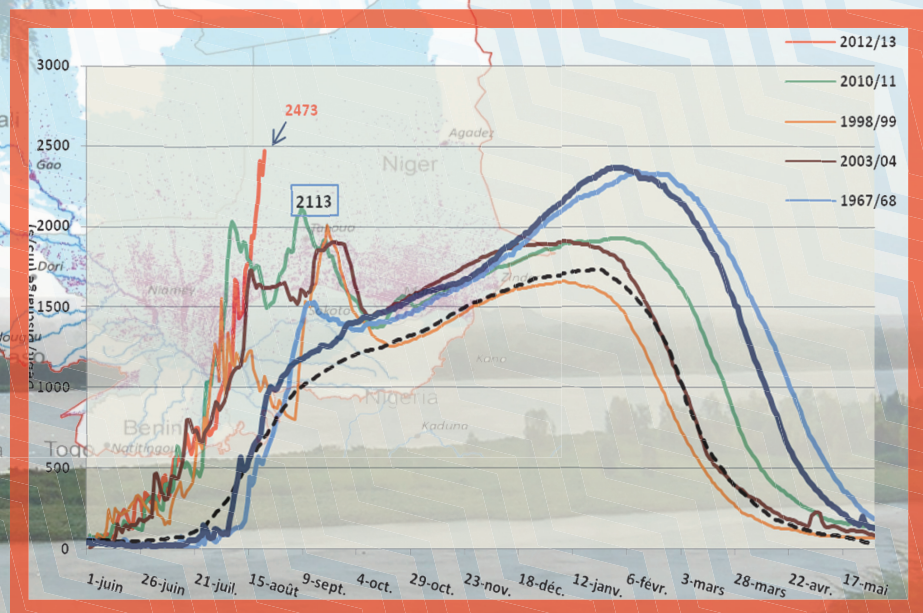




GICRESAIT | GESTION INTÉGRÉE ET CONCERTÉE DES RESSOURCES
EN EAU DES SYSTÈMES AQUIFÈRES D'ILLEMEDEN, DE TAOUDÉNI-
TANEZROUFT ET DU FLEUVE NIGER

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'ILLEMEDEN, 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

LISTE DES ACRONYMES ET DES ABRÉVIATIONS	5
1. CONTEXTE	7
2. CADRE DE L'ETUDE	8
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
3. LISTE DES DOCUMENTS CONSULTÉS	30

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 & 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

<i>GEF</i>	<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'Iullemeden, de Taoudéni /Tanezrouft et du Fleuve Niger
<i>GIS</i>	<i>Geographical Information System</i>
GiZ (ex GTZ)	Agence de Coopération Technique Allemande pour le Développement
<i>IGAD</i>	<i>Inter Governmental Authority for Development</i>
<i>JRC</i>	<i>Joint Research Centre</i>
<i>MCA-WEAP</i>	<i>Multi-Criteria Analysis tool - Water Evaluation and Planning System</i>
<i>MODIS</i>	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
<i>NASA</i>	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
<i>NEPAD</i>	<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'Iullemeden
SAR	Synthetic Aperture Radar
SASS	Système Aquifère du Sahara Septentrional
SAT	Système Aquifère de Taoudéni/Tanezrouft
<i>SEI</i>	<i>Stockholm Environment Institute</i>
SIG	Système d'Information Géographique
<i>SRTM</i>	<i>Shuttle RADAR Topographic Mission</i>
TdR	Termes de Référence
UMA	Union du Maghreb Arabe
<i>UNESCO</i>	<i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>
<i>WEAP</i>	<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'Iullemeden (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'Iullemeden (SAI), partagé dans sa majeure partie par le Mali, le Niger et le Nigeria sur 500.000 km².

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 km² (2 629 303 km²) partagée entre sept (7) pays que sont l'Algérie (450.925 km², 17%), le Bénin (57.338 km², 2%), le Burkina Faso (130.174 km², 5%), le Mali (1.089.407 km², 41%), la Mauritanie (256.374 km², 10%), le Niger (524.813 km², 20%) et le Nigeria (120.272 km², 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 km²) partagé par l'Égypte, la Libye, le Soudan et le Tchad.

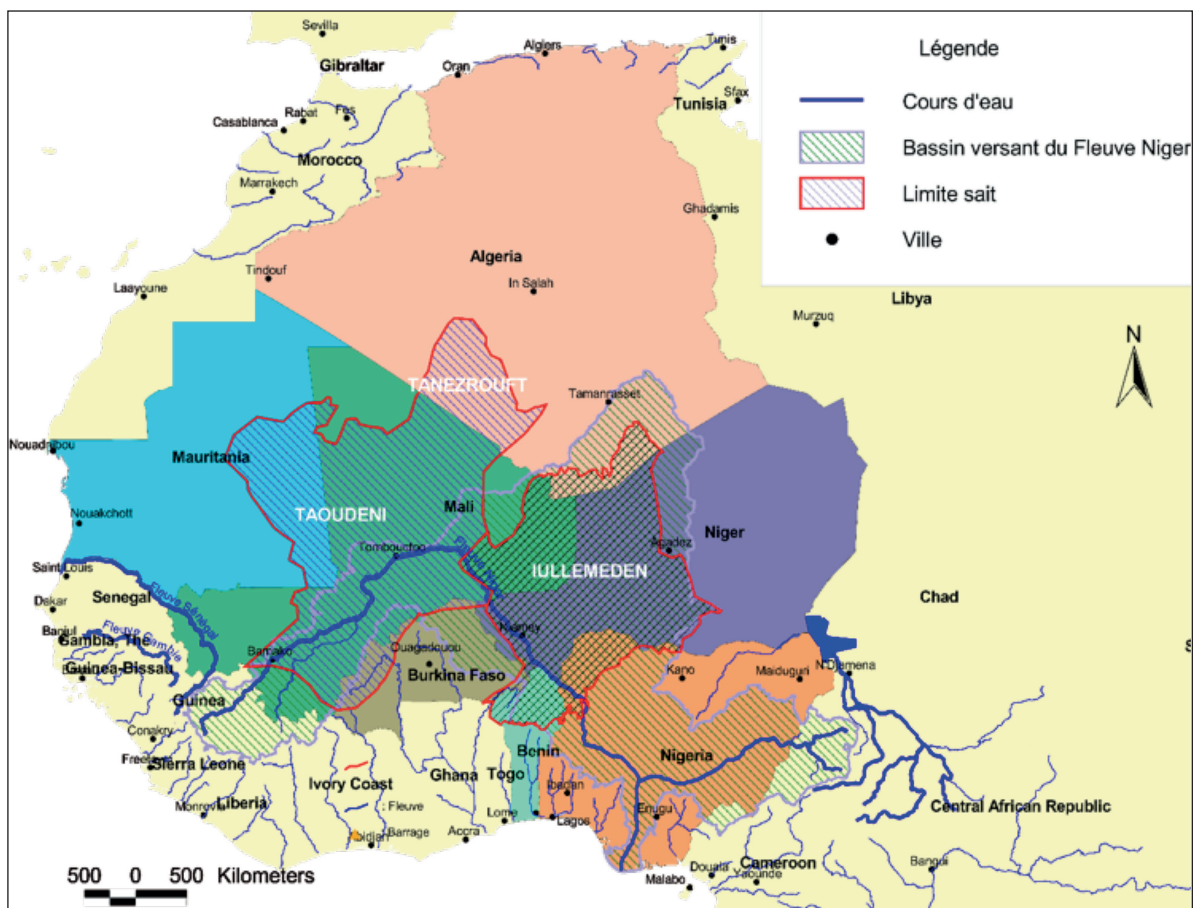


Figure 1: Zone d'intervention du projet GICRESAIT

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 km².
- 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 km².

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.

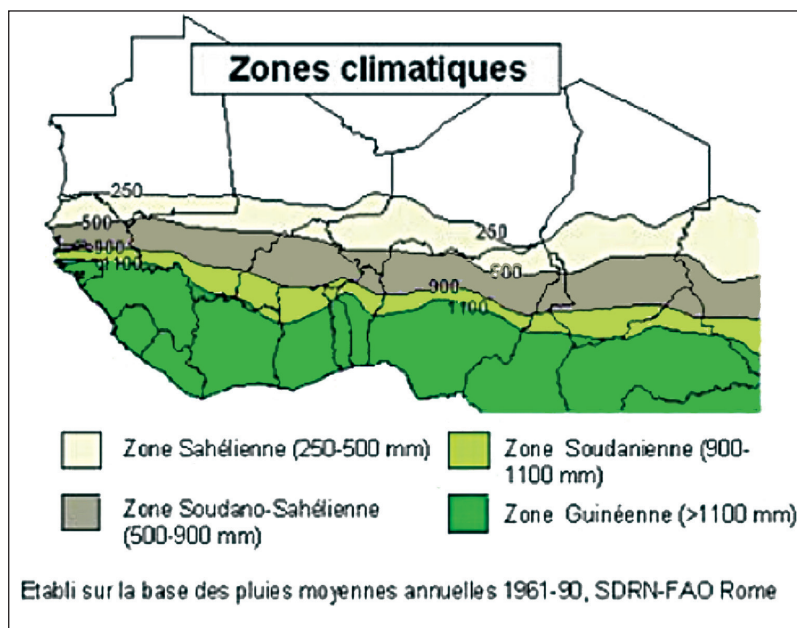


Figure 2 : Zones climatiques en Afrique de l'Ouest

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.

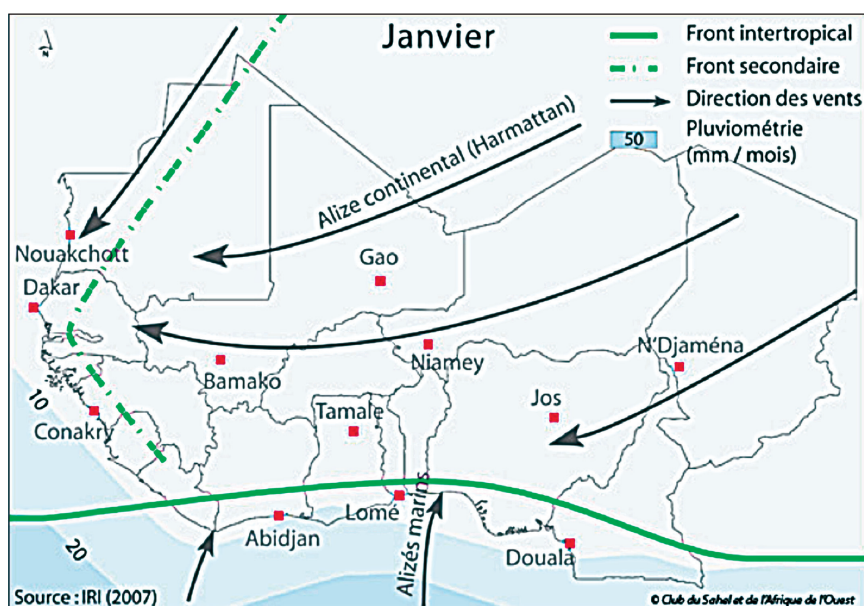
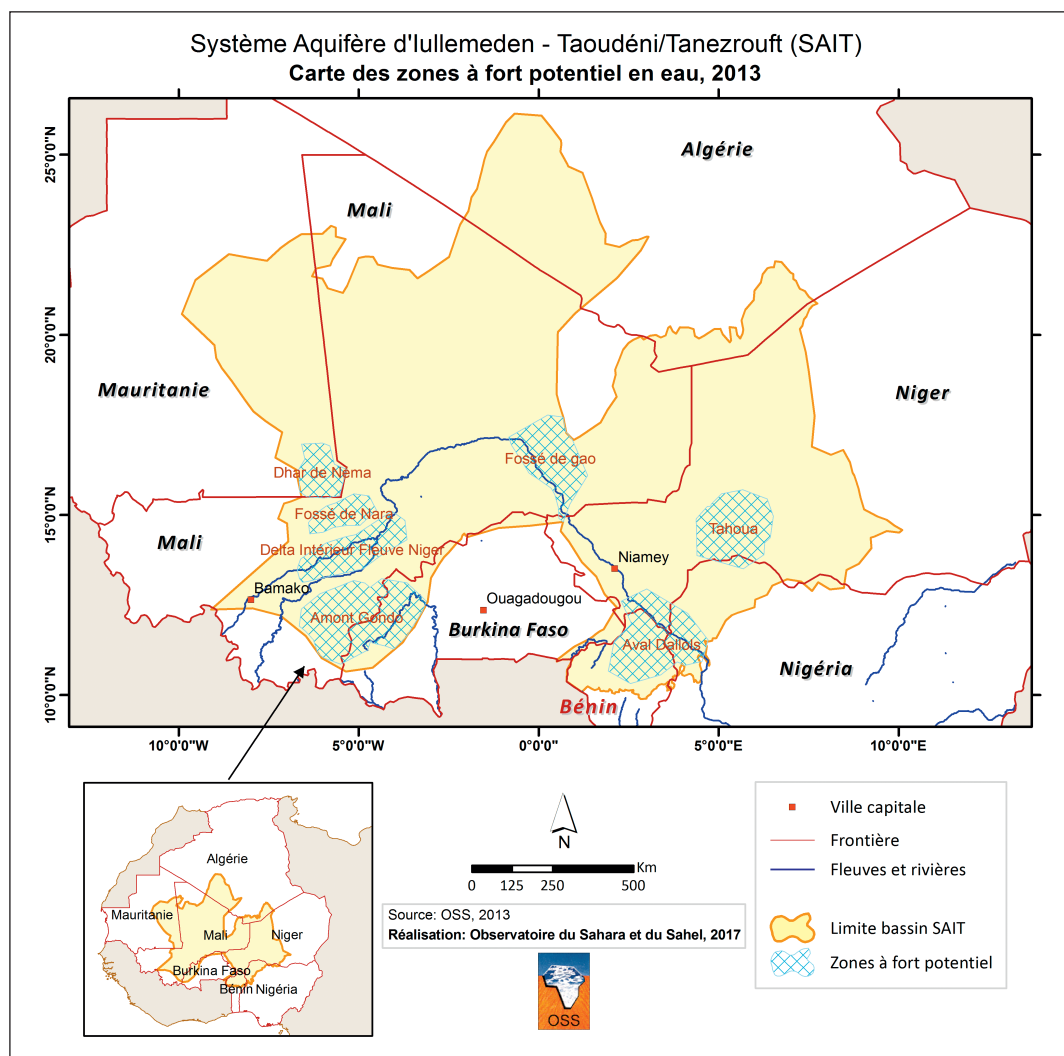


Figure 3 : Circulation des masses d'air en Afrique de l'Ouest

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.



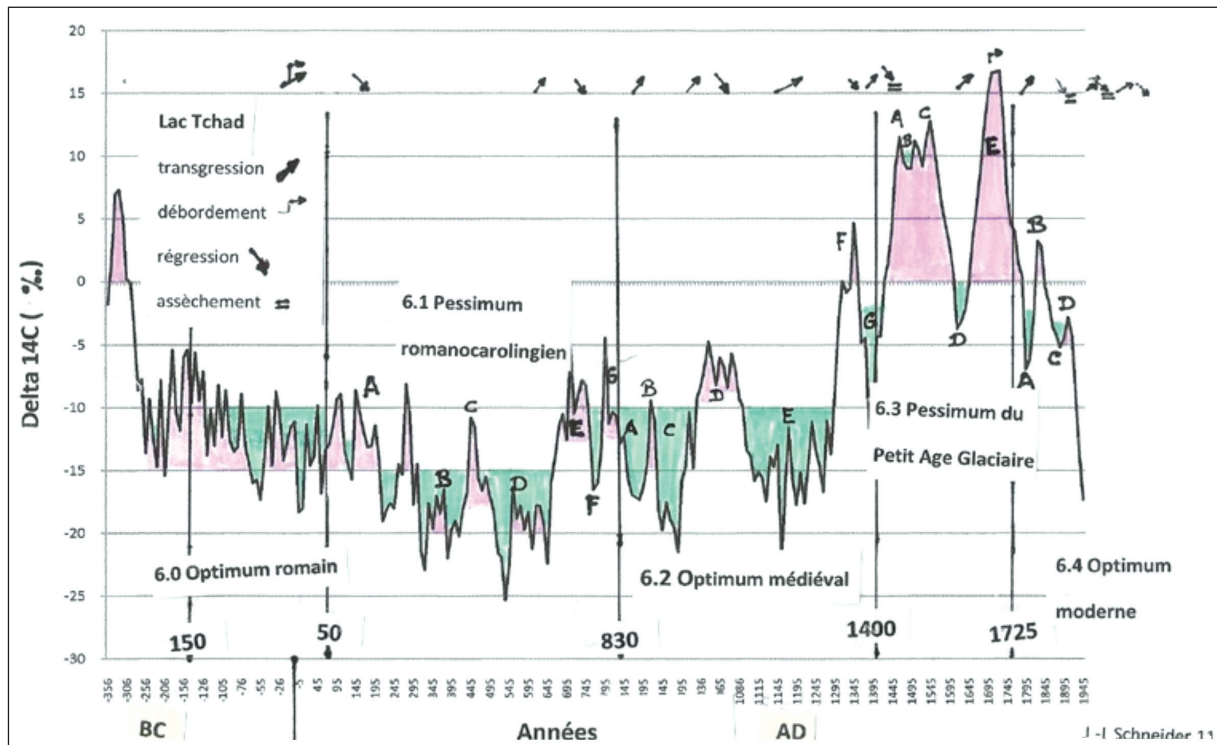
(source : CEDEAO-CSAO/OCDE, 2008).

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^e au XIV^e siècle) correspond à une période arrosée où les conditions de peuplement étaient plus propices qu'à l'heure actuelle.



(Source : J.L. Schneider, 2011)

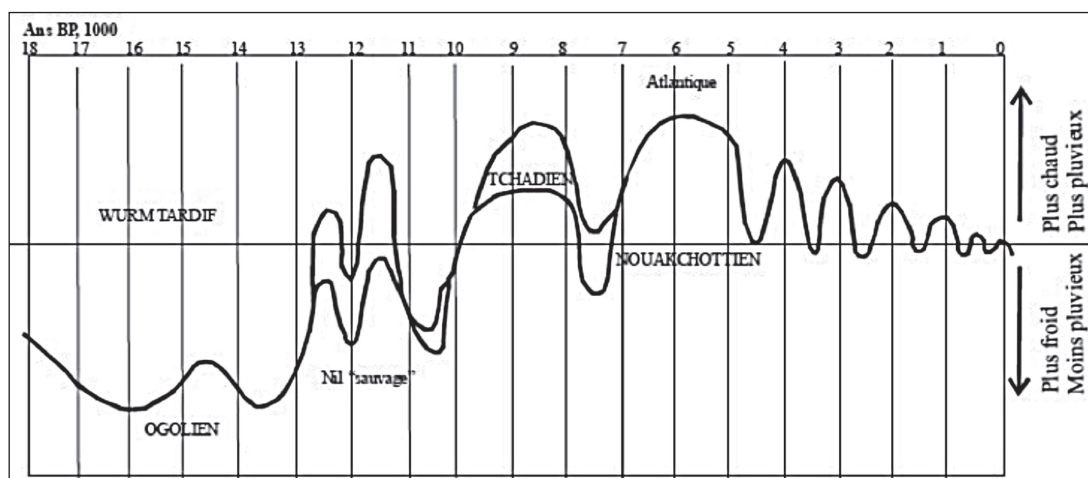
Figure 5 : Séquences climatiques de l'ère chrétienne

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

Au début du XIX^e 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. DONNEES CONTEMPORAINES DES PRECIPITATIONS ET TEMPERATURES 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).

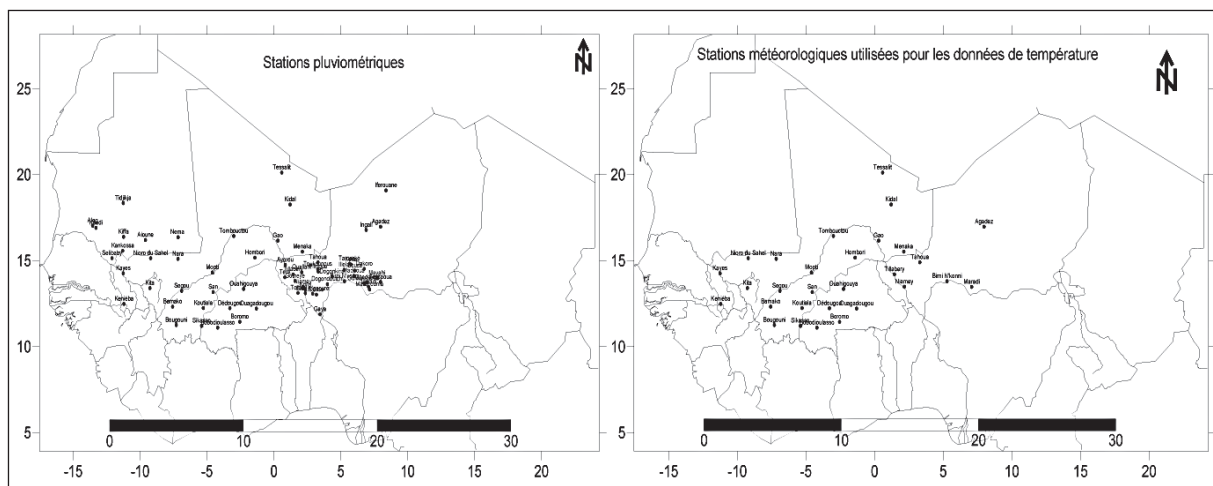


Figure 7 : Stations pluviométriques et météorologiques utilisées pour l'étude

(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.

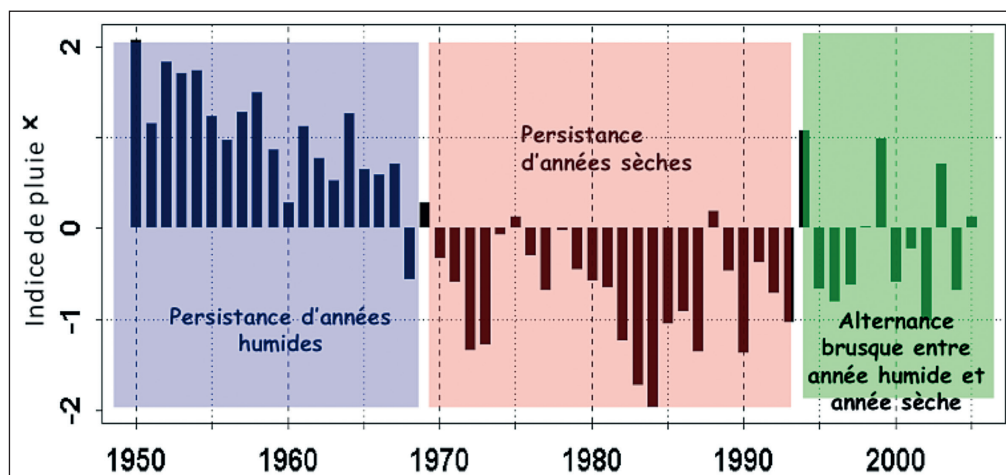
2.5. ANALYSE DE LA PLUVIOMÉTRIE

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 CILLSI/AGRHYMET)

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

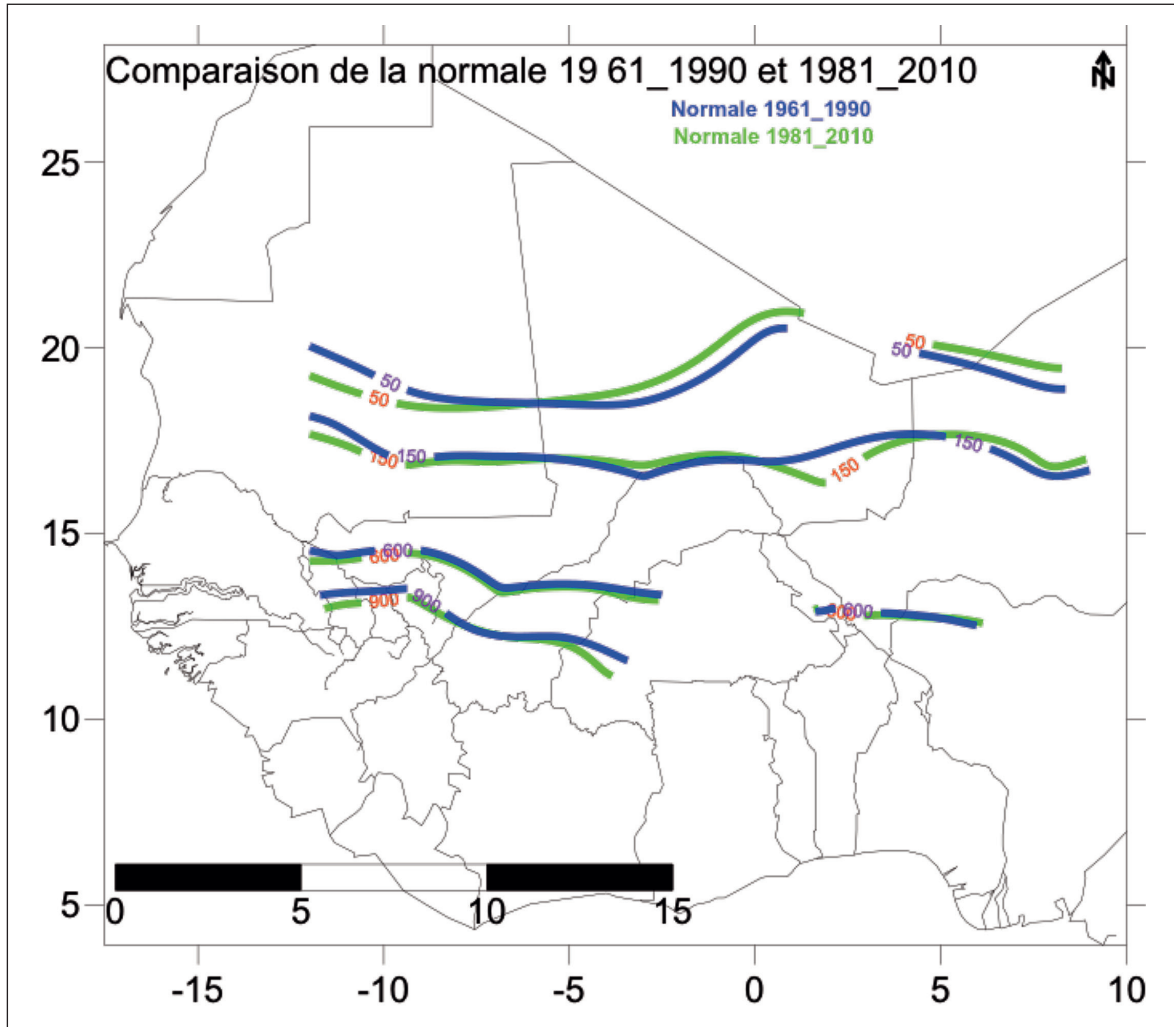
- La première, de 1950 à 1969, est caractérisée par une persistance d'années humides.
- La deuxième, de 1970 à 1993, par une persistance de plus de vingt années sèches.
- La troisième de 1994 à nos jours, est marquée par une alternance rapprochée d'années humides et sèches avec une tendance vers des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

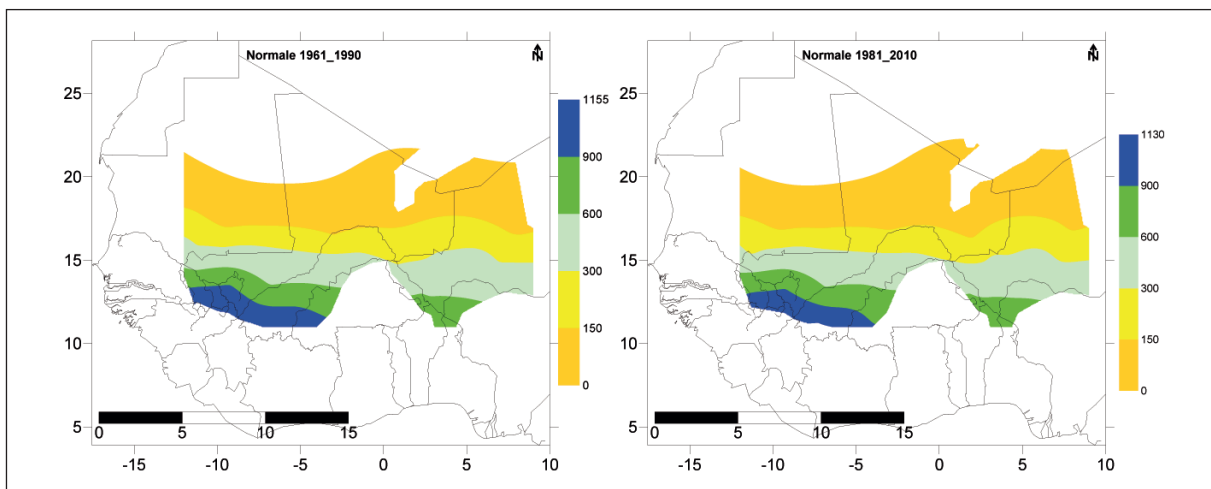
- Les isohyètes 50 et 150 mm de la normale 1981-2010 (Fig. 10b) se caractérisent dans la zone saharienne et sahélo-saharienne du Mali, Niger et Algérie (par extrapolation) par une légère remontée vers le Nord par rapport à la normale 1961 – 1990 (Fig. 10a).
- Ailleurs, toutes les isohyètes des deux normales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

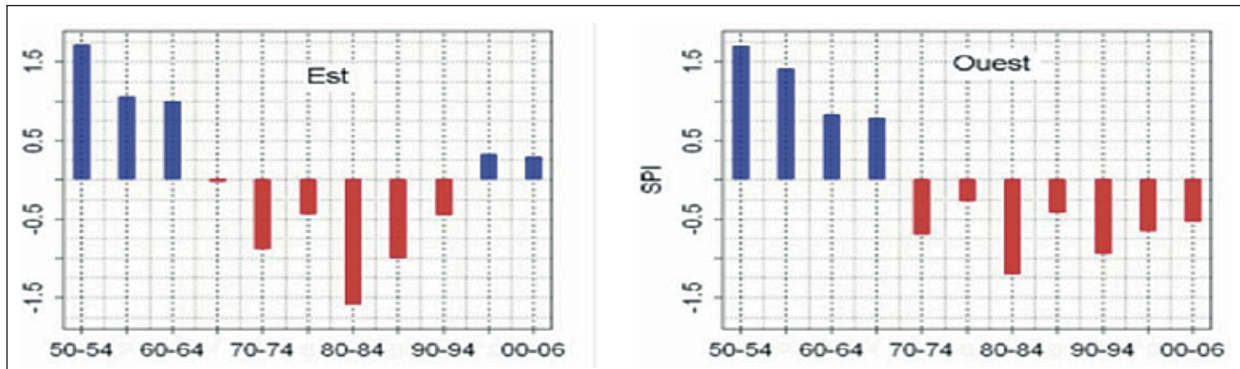


(a)

(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.

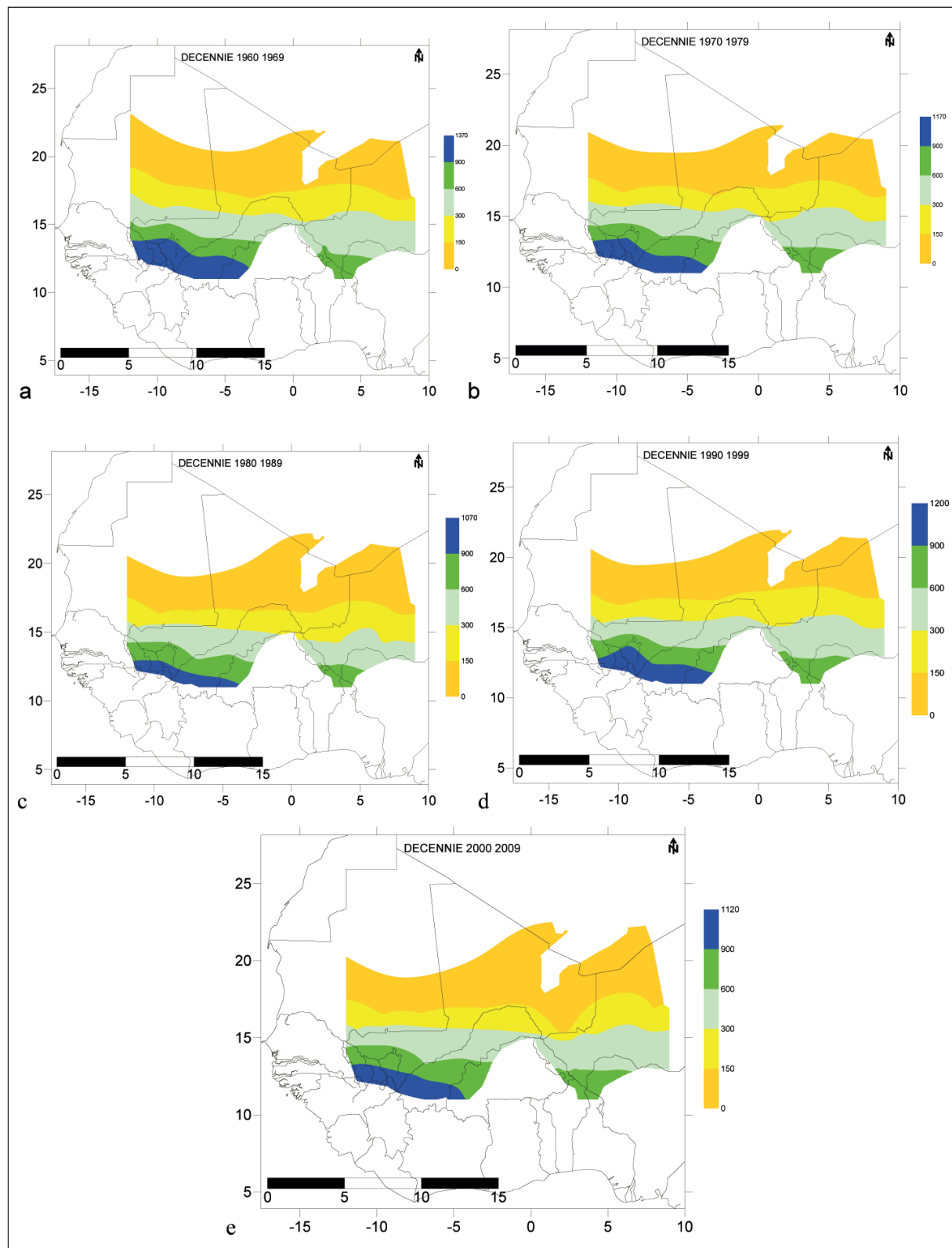


Figure 12 : Spatialisation de la pluviométrie décennale de 1960 à 2010

Pluies exceptionnelles de 2012

En août-septembre 2012, des pluies exceptionnelles se sont concentrées en un laps de temps, en Afrique de l'Ouest notamment au Burkina Faso, au Niger, au Sénégal :

- **A la station hydrométrique de Niamey** : le mois d'août concentre à lui seul plus de la moitié de ces précipitations (327 mm contre une hauteur moyenne mensuelle de l'ordre de 160 mm à Niamey), enregistrées en quasi-totalité dans le courant des deux premières décades du mois. Il faut également noter la journée particulièrement pluvieuse du 18 août dans la région, a été enregistré une hauteur de précipitations de 119 mm enregistrée au poste de Niamey-Aéroport.
- **Du Nord Cameroun jusqu'au Sénégal** : la concomitance de fortes précipitations signalées autour de la même date du 18 août 2012 (156 mm en moins de 2 h à Dakar le 25-08-2012).
- **Au Burkina Faso (provinces de Soum, Oudalan et Yagha)** : des cumuls de précipitations de 100 à 160mm en 1 à 5 jours (deux fois en un mois dans certaines localités) ont été enregistrés dans toutes les provinces de la portion nationale du bassin du Niger au Burkina Faso.
- **Au Burkina Faso (provinces de Séno et Yagha)**, avec des hauteurs de précipitations mensuelles variant entre 200 à 320 mm au mois d'août et de 150 à 200 mm en septembre 2012.
- **Au Burkina Faso** : le cumul de précipitations au 30 septembre 2012 dépasse 750 mm dans certaines localités (pour des pluies moyennes annuelles qui atteignent rarement les 600mm dans la région).

Impact des pluies exceptionnelles de 2012 sur le régime du fleuve Niger

La station hydrométrique de Niamey sur le fleuve Niger est caractéristique des écoulements du Niger Moyen entre Ansongo au Mali et Malanville au Bénin. Les écoulements sont influencés par les apports des affluents de la rive droite (partie du bassin versant du Niger se trouvant au Burkina Faso) et de ceux du haut bassin (vidange de la plaine du Delta intérieur).

La crue associée aux apports des affluents du Burkina est appelée crue locale à cause de son caractère localisé dans le temps et dans l'espace, par opposition à la deuxième crue appelée crue malienne (ou soudanienne) qui est due à des apports lointains venant du haut bassin du Niger (Guinée et Mali).

Le tableau 1 présente les valeurs caractéristiques de la crue en cours à la station hydrométrique du Niger à Niamey, en comparaison avec celles enregistrées depuis le début des observations en 1929 à cette station, pendant les années les plus humides connues de la sous-région.

Année hydrologique	Qmax. (m ³ /s) Juillet	Qmax. (m ³ /s) Août	Qmax. (m ³ /s) septembre	Qmax. (m ³ /s) annuel	Observation
1967/1968	98,7 (le 25-7-67)	959 (le 31-8-67)	1 531 (le 13-9-67)	2 337 (le 10-2-68)	Année la plus humide jamais enregistrée depuis le début des observations en 1929
1969/1970	141 (le 25-7-69)	1 078 (le 31-8-69)	1 402 (le 30-9-69)	2 365 (le 3-2-70)	Débit maximum annuel le plus élevé de la période humide d'avant 1970
1998/1999	1 249 (le 29-7-98)	1 428 (le 1-8-98)	1 989 (le 19-9-98)	1 989 (le 19-9-98)	Année la plus humide des 4 dernières décennies de la période sèche dans la sous-région
2010/2011	1 262 (le 31-7-10)	2 030 (le 6-8-10)	2 120 (le 7-9-10)	2 120 (le 7-9-10)	Les débits maximums mensuels de juillet à septembre sont les plus forts jamais enregistrés en 3 mois successifs à Niamey depuis 1929
2011/2012	957 (le 31-7-12)	2 473 (le 21-8-10)			Le débit maximum enregistré le 21 Août 2012 est le plus fort jamais enregistré à cette station depuis le début des observations en 1929

Tableau 1 : Débits du Niger à Niamey pendant les années humides exceptionnelles

La valeur du débit de pointe (2473 m³/s) enregistrée le 19 août 2012 est la plus forte jamais enregistrée à la station hydrométrique de Niamey, depuis le début des observations en 1929. La montée de la crue a par ailleurs été très rapide, comparativement aux années antérieures, puisqu'on est passé d'un débit de 1000 à 2473 m³/s en une semaine.

Le 21 août 2012, la pointe de la crue a atteint la cote de 617 cm à l'échelle de la station hydrométrique de Niamey, pour un débit de **2473 m³/s** (mesuré à l'ADCP, Fig. 14). Sur le plan statistique, cette valeur du débit de pointe de la crue à une **période de retour de près de 125 ans**. En revanche, en se référant aux écoulements d'août, cette valeur a une récurrence supérieure à la bicentennale humide.

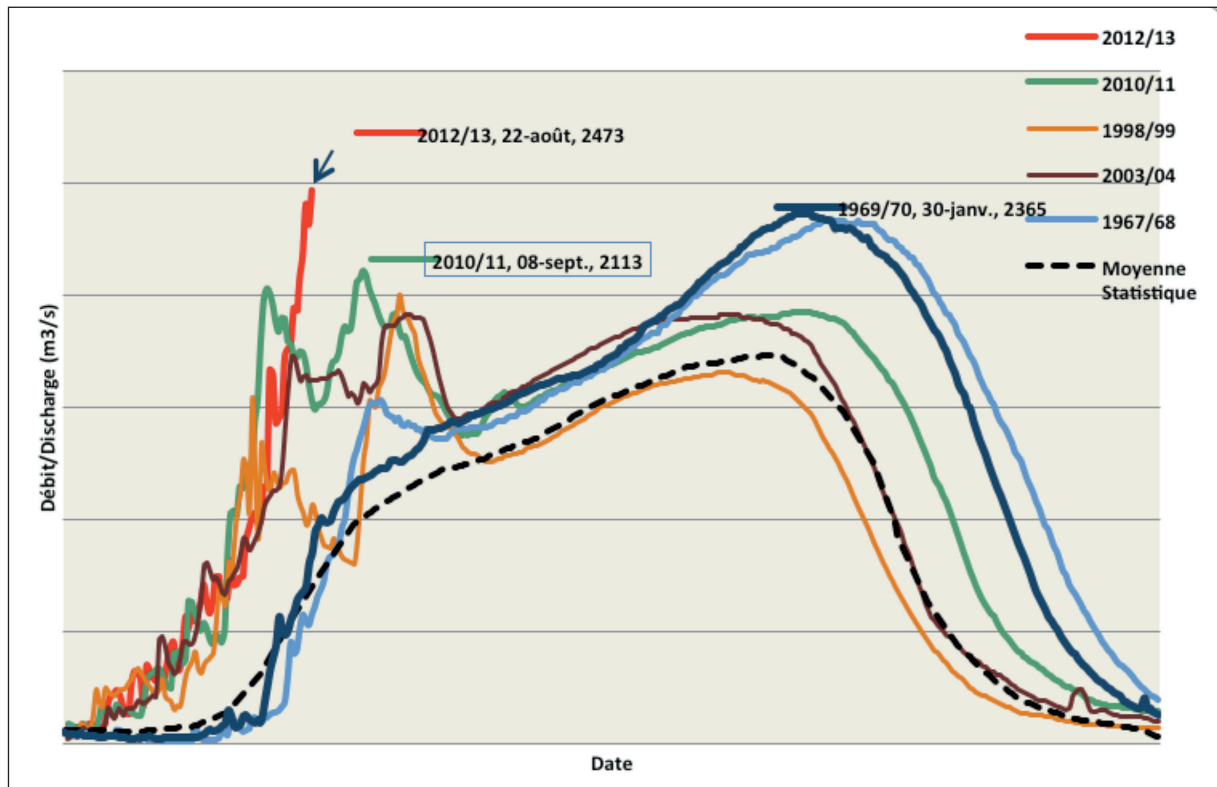


Figure 14 : Evolution de la crue 2011/2012 comparativement aux plus importantes crues connues à Niamey

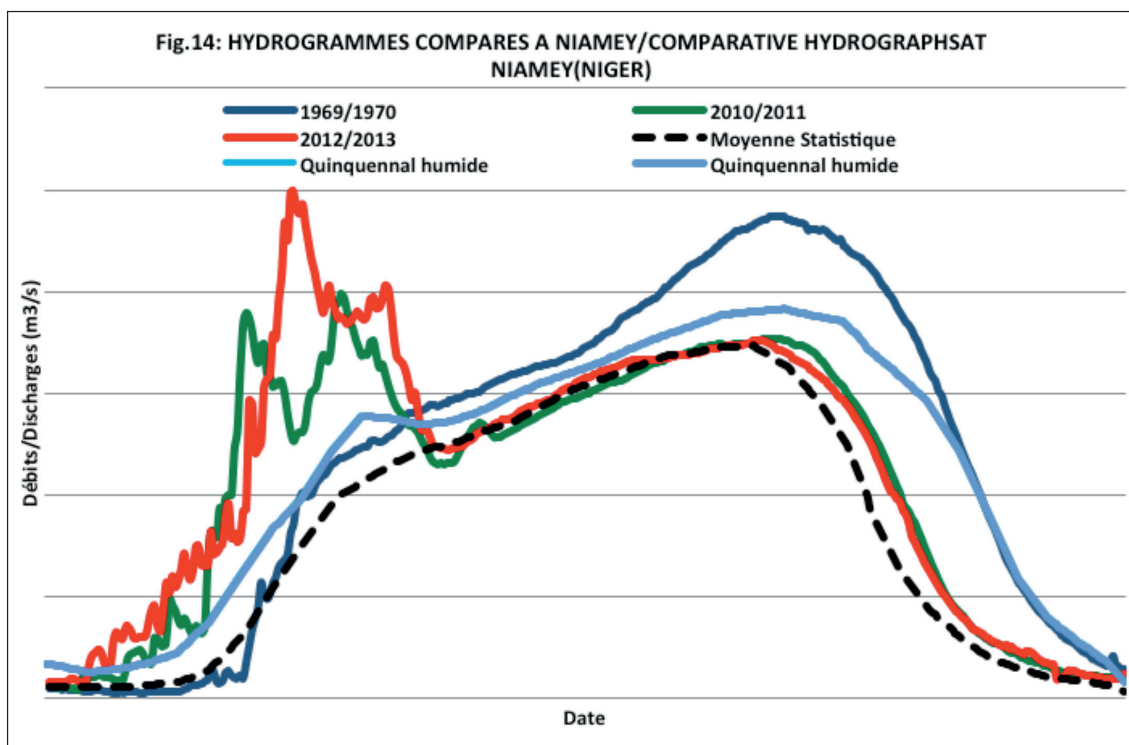


Figure 15 : Hydrogrammes du Fleuve Niger à Niamey



Fleuve Niger

Plus à l'aval du fleuve Niger, à la station Lokoja au Nigeria (Niger inférieur), le débit moyen annuel enregistré était $8612 \text{ m}^3/\text{s}$ avec un maximum de $31\,692 \text{ m}^3/\text{s}$ enregistré le 29 septembre 2012 (Fig. 15), qui a environ 125 ans de période de retour. C'est la plus forte valeur jamais enregistrée à cette station depuis sa création en 1914.

Le débit moyen annuel enregistré était $8612 \text{ m}^3/\text{s}$ avec un maximum de $31.692 \text{ m}^3/\text{s}$ enregistré le 29 septembre 2012 qui a environ 125 ans de période de retour comme montre la Figure 5. Le minimum est de $1731 \text{ m}^3/\text{s}$ enregistré le 1^{er} juin 2013.

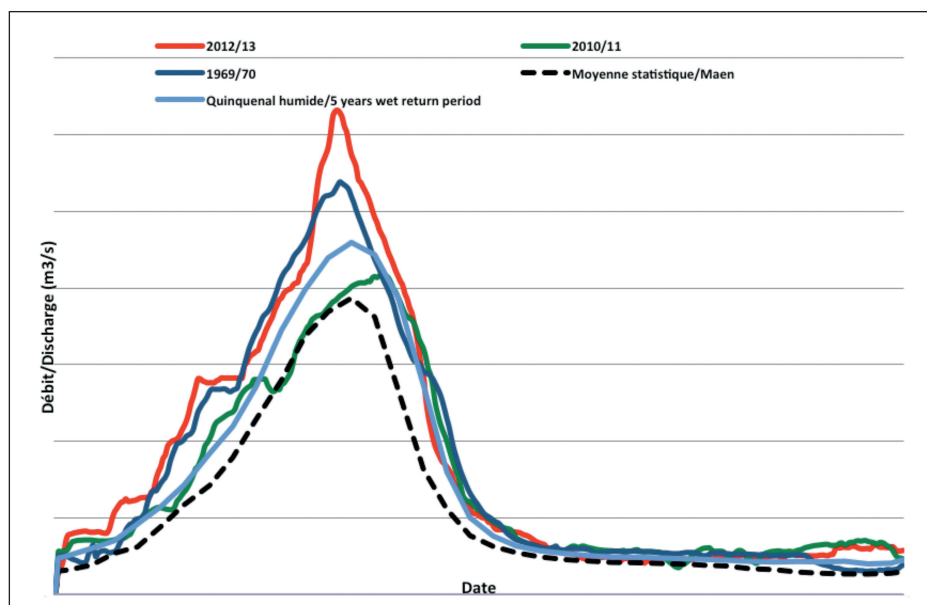


Figure 16 : Hydrogrammes comparés à Lokoja (Nigeria)

Le bilan humain est terrible puisque 81 personnes ont perdu la vie au Niger ; les dégâts matériels sont énormes. La mousson de 2012 est remarquable par le nombre d'inondations relevées en Afrique de l'Ouest, du Sénégal au lac Tchad. Cela démontre que le risque de crue est en augmentation. La crue du Niger moyen en 2012 (Sighomnou et al., 2012) a provoqué des dégâts considérables.

2.7. ANALYSE DES TEMPÉRATURES

2.7.1. Tendances et variations des températures minimales, maximales et moyennes observées

Le réchauffement global du climat, tel qu'il est décrit par le GIEC est une réalité dans la zone d'étude au regard de l'évolution actuelle des températures observées depuis le milieu du 19^{ème} siècle. Les températures observées montrent une tendance généralisée à la hausse.

Les décennies 1990-1999 et 2000-2009 sont les plus chaudes. Depuis 1980, la hausse s'est nettement accélérée et devient continue. Il faut souligner que la hausse des températures minimales a été plus rapide et plus régulière que celle des températures maximales.

Les écarts de température dans la zone d'étude (Fig. 17), entre la période actuelle 1981-2010 et la période 1961-1990 sont compris :

- Pour les températures minimales entre + 0.08 et +1.3°C
- Pour les températures maximales entre -0.33 et +1.29°C.

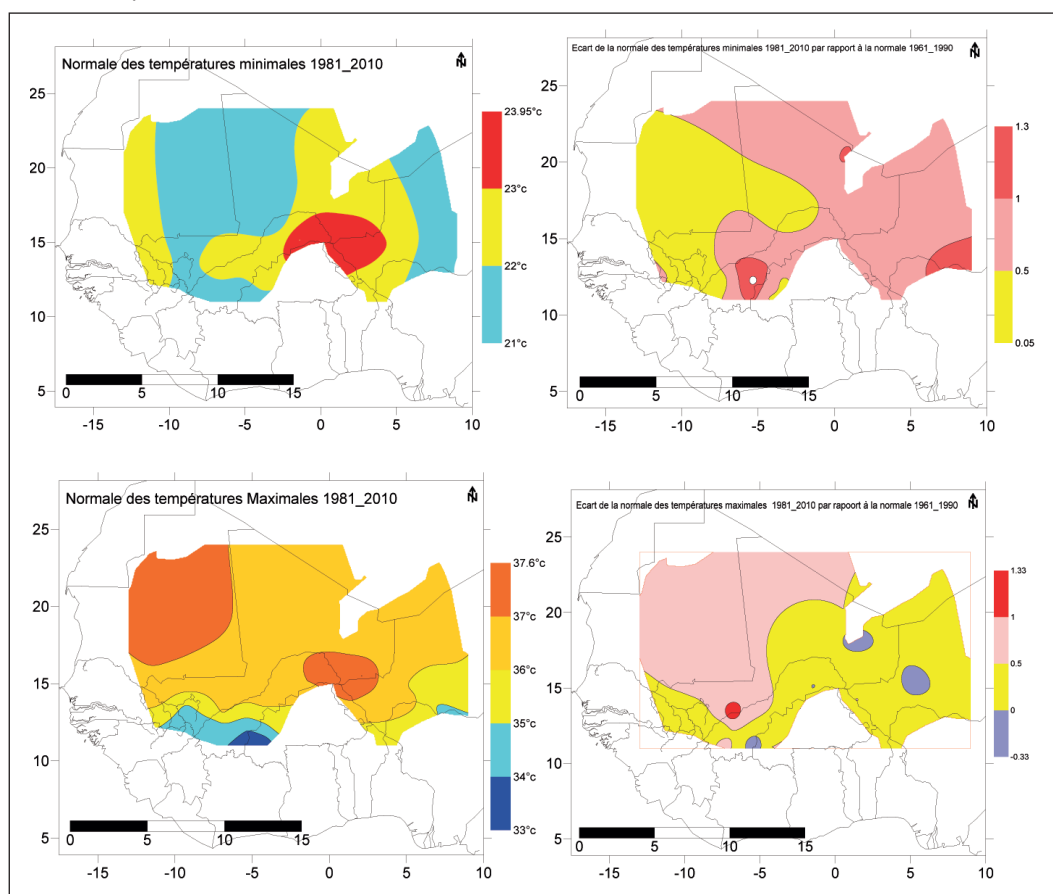


Figure 17 : Spatialisation des normales 1981-2010 de températures minimales et maximales et leurs écarts par rapport à la normale de référence 1961-1990

2.8. IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES AQUIFÈRES

Des modèles mathématiques ont été développés pour, entre autres, les effets des accroissements de prélèvements à l'horizon 2050 soumis à différentes contraintes climatiques, selon deux scénarios :

- Un **Scénario standard** avec les variations climatiques observées de 1960 à 2000 pour simuler le climat de 2010 à 2050.
- Un **Scénario pessimiste** pour simuler un climat avec un très fort déficit pluviométrique, en reproduisant la décennie 1980-1990, dans laquelle a été substituée l'année 1985 pluvieuse par l'année 1983 qui est l'année la plus sèche des 50 dernières années. Pour accentuer les effets d'une sécheresse très sévère et continue dans le temps, cette décennie ainsi reconstituée a été reproduite sur deux décennies successives (2030-2040 et 2040-2050).

Le **Scénario pessimiste** a consisté à dupliquer les calculs de la recharge pour les années 1960 à 2000 pour simuler les années 2010 à 2050 avec les correspondances suivantes :

(2 décennies sèches : (1980-1990)*2 mais en substituant 1985 par 1983)

- Départ : juillet 1960- juin 1970 ← → juillet 2010 - juin 2020
- Juillet 1970- juin 1980 ← → juillet 2020 - juin 2030
- Juillet 1980- juin 1990* ← → juillet 2030 - juin 2040 * **1985 substituée par 1983**
- Juillet 1980- juin 1990* ← → juillet 2040 - juin 2050 * **1985 substituée par 1983**

Les résultats calculés au bout de 40 années de simulation (année 2050) sont ci-après décrits pour le modèle pessimiste.

Dans le **Système Aquifère de Taoudéni/Tanezrouft (SAT)**, l'impact de l'augmentation des besoins en eau telle que simulée reste faible dans le cas d'un scénario classique. Les rabattements calculés ne dépassent pas 3,5 mètres. Les secteurs les plus sensibles sont situés près des zones qui exploitent déjà les eaux souterraines : agglomération de Sikasso, Douentza, Goundam au Mali, secteur de Bordj Badji Mokhtar en Algérie et Fossé de Nara (Mali) / Dhar de Néma (Mauritanie).

Une augmentation des besoins en eau couplée à une succession de deux décennies sèches viendrait accentuer l'extension des cônes de rabattements liés à l'exploitation de l'aquifère. Toutefois, les rabattements engendrés seraient inférieurs à 4 mètres sur la majeure partie du système aquifère.

Dans l'ensemble du SAT, les rabattements calculés restent faibles (inférieurs à 3,5 mètres), (Fig. 18).

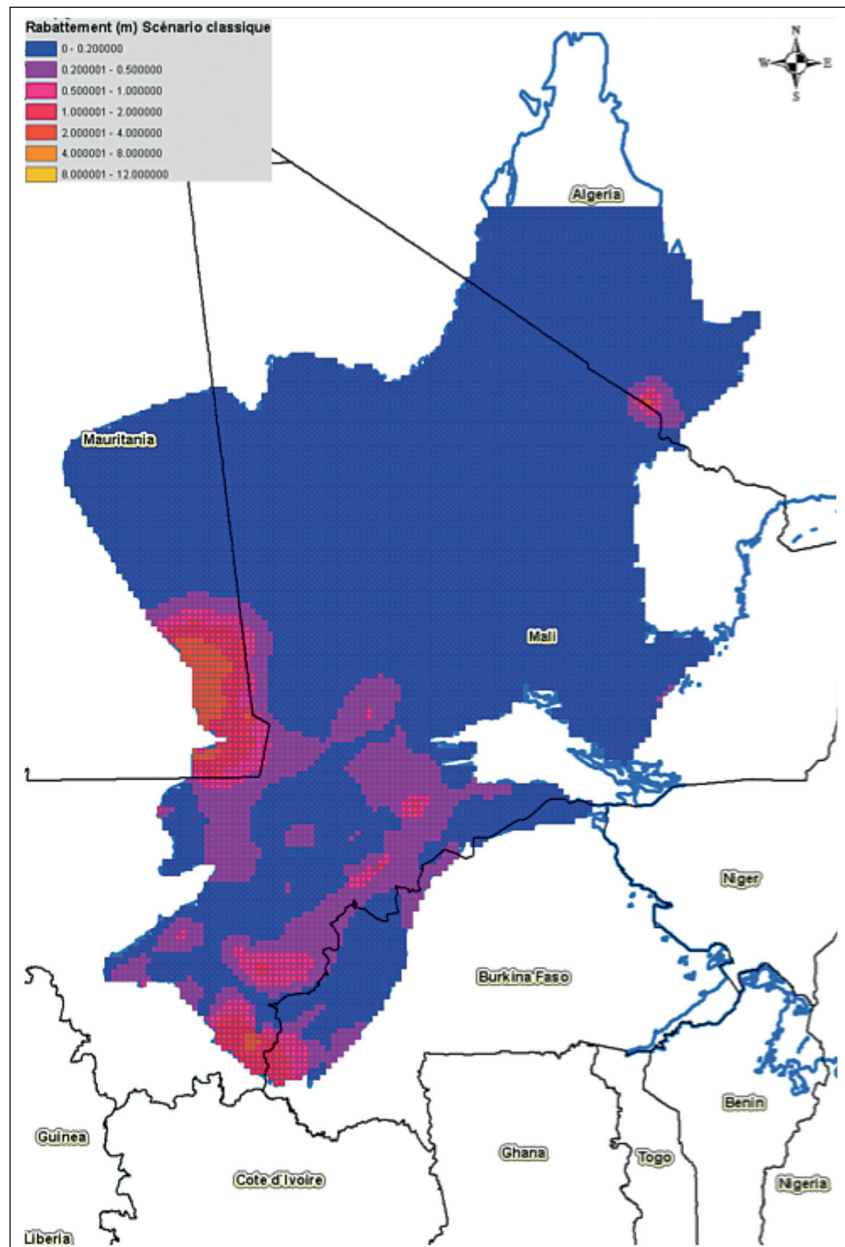


Figure 18 : Rabattements calculés dans le SAT en 2050 (Scénario classique)

Dans le Système Aquifère d'Illemeden (SAI), les prélèvements initiaux introduits sont 4 fois plus élevés que ceux du SAT. Au sud du 14^e parallèle, l'aquifère est déjà sollicité. Une augmentation des prélèvements telle qu'introduite dans le modèle amplifierait les zones déjà sollicitées notamment dans la zone centrale entre le 12^e et le 14^e parallèle.

Les rabattements les plus importants calculés sont situés à la frontière nigéro-nigériane dans une zone où les perméabilités introduites sont plus faibles d'un facteur 10.

Dans le cas d'un scénario de recharge classique, les rabattements calculés ne dépassent pas 2 mètres sur une large superficie du SAI. Comme pour le SAT, les zones les plus déprimées sont observées en bordure du modèle. Une succession de deux décennies de faible recharge, viendrait accentuer ces rabattements comme pour le SAT.

Ramenés à l'épaisseur totale du Système Aquifère, de plusieurs centaines de mètres, les rabattements calculés restent toutefois très faibles), (Fig. 19).

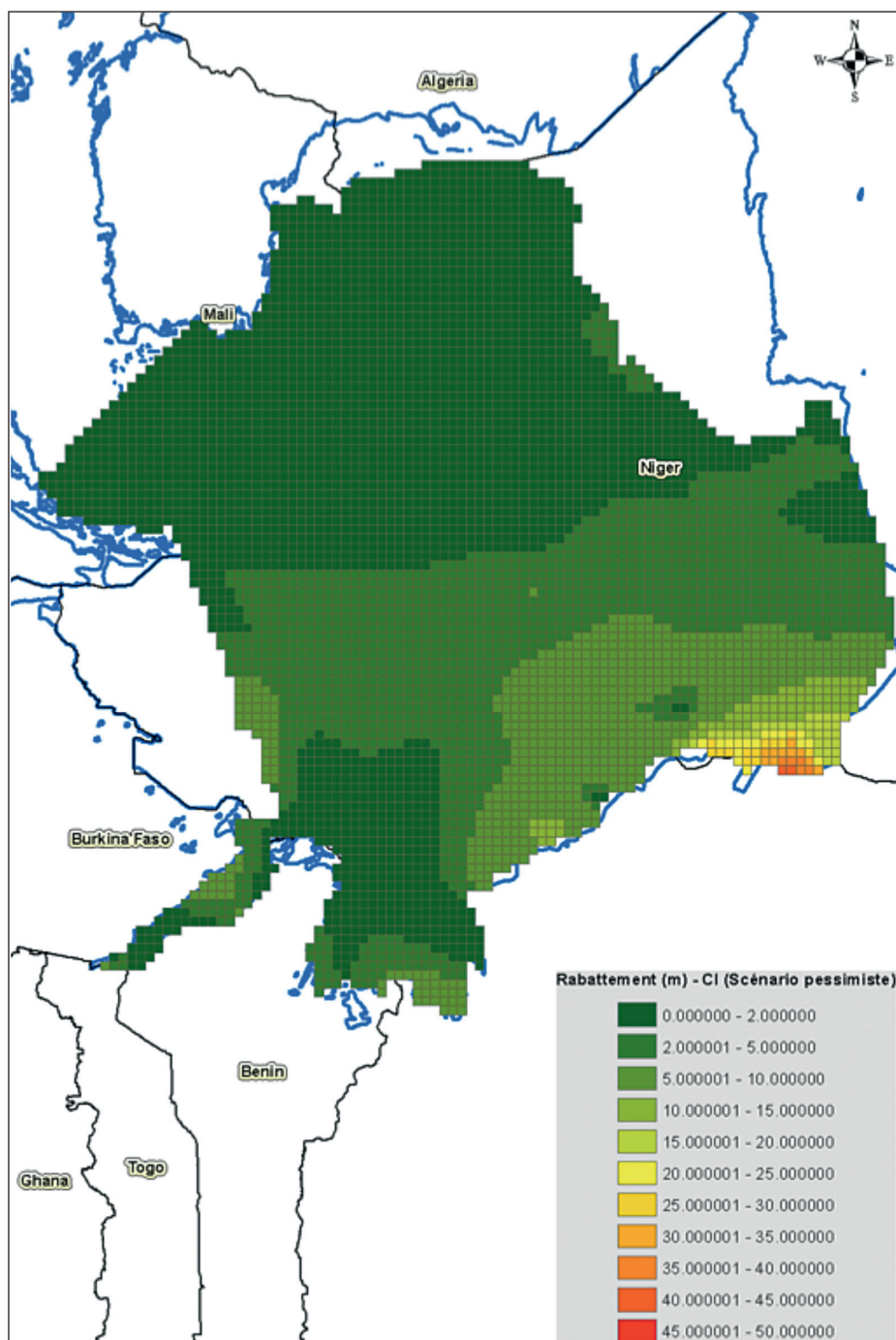


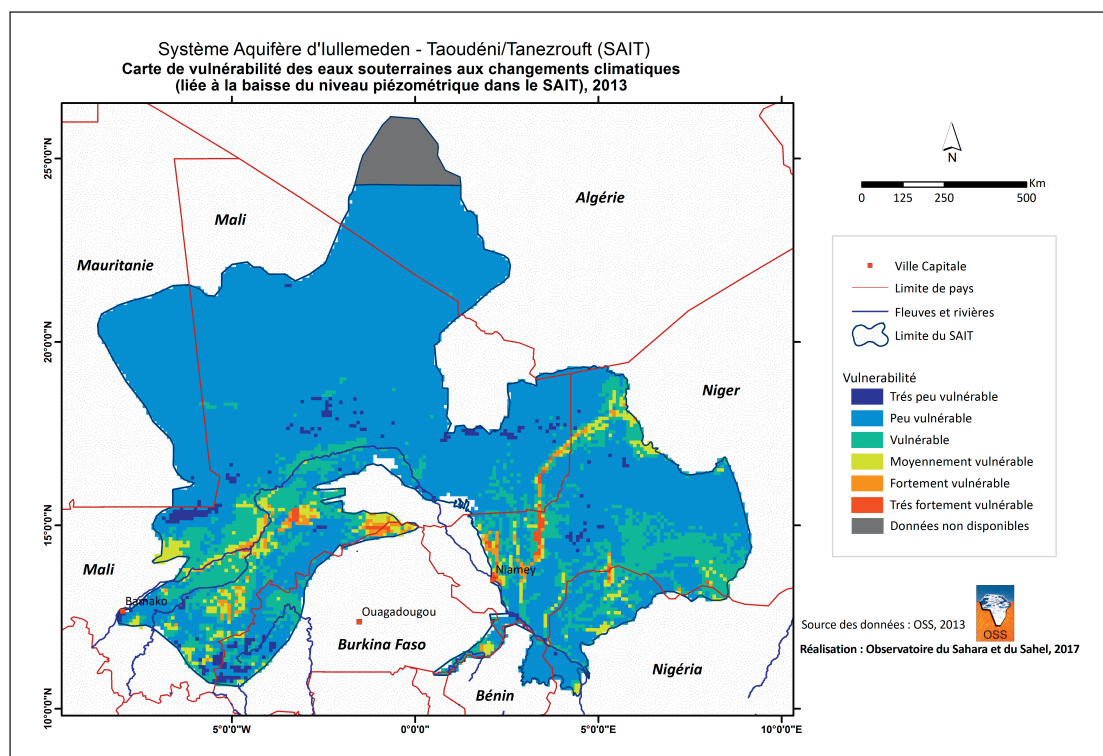
Figure 19 : Rabattements calculés dans le SAI (Continental Intercalaire) en 2050 (Scénario pessimiste)

En définitive, le scénario extrêmement pessimiste devrait permettre de montrer l'importance des eaux souterraines en tant que ressource abondante et assez bien protégée des variations climatiques, ce qui lui confère son rôle de buffer vis-à-vis des eaux de surface, et constituer ainsi une alternative de choix en cas de pénurie extrême.

Variation du niveau des nappes face aux changements climatiques

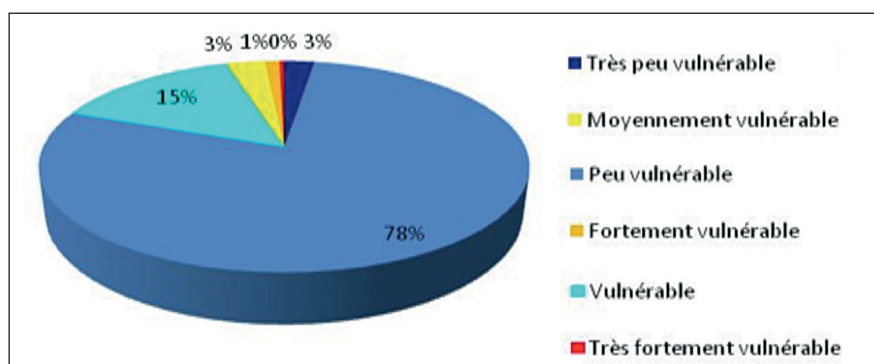
La baisse du niveau des aquifères engendrée par un stress climatique et par l'exploitation croissante de la ressource constitue un axe prioritaire pour les gestionnaires/ décideurs. Sa cartographie permet de mettre en évidence les zones «vulnérables» et «à risque» pour lesquelles ou la baisse du niveau de la nappe peut se faire de manière rapide et importante aux vues des conditions climatiques extérieures. Ces zones nécessitent une l'attention tant en terme de «surveillance / vigilance» que d'amélioration des connaissances. Ces zones s'inscrivent comme des «secteurs prioritaires de gestion».

D'un point de vue global, **plus de 80% du Système aquifère reste très peu à peu vulnérable** à la baisse des niveaux piézométriques (Fig. 20). Le secteur Nord apparait assez «préservé» de cette vulnérabilité, les nappes étant profondes et le secteur peu peuplé. Un peu moins de 20% de la zone est soumise à une vulnérabilité plus ou moins accrue.



Source : OSS, 2013 Réalisation

Figure 20 : Vulnérabilité des eaux souterraines liée au changement climatique



CONCLUSION

Le Système Aquifère d'Iullemeden-Taoudéni/Tanezrouft fait partie des régions arides et hyper-arides d'Afrique.

Durant les 50 dernières années, ces zones ont connu des épisodes de forts déficits hydriques en 1972-73, 1982-84 et 1997 traduits par un glissement des isohyètes de près de 200 km vers le Sud, la réduction de la recharge des aquifères (de l'ordre de 30% compromettant la disponibilité de l'eau) et des années exceptionnellement humides en 1967-1968, 1969-1970, 1998-1999, 2010-2011 et 2011-2012.

Les ressources en eau souterraines du Système Aquifère d'Iullemeden-Taoudéni/Tanezrouft ne sont vulnérables au changement climatique que dans les grandes plaines amont du fleuve Niger (Mali) et dans la zone médiane du bassin du fleuve Niger (Niger – Nigeria) qui représentent près de 20% de la superficie totale du Système Aquifère. Dans ces secteurs, la nappe affleurante ou sub-affleurante et la baisse du niveau de la nappe peut se faire de manière rapide et importante aux vues des conditions climatiques extérieures. . Un peu moins de 20% de la zone SUD est soumise à une vulnérabilité plus ou moins accrue ; il s'agit principalement des aires du réseau hydrographique du fleuve Niger où la nappe est proche du sol.

Toutefois, les variations du niveau des nappes relevées au Burkina Faso et au Niger (Fig. 21 et 22) dans cette partie sud témoignent que certaines zones qui sont particulièrement alimentées même pendant des sécheresses prolongées.

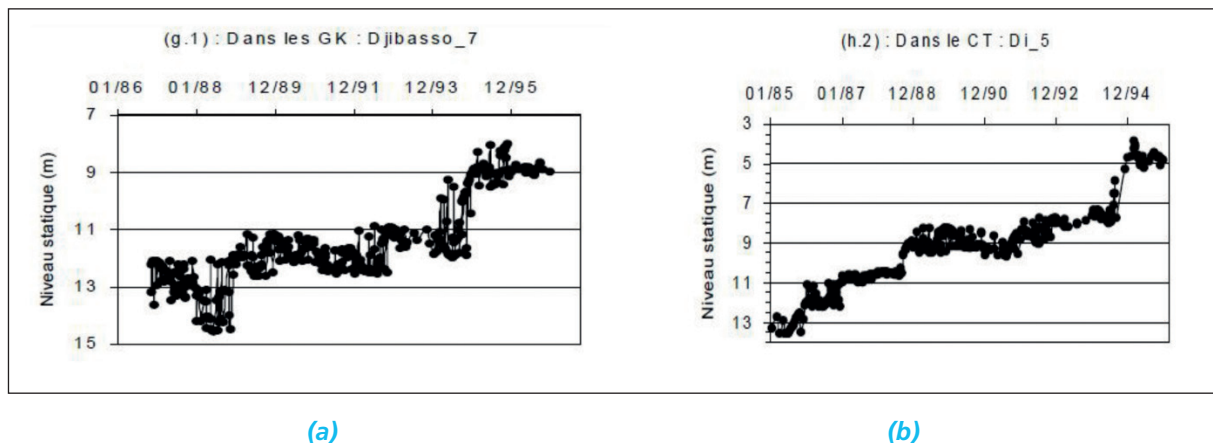
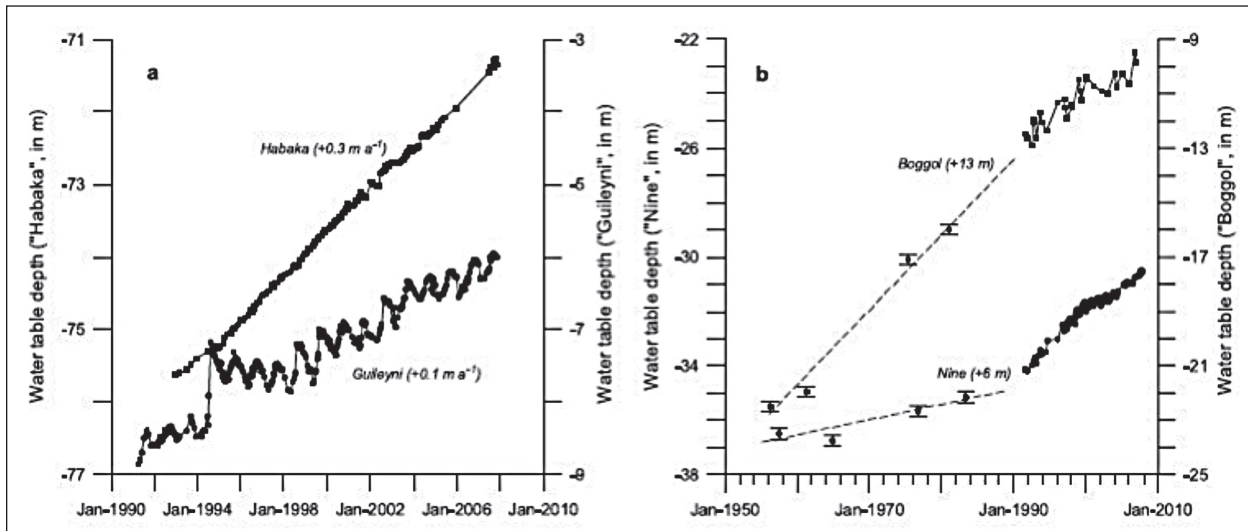


Figure 21 : Variations piézométriques à Djibasso-7 et à Kira-1 (a), et au DI-5 dans la plaine de Gondo (b), (Burkina Faso) : Une seule année excédentaire permet de combler la baisse des niveaux liée à plusieurs années déficitaires dans les zones où il y a une recharge significative



(a)

(b)

Figure 22 : Évolution des niveaux de la nappe dans la région Est de Niamey entre (a) 1990 et 2010, et (b) 1955 et 2007 : Hausse continue du niveau des nappes d'environ 0,2 m par an en moyenne depuis les années 1960 (Leduc et al, 2001 ; Favreau et al., 2009 ; IRD, 2011).

En conclusion, les ressources en eau du Système Aquifère d'Illemeden-Taoudéni/Tanezrouft sont assez bien protégées des variations climatiques. Elles constituent une excellente alternative en cas de sécheresse prolongée.

3. LISTE DES DOCUMENTS CONSULTÉS

- Ali A, Lebel T. 2008. *The sahelian standardized rainfall index revisited*. *International Journal of climatology*. DOI : 10.1002/joc.1832. Published online in Wiley Interscience. www.interscience.wiley.com).
- Autorité du Bassin du Niger, *Projet Niger-Hycos*. Bulletin Mensuel Septembre 2012.
- Bricquet Jean-Pierre, Mahé Gil, Bamba F., Olivry Jean-Claude, 1996. *Changements climatiques récents et modification du régime hydrologique du fleuve Niger à Koulikoro (Mali)*. <http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010009808>.
- CILSS, 2008. *Le climat et les changements climatiques. Atlas de l'intégration régionale en Afrique de l'Ouest*. Publié par Club du Sahel, FAO et CILSS, 24 p.
- IPCC, 2007 : *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976pp.
- Le Barbé, L., and T. Lebel, 1997. *Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950-1990*. *J. Hydrol.*, 188-189, 43-73.
- Favreau, G., B. Cappelaere, S. Massuel, M. Leblanc, M. Boucher, N. Boulain, and C. Leduc, 2009. *Land clearing, climate variability, and water resources increase in semiarid southwest Niger: A review*, *Water Resour. Res.*, 45, W00A16, doi:10.1029/2007WR00678.
- IRD, 2011. *Integrated surface water-groundwater modelling in the context of increasing water reserves of a regional Sahelian aquifer*, *Hydrological Sciences Journal*, 1, 2011.
- Leduc et al, 2001. Leduc, C., G. Favreau, and P. Schroeter, 2001. *Long-term rise in a Sahelian water table: The Continental Terminal in south-west Niger*, *J. Hydrol.*, 243, 43– 54, doi : 10.1016/S0022-1694(00)00403-0.
- Nicholson S.E. 2001. *Climatic and environmental change in Africa during the last two centuries*. *Climate Research* 17, 123-144.
- Sivakumar MVK. 1998. *Predicting rainy season potential from the onset of rains in Southern Sahelian and Soudanian Climatic Zones of West Africa*. *Agr and For. Meteorol* 1988; 42 : 295-305.
- Stern R, Knock J, Rijks D, Dal I, 2006. *Instat + for windows*. Version 3.30. An interactive Statistics Package. Reading : University of Reading UK, 2006, 40 p.

BIBLIOGRAPHIE GICRESAIT - OSS

- OSS, 2017. **Système Aquifère transfrontalier d'Illemeden, Taoudéni-Tanezrouft : atlas des ressources en eau**\OSS. _ Imprimeries Réunies, Tunis : 2017 - 48 pages. _ ISBN : 978-9938-933-03-1
- OSS, 2017. **GICRESAIT | Gestion intégrée et concertée des ressources en eau : synthèse finale**\OSS. _ Tunis, OSS : 2017. _ 20 p. _ ISBN : 978-9938-933-04-8
- OSS, 2017. **La Mobilisation des eaux souterraines du Système Aquifère d'Illemeden - Taoudéni/Tanezrouft - Un élément de solution** ?\OSS . _ OSS : Tunis, 2017 . _ 12p. _ ISBN : 978-9938-933-01-7
- OSS, 2014. **Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT) [Plaidoyer]**/ OSS. _ OSS : Tunis, 2014. - 16 pp.
- OSS, 2014. **Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT) [CD ROM Interactif]**/ OSS. _ OSS : Tunis, 2014.
- OSS, 2013. **Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT). Rapport Base de données**\OSS : Tunis, 2012. _ OSS . _ 43 p.
- OSS, 2012. **Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT). Rapport Télédétection**\OSS : Tunis, 2012. _ OSS . _ 36p.
- OSS, 2012. **Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT). Rapport Hydrogéologie**\OSS : Tunis, 2012. _ OSS . _ 86 p.
- OSS, 2012. **Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT). Changement Climatique en Afrique de l'Ouest et Conséquences sur les eaux souterraines**\OSS : Tunis, 2012. _ OSS . _ 41 p.
- OSS, 2012. **Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT). Rapport de synthèse hydro-climatologique**\OSS : Tunis, 2012. _ OSS . _ 25 p.
- OSS, 2012. **Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT). Rapport de synthèse Socio-économique**\OSS : Tunis, 2012. _ OSS . _ 53 p.
- OSS, 2012. **Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT). Rapport de synthèse Nigeria**\OSS : Tunis, 2012. _ OSS . _ 46 p.
- OSS, 2012. **Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT). Rapport de synthèse Niger**\OSS : Tunis, 2012. _ OSS . _ 76 p.

- OSS, 2012. **Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT). Rapport de synthèse Mauritanie**\OSS : Tunis, 2012. _ OSS . _ 61p.
- OSS, 2012. **Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT). Rapport de synthèse Mali**\OSS : Tunis, 2012. _ OSS . _ 98 p.
- OSS, 2012. **Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT). Rapport de synthèse Burkina Faso**\OSS : Tunis, 2012. _ OSS . _ 57 p.
- OSS, 2012. **Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT). Rapport de synthèse Bénin**\OSS : Tunis, 2012. _ OSS . _ 38 p.
- OSS, 2012. **Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT). Rapport de synthèse Algérie**\OSS : Tunis, 2012. _ OSS . _ 59 p.
- OSS, 2012. **Gestion Intégrée et Concertée des Ressources en Eau des Systèmes Aquifères d'Illemeden, de Taoudéni-Tanezrouft et du Fleuve Niger (GICRESAIT). Rapport phase de démarrage**\OSS : Tunis, 2012. _ OSS . _ 78 p.
- OSS, 2011. **Système Aquifère d'Illemeden : analyse diagnostique transfrontalière. Tome I** \ OSS. _ OSS : Tunis, 2011. _ 112 p. ; 21 cm. _ ISBN : 978-9973-856-41-8
- OSS, 2011. **Système Aquifère d'Illemeden : Base de données commune. Tome II** \ OSS. _ Tunis, 2011. _ 98 p. ; 21 cm. _ ISBN : 978-9973-856-42-5
- OSS, 2011. **Système Aquifère d'Illemeden : Modèle hydrogéologique. Tome III** \ OSS. _ OSS : Tunis, 2011. _ 90p. _ 21 cm. _ ISBN : 978-9973-856-43-2
- OSS, 2011. **Système Aquifère d'Illemeden : Gestion participative des risques transfrontaliers. Tome IV** \ OSS. _ OSS : Tunis, 2011. _ 54p. . _ 21 cm. _ ISBN : 978-9973-856-44-9
- OSS, 2011. **Système Aquifère d'Illemeden : Suivi-évaluation des aquifères transfrontaliers. Tome V** \ OSS. _ OSS : Tunis, 2011. _ 46p. _ 21 cm. _ ISBN : 978-9973-856-45-6
- OSS, 2011. **Système Aquifère d'Illemeden : Éléments de politique pour la réduction des risques transfrontaliers**\ OSS. _ OSS : Tunis, 2011. _ 57 p. . _ 15x21 cm. _ ISBN : 978-9973-856-46-3
- OSS, 2011. **Système Aquifère d'Illemeden : Approche de l'ADT/Pas du FEM appliquée au SAI** \ OSS. _ OSS : Tunis, 2011. _ 45 p. . _ 15x21 cm. _ ISBN : 978-9973-856-47-0
- OSS, 2011. **Système Aquifère d'Illemeden : Cadre de Concertation pour la gestion du risque transfrontalier**\ OSS. _ OSS : Tunis, 2011. _ 40p. . _ 21x15 cm. _ ISBN : 978-9973-856-48-7
- OSS, 2008. **Système aquifère d'Illemeden (Mali, Niger, Nigeria) : gestion concertée des ressources en eau partagées d'un aquifère transfrontalier sahélien** \ OSS. _ Collection Synthèse n° 2. _ OSS : Tunis, 2008. _ 33 pp. _ ISBN : 978-9973-856-28-9



CONTACT



Observatoire du Sahara et du Sahel

Boulevard du Leader Yasser Arafat

BP31, 1080Tunis Carthage, Tunisie

Tél. : +216 206 633 - Fax : +216 206 636

Courriel : boc@oss.org.tn

www.oss-online.org

 twitter.com/OSS_Comms

 facebook.com/osscommunity
facebook.com/sawapbricks

ISBN : 978*9938-933-12-3

PARTENAIRES DE COOPÉRATION

