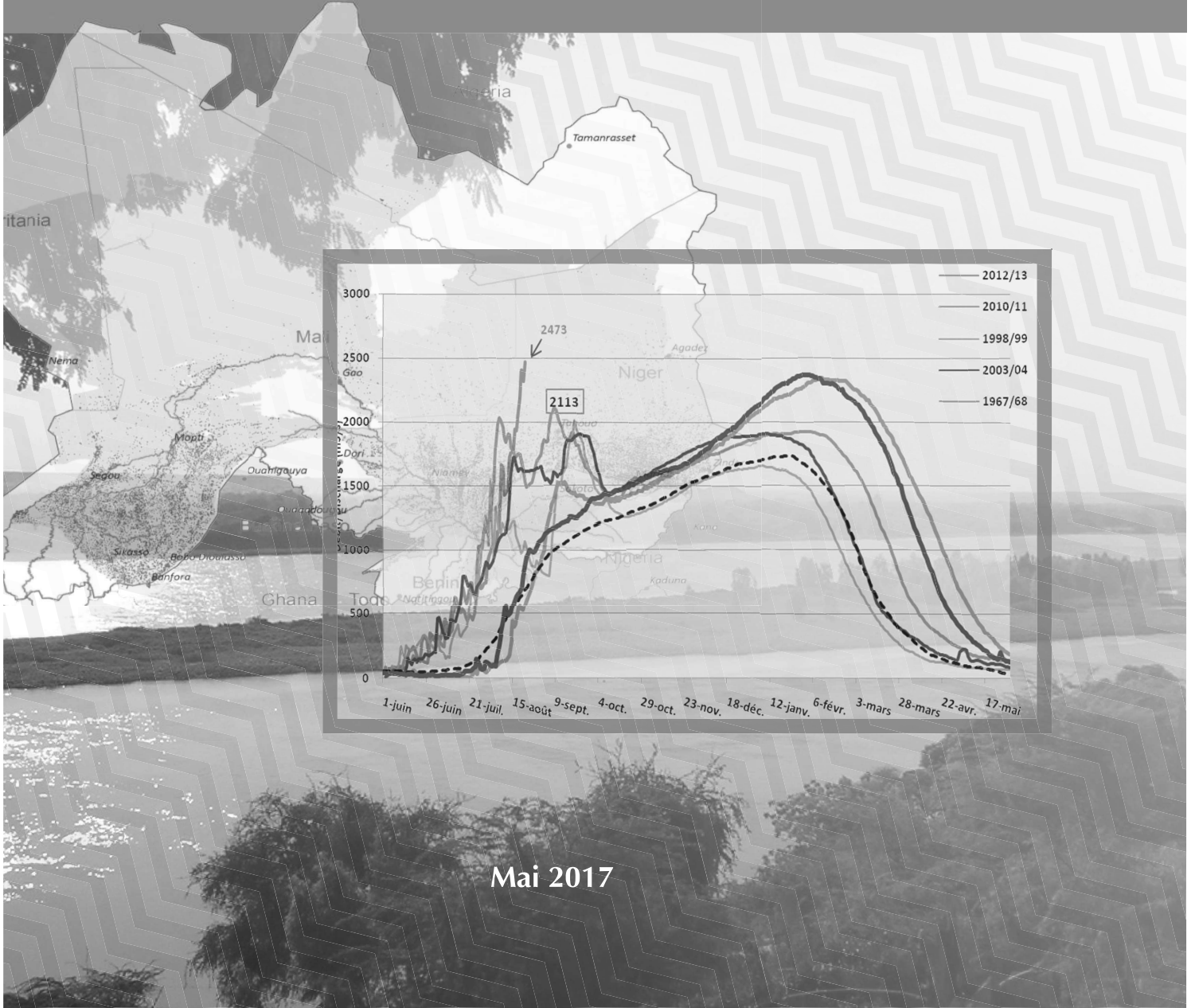


GICRESAIT | GESTION INTÉGRÉE ET CONCERTÉE DES RESSOURCES  
EN EAU DES SYSTÈMES AQUIFÈRES D'ILLEMEDEN, DE TAODÉNI-  
TANEZROUFT ET DU FLEUVE NIGER

# HYDROCLIMATOLOGIE ET IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES AQUIFERES



Mai 2017

PROJET DE «GESTION INTÉGRÉE ET CONCERTÉE DES RESSOURCES  
EN EAU DES SYSTÈMES AQUIFÈRES D’IULLEMEDEN, TAODÉNI  
TANEZROUFT ET DU FLEUVE NIGER»  
(ALGÉRIE, BÉNIN, BURKINA FASO, MALI, MAURITANIE, NIGER, NIGERIA)

«GICRESAIT»

## HYDROCLIMATOLOGIE ET IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES AQUIFERES

Mai 2017

**Observation du Sahara et du Sahel © 2017**

GICRESAIT | Hydroclimatologie et impacts du changement climatique sur les aquifères / OSS. \_ OSS,  
Tunis : 2017. \_ 32 p.

ISBN : 978-9938-933-12-3

Réalisation et impression : Simpact

## TABLE DES MATIÈRES

<b>LISTE DES ACRONYMES ET DES ABRÉVIATIONS</b>	<b>5</b>
<b>1. CONTEXTE</b>	<b>7</b>
<b>2. CADRE DE L'ETUDE</b>	<b>8</b>
2.1. Étendue de la zone intéressée par le GICRESAIT	8
2.2. Cadre climatique et hydrologique	9
2.2.1. Climat	9
2.3. Variabilité du climat en Afrique depuis 20 000 ans	11
2.4. Données contemporaines des précipitations et températures en Afrique de l'Ouest	13
2.5. Analyse de la Pluviométrie	13
2.6. Analyse des écoulements	18
2.7. Analyse des Températures	23
2.8. Impact des Changements Climatiques sur les aquifères	24
<b>3. LISTE DES DOCUMENTS CONSULTÉS</b>	<b>30</b>





## LISTE DES ACRONYMES ET DES ABRÉVIATIONS

ABN	Autorité du Bassin du Niger
ABV	Autorité du Bassin de la Volta
ACDI	Agence Canadienne de Développement International
ACMAD	<i>African Centre of Meteorological Application for Development</i> (Centre Africain pour les Applications de la Météorologie au Développement)
ADT	Analyse Diagnostique Transfrontalière
AIEA	Agence Internationale de l'Énergie Atomique
AMCOW	African Ministers' Council on Water
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar
ASTER	Advanced Spaceborne <i>Thermal Emission and Reflection</i>
BAD	Banque Africaine de Développement
BGR	<i>Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe</i> (Institut Fédéral des Géosciences et des Ressources Naturelles)
BRGM	Bureau des Recherches Géologiques et Minières
CCNUCC	Convention Cadre des Nations Unies pour les Changements Climatiques
CCRE	Centre de Coordination des Ressources en Eau de la CEDEAO
CEDEAO	Communauté Économique Des États de l'Afrique de l'Ouest
CEN-SAD	Communauté des États Sahélo-Sahariens
Ci	Continental intercalaire
CILSS	Comité Inter-états de Lutte contre la Sécheresse au Sahel
CNCS	Comité National de Coordination et de Suivi des activités
CRA	Centre Régional AGRHYMET
CT	Continental Terminal
DDC-Suisse	Direction du Développement et de la Coopération - Suisse
DSRP	Document de Stratégie de Réduction de la Pauvreté
ENVISAT	<i>ENVironment SATellite</i>
ERS	<i>European Remote Sensing Satellite</i>
ESA	<i>European Space Agency</i> (Agence Spatiale Européenne)
FAE	Facilité Africaine de l'Eau
FAO	<i>Food &amp; Agriculture Organisation</i> (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture)
FEM	Fonds pour l'Environnement Mondial
FFEM	Fonds Français pour l'Environnement Mondial
FIDA	Fonds International pour le Développement Agricole

GEF	<i>Global Environment Facility</i>
GIRE	Gestion Intégrée des Ressources en Eau
GICRE	Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau
GICRESAIT	Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni /Tanezrouft et du Fleuve Niger
GIS	<i>Geographical Information System</i>
GiZ (ex GTZ)	Agence de Coopération Technique Allemande pour le Développement
IGAD	<i>Inter Governmental Authority for Development</i>
JRC	<i>Joint Research Centre</i>
MCA-WEAP	<i>Multi-Criteria Analysis tool - Water Evaluation and Planning System</i>
MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NEPAD	<i>New Partnership for Africa Development</i>
OMVS	Organisation de Mise en Valeur du Fleuve Sénégal
OSS	Observatoire du Sahara et du Sahel
PANA	Plan d'Action National pour l'Adaptation aux Changements Climatiques
PAS	Programme d'Action Stratégique
PFN	Points Focaux Nationaux du projet
PHI	Programme Hydrologique International
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
SAI	Système Aquifère d'Illemeden
SAR	Synthetic Aperture Radar
SASS	Système Aquifère du Sahara Septentrional
SAT	Système Aquifère de Taoudéni/Tanezrouft
SEI	<i>Stockholm Environment Institute</i>
SIG	Système d'Information Géographique
SRTM	<i>Shuttle RADAR Topographic Mission</i>
TdR	Termes de Référence
UMA	Union du Maghreb Arabe
UNESCO	<i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>
WEAP	<i>Water Evaluation and Planning System</i>

## 1. CONTEXTE

L'Afrique de l'Ouest est dotée de ressources en eau partagées entre plusieurs États, tant au niveau des bassins hydrologiques (Niger, Sénégal, ...) que des systèmes aquifères transfrontaliers tels ceux d'Illemeden (SAI), de Taoudéni/Tanezrouft (SAT) et le système Sénégal-mauritanien (SASM). Si les bassins hydrographiques ont fait l'objet depuis plusieurs décennies d'une attention particulière en matière de connaissance et de règles communes de gestion, il n'en est pas de même pour les systèmes aquifères transfrontaliers. Leurs ressources sont souvent très mal connues et de plus en plus menacées par l'augmentation de : la demande en eau, la variabilité climatique, la dégradation de leur qualité à cause de pollutions d'origines diverses et de l'appel d'eaux profondes parfois très minéralisées.

De plus, la gestion de ces ressources en eau partagées par deux ou plusieurs pays n'est pas concertée. Une première initiative en la matière a vu le jour en 2004, avec l'étude pour une gestion concertée des deux principaux aquifères transfrontaliers (le Continental intercalaire et le Continental Terminal) constituant le Système Aquifère d'Illemeden (SAI), partagé dans sa majeure partie par le Mali, le Niger et le Nigeria sur 500.000 km<sup>2</sup>.

Les ressources en eau du SAI, peu renouvelables, constituent une importante source d'alimentation en eau potable pour les populations de la région. Le modèle mathématique de simulation des écoulements souterrains du système aquifère développé par l'OSS, a permis de mettre en évidence des relations étroites entre le SAI et le fleuve Niger, ainsi qu'avec le Système Aquifère de Taoudéni/Tanezrouft (SAT) situé à l'Ouest du SAI. Un protocole d'accord assorti d'une feuille de route pour la création et la mise en place d'un cadre de concertation pour une gestion optimisée de la ressource a été adopté en mai 2009 par les Ministres en charge de l'eau du Mali, Niger et Nigeria.

Ces ressources en eau souterraines et celles des eaux de surface du fleuve Niger constituent une ressource stratégique de la sous-région de l'Afrique de l'ouest, appelée à jouer un rôle déterminant dans le développement économique et social des pays de la Région. Une étude de l'ensemble des systèmes s'avère nécessaire pour mieux appréhender leurs fonctionnements hydrauliques ainsi que les risques transfrontaliers qui peuvent compromettre les efforts de développement des pays concernés. La connaissance des relations hydrodynamiques et hydrauliques entre les différents aquifères et entre ces aquifères et le delta intérieur du fleuve Niger sont fondamentales pour améliorer la gestion du système hydraulique dans son ensemble, aussi bien au niveau de l'exploitation des ressources de surface que des ressources souterraines.

Une telle gestion, basée sur des informations scientifiques, permettra aux pays d'une part, de combler les lacunes de connaissance afin de mieux coordonner leurs actions et de maîtriser les risques transfrontaliers, et d'autre part d'entrevoir des options de développement basées sur une exploitation durable et rationnelle de ces ressources aux fins d'assurer des meilleures conditions d'existence aux populations et surtout leur fixation dans leur milieu naturel.

Le projet bénéficie, dans sa globalité, des contributions financières de la Facilité Africaine de l'Eau, du Fonds Français pour l'Environnement Mondial, de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique, de l'OSS ainsi que des pays (en nature). La contribution du FEM/PNUE est en cours de mobilisation. Pour la partie du projet assignée au Consultant, le financement provient uniquement de la Facilité Eau.

## 2. CADRE DE L'ÉTUDE

### 2.1. ÉTENDUE DE LA ZONE INTÉRESSÉE PAR LE GICRESAIT

La zone intéressée est comprise entre les longitudes 10° Ouest et 10° Est et les latitudes 10° et 27° Nord (Fig. 1). Elle couvre une superficie de près de 2,6 millions de km<sup>2</sup> (2 629 303 km<sup>2</sup>) partagée entre sept (7) pays que sont l'Algérie (450.925 km<sup>2</sup>, 17%), le Bénin (57.338 km<sup>2</sup>, 2%), le Burkina Faso (130.174 km<sup>2</sup>, 5%), le Mali (1.089.407 km<sup>2</sup>, 41%), la Mauritanie (256.374 km<sup>2</sup>, 10%), le Niger (524.813 km<sup>2</sup>, 20%) et le Nigeria (120.272 km<sup>2</sup>, 5%).

Le système aquifère d'Iullemeden et de Taoudéni / Tanezrouft est le second plus grand aquifère du Continent africain, du même ordre d'étendue que le Système aquifère des Grès de Nubie (2,6 millions de km<sup>2</sup>) partagé par l'Égypte, la Libye, le Soudan et le Tchad.

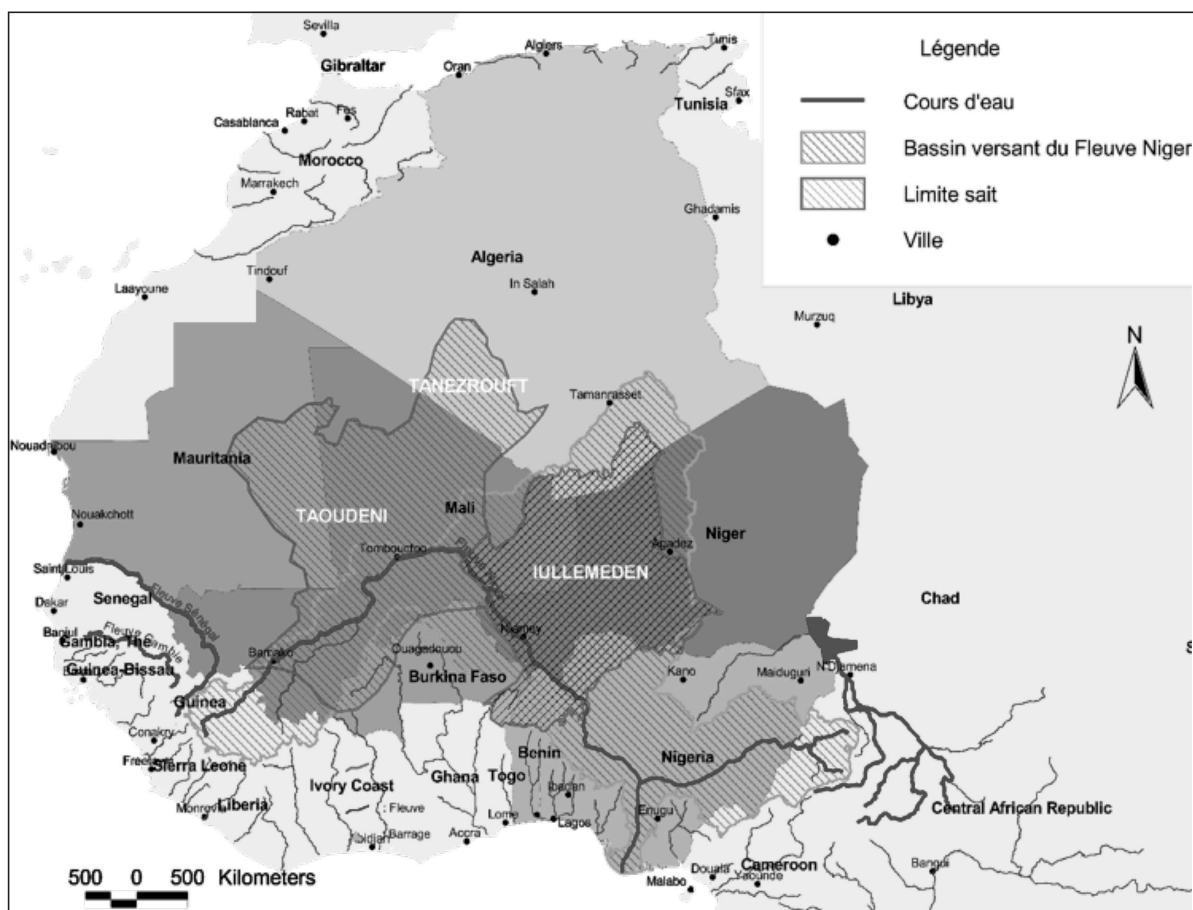


Figure 1: Zone d'intervention du projet GICRESAIT

Ce domaine ne se limite pas aux seules formations géologiques mais intègre les conditions environnementales qui peuvent interférer sur la qualité des eaux des nappes souterraines.

L'approche combinée «ressources en eau souterraine» et «environnement» amène à considérer à la fois :

- La «**zone d'étude**» est la zone d'extension des nappes des systèmes aquifères des formations géologiques du Ci et du CT. Elle couvre 2,6 millions km<sup>2</sup>.
- La «**zone d'intervention**» du projet est la zone élargie comprenant l'essentiel des bassins versants en amont des systèmes aquifères (intégrant certaines formations sédimentaires sous-jacentes en continuité hydraulique) dans une logique de «risque d'importation» d'éventuelles pollutions dans les SAI et SAT par les cours d'eau. Elle couvre 3 millions km<sup>2</sup>.

**Les bassins versants hydrologiques situés en amont** des limites d'extension du Ci et du CT. En effet, l'impluvium sur ces surfaces participe à la recharge des nappes du Ci et du CT par infiltration au niveau des zones d'affleurement, et constitue un important terme du bilan de ces nappes. Sont concernés tous les oueds et fleuves entrant dans le domaine d'extension des aquifères, comme par exemple le fleuve Niger dès son entrée au Mali à l'ouest. Par ailleurs, ces bassins versants «amont» peuvent influencer significativement la qualité de la ressource et la vulnérabilité des nappes du Ci et du CT en cas de présence de sources de pollution qui seraient importées dans le domaine via les cours d'eau.

**Le domaine d'extension géographique des formations sédimentaires aquifères sous-jacentes** au Ci et au CT : il tient compte des phénomènes de drainance verticale à partir de nappes profondes si elles sont présentes sous le Ci et le CT. Il en résulte fréquemment des apports qui soutiennent la ressource en eau exploitée, mais qui peuvent risquer de dégrader sa qualité si l'eau des nappes sous-jacentes a une minéralisation défavorable. Le tracé de la limite nord du domaine d'intervention a été simplifié par rapport au tracé complexe des limites de bassins versants, tout en respectant la logique exposée, car il se situe en milieu extrêmement désertique où les écoulements endoréiques sont mal déterminés.

## 2.2. CADRE CLIMATIQUE ET HYDROLOGIQUE

### 2.2.1. Climat

La région est subdivisée en quatre zones, dont les limites apparaissent sur les cartes isohyètes (Fig. 2) :

- La zone soudanienne avec un climat de type guinéen et des précipitations supérieures à 1200 mm par an et parfois 1500 mm.
- La zone soudano sahélienne avec un climat de type tropical et des précipitations comprises entre 700 et 1200 mm.
- La zone sahélienne avec un climat de type sahélien et des précipitations comprises entre 700 et 200 mm.
- La zone sub-saharienne avec un climat de type subdésertique et des précipitations variant de 200 à moins de 50 mm.

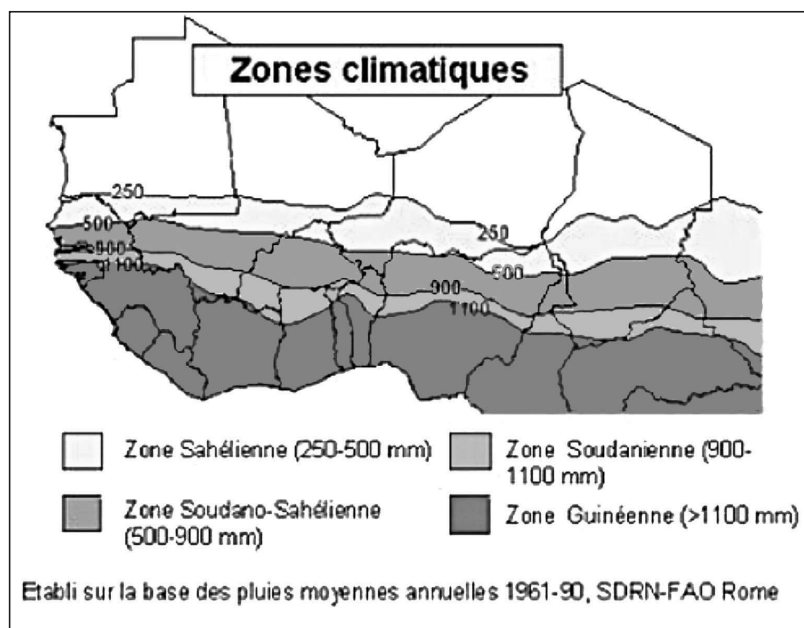


Figure 2 : Zones climatiques en Afrique de l'Ouest

Le régime pluviométrique ouest-africain est sous la dépendance des masses d'air liés à la mousson ouest-africaine (Fig. 3). La mise en place de cette mousson (installation et retrait) est caractérisée par la zone de convergence intertropicale (zone du Front Inter Tropical, FIT), espace de rencontre des alizés (vents chauds et secs soufflant du Nord-Est) avec les masses d'air humide, venant de l'océan atlantique Sud. Le FIT scinde l'année en deux saisons. **Les régions au Sud du front** sont sous le régime de la Mousson sous l'influence des vents alizés du Sud-Ouest chargés d'humidité c'est la saison des pluies (ou «hivernage») qui s'étend au Sahel d'avril à octobre au Sud, et de juillet à septembre au Nord. Les régions situées au **Nord du Front** sont sous le régime de l'alizé continental chaud et sec venant du Nord-Est appelé l'Harmattan : c'est la saison sèche.

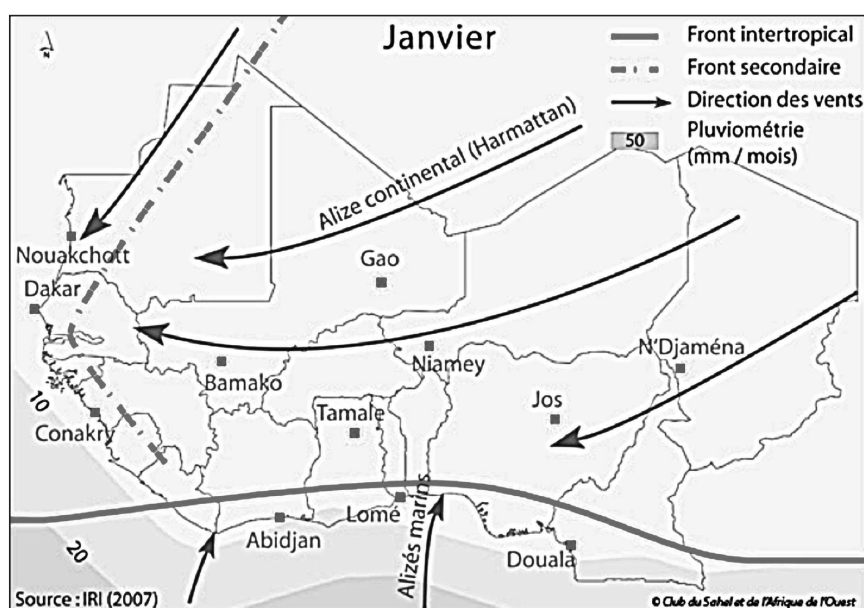
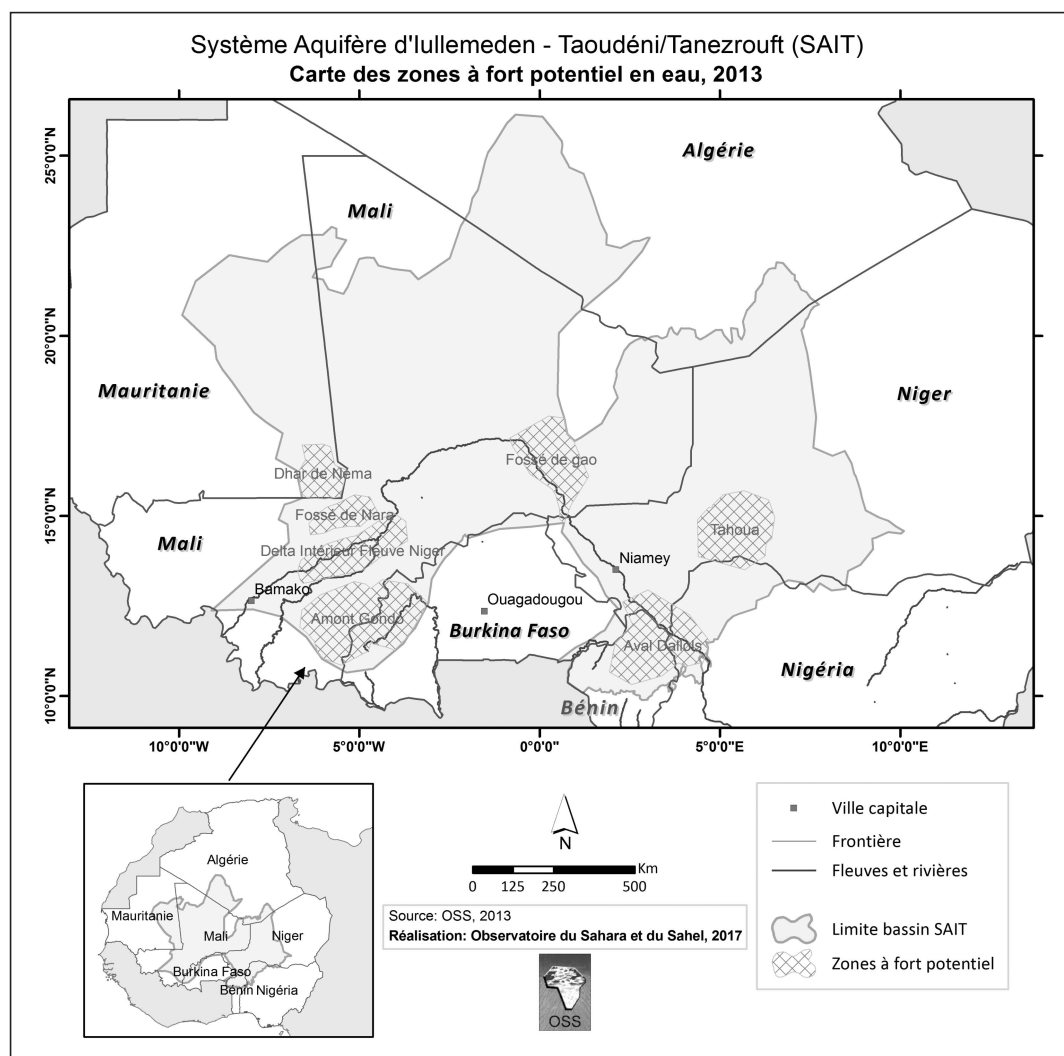


Figure 3 : Circulation des masses d'air en Afrique de l'Ouest

La zone semi-aride, qui comprend essentiellement la bande sahéenne et sahélo-saharienne (Fig. 4), est marquée par une seule saison des pluies allant de juin à septembre. Les zones humides et subhumides plus au sud correspondant au climat soudanien et guinéen, sont, quant à elles, marquées par deux saisons pluvieuses, dont la petite d'octobre à novembre et la grande d'avril à juillet. Le Sahel reçoit la plus grande partie de ses précipitations entre juillet et septembre.



(source : CEDEAO-CSAO/OCDE, 2008).

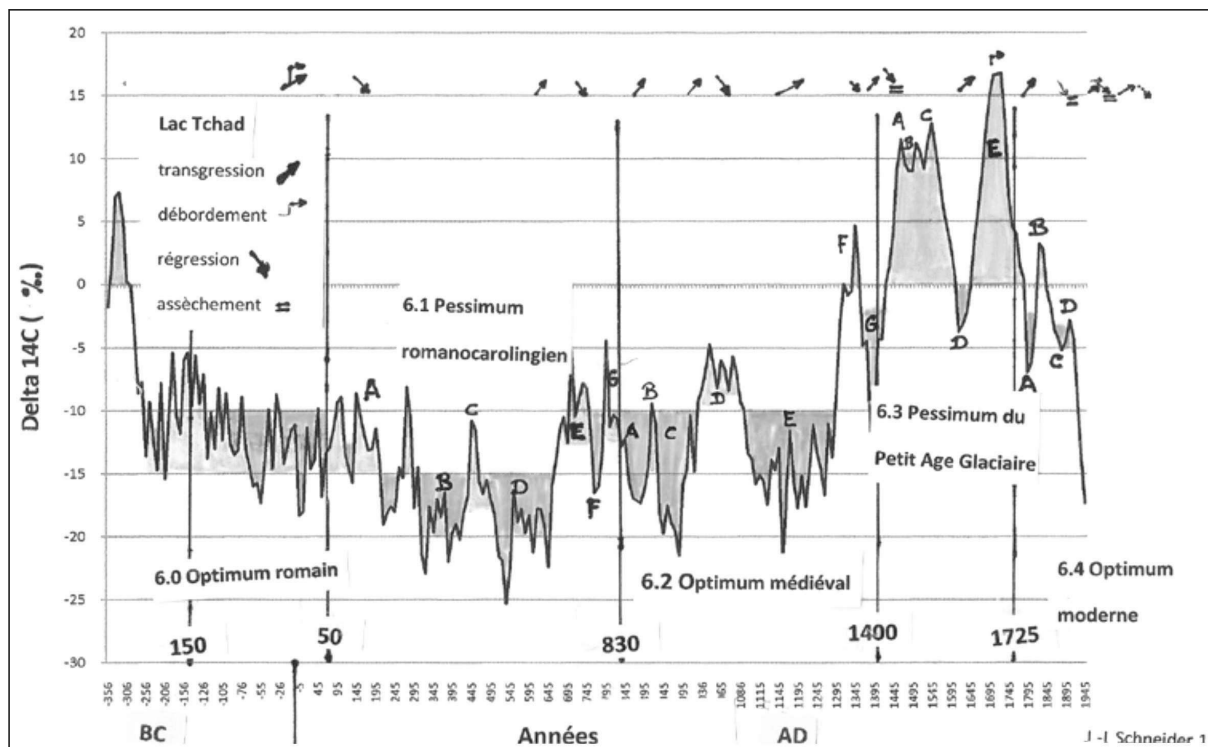
Figure 4: Régions climatiques de l'Afrique de l'Ouest

### 2.3. VARIABILITE DU CLIMAT EN AFRIQUE DEPUIS 20 000 ANS

L'Afrique a traversé des périodes climatiques très différentes par le passé (Fig. 5). Le climat africain contemporain est pratiquement le même que celui qui prévalait il y a 2000 ans, avec des phases plus arides ou plus humides (Fig. 6).

L'époque des premiers grands empires sahéens (X<sup>e</sup> au XIV<sup>e</sup> siècle) correspond à une période arrosée où les conditions de peuplement étaient plus propices qu'à l'heure actuelle.





(Source : J.L. Schneider, 2011)

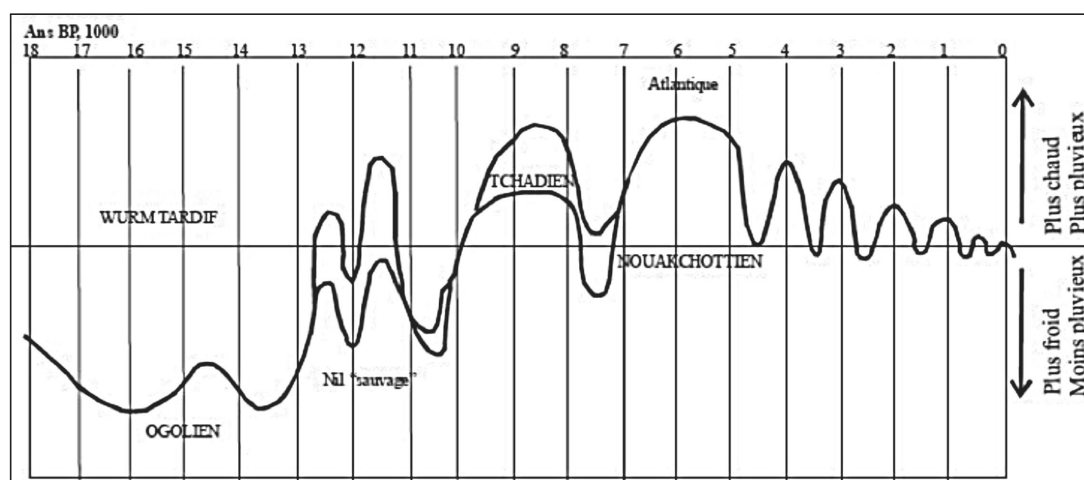
Figure 5 : Séquences climatiques de l'ère chrétienne

BC : Before Christ. BP : Before Present (année de référence 1950). AD : Anno Domini (Après Jésus-Christ)

Au début du XIX<sup>e</sup> siècle en revanche, une période aride touche le continent durant quelques décennies. L'écoulement du Nil diminue fortement et le lac Tchad s'assèche.

Le siècle passé n'échappe pas à ces fluctuations. Après une période sèche de courte durée, s'installe une phase humide jusque dans les années 1960.

La décennie 1970-1980 marque à nouveau une aridification du climat qui se fera lourdement ressentir par les populations.



(source : Leroux, 1992)

Figure 6 : Évolution climatique en Afrique depuis 18 000 ans

Avant la fin de l'ère glaciaire (-18 000 ans), le continent était quasiment désertique. Une période humide s'est ensuite installée entre -12 000 et -5 000 ans. Elle a fait disparaître la quasi-totalité des zones arides et permis le développement de l'agriculture et de l'élevage dans la partie actuelle de l'Ouest du Sahara. L'existence d'un gigantesque lac Tchad à l'Holocène moyen (il y a plus de 6000 ans) atteste de ces fluctuations historiques.

## 2.4. DONNÉES CONTEMPORAINES DES PRÉCIPITATIONS ET TEMPÉRATURES EN AFRIQUE DE L'OUEST

Les données pluviométrique de 65 stations professionnelles (météorologique, agricole) et des données de température minimale, et maximale de 30 stations météorologiques ont été exploitées (Fig. 7).

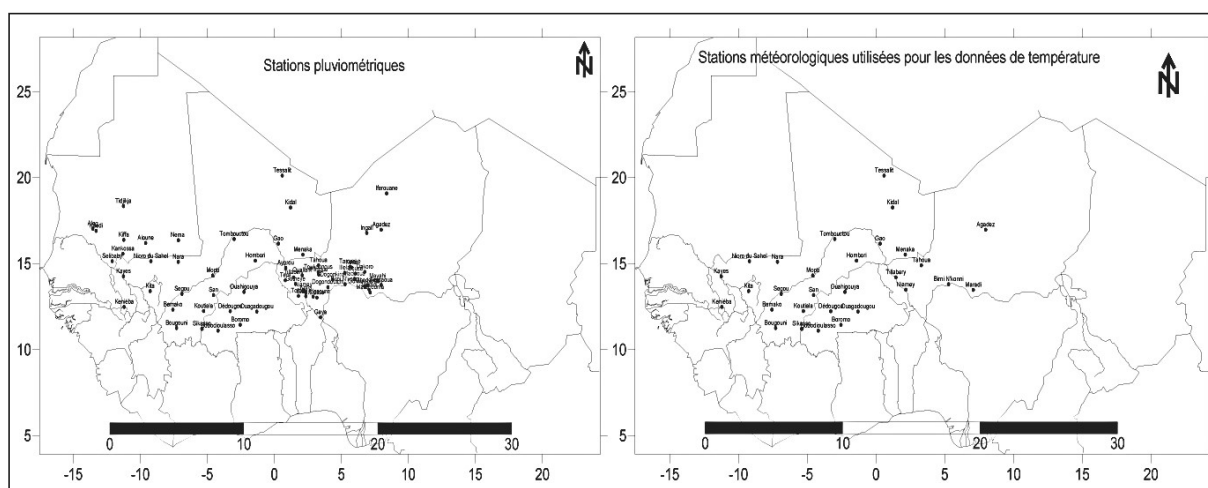


Figure 7 : Stations pluviométriques et météorologiques utilisées pour l'étude

(Source : Centre Régional AGRHYMET)

En vue de faire ressortir les grands traits de la pluviométrie en terme de variabilité, l'analyse de la pluviométrie a porté sur les tendances et la variabilité des séries des cumuls pluviométriques annuels de 1960 à 2010.

L'analyse de la température minimale et maximale a porté sur la tendance et la variabilité des séries des moyennes de températures minimales et maximales annuelles de 1960 à 2010.

La période de référence utilisée est la normale 1961-1990, qui est la référence utilisée par la communauté scientifique dans les études sur le changement climatique.

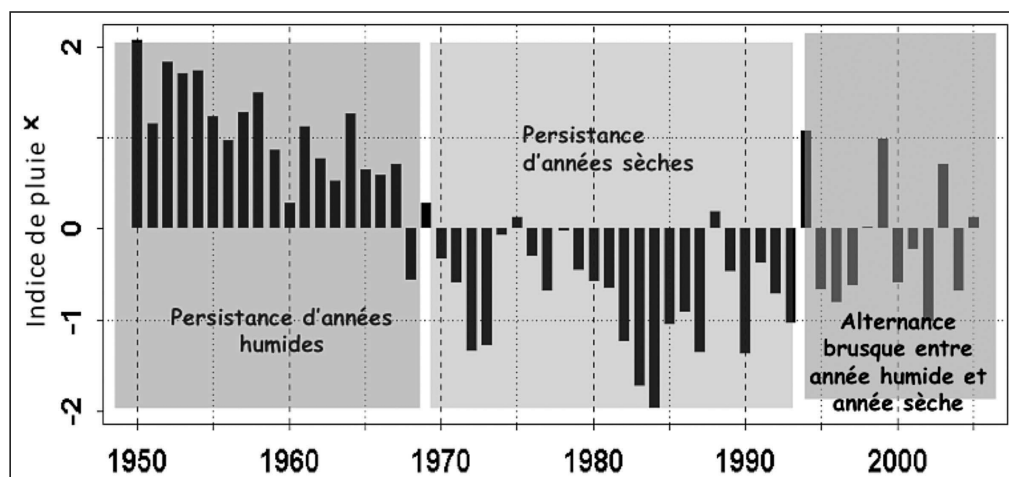
## 2.5. ANALYSE DE LA PLUVIOMÉTRIE

### Tendances et variabilité des cumuls pluviométriques annuels

L'Afrique de l'Ouest a connu une forte diminution des précipitations durant les 50 dernières années avec une rupture nette dans les années 1968-1972 (Le barbé *et al.* 1997 ; Nicholson, 2001 ; Abdou *et al.* 2008). La réduction importante des précipitations apparaît clairement au Sahel, avec des épisodes de forts déficits en 1972-73, 1982-84 et 1997. Cette tendance s'est

traduite par un glissement des isohyètes de 200 km vers le Sud et un processus historique d'aridification du climat dans la zone.

L'analyse de l'Indice des Pluies du Sahel (IPS), calculé sur la base des données de 600 stations suivies par le centre régional AGRHYMET, met en évidence trois périodes bien distinctes (Fig. 8) :



(Source : bulletin spécial CILLS/AGRHYMET)

Figure 8 : Indice de pluie (IPS) du Sahel (période 1950-2006)

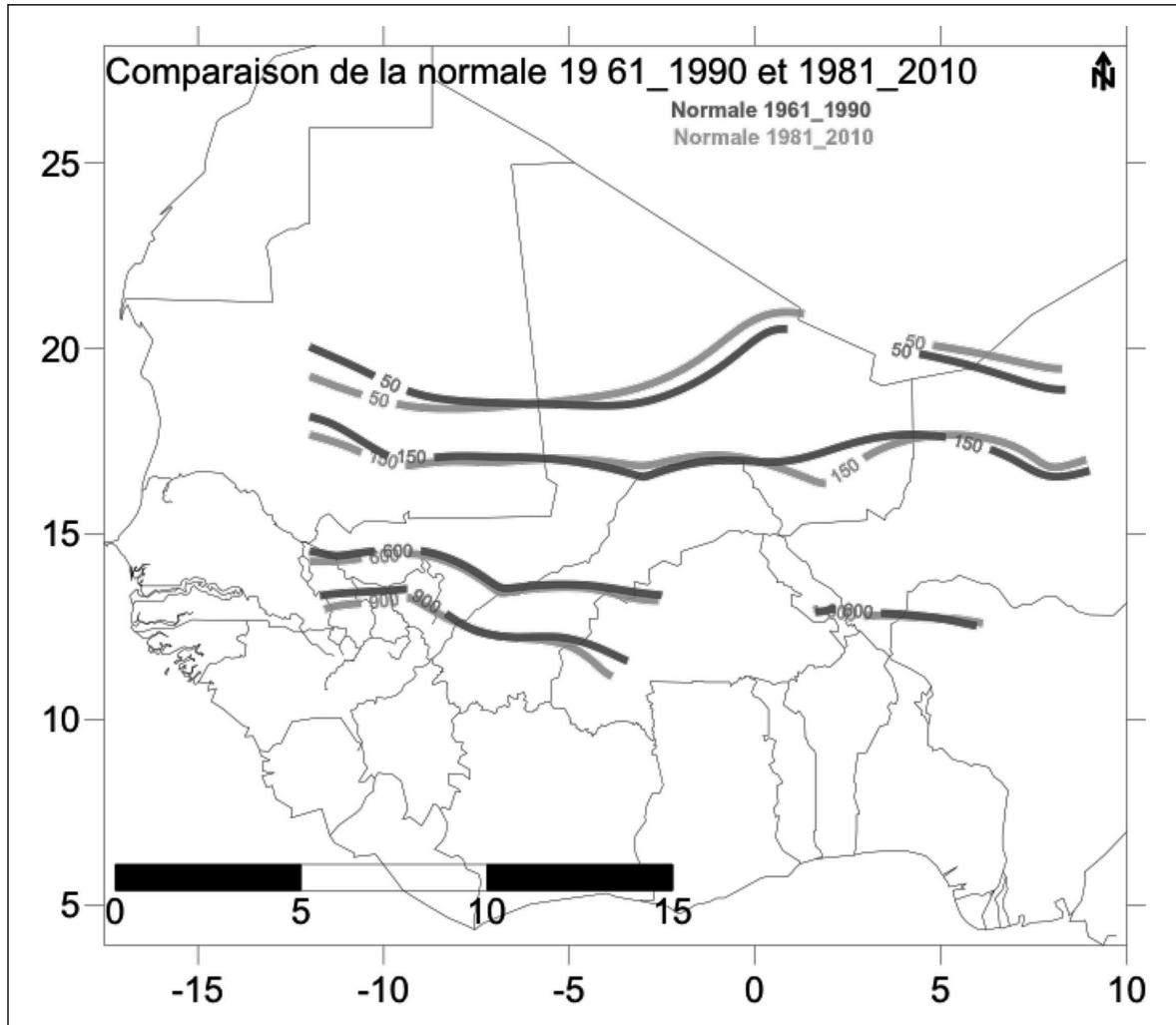
- La première, de 1950 à 1969, est caractérisée par une persistance d'années humides.
- La deuxième, de 1970 à 1993, par une persistance de plus de vingt années sèches.
- La troisième de 1994 à nos jours, est marquée par une alternance rapprochée d'années humides et sèches avec une tendance vers des précipitations proches de la première période lors des années humides.

Les années 1970 marquent ce qui est communément appelé la rupture climatique au Sahel. C'est ainsi aussi que serait apparu le terme «*Changement*» pour remplacer celui de «*variation*», lorsqu'on parle du climat (sic !!!!). Cette tendance vers une diminution des précipitations s'est traduite par un glissement des isohyètes de 200 km vers le Sud et un processus historique d'aridification du climat dans la zone.

Cependant, il n'est pas du tout évident que le changement de régime pluviométrique survenu pendant les décennies passées se confirme. En effet, depuis le milieu des années 1990, **un retour à de meilleures conditions pluviométriques** est notable, notamment dans le Sahel continental. Ceci est montré au cours des 15 dernières années par le glissement des isohyètes en chemin inverse (Fig. 9). En effet, sur cette carte des isohyètes :

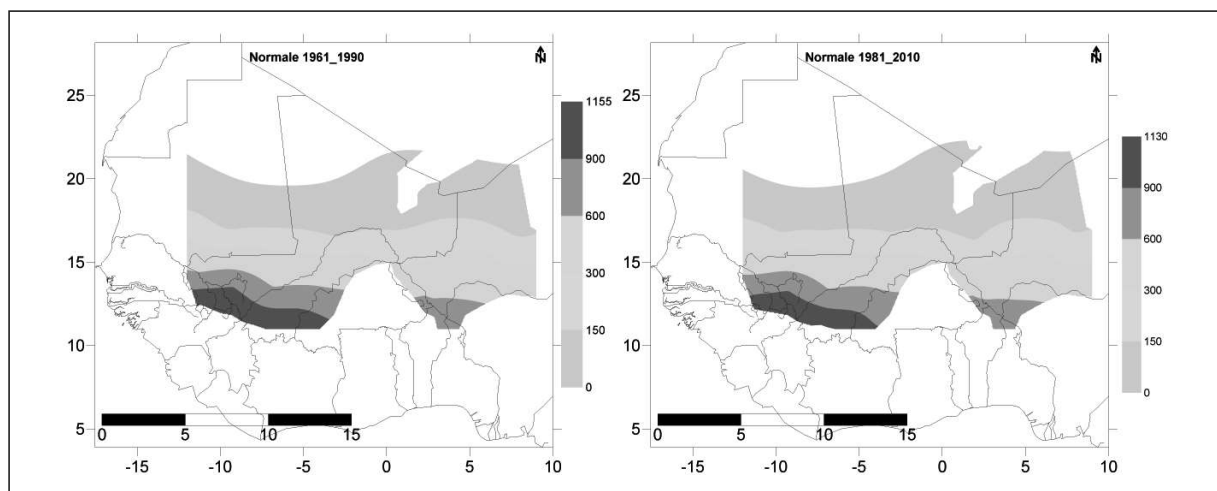
- Les isohyètes 50 et 150 mm de la normale 1981-2010 (Fig. 10b) se caractérisent dans la zone saharienne et sahélo-saharienne du Mali, Niger et Algérie (par extrapolation) par une légère remontée vers le Nord par rapport à la normale 1961 – 1990 (Fig. 10a).
- Ailleurs, toutes les isohyètes des deux normales sont soit équivalentes à la normale 1981 - 2010 soit légèrement en dessous de la normale 1961-1990.

il n'y a pratiquement aucun écart entre les isohyètes de la période 1961–1990 par rapport à celles de la période 1981–2010.



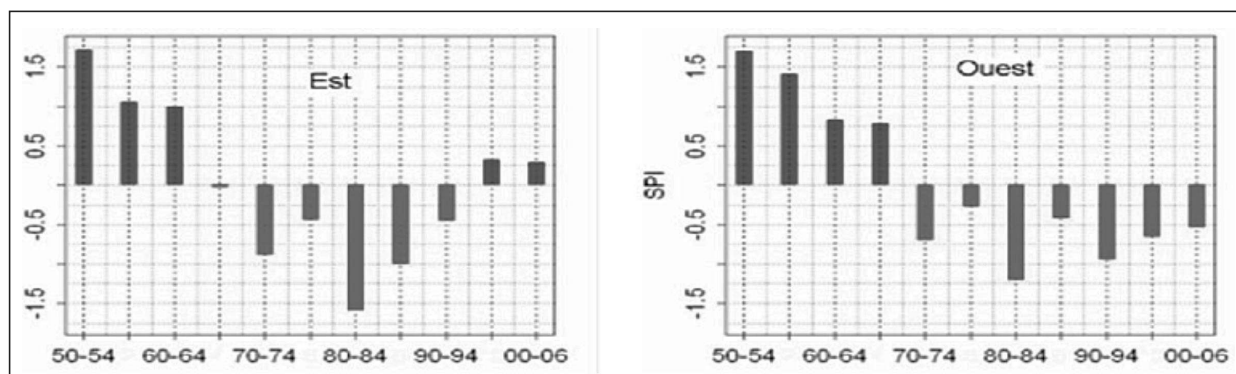
(Source : AGRHYMET)

Figure 9 : Comparaison des isohyètes 50, 150, 600 et 900 mm de la normale 1961-1990 et de la normale 1981-2010



(a) (b)  
Figure 10 : Représentation de la normale 1961-1990 et 1981-2010

L'alternance entre années humides et années sèches, observée ces dernières années au niveau général du Sahel, cache une tendance climatologique nuancée entre les parties Ouest et Est. Le retour à des conditions plus humides est plus marquée dans la partie Est du Sahel que dans la partie Ouest (fig. 11).



(Source : Lebel et Ali, 2009)

Figure 11 : Indice de pluie pour les parties Est et Ouest du Sahel (période 1950-2006) (Les valeurs des indices annuels sont des moyennes calculées par période de cinq ans pour mieux ressortir les grandes tendances)

Dans ce contexte, il n'est point judicieux de continuer à considérer un indice global et d'en déduire une caractéristique globale de la pluviométrie pour le Sahel : il est nécessaire de distinguer la partie Est de la partie Ouest.

### Pluie décennale

La pluie a été représentée sous forme cartographique pour cinq décennies (Fig. 12) : 1960-1969, 1970-1979, 1980-1989, 1990-1999 et 2000-2009, pour dégager les périodes humides et sèches ainsi que la tendance des conditions pluviométriques.