

UNIVERSITE DE KINSHASA



FACULTE DES SCIENCES AGRONOMIQUES
Département de Gestion des Ressources Naturelles
BP. 117 Kinshasa XI

**DEVELOPPEMENT DE L'INDICE AGREGÉ DE VULNERABILITE
POUR GERER LE NEXUS CLIMAT-EAU-MIGRATIONS-CONFLITS
DANS LE BASSIN DU CONGO : Cas des bassins versants de la partie
Nord-Est de la République Démocratique du Congo**

Par

LUTONADIO KIALA Génie-Spirou

Ingénieur Agronome

Mémoire présenté et défendu en vue de l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA) en
Gestion des Ressources Naturelles. Option : Sol et Eau

Composition du jury :

Professeur KINKELA SAVY Charles, Président du Jury
Professeur KIATOKO MANGEYE, Secrétaire du Jury
Professeur TSHIMANGA MUAMBA Raphael, Promoteur
Professeur NTOTO VUBU Roger, Co-promoteur
Professeur LUMBUENAMO SINZI Raymond, Membre Effectif
Professeur MAKANZU IMWANGANA Fils, Membre suppléant
Professeur KISANGALA MUKE Modeste, Membre suppléant

Année Académique 2019-2020

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	v
DEDICACE	vi
REMERCIEMENTS.....	vii
RESUME	viii
INTRODUCTION	1
Contexte et Problématique.....	1
Questions de recherche	2
Hypothèses de l'étude	3
Objectifs de l'étude	3
Méthodologie générale de l'étude.....	4
Structure de l'étude	5
Chapitre 1. REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	6
1.1. Nexus Climat-Eau-Migrations-Conflits dans le bassin du Congo.....	6
1.2. Vulnérabilité au changement climatique	7
1.2.1. Considérations générales	7
1.2.1.1. Exposition.....	7
1.2.1.2. Sensibilité	7
1.2.1.3. Impact potentiel.....	8
1.2.1.4. Capacité d'adaptation.....	8
1.2.2. Évaluation de la vulnérabilité.....	8
1.2.2.1. Approche par indicateur ou indice	8
1.2.2.2. Aperçu de la diversité des indices.....	9
1.3. Indice agrégé de vulnérabilité.....	10
Chapitre 2. CADRE DE L'ETUDE, DONNEES ET METHODES.....	11
2.1. MILIEU D'ETUDE	11
2.1.1. Situation géographique.....	11
2.1.2. Hydrologie.....	11
2.1.2.1. Bassin de l'Uélé	11
2.1.2.2. Bassin de l'Aruwimi	12

2.1.2.3. Bassin de l'Itimbiri	12
2.1.3. Climatologie	15
2.1.4. Paramètres climatiques.....	16
2.1.5. Hydrogéologie.....	19
2.1.6. Pédologie et géologie	20
2.2. DONNEES UTILISEES	21
2.3. METHODES D'ANALYSE.....	23
2.3.1. Analyse des indices liés aux composantes de vulnérabilité	23
2.3.1.1. Indices d'exposition	26
2.3.1.2. Indices de sensibilité.....	28
2.3.1.3. Indices de capacité d'adaptation	30
2.3.2. Développement de l'indice agrégé de vulnérabilité	32
2.3.2.1. Normalisation des indices	33
2.3.2.2. Agrégation des indices.....	33
Chapitre 3. RESULTATS ET DISCUSSION.....	36
3.1. RESULTATS	36
3.1.1. Résultats relatifs aux indices des composantes de vulnérabilité	36
3.1.1.1. Indices d'exposition	36
3.1.1.2. Indices de sensibilité.....	49
3.1.1.3. Indices de capacité d'adaptation	50
3.1.2. Résultats relatifs au développement de l'indice agrégé de vulnérabilité.....	52
3.1.2.1. Valeurs normalisées des indices	52
3.1.2.2. Indice composite de l'impact potentiel du changement climatique par bassin versant	54
3.1.2.3. Indice agrégé de vulnérabilité par bassin versant	54
3.1.2.4. Indice Agrégé de Vulnérabilité globale	55
3.2. DISCUSSION	55
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	59
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	62
PHOTOGRAPHIES.....	67

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Services de l'eau dans la région d'étude	1
Figure 2. Cheptels des vaches Mbororo dans la région d'étude	2
Figure 3. Approches méthodologiques de l'étude	5
Figure 4. Carte de la région d'étude.....	11
Figure 5. Réseau hydrographique de la région d'étude	14
Figure 6. Classe des élévations des bassins d'étude	15
Figure 7. Zone climatique de la zone d'étude.....	15
Figure 8. Grilles de CRU dans la région d'étude.....	16
Figure 9. Normales pluviométriques mensuelles.....	17
Figure 10. Distribution mensuelle des précipitations moyennes dans la région d'étude (1960-2018)	17
Figure 11. Températures mensuelles de deux stations de la région d'étude.....	18
Figure 12. Distribution mensuelle des températures moyennes dans la région d'étude (1960-2018)	18
Figure 13. Moyenne mensuelle de l'évapotranspiration de deux stations de la région d'étude ...	19
Figure 14. Distribution mensuelle de l'évapotranspiration potentielle moyenne dans la région d'étude.....	19
Figure 15. Recharge des aquifères des bassins versants sous étude	20
Figure 16. Géologie et hydrographie de la région d'étude	21
Figure 17. Corrélation entre les données de CRU et de la station météorologique de Bambesa..	22
Figure 18. Occupation du sol dans la région d'étude.....	29
Figure 19. Plan de déploiement dans les différents sites d'investigation	32
Figure 20. Cadre conceptuel du développement de l'indice agrégé de vulnérabilité	33
Figure 21. Valeurs décennales de l'indice standardisé des précipitations (SPI) durant la période allant de 1980-2018.....	36
Figure 22. Valeurs décennales du Climatic Moisture Index (CMI) durant la période allant de 1980- 2019 dans la région d'étude	37
Figure 23. Valeurs décennales de SPEI durant la période allant du 1980 au 2019	38
Figure 24. Variabilité climatique annuelle du SPEI 12 mois durant la période allant de 1960 à 2018 des bassins versants sous étude (Uélé, Aruwimi et Itimbiri).....	39
Figure 25. Variabilité climatique saisonnière du SPEI 12 mois durant la période allant de 1960 à 2018 des bassins versants sous étude (Uélé, Aruwimi et Itimbiri).....	40
Figure 26. Classification de la sécheresse annuelle à l'aide du SPEI 12 mois durant la période allant du 1960 au 2018.....	41
Figure 27. Classification de la sécheresse décennale à l'aide du SPEI 12 mois durant la période allant du 1960 au 2018.....	42
Figure 28. Scénario du régime climatique (périodes sèche et humide) avec l'indice SPI à la station de Bambesa sous RCP 4.5 et RCP 8.5	43

Figure 29. Fréquences relatives des intensités de sécheresse ou les classes du SPI pour la période de référence et pour les trois périodes futures sous RCP 4.5 et RCP 8.5	44
Figure 30. Scénario du régime climatique (périodes sèche et humide) avec l'indice CMI à la station de Bambesa sous RCP 4.5 et RCP 8.5	45
Figure 31. Fréquences relatives des intensités de sécheresse ou les classes du CMI pour la période de référence et pour les trois périodes futures sous RCP 4.5 et RCP 8.5	46
Figure 32. Scénario du régime climatique (périodes sèche et humide) avec l'indice SPEI à la station de Bambesa sous RCP 4.5 et RCP 8.5	47
Figure 33. Fréquences relatives des intensités de sécheresse ou les classes du SPEI pour la période de référence et pour les trois périodes futures sous RCP 4.5 et RCP 8.5	48
Figure 34. Indice d'accessibilité à l'eau (Water Accessibility Index)	49
Figure 35. Ratio des surfaces couvertes et non couvertes par la forêt	49
Figure 36. Indice de végétation par différence normalisée	50
Figure 37. Indices de capacité d'adaptation	51
Figure 38. Indices agrégés de vulnérabilité des bassins de l'Uélé, de l'Aruwimi et de l'Itimbiri	54
Figure 39. Les indices de l'impact climatique global, de la capacité d'adaptation globale et l'indice agrégé de la vulnérabilité globale	55

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Rivières constituant le réseau hydrographique de la région d'étude et leur ordre de drainage.....	13
Tableau 2. Caractéristiques hydrologiques et morpho-métriques des bassins versants sous étude.....	14
Tableau 3. Données utilisées.....	22
Tableau 4. Description et justification du choix des indices utilisés	24
Tableau 5. Classes de l'Indice Standardisé de Précipitations	27
Tableau 6. Classes du Climatic Moisture Index	28
Tableau 7. Classes de l'indice standardisé d'évapotranspirations et de précipitations.....	28
Tableau 8. Echantillonnage des sites d'investigation	31
Tableau 9. Valeur normalisée des indices de l'évaluation de la vulnérabilité.....	52
Tableau 10. Indice composite de l'impact potentiel du changement climatique.....	54

DEDICACE

*A mon épouse MATONDO LUTONADIO Prisca,
Je dédie ce travail.*

REMERCIEMENTS

A l'issue de cette étude, nous bénissons et remercions le Dieu Tout Puissant, Seigneur Jésus-Christ, le Maître du temps et des circonstances, qui a permis par sa grâce que cette étude soit réalisée. Nous exprimons également nos sentiments de gratitude à l'égard du Professeur TSHIMANGA MUAMBA Raphael, qui assure pleinement notre encadrement scientifique et qui, en dépit de ses multiples occupations, a accepté la promotion de cette étude.

Nous remercions l'équipe de la coordination du projet sur le Nexus Climat-Eau-Migrations-Conflits dans le bassin du Congo (CEMiC, en sigle) qui a mis à notre disposition des ressources techniques ayant concouru à la réalisation de cette étude.

Nous remercions également le Centre de Recherches pour le Développement International (CRDI) pour avoir financé les différentes activités de cette étude.

Nous remercions aussi toute l'équipe du Centre de Recherche en Ressources en Eau du Bassin du Congo (CRREBaC) ainsi que son partenaire technique l'Université des Nations Unies – Institut pour l'Eau, la Santé et l'Environnement du Canada (UNU-INWHE) pour leurs précieuses contributions et multiples échanges qui ont permis à raffiner cette étude.

Nous remercions vivement les chercheurs et évaluateurs de cette étude pour leurs remarques et orientations qui ont contribué à l'amélioration de cette étude. Nous citons : Professeur NTOTO VUBU Roger, de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université de Kinshasa (FASA-UNIKIN) ; Professeur NGONZO LUWESI Cush, Chercheur et Membre de l'Organisation Mondiale de la Météorologie ; Chef des travaux ABEDI Fidèle, de la FASA-UNIKIN ; Chef des travaux LANDU José, du Commissariat Général de l'Energie Atomique/Centre Régional d'Etudes Nucléaires de Kinshasa ; Docteur MERIME NONKI Rodric, de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaounde.

Nous remercions aussi le Professeur LUTALADIO Ne BAMBI Jacques pour son encadrement et ses conseils tout au long de notre parcours académique.

Nous remercions enfin tous les professeurs et assistants de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université de Kinshasa qui nous ont transmis des connaissances et prodigué des conseils avisés afin que notre personne soit pleine des valeurs scientifiques.

RESUME

Cette étude avait pour objectif général d'évaluer la vulnérabilité due au nexus Climat-Eau-Migrations-Conflicts dans les bassins de l'Uélé, de l'Aruwimi et de l'Itimbiri. De façon spécifique, elle visait à analyser le caractère, l'ampleur et le rythme de l'évolution et de la variabilité climatiques, à établir un aperçu futur du régime climatique et à évaluer le degré d'affectation de la région d'étude par une exposition donnée ainsi que les facteurs qui déterminent la capacité des communautés à générer et à mettre en œuvre des mesures d'adaptation. Elle visait également de développer par agrégation un indice de vulnérabilité intégrant les composantes de la vulnérabilité au changement climatique à savoir l'exposition du milieu aux facteurs climatiques, la sensibilité de l'environnement naturel et la capacité d'adaptation des communautés affectées. Pour y parvenir, une méthodologie rigoureuse associant les approches quantitative et qualitative a été utilisée en vue d'analyser, de normaliser et d'agréger les indices des composantes de vulnérabilité susmentionnées dans les bassins des rivières Uélé, Aruwimi et Itimbiri.

A l'issue de cette étude, les résultats ont montré que du point de vue de l'exposition et de la distribution spatio-temporelle du régime hydro-climatique, la région d'étude est caractérisée par trois classes de sécheresse à savoir l'humidité forte, l'humidité modérée et la sécheresse modérée. La détection de la sécheresse a montré que durant la période allant de 1960 à 2018, la région d'étude a connu trois périodes sèches ayant des allures de la sécheresse sévère à la sécheresse modérée et trois périodes humides ayant les tendances de l'humidité modérée à l'humidité forte. Les analyses des projections futures des indices hydro-climatiques montrent, indépendamment des scénarios, que le changement climatique va amplifier dans un avenir très proche les conditions climatiques extrêmes ; les communautés de la région d'étude vont observer une augmentation de la fréquence annuelle des sécheresses.

Du point de vue de la sensibilité et de la capacité d'adaptation, les résultats obtenus ont montré que les communautés riveraines de trois bassins versants sous étude sont censées parcourir à des degrés variés des longues distances pour accéder à l'eau salubre, l'accessibilité à l'eau dans le bassin de l'Aruwimi se rapproche de l'optimum envisageable mais elle est critique dans les deux autres bassins. L'occupation du sol évaluée par la couverture forestière a révélé que les bassins de l'Itimbiri et de l'Aruwimi sont plus ou moins bien couverts et sont de ce fait moins sensibles que le bassin de l'Uélé qui devient de plus en plus anthropisé. L'état de santé de la végétation, évalué avec l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), montre les valeurs situées au-dessous du seuil critique (soit supérieur à 0,1) pour les trois bassins versants sous étude, ces valeurs correspondent à une forte activité de photosynthèse, propre aux terres arbustives, aux forêts tempérées, aux forêts humides et aux terres agricoles. En outre, les communautés disposent une faible capacité d'adaptation, certaines initiatives individuelles ou communautaires d'adaptation sont mises en œuvre dans la région pour faire face aux problèmes d'accès à l'eau, aux pressions migratoires et à l'émergence des conflits, mais elles sont fragiles et moins adoptées par les communautés, ce qui accroît leur vulnérabilité et réduit leur résilience.

Après l'agrégation des indices par composante de vulnérabilité, les résultats ont montré que dans une échelle de 0 à 1 dont 0 est défini comme situation optimale et 1 comme situation critique, les bassins d'étude tendent vers une vulnérabilité accrue due au nexus Climat-Eau-Migrations-Conflits avec un risque climatique quasiment élevé et une très faible capacité d'adaptation. Les indices de sous-vulnérabilités développés sont très critiques (supérieurs à 0,5), les bassins de l'Uélé et de l'Aruwimi ont un même niveau de vulnérabilité soit 0,6 et le bassin de l'Itimbiri s'est montré plus vulnérable soit 0,7. La région d'étude est exposée au risque climatique évalué à 0,6 de vulnérabilité, les communautés qui y vivent ont une faible capacité d'adaptation estimée à 0,7 de vulnérabilité, ce qui rend, in fine, la région d'étude vulnérable au changement climatique avec un Indice Agrégé de Vulnérabilité globale évalué à 0,6.

Mots-clés : Climat-Eau-Migrations-Conflits ; Composantes de vulnérabilité ; Bassin versant ;
Indice Agrégé de Vulnérabilité ; Nord-Est du bassin du Congo

INTRODUCTION

Contexte et Problématique

La variabilité et le changement climatiques sont deux phénomènes environnementaux auxquels est associée l'occurrence des événements extrêmes et des catastrophes naturelles, dont les impacts se manifestent sur les populations et leurs moyens de subsistance, ainsi que sur la disponibilité des ressources naturelles. Les importantes sécheresses et inondations sont de plus en plus récurrentes en Afrique depuis ces trois dernières décennies (Beaudoin, 2007) et leurs effets sont désastreux, voire mortels où près de 1,3 milliards des personnes en sont mortes de causes directes ou indirectes (Obassi, 1994 ; GIEC, 2007). Dans une large mesure, les communautés qui vivent dans les conditions de vulnérabilité accentuée éprouvent de grande difficulté quant à leur capacité relativement faible de faire face aux effets induits par la variabilité et le changement climatiques (Wilhite, 2000 ; Sonwa et al., 2012).

Ces effets de la variabilité et du changement climatiques sont observés dans l'agriculture et la sécurité alimentaire, la production d'hydroélectricité, les activités industrielles, la santé humaine et animale, la sécurité des moyens de subsistance et celle des personnes (quand les femmes doivent parcourir de grandes distances pour aller chercher de l'eau, par exemple) et l'accès à l'éducation (quand les enfants ne vont plus à l'école parce que la corvée d'eau prend trop de temps, par exemple) (WMO et GWP, 2013).

Le bassin du Congo, qui est essentiel à la sécurité de l'eau à l'échelle tant locale que continentale, n'est pas épargné aux effets néfastes du changement climatique notamment les changements dans la distribution saisonnière des précipitations, l'utilisation des terres, les régimes hydrologiques et les modes d'utilisation des eaux. Ces effets amplifient les vulnérabilités des 120 millions d'habitants du bassin, qui dépendent essentiellement de l'agriculture pluviale (Tshimanga et Hughes, 2012). Les bassins des rivières Uélé, Aruwimi et Itimbiri, comptés parmi les principaux sous-bassins de la partie Nord-Est du Bassin du Congo, sont connus pour les multiples biens et services écosystémiques et font face également aux effets néfastes du changement climatique susmentionnés, qui astreignent les opportunités que ces trois bassins devaient offrir.



Figure 1. Services de l'eau dans la région d'étude

Force est de constater que ces bassins versants constituent à ce jour, un vestibule où s'engouffrent des migrants pasteurs en provenance du bassin du lac Tchad. Cette situation accroît la vulnérabilité des communautés dans ces bassins, et suscite beaucoup d'attention à cause des multiples conflits liés à l'eau, enregistrés entre les migrants pasteurs et les autochtones agriculteurs (UNEP, 2011 ; Kabamba, 2015). C'est ainsi que la compréhension de cette vulnérabilité due au nexus Climat-Eau-Migrations-Conflits est dès lors nécessaire en vue de renforcer la résilience des communautés riveraines aux effets de changement environnemental actuel et futur.



Figure 2. Cheptels des vaches Mbororo dans la région d'étude

L'évaluation de la vulnérabilité de ces communautés au changement climatique ne peut pas être étudiée de manière isolée, elle est une analyse complexe et multifactorielle car outre la nature physique du changement climatique, divers facteurs socioéconomiques influent sur la gravité et la nature des impacts qu'il engendre. Face à toutes ces questions, il est donc pertinent d'envisager la vulnérabilité sous un angle nouveau qui prend en compte les trois plans du développement durable à savoir les aspects humains, économiques et environnementaux (ONERC, 2005), afin de mieux cerner les relations de cause à effet du changement climatique et de son impact sur les personnes, les secteurs économiques et les systèmes socio-écologiques. A cet effet, plusieurs chercheurs suggèrent d'approcher la vulnérabilité par un travail basé sur les indicateurs ou indices qui tiennent compte de la nature complexe du changement climatique (Pavageau et al., 2013 ; GIZ, 2017).

C'est dans ce contexte que cette étude analyse les indices hydro-climatiques c'est-à-dire les indices relatifs au caractère, à l'ampleur et au rythme des changements climatiques auxquels la région d'étude est exposée, les indices liés à la sensibilité du milieu naturel et les indices socioéconomiques liés à la capacité d'adaptation des communautés riveraines (Parry et al., 2007 ; Pavageau et al., 2013). L'agrégation de ces indices multifactoriels va aboutir au développement d'un indice agrégé de vulnérabilité qui illustre et communique les réalités complexes et multidimensionnelles de la vulnérabilité dans la partie Nord-Est du bassin du Congo.

Questions de recherche

La question fondamentale à laquelle cette étude est censée répondre est la suivante : Quel est le niveau de la vulnérabilité des communautés riveraines de la partie Nord-Est du bassin du

Congo dans un contexte des conflits hydriques engendrés par les migrants transhumants et accentués par le changement climatique ? Mais nous ne saurons évaluer cette vulnérabilité sans répondre aux questions spécifiques suivantes : Quel est le degré de l'exposition actuelle des communautés de la région d'étude aux effets du changement climatique y compris les événements extrêmes ? Quel en est son aperçu futur ? Quel est le degré de sensibilité de la région sous étude par une exposition donnée ? Quels sont les facteurs explicatifs de la capacité d'adaptation des communautés de la région sous étude ?

Hypothèses de l'étude

Les bassins versants sous étude seraient vulnérables au nexus Climat-Eau-Migrations-Conflits, l'analyse des facteurs hydro-climatiques et physiographiques associés aux facteurs socioéconomiques permettrait de mettre en exergue la vulnérabilité de la région d'étude. Les hypothèses spécifiques suivantes ont été formulées pour tenter répondre aux questions spécifiques de recherche susmentionnées :

- La région d'étude serait exposée aux effets du changement climatique à cause des variations de paramètres climatiques (les températures, les précipitations et l'évapotranspiration) enregistrées ces trois dernières décennies ;
- Les scénarios de changement climatique indiqueraient une exposition grandissante de la région d'étude ;
- La péjoration des caractéristiques du milieu naturel et le changement d'occupation du sol tels qu'observés actuellement rendraient la région d'étude sensible aux effets du changement climatique ;
- Le savoir, la capacité des institutions, la technologie et les ressources économiques seraient les facteurs clés qui atténueraient la vulnérabilité due au nexus Climat-Eau-Migrations-Conflits au niveau local.

Objectifs de l'étude

Cette étude a pour objectif général, celui d'évaluer la vulnérabilité due au nexus Climat-Eau-Migrations-Conflits dans les bassins de l'Uélé, de l'Aruwimi et de l'Itimbiri. Spécifiquement, elle vise à :

- Analyser le caractère, l'ampleur et le rythme de l'évolution et de la variabilité climatiques des périodes historique et actuelle ;
- Etablir un aperçu futur du régime climatique notamment des événements extrêmes dans la région d'étude en vue d'anticiper des conséquences et des impacts du changement climatique sur la disponibilité des ressources en eau et les communautés riveraines ;
- Déterminer le degré d'affectation des bassins versants sous étude par une exposition donnée ;
- Evaluer les facteurs qui déterminent la capacité des communautés (hommes et femmes) à générer et à mettre en œuvre des mesures d'adaptation ;
- Développer par agrégation un indice de vulnérabilité intégrant l'exposition actuelle, la sensibilité et la capacité d'adaptation.

Cette étude s'aligne aux Objectifs de Développement Durable (ODD 5 sur l'égalité entre les sexes, ODD 6 sur l'accès à l'eau salubre et assainissement, ODD 10 sur la réduction des inégalités et ODD 13 sur le changement climatique).

Méthodologie générale de l'étude

Pour parvenir à évaluer la vulnérabilité due au nexus Climat-Eau-Migrations-Conflits, une méthodologie plurielle associant les approches quantitative et qualitative a été proposée. L'analyse se penche sur les caractéristiques hydro-climatiques, les caractéristiques de l'environnement naturel et d'occupation des sols, et les caractéristiques socioéconomiques (migrations, conflits, genre, accès aux ressources et usages) en vue d'établir la vulnérabilité.

A cet égard, cette étude a procédé aux analyses des données disponibles et des différentes cartes thématiques, notamment les séries temporelles des variables hydro-climatiques, les modèles numériques de terrain, la végétation et les types d'occupation des sols, les infrastructures d'accès aux services socioéconomiques de base, etc. Plusieurs méthodes spécifiques sont utilisées à cette fin, incluant notamment le Système d'Information Géographique, les analyses fréquentielles des données socioéconomiques, et des indices hydro-climatiques. Les analyses des tendances à long terme des indices hydro-climatiques sont utilisées pour détecter les changements dans la distribution spatiale et temporelle du régime hydro-climatique, et de déterminer également la fréquence d'occurrence des périodes sèches et humides.

La vulnérabilité étant une fonction de l'exposition, de la sensibilité et de la capacité d'adaptation ($\text{Vulnérabilité} = \text{Exposition} \times \text{Sensibilité} \times \text{Capacité d'adaptation}$), un ensemble d'indicateurs ou d'indices directs ou indirects issus des bases de données est utilisé dans cette étude pour évaluer l'exposition, la sensibilité et la capacité d'adaptation en vue de développer l'indice agrégé de vulnérabilité due au nexus Climat-Eau-Migrations-Conflits. La Figure 3 présente le résumé des approches méthodologiques spécifiques pertinentes à cette étude.

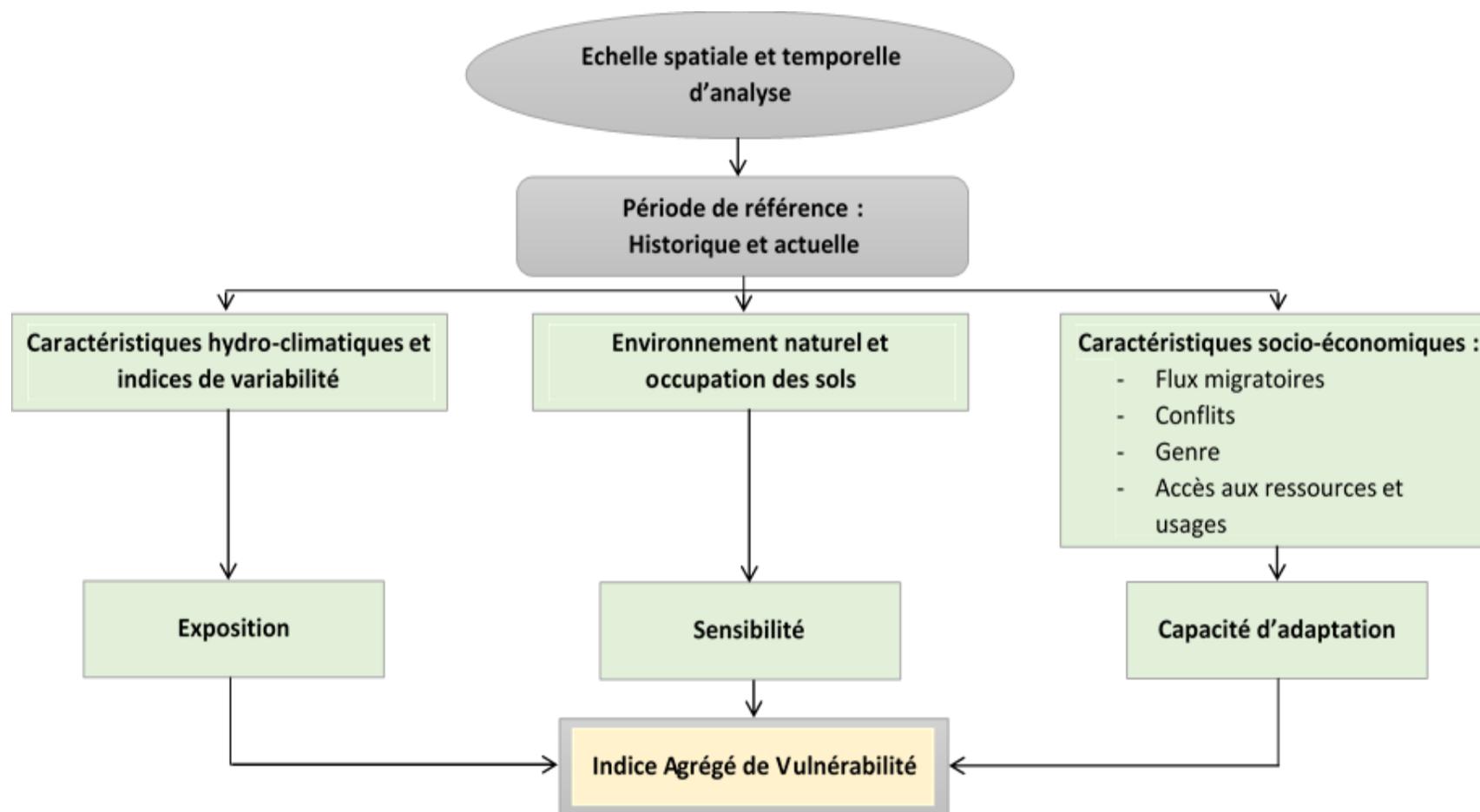


Figure 3. Approches méthodologiques de l'étude

Structure de l'étude

Hormis l'introduction et la conclusion ponctuée des recommandations, cette étude est structurée en trois chapitres dont le premier traite de la revue de la littérature sur les théories et les approches méthodologiques de l'évaluation de la vulnérabilité au changement climatique, le deuxième décrit de manière approfondie le milieu d'étude, les données et les méthodes utilisées et le troisième chapitre présente les résultats et les discussions.

Chapitre 1. REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1. Nexus Climat-Eau-Migrations-Conflicts dans le bassin du Congo

Le Bassin du Congo regorge un potentiel en ressources en eau équivalent à 40 % du volume d'eau douce du continent africain, offrant ainsi des opportunités pour de nombreux biens et services, notamment l'agriculture, la pêche, l'hydroélectricité, l'approvisionnement en eau, le transport et le maintien des écosystèmes (Tshimanga, 2012). Plus de 60 % de la population du bassin vit dans des zones rurales et dépend des ressources du bassin pour leur subsistance.

D'une part, le cas du Bassin du Congo montre qu'il est possible de soutenir la coopération régionale dans la gestion des systèmes d'eau partagés. D'autre part, le bassin fait l'objet de conflits entre des utilisations concurrentielles. Le thème de la "guerre de l'eau" est fréquemment mis en exergue dans la littérature et les discussions sur le bassin (Dialogue des Peuples, 2016) comme l'une des nombreuses facettes des conflits émergents - exacerbés par les impacts du changement climatique et les nouveaux modèles de mobilité et des migrations humaines. Les impacts directs du changement climatique dans le bassin ont une influence négative sur l'économie de subsistance des populations locales, ils influent sur la production agricole et la sécurité alimentaire. De manière prévisible, les groupes vivant dans les situations les plus vulnérables, notamment les femmes et les enfants (Tshimanga et Hughes, 2012 ; Molua, 2015), sont les plus touchés.

Une analyse efficace du lien entre le climat et la migration est plus facile à comprendre lorsqu'elle est envisagée dans une perspective régionale. La variabilité climatique observée dans la région du Sahel, au Nord du Bassin du Congo, conjuguée à l'accroissement démographique galopant et auxquelles sont liées des pratiques irrationnelles de gestion de l'eau disponible, plus particulièrement dans Bassin du Lac Tchad (Magrin, 2016), est particulièrement préoccupante au regard de nouveaux modes du phénomène migratoire et des conflits y associés actuellement observés dans la région du Bassin du Congo. La migration des éleveurs de la région du Lac Tchad vers le Bassin du Congo est une importante voie de migration émergente dans la région. En outre, la question du transfert d'eau du Bassin du Congo pour maintenir et revitaliser le niveau d'eau du Lac Tchad, constitue l'une des préoccupations politique et scientifique majeures au niveau régional, et est au cœur d'intenses débats qui font parfois intervenir la théorie de la "guerre de l'eau" ou conflits socio-politiques déclenchés par l'eau. Ces éleveurs ont pénétré dans les pays du Nord du Bassin du Congo - RDC, République centrafricaine (RCA) et Cameroun - et de multiples épisodes des conflits liés à la terre et à l'eau ont été enregistrés (UNEP, 2011).

Les mouvements migratoires ont augmenté au cours des deux dernières décennies en raison de plusieurs facteurs directs et indirects, et plus souvent liés à la variabilité du climat, l'occupation des terres et à la dégradation des ressources naturelles (Union africaine, 2008). Ceci a entraîné le remplacement des tendances classiques de la mobilité humaine par de nouveaux schémas de migration motivés par les besoins des communautés d'accéder aux ressources en terre et en eau. Il en résulte l'émergence de nouveaux types de conflits. Cette tendance affaiblit

l'équilibre et les échanges culturels établis entre les communautés migrantes et celles résidentes et accroît la vulnérabilité tant des communautés migrantes que celles du pays d'accueil.

De ce qui précède, le besoin d'une compréhension approfondie des interactions entre le climat, l'eau, les migrations et les conflits devient pertinent. C'est ce qui a motivé cette étude sur la vulnérabilité due au nexus Climat-Eau-Migrations-Conflits.

1.2. Vulnérabilité au changement climatique

1.2.1. Considérations générales

Le concept de « vulnérabilité au changement climatique » permet de mieux cerner les relations de cause à effet du changement climatique et de son impact sur les personnes, les secteurs économiques et les systèmes socio-écologiques. La vulnérabilité, telle qu'abordée dans cette étude, repose sur la définition la plus largement utilisée issue du quatrième Rapport d'évaluation du GIEC qui définit la vulnérabilité comme étant « le degré par lequel un système risque de subir ou d'être affecté négativement par les effets néfastes des changements climatiques, y compris la variabilité climatique et les phénomènes extrêmes.

La vulnérabilité dépend du caractère, de l'ampleur, et du rythme des changements climatiques auxquels un système est exposé, ainsi que de sa sensibilité, et de sa capacité d'adaptation » (Parry *et al.*, 2007). De cette définition, on peut distinguer quatre composantes clés qui déterminent si, et dans quelle mesure, un système est susceptible d'être impacté par les changements climatiques : l'exposition, la sensibilité, l'impact potentiel et la capacité d'adaptation.

1.2.1.1. Exposition

De toutes les quatre composantes de la vulnérabilité, l'exposition est la seule qui soit directement liée aux paramètres climatiques, c'est-à-dire au caractère, à l'ampleur et au rythme de l'évolution et de la variabilité climatiques. Les facteurs d'exposition comprennent les températures, les précipitations, l'évapotranspiration, le bilan hydrique climatique ainsi que les événements extrêmes, tels que les fortes pluies et les sécheresses météorologiques même hydrologiques. Les variations de ces paramètres peuvent exercer un stress supplémentaire important sur ces systèmes (GIEC, 2007 ; Parry *et al.*, 2007).

1.2.1.2. Sensibilité

La sensibilité détermine le degré d'affectation positive ou négative d'un système par une exposition donnée au changement climatique. La sensibilité est typiquement façonnée par les caractéristiques de l'environnement naturel et/ou physique d'un système dont la topographie, la capacité de résistance des différents types de sol à l'érosion et le type de couverture du sol. Elle se réfère également aux activités humaines qui influent sur la composition physique d'un système, tels que les méthodes de culture, la gestion de l'eau, l'exploitation des ressources et la pression démographique. Les facteurs sociaux tels que la densité de population ne devraient être considérés comme faisant partie de la sensibilité que dans le cas où ceux-ci contribuent directement à un impact spécifique de changement climatique (GIEC, 2007 ; Parry *et al.*, 2007).

1.2.1.3. Impact potentiel

La combinaison de l'exposition et de la sensibilité détermine l'impact potentiel du changement climatique. Par exemple des épisodes de sécheresse (exposition) associés avec une capacité de rétention en eau du sol (sensibilité) se traduiront par un stress hydrique (impact potentiel). Les effets du changement climatique peuvent former une chaîne d'impact plus ou moins directs qui s'étend de la sphère biophysique à la sphère sociale. Dans de nombreux pays en développement, la dépendance directe à l'égard des ressources naturelles signifie que le lien entre les impacts biophysiques du changement climatique et les activités humaines et le bien-être des populations est particulièrement étroit (GIEC, 2007 ; Parry *et al.*, 2007).

1.2.1.4. Capacité d'adaptation

La capacité d'adaptation peut être définie comme « la capacité d'un système à s'adapter au changement climatique (y compris aux variations et aux extrêmes climatiques) afin d'atténuer des effets négatifs potentiels, d'exploiter les opportunités ou de faire face aux conséquences » (Parry *et al.*, 2007). Autrement dit, la capacité d'adaptation est définie comme un ensemble de facteurs qui détermine la capacité d'un système à générer et à mettre en œuvre des mesures d'adaptation. Ces facteurs sont étroitement liés aux ressources disponibles inhérentes aux systèmes humains et à leurs caractéristiques et capacités socioéconomiques, structurelles, institutionnelles et techniques (GIEC, 2007 ; Parry *et al.*, 2007).

1.2.2. Évaluation de la vulnérabilité

La vulnérabilité n'est pas une caractéristique mesurable d'un système, comme peuvent l'être la température, les précipitations ou la production agricole. Il s'agit d'un concept qui traduit l'interaction complexe de plusieurs facteurs qui vont déterminer la sensibilité d'un système aux effets du changement climatique. Cependant, il n'existe pas de règle établie définissant les facteurs qui doivent être considérés, ni de méthode pour les quantifier. C'est pourquoi nous parlons « d'évaluer » ou « d'analyser » plutôt que de « mesurer » la vulnérabilité. Pour y parvenir, l'approche par indicateur ou indice est de plus en plus recommandée (GIZ, 2017). Cela permet d'obtenir une vision d'ensemble d'une partie de la problématique sans recourir à de lourds travaux.

1.2.2.1. Approche par indicateur ou indice

Les indicateurs, aussi appelés indices, sont de manière générale des paramètres qui fournissent des informations sur des états ou des conditions spécifiques qui ne sont pas directement mesurables (Pavageau *et al.*, 2013). L'objectif de l'utilisation d'indicateurs est d'utiliser ces informations quantifiées pour les comparer à des seuils critiques ou des mesures antérieures. Il peut s'agir de réaliser un suivi et évaluation, d'évaluer des objectifs préétablis ou de faire d'autres observations, comme la comparaison entre différentes communautés.

Les indices sont appliqués à un large éventail de domaines notamment la vulnérabilité des systèmes socio-écologiques dans le contexte du changement climatique. Dans le cas échéant, la vulnérabilité est généralement décomposée en éléments plus tangibles, il s'agit des trois composantes suivantes : exposition, sensibilité et capacité d'adaptation. Chaque composante est constituée de plusieurs facteurs, les indices sont sélectionnés pour quantifier ces facteurs.

1.2.2.2. Aperçu de la diversité des indices

La plupart des études appliquent une approche multidisciplinaire, combinant des données biophysiques, socioéconomiques et politiques (Döll, 2009 ; Iglesias et Rosenzweig, 2010 ; Samson *et al.*, 2011) ou intégrant des indicateurs ou des indices économiques et sociopolitiques (Wheeler, 2011). Pour mieux évaluer la vulnérabilité au changement climatique, il est nécessaire de prendre en compte les trois plans du développement durable à savoir les aspects humains, économiques et environnementaux. En d'autres termes, les indices susceptibles d'être utilisés dans une évaluation de la vulnérabilité, doivent prendre en compte l'exposition, la sensibilité et la capacité d'adaptation.

Leurs prises en compte de l'exposition

Les indices analysent la vulnérabilité par rapport à une exposition, qui peut être soit le changement climatique futur, soit la variabilité climatique passée. L'exposition climatique est souvent mesurée par les variations d'un ou plusieurs paramètres climatiques, en particulier la température, les précipitations, le niveau de la mer ou les événements extrêmes (Malone et Brenkert, 2009). Certains indices évaluent la vulnérabilité aux sécheresses ou aux pénuries d'eau, mais n'utilisent pas explicitement des indices d'exposition (Sullivan *et al.*, 2002 ; Vincent, 2004 ; Haddad, 2005 ; Sietz *et al.*, 2011). Certains indices incorporent des éléments d'expositions non climatiques ou attirent l'attention sur les interactions entre différents changements globaux (Kaly *et al.*, 2004), alors que d'autres se focalisent sur une seule exposition pour évaluer la vulnérabilité.

Leurs prises en compte de la sensibilité et de la capacité d'adaptation

La séparation théorique entre sensibilité et capacité d'adaptation, telle que définie par le GIEC, n'est pas toujours aisée dans la construction des indices, qui peuvent regrouper les deux concepts (Haddad, 2005 ; Sietz *et al.*, 2011). Ces indices sont souvent similaires. Parmi les facteurs les plus utilisés, la capacité économique (revenus, pauvreté), les ressources naturelles (état et gestion des ressources naturelles), les ressources humaines (santé, éducation, démographie), les ressources en eau et l'agriculture, les infrastructures (routes, équipements pour l'eau potable) et les aspects sociaux (inégalités dans les revenus, aspects liés au genre) font écho aux cinq types de capitaux de l'approche « *Sustainable Livelihoods Framework* » (ou cadre d'analyse des moyens durables d'existence) (Chambers et Conway, 1992 ; Scoones, 1998). Les aspects liés à la gouvernance, aux politiques ou aux relations internationales sont en revanche moins fréquemment examinés (Brooks *et al.*, 2005 ; Wheeler, 2011) alors qu'ils constituent des déterminants nationaux de la vulnérabilité.

Parmi tous ces facteurs, ceux relatifs à la dépendance aux ressources naturelles, à la population ou aux secteurs exposés, à l'état des ressources naturelles et aux rendements agricoles sont plutôt associés à la sensibilité, alors que les indicateurs institutionnels, de pauvreté, de développement ou de stabilité politique sont plutôt associés à la capacité d'adaptation. La démographie ou la répartition de la population est un indicateur utilisé dans un grand nombre d'indices : une forte densité de population est vue alternativement comme un stress ou comme un facteur augmentant la capacité adaptative (Yohe *et al.*, 2006 ; Malone et Brenkert, 2009).

1.3. Indice agrégé de vulnérabilité

La vulnérabilité au changement climatique ne peut être évaluée de manière isolée car elle prend en compte les réalités complexes et multidimensionnelles qui regroupent les autres facteurs qui contribuent à la vulnérabilité au changement climatique, c'est ce qui justifie le complexe « nexus Climat-Eau-Migrations-Conflits » utilisé dans le cadre de cette étude. Les indices composites ou agrégés sont promus, pour illustrer et communiquer sur ces réalités complexes et multidimensionnelles de la vulnérabilité au changement climatique (OCDE, 2008).

L'OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Économiques) définit un indice agrégé comme « une mesure quantitative ou qualitative tirée d'une série de faits observés qui peut révéler des situations relatives (par exemple d'un pays) dans une zone donnée. Lorsqu'il est évalué à intervalles réguliers, un indice agrégé peut indiquer le sens du changement à travers différentes unités et à travers le temps. »

Les décideurs et le grand public trouvent souvent plus facile de comprendre un indice composite que de nombreux indices séparés (OCDE, 2008). Dans le contexte du changement climatique, l'indice composite ou agrégé de vulnérabilité comprend l'exposition, la sensibilité, l'impact potentiel et la capacité d'adaptation. Alors qu'un indice composite hautement agrégé peut aider à illustrer un problème complexe et multidimensionnel, une grande partie de l'information sous-jacente demeure invisible. Toutefois, il conviendra d'être transparent tout au long de l'analyse de vulnérabilité sur le degré de contribution des composantes (ou même des indices individuels) à l'indice agrégé de vulnérabilité. Ceci est particulièrement pertinent lorsque l'évaluation de la vulnérabilité est nécessaire pour identifier les domaines prioritaires d'adaptation.

Chapitre 2. CADRE DE L'ETUDE, DONNEES ET METHODES

2.1. MILIEU D'ETUDE

2.1.1. Situation géographique

La région de cette étude comprend trois provinces de la partie Nord-Est de la RDC à savoir les provinces du Haut-Uélé, du Bas-Uélé et de l'Ituri et inclue respectivement les bassins des rivières Uélé, Aruwimi et Itimbiri, ces bassins sont bornés à l'intérieur des limites de 0,25° à 4,75° latitude Nord et de 23° à 30° longitude Est. La région d'étude se délimite au Nord par la République Centrafricaine (RCA) et le Sud-Soudan, au Sud par les provinces de la Tshopo et du Nord-Kivu, à l'Est par l'Ouganda et à l'Ouest par la province de la Mongala et du Nord-Ubangi. La Figure 4 décrit la situation géographique de la région d'étude (Omasombo, 2011 ; Omasombo, 2014).

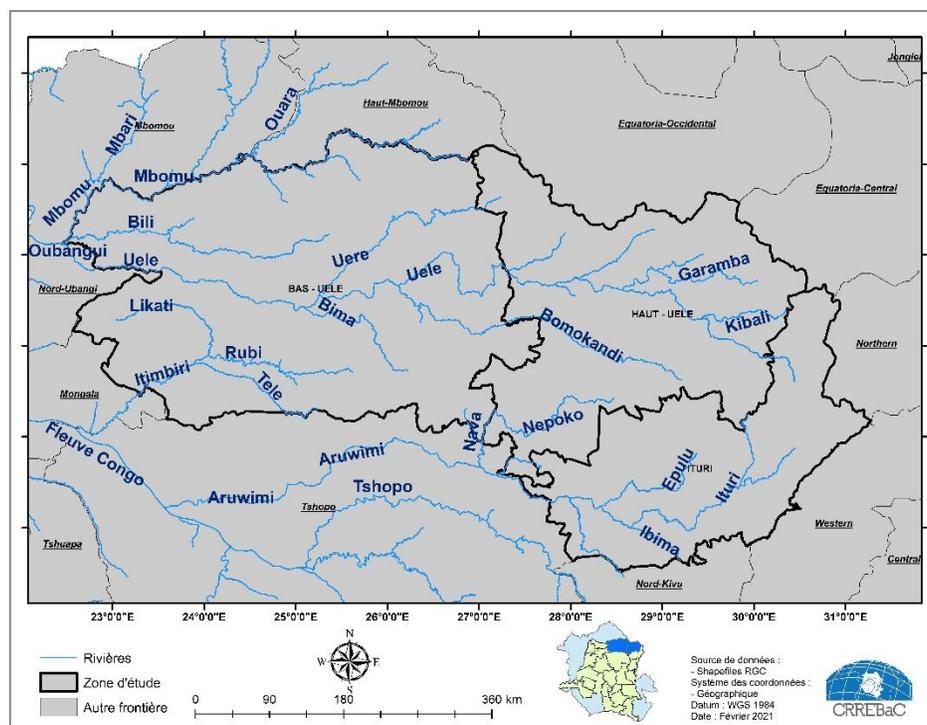


Figure 4. Carte de la région d'étude

2.1.2. Hydrologie

2.1.2.1. Bassin de l'Uélé

Il est représenté par les importants tributaires de la rivière Bomokandi, de la rivière Gada à la rive droite, qui coulent du Sud-Est et au Nord-Ouest en prenant leur source dans les formations granitiques. En rive droite, on a les tributaires principaux suivants : la rivière Duru, la rivière Kapili, la rivière Bwere, la rivière Gurba, qui prennent naissance dans les orthogneiss du nord-ouest vers le Sud-Est. La rivière Kibali est aussi un tributaire de droite de l'Uélé et coule suivant une direction presque est-ouest. Elle prend sa source dans les formations granitiques, traverse les

formations dites Kibaliennes et les orthogneiss avant de se jeter dans l'Uélé. La rivière Uélé regorge d'autres rivières de faible importance (Omasombo, 2011 ; Omasombo, 2014).

2.1.2.2. Bassin de l'Aruwimi

Il correspond principalement au sous-bassin de la Nepoko et de ses affluents principaux, la Nepoko est la principale rivière qui draine la partie Sud du Haut-Uélé, avant de rencontrer la rivière Ituri pour donner naissance à la rivière Aruwimi, dans la province de la Tshopo. En dehors des principales rivières précitées, il y a plusieurs cours d'eau de moindre importance formant le réseau hydrographique de l'Aruwimi (Omasombo, 2011 ; Omasombo, 2014).

2.1.2.3. Bassin de l'Itimbiri

Il est constitué principalement de la rivière Rubi qui traverse les territoires de Poko, de Bambesa, de Buta et d'Aketi où elle constitue la rivière Itimbiri avec la rivière Tele et la rivière Likati. La rivière Itimbiri se jette dans le fleuve Congo à 15 km de Bumba (Omasombo, 2011 ; Omasombo, 2014).

Le Tableau 1 et la Figure 5 montrent les rivières selon leur ordre de drainage, regroupées en trois bassins versants qui constituent la région d'étude à savoir les bassins de l'Uélé, de l'Aruwimi et de l'Itimbiri.

Tableau 1. Rivières constituant le réseau hydrographique de la région d'étude et leur ordre de drainage

Ordre de drainage	Bassin de l'Uélé	Bassin de l'Itimbiri	Bassin de l'Aruwimi
1	-	-	Biye, Lubi (A), Mozogodja et Waka
2	Aka, Ambia, Ao, Bawa, Dimbili, Dungu (A), Gangu, Kalina, Kapili, Lemvo, Libayo, Loura, Mobummu, Nai, Nizi, Nlere, Omi, Peme, Sara et Teba	Amba, Mobuama, Ombwe, Pwengipe, Tinda et Yoko	Asefu, Batiri, Bubu, Ekale, Etambi, Gabu Gula, Kabilu (A), Linaka, Longa, Lukailu, Luki Matandu, Mubilinga, Nebulu, Oara, Sausore, Tito, Uara et Wamba
3	Andu, Ango, Arebi, Aro, Aru, Avuku, Baradi, Beo, Bili Moke, Braw, Bwembi, Duma, Futu, Kedi, Koke, Kwandro, Lombe (A), Lowa, Makpwa, Muri, Niemue, Obo, Paika, Poko, Runga, Sombe, Tely et Utua	Aketi, Bilengo, Bilo, Bongu, Buangulu, Bukanga, Elongo, Lemoi, Lese, Makondo, Masi, Tangali, Tshimbi, Yoko et Zoki	Abu, Afande, Alolo, Asoa, Biabone, Biena, Bunga, Digu, Ekunga, Elai, Gada, Imbo, Isoro, Itua, Kalumete, Loku (A), Longele, Loya (B), Luhule, Luki (B), Lulu, Lulu (A), Maika, Mambo, Meduka, Mososa, Namopina, Nduye, Nesebene, Oke, Samboko, Semue, Turanga et Yafele
4	Aval Poko, Bima, Duru, Gada, Garamba, Gurba, Nzoro et Uere	Balina, Likati, Loeku, Lolili, Tele et Rubi	Epulu, Ibina, Lenda, Lokuma, Nava, N'gayu, Shari et Sumate
5	Bomokandi, Dungu et Kibali et Bwere	Itimbiri	Nepoko et Ituri
6	Uélé	-	Aruwimi

Source : *CRREBaC-Classification des rivières du bassin du Congo (2019)*

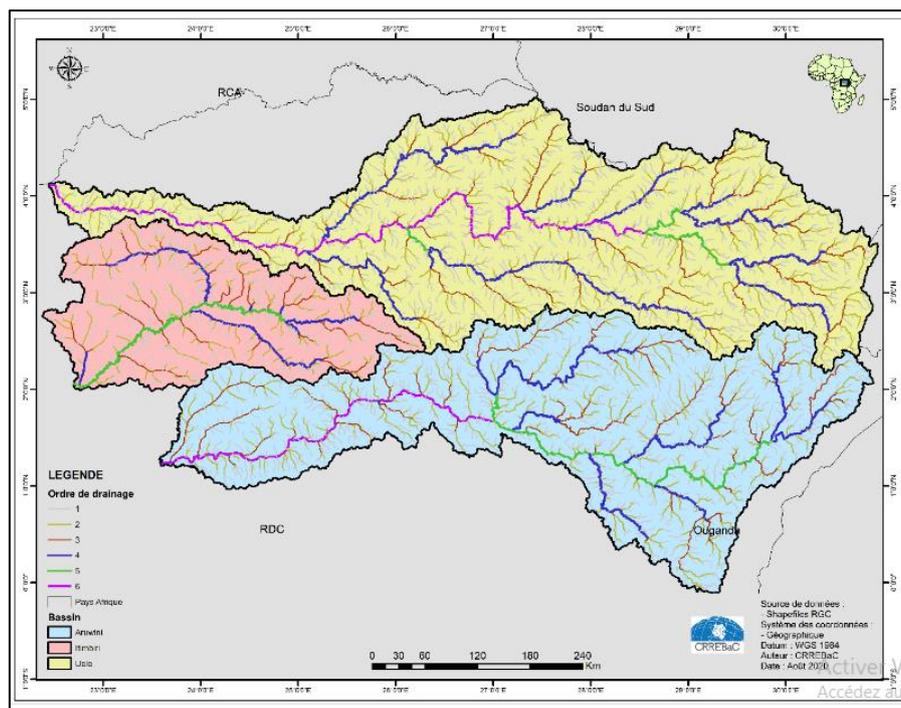


Figure 5. Réseau hydrographique de la région d'étude

Le Tableau 2 présente les caractéristiques hydrologiques et morpho-métriques des trois bassins sous étude.

Tableau 2. Caractéristiques hydrologiques et morpho-métriques des bassins versants sous étude

Bassin versant	Station hydro.	Ordre de drainage	Débit m ³ /s	Périmètre (Km)	Superficie (Km ²)	Indice de Gravelius	Élévation moyenne (m)
Uélé	Mobaye	6	1 540	5064	139 124	3,8	394 743
Aruwimi	Banalia	6	1 200	4 466	120 406	3,6	358 783
Itimbiri	Aketi	5	384	2 350	52 854	2,8	347 477

Sources : CRREBaC/CB-CIS (Classification des rivières du bassin du Congo), Institut Royal Colonial Belge (1941), Institut de Recherche pour le Développement

Les élévations des trois bassins versants sous étude s'étalent entre 347 et 2521m. Les plus hautes élévations (1318 m-2521 m) sont caractérisées par des plateaux très accidentés entrecoupés des vallées très profondes alors que les classes modérées et faibles élévations sont caractérisées un relief peu varié, généralement plat (665-347m) (INEAC, 1960 ; Köppen, 1967 ; Hufty, 2001). La Figure 5 présente les classes des élévations des bassins des trois bassins versants sous étude.

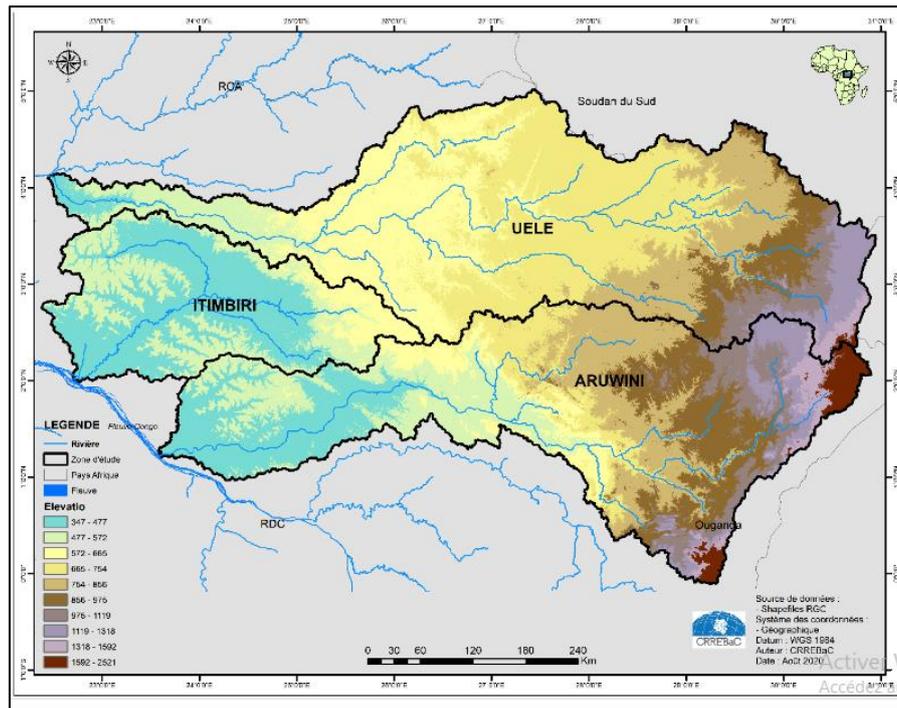


Figure 6. Classe des élévations des bassins d'étude

2.1.3. Climatologie

Le climat est le principal facteur qui contrôle l'hydrologie d'un bassin versant car la variabilité et les changements climatiques ont des effets directs et remarquables sur les disponibilités des ressources en eau.

La variabilité spatiale du climat et la répartition des pluies au niveau du Bassin du Congo ont permis de définir cinq zones, sur base de la classification climatique de Köppen Geiger (Peel et al., 2007). Les 5 zones dont les coordonnées géographiques sont reprises sur la Figure 7 ci-après.

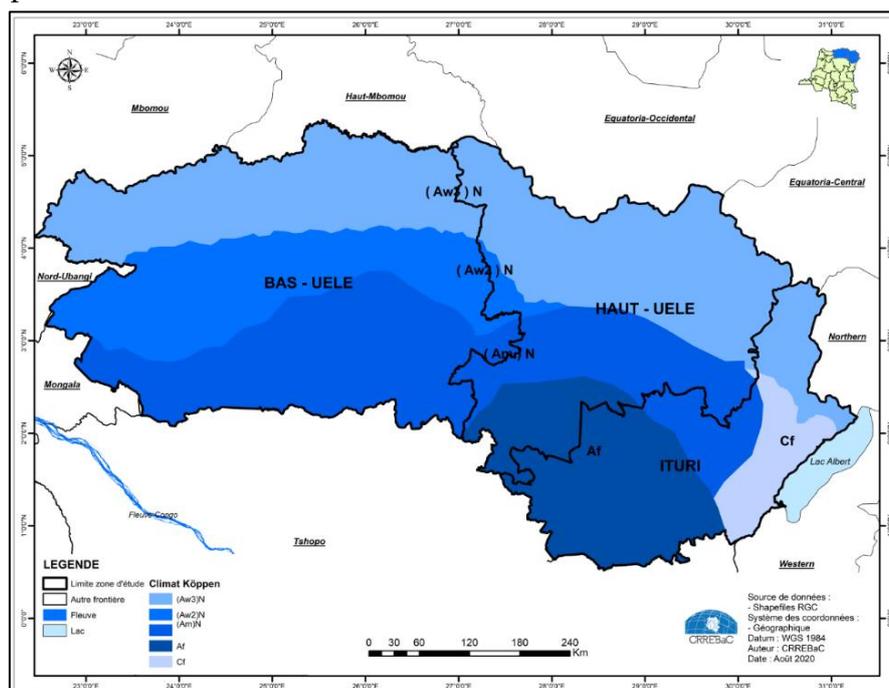


Figure 7. Zone climatique de la zone d'étude

La région d'étude se situe dans la zone climatique 3 et jouit d'un climat tropical humide du type *Af*, *Am* et *Aw*. Il est caractérisé par une saison pluvieuse qui dure huit mois soit du mois d'Avril au mois de Novembre, et une saison sèche qui dure quatre mois soit du mois de Décembre au mois de Mars, cette dernière constitue la période la plus chaude. Actuellement, les variations saisonnières d'année en année sont très remarquables, souvent la saison sèche tend à s'allonger. Ces perturbations climatiques affectent les activités de la population, surtout l'agriculture, les tornades surtout sèches sont assez fréquentes et très fortes.

2.1.4. Paramètres climatiques

Grilles de l'Unité de recherche climatique de l'Université d'East Anglia (CRU-TS)

La CRU-TS représente une base de données des variations mensuelles du climat au cours du siècle dernier ou plus. Ces données sont calculées à une haute résolution à un pas de grilles de 0.5 degré et sont fondées sur une archive de températures moyennes mensuelles fournies par plus de 4000 stations météorologiques réparties dans le monde entier. Ceci permet l'étude des variations climatiques et comprennent des variables telles que la couverture nuageuse, la gamme des températures diurnes, la fréquence des jours de gel, les précipitations, la température moyenne journalière, la température mensuelle moyenne journalière maximale, la pression de vapeur et la fréquence des journées humide.

La région d'étude couvre au total 107 points correspondant chacun aux coordonnées géographiques très spécifiques. Les données climatiques sont donc extraites à partir de chaque point dans le but de caractériser les conditions climatiques ayant prévalu durant la période allant de 1980 à 2018 soit au total quatre décennies. La Figure 8 montre les différentes grilles étalées sur les trois bassins d'étude.

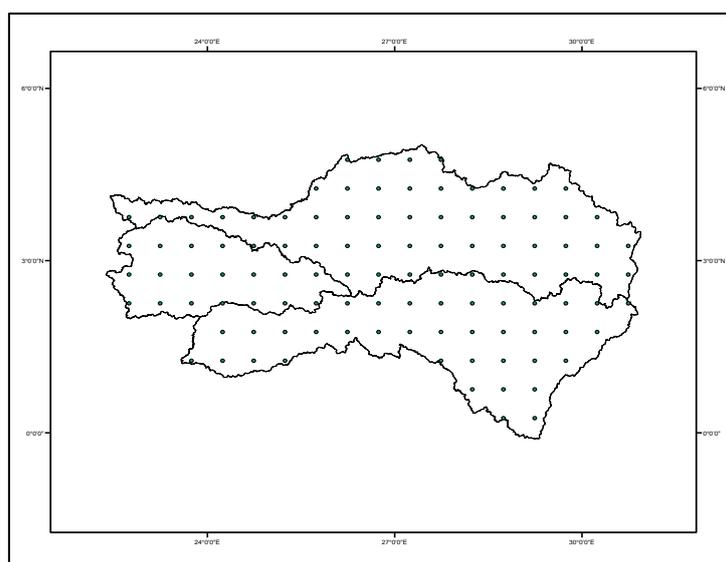


Figure 8. Grilles de CRU dans la région d'étude

2.1.4.1. Précipitations

Les Figures 9 et 10 présentent respectivement les données pluviométriques mensuelles et la distribution spatiale de ces moyennes durant période de 1980 à 2018 pour la base des données CRU-TS.

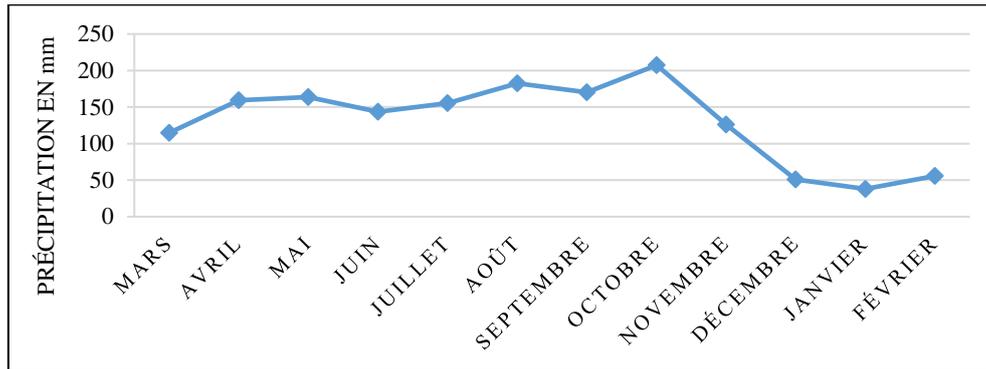


Figure 9. Normales pluviométriques mensuelles

Le régime pluviométrique annuel de la région est caractérisé par une saison pluvieuse, avec un pic enregistré durant le mois de mai. Les normales pluviométriques annuelles durant de 1980 à 2018 pour la base des données CRU-TS s'élèvent à 1 420 mm.

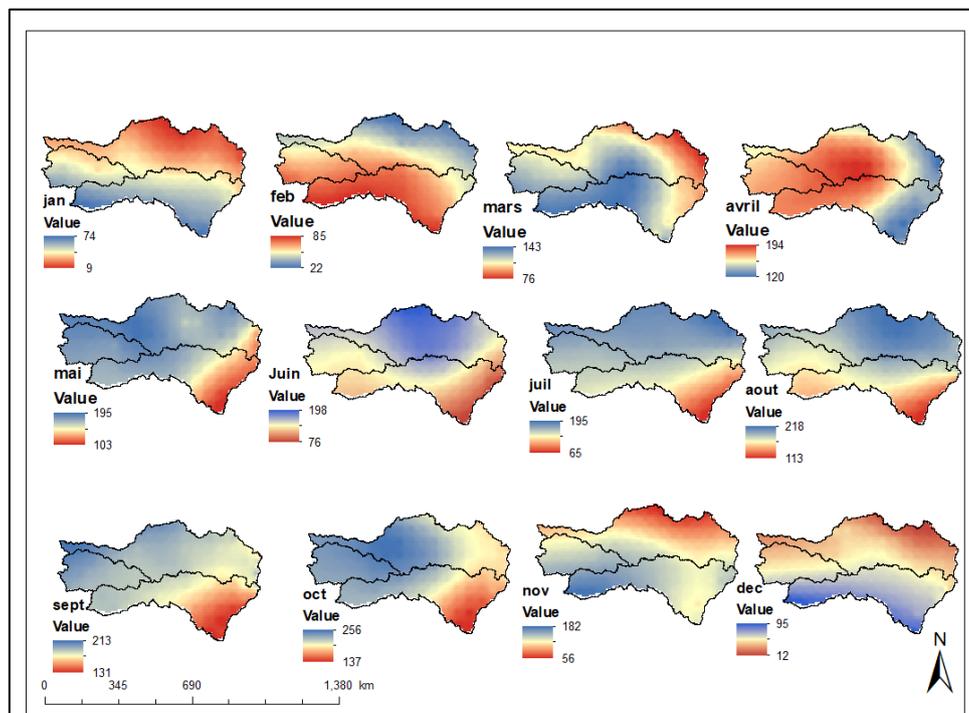


Figure 10. Distribution mensuelle des précipitations moyennes dans la région d'étude (1960-2018)

2.1.4.2. Températures moyennes

Les Figures 11 et 12 présentent respectivement les données mensuelles de la température moyenne et la distribution spatiale de ces données durant période de 1980 à 2018 pour la base des données CRU-TS.

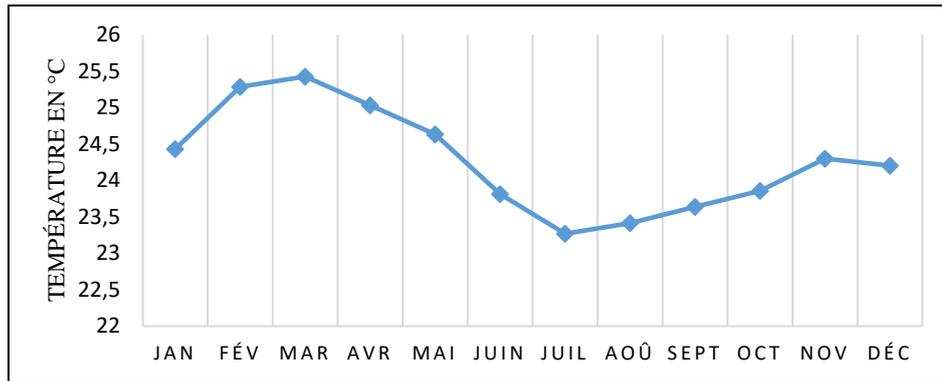


Figure 11. Températures mensuelles de deux stations de la région d'étude

La Figure montre que le pic des températures minimales est enregistré durant les mois de février, mars et avril. La moyenne annuelle de température pour la base des données spatiales de CRU-TS est 24,3°C.

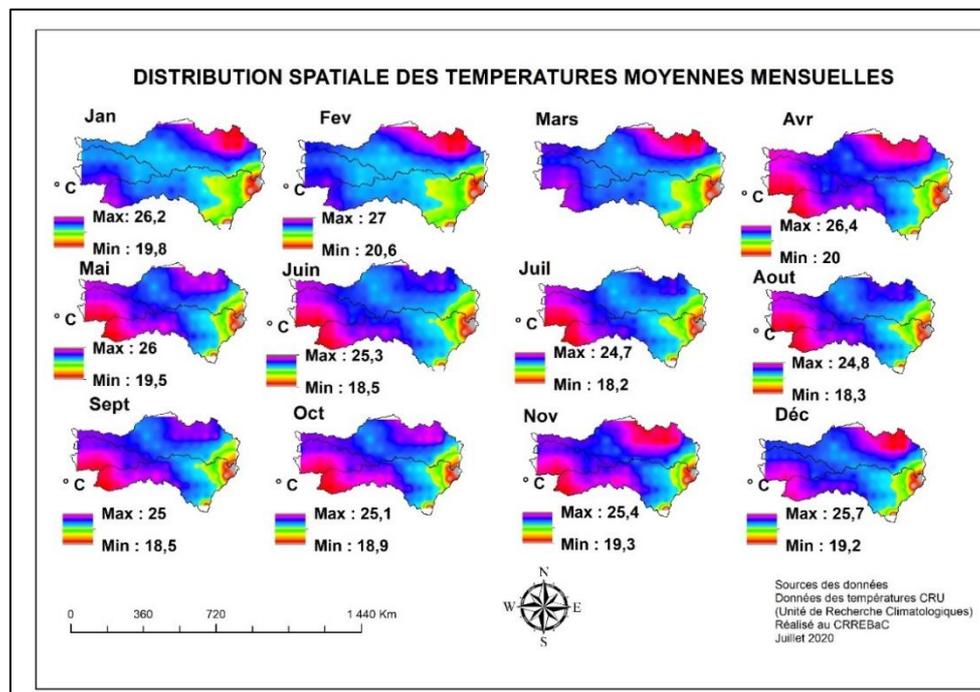


Figure 12. Distribution mensuelle des températures moyennes dans la région d'étude (1960-2018)

2.1.4.3. Evapotranspiration potentielle

Les Figures 13 et 14 présentent respectivement les données mensuelles de l'évapotranspiration potentielle et la distribution spatiale de ces données durant la période de 1980 à 2018 pour la base des données CRU-TS.

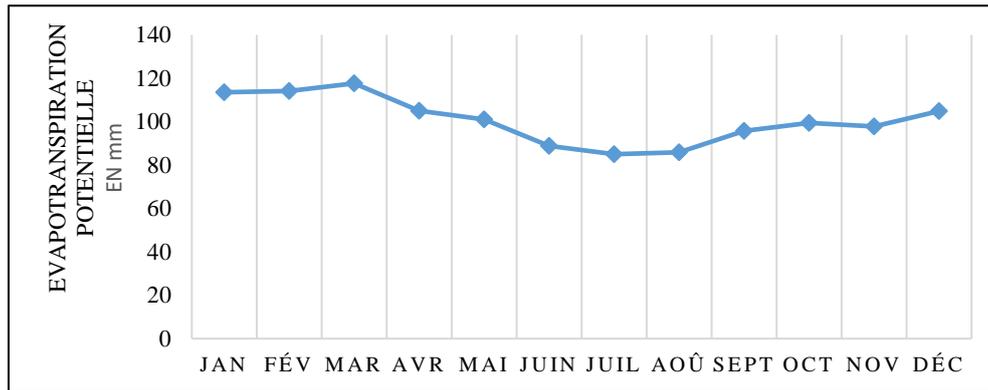


Figure 13. Moyenne mensuelle de l'évapotranspiration de deux stations de la région d'étude

La Figure 13 montre que le tracé de l'évapotranspiration potentielle normale fait ressortir des valeurs élevées d'évapotranspiration durant les mois Janvier, Février et Mars soit en saison sèche.

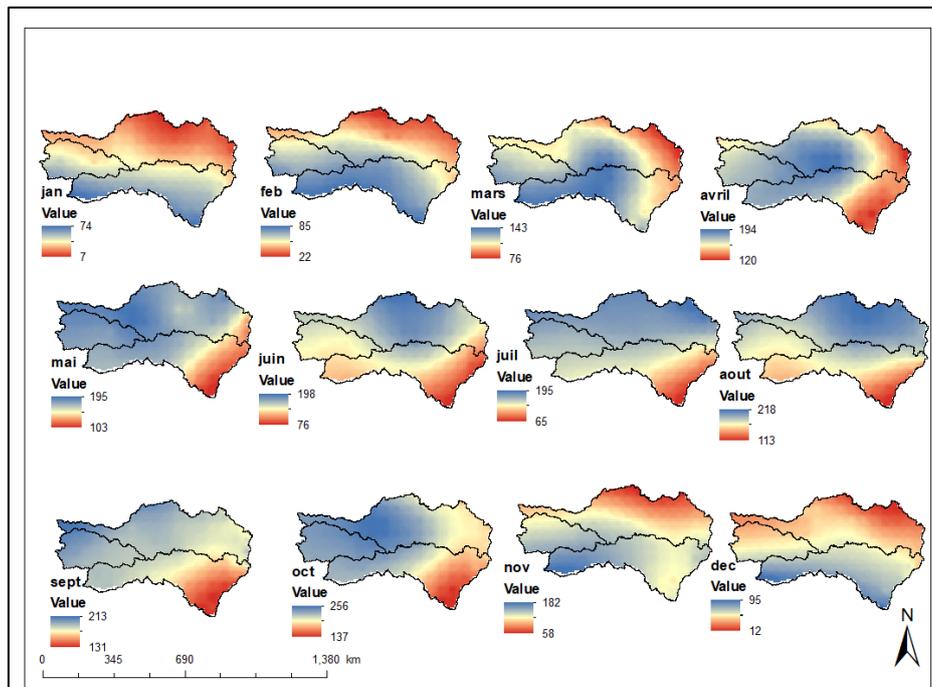


Figure 14. Distribution mensuelle de l'évapotranspiration potentielle moyenne dans la région d'étude

2.1.5. Hydrogéologie

La région d'étude fait partie de l'unité hydrogéologique des aquifères de grès mésozoïques (de Karroo) et calcaires qui entourent de grandes parties de la Cuvette Centrale. Les eaux souterraines sont des puits traditionnels, à l'aide de pompes à main ou des pompes mécaniques. La réalimentation des aquifères résulte naturellement d'un processus hydrologique par lequel les eaux de surface percolent à travers le sol et s'accumulent sur le premier horizon imperméable rencontré, elle constitue un indicateur important dans l'appréciation du potentiel hydrologique d'un bassin hydrographique (Omasombo, 2011 ; Omasombo, 2014).

La région d'étude est caractérisée par une recharge rapide et une productivité se trouvant dans la fourchette du faible au modéré. La recharge provient en grande partie de l'infiltration directe des précipitations et localement de l'infiltration du lit de la rivière, elle peut être rapide, en particulier via de grandes fractures et des caractéristiques karstiques. La Figure 15 présente les recharges moyennes annuelles des aquifères de deux bases de données utilisées (CRU et GPCC) dans la région d'étude.

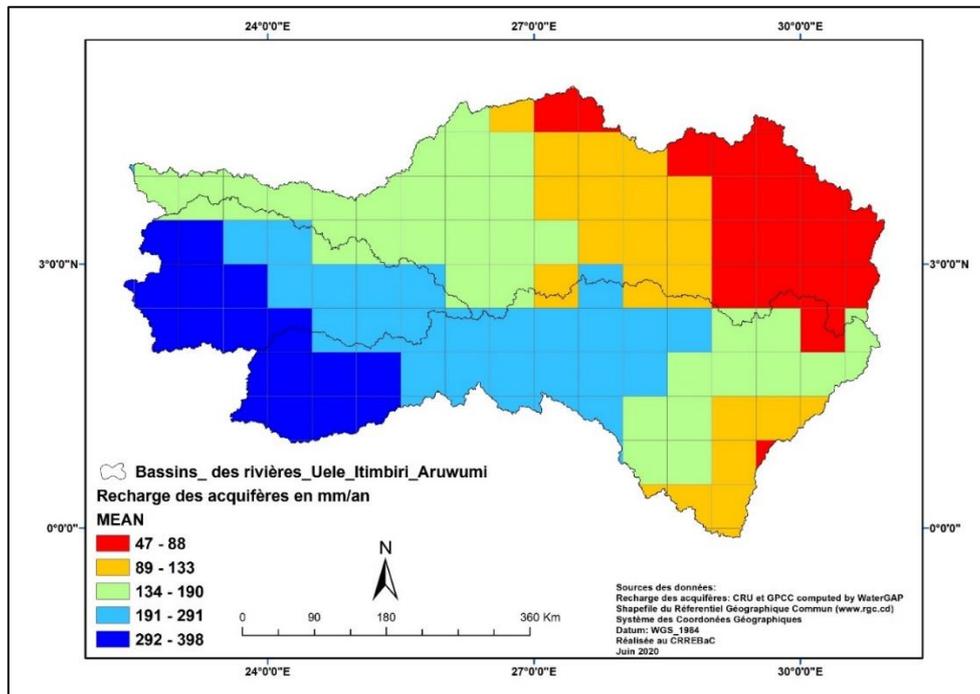


Figure 15. Recharge des aquifères des bassins versants sous étude

2.1.6. Pédologie et géologie

Les principaux groupes de sols rencontrés dans la région d'étude appartiennent au groupe des sols tropicaux ferrallitiques riches en fer et en alumine, avec une texture et une structure variée. Les sols du bassin de l'Itimbiri sont des ferra-sols, reconnus comme sols pauvres. Ces sols, riches en argile mais faibles en réserve minérale, présente une pédogenèse quasi arrêtée et peuvent avoir une certaine fertilité sous la forêt dense. Le bassin de l'Uélé renferme principalement des ferra-sols et des ferri-sols, réputés des sols à fertilité élevée. A l'instar du bassin de l'Uélé, le bassin de l'Aruwimi comprend une gamme variée de types de sols offrant des possibilités de pratiquer plusieurs sortes de cultures. On y trouve des ferra sols et des Ferri sols provenant des assises non différenciées (comme des granites, schistes et les basaltes), des Kaolisols à horizons sombres, des terres noires tropicales sur alluvions et aussi des sols bruns tropicaux sur alluvions (Omasombo, 2011 ; Omasombo, 2014).

Le sous-sol est formé de terrains très anciens (précambriens), les affleurements des roches en place y sont relativement rares et se voient principalement dans le lit des cours d'eau et sur quelques collines isolées, cas de complexe de base Mbomu et le Lindimbia le long de la Rivière Uélé. Il n'y a pas de volcan. Une ligne de collines traverse sensiblement de l'Est à l'Ouest (Omasombo, 2011 ; Omasombo, 2014). Plusieurs cours d'eau drainent la région, constituant ainsi trois grands sous bassins versants, dont le sous-bassin de la rivière Aruwimi

(superficie 120406 km², ordre de drainage 6, densité de drainage 155,3 km/km²), le sous-bassin de la rivière Itimbiri (superficie 52 854 km², ordre de drainage 5, densité de drainage 148 km/km²) et le sous-bassin de la rivière Uélé (superficie 139 124 km², ordre de drainage 6, densité de drainage 150 km/km²) (Tshimanga *et al.*, 2020). La Figure 16 présente la carte géologique et hydrographique de la partie Nord-Est de la RDC.

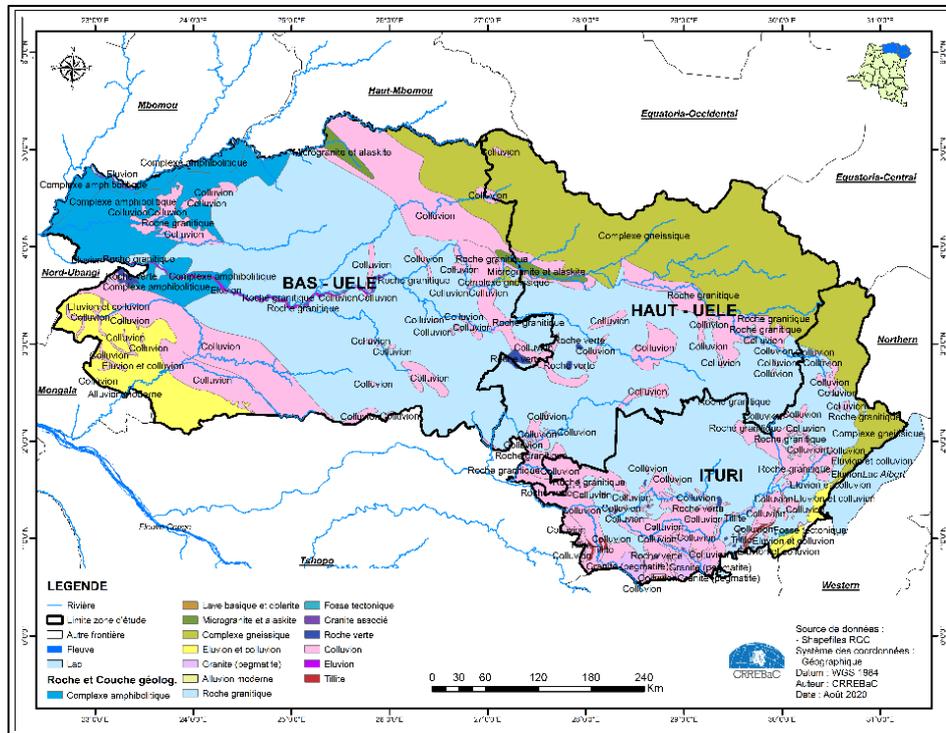


Figure 16. Géologie et hydrographie de la région d'étude

2.2. DONNEES UTILISEES

Cette étude a recouru principalement à deux sources des données à savoir les sources des données primaires et secondaires. Les données primaires sont des données socio-économiques issues de la campagne de collecte des données organisée par le Centre de Recherche en Ressources en Eau Bassin du Congo dans le cadre du projet sur la Gestion des Interactions entre les migrations et les conflits dus au changement climatique et à l'eau en vue de renforcer la résilience des communautés dans le bassin du Congo (CEMiC). Quant aux sources des données secondaires, elles sont issues des observations spatiales. Le Tableau 3 présente les données utilisées et leurs sources. La Figure 17 présente la corrélation statistique par régression linéaire pour la validation des données CRU-TS.

Tableau 3. Données utilisées

Types de données		Sources de données
Données climatiques	Précipitations moyennes	Unité de recherche climatique de l'Université d'East Anglia (Climatic Research Unit-Time-Series datasets, CRU-TS)
	Evapotranspirations moyennes	
	Températures moyennes	
	Températures maximales	
	Températures minimales	
	Humidité relative	
	Radiation solaire	
Données cartographiques	Occupation du sol	OSFAC (Observation Satellitaire des Forêts d'Afrique Centrale)
Données d'enquête	Données socio-économiques	<ul style="list-style-type: none"> - Base des données du Projet Climat-Eau-Migration-Conflit - Enquête Démographique et de Santé 2013-2014 (UNICEF, RDC)

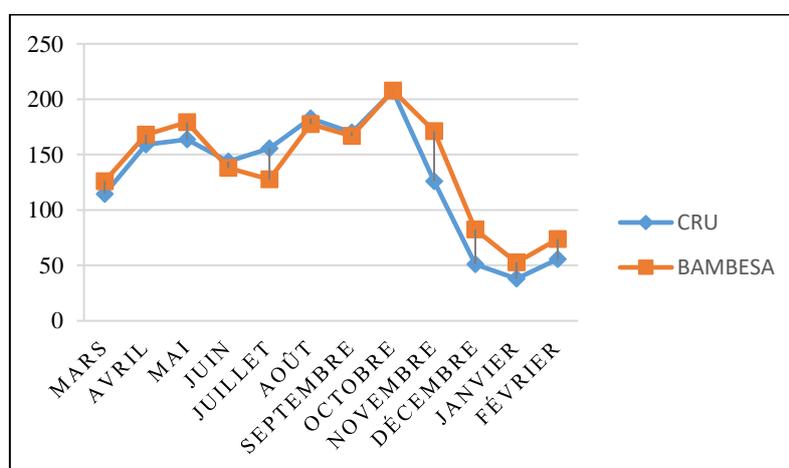


Figure 17. Corrélation entre les données de CRU et de la station météorologique de Bambesa

La corrélation entre les données des précipitations moyennes de la station de Bambesa (1960-2018) et les données de la même période des précipitations moyennes extraites à partir de 107 grilles de CRU-TS, correspondantes à la région d'étude a été réalisée par régression linéaire à l'aide du logiciel Statistix 10.0 afin d'évaluer le degré de fiabilité des données de CRU. Ces dernières CRU ont permis d'établir les tendances historiques et actuelles des fluctuations climatiques. La Figure 17 ci-dessus montre une même distribution des précipitations mensuelles entre les deux séries des données. La mesure statistique de la fiabilité (R^2) a montré qu'il existe une corrélation forte entre les deux séries des données soit 91,6%.

Pour les analyses des scénarios climatiques, une autre source de données a été ciblée en vue d'établir les tendances futures, il s'agit du WFDEI-Warch Forced Era Interim ([Weedon](#)

et al., 2018), qui présente une base des données de ré-analyse, cette source contient des séries chronologiques journalières de précipitations, de températures maximales et minimales, d'humidité relative, de radiation solaire ainsi que de vitesse du vent. Ces données ont été comparées avec celles de la même série chronologique de la station de Bambesa, obtenues auprès du CRREBaC (Centre de Recherche en Ressources en Eau du Bassin du Congo), cette comparaison a permis d'écarter des données aberrantes de cette station à une différence d'écart de 10%.

2.3. METHODES D'ANALYSE

2.3.1. Analyse des indices liés aux composantes de vulnérabilité

La méthodologie utilisée dans le cadre de cette étude consiste à analyser selon les approches spécifiques à la construction des indices liés aux trois composantes de vulnérabilité à savoir l'exposition, la sensibilité et la capacité d'adaptation.

Le Tableau 4 ci-dessous décrit de manière détaillée les différents des indices par composante utilisés dans le cadre de cette étude.

Tableau 4. Description et justification du choix des indices utilisés

Composante de vulnérabilité	Indices	Description	Source des données
Exposition : les indices d'exposition concernent essentiellement les paramètres climatiques qui influent sur la région d'étude.	Indice standardisé de précipitations (SPI)	SPI repose uniquement sur les données de précipitations, ce qui le rend très facile à calculer et à utiliser pour évaluer le degré de sécheresse. Il s'applique à tous les régimes climatiques et peut être comparé dans des climats très différents. La possibilité d'effectuer les calculs pour de courtes périodes dont les relevés sont incomplets est également appréciable pour les régions pour lesquelles on manque de données ou de jeux de données homogènes à long terme.	Unité de recherche climatique de l'Université d'East Anglia (Climatic Research Unit-Time-Series datasets, CRU-TS)
	Indice standardisé de précipitations et d'évapotranspirations (SPEI)	SPEI est un indice relativement récent et repose sur les mêmes bases que le SPI mais il ajoute la température, pour tenir compte de l'effet de celle-ci sur la progression de la sécheresse par un calcul élémentaire du bilan hydrique. Il comporte une échelle d'intensité pour calculer les valeurs positives et négatives, qui signalent les épisodes humides et secs. Le pas de temps peut aller de 1 à 48 mois, voire plus.	
	Indice climatique d'humidité (CMI)	L'indice CMI peut servir à la classification des climats de diverses régions, car le rapport entre les précipitations et les températures permet d'établir le régime climatique d'un secteur. On peut le calculer sur une base mensuelle pour déterminer le début d'une sécheresse, car il tient compte de l'incidence des températures en plus de celle des précipitations.	
Sensibilité : les indices de sensibilité comprennent les caractéristiques naturelles ou physiques du milieu d'étude	Indice d'accessibilité à l'eau (WAI)	L'accès à l'eau est une nécessité de base à de nombreuses activités liées aux efforts d'adaptation. L'indice exprime le temps de trajet moyen nécessaire pour se rendre au point d'eau amélioré le plus proche.	Enquête Démographique et de Santé 2013-2014 (UNICEF, RDC)
	Occupation du sol	L'indice se rapporte aux différentes utilisations du sol, les activités anthropiques ont une incidence sur les disponibilités des ressources en eau.	Carte thématique d'occupation de la région d'étude (OSFAC)
	Indice de végétation par différence normalisée (NDVI)	Le NDVI est un indice qui indique la masse de végétation présente dans une région, ainsi que son état de santé ou sa vigueur de croissance, il sert aussi à déceler et à suivre les sécheresses qui ont une incidence sur l'agriculture.	http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_browse.php
Capacité d'adaptation : les indices de capacité d'adaptation sont relatifs aux savoirs, aux technologies, aux capacités institutionnelles et	Part des ménages qui prennent en compte d'autres utilisateurs de ressources en eau	Les déficits en eau sont très souvent constatés par des utilisateurs en aval, ils sont donc la résultante de l'appropriation excessive par les utilisateurs en amont. L'indice évalue cette appropriation.	Base des données du Projet Climat-Eau-Migrations-Conflits
	Part des ménages qui stockent l'eau	Indice se rapportant au stockage des ressources en eau pour les besoins immédiats et ultérieurs. Il informe sur la dépendance à l'eau et la vulnérabilité par rapport aux prix de l'eau et la vulnérabilité en cas de conditions climatiques extrêmes.	Base des données du Projet Climat-Eau-Migrations-Conflits
	Part des ménages qui stockent la production	Indice agrégeant la production agricole et les produits alimentaires stockés. Il conduit à des hypothèses sur la dépendance alimentaire et la vulnérabilité par rapport aux prix du marché et la vulnérabilité en cas de conditions climatiques extrêmes.	Base des données du Projet Climat-Eau-Migrations-Conflits
	Pourcentage de ménages dirigés par des femmes	Les ménages dirigés par des femmes sont désavantagés à plusieurs niveaux (dépendance élevée, un capital ou des actifs et un accès aux ressources moindres, un passé marqué par des bouleversements, des revenus moins importants, une capacité de diversification et de mobilité moins importante).	Base des données du Projet Climat-Eau-Migrations-Conflits

aux ressources économiques et financières susceptibles de renforcer la capacité d'adaptation et de réduire la vulnérabilité.	Part des femmes qui détiennent les titres de propriété	Elle mesure de la proportion de titres fonciers délivrés et qui sont occupés par des femmes. Dans certains cas, il est plus difficile pour les femmes d'obtenir des titres fonciers ou d'en hériter.	Base des données du Projet Climat-Eau-Migrations-Conflits
	Proportion des femmes salariées du secteur non agricole	Proportion des travailleurs de genre féminin salariés du secteur non agricole (industrie et services) exprimée en pourcentage du nombre total de salariés dans ce même secteur. L'emploi salarié a souvent été la chasse gardée des hommes dans les pays moins développés, sauf dans l'agriculture.	Base des données du Projet Climat-Eau-Migrations-Conflits
	Part des ménages ayant connu un conflit armé ou non armé dans le domaine ou la propriété	Elle mesure la capacité d'une société à résoudre ses conflits en interne et sans pressions extérieures (politique, administrative, militaire). La capacité à résoudre les conflits en interne est une des principales raisons de l'existence de liens sociaux solides au sein des communautés et facilite d'autres formes de soutien.	Base des données du Projet Climat-Eau-Migrations-Conflits
	Personnes déplacées à l'intérieur du pays ou personnes migrantes venant d'un autre pays	Personnes devant quitter leurs villages sans franchir de frontières ou personnes ayant quitté leurs pays pour des raisons évidentes. Cet indice est utilisé comme un indicateur de vulnérabilité aux conflits dus aux migrants internes ou externes.	Base des données du Projet Climat-Eau-Migrations-Conflits
	Part des ménages qui n'ont pas connu une baisse de production	Il s'agit de la part des ménages ayant connu la baisse de production suite aux infestations et/ou au changement climatique. Cet indicateur sert de représenter la vulnérabilité alimentaire.	Base des données du Projet Climat-Eau-Migrations-Conflits
	Part des ménages qui accordent la valeur économique à l'eau	Il s'agit de la part des ménages qui considère l'eau comme une denrée rare, une ressource économique et qu'elle a un prix.	Base des données du Projet Climat-Eau-Migrations-Conflits
	Part des ménages qui utilisent les cultures et les races résilientes	Indice sur la capacité à planter des cultures plus résistantes. Pouvoir investir dans de nouveaux types de cultures est un atout important pour faire face à des changements environnementaux.	Base des données du Projet Climat-Eau-Migrations-Conflits
	Part des ménages qui utilisent les stratégies de mitigation structurelles ;	Indicateur sur la capacité à mettre en œuvre des initiatives communautaires pour faire face ou anticiper les effets du changement climatique.	Base des données du Projet Climat-Eau-Migrations-Conflits
	Part des ménages qui utilisent de sources alternatives d'approvisionnement en eau	Pourcentage de la population rurale ayant accès à une source aménagée d'eau potable (eau courante, robinets publics, sources protégées, collecte des eaux de pluie).	Base des données du Projet Climat-Eau-Migrations-Conflits
	Part des ménages qui pratiquent l'irrigation	Il s'agit d'indicateur sur la diffusion du savoir-faire et sur la sensibilisation aux techniques et aux problèmes d'irrigation. Il évalue en outre la dépendance à l'agriculture pluviale.	Base des données du Projet Climat-Eau-Migrations-Conflits

Source : World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP), 2013. Handbook of Drought Indicators and Indices ; GIZ, 2017. Guide de référence sur la vulnérabilité : annexes

2.3.1.1. Indices d'exposition

Construction des indices hydro-climatiques

L'approche méthodologique développée pour construire les indices hydro-climatiques a consisté à établir des tendances à long terme des indices hydro-climatiques sous étude à savoir l'Indice Standardisé de Précipitations (SPI), l'Indice climatique d'humidité (CMI) et l'Indice Standardisé de Précipitations et d'Evapotranspirations (SPEI) en vue de détecter les changements dans la distribution spatiale et temporelle du régime hydro-climatique, et de déterminer également la fréquence d'occurrence des périodes sèches et humides ainsi que leur intensité.

Concrètement, cette approche a permis de déterminer à l'échelle décennale des indices renseignant la durée, la fréquence et l'intensité des sécheresses et des inondations. En plus de la variabilité climatique décennale, les variabilités climatiques annuelles ont été établies essentiellement avec l'Indice Standardisé de Précipitations et d'Evapotranspirations qui est considéré comme un indice statistiquement robuste. L'évaluation de l'intensité des sécheresses et des inondations avait pour but de déterminer l'ampleur et la gravité des conséquences du déficit ou d'excès de précipitations et des débits des rivières. Elle a été essentiellement évaluée à l'aide des valeurs du SPEI.

Analyse des scénarios de changement climatique

Les projections du changement climatique basées sur le récent rapport du GIEC permettent d'établir un aperçu futur du régime climatique de la région d'étude. Cette projection est basée sur les résultats de onze modèles climatiques régionaux (RCM) issus de l'expérience coordonnée de réduction d'échelle effectuée par CORDEX-Coordinated Downscaling Experiment ([Giorgi et Gutowski, 2015](#)) sous deux voies de concentration représentatives à savoir les scénarios RCP 4.5-Scénarios d'émission modérées ou pessimistes et RCP 8.5-Scénarios d'émissions élevées ou optimistes. L'approche méthodologique utilisée pour l'analyse de ces scénarios est présentée de manière exhaustive par [Karam et al. \(2020\)](#) et se résume en trois phases ci-dessous.

- Première phase : les données mensuelles disponibles des précipitations et des températures des longues séries chronologiques sont passées au crible avant que ces dernières ne soient retenues et désagrégées temporellement en utilisant la méthode des fragments pour convertir ces séries chronologiques mensuelles en séries chronologiques journalières.
- Deuxième phase : les précipitations et les températures journalières simulées par le RCM-Regional Climate Models et sont réduites en utilisant la cartographie des quantiles, tandis que la vitesse du vent, la radiation solaire et l'humidité relative ont été projetées en utilisant la réduction de l'échelle par la méthode du plus proche voisin.
- Troisième phase : elle a consisté à élaborer les trois indices précités pour évaluer les résultats journaliers des périodes actuelle et future des données climatiques susmentionnées. Ces indices sont analysés en utilisant une période de référence et deux périodes futures pour prévoir les changements qui se produiront dans la région d'étude

dans un avenir proche. La référence est comprise entre 1986-2005, la période future 1 est comprise entre 2041-2070, et la période future 2 se situe entre 2071-2100. De manière singulière, les données journalières de la température, de l'humidité, de la vitesse du vent et de la radiation solaire ont été utilisées pour évaluer l'évapotranspiration actuelle et future, combinées aux données de précipitations, ont permis de générer les valeurs du SPEI.

Indice Standardisé de Précipitations (Standardized Precipitation Index, SPI)

L'indice Standardisé de Précipitations définit le degré de la sécheresse en différentes classes (Bergaoui et Alouini, 2001 ; Ardoïn-Bardin et al., 2003 ; Ardoïn-Bardin, 2004 ; Ali et Lebel, 2009 ; Lebel et Ali, 2009). Il a été créé par *Mckee et al. (1993)* et a été employé par de nombreux auteurs sur diverses régions du globe (WU et al., 2001 ; Giddings et al., 2005 ; Sönmez et al., 2005 ; Bodian, 2014). Il est calculé suivant cette formule :

$$SPI = \frac{X_i - X_m}{S_i}$$

- X_i représente le cumul de la pluie pour une année i ;
- X_m représente la moyenne des pluies annuelles observées pour une série donnée.
- S_i représente l'écart type des pluies annuelles observées pour une série donnée.

Les valeurs annuelles négatives indiquent une sécheresse par rapport à la période de référence choisie et les positives une situation humide. Le Tableau 5 présente les différentes classes de l'indice standardisé de précipitations.

Tableau 5. Classes de l'Indice Standardisé de Précipitations

Classes SPI	Degré de la sécheresse
$SPI > 2$	Humidité extrême
$1 < SPI < 2$	Humidité forte
$0 < SPI < 1$	Humidité modérée
$-1 < SPI < 0$	Sécheresse modérée
$-2 < SPI < -1$	Sécheresse forte
$SPI < -2$	Sécheresse extrême

Indice climatique d'humidité (Climatic Moisture Index, CMI)

L'indice climatique d'humidité a été utilisé par divers chercheurs (Willmott et Feddema, 1992 ; Vörösmarty et al., 2005) et représente le ratio de la pluie annuelle sur l'évapotranspiration potentielle annuelle. Il est strictement défini par les équations suivantes :

- Si les précipitations sont inférieures aux évapotranspirations :

$$CMI = \frac{P}{PET} - 1$$

→ Si les précipitations sont supérieures aux évapotranspirations :

$$CMI = 1 - \frac{PET}{P}$$

Le Tableau 6 présente les différentes classes du Climatic Moisture Index.

Tableau 6. Classes du Climatic Moisture Index

Classes CMI	Degré de la sécheresse
CMI>0	Humide
-0,6<CMI<0	Semi-humide
CMI<-0,6	Aride

Indice Standardisé de Précipitations et d'Évapotranspirations (Standardized Evapotranspiration and Precipitation Index, SPEI)

Le SPEI est calculé suivant la même méthode que le SPI, il est par conséquent également normalisé et peut être calculé à différentes échelles de temps. La différence fondamentale entre ces deux indicateurs est que le SPI est calculé uniquement à partir des précipitations, alors que le SPEI s'appuie sur la différence entre les précipitations (P) et l'évapotranspiration potentielle (ETP). Ensuite, à cette valeur cumulée de (P-ETP) sur n mois, est ajustée la loi log logistic à trois paramètres (Serrano 2010). Le Tableau 7 présente les différentes classes de l'indice standardisé d'évapotranspiration et de précipitations.

Tableau 7. Classes de l'indice standardisé d'évapotranspirations et de précipitations

Classes SPEI	Degré de la sécheresse
SPI>2,0	Humidité extrême
1,5<SPI<2,0	Humidité forte
1,0<SPI<1,5	Humidité modérée
-1,5<SPI<1,0	Sécheresse modérée
-2,0<SPI<-1,5	Sécheresse sévère
SPI<-2,0	Sécheresse extrême

2.3.1.2. Indices de sensibilité

Les trois indices de sensibilité identifiés dans cette étude, ne sont pas de même nature. Il s'agit des trois caractéristiques du milieu d'étude à savoir l'accessibilité à l'eau, l'occupation du sol et la vigueur de la végétation.

Indice d'accessibilité à l'eau (Water Accessibility Index, WAI)

L'indice d'accessibilité à l'eau est lié aux ressources en eau accessibles dans le milieu d'étude, la distance que les usagers potentiels des ressources en eau doivent parcourir pour

atteindre la rivière ou le point d'eau le plus proche. Les statistiques de la région sur l'accessibilité à l'eau ont été obtenues à partir de l'Enquête Démographique et de Santé 2013-2014, qui est une enquête nationale de l'UNICEF-RDC récente (2017) donnant des chiffres sur l'accès à l'eau, l'assainissement et l'hygiène en RDC.

Indice d'occupation du sol

L'indice d'occupation du sol a été évalué en fonction de la qualité de la couverture du sol, c'est-à-dire le ratio des surfaces non couvertes et couvertes par la forêt. La perte des surfaces forestières illustre le niveau de la dégradation forestière et de l'anthropisation du milieu naturel. La carte d'occupation du sol de la région d'étude, obtenue à l'OSFAC, a été utilisée pour déterminer cet indice en superposant les provinces et les bassins versants délimités. La Figure 18 présente l'occupation du sol dans la région d'étude.

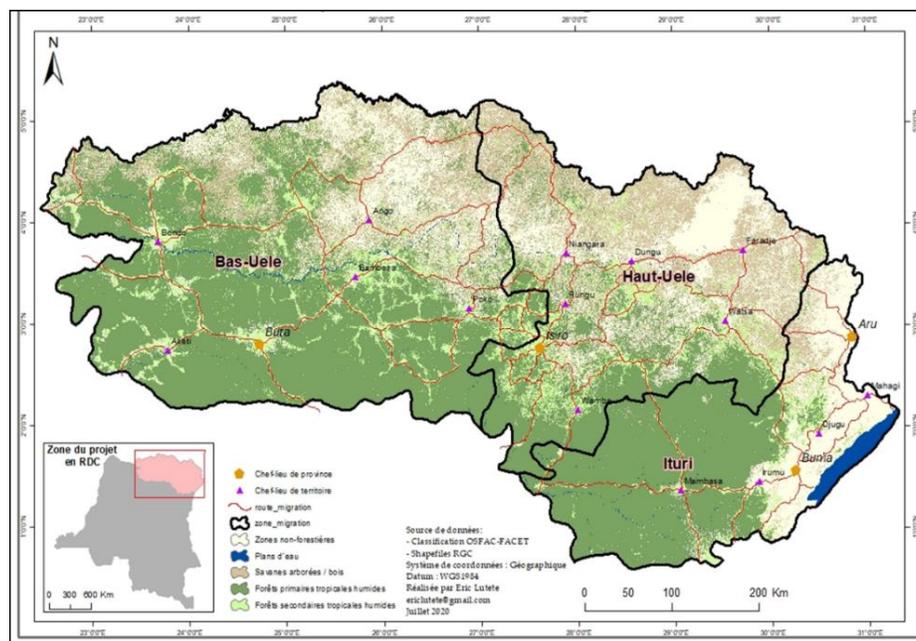


Figure 18. Occupation du sol dans la région d'étude

Indice de végétation par différence normalisée (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)

Le NDVI est une mesure du bilan entre l'énergie reçue et l'énergie émise par les objets sur la Terre. Lorsqu'il est appliqué à des communautés végétales, cet indice établit une valeur mesurant l'intensité de vert d'une zone donnée, c'est-à-dire indiquant la masse de végétation présente dans celle-ci, ainsi que son état de santé ou sa vigueur de croissance. Le NDVI est un indice sans dimension dont sa valeur est comprise entre -1 et +1.

Dans la pratique, les valeurs situées en dessous de 0,1 correspondent aux étendues d'eau et aux sols nus, tandis que les valeurs plus élevées indiquent une forte activité de photosynthèse, propre aux terres arbustives, aux forêts tempérées, aux forêts humides et aux terres agricoles (Meneses-Tovar, 2012).

2.3.1.3. Indices de capacité d'adaptation

Une mission de collecte et de production des données a été organisée dans le cadre du Projet Climat-Eau-Migrations-Conflits en 2019 dans la partie Nord-Est de la RD Congo notamment les provinces du Haut-Uélé (bassin de l'Uélé), du Bas-Uélé (bassin de l'Itimbiri) et de l'Ituri (Bassin de l'Aruwimi). Cette mission avait pour but de collecter les données quantitatives et qualitatives relatives aux impacts socioéconomiques et environnementaux des mouvements migratoires, aux impacts du changement climatique sur les ressources en eau, au genre et sexospécificité et aux différents usages de l'eau. Les données quantitatives d'intérêt ont permis de mettre en exergue les indices liés à la capacité d'adaptation des communautés au nexus Climat-Eau-Migrations-Conflits.

Les enquêtes ont été organisées en grappe, trois grappes ont été identifiées à savoir les milieux urbain, péri-urbain et rural. L'unité statistique lors des enquêtes quantitatives a été le ménage, et le tirage de l'échantillon s'est fait à trois degrés. En milieu urbain et périurbain, on a considéré les communes où ont été tirés au hasard les quartiers au premier degré et les avenues au deuxième degré. En milieu rural, les villages des différentes chefferies investiguées ont été considérés. Au troisième degré, 30 ménages par grappe étaient tirés après dénombrement systématique des ménages à l'aide d'une fiche de dénombrement des ménages. Par ménage, un ménage est constitué d'un ensemble de personnes apparentées ou non, vivant dans une même unité d'habitation (ou sous le même toit), prenant le plus souvent leur repas en commun et subvenant ensemble à leurs besoins essentiels et reconnaissant généralement en son sein l'autorité d'une seule personne qui est appelée chef de ménage. Sans discrimination, toutes les personnes des ménages ciblés dans les trois grappes (bassins versants) ont été éligibles dont l'âge minimal est d'au moins 10 ans révolus.

Le tirage de l'échantillon pour la collecte des données quantitatives au niveau des ménages de chacune des provinces s'est fait à trois niveaux :

- Au niveau de la province du Haut-Uélé, l'enquête s'est faite dans la Ville d'Isiro, chef-lieu de la province ; la cité de Niangara, chef-lieu du Territoire de Niangara et la chefferie de Manziga-Nambia.
- Pour la province du Bas-Uélé, Il s'agit de la ville de Buta, chef-lieu de la province (urbain) ; la cité de Bondo, chef-lieu du territoire (Périurbain) et le village Baye, chef-lieu du groupement Diadia de la chefferie Gaya (village).
- Quant à la province de l'Ituri, en dehors de la ville de Bunia, chef-lieu de la province ; les activités de collecte des données ont été organisées dans deux territoires, Mambasa et Aru. Pour le territoire de Mambasa, au niveau de la cité de Mambasa, chef-lieu du Territoire et au niveau de la chefferie d'Epulu. Pour le territoire d'Aru, la mission de collecte des données s'est focalisée sur les villages Ndango et Ngabo de la chefferie Ndo du groupement Biringi.

Le Tableau 8 présente l'échantillonnage des sites d'investigation et la Figure 19 présente le plan de déploiement dans les différents sites d'investigation.

Tableau 8. Echantillonnage des sites d'investigation

Bassin/Province	Grappe	Nom de grappe	Nombre de ménage	Taille de l'échantillon	Pas de sondage
Itimbiri/Bas Uélé	Urbain (Ville de Buta)	Rubi	320	30	10
		Bagbe	320	30	10
		Alongo	320	30	10
	Péri-urbain (Cité de Bondo)	Makambuwa	320	30	10
	Rural (Chefferie Gaya)	Localité Baye	320	30	10
Uélé/Haut Uélé	Urbain (Ville Isiro)	Tely	328	30	10
		Kongoli	324	30	10
		Edindale	322	30	10
	Péri-urbain (Cité de Niangara)	Ligunza	300	30	10
	Rural (Chefferie Manziga)	Localité Nambia	300	30	10
Aruwimi/Ituri	Urbain (Ville de Bunia)	Simbilyabo	360	30	12
		Muzipela	360	30	12
		Lumumba	360	30	12
	Péri-urbain (Cité d'Aru)	Cité d'Aru	300	30	10
	Rural (Secteur Ndo)	Localité Epulu	300	30	10

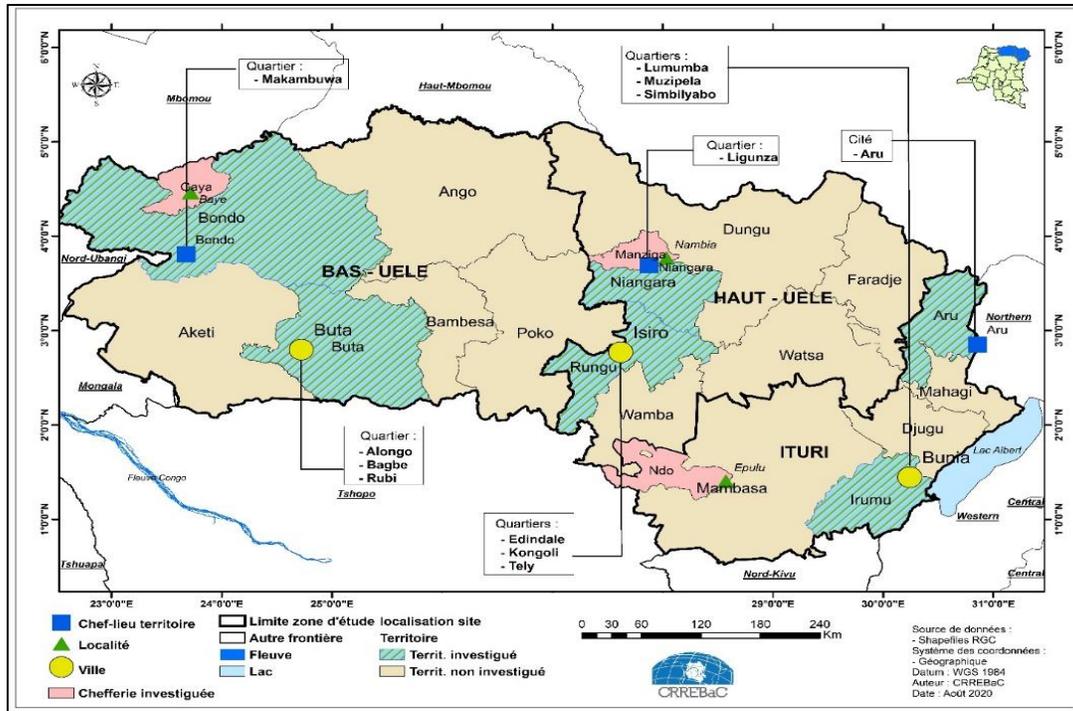


Figure 19. Plan de déploiement dans les différents sites d'investigation

Les données issues des enquêtes quantitatives ont été codifiées à l'aide du logiciel EPIDATA 3.0 et analysées statistiquement pour établir les analyses fréquentielles uni-variée sur certaines variables d'intérêt à l'aide du logiciel SPSS (Statistical Package for Social Science).

2.3.2. Développement de l'indice agrégé de vulnérabilité

L'approche méthodologique utilisée pour développer l'indice agrégé de vulnérabilité a été définie dans le quatrième rapport du GIEC (GIEC, 2007), est une approche basée sur l'agrégation des indices, elle consiste à normaliser les données et à agréger les indices individuels de chaque composante. La Figure 20 ci-dessous présente le cadre conceptuel du développement de l'indice agrégé de vulnérabilité due au nexus Climat-Eau-Migrations-Conflits.

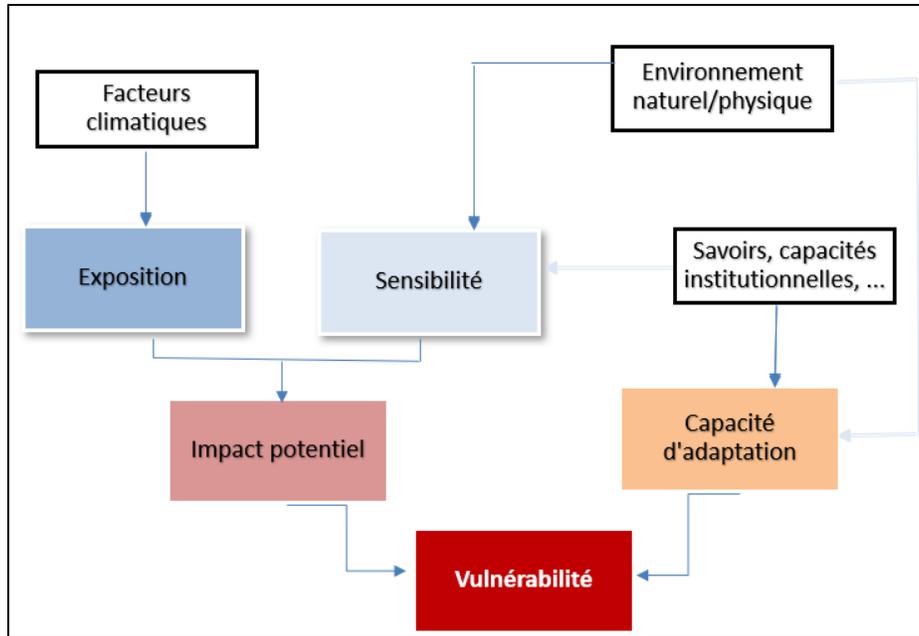


Figure 20. Cadre conceptuel du développement de l'indice agrégé de vulnérabilité

2.3.2.1. Normalisation des indices

Les indices de vulnérabilité calculés doivent être normalisés avant leur agrégation, la normalisation est à la transformation des valeurs d'indices évaluées sur des échelles différentes et à l'aide d'unités de mesures différentes en valeurs sans unité sur une échelle commune (OCDE, 2008). La normalisation consiste à attribuer un sens aux chiffres en évaluant à partir de quelle valeur un indice devient critique ; « 0 » est définie comme « situation optimale, aucune amélioration n'est nécessaire ou possible » et « 1 » comme « situation critique, le système ne fonctionne plus ». Un score bas correspond à une valeur « faible » et un score élevé à une valeur « forte » en termes de vulnérabilité. La méthode minimum-maximum a été utilisée pour normaliser les indices, selon l'équation suivante :

$$X_i \text{ 0 à 1} = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$$

- X_i 0 à 1 : Valeur normalisée à l'intérieur du champ de 0 à 1
- X_i : Valeur de la donnée individuelle à normaliser
- X_{\min} : Valeur la plus faible de l'indice
- X_{\max} : Valeur la plus élevée de l'indice

2.3.2.2. Agrégation des indices

L'agrégation est employée pour combiner les informations des différents indices en un indice composite qui représente la vulnérabilité sous la forme d'une composante unique. La méthode d'agrégation arithmétique pondérée est recommandée pour agréger les indices, c'est une méthode d'agrégation courante, simple et transparente. L'agrégation des indices se fait en trois étapes :

- Agrégation des indices d'une même composante ;
- Agrégation de l'exposition et de la sensibilité en impact potentiel ;
- Agrégation de l'impact potentiel et la capacité d'adaptation vers un indice de vulnérabilité composite.

Agrégation des indices d'une même composante

Pour calculer l'indice représentatif (I_r) d'une composante de la vulnérabilité, les indices individuels sont multipliés par leurs coefficients de pondération, ensuite additionnés, puis divisés par la somme de l'ensemble de leurs valeurs. Pour cette première agrégation, nous partons de l'hypothèse selon laquelle les différents facteurs (indices) contribuent de la même manière à l'indice représentatif de la composante de vulnérabilité considérée. La formule ci-dessous résume cette méthode.

$$I_r = \frac{I_1 * C_1 + I_2 * C_2 + \dots + I_n * C_n}{\sum C}$$

- I_r : Indice représentatif d'une composante de la vulnérabilité
- I : Indice individuel d'une composante de la vulnérabilité
- C : Coefficient de pondération attribué à l'indice
- n : nième indice ou coefficient

Agrégation de l'exposition et de la sensibilité en impact potentiel

Après avoir calculé l'indice représentatif deux composantes de la vulnérabilité, l'exposition et la sensibilité, ces deux composantes doivent être combinées pour constituer la composante subsidiaire de la vulnérabilité appelée "impact potentiel". La méthode d'agrégation arithmétique pondérée est encore appliquée pour calculer l'indice composite d'impact potentiel. Pour cette deuxième agrégation, nous considérons que les indices d'exposition ont un poids plus important c'est-à-dire une grande influence que les indices de la sensibilité sur la composante de l'impact potentiel soit $\frac{3}{4}$ pour l'exposition et $\frac{1}{4}$ (Feindouno et al., 2020). La formule est la suivante :

$$IP = \frac{EX * C_{ex} + SE * C_{se}}{C_{ex} + C_{se}}$$

- IP : Indice composite de l'impact potentiel
- ex : Exposition
- se : Sensibilité
- C : Coefficient de pondération attribué à la composante

Agrégation de l'impact potentiel et de la capacité d'adaptation vers un indice agrégé de vulnérabilité

La dernière étape consiste à intégrer l'indice composite d'impact potentiel avec la capacité d'adaptation, de façon à aboutir à un indice composite de la vulnérabilité du système étudié. La méthode d'agrégation arithmétique pondérée est à nouveau appliquée. Pour cette dernière agrégation, nous partons également de l'hypothèse selon laquelle le risque climatique ou l'impact potentiel contribue plus à la vulnérabilité globale soit $\frac{3}{4}$ que la composante capacité d'adaptation $\frac{1}{4}$ (Feindouno et al., 2020). La formule est présentée ci-dessous :

$$\text{IAV} = \frac{IP * CIP + CA * CCA}{CIP + CCA}$$

- IAV : Indice Agrégé de la vulnérabilité
- IP : Indice représentatif d'impact potentiel
- CA : Indice représentatif de la capacité d'adaptation
- C : Coefficient de pondération attribué aux composantes de vulnérabilité

Chapitre 3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. RESULTATS

3.1.1. Résultats relatifs aux indices des composantes de vulnérabilité

3.1.1.1. Indices d'exposition

Séquences de la variabilité climatique

Variabilité climatique décennale avec l'Indice Standardisé de Précipitations

La Figure ci-après présente les valeurs décennales de l'indice standardisé des précipitations (SPI) durant la période allant de 1980-2018.

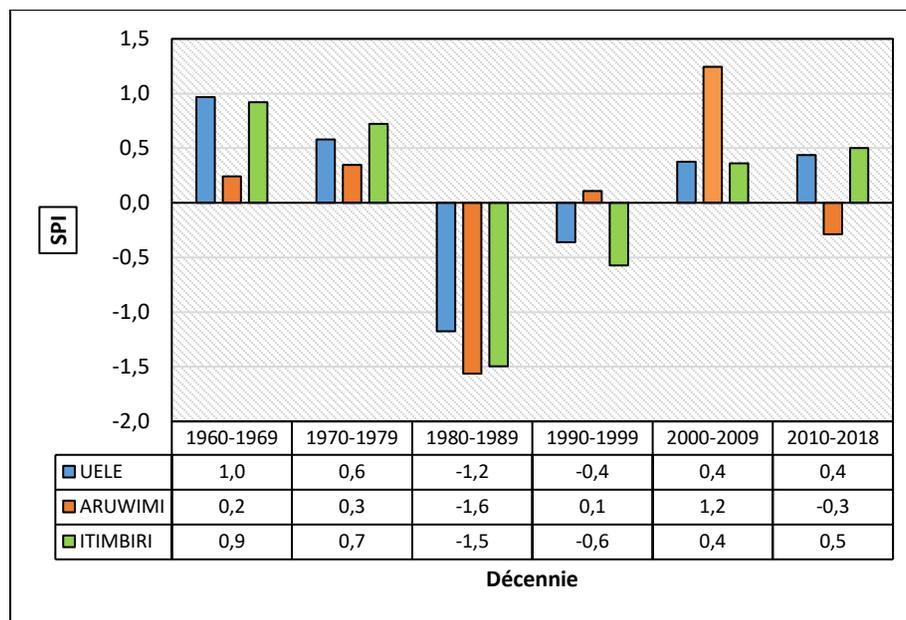


Figure 21. Valeurs décennales de l'indice standardisé des précipitations (SPI) durant la période allant de 1980-2018

Les résultats obtenus sur la variabilité climatique décennale avec l'Indice Standardisé de Précipitations durant la période allant de 1960 à 2018 ont montré ce qui suit :

- Les valeurs de SPI sur les trois bassins versants pendant les deux premières décennies d'étude soit les décennies 1960-1969 et 1970-1979 sont positives et caractérisées d'une humidité modérée et elles sont de ce fait classées dans la fourchette de 0 à 1 suivant l'échelle du degré de sécheresse de SPI.
- Les valeurs de SPI des décennies médianes soit 1980-1989 et 1990-1999 sont de manière générale négatives, à l'exception du bassin de l'Aruwimi qui a donné une valeur de SPI positive durant la décennie 1990-1999, la décennie 1980-1989 est caractérisée d'une sécheresse forte et la décennie 1990-1999 est caractérisée d'une sécheresse modérée pour les bassins de l'Uélé et de l'Itimbiri.

- Les deux dernières décennies (2000-2009 et 2010-2018) pour les bassins de l'Uélé et de l'Itimbiri sont caractérisées par une humidité modérée, par contre le bassin de l'Aruwimi est caractérisé d'une humidité forte pour la décennie 2000-2009 et subit une chute contrairement aux autres bassins lors de la décennie 2010-2018 où il est caractérisé par une sécheresse modérée.

Variabilité climatique décennale de l'Indice climatique d'humidité

La Figure 22 présente l'évolution décennale de l'indice climatique d'humidité des six dernières décennies soit durant la période allant de 1960 à 2018.

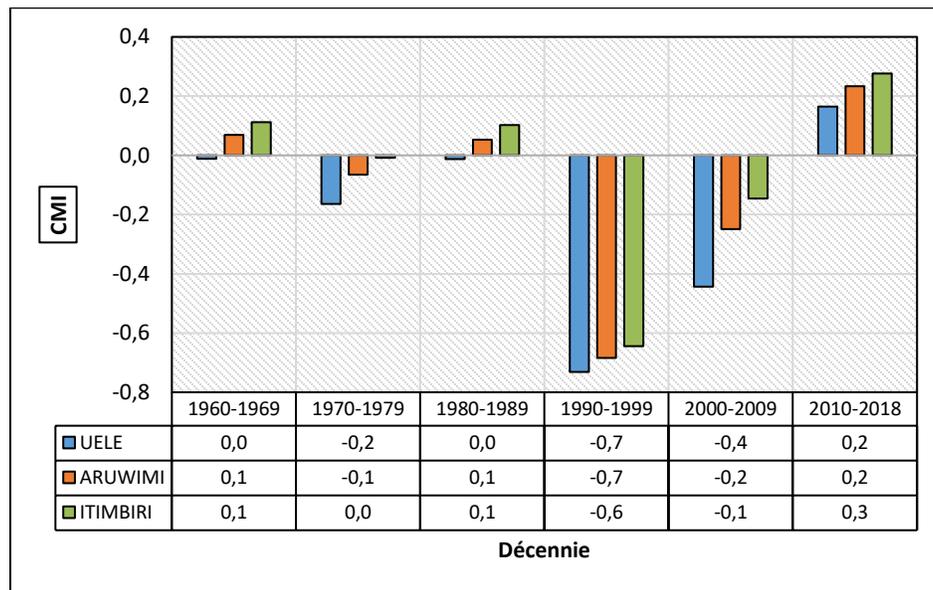


Figure 22. Valeurs décennales du Climatic Moisture Index (CMI) durant la période allant de 1960-2019 dans la région d'étude

La Figure 22 sur la variabilité climatique décennale de la CMI au cours des six dernières décennies, de 1960 à 2018, montre que les conditions arides pour les trois bassins versants sont identifiées dans la décennie 1990-1999, et que les conditions semi-arides sont représentées dans deux décennies, 1970-79 et 2010-2019. Il se dégage également une hiérarchisation de cet indice (CMI) pour les trois bassins versants pendant toute la période d'étude (CMI Uélé < CMI Aruwimi < CMI Itimbiri). A la lumière de ces résultats, le CMI présente la région d'étude comme une région semi-aride.

Variabilité climatique décennale de l'Indice Standardisé d'Evapotranspirations et de Précipitations 12 mois (SPEI 12 mois)

La Figure 23 présente l'évolution décennale de SPEI des quatre dernières décennies soit durant la période allant de 1980 à 2018.

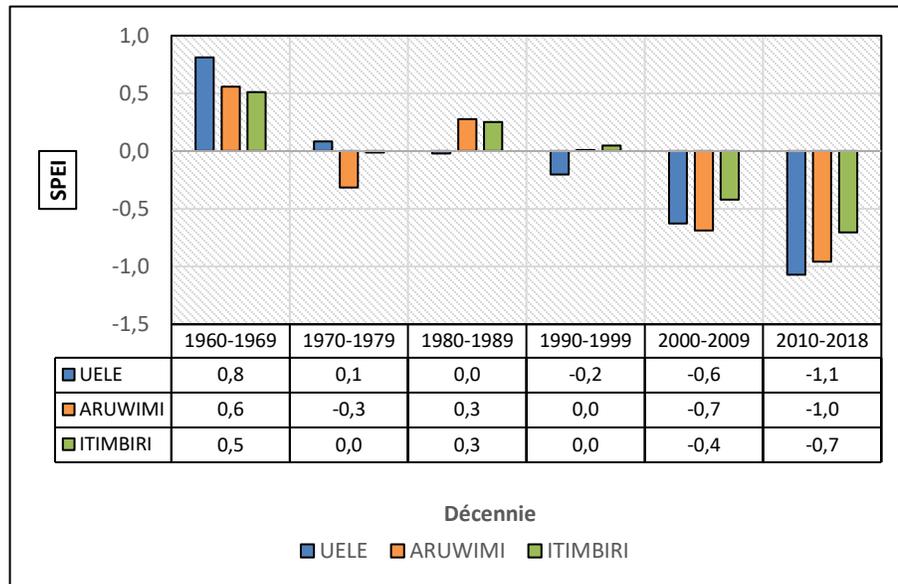


Figure 23. Valeurs décennales de SPEI durant la période allant du 1980 au 2019

Il résulte de la Figure 23 ce qui suit :

- Les valeurs de SPEI pendant les décennies 1960-1969, 1970-1979, 1980-1989 et 1990-1999 sont de manière générale positives et caractérisent à des degrés variés par bassin versant une humidité modérée, exceptés le bassin de l’Aruwimi qui, pendant la deuxième décennie et le bassin de l’Uélé qui, pendant la quatrième décennie, sont caractérisés par une sécheresse modérée.
- Les deux dernières décennies soit 2000-2009 et 2010-2018 sont caractérisées de manière générale par une sécheresse allant du modéré au fort pour les trois bassins versants.

Evolution annuelle du SPEI 12 mois

La Figure 24 (a, b et c) présente respectivement l’évolution annuelle du SPEI 12 mois durant la période allant du Janvier 1960 au Décembre 2018 dans les bassins de l’Uélé, de l’Aruwimi et de l’Itimbiri. Cette figure montre des fluctuations annuelles du SPEI sont caractérisées d’une grande irrégularité et tendent vers une régression pour les trois bassins d’étude. Les indices indiquant l’humidité modérée sont plus retrouvés sur le bassin de l’Aruwimi et les indices indiquant la sécheresse modérée sont plus identifiés dans les bassins de l’Uélé et de l’Itimbiri.

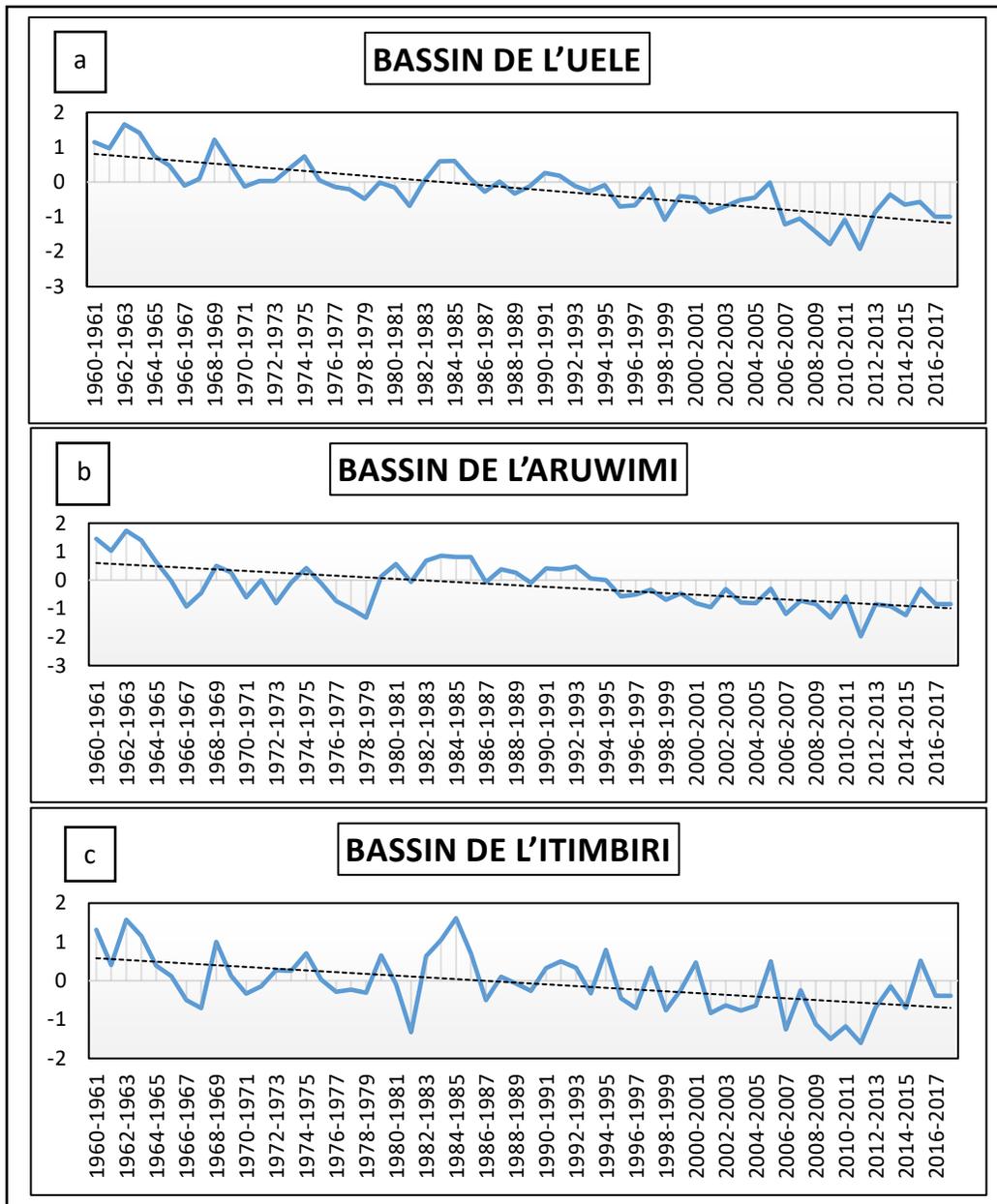


Figure 24. Variabilité climatique annuelle du SPEI 12 mois durant la période allant de 1960 à 2018 des bassins versants sous étude (Uélé, Aruwimi et Itimbiri)

Il résulte de la Figure 24 (a, b et c) que les fluctuations annuelles du SPEI sont caractérisées d'une grande irrégularité et tendent vers une régression pour les trois bassins d'étude. Les indices indiquant l'humidité modérée sont plus retrouvés sur le bassin de l'Aruwimi et les indices indiquant la sécheresse modérée sont plus identifiés dans les deux autres bassins.

Evolution saisonnière du SPEI 12 mois

La Figure 25 (a, b et c) présente respectivement la variabilité climatique saisonnière du SPEI 12 mois durant la période allant du Janvier 1960 au Décembre 2018 dans les bassins de l'Uélé, de l'Aruwimi et de l'Itimbiri.

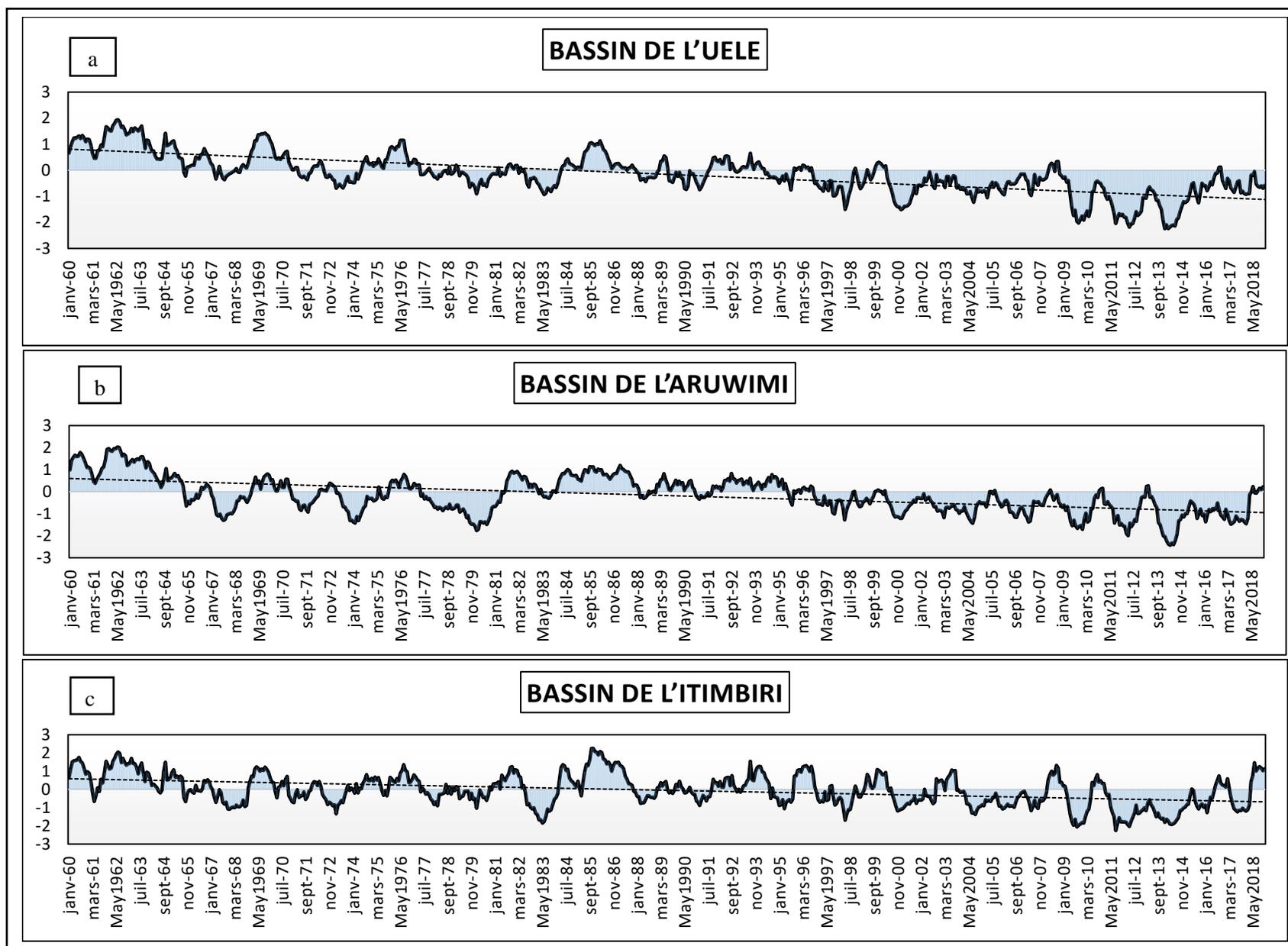


Figure 25. Variabilité climatique saisonnière du SPEI 12 mois durant la période allant de 1960 à 2018 des bassins versants sous étude (Uélé, Aruwimi et Itimbiri)

Il ressort de la Figure 25 (a, b et c) que l'évolution saisonnière du SPEI est irrégulière et a une tendance régressive pour les trois bassins d'étude avec une légère accentuation pour le bassin de l'Uélé. A cette échelle de temps de 12 mois, les indices SPEI présentent la sécheresse hydrologique car ils fournissent une représentation des régimes de précipitations à longue échéance, qui sont associés au débit des cours d'eau, au niveau des réservoirs et au niveau des eaux souterraines à long terme.

Intensité de sécheresse avec le SPEI

Intensité de sécheresse annuelle avec le SPEI

La Figure 30 présente les différentes classes de sécheresse identifiées dans les trois bassins d'étude durant la période allant de la décennie 1960-1969 à la décennie 2010-2018.

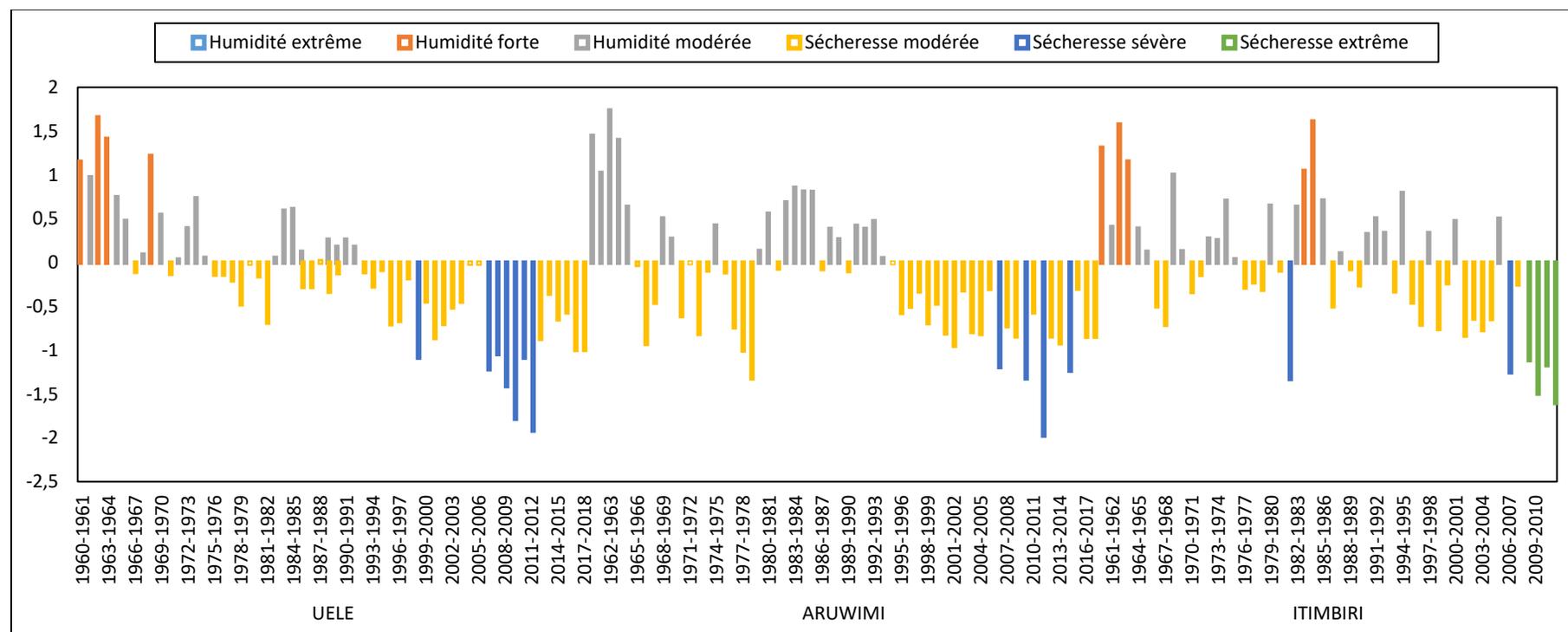


Figure 26. Classification de la sécheresse annuelle à l'aide du SPEI 12 mois durant la période allant du 1960 au 2018

Il résulte de la Figure 26 que quatre classes caractérisent le degré de sécheresse pour les trois bassins d'étude durant la période allant de 1960 à 2018, il s'agit des classes de l'humidité forte, de l'humidité modérée, de la sécheresse modérée et de la sécheresse sévère, les conditions extrêmes notamment l'humidité et la sécheresse extrêmes n'ont pas été observées dans la région d'étude.

Intensité de sécheresse décennale avec le SPEI

La Figure 27 présente les différentes classes de sécheresse identifiées dans les trois bassins d'étude durant la période allant de la décennie 1960-1969 à la décennie 2010-2018.

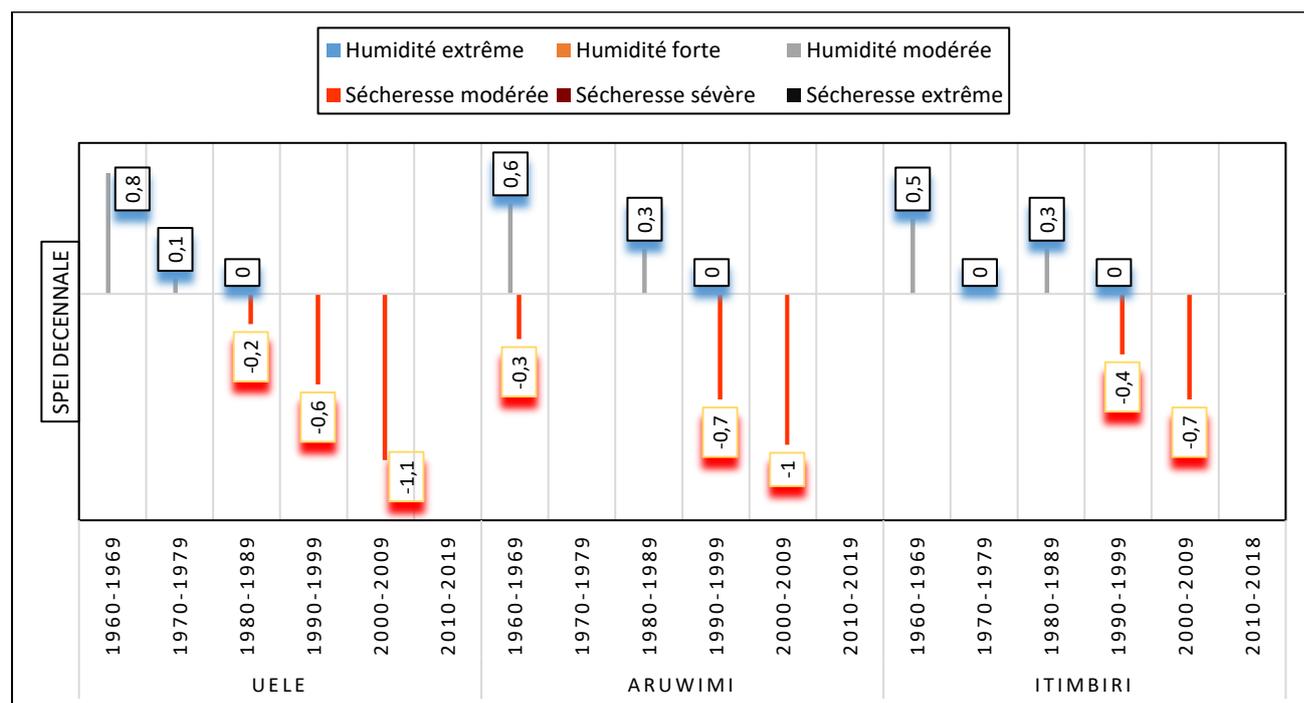


Figure 27. Classification de la sécheresse décennale à l'aide du SPEI 12 mois durant la période allant du 1960 au 2018

Du point de vue de la classification de sécheresse, il ressort de la Figure 31 que deux classes caractérisent le degré de sécheresse pour les trois bassins d'étude, durant la période allant de la décennie 1960-1969 à la décennie 2010-2018, il s'agit des classes de l'humidité modérée et de la sécheresse modérée.

Projections futures des indices hydro-climatiques

Indice Standardisé de Précipitations

Les Figures 28 et 29 présentent respectivement la projection future du régime climatique (périodes sèche et humide) avec l'indice SPI ainsi que fréquences relatives des intensités de sécheresse ou les classes du SPI pour la période de référence et pour les deux périodes futures sous RCP4.5 et celles sous RCP 8.5. De cette Figure, il en découle deux périodes sèches d'après les scénarios pessimistes et une période soit la période 1 d'après les scénarios optimistes.

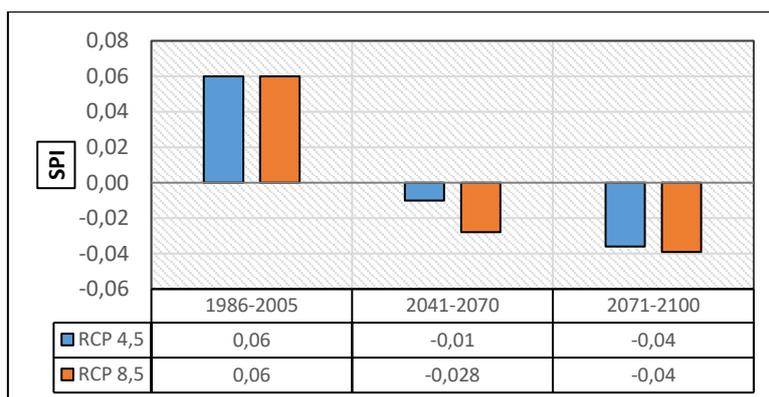


Figure 28. Scénario du régime climatique (périodes sèche et humide) avec l'indice SPI à la station de Bambesa sous RCP 4.5 et RCP 8.5

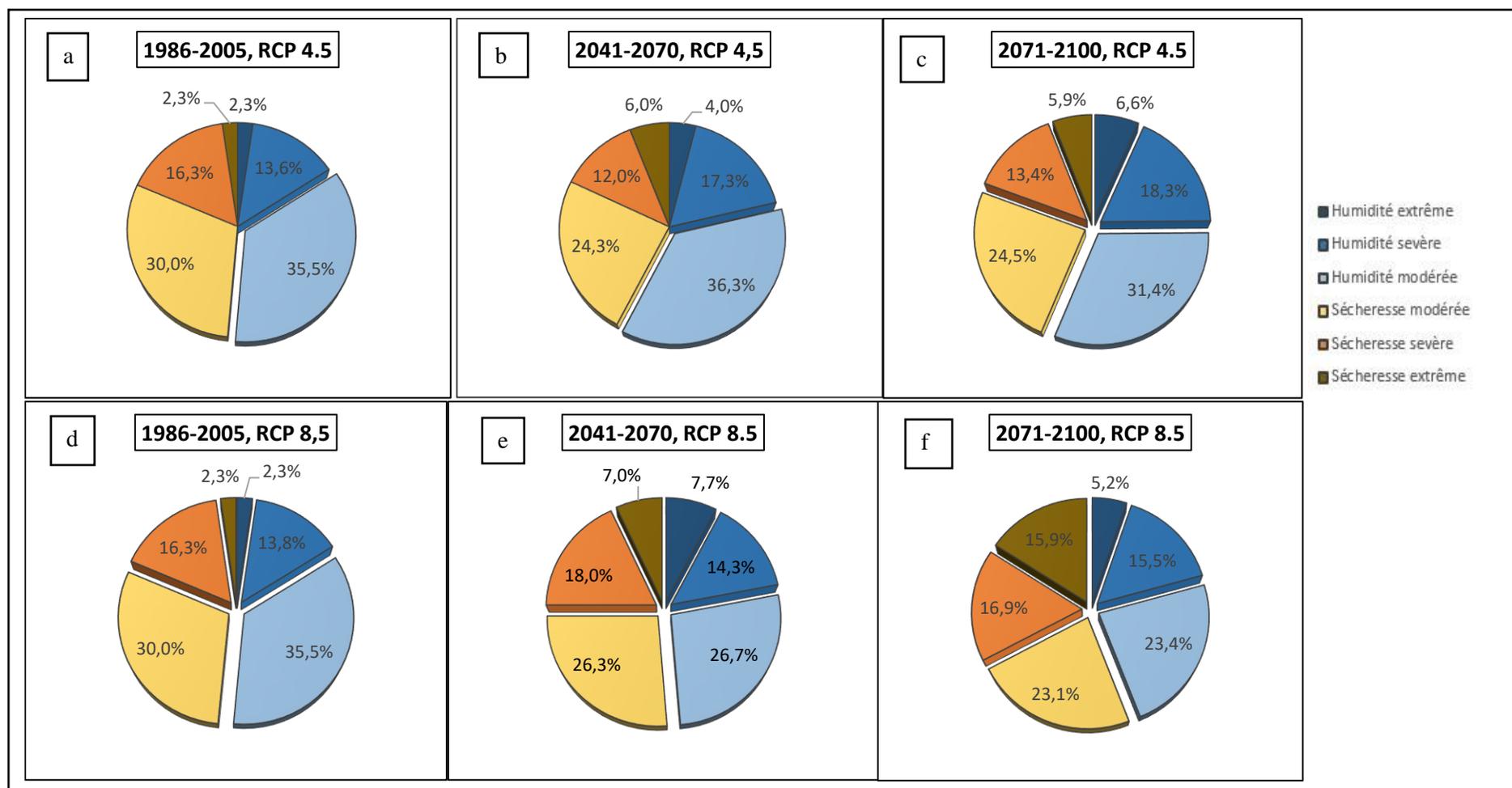


Figure 29. Fréquences relatives des intensités de sécheresse ou les classes du SPI pour la période de référence et pour les trois périodes futures sous RCP 4.5 et RCP 8.5

La Figure 29 (a, b, c, d et e) montre que la fréquence de sécheresses et d'humidités augmente considérablement au fil du temps. Avec les scénarios pessimistes RCP 4.5, de la période de référence à la période 1, la fréquence des sécheresses extrêmes augmente de 3,7%, pour chuter ensuite sensiblement à la période 2 soit une diminution de 0,1%. Simultanément, la fréquence de l'humidité extrême augmente de la période de référence à la période 1 soit une augmentation de 1,7%, elle augmente enfin à 1,6% à la période 2.

La tendance est similaire avec les scénarios optimistes RCP 8.5 où les fréquences de sécheresses et d'humidités extrêmes augmentent grièvement, la fréquence de sécheresses est multipliée pratiquement par 2 de la période de référence à la période 1, elle s'amplifie encore de la période 2 soit une forte augmentation de 8,9 %. Les fluctuations des fréquences sont aussi observées avec les autres classes du SPI.

Indice climatique d'humidité

Les Figures 30 et 31 (a, b, c, d et e) présentent respectivement la projection future du régime climatique (périodes sèche et humide) avec l'indice CMI, les fréquences relatives des intensités de sécheresse ou les classes du SPI pour la période de référence et pour les deux périodes futures sous RCP 4.5 et celles sous RCP 8.5.

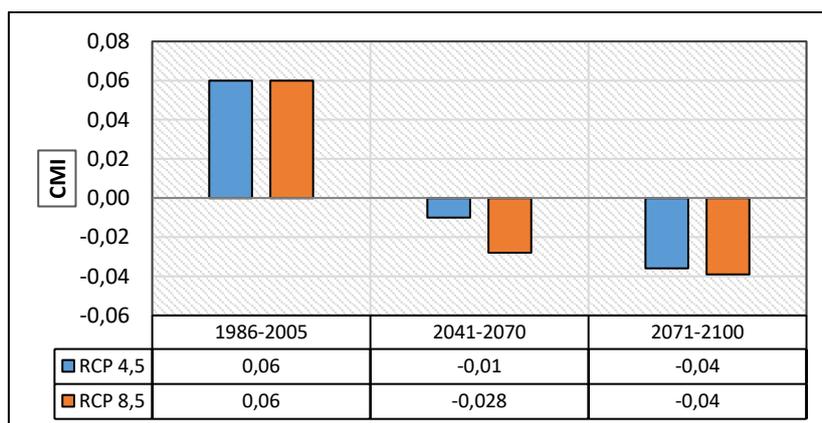


Figure 30. Scénario du régime climatique (périodes sèche et humide) avec l'indice CMI à la station de Bambesa sous RCP 4.5 et RCP 8.5

Il ressort de la Figure 30 que dans les deux scénarios, les conditions semi-arides allant des faibles à des degrés élevés vont prévaloir de la période de référence à la période 2 où elles vont tendre vers des conditions d'aridité.

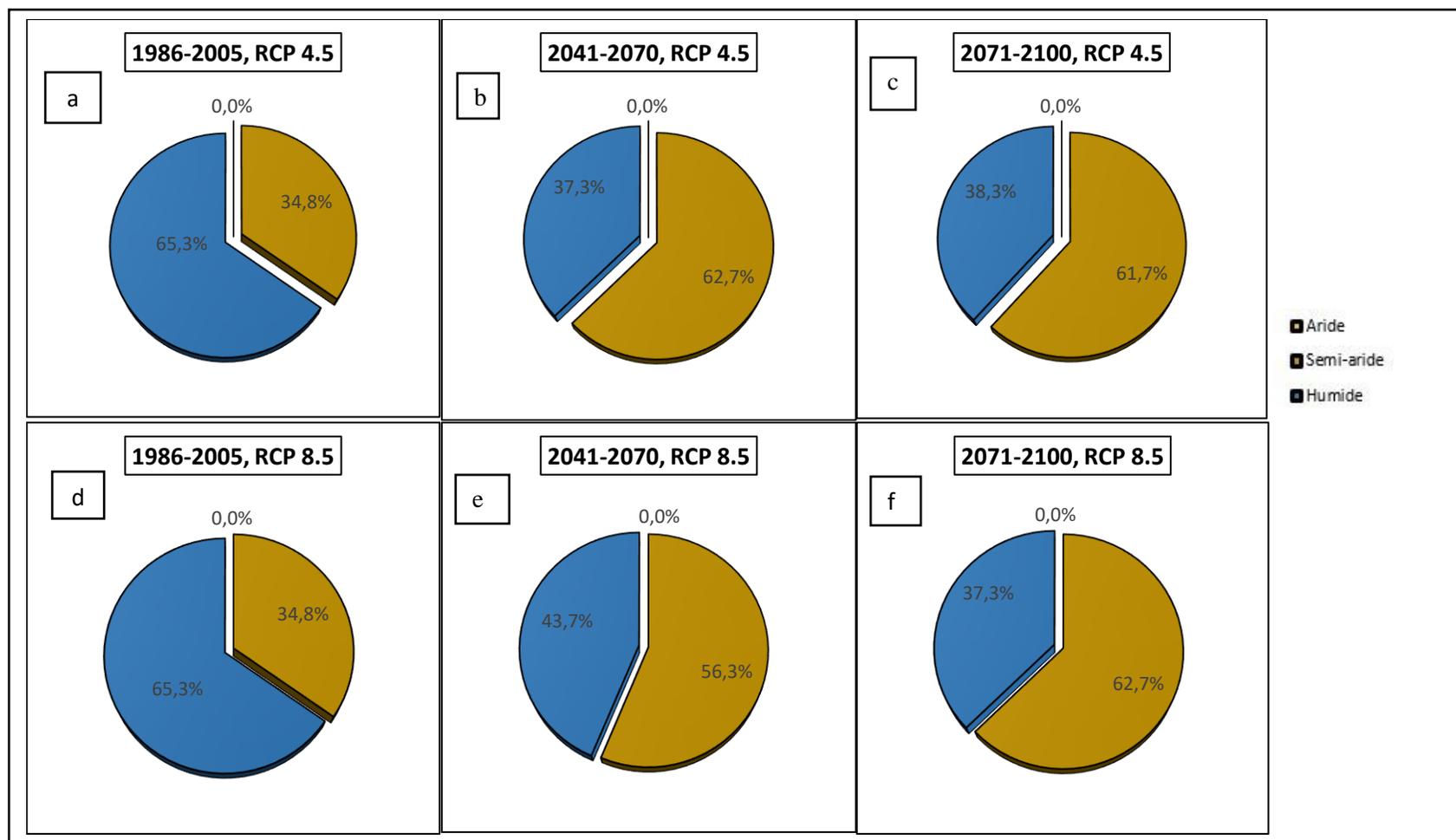


Figure 31. Fréquences relatives des intensités de sécheresse ou les classes du CMI pour la période de référence et pour les trois périodes futures sous RCP 4.5 et RCP 8.5

La Figure 31 montre que la fréquence de sécheresses et d'humidités extrêmes varie sensiblement, en effet, les conditions d'aridité augmentent avec la diminution des conditions d'humidité. Avec les scénarios pessimistes et optimistes de la période de référence à la période 2, la fréquence de conditions d'aridité augmentent et celle des conditions d'humidité diminuent.

Indice Standardisé d'Evapotranspiration et de Précipitations

Les Figures 32 et 33 présentent respectivement la projection future du régime climatique (périodes sèche et humide) avec l'indice SPEI, les fréquences relatives des intensités de sécheresse ou les classes du SPI pour la période de référence et pour les deux périodes futures sous RCP 4.5 et RCP 8.5.

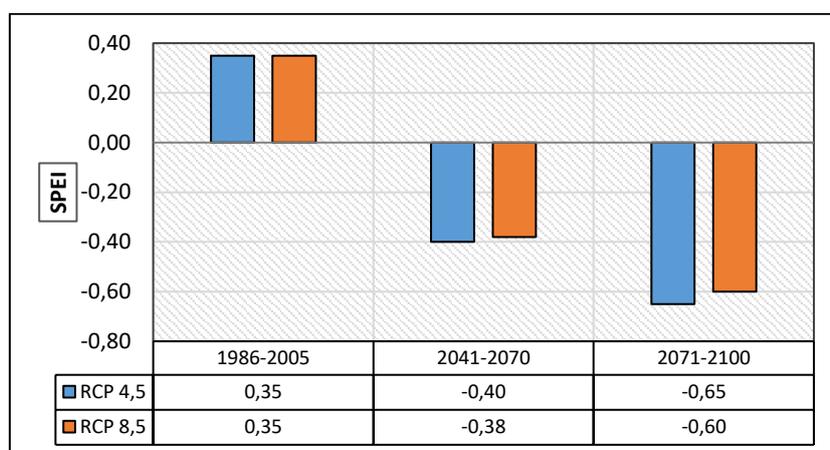


Figure 32. Scénario du régime climatique (périodes sèche et humide) avec l'indice SPEI à la station de Bambesa sous RCP 4.5 et RCP 8.5

La Figure 32 montre une tendance quasi-similaire à la variabilité climatique décennale du SPEI décrite ci-dessus, on note, sur la base deux scénarios, une période humide soit la période de référence et les deux autres périodes sont des périodes caractérisées par des sécheresses des faibles à fortes.

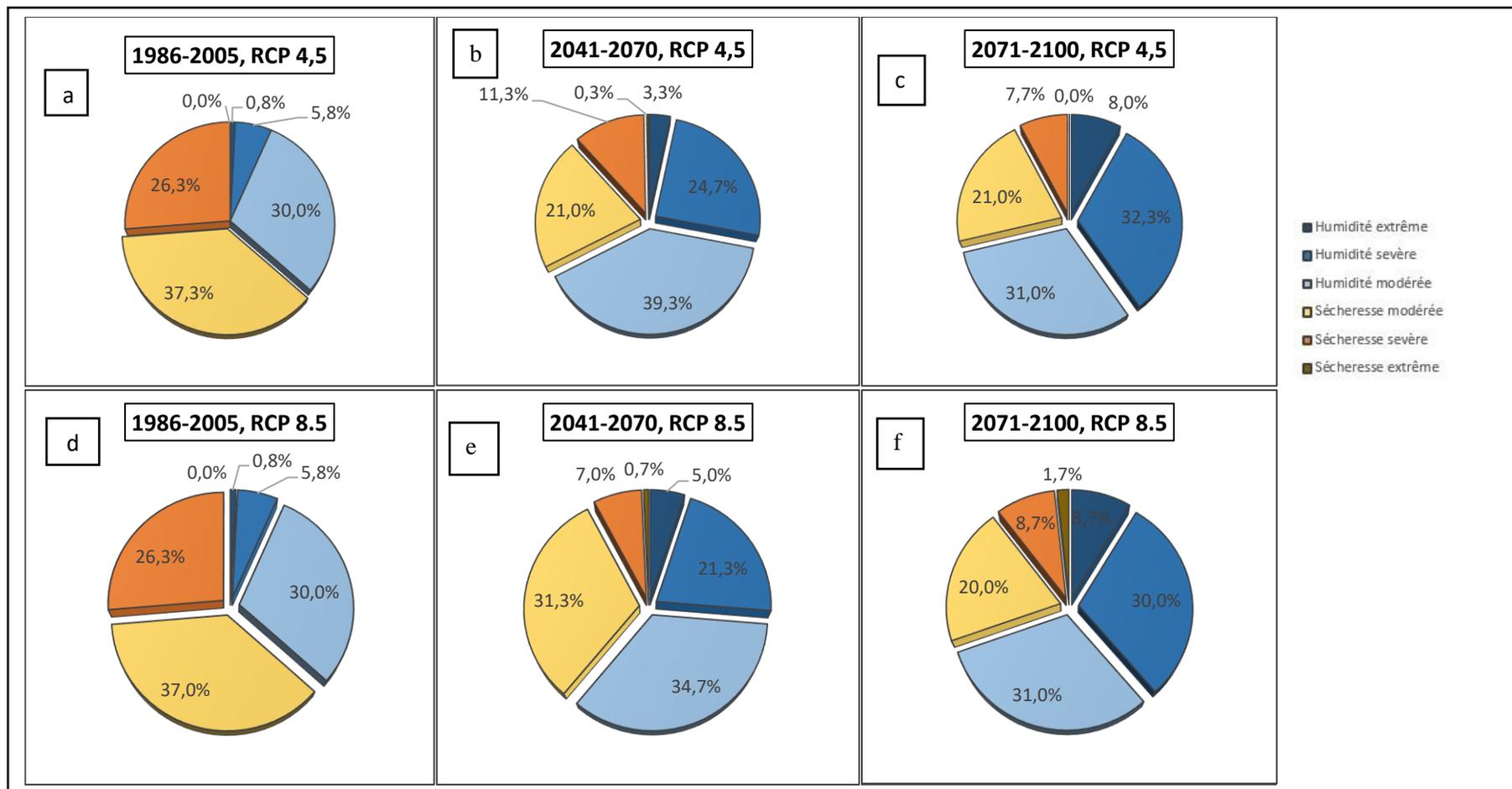


Figure 33. Fréquences relatives des intensités de sécheresse ou les classes du SPEI pour la période de référence et pour les trois périodes futures sous RCP 4.5 et RCP 8.5

La Figure 33 montre quasiment les mêmes fluctuations que celles observées avec les deux scénarios pour le SPI, la seule différence avec le SPEI, est qu'on note une diminution de la sévérité, les conditions extrêmes sont moins présentes et dominées par les modérées, il y a lieu de noter tout de même que les sécheresses modérées diminuent au fil du temps et la situation inverse est observée avec les humidités modérées qui évoluent à des humidités extrêmes. Les fluctuations d'importance mineure des fréquences sont aussi observées avec les autres classes.

3.1.1.2. Indices de sensibilité

Indice d'accessibilité à l'eau

La Figure 34 présente l'indice d'accessibilité à l'eau, évalué à partir des données issues de la carte d'occupation du sol pour l'indice d'occupation du sol (Ratio des surfaces couvertes et non couvertes par la forêt).

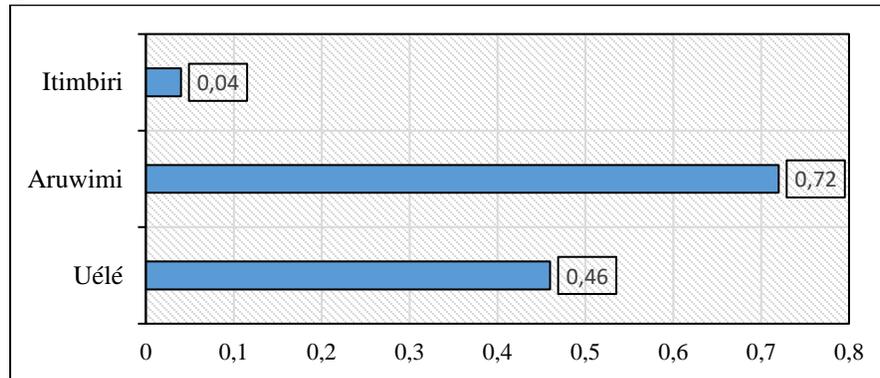


Figure 34. Indice d'accessibilité à l'eau (Water Accessibility Index)

La Figure 34 montre que les communautés riveraines de trois bassins versants étudiés sont censées parcourir à des degrés variés des longues distances pour accéder à l'eau salubre, la situation dans le bassin de l'Aruwimi se rapproche de l'optimum envisageable mais elle est critique dans les deux autres bassins.

Indice d'occupation du sol

La Figure 35 présente l'indice d'occupation du sol, évalué à partir de la carte d'occupation du sol de la région d'étude. Il présente un ratio des surfaces couvertes et non couvertes par la forêt. Elle montre la qualité de la couverture évaluée par le ratio non forêt et forêt dans une échelle de 0 à 1, 0 comme étant la situation optimale et 1, la situation critique, les bassins de l'Itimbiri et de l'Aruwimi sont bien couverts et sont moins sensibles que le bassin de l'Uélé qui devient de plus en plus anthropisé.

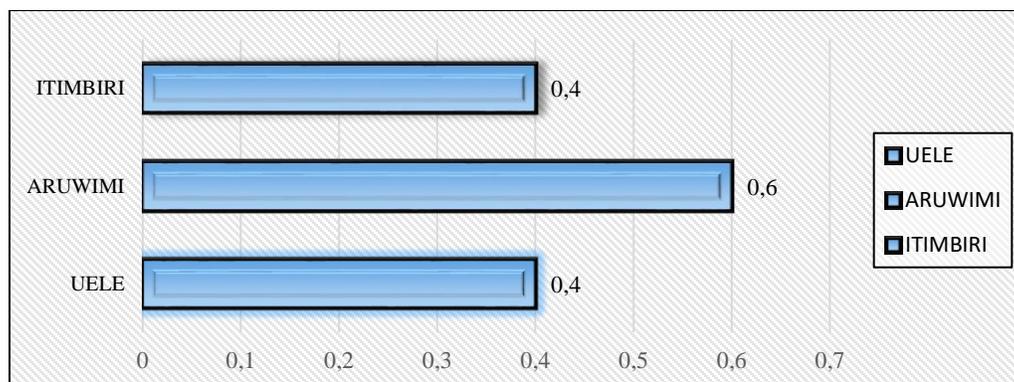


Figure 35. Ratio des surfaces couvertes et non couvertes par la forêt

Indice de végétation par différence normalisée

La Figure 36 présente l'indice de végétation par différence normalisée, évalué dans la région d'étude. Elle montre les valeurs situées au-dessus du seuil critique (soit supérieur à 0,1) pour les trois bassins versants sous étude, ces valeurs correspondent à une forte activité de photosynthèse, propre aux terres arbustives, aux forêts tempérées, aux forêts humides et aux terres agricoles.

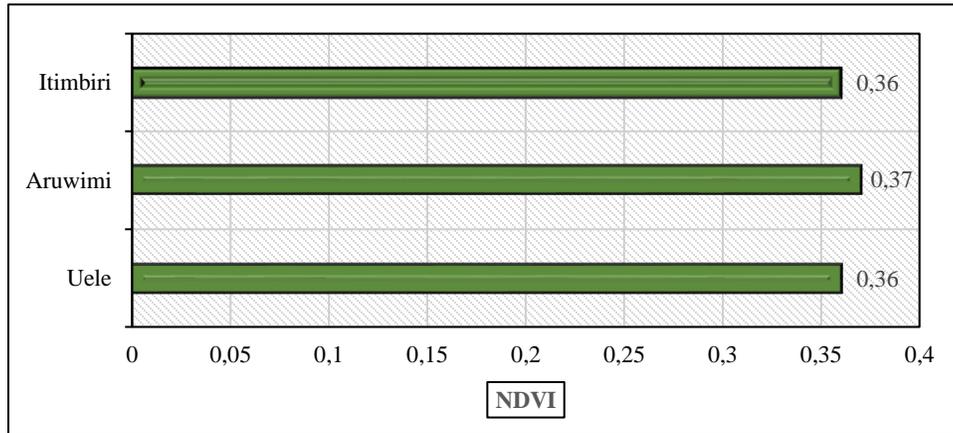


Figure 36. Indice de végétation par différence normalisée

3.1.1.3. Indices de capacité d'adaptation

La Figure 37 présente les résultats d'analyses statistiques uni-variées réalisées sur les variables identifiées dans la base des données du projet CEMIC comme des indices de capacité d'adaptation de la population de région d'étude aux impacts du changement climatique. Il en ressort que la région d'étude est, en moyenne et de manière générale, vulnérable aux effets du changement climatique, les communautés disposent une faible capacité d'adaptation. Comme illustré dans cette Figure, certaines initiatives individuelles ou communautaires d'adaptation au changement climatique sont certes visibles dans la région d'étude mais elles sont fragiles et moins adoptées, ce qui réduit leur résilience et accroît leur vulnérabilité.

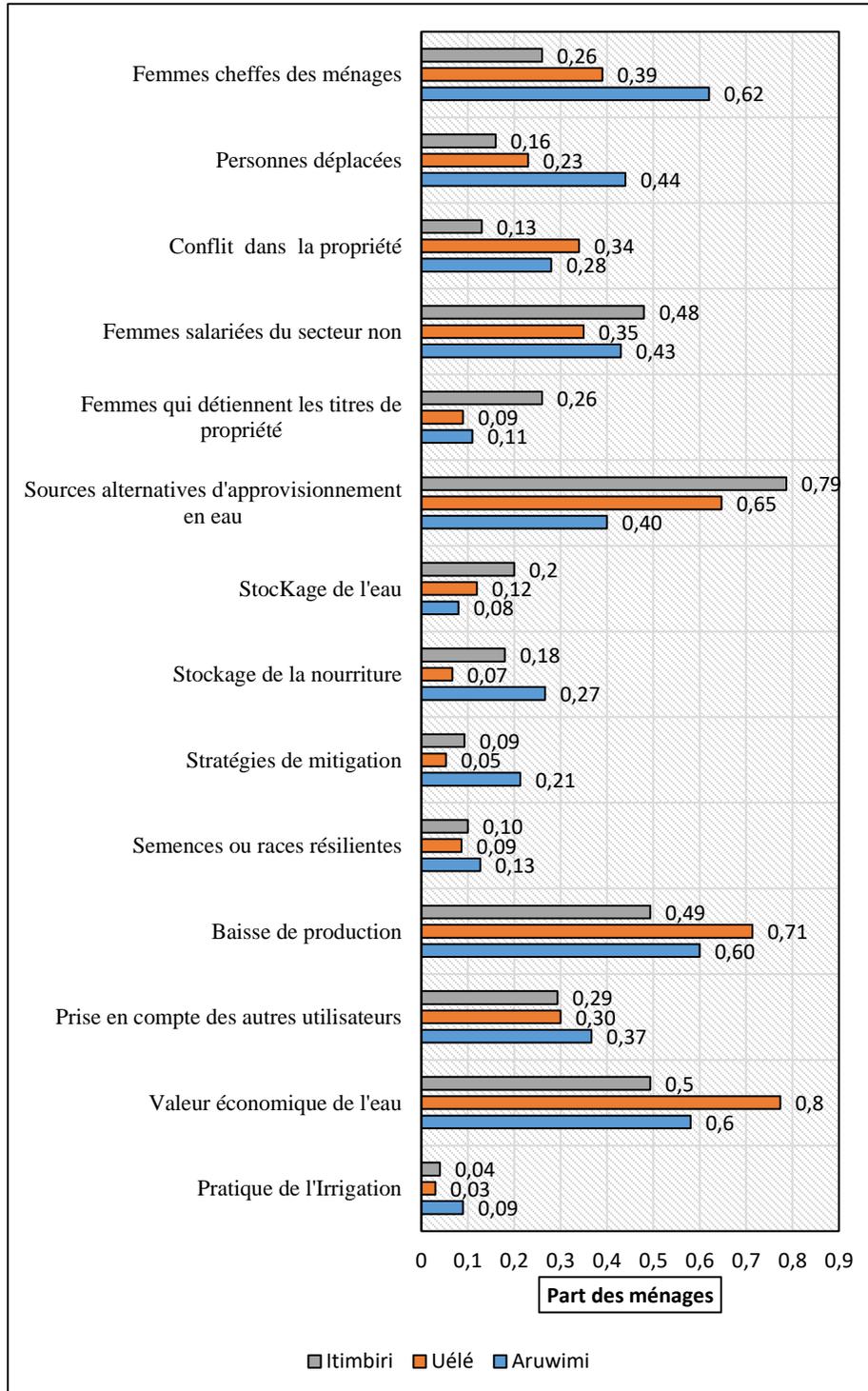


Figure 37. Indices de capacité d'adaptation

3.1.2. Résultats relatifs au développement de l'indice agrégé de vulnérabilité

3.1.2.1. Valeurs normalisées des indices

Le Tableau ci-après présente les valeurs normalisées des différents indices ayant contribué à l'évaluation de la vulnérabilité au changement climatique.

Tableau 9. Valeur normalisée des indices de l'évaluation de la vulnérabilité

Composante de vulnérabilité	Indices	Echelle de mesure	Valeur normalisée de l'indice		
			Uélé	Aruwimi	Itimbiri
Exposition	SPI	-2 à 2	0,45	0,4	0,5
	SPEI	-2 à 2	0,52	0,5	0,5
	CMI	0 à -6	0,9	0,9	1
Sensibilité	WAI	1 à 1	0,6	0,3	1
	Occupation du sol	0 à 1	0,4	0,6	0,6
	NDVI	-1 à 1	0,7	0,7	0,7
	Part des ménages qui prennent en compte d'autres utilisateurs de ressources en eau	0 à 1	0,7	0,7	0,8
	Part des ménages qui stockent l'eau	0 à 1	0,9	0,9	0,8
	Part des ménages qui stockent la production	0 à 1	0,9	0,9	0,8
	Pourcentage de ménages dirigés par des femmes	0 à 1	0,7	0,4	0,7
	Part des femmes qui détiennent les titres de propriété	0 à 1	0,9	0,9	0,7

Capacité d'adaptation	Proportion des femmes salariées du secteur non agricole	0 à 1	0,6	0,6	0,5
	Part des ménages ayant connu un conflit armé ou non armé dans le domaine ou la propriété	0 à 1	0,9	0,7	0,9
	Personnes déplacées dans leur propre pays ou personnes migrantes venant d'un autre pays	0 à 1	0,7	0,6	0,3
	Part des ménages qui n'ont pas connu une baisse de production	0 à 1	0,7	0,6	0,4
	Part des ménages qui accordent la valeur économique à l'eau	0 à 1	0,2	0,4	0,5
	Part des ménages qui utilisent les cultures et les races résilientes	0 à 1	0,9	0,9	0,9
	Part des ménages qui utilisent les stratégies de mitigation structurelles	0 à 1	0,9	0,8	0,9
	Part des ménages qui utilisent de sources alternatives d'approvisionnement en eau	0 à 1	0,3	0,6	0,2
	Part des ménages qui pratiquent l'irrigation	0 à 1	1	0,9	1

3.1.2.2. Indice composite de l'impact potentiel du changement climatique par bassin versant

Le Tableau 10 ci-dessous présente les indices composites de l'impact potentiel du changement climatique des différents bassins versants.

Tableau 10. Indice composite de l'impact potentiel du changement climatique

Composante agrégée	Coefficient de pondération	Valeur normalisée de l'indice		
		Uélé	Aruwimi	Itimbiri
Indice représentatif de la composante Exposition	$\frac{3}{4}$	0,6	0,6	0,7
Indice représentatif de la composante Sensibilité	$\frac{1}{4}$	0,6	0,5	0,8
Indice composite de l'Impact potentiel (Exposition + Sensibilité)		0,6	0,6	0,7

3.1.2.3. Indice agrégé de vulnérabilité par bassin versant

La Figure 45 ci-dessous présente les indices agrégés de vulnérabilité au changement climatique des différents bassins versants.

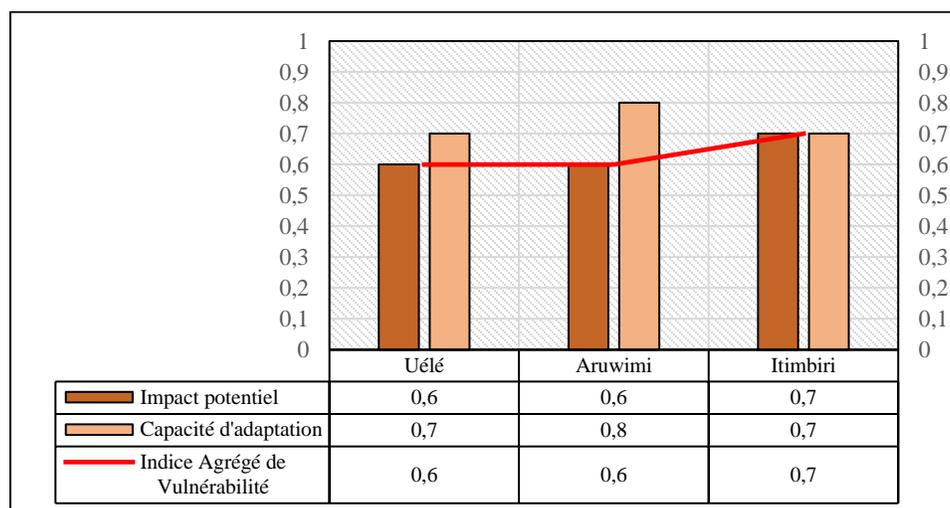


Figure 38. Indices agrégés de vulnérabilité des bassins de l'Uélé, de l'Aruwimi et de l'Itimbiri

Il ressort de la Figure 38 de manière que les trois bassins d'étude tendent vers une vulnérabilité accrue au changement climatique avec un indice impact potentiel élevé mais une faible capacité d'adaptation, les indices agrégés de vulnérabilité sont supérieurs à la valeur médiane, les bassins de l'Uélé et de l'Itimbiri ont un même niveau de vulnérabilité soit 0,7 ; le bassin de l'Aruwimi s'est avéré moins vulnérable comparativement aux deux autres soit un indice agrégé de 0,6.

3.1.2.4. Indice Agrégé de Vulnérabilité globale

La Figure 39 ci-après présente les indices de l'impact potentiel global, de la capacité d'adaptation globale et l'indice agrégé de la vulnérabilité globale au nexus Climat-Eau-Migrations-Conflicts de la région d'étude. Il résulte de cette figure que la région d'étude est exposée à 0,6 au risque climatique et dispose une faible capacité d'adaptation soit 0,7 ; ce qui rend de manière générale, la région d'étude vulnérable au changement climatique avec un indice agrégé de vulnérabilité globale de 0,6.

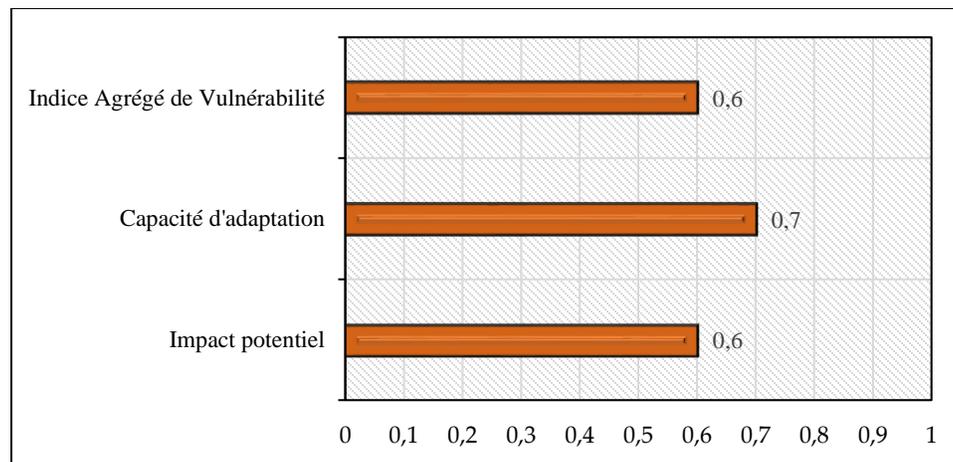


Figure 39. Les indices de l'impact climatique global, de la capacité d'adaptation globale et l'indice agrégé de la vulnérabilité globale

3.2. DISCUSSION

De l'exposition et de la distribution spatio-temporelle du régime hydro-climatique.

L'analyse des tendances de la variabilité climatique est pertinente pour prévenir ou faire face aux sécheresses et inondations. Les résultats de cette étude montrent, de manière générale, des grandes fluctuations climatiques à des différentes échelles de temps dans la région et qui ont des répercussions négatives sur les précipitations et les débits des rivières. Selon les indices SPI et SPEI, la région d'étude est caractérisée par trois classes de sécheresse à savoir l'humidité forte, l'humidité modérée et la sécheresse modérée. L'indice CMI confirme ce degré de sécheresse en classant la région d'étude comme une région semi-aride. Ces résultats corroborent aux conclusions de [Tshimanga et Hughes \(2012\)](#) stipulant que le bassin du Congo a connu ces dernières décennies des impacts directs du changement climatique caractérisés par les changements dans la distribution saisonnière des précipitations.

L'approche de l'évaluation des indices hydro-climatiques par bassin versant a permis de détecter à l'échelle spatio-temporelle des fluctuations hydro-climatiques annuelles et décennales pour l'indice SPEI et essentiellement des fluctuations décennales pour les indices SPI, CMI. Il découle de cette détection que durant la période allant de 1960 à 2018, la région d'étude a connu trois périodes sèches ayant des allures allant de la sécheresse sévère à la sécheresse modérée et trois périodes humides ayant les tendances de l'humidité modérée à l'humidité forte. Les périodicités varient d'un indice à un autre. Ces résultats confirment ceux de [Cheikh Faye et al.](#)

(2015) qui mentionnent que la crise climatique qui a frappé le milieu soudano-sahélien s'est jusqu'à présent manifesté par une augmentation des sécheresses modérées à fortes.

S'agissant des bassins versants et en mettant en exergue les valeurs des trois indices étudiés, le bassin de l'Itimbiri a connu en moyenne un degré élevé de sécheresse c'est-à-dire une exposition au risque climatique élevée comparativement aux bassins de l'Uélé et de l'Aruwimi. La vulnérabilité locale c'est-à-dire à l'échelle du bassin est influencée par une combinaison de facteurs à différentes échelles, par exemple de facteurs locaux (O'Brien *et al.*, 2004 ; Fekete *et al.*, 2009), alors que la vulnérabilité à l'échelle nationale dépend d'autres facteurs macroéconomiques et structurels. L'analyse de la vulnérabilité à une échelle du bassin versant présente l'avantage de pouvoir considérer des facteurs à différentes échelles (Brooks *et al.*, 2005).

Des scénarios du changement climatique. Les analyses des scénarios ont montré que s'agissant du SPI, deux périodes sèches d'après les scénarios pessimistes et une période soit la période 1 d'après les scénarios optimistes. Indépendamment des scénarios, les fréquences des événements humides et secs extrêmes observées avec les projections du SPI confirment que le changement climatique va amplifier dans un avenir très proche les conditions extrêmes, ce qui entrainera d'une part des sécheresses et d'autre part des inondations. Le CMI indique que les conditions semi-arides allant des faibles degrés à des degrés élevés vont prévaloir de la période de référence à la période 2 où elles vont tendre vers des conditions d'aridité. L'évolution du CMI au fil du temps montre que l'augmentation l'évaporation résultant de la hausse des températures sera supérieure à l'augmentation globale des précipitations. Ce qui signifie que les communautés de la région d'étude vont observer une augmentation de la fréquence annuelle des sécheresses. Le SPEI montre une tendance similaire à celle du SPI, où sur la base deux scénarios, une période humide a été identifiée soit la période de référence et les deux autres périodes sont des périodes caractérisées par des sécheresses. Sur la base de cet indice et de deux scénarios, la région d'étude connaîtra une fréquence plus modérée d'humidité, ce qui signifie que les communautés riveraines observeront probablement au fil du temps des périodes d'inondation qui vont aller de moins intenses aux plus intenses et plus fréquentes dans un avenir prévisible, on note que certaines régions du bassin du Congo connaissent déjà de graves inondations (Tshimanga et Hughes, 2012).

De l'indice agrégé de vulnérabilité. Il est important de noter que la vulnérabilité au changement climatique n'est pas une caractéristique mesurable d'un système, comme peuvent l'être la température, les précipitations, la production agricole, etc. Il s'agit d'un concept qui traduit l'interaction complexe de plusieurs facteurs qui vont déterminer la sensibilité d'un système aux effets du changement climatique. Cependant, il n'existe pas de règle établie définissant les facteurs qui doivent être considérés, ni de méthode pour les quantifier d'où l'utilisation des termes « évaluer ou analyser » plutôt que « mesurer » la vulnérabilité au changement climatique, c'est dans cette optique que l'approche par indice a été utilisée dans cette étude (GIZ, 2017). Etant donné que les analyses de vulnérabilité ne se limitent pas toujours à un seul secteur ou une seule région mais peuvent contenir plusieurs sous-vulnérabilités, l'approche par bassin versant a été utilisée pour fournir des informations plus utiles que la valeur globale lorsqu'il s'agira d'identifier des zones prioritaires d'adaptation.

La dimension genre a été prise en compte dans cette analyse car les changements climatiques ont des effets différents sur les femmes et les hommes. Dans les pays en voie de développement notamment la RDC, les femmes sont particulièrement susceptibles de ressentir les effets négatifs du changement climatique. La capacité des femmes à réagir et à s'adapter au changement climatique est réduite par leur statut socio-économique inférieur et par leur accès restreint à l'information et aux ressources (Nellemann *et al.*, 2011), un fait qui illustre des schémas plus généraux sur les inégalités structurelles liées au genre (GIEC, 2007, Molua, 2015). Les aspects liés aux conflits causés par les mouvements migratoires des pasteurs du bassin du Lac Tchad vers le Bassin du Congo, ont été analysés et pris en compte dans le cadre de l'évaluation de la vulnérabilité au changement climatique (Kabamba, 2015). Il a été prouvé les effets potentiels du changement climatique sur les populations humaines en combinant, d'une part, les corrélations spatiales entre le climat actuel et la densité de population et, d'autre part, des scénarios climatiques et démographiques (Samson *et al.*, 2011). Les régions de forte vulnérabilité au changement climatique sont celles qui sont actuellement fortement peuplées et susceptibles aux conflits, ce sont des régions où les conditions climatiques deviennent défavorables (sécheresses plus fréquentes, diminution de la nappe phréatique, augmentation de la température) combinées à une croissance galopante de la population.

L'évaluation a révélé que les caractéristiques propres des bassins versants de l'Uélé, de l'Aruwimi et de l'Itimbiri diffèrent sensiblement alors que l'exposition actuelle à des effets du changement climatique est élevée ; le bassin de l'Itimbiri s'est avéré plus sensible avec un indice agrégé de 0,8 comparativement aux bassins de l'Uélé et de l'Aruwimi qui sont notés moins sensibles dont respectivement 0,5 et 0,4.

En ce qui concerne la capacité d'adaptation, l'évaluation des trois régions montre des résultats quasi-similaires, avec une capacité d'adaptation faible en raison d'une connaissance inadéquate des savoirs endogènes, des capacités institutionnelles réduites et des pratiques dans la gestion des ressources en eau moins appropriées.

Après l'agrégation des indices par composante, les résultats ont montré que dans une échelle de 0 à 1 dont 0 est défini comme situation optimale et 1 comme situation critique, les bassins d'étude tendent vers une vulnérabilité accrue au changement climatique avec un impact potentiel moins élevé mais une faible capacité d'adaptation. Les indices agrégés de vulnérabilité sont supérieurs à la valeur médiane, les bassins de l'Uélé et de l'Aruwimi ont un même niveau de vulnérabilité soit 0,6 ; le bassin de l'Itimbiri s'est avéré moins vulnérable comparativement aux deux autres soit un indice de 0,7. La région d'étude est exposée à 0,6 au risque climatique et dispose une faible capacité d'adaptation soit de 0,7. Ceci rend de manière générale, la région d'étude vulnérable avec un indice agrégé de vulnérabilité globale au changement climatique de 0,6.

Ces résultats corroborent à ceux présentés par Pavageau *et al.* (2013) dans une revue de la littérature résumant la cartographie de la vulnérabilité aux variations climatiques des pays africains, les indices établis dans cette revue sont évalués dont trois portent sur la sécurité alimentaire et le secteur agricole à savoir CCVI-Climate Change Vulnerability Index, VRIM-

Vulnerability-Resilience Indicator Model et PCCH-Population and Climate Change Hotspot (Malone et Brenkert, 2009, Hossain, 2001 ; Wheeler, 2011). Les trois autres indices portent sur les ressources en eau en lien avec les économies rurales et les populations pauvres en l'occurrence CVI-Climate Vulnerability Index, SVI- Social Vulnerability Index et WPI-Water Poverty Index (Vincent, 2004 ; Sullivan et Meigh, 2005 ; Sullivan et al., 2002). Le dernier HVI-Human Vulnerability Index (Hossain, 2001) aborde sur les interactions entre l'utilisation des terres, l'eau et le climat. La carte agrégée établie par le même auteur sur ces indices sur la région africaine montre une concordance et indique de manière générale que la République Démocratique du Congo et beaucoup de pays sahéliens sont vulnérables aux effets du changement climatique.

En plus du fait que cette étude de vulnérabilité ne se limite pas toujours à un seul secteur et contient plusieurs sous-vulnérabilités, les indices agrégés susmentionnés renforcent le caractère original de l'indice agrégé de vulnérabilité globale développé dans cette étude. A la différence de ces indices présentés par Pavageau et al. (2013) excepté CCVI-Climate Change Vulnerability Index, l'indice développé dans cette étude agrège toutes les trois composantes de vulnérabilité au changement climatique et inclue les trois plans du développement durable à savoir les aspects humains, économiques et environnementaux.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La vulnérabilité au changement climatique doit être abordée sous un angle nouveau car elle soulève des problématiques nouvelles, les méthodes traditionnelles se heurtent aux larges incertitudes liées à la complexité et à l'évolution du climat. Cette étude visait à évaluer le caractère, l'ampleur et le rythme de l'évolution et de la variabilité climatiques ; d'établir un aperçu futur du régime climatique ; d'évaluer le degré d'affectation de la région d'étude par une exposition donnée à la péjoration des conditions climatiques ; les facteurs qui déterminent la capacité des communautés à générer et à mettre en œuvre des mesures d'adaptation. Elle visait également à développer par agrégation un indice de vulnérabilité intégrant l'exposition, la sensibilité et la capacité d'adaptation au nexus Climat-Eau-Migrations-Conflits.

Pour atteindre ces objectifs, une méthodologie plurielle associant les approches quantitatives et qualitatives a été proposée. L'analyse se penche sur les caractéristiques hydro-climatiques, les caractéristiques de l'environnement naturel et d'occupation des sols, et les caractéristiques socio-économiques (migrations, conflits, genre, accès aux ressources et usages) en vue d'établir la vulnérabilité.

Les résultats de cette étude ont montré ce qui suit :

- **Des indices d'exposition et de la distribution spatio-temporelle du régime hydro-climatique.** Les indices d'exposition SPI et SPEI, la région d'étude est caractérisée par trois classes de sécheresse à savoir l'humidité forte, l'humidité modérée et la sécheresse modérée, l'indice climatique d'humidité confirme ce degré de sécheresse en classant la région d'étude comme une région transitoire entre humide et aride donc semi-aride. Le bassin de l'Itimbiri a connu en moyenne un degré élevé de sécheresse c'est-à-dire une exposition au risque climatique élevée comparativement aux bassins de l'Uélé et de l'Aruwimi. Il découle du suivi de la sécheresse que de manière générale, de la période allant de 1960 à 2018, la région d'étude a connu trois périodes sèches ayant des allures allant de la sécheresse sévère à la sécheresse modérée et trois périodes humides ayant les tendances de l'humidité modérée à l'humidité forte. Les périodicités varient d'un indice à un autre.
- **Des scénarios du changement climatique.** Les résultats ont montré que s'agissant du SPI, deux périodes sèches d'après les scénarios pessimistes et une période soit la période 1 d'après les scénarios optimistes. Indépendamment des scénarios, les fréquences des événements humides et secs extrêmes observées avec les projections du SPI confirment que le changement climatique va amplifier dans un avenir très proche les conditions extrêmes. Le CMI indique que les conditions semi-arides allant des faibles degrés à des degrés élevés vont prévaloir de la période de référence à la période 2 où elles vont tendre vers des conditions d'aridité. L'évolution du CMI au fil du temps montre que l'augmentation l'évaporation résultant de la hausse des températures sera supérieure à l'augmentation globale des précipitations. Le SPEI montre une tendance similaire à celle du SPI, où sur la base deux scénarios, une période humide a été

- identifiée soit la période de référence et les deux autres périodes sont des périodes caractérisées par des sécheresses. Sur de deux scénarios du SPEI, la région d'étude connaîtra une fréquence plus modérée d'humidité.
- **Des indices de sensibilité de la région d'étude.** Les communautés riveraines de trois bassins versants étudiés sont censées parcourir à des degrés variés des longues distances pour accéder à l'eau salubre, la situation dans le bassin de l'Aruwimi se rapproche de l'optimum envisageable mais elle est critique dans les deux autres bassins. La qualité de la couverture évaluée par le ratio non forêt et forêt dans une échelle de 0 à 1, 0 comme étant la situation optimale et 1, la situation critique, les bassins de l'Itimbiri et de l'Aruwimi sont bien couverts et sont moins sensibles que le bassin de l'Uélé qui devient de moins en moins couvert.
 - **Des indices de capacité d'adaptation.** Les communautés disposent une faible capacité d'adaptation. Certaines initiatives individuelles ou communautaires d'adaptation au changement climatique sont mises en œuvre dans la région d'étude pour réduire la vulnérabilité dont principalement des femmes et des enfants, de faciliter l'accès à l'eau et renforcer tant soit peu la sécurité alimentaire, etc. mais elles sont fragiles et moins adoptées par les communautés, ce qui réduit leur résilience et accroît leur vulnérabilité aux effets du changement climatique.
 - **De l'indice agrégé de vulnérabilité.** Après l'agrégation des indices par composante, les résultats ont montré que dans une échelle de 0 à 1 dont 0 est défini comme situation optimale et 1 comme situation critique, les bassins d'étude tendent vers une vulnérabilité accrue au changement climatique avec un impact potentiel moins élevé mais une faible capacité d'adaptation. Les indices de sous-vulnérabilités développés sont supérieurs à la moyenne, les bassins de l'Uélé et de l'Aruwimi ont un même niveau de vulnérabilité soit 0,6 et le bassin de l'Itimbiri s'est montré plus vulnérable soit 0,7. La région d'étude est exposée à 0,6 au risque climatique, elle a une faible capacité d'adaptation estimée à 0,7 de vulnérabilité, ce qui la rend vulnérable au changement climatique avec indice agrégé de vulnérabilité globale au changement climatique évalué à 0,7.

A la lumière des défis de l'heure et ceux qui se profilent à l'horizon, les recommandations suivantes sont formulées dans le but de renforcer la résilience des communautés :

- Les résultats intermédiaires obtenus pour le développement de l'indice agrégé de vulnérabilité due au nexus Climat-Eau-Migrations-Conflits ont permis de ressortir les informations sous-jacentes, pertinentes pour être utilisées dans la planification des stratégies d'adaptation car les indices individuels, les composantes et les sous-vulnérabilités (vulnérabilité par bassin) et fournissent des informations plus utiles que la valeur globale (l'indice agrégé de vulnérabilité globale) pour permettre aux décideurs

- d'identifier des domaines et des régions prioritaires d'adaptation. La prise en compte par les décideurs des résultats intermédiaires de cette analyse est indispensable.
- L'adaptation au nexus Climat-Eau-Migrations-Conflits devra être abordée de manière très pratique, à travers des projets de démonstration concrets, même s'ils sont de taille modeste, afin de développer la réflexion, les réflexes et les mécanismes pour sa prise en compte. Une implication des communautés riveraines est indispensable, car c'est à ce niveau que la vulnérabilité peut être le plus concrètement évaluée, et que se feront sentir les effets du changement climatique.
 - Le développement de l'indice agrégé de vulnérabilité, en plus du fait qu'il a permis d'avoir une vision globale de la vulnérabilité des communautés au nexus Climat-Eau-Migrations et Conflits, il permet en outre aux décideurs et aux parties prenantes de répondre aux questions ci-après : Quels sont les points de départ pour agir ? Quels sont les leviers sur lesquels les options d'adaptation doivent s'appuyer ? Quels sont obstacles/barrières socioculturels à surmonter ? La démarche pour parvenir à réduire la vulnérabilité des communautés due au nexus Climat-Eau-Migrations-Conflits doit être une approche intégrée, participative et holistique incluant une expertise diversifiée, des différents acteurs locaux et des communautés tant autochtones que migrantes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- African Union, 2008. Report on the migrations of Mbororo nomadic pastoralists by the fact-finding mission dispatched to the Democratic Republic of Congo, the Central African Republic and Cameroon, pursuant to decision PSC/PR/COMM (XCVII) of the 97th meeting of the Peace and Security Council. Ethiopia.
- Agence de coopération internationale allemande pour le développement (GIZ), 2017. Guide de référence sur la vulnérabilité : Concept et lignes directrices pour la conduite d'analyses de vulnérabilité standardisées. Risk Supplement: How to apply the approach with the IPCC AR5 risk concept. 180p
- Ali, A. and Lebel, T., 2009. The Sahelian standardized rainfall index revisited. *International Journal of Climatology*, vol. 29, p. 1705-1714.
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. and Smith M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Édit. FAO, Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, Italie, 300 p.
- Ardoin-Bardin S., 2004. Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano sahélienne. Thèse de l'Université Montpellier II, 440 p.
- Ardoin-Bardin S., Lubes-Niel H., Servat E., Dezetter A. et Boyer J.F., 2003. Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'Ouest : caractérisation de la situation de la décennie 1990. In: *Hydrology of Mediterranean and Semiarid Regions*, É. SERVAT, Najem, W. C. Leduc et Shakeel, A. édit., IAHS Publication n° 278, p. 223-228.
- Baltas, E., 2007. Spatial distribution of climatic indices in northern Greece», *Meteorological Applications*, 14:69–78.
- Beaudoin, C.E., 2007. Media Effets on Public Safety following a Natural Disaster : Testing Lagged Dependent Variable. <https://journals.sagepub.com>
- Bergaoui M. et Alouini A., 2001. Caractérisation de la sécheresse météorologique et hydrologique : cas du bassin versant de Siliana en Tunisie. *Sécheresse*, vol. 12, n° 4, p. 205-213.
- Chambers, R. and Conway, G., 1992. Sustainable rural livelihoods: practical concepts for the 21st century, IDS Discussion Paper 296. Institute for Development Studies (IDS), Brighton.
- Cheikh Faye, Amadou Abdoul Sow et Jean Baptiste Ndong, 2015. Étude des sécheresses pluviométriques et hydrologiques en Afrique tropicale : caractérisation et cartographie de la sécheresse par indices dans le haut bassin du fleuve Sénégal », *Physio-Géo* [En ligne], Volume 9 |2015, mis en ligne le 08 février 2015, consulté le 16 janvier 2020. URL : <http://journals.openedition.org/physio-geo/4388> ; DOI: 10.4000/physio-geo.4388

- Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), 2010. Handbook on Vulnerability and Adaptation Assessment (Manuel du Groupe consultatif d'experts sur l'évaluation de la vulnérabilité et de l'adaptation). Bonn : Secrétariat de la CCNUCC.
- Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), 2010. Handbook on Vulnerability and Adaptation Assessment (Manuel du Groupe consultatif d'experts sur l'évaluation de la vulnérabilité et de l'adaptation). Bonn : Secrétariat de la CCNUCC.
- De Martonne, E., 1925. *Traité de géographie physique*, 11e édition, Paris, Colin.
- Dialogue des Peuples, 2016. La première guerre de l'eau aura-t-elle lieu en Afrique Centrale ? Dossier Eau, Année 2016 n° 2.
- Döll, P., 2009. Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: a global-scale assessment. *Environmental Research Letter* 4, 035006.
- Feindouno, S., Guillaumont, P., Simonet, C., 2020. The Physical Vulnerability to Climate Change Index : An Index to Be Used for International Policy Ecological Economics, vol. 176
- Giddings L., Soto M., Rutherford, B.M. and Maarouf, A., 2005. Standardized Precipitation Index Zones for México. *Atmósfera*, vol. 18, n° 1, p. 33-56.
- Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), 2007. AR4 WG2 Appendix I Glossary (Glossaire de l'AR4, groupe de travail 2, Annexe I). pp. 869-883.
- Guttman, N.B., 1998. Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index, *Journal of the American Water Resources Association*, 34:113–121, doi:10.1111/j.1752-1688.1998.tb05964.
- Guttman, N.B., 1999. Accepting the Standardized Precipitation Index: a calculation algorithm, *Journal of the American Water Resources Association*, 35:311–322, doi:10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x.
- Haddad, B.M., 2005. Ranking the Adaptive Capacity of Nations to Climate Change When Socio-Political Goals are Explicit. *Global Environmental Change Part A* 15, 165-176.
- Hayes, M., Svoboda, M., Wall, N. and Widhalm, M., 2011. The Lincoln Declaration on Drought Indices: universal meteorological drought index recommended, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(4):485–488.
- Hossain, S.M.N., 2001. *Assessing Human Vulnerability due to Environmental Change : Concepts and Assessment Methodologies*. Royal Institute of Technology, Stockholm, 100 p.

- Iglesias, A. and Rosenzweig, C., 2010. Effects of Climate Change on Global Food Production under Special Report on Emissions Scenarios (SRES) Emissions and Socioeconomic Scenarios: Data
- Kabamba, M.F., 2015. Les migrants climatiques en quête d'adaptation : les éleveurs Mbororo émigrent en RD Congo. In Delgado-Ramos (Ed). Inégalité et Changement Climatique, perspectives du sud. Dakar, Sénégal: CODESRIA, 2015. ISBN: 9782869786769 286978676X
- Kaly, U.L., Pratt, C.R., Mitchell, J., 2004. The Environmental Vulnerability Index (EVI) 2004, in: SOPAC Technical Report 384, S.T.R. (Ed.). South Pacific Applied Geoscience Commission, Suva, Iles Fiji.
- Lebel T. and Ali A., 2009. Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007). *Journal of Hydrology*, vol. 375, n° 1-2, p. 52-64.
- Magirn, G., 2016. The disappearance of Lake Chad: history of a mythe. *Journal of Political Ecology* Vol.23, 2016.
- Malone, E., Brenkert, A., 2009. Vulnerability, sensitivity and coping/adapting capacity worldwide, in: Ruth, M., Ibararán, M.E. (Eds.), *Distributional Impacts of Climate Change and Disasters: Concepts and Cases*. Edward Elgar, Cheltenham, Royaume-Uni, pp. 8-45.
- McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J., 1993. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17–22 janvier 1993, Anaheim, CA. Boston, MA, American Meteorological Society.
- Meneses-Tovar, C.L., 2012. L'indice différentiel normalisé de végétation comme indicateur de la dégradation. *Unasyuva*, Vol. 62, 2011/2
- Molua, L.E., 2015. Reappraisal of the Climate Change Challenge in the Congo Basin and Implications for the Cost of Adaptation. *Environment and Natural Resources Research*; Vol. 5, No. 3; 2015 ISSN 1927-0488 E-ISSN 1927-0496
- Nellemann, C., Verma, R. and Hislop, L. (eds.), 2011. Women at the frontline of climate change. Gender risks and hopes. A rapid response assesement. (Les femmes sur la ligne de front des changements climatiques. Risques et espoirs féminins). Arendal : PNUE, GRID Arendal.
- Obassi, G.O.P, 1994. WMO's role in the international decade for natural disaster reduction, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 75, 1655-1661
- Observatoire National des Effets du Réchauffement climatique (ONERC), 2005. Gestion et impacts du changement climatique. Programme de recherche piloté par le ministère de l'Écologie et du Développement durable. 107p

- Omasombo, T.J., 2011. République démocratique du Congo. Haut-Uélé. Trésor touristique. Séries « Monographies des provinces de la RD Congo », vol. 2. Bruxelles-Tervuren : Le CRI-MRAC, 440 p.
- Omasombo, T.J., 2014. Bas-Uélé. Pouvoirs locaux et économie agricole : héritages d'un passé brouillé, Tervuren, MRAC.
- Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE), 2008. Working Party on Climate, Investment and Development. Integrating Climate Resilience into Development Planning. Draft synthesis report. (Groupe de travail sur le climat, les investissements et le développement. Intégrer la résilience au changement climatique dans la planification du développement). Paris : publications de l'OCDE.
- Pavageau, C., Locatelli B., Tiani A.M., et Zida, M., 2013. Cartographier la vulnérabilité aux variations climatiques : Une méta-analyse en Afrique. Document de travail 118. Bogor, Indonésie : CIFOR.
- Samson, J., Berteaux, D., McGill, B.J., Humphries, M.M., 2011. Geographic disparities and moral hazards in the predicted impacts of climate change on human populations. *Global Ecology and Biogeography*.
- Scoones, I., 1998. Sustainable rural livelihoods: a framework for analysis, IDS Working Paper 72. Institution for Development Studies (IDS), Brighton.
- Sietz, D., Ludeke, M.K.B. and Walther, C., 2011. Categorization of typical vulnerability patterns in global drylands. *Global Environmental Change* 21, 431-440.
- Sonwa, D., Scholte, P., Pokam, W., 2012. Changement climatique et adaptation en Afrique Centrale : Passé, Scénarios et options pour le futur. In book : Les foreets du bassin du Congo- Etat des Foreets. Editors : de Wassige C., Flynn J., Louppe D., Hiol Hiol F., Mayaux Ph
- Sullivan, C., Meigh, J., 2005. Targeting attention on local vulnerabilities using an integrated index approach: the example of the Climate Vulnerability Index. *Water Science and Technology* 51, 69-78.
- Sullivan, C.A., Meigh, J.R., Fediw, T., 2002. Developing and testing the Water Poverty Index: Phase 1. Final Report, in: Report to Department for International Development (Ed.). Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, Royaume-Uni.
- Tshimanga, R.M., 2012. Hydrological uncertainty analysis and scenario-based streamflow modelling for the Congo River Basin. PhD thesis, Rhodes University repository. South Africa.

- Tshimanga, R.M., Hughes, D.A., 2012. Climate change and impacts on the hydrology of the Congo Basin: the case of the northern sub-basins of the Oubangui and Sangha Rivers. *Physics and Chemistry of the Earth* 50–52 (2012) 72–83
- Vicente-Serrano, S.M., Begueria, S. and Lopez-Moreno, J.I. (2010) A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, *Journal of Climate*, 23:1696–1718
- Vincent, K., 2004. Creating an index of social vulnerability to climate change for Africa, Tyndall Centre for Climate Change Research. Tyndall Centre, p.50.
- Vörösmarty C.J., Douglas E.M., Green, P.A. and Revenga C., 2005. Geospatial indicators of emerging water stress: an application to Africa. *Ambio*, vol. 34, n° 3, p. 230-237.
- Wheeler, D., 2011. Quantifying Vulnerability to Climate Change: Implications for Adaptation Assistance, CGD Working Paper. Center for Global Development, Washington, D.C.
- Willmott C.J. and Feddema J.J., 1992. A more rational Climatic Moisture Index. *The Professional Geographer*, vol. 44, p. 84-88.
- World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP), 2013. *Handbook of Drought Indicators and Indices*. 52p
- World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP), 2016. *Handbook of Drought Indicators and Indices* (M. Svoboda and B.A. Fuchs). Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2. Geneva. ISBN 978-92-63-11173-9, ISBN 978-91-87823-24-4.
- Wu H., Hayes M.J., Weiss A. and Hu, Q., 2001. An evaluation of the Standardized Precipitation Index, the China Z-index and the statistical Z-score. *International Journal of Climatology*, vol. 21, n° 6, p. 745-758
- Yohe, G., Malone, E., Brenkert, A., Schlesinger, M., Meij, H. and Xing, X., 2006. Global Distributions of Vulnerability to Climate Change. *The Integrated Assessment Journal* 6, 35-44.

PHOTOGRAPHIES



Photo 1. Point d'eau amélioré au territoire Niangara/Haut-Uélé



Photo 2. Visite de travail dans le village de Manziga/Haut-Uélé