

Une évaluation comparative des séquences du stress hydrique et de la sécheresse par indicateurs et par échelles de temps dans le bassin du Bafing en amont de Manantali

CHEIKH FAYE ; Département de Géographie, U.F.R. Sciences et Technologies, UASZ, Laboratoire de Géomatique et d'environnement (SENEGAL).

RESUME :

La gestion des ressources en eau dans les systèmes fluviaux est de plus en plus difficile ces derniers temps en raison de la fréquence et de l'intensité des sécheresses. Le haut bassin du fleuve Sénégal, comme la plupart régions tropicales, a connu une alternance de périodes humide et sèche. Dans un contexte climatique de plus en plus perturbé par les activités anthropiques, il est indispensable d'analyser les épisodes secs à diverses échelles temporelles et par divers indices en vue de proposer aux populations des mesures d'atténuation ou d'adaptation en matière de gestion de l'eau. Dans cet article, la station hydrométrique de Bafing-Makana disposant de plus longues séries hydrométriques a été analysée. L'analyse a utilisé et a comparé les valeurs de l'indice hydrologique normalisé(IHN), de l'indice de sécheresse des débits(ISD) et de l'indice logarithme décimal des déviations hydrologiques(ILDH) calculés pour des échelles de temps d'une année, de 25 ans et de 50 ans. Les résultats indiquent que les sécheresses les plus remarquables de par leur intensité, leur durée et leur fréquence se sont produites durant la période 1970-1999 et cela quel que soit l'indice ou l'échelle de temps utilisée. Ces épisodes secs ont atteint leurs paroxysmes en 1977-78 et 1984-85 avec des sécheresses d'une sévérité extrême. La station de Bafing-Makana en amont du barrage de Manantali est bien affectée par la sécheresse. En outre, il ressort des analyses que l'indice IHN et l'échelle de temps à long terme semble les mieux appropriés pour décrire avec plus de précisions les épisodes secs dans le bassin du Bafing.

Mots-clés: changement climatique, sécheresse, indice hydrologique normalisé, indice de sécheresse des débits, indice logarithme décimal des déviations hydrologiques

ABSTRACT:

The resource management in water in the river systems is harder and harder lately because of the frequency and the intensity of the droughts. The high basin of the Senegal River, as most tropical regions, knew an alternation of wet and dry periods. In a climatic context more and more disrupted by the anthropological activities, it is essential to analyze the dry episodes with diverse temporal scales and by diverse indications to propose to the populations of the measures of mitigation or adaptation regarding management of the water. In this article, the hydrometric station of Bafing-Makana arranging longer hydrometric series was analyzed. The analysis used and compared the values of the standardized hydrological index (SHI), the index of drought flows (IDF) and the decimal logarithm hydrological deviations index (DLHI) calculated for timescales of one year, of 25 years and of 50 years. The results indicate that the most remarkable droughts due to their intensity, their duration and their frequency occurred during period 1970-1999 and it whatever is the index or the used timescale. These dry episodes reached their paroxysm in 1977-78 and 1984-85 with droughts of an extreme severity. The station of Bafing-Makana upstream to the dam of Manantali is affected seriously by the drought. Besides, it emerges from analysis that the index SHI and the long-

term timescale seems the best suited to describe with more precision the dry episodes in the basin of Bafing.

Keywords: climate change, drought, standardized hydrological index, index of drought of the flows, decimal logarithm hydrological deviations index

ملخص:

من الصعب الاستمرار في تدبير الموارد المائية في الأنظمة النهرية على نحو متزايد في الآونة الأخيرة بسبب وتيرة وشدة الجفاف. عرف الحوض العلوي من نهر السنغال، مثله مثل معظم المناطق المدارية، تناوب فترات رطبة وجافة. في سياق مناخي عالمي في اضطراب متزايد بسبب الأنشطة البشرية، من الضروري تحليل موجات الجفاف على مستويات زمنية مختلفة وبمؤشرات مختلفة بهدف اقتراح على المستعملين تدابير للتخفيف أو التكيف لإدارة الماء.

في هذه المقالة، تم تحليل المحطة الهيدرومترية بافنج-ماكانا لأنها تتوفر على سلسلة هيدرومترية طويلة. التحليل استخدم وقارن قيم المؤشرات الهيدرولوجية القياسية (IHN)، و مؤشر جفاف الصبيب (ISD) و مؤشر لوغاريتم الانحرافات الهيدرولوجية (ILDH) وكلها قيست على جداول زمنية لسنة واحدة، و 25 عاما و 50 سنة. تشير النتائج إلى أن أبرز فترات الجفاف من حيث الشدة والمدة والتواتر وقعت خلال فترة 1999-1970 وذلك كيفما كان مؤشر أو مقياس الوقت المستخدم.

بلغت حلقات الجفاف هذه ذروتها في 1978-1977 و 1985-1984 بجفافات قصوى. تأثرت محطة بافنج-ماكانا بعالية سد Manantali بهذا الجفاف. وعلاوة على ذلك، يبدو أن تحليل مؤشر IHN والمدى الزمني الطويل هما الأنسب لوصف أكثر دقة لفترات الجفاف في حوض بافنج.

كلمات المفاتيح : تغير المناخ، الجفاف، مؤشر الهيدرولوجي الموحد، مؤشر جفاف الصبيب ، مؤشر لوغاريتم الانحرافات الهيدرولوجية

1. INTRODUCTION

La sécheresse est un phénomène naturel qui pose de nombreux problèmes à travers le monde. La sécheresse place des demandes énormes sur des ressources en eau rurales et urbaines et d'énormes fardeaux sur la production agricole et d'énergie (Baruaet *al.*, 2009). En général, la sécheresse est définie comme la rareté de l'eau en raison de l'insuffisance des précipitations, la forte évapotranspiration et la surexploitation de ressources en eau ou une combinaison de ces paramètres (Bhuiyan, 2004). Ainsi, la sécheresse représente la période et l'état de déficit hydrique causé par la différence négative entre les entrées et les sorties d'eau dans le système, provoquant des déséquilibres et des dysfonctionnements de caractère réversible ou irréversible (Stângă, 2009). La détermination opportune du niveau de sécheresse aidera le processus de prise de décisions à réduire les impacts de sécheresses. La sécheresse est une des conditions climatiques extrêmes affectant plus de personnes que toute autre forme de catastrophe naturelle (Wilhite, 2000). Depuis les dernières décennies, l'occurrence d'importantes sécheresses occupant de grands territoires sur tous les continents souligne l'importance de ce phénomène (Beaudin, 2007). Les pays en voie de développement tout comme les pays industrialisés en sont touchés. Dans les pays sous développés, les effets peuvent être désastreux (Soroet *al.*, 2014). Selon Obassi (1994), près de 1,3 milliards en sont mortes de causes directes ou indirectes.

Au cours d'une période de sécheresse, il est souhaitable de connaître la probabilité de la sécheresse persistante jusqu'à l'arrivée des pluies (Sharma et Panu, 2010). Son évaluation et sa prévision fournit des renseignements précieux pour les planificateurs des ressources en eau et les décideurs politiques pour faire face à leurs conséquences. En raison de la relation complexe entre les différents facteurs physiques qui participent à l'occurrence et à la persistance de la sécheresse, il est difficile de donner une définition précise de la sécheresse (Soroet *al.*, 2014), d'où l'ampleur des difficultés à les reconnaître et à les planifier dont font face les décideurs et les planificateurs des ressources en eau. Néanmoins, la gestion de la

sécheresse repose sur les indices statistiques qui permettent d'indiquer le début de la mise en œuvre des mesures de conservation de l'eau ou d'atténuation (Khadret *al.*, 2009).

Les sécheresses peuvent être quantifiées en utilisant plusieurs indices de sécheresse hydrométéorologiques dont les plus populaires sont : l'indice Palmer (Palmer, 1965), l'indice de l'approvisionnement en eau de surface (Shafer et Dezman, 1982), l'indice standardisé de précipitation (McKee *et al.*, 1993), l'indice de sécheresse effective (Byun et Wilhite, 1999), l'indice de sécheresse des débits (Nalbantis et Tsakiris, 2009), l'indice hydrologique normalisé (Sharma et Panu, 2010), l'indice normalisé de l'évapotranspiration maximale (Vicente-Serrano *et al.*, 2010), l'indice régional de la zone de sécheresse (Fleiget *al.*, 2011), l'indice agricole de référence de la sécheresse (Woliet *al.*, 2012). Chaque indice renferme ses propres forces et faiblesses (Mishra et Singh, 2010). Plusieurs indices ont été mis au point pour la caractérisation des sécheresses hydrologiques et exigent, en général, beaucoup de données et de calculs exigeants, contrairement aux indices de sécheresses météorologiques très simples et efficaces tels que l'indice standardisé de précipitation (Nalbantis et Tsakiris, 2009).

Pour caractériser l'ampleur et l'intensité des sécheresses hydrologiques dans le bassin du Bafing, des indices hydrologiques analogues aux indices des sécheresses météorologiques ont été utilisés. Ainsi, l'indice hydrologique normalisé, l'indice de sécheresse Bhalme-Mooley et l'indice logarithme décimal des déviations hydrologiques, populaires dans la caractérisation de la sécheresse hydrologique et largement utilisés à travers le monde pour l'analyse de la sécheresse (Pashiardis et Michaelides, 2008; Ibrahim *et al.*, 2010; Sharma et Panu, 2010; Tirandaz et Eslami, 2012; Jacobi *et al.*, 2013; Jouilil *et al.*, 2013; Mirabbasi *et al.*, 2013; Soro *et al.*, 2014), sont utilisés dans ce travail. Ces indices de sécheresse présentent des avantages en termes de cohérence statistique, et ont la capacité de décrire à la fois à court, à moyen et à long terme les impacts de la sécheresse à travers les différentes échelles de temps. Par rapport au choix de cette échelle de temps, les statistiques de sécheresse (durée et ampleur) à l'échelle annuelle peuvent prêter peu d'informations (Sharma et Panu, 2010). Par exemple, si une sécheresse de 100 ans persiste pendant quatre années, cela ne signifie pas que tous les 48 mois (= 4 × 12 mois) seront sous l'emprise de la sécheresse. Il est prévu qu'un plus petit nombre de mois doit être affectée par la sécheresse persistante, un nombre qui peut être obtenu grâce à l'analyse des séquences de la sécheresse à l'échelle mensuelle, telle que développée dans le présent document.

Dans un contexte climatique marquée par une éventuelle augmentation de l'occurrence et de l'impact des sécheresses dans les années à venir (Watson *et al.*, 1997), il est indispensable de pouvoir analyser les séquences de sécheresse hydrologique en vue de proposer aux populations des mesures d'atténuation ou d'adaptation. C'est dans ce cadre que la présente étude a été initiée dans le haut bassin du fleuve Sénégal, notamment le bassin du Bafing qui est sujet depuis plusieurs années à des déficits hydrométriques. L'objectif de cette étude est de confirmer la persistance du phénomène de la sécheresse dans le bassin du Bafing, à l'échelle mensuelle, à travers des indices normalisés sur des pas de temps différents.

2. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

La zone d'étude est le haut bassin du fleuve Sénégal, un espace qui s'étend, du point de vue administratif, sur le Nord-ouest de la Guinée Conakry et le Sud-est du Mali avec une superficie de 21 290 km² à la station hydrométrique de Bafing Makana. Elle est située entre les latitudes 10°30' et 12°30' N et les longitudes 12°30' et 9°30' W (Figure 1).

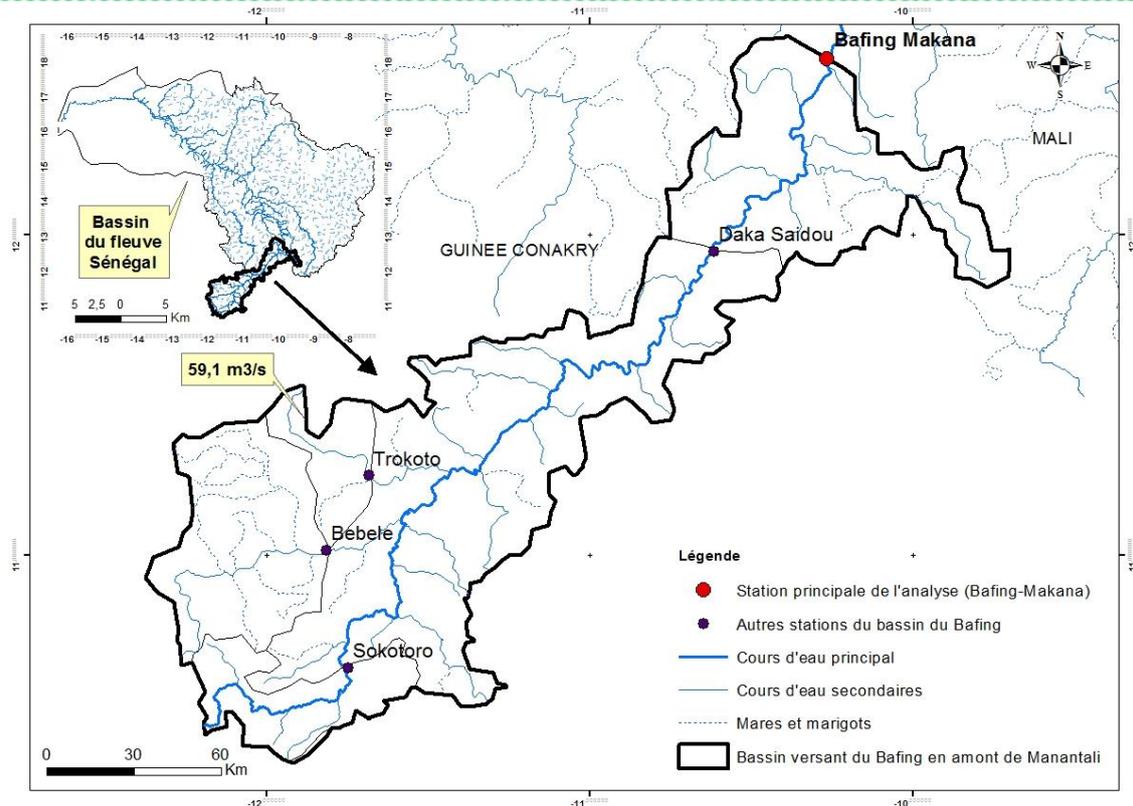


Figure 1 : Localisation du haut bassin du Sénégal, ainsi que des stations hydrométriques

Le réseau hydrographique du haut bassin est dense mais les sols et les formations géologiques ne permettent pas l'existence de nappes importantes (Rochette, 1974). En effet, les roches dures représentent près de 54 % des affleurements (Coly, 1996). Le relief de la zone d'étude est constitué de plaines et de plateaux d'altitude variant de 215 à 1389 m (Bodian, 2011) et traduisant l'importance du volume montagneux du Fouta Djallon et la forte incision du relief. Sa végétation est dense mais présente des signes de dégradation due aux effets conjugués des facteurs naturels et anthropiques (CSE, 2006). Le haut bassin du fleuve Sénégal se situe dans le climat guinéo-soudanien caractérisé par une seule saison des pluies dans l'année qui va d'avril à octobre (Dione, 1996). La pluviométrie moyenne annuelle sur la période 1923-2005 varie entre 2000 mm au Sud du bassin et 1200 mm au Nord (Bodian *et al.*, 2012). La température y est plus variable et l'humidité relative demeure plus basse. L'harmattan, chaud et sec d'origine sud-est saharienne, souffle au maximum en saison sèche. Le haut bassin, au régime hydrologique essentiellement pluvial, subit fortement les déficits pluviométriques (Olivry, 1994).

3. DONNEES ET METHODES

3.1. Données

Les données de base sont constituées de relevés hydrométriques journaliers provenant de la station hydrométrique de Bafing-Makana (Tableau 1). Les données ont été mises à notre disposition par l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS). Les données sont disponibles de 1961 à 2014 (seule l'année 1961 est incomplète et elle n'est pas prise en compte dans l'étude). La variable d'étude est le débit mensuel de la période 1964 à 2014. La station de Bafing-Makana obéit à des critères de continuité, de durée de

l'information disponible et de qualité des données. Son choix s'est également effectué de manière à permettre une couverture plus homogène possible de la zone d'étude. Cette station contrôle l'essentiel des débits du haut bassin du fleuve Sénégal en amont du barrage de Manantali.

3.2. Méthodes

L'analyse a utilisé et comparé les valeurs de l'indice hydrologique normalisé (IHN), de l'indice de sécheresse des débits (ISD) et de l'indice logarithme décimal des déviations hydrologiques (ILDH) calculés sur la période 1964-2014 à des échelles de temps d'une année, de 25 ans et de 50 ans.

3.2.1. Indice hydrologique normalisé

L'indice hydrologique normalisé (IHN) est analogue à l'indice standardisé des précipitations (McKee *et al.*, 1993; Hayes, 1996). Ainsi, il a été développé en vue de quantifier le déficit hydrologique pour des échelles de temps multiples qui vont refléter l'impact de la sécheresse sur la disponibilité des différents types de ressources en eau pour une période donnée (Sharma et Panu, 2010). Il est exprimé mathématiquement comme suit :

$$IHN = \frac{(D_i - D_m)}{S}$$

Avec : D_i : le débit du mois ou de l'année i ; D_m : le débit moyen de la série sur l'échelle temporelle considérée ; S : l'écart-type de la série sur l'échelle temporelle considérée.

Etudier cet indice permet également de distinguer les mois et années secs (déficitaires) des mois et années humides (excédentaires). Une sécheresse sévit lorsque l'IHN est consécutivement négatif et que sa valeur atteint une intensité de -1 ou moins et se termine lorsque l'IHN devient positif. On effectue une classification de la sécheresse suivant les valeurs de l'IHN (Tableau 1).

Tableau 1: Classification des séquences de sécheresse selon l'IHN

Valeur de l'IHN	Séquence de sécheresse	Valeur de l'IHN	Séquence humide
$0,00 < IHN < -0,99$	Légèrement sèche	$0,00 < IHN < 0,99$	Légèrement humide
$-1,00 < IHN < -1,49$	Modérément sèche	$1,00 < IHN < 1,49$	Modérément humide
$-1,50 < IHN < -1,99$	Sévèrement sèche	$1,50 < IHN < 1,99$	Sévèrement humide
$IHN < -2,00$	Extrêmement sèche	$2,00 < IHN$	Extrêmement humide

3.2.2. Indice de sécheresse des débits

L'indice de sécheresse des débits (ISD) est analogue à l'indice Bhalme et Mooley (Bhalme et Mooley, 1979) qui représente le pourcentage d'écart de la pluie à la moyenne sur le long terme. L'ISD encore appelé l'écart moyen du débit (EMD) est utilisé pour déterminer la réaction du fleuve face au déficit pluviométrique (Nalbantis et Tsakiris, 2009) et permet de déterminer les déficits et variations du débit (Mahé et Olivry, 1995). Il est calculé de la manière suivante :

$$ISD = \left(\frac{D_i}{D_m} \right) - 1$$

Avec : D_i : le débit du mois ou de l'année i ; D_m : le débit moyen de la série sur l'échelle temporelle considérée.

Cette méthode consiste à mettre en relief les périodes durant lesquelles les apports du bassin sont significativement inférieurs par rapport à l'apport moyen mensuels. Par rapport à la classification de cet indice: si l'ISD est supérieur à 1, la période est humide ; si l'ISD est égal à 0, la période est moyennement normale ; si l'ISD est inférieur à 0, la période est sèche.

3.2.3. Indice logarithme décimal des déviations hydrologiques

Le pourcentage des débits représente peut-être la plus simple méthode employée pour exprimer le déficit hydrologique d'une période par le rapport entre les débits effectifs et la moyenne pluriannuelle pour cette période (Stângă, 2009). Comme l'expression graphique du rapport n'est pas suffisamment suggestive pour nuancer les déviations maximales, l'indice logarithme décimal des déviations hydrologiques (ILDH) est calculé de la manière suivante :

$$ILDH = \log (D_i / D_m)$$

Avec : D_i : le débit du mois ou de l'année i ; D_m : le débit moyen de la série sur l'échelle temporelle considérée.

L'ILDH met beaucoup mieux en évidence l'excédent ou le déficit hydrologiques, avec une bonne tendance de mettre en évidence les extrêmes positives ou négatives. On effectue une classification de la sécheresse suivant les valeurs de l'ILDH (Tableau 2).

Tableau 2: Classification des séquences de sécheresse selon l'ILDH

Valeur de l'ILDH	Séquence de sécheresse	Valeur de l'IHN	Séquence humide
$0,00 < Id < -0,99$	Modérément sèche	$0,00 < IHN < 0,99$	Modérément humide
$-1,00 < Id < -1,99$	Fortement sèche	$1,00 < IHN < 1,99$	Fortement humide
$Id < -2,00$	Extrêmement sèche	$2,00 < Id$	Extrêmement humide

3.2.4. Durée, fréquence et intensité des séquences de sécheresse

Pour étudier la sécheresse, il est important de caractériser sa durée (à partir du début et de la fin d'une séquence de sécheresse), son intensité et la fréquence.

La durée maximale des séquences de sécheresse : La durée maximale (D) qui est une caractéristique importante de la sécheresse est choisie sur cette étude pour caractériser la durée des séquences sèches. Le calcul de la durée se fait comme suit :

$$D = (A_{fin} - A_{début}) + 1$$

Avec : A_{fin} : Année de la fin de la période sèche ; $A_{début}$: Année du début de la période sèche ;

La fréquence des séquences de sécheresse : La fréquence cumulée de sécheresse (F) donne une idée sur l'occurrence des séquences sèches sur une période d'étude. Elle est obtenue par :

$$F = \frac{\int n}{N} \times 100$$

Avec : $\int n$: effectif cumulé des séquences sèches ; N : effectif total de la série étudiée.

L'intensité des séquences de sécheresse : L'intensité de la sécheresse indique l'ampleur et la gravité du déficit hydrologique. Sur cette étude, la valeur extrême de l'IHN et de l'ISD est évaluée et considérée comme la valeur de référence de l'intensité de la sécheresse.

4. RESULTATS

L'évolution des débits moyens annuels associés à la courbe de la moyenne mobile calculée sur 5 ans permettent d'identifier la grande variabilité de l'écoulement dans le bassin du Bafing (Figure 2). De 1964 à 2014, le débit moyen écoulé est de 238 m³/s pour un maximum de 498 m³/s en 1967-68 et un minimum de 124 m³/s en 1984-85. La figure montre la persistance du déficit hydrologique et de la sécheresse dans le bassin depuis le début des années 1970. Cette sécheresse est caractérisée à court, moyen et long terme.

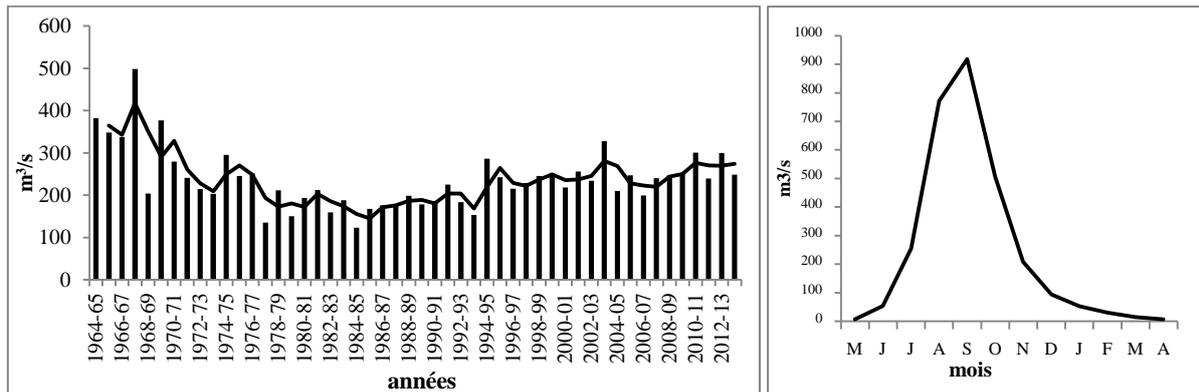


Figure 2 : Evolution des débits moyens annuels dans le bassin du Bafing à la station de Bafing-Makana

L'évolution des débits moyens mensuels montre une concentration de l'écoulement sur la période allant de juillet à novembre. L'analyse des coefficients mensuels de débits à la station de Bafing-Makana montre une période de hautes eaux de quatre mois (de juillet à octobre) : il s'agit du régime tropical de transition.

4.1. Sécheresse hydrologique à court terme

Les résultats de l'analyse de la sécheresse hydrologique à court terme sont présentés dans le Tableau 3 et sur la Figure 3. A l'échelle annuelle, des trois indices montrent une alternance de séquences sèches et humides de 1964 à 2014, avec un nombre de séquences sèches plus important de 1970 à 1999. Cette alternance de séquences sèches et humides montre des insuffisances de l'échelle 5 ans pour caractériser la sécheresse. L'indice hydrologique normalisé (IHN) a une valeur moyenne annuelle négative (avec -0,24), ce qui témoigne du caractère sec de la période. L'indice de sécheresse des débits (ISD) et l'indice logarithme décimal des déviations hydrologiques (ILDH), avec respectivement -0,04 et -0,06, confirment l'indice IHN. Toutefois, leurs valeurs sont plus faibles. Les fréquences des séquences sèches sont élevées : 66 % pour les indices ISD et ILDH et 40 % pour l'indice IHN.

A l'échelle mensuelle, le caractère sec est beaucoup plus apparent. Seuls quatre mois ont un indice positif. Sur les 8 autres mois (de novembre à juin), on note la présence de séquences sèches très extrêmes quel que soit l'indice considéré. Sur cette période sèche, le mois de mai est le plus sévèrement touché. Ces valeurs minimales (les plus extrêmes) sont notées avec les indices statistiques ILDH (-12, 5) et IHN (-12,3). Sur ces mois déficitaires, la sécheresse est très souvent extrême pour les indices statistiques IHN et ILDH (fréquence souvent égale à 100 %). Sur l'indice statistique ISD, ces mois n'enregistrent que des valeurs déficitaires (100 %). Seuls les mois de juillet et novembre qui encadrent la période de hautes eaux, avec des déficits respectifs de 50 % et 82 %, enregistrent certains excédents.

Tableau 3. Statistiques des indices de sécheresses hydrologiques pour la période 1964-2014 à court terme

Indice hydrologique normalisé													
Statistiques	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN
Moyenne	- 6,65	- 5,38	0,34	14,61	17,85	6,39	- 1,24	- 4,31	- 5,39	- 6,00	- 6,42	- 6,64	- 0,24
Maximum	- 3,07	- 2,15	5,76	29,03	40,45	19,08	4,71	- 1,26	- 2,43	- 2,74	- 3,03	- 3,17	1,67
Minimum	- 12,3	- 12,2	- 5,33	1,37	3,96	0,90	- 5,36	- 8,79	- 10,3	- 11,1	- 11,8	- 12,2	- 3,54
Fréquences	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN
Légèrement	0	0	18	0	0	0	18,0	0	0	0	0	0	40
Modérément	0	0	6	0	0	0	12,0	4	0	0	0	0	12
Sévèrement	0	0	8	0	0	0	24,0	6	0	0	0	0	6
Extrêmement	100	100	16	0	0	0	28	90	100	100	100	100	4
Indice de sécheresse des débits													
Statistiques	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN
Moyenne	- 0,98	- 0,79	0,03	2,11	2,63	0,96	- 0,19	- 0,63	- 0,79	- 0,88	- 0,94	- 0,98	- 0,04
Maximum	- 0,82	- 0,42	0,86	3,69	4,47	3,03	0,74	- 0,34	- 0,65	- 0,79	- 0,89	- 0,94	0,43
Minimum	- 1,00	- 0,99	- 0,59	0,24	0,91	0,05	- 0,58	- 0,81	- 0,89	- 0,94	- 0,98	- 1,00	- 0,51
Fréquences	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN
Déficitaires	100	100	50	0	0	0	82	100	100	100	100	100	66
Indice logarithme décimal des déviations hydrologiques													
Statistiques	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN
Moyenne	- 4,68	- 1,77	- 0,03	1,10	1,26	0,63	- 0,25	- 1,03	- 1,60	- 2,19	- 2,97	- 4,03	- 0,06
Maximum	- 1,71	- 0,54	0,62	1,55	1,70	1,39	0,55	- 0,41	- 1,06	- 1,58	- 2,22	- 2,83	0,36
Minimum	- 12,5	- 4,21	- 0,88	0,21	0,65	0,05	- 0,87	- 1,64	- 2,17	- 2,79	- 3,89	- 6,28	- 0,72
Fréquences	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN
Modérément	0	8	50	0	0	0	82	36	0	0	0	0	66
Fortement	2	56	0	0	0	0	0	64	98	22	0	0	0
Extrêmement	98	36	0	0	0	0	0	0	2	78	100	100	0

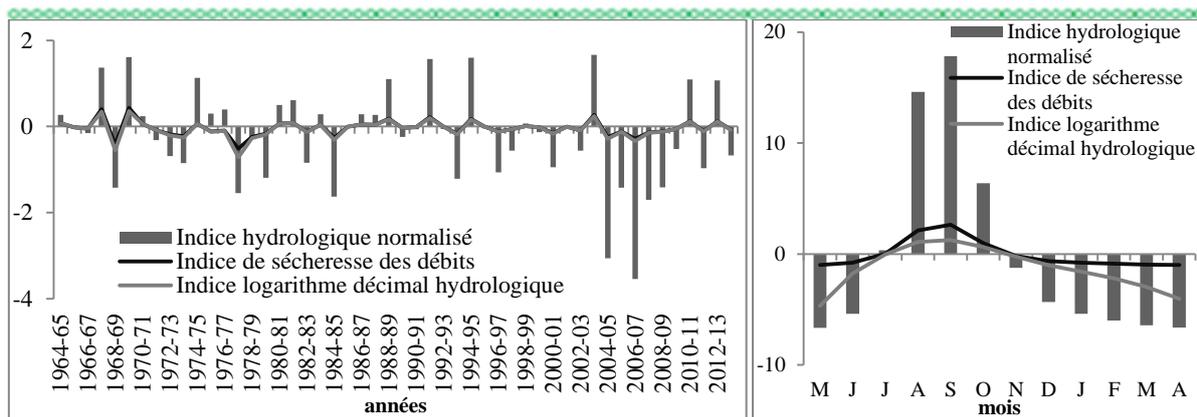


Figure 4 : Evolution de la sécheresse hydrologique à court terme à l'aide de l'IHN, l'ISD et l'ILDH

4.2. Sécheresse hydrologique à moyen terme

Les résultats de l'analyse de la sécheresse hydrologique à moyen terme sont donnés dans le Tableau 4 et la Figure 4.A l'échelle annuelle, tous les trois indices statistiques calculés indiquent d'abord des séquences humides de 1964 à 1970, ensuite des séquences sèches de 1970 aux environs de 1999.Par contre, de 2000 à 2014, il est noté une alternance de séquences sèches et humides.

Tableau 4. Statistiques des indices de sécheresses hydrologiques pour la période 1964-2014 à moyen terme

Indice hydrologique normalisé													
Statistiques	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN
Moyenne	-3,48	-2,86	0,20	7,98	9,85	3,66	-0,51	-2,18	-2,78	-3,11	-3,34	-3,46	0,00
Maximum	-1,08	-0,60	5,99	19,48	30,38	13,13	3,29	-0,34	-0,75	-0,91	-1,07	-1,15	2,25
Minimum	-5,84	-5,74	-3,36	0,36	0,44	0,01	-2,49	-4,36	-5,07	-5,50	-5,74	-5,83	-2,05
Fréquences	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN
Légèrement	0	32	36	0	0	0	48	46	22	8	0	0	44
Modérément	50	18	4	0	0	0	6	4	28	42	50	50	6
Sévèrement	0	0	2	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0
Extrêmement	50	50	10	0	0	0	10	50	50	50	50	50	2
Indice de sécheresse des débits													
Statistiques	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN
Moyenne	-0,97	-0,78	0,05	2,20	2,77	1,06	-0,15	-0,62	-0,78	-0,88	-0,94	-0,97	0,00
Maximum	-0,86	-0,36	1,02	5,96	6,96	4,36	0,93	-0,27	-0,60	-0,72	-0,85	-0,92	1,09
Minimum	-1,00	-0,98	-0,58	0,28	0,35	0,01	-0,61	-0,82	-0,90	-0,96	-0,99	-1,00	0,48
Fréquences	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN
Déficitaires	100	100	52	0	0	0	78	100	100	100	100	100	52
Indice logarithme décimal des déviations hydrologiques													
Statistiques	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN

Moyenne	-	-	-	1,11	1,27	0,65	-	-	-	-	-	-	-
	4,66	1,75	0,01				0,23	1,01	1,59	2,17	2,96	4,01	0,04
Maximum	-	-	0,71	1,94	2,08	1,68	0,66	-	-	-	-	-	0,74
	1,99	0,44						0,32	0,90	1,29	1,93	2,48	
Minimum	-	-	-	0,25	0,30	0,01	-	-	-	-	-	-	-
	12,4	4,04	0,86				0,95	1,71	2,32	3,10	4,24	6,23	0,66
Fréquences	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN
Modérément	0	16	52	0	0	0	78	44	4	0	0	0	52
Fortement	2	54	0	0	0	0	0	56	88	24	4	0	0
Extrêmement	98	30	0	0	0	0	0	0	8	76	96	100	0

Durant la période 1977 à 1993, de très longues séquences consécutives de sécheresse (17 années au total) ont été enregistrées sur les trois indices calculés. A partir de 1994, la sécheresse hydrologique s'est fait aussi ressentir avec, toutefois, un nombre moins important (5 cas au total). Les séquences sèches, à l'échelle annuelle, ont un caractère léger à modéré avec des fréquences élevées : 52 % pour les indices ISD et ILDH et 44 % pour l'indice IHN qui d'ailleurs est le seul à enregistrer une sécheresse extrême. Toutefois, la valeur de sécheresse extrême est très faible (2 %).

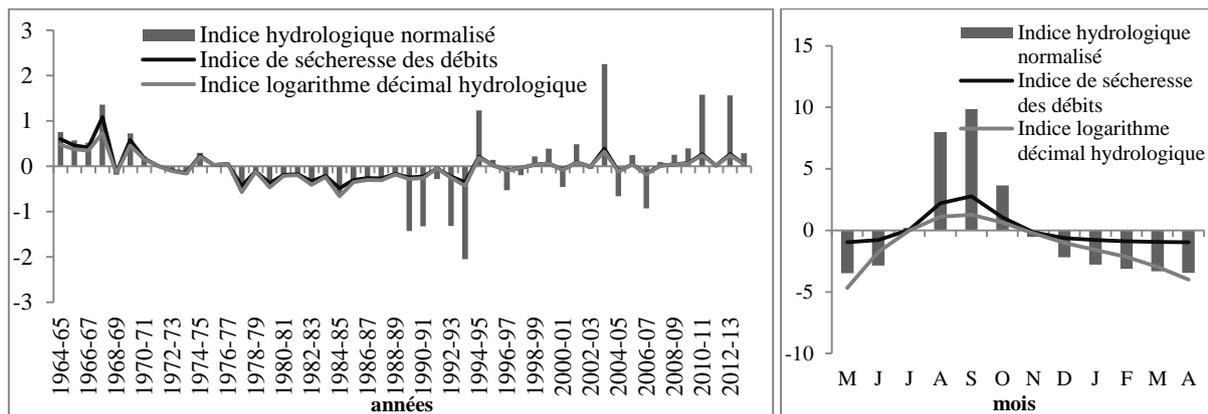


Figure 4 : Evolution de la sécheresse hydrologique à moyen terme à l'aide de l'IHN, l'ISD et l'ILDH

Autant qu'à l'échelle annuelle, à l'échelle mensuelle, le caractère sec est très bien apparent. Sur une année en moyenne, 8 mois (de novembre à juin) enregistrent la présence de séquences sèches très souvent extrêmes pour les indices IHN et ISD, et 9 mois (de novembre à juillet) pour l'indice ILDH. Il s'agit des mois de la période de basses eaux. Comme à court terme, la sécheresse hydrologique à moyen terme est plus importante au mois de mai qui enregistre des indices minimaux extrêmes atteignant -12,4 pour l'indice statistique ILDH, -5,84 pour l'indice statistique IHN et 1 pour l'indice statistique ISD. Quant aux fréquences d'apparitions, les valeurs des indices IHN et ILDH ont souvent des caractères dispersés suivant les différentes classes, mais avec une prédominance des classes extrême et forte (les valeurs atteignant ou dépassant souvent 50 %). Pour l'indice statistique ISD, les fréquences déficitaires atteignent des valeurs de 100 % sur les mois et basses eaux.

4.2 Sécheresse hydrologique à long terme

A long terme, les résultats de l'analyse de la sécheresse hydrologique sont donnés dans le Tableau 5 et la Figure 5. Les indices utilisés pour l'évaluation du déficit hydrologiques à

l'échelle annuelle sur une série d'observations allant de 1964-65 à 2013-14 montrent une importante fluctuation des périodes sèches et humides avec une forte tendance à la sécheresse, notamment sur la période 1970-1999. La période de sécheresse la plus longue qui affecte le bassin s'étale de 1977 à 1993 avec un total de 17 années sur les trois indices. Au-delà, quelques intercalations d'épisodes sèches qui ont des durées comprises entre 1 et 2 années, quelque soit l'indice, sont notées sur la période 2000-2014. On note, soit un excédent des débits, soit un déficit, sur des durées plus ou moins longues et avec des intensités variables. Si les séquences sèches avec les indices ISD et ILDH enregistrent les mêmes fréquences (52 %), l'indice IHN connaît une légère baisse (40 %).

A l'échelle mensuelle, la caractérisation des séquences déficitaires a amené à subdiviser l'année en deux périodes selon l'état sec ou humide. Tout comme à l'échelle moyen terme, la période de basses eaux ou déficitaires va de novembre à juin pour les indices IHN et ISD, et de novembre à juillet pour l'indice ILDH. Le mois de mai est toujours le mois le plus déficitaire avec des valeurs pouvant atteindre -12,4 sur l'indice ILDH. Même les valeurs moyennes de ce mois sont extrêmes avec -3,34 pour l'indice IHN et -4,66 pour l'indice ILDH. Bien que les fréquences soient dispersées, l'essentiel des valeurs de l'indice IHN sont extrêmement sèches (100 % du mois de décembre au mois de mai). Ce résultat est confirmé par les autres indices de l'étude qui enregistrent des valeurs très sèches.

Tableau 5. Statistiques des indices de sécheresses hydrologiques pour la période 1964-2014 à long terme

	Indice hydrologique normalisé												
Statistiques	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN
Moyenne	-3,34	-2,68	0,18	7,54	9,50	3,64	-0,51	-2,12	-2,69	-3,01	-3,23	-3,34	0,00
Maximum	-2,96	-1,24	3,49	20,57	24,04	15,05	3,23	-0,92	-2,04	-2,48	-2,93	-3,15	3,76
Minimum	-3,43	-3,37	-1,98	1,00	1,22	0,04	-2,10	-2,81	-3,10	-3,28	-3,39	-3,43	-1,65
Fréquences	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN
Légerement	0	0	36	0	0	0	36	2	0	0	0	0	40
Modérément	0	4	10	0	0	0	32	12	0	0	0	0	10
Sévèrement	0	10	6	0	0	0	6	12	0	0	0	0	2
Extrêmement	100	86	0	0	0	0	4	74	100	100	100	100	0
	Indice de sécheresse des débits												
Statistiques	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN
Moyenne	-0,97	-0,78	0,05	2,20	2,77	1,06	-0,15	-0,62	-0,78	-0,88	-0,94	-0,97	0,00
Maximum	-0,86	-0,36	1,02	5,99	7,00	4,38	0,94	-0,27	-0,59	-0,72	-0,85	-0,92	1,09
Minimum	-1,00	-0,98	-0,58	0,29	0,35	0,01	-0,61	-0,82	-0,90	-0,95	-0,99	-1,00	0,48
Fréquences	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN
Déficitaires	100	100	52	0	0	0	78	100	100	100	100	100	52
	Indice logarithme décimal des déviations hydrologiques												
Statistiques	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN
Moyenne	-4,66	-1,75	0,01	1,11	1,27	0,65	0,23	1,01	1,59	2,17	2,96	4,01	0,04

Maximum	-	-	0,70	1,94	2,08	1,68	0,66	0,31	0,90	1,28	1,92	2,48	0,74
Minimum	-	-	0,86	0,25	0,30	0,01	0,94	1,71	2,32	3,10	4,23	6,23	0,66
Fréquences	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	AN
Modérément	0	16	52	0	0	0	78	44	4	0	0	0	52
Fortement	2	54	0	0	0	0	0	56	88	24	4	0	0
Extrêmement	98	30	0	0	0	0	0	0	8	76	96	100	0

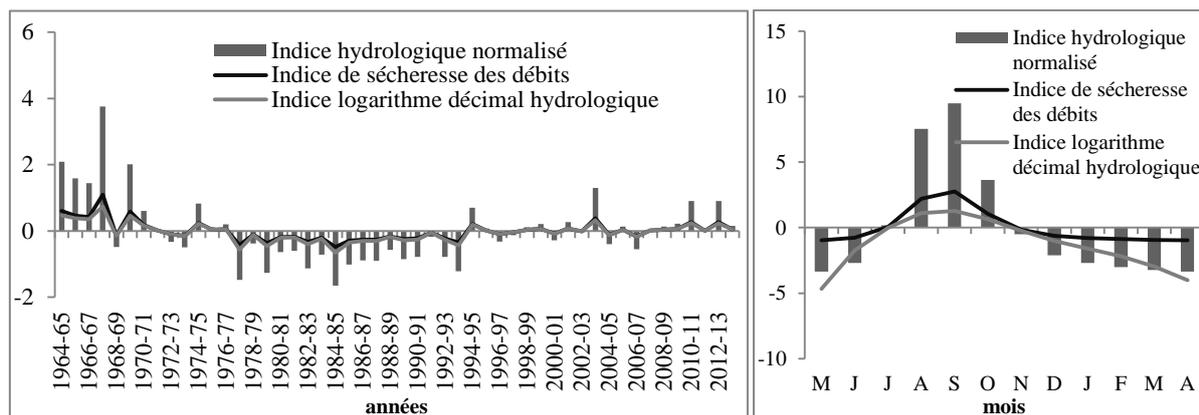


Figure 5 : Evolution de la sécheresse hydrologique à long terme à l'aide de l'IHN, l'ISD et l'ILDH

4.4. Analyse de la durée, la fréquence et l'intensité des séquences de sécheresse

L'analyse de la durée, de la fréquence et de l'intensité des séquences de sécheresse est basée sur les résultats du Tableau 6.

Tableau 6 : Intensité, durée et fréquences des séquences de sécheresses enregistrées durant la période 1964 à 2014 à court, moyen et long termes

Echelle de temps	ECHELLE MENSUELLE											
	Paramètres	INTENSITE			DUREE			FREQUENCE				
		IHN	ISD	ILDH	Paramètres	IHN	ISD	ILDH	Paramètres	IHN	ISD	ILDH
Court terme (5 ans)	Intensité	-12,3	-1,00	-12,5	Durée max. (mois)	9 (nov. - juil.)	9 (nov. - juil.)	9 (nov. - juil.)	Fréquences cumulée	69	69	69
	Type	Ext.	Mod.	Ext.								
	Date	Mai 2007	Mai 1974	Mai 1974								
Moyen terme (25 ans)	Intensité	-5,84	-1,00	-12,4	Durée max. (mois)	9 (nov. - juil.)	9 (nov. - juil.)	9 (nov. - juil.)	Fréquences cumulée	69	69	69
	Type	Ext.	Mod.	Ext.								
	Date	Mai 1991	Mai 1974	Mai 1974								
Long terme	Intensité	-3,43	-1,00	-12,4	Durée	9 (nov. - juil.)	9 (nov. - juil.)	9 (nov. - juil.)	Fréquences	69	69	69

(50 ans)	Type	Ext.	Mod.	Ext.	max. (mois)	v. - juil.)	. - juil.)	v. - juil.)	cumulée			
	Date	Mai 1991	Mai 1974	Mai 1974								
ECHELLE ANNUELLE												
Echelle de temps	INTENSITE				DUREE				FREQUENCE			
	Paramètres	IHN	ISD	ILDH	Paramètres	IHN	ISD	ILDH	Paramètres	IHN	ISD	ILDH
Court terme (5 ans)	Intensité	- 3,54	- 0,51	-0,72	Durée max (années)	6 (2004 - 2009)	10 (2004 - 2013)	6 (2004 - 2009)	Fréquences cumulée	62	66	62
	Type	Ext.	Lég.	Lég.								
	Date	2006-07	1977-78	1977-78								
Moyen terme (25 ans)	Intensité	- 2,05	- 0,48	-0,66	Durée max (années)	17 (1977 - 1993)	17 (1977 - 1993)	17 (1977 - 1993)	Fréquences cumulée	52	52	52
	Type	Ext.	Lég.	Lég.								
	Date	1993-94	1984-85	1984-85								
Long terme (50 ans)	Intensité	- 1,65	- 0,48	-0,66	Durée max (années)	17 (1977 - 1993)	17 (1977 - 1993)	17 (1977 - 1993)	Fréquences cumulée	52	52	52
	Type	Sév.	Lég.	Mod.								
	Date	1984-85	1984-85	1984-85								

Ext. : Extrêmement; Mod. : Modérément; Lég. : Légèrement; Sév. : Sévèrement ; IHN : indice hydrologique normalisé; max. : maximale ; nov. : novembre ; juil. : juillet ; ISD : indice de sécheresse des débits; ILDH : indice logarithme décimal des déviations hydrologiques

A l'échelle annuelle, sur la période 1964-2014 analysée (50 années), les sécheresses les plus remarquables de par leur intensité ont été celles des années 1977-78 à court terme, et 1984-85 à moyen et long termes (pour les indices statistiques ISD et ILDH). Quant à l'indice IHN, l'intensité est notée à une période plus récente : 2006-07 (à court terme) et 1993-94 (à moyen terme) (Tableau 6). Les épisodes secs détectés en 1977-78 et 1984-85 ont été qualifiés légèrement sévères en termes d'intensité.

L'analyse de la durée des épisodes de sécheresse montre que celle-ci peut varier d'une échelle de temps à une autre (Tableau 6). A moyen et long termes, les trois indices calculés indiquent à l'unanimité la plus longue période de sécheresse avec 17 années de séquences sèches consécutives (1977-1993). A court terme, la période de sécheresse est plus faible et varie entre 6 années (pour l'IHN et l'ILDH) et 10 années (pour l'ISD).

Les fréquences des épisodes de sécheresse observée dans le bassin sont supérieures à 50% quels que soient l'échelle de temps et l'indice considéré (Tableau 6). Toutefois, à court terme, les fréquences des séquences de sécheresse sont plus élevées : 66% (pour l'ISD) et 62% (pour l'IHN et l'ILDH). A moyen et long termes, les fréquences des séquences de sécheresses ont de 52 % quel que soit l'indice.

A l'échelle mensuelle, sur la même période (50 années), les épisodes secs détectés ont été extrêmement sévères en termes d'intensité. Le mois de mai des années 1974, 1978, 1983, 1986, 1989, 1991, 1994... a enregistré généralement l'intensité de la sécheresse la plus élevée pour les indices statistiques quelle que soit l'échelle de temps (Tableau 6). La durée des épisodes secs est partout égale à 9 mois allant de novembre à juillet. Cette durée de la période sèche témoigne du caractère et de l'ampleur de la sévérité des étiages dans le bassin. Il en est de même pour les fréquences des épisodes de sécheresse observés dans le bassin et qui sont partout de 69% quels que soient l'échelle de temps et l'indice considéré.

5. DISCUSSION

L'analyse comparée des valeurs de l'indice hydrologique normalisé (IHN), de l'indice de sécheresse des débits (ISD) et de l'indice logarithme décimal des déviations hydrologiques (ILDH) calculés pour des échelles de temps différentes a révélé que le bassin du Bafing en amont du barrage de Manantali a connu un important déficit hydrologique après 1970 avec des pics en 1977-78 et 1984-85. Ces pics ont été caractérisés par des sécheresses de types extrêmement sévères. L'IHN analogue à l'indice standardisé des précipitations, l'ISD analogue à l'indice Bhalme et Mooley et l'ILDH qui ont été employés par de nombreux auteurs sur diverses régions du globe (Bhalme et Mooley, 1979 ; McKee *et al.*, 1993 ; Mahé et Olivry, 1995 ; Hayes, 1996 ; Nalbantis et Tsakiris, 2009 ; Stângă, 2009 ; Sharma et Panu, 2010) sont pertinents pour caractériser la sécheresse dans le bassin. Ainsi, ils ont pu quantifier le déficit hydrologique pour des échelles de temps multiples.

Contrairement à une variété d'indices de caractérisation de la sécheresse hydrologique basés sur des calculs exigeants, les indices utilisés sont très simples, efficaces et disposent d'avantages majeurs: ils sont simples à calculer car ils se fondent uniquement sur des données de débit. En plus, ils peuvent être calculés pour des pas de temps variables et enfin leur normalisation, issue de leur méthode de calcul, assurent que la fréquence d'occurrence des événements extrêmes est la même partout (Lloyd-Hughes et Saunders, 2002).

On remarque avec intérêt que les trois indices donnent des résultats similaires et une tendance globale assez identique. Ces résultats confirment les nombreuses recherches effectués en Afrique de l'Ouest (Olivry *et al.*, 1993; Servat *et al.*, 1998 ; Paturel *et al.*, 1998 ; L'Hôte *et al.*, 2002 ; Mahe et L'hôte, 2004) et dans le bassin du fleuve Sénégal (Citeau *et al.*, 1988 ; Dione, 1996 ; Sow, 2007 ; Bodian, 2011 ; Faye, 2013 et 2014) qui ont montré que les décennies 1970-1979, 1980-1989 et 1990-1999 ont été des périodes sèches. Selon ces auteurs, la sécheresse de 1982-1984 est la plus intense du siècle en Afrique de l'Ouest, le déficit hydrologique y est également le plus important et la baisse hydrologique s'est intensifiée au cours des années 1980 et 1990 avant de connaître une légère baisse dans les années 2000 comme indiqué sur cette étude.

Cette diminution des débits écoulés du cours d'eau confirme le déficit de l'écoulement de l'ordre de 50,8 % et 56,4 % respectivement à Kidira et Gourbassi dans le bassin de la Falémé, affluent du fleuve Sénégal (Faye, 2013). La diminution des débits (plus de 50 %) y est en effet beaucoup très forte, ce que Olivry *et al.* (1993), Mahé et Olivry (1995) caractérisent par l'augmentation des coefficients de tarissement des rivières de l'Afrique de l'Ouest. De ce fait, une certaine durabilité de la sécheresse ou déficit hydrologique dans le bassin du fleuve Sénégal est imputée à l'effet cumulé des longues années de sécheresse : 1970, 1980, 1990. Cela confirme Servat *et al.* (1998) selon qui l'importance des déficits des débits moyens annuels sont rarement inférieurs à 30 % et parfois supérieurs à 55 %, voire 60 %.

Les résultats obtenus à court, moyen et long termes varient selon l'indice, l'échelle mais aussi selon le paramètre d'intérêt de la sécheresse. En effet, la durée et la fréquence des séquences de sécheresse indiquent des résultats identiques à moyen et long terme, mais différent de celle à court terme. Pour l'intensité de la sécheresse, les valeurs selon les indices sont différentes mais la typologie et l'occurrence obtenues sont identiques quelle que soit l'échelle de temps. Néanmoins, des désavantages sont à noter, en particulier avec l'application des indices à de petites échelles de temps sur des régions avec des saisons sèches ((Lloyd-Hughes et Saunders, 2002). Ces analyses montrent donc les effets de l'échelle de temps d'études sur la caractérisation des paramètres des séquences sèches. En effet, plus le temps choisi est long (importance des données historiques), plus l'indice statistique varie peu et permet de définir avec plus de précision les épisodes secs, d'où la nécessité d'utiliser des échelles de temps à long terme pour mieux caractériser les séquences sécheresse (Lopez *et al.*, 2006 ; Soro *et al.*, 2014).

6. CONCLUSION

La présente étude a permis de mettre en évidence les principales fluctuations du régime hydrologique, de retracer les tendances, sur base des données des débits mesurés à la station de Bafing et de déterminer les différentes périodes sèches sur la période 1964 à 2014. Les indices ont permis de visualiser et de subdiviser la série d'observation en plusieurs intervalles selon l'état sec ou humide et de caractériser l'ampleur des périodes sèches et leur intensité. La sécheresse peut se produire à l'échelle de l'année comme elle peut s'étaler sur une ou plusieurs années (comme entre 1977-1993). Les sécheresses les plus remarquables de par leur intensité, leur durée et leur fréquence ont donc été observées durant la période 1970-1999 et ce quels que soient l'échelle de temps et l'indice considérés. Ces épisodes secs ont atteint leurs paroxysmes en 1977-78 et 1984-85 avec des sécheresses de type extrêmement sévères.

Des trois indices calculés, l'indice hydrologique normalisé semblent le plus apte à caractériser la sécheresse. Des trois échelles de temps considérés, celle à long terme semble la mieux appropriée pour décrire les séquences de sécheresse car à ce pas de temps, l'indice devient stable permettant ainsi de définir avec plus de précision les épisodes secs. A l'échelle mensuelle, la méthode des indices montre que les années qui présentent 8 et 9 mois secs sont les plus fréquentes dans le bassin. La comparaison des périodes déficitaires déterminées par les différentes méthodes semble indiquer les mêmes tendances évolutives à l'échelle du bassin. Elle montre des résultats globalement similaires, avec une tendance à l'assèchement. La caractérisation des séquences sèches par les indices montre donc que les déficits hydrométriques sont très accentués. L'analyse des résultats des différents indices de sécheresse montre, qu'en plus de leurs facilités d'utilisation, les indices donnent une caractérisation de la sécheresse plus précise par rapport aux autres indices aux calculs exigeants.

L'analyse de la sécheresse qui affecte le bassin impacte sur les activités des populations. Cette sécheresse à l'échelle régionale affecte simultanément la productivité agricole dans des pays riverains au bassin. Leur stratégie d'atténuation à la sécheresse peut être de compenser le déficit alimentaire chez les voisins. La sécheresse pourrait donc avoir des conséquences sévères sur la sécurité alimentaire. De même la présence de sécheresse dans le monde entier ou dans les nations d'exportation de grain principalement peut significativement changer l'accès d'un pays en voie de développement à la nourriture du gouvernement de donateur. A cet égard, l'étude a pu appliquer une fondation sur laquelle toute une évaluation de vulnérabilité de sécheresse d'inclusion peut être construite.

REFERENCES

- Barua, S., Perera B.J.C. and Ng A.W.M., 2009. A comparative drought assessment of Yarra River Catchment in Victoria, Australia. *18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia* 13-17 July, 3245-3251.
- Beaudin I., 2007. Potentiel de la télédétection pour le suivi et la caractérisation des conditions de sécheresse en milieu méditerranéen. Rapport de Maîtrise en Sciences Géomatiques, Université Laval, 233 p.
- Bhalme H. N. and Mooley D. A., 1980. On the performance of modified Palmer Index Drought conditions, India. *Hydrological aspects of droughts: International symposium, 3-7 December 1979, New Delhi: Proceedings. Session 3. Trends and Prediction of Droughts, 373-383.*
- Bhuiyan, C., 2004. Various Drought Indices for Monitoring Drought Condition in Aravalli Terrain of India, *Proceedings of the XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, 12-23.*
- Bodian A., 2011. *Approche par modélisation pluie-débit de la connaissance régionale de la ressource en eau : Application au haut bassin du fleuve Sénégal.* Thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 288 p.
- Bodian A., Dezetter A. et Dacosta H., 2012. Apport de la modélisation pluie-débit pour la connaissance de la ressource en eau : application au haut bassin du fleuve Sénégal. *Climatologie*, vol. 9 (2012), 109-125.
- Byun H. R., Wilhite D.A., 1999. Objective quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate*, 12, 2747-2756.
- Citeau C., Berges H., Demarcq E.L. et Mahé G., 1988. *The watch of ITCZ migrations over the tropical atlantic ocean as an indicator in drought forecast over sahelian areas.* *Tropical Ocean Atmospheric Newsletter*, 45, 1-3.
- Coly A., 1996. *Le système fluvio-lacustre du Guiers : étude hydrologique et gestion quantitative intégrée.* Thèse de 3ème cycle, UCAD, 308 p.
- CSE, 2006. *Etude d'impacts des feux de brousses sur l'eau, les sols et la végétation dans la partie guinéenne du bassin du fleuve Sénégal.* Rapport OMVS, Dakar, 133 p.
- Dione O., 1996. *Evolution climatique récente et dynamique fluviale dans les hauts bassins des fleuves Sénégal et Gambie.* Thèse de doctorat, Université Lyon 3 Jean Moulin, 477 p.
- Faye C., 2014. Variabilité et tendances observées sur les débits moyens mensuels, saisonniers et annuels dans le bassin de la Falémé (Sénégal). *Hydrological Sciences Journal*, Disponible sur : DOI: 10.1080/02626667.2014.990967.
- Faye C., 2013. *Evaluation et gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de variabilité hydroclimatique : cas du bassin versant de la Falémé.* Thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 309 p.
- Fleig A.K., Tallassee L.M., Hisdal H., Hannah D.M., 2011. Regional hydrological drought in north-western Europe: linking a new Regional Drought Area Index with weather types. *Hydrological Process*, 25 (7), 1163-1179.
- Hayes M., 1996. Drought Indices. National Drought Mitigation Center. Disponible sur : <http://enso.unl.edu/ndmc>.
- Ibrahim K., Wan zin W., Jemain A., 2010. Evaluating the dry conditions in Peninsular Malaysia using bivariate copula. *Anziam Journal*, 51, pp. C555-C569.

- Jacobi J., D. Perrone D., 2013. A tool for calculating the Palmer drought indices. *Water Resources Research*, 49 (9), 6086-6089.
- Jouilil I., Bitar K., Salama H., Amraou I., Mokssit A., Tahiri M., 2013. Sécheresse météorologique au bassin hydraulique OUM ER RBIA durant les dernières décennies, *Larhyss Journal*, 12, 109-127.
- Khadr M., Morgenschweis G., Schlenkhoff A., 2009. Analysis of meteorological drought in the Ruhr basin by using the standardized precipitation index. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 57, 607-616.
- L'Hôte Y., Mahé G. Some B. et Triboulet J.P., 2002. Analysis of a sahelian rainfall index from 1896 to 2000: the drought continues. *Hydrological Sciences* 47(4), 563-572.
- Lloyd-Hughes B. et Saunders M.A., 2002. A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology*, 22, 1571-1592.
- Lopez D.N., Robles C.A.M., Gadsden H., Reyes-Gómez V.M., 2006. Caractérisation, à diverses échelles de temps, des séquences de sécheresse dans l'État de Chihuahua (Mexique). *Sécheresse*, 17 (4), 467-74.
- Mahé G., Olivry J.C., 1995 : *Variation des précipitations et des écoulements en Afrique de l'ouest et centrale de 1951 à 1989*. *Sécheresse*, 6 (1), Paris, 109-117.
- Mahé G. et L'Hôte Y., 2004. Sahel: une sécheresse persistante et un environnement profondément modifié. *La Météorologie*, 44 (8), 2-3.
- Mckee T.B., Doesken N.J. et Kleist J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scale. *Actes de la 8th Conference on Applied Climatology* (Anaheim, Californie), p. 179-184.
- Mirabbasia R., Anagnostoub E.N., Fakheri-Farda A. Dinpashoha Y., Eslamianc S., 2013. Analysis of meteorological drought in northwest Iran using the Joint Deficit Index. *Journal of Hydrology*, (492), 35-48.
- Mishra A.K., Singh V.P., 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391, 202-216.
- Nalbantis I., Tsakiris G., 2009. Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resources Management*, 23, 881-897.
- Obassi G.O., 1994. WMO's Role in the International Decade for Natural Disaster Reduction. *Bulletin of American Meteorological Society*, 75-9.
- Olivry J.C., 1996. Etude régionale sur les basses eaux ; les effets durables du déficit des précipitations sur les étiages et les tarissements en Afrique de l'ouest et du centre. XIIèmes journée hydrologiques de l'Orstom, Montpellier, 10-11 oct, 14 p.
- Olivry J.C., Bricquet J.P. et Mahé G., 1993. Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide? Proceedings of the Symposium « Hydrology of Warm Humid Regions ». *IAHS Sc.Assembly Yokohama*, 216, 66-78.
- Palmer W., 1965. Meteorological Drought. Research Paper No. 45, U.S. Department of Commerce Weather Bureau, 58 p.
- Pashiardis S., Michaelides S., 2008. Implementation of the standardized precipitation index (SPI) and the reconnaissance drought index (RDI) for regional drought assessment: a case study for Cyprus. *European Water* 23/24, 57-65.

- Paturel J.E., Servat E., Delattre M.O. et Lubes-Niel H., 1998. Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Hydrological Sciences Journal*, 43(6), 937-946.
- Rochette C., 1974. *Le bassin du Fleuve Sénégal. Monographies hydrologiques*. Orstom, 329 p.
- Servat E., Paturel J.E., Lubes-Niel H., Kouamé B., Masson J.M., Travaglio M., et Marieu B., 1999. De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'ouest et centrale non sahélienne. *Revue des sciences de l'eau*, 12 (2), 363-387.
- Shafer B.A., Edezman L.E., 1982. Development of a surface water supply index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. In: Proceedings of the Western Snow Conference. Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 164-175.
- Sharma T.C., Panu U.S., 2010. Analytical procedures for weekly hydrological droughts: a case of Canadian rivers. *Hydrological Sciences Journal*, 55 (1), 79-92.
- Soro G.E., Anouman D. G.L., Goula BI T.A., Srohorou B. et Savane I., 2014. Caractérisation des séquences de sécheresse météorologique a diverses échelles de temps en climat de type soudanais : cas de l'extrême Nord-ouest de la cote d'ivoire. *Larhyss/Journal*, 18, 107-124.
- Sow A.A., 2007. *L'hydrologie du Sud-est du Sénégal et de ses Confins guinéo-maliens : les bassins de la Gambie et de la Falémé*, Thèse de doctorat d'Etat, Université Cheikh AntaDiop de Dakar, 1232 p.
- Stângă I.C., 2009. Quantifier la sécheresse. durée, intensité, fréquence. *Analele Stiintificeale Universității Al I. Cuza" Iași*, Tom LV s. II – c., Geografie 2009, 31-46.
- Tirandaz M., Eslami A. (2012). Zoning droughts and wetness trends in north of Iran: A case study of Guilan province. *African Journal of Agricultural Research*, 7(15), 2320-2327
- Vicente-Serrano S. M., Begueria S., Lopez-Moreno. J. I., 2010. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index –SPEI. *Journal of Climate*. 23 (7), 1696-1718.
- Watson E., Forster P., Richards M., and Bandelt H. J., 1997. Mitochondrial footprints of human expansions in Africa. *Am J Hum Genet.*, 61(3), 691–704.
- Wilhite D.A., 2000. Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions. Drought: A Global Assessment Routledge, London, UK.
- Woli P. Jones J.W., Ingram K.T., Fraise C.W., 2012. Agricultural reference index for drought. *Agronomy Journal*, 104 (2), 287-300.