, précipitations interannuelles CV, variance décennale des précipitations, NDVICV, tendance de la température et fréquence des inondations.

*Exposition = (précipitations moyennes annuelles + précipitations interannuelles CV + variance décennale des précipitations + NDVICV + tendance de la température + fréquence des inondations)/6*

La sensibilité est calculée comme une moyenne pondérée de sept variables : richesse des foyers, retard de croissance infantile, indice de pauvreté par commune, conflits, carbone organique du sol et indice de stabilité du paludisme. Nous avons doublé les valeurs du retard de croissance infantile et de la richesse des foyers, d'où le diviseur neuf comme suit :

*Sensibilité = (richesse des foyers*2 + retard de croissance*2 + taux de mortalité infantile + indice de pauvreté + sol en carbone organique + indice de stabilité du paludisme)/9*

La capacité d'adaptation est générée par une moyenne pondérée de cinq variables : niveau d'éducation de la mère, accessibilité du marché, indice des infrastructures de santé, biomes anthropiques et zones irriguées. Le poids du niveau d'éducation de la mère a été doublé, comparé au reste des variables incluses dans la composante, d'où le diviseur 6, comme suit :

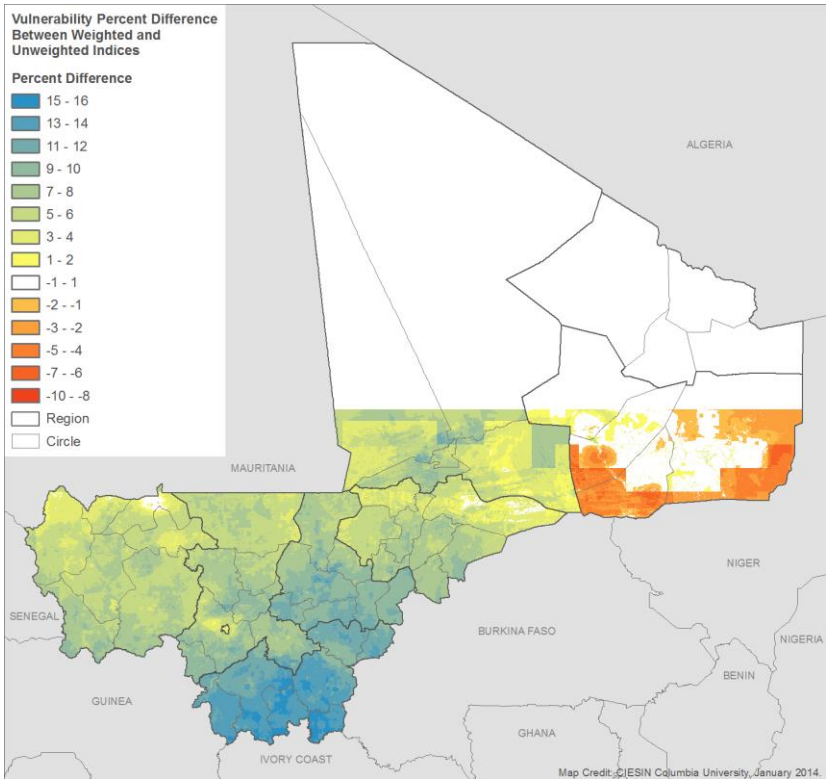
*Capacité d'adaptation = (niveau d'éducation de la mère*2 + accessibilité du marché + indice des infrastructures de santé + biomes anthropiques + zones irriguées)/6*

Lorsque nous soustrayons l'indice de vulnérabilité à "valeurs pondérées égales" de l'indice de vulnérabilité d'origine (Indice de vulnérabilité pondéré moins non pondéré), la baisse maximale de la vulnérabilité pour un unique pixel est de 16,7 pourcent et la hausse maximale est de 8 pourcent (Tableau A3-1). La baisse moyenne de la vulnérabilité est de 5,6 pourcent. Les changements sont dérivés de la soustraction du poids supplémentaire (importance) attribué aux indicateurs EDS. Les différences sont reproduites sur carte à la figure A3-1. L'approche pondérée a l'avantage (ou l'inconvénient, selon la perspective de chacun) de présenter une vulnérabilité plus forte dans les vastes régions du sud Mali où le retard de croissance et le TMI sont élevés et l'éducation de la mère et la richesse des foyers sont faibles.

**TABLEAU A3-1. RESUME DES DIFFERENCES (INDICE DE VULNERABILITE PONDERE MOINS INDICE NON PONDERE)**

| | Min. | 1ère Qu. | Médiane | Moyenne | 3e Qu. | Max. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Poids égaux | -8,034 | 2,853 | 5,579 | 5,183 | 7,592 | 16,700 |

**FIGURE A3-1. RESULTATS DES DIFFERENCES (INDICE DE VULNERABILITE PONDERE *MOINS* INDICE NON PONDERE)**




*N.B. : les zones orange à rouge indiquent une vulnérabilité plus forte dans l'indice non pondéré ; les zones jaunes à bleu indiquent une vulnérabilité plus faible dans l'indice non pondéré.*

## AIII.3 EXCLUSION DES INDICATEURS

Pour tester l'impact de l'exclusion des indicateurs sur la vulnérabilité, nous avons retiré un indicateur à un moment donné lors du calcul de l'indice de vulnérabilité, en maintenant les valeurs pondérées différentielles de notre approche par indices d'origine. Le tableau A3-2 présente les résultats suivants : minimum, premier quartile, médiane, moyenne, troisième quartile et maximum, pour le pays dans son ensemble. Nous remarquons que l'impact minimum (baisse) dans l'indice de vulnérabilité résulte du retrait du retard de croissance infantile (~14 pourcent) et des baisses importantes sont également observées avec le retrait du niveau d'éducation de la mère. Les valeurs pondérées de ces deux indicateurs ont été doublées dans l'indice de vulnérabilité d'origine. En plus, le retrait de la fréquence des inondations (~13 pourcent) et la richesse des foyers (~10 pourcent) entrainent également des baisses dans l'indice de vulnérabilité. Par ailleurs, une hausse de l'indice de vulnérabilité est observée due au retrait du carbone du sol et des zones irriguées (~9 pourcent). La figure A3-2 présente les cartes de différence de pourcentage pour les quatre versions de l'indice de vulnérabilité. Des différences relativement fortes sont constatées lorsqu'on retire les indicateurs de retard de croissance, de zones irriguées et de carbone du sol.

Il est important de noter que ce ne sont que des valeurs et que la plupart des grilles sont très peu de différentes (comme illustré par les régions en blanc à la figure A3-2). Comme prévu, les différences en moyennes les plus grandes (voir Moyenne au tableau A3-2) concernent les variables avec une valeur

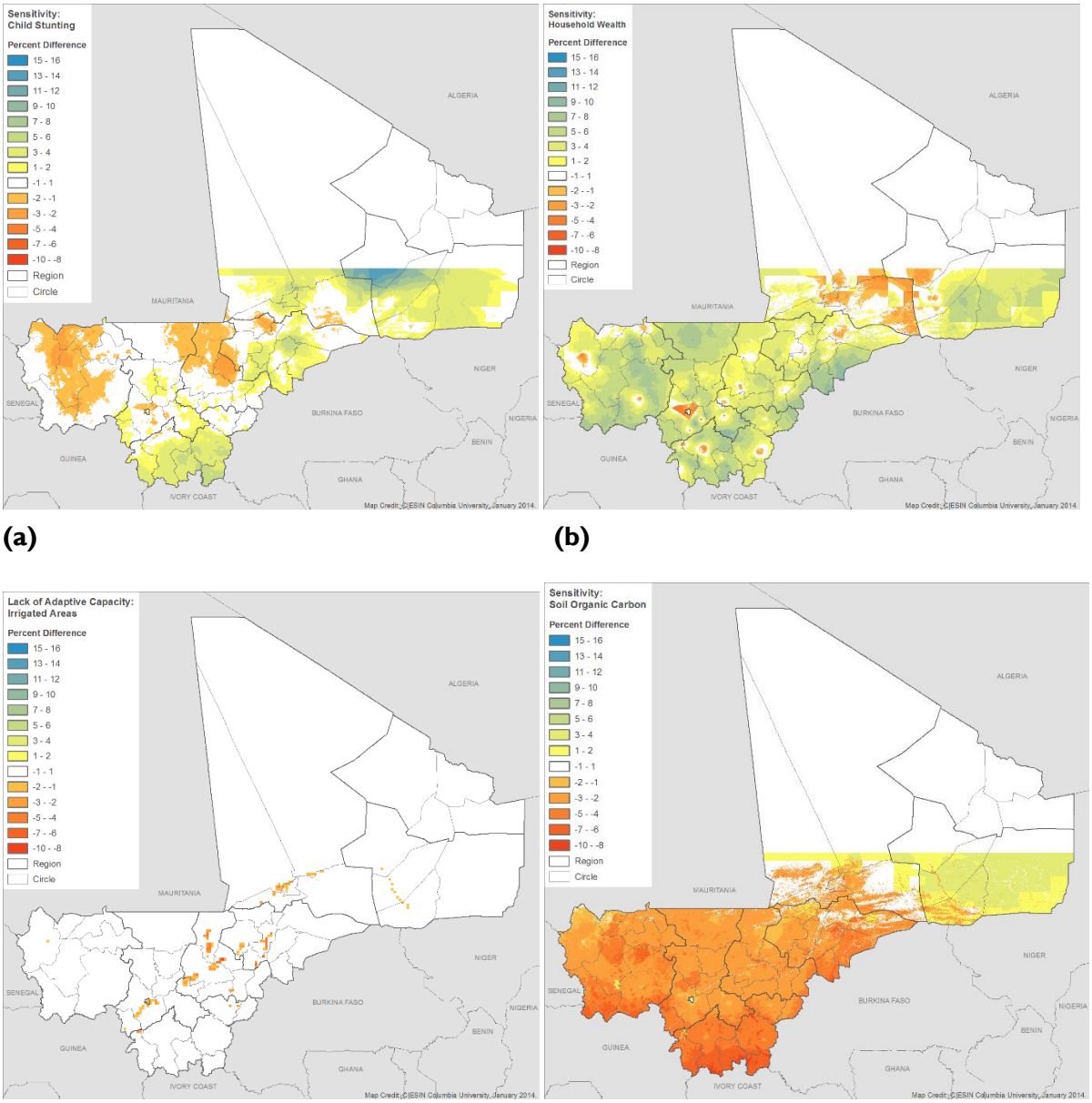
pondérée double qu'on a retirées comme le niveau d'éducation de la mère et la richesse des foyers. En général, le changements en termes de moyenne sont faibles (de l'ordre de 2 à 4 pourcent) alors que les changements maximum observés de 14 pourcent (vulnérabilité en baisse due au retrait) et le minimum de -9 pourcent (hausse de la vulnérabilité due au retrait) indiquent qu'un pixel donné peut augmenter ou baisser tout au plus d'une classe de vulnérabilité. Ces tests de sensibilité suggèrent que les méthodes et les résultats sont relativement solides.

**TABLEAU A3-2. RESUME DES DIFFERENCES AU NIVEAU DE L'INDICE DE VULNERABILITE APRES EXCLUSION D'UN INDICATEUR A LA FOIS**

| | Min. | 1ère Qu. | Médiane | Moyenne | 3e Qu. | Max. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| sans anth | -6,575 | -3,254 | -2,199 | -2,418 | -1,572 | 3,131 |
| sans carb | -9,172 | -3,899 | -2,864 | -2,153 | 0,534 | 5,083 |
| sans conf | -0,665 | -0,312 | -0,198 | -0,018 | -0,096 | 8,218 |
| sans dcvar | -4,163 | -0,355 | 0,871 | 0,796 | 1,864 | 5,854 |
| sans edmo | -4,054 | 2,252 | 4,544 | 4,083 | 5,897 | 12,910 |
| sans flood | -1,991 | -0,147 | 0,875 | 1,132 | 2,132 | 12,480 |
| sans health | -6,864 | 0,123 | 1,282 | 0,865 | 2,024 | 4,537 |
| sans hhwl | -7,362 | 1,241 | 2,904 | 2,795 | 4,574 | 10,440 |
| sans iacv | -3,259 | -0,988 | -0,284 | -0,187 | 0,354 | 3,906 |
| sans tmi | -7,544 | -0,839 | 0,576 | 0,042 | 1,969 | 6,363 |
| sans irri | -9,448 | 0,000 | 0,000 | -0,048 | 0,000 | 0,000 |
| sans mala | -5,368 | 1,193 | 2,378 | 1,195 | 2,815 | 4,343 |
| sans mark | -4,482 | -2,346 | -1,849 | -1,536 | -1,09 | 5,184 |
| sans ndvicv | -6,931 | -2,365 | -1,400 | -1,433 | -0,484 | 3,434 |
| sans povi | -5,254 | 0,017 | 0,8822 | 0,937 | 1,754 | 5,619 |
| sans prcp | -5,714 | -1,040 | -0,1399 | -0,275 | 0,481 | 3,479 |
| sans stnt | -4,502 | -0,538 | 0,5516 | 0,965 | 2,056 | 14,330 |
| sans ttrend | -4,428 | -0,050 | 1,031 | 0,760 | 1,746 | 3,278 |

En conclusion, même si les résultats montrent une certaine sensibilité à ces modifications de l'ordre de +/- 5 pourcent en moyenne de changements (et jusqu'à +/- 10 pourcent de pixels individuels), nous sommes convaincus que les résultats de l'indice de vulnérabilité globale sont relativement solides par rapport aux changements dans la construction de l'indice.

**FIGURE A3-2. CHANGEMENT EN POURCENTAGE DE LA NOTE DE L'INDICE DE VULNERABILITE (A) SANS RETARD DE CROISSANCE ; (B) SANS RICHESSE DES FOYERS ; (C) SANS ZONES IRRIGUEES ; (D) SANS CARBONE DU SOL**




*N.B. : Les zones orange à rouge indiquent une vulnérabilité plus forte sans l'indicateur ; les zones jaunes à bleu indiquent une vulnérabilité plus faible sans l'indicateur.*

## AIII.4 SOURCES


Jankowska, M., D. Lopez-Carr, C. Funk, G.J. Husak, Z.A. Chafe. (2012). Climate change and human health: Spatial modeling of water availability, malnutrition, and livelihoods in Mali, Africa. *Applied Geography*, 33:4-15.

**U.S. Agency for International Development**
1300 Pennsylvania Avenue, NW
Washington, DC 20523
Tel: (202) 712-0000
Fax: (202) 216-3524
**www.usaid.gov**