

Philippe ROUDIER
Mémoire de stage de Master 2 Risques Naturels

**Vulnérabilité des ressources en eau
superficielle d'un bassin soudano-sahélien
dans un contexte de changement
climatique :
approche par indicateurs**



Tuteur : Gil Mahé

Février-Juillet 2008

Remerciements

Je tenais remercier tout d'abord l'RD et toute l'équipe d'Hydrosciences pour m'avoir permis d'y faire mon stage dans de bonnes conditions.

Plus particulièrement, mon maître de stage, Gil Mahé, pour son accueil et ses conseils tout au long de mon travail ainsi que Claudine Dieulin et Nathalie Rouché qui ont pu m'aider sur divers points techniques.

Un grand merci également à Matthieu Lecoq et Arnaud Zannou, thésards, pour leurs conseils et leur accueil ainsi qu'à Line Kong A Siou pour ses photos.

Enfin, je voulais remercier tous les chercheurs qui m'ont envoyé leurs travaux quand ils n'étaient pas disponibles gratuitement et qui ont répondu à mes questions par courriel : Caroline Sullivan, Karen O'Brien, Sibiki Boiré, Mathieu Le lay, Vladimir Smakhtin, Saeid Morid, Zan Traoré et Henry Ntale.

Résumé

Vulnérabilité des ressources en eau superficielle d'un bassin soudano-sahélien dans un contexte de changement climatique : approche par indicateurs

Le bassin du Bani (Mali) risque comme bon nombre de zones en Afrique d'être touché négativement par les changements climatiques, c'est pourquoi on s'intéresse à la vulnérabilité de ce bassin, plus particulièrement de ses eaux superficielles, un élément fondamental du développement.

On tente ici dans un premier temps de définir la vulnérabilité, un concept vaste qui s'avère finalement trop global pour pouvoir conclure, et de répertorier des indices permettant d'établir une évaluation globale ou partielle de cette thématique.

On calcule par la suite plusieurs indices qui permettront de donner des éléments pour une évaluation future de la vulnérabilité tout en donnant des informations intéressantes pour d'autres secteurs comme l'agronomie, l'ingénierie. On s'intéresse tout d'abord à des valeurs utiles telles que les pluies (1963-2000) et débits de projet calculés respectivement sur 51 et 6 stations du bassin. L'étude est ensuite poursuivie par le calcul du Climatic Moisture Index puis par l'étude de paramètres pluviométriques simples dont le nombre de jours sans pluie grâce à des données journalières (1963-2000). Cela nous amène logiquement à la définition et l'évaluation des sécheresses par un premier indice : le Standardized Precipitation Index qu'on essaie de calculer sur des décades (SPI-10j). On compare enfin ce résultat avec un nouvel indice, l'Effective Drought Index, créé pour le pas de temps journalier. Ce dernier indice s'avère plus précis même si le SPI a des atouts importants.

Cela nous permet finalement de conclure sur les zones du bassin potentiellement en danger face aux sécheresses (durée, nombre et augmentation dans le temps) : elles sont au nombre de 3. On remarque également la tendance générale des sécheresses à diminuer en nombre, mais à être plutôt plus longues, le nombre de jours totaux « secs » augmentant.

Abstract

Vulnerability of superficial water resources on a soudano-sahelian watershed, in a climate changing context: study with indicators.

As a lot of African regions, the Bani watershed (Mali) is threatened by climate changes, that is why we are interested in this basin's vulnerability, and especially in its surface water's, a very important part of development.

First, we try to define the vulnerability which is a wide concept, too wide to be able to conclude in this study. We also try to list most of indicators dealing with vulnerability.

Then, some indicators have been computed, which will give in the future important elements to conclude on vulnerability and which are in the same time useful in sectors such as engineering, agronomy. We calculate first the **pluie and debit de projet** respectively for 51 and 6 stations all over the basin.

Then, we try to have an overview of the water stress with the Climatic Moisture Index and some simple rainfall parameters such as the number of dry days, calculated with daily data (1963-2000). It logically leads us to the definition and calculation of droughts with a first index, the Standardized Precipitation Index. computed at a 10 days time step. We finally try to compare the SPI with a relatively new index, the Effective Precipitation Index, created especially for daily data. The EDI seems to be more powerful. Thanks to it, we can define 3 regions particularly threatened by droughts (length, number and evolution in time). It also shows that droughts seem to be less frequent but with a longer duration; total dry days is going up

INDEX DES FIGURES	6
INDEX DES TABLEAUX	7
1. Généralités	8
1.1. Structure d'accueil	8
1.2. Introduction	8
1.2.1. Importance du sujet	8
1.2.2. Evolution de l'énoncé	8
1.2.3. Cadre du sujet	8
1.3. Présentation de la zone d'étude	9
1.3.1. Situation et topologie	9
1.3.2. Climat	9
1.3.3. Connaissances précises sur ce bassin	10
2. Notion de vulnérabilité	10
2.1. Généralités	11
2.2. Les différentes approches théoriques : survol rapide	11
2.2.1 Classification « simple » en 3 points de Downing et Patwardhan	11
2.2.2 Classification « en poupées russes » de Birkmann	11
2.2.3 Classification en <i>outcome</i> et <i>contextual vulnerability</i> de O'Brien	11
2.3. La définition précise de la vulnérabilité : une étape nécessaire	12
2.4. Méthodologie de l'évaluation de la vulnérabilité	12
2.4.1. Approche en 8 points	12
2.4.2. Vulnerability Scoping Diagram	13
2.4.2.1. Définition	13
2.5. Choix d'une approche par indicateurs	14
2.5.1. Rôle des indices	14
2.5.2. Indices trouvés dans la littérature	14
2.6. Bilan sur l'applicabilité dans le contexte du stage	15
3. Calcul des pluies décennales et vicennales	15
3.1. Préliminaires	15
3.1.1. Rôle et importance de ce calcul	15
3.1.2. Données journalières utilisées	16
3.1.3. Comblement des données	16
3.1.3.1. Corrélation	17
3.1.3.2. Comblement par fréquences cumulées	17
3.1.3.3. Limites de la méthode	17
3.1.3.4. Deuxième méthode de comblement	18
3.1.3.5. Bilan sur le comblement	18
3.2. Calculs	18
3.2.2 Commentaires sur les stations ayant des problèmes	19
3.2.3 Détection de valeurs aberrantes (« ouliers »)	19
3.2.4 Choix de la loi statistique	20
3.2.4.1 Le diagramme des L-moments	20
3.2.4.2 Découpage en régions homogènes	21
3.2.4.3 Bilan	22
3.2.5 Tests de conformité	22
3.3. Résultats et commentaires	23
4. Etude des débits	24
4.1 Calcul des débits décennaux et vicennaux	25

4.1.1	Données et choix des stations.....	25
4.1.2	Comblement des données.....	25
4.1.3	Calculs.....	26
4.1.3.1	Test avec Khronostat pour vérifier le caractère aléatoire et indépendant des séries	26
4.1.3.2	Choix de la répartition statistique.....	26
4.1.3.3	Test de conformité.....	27
4.1.4	Résultats	27
4.1.4.1	Q10 et Q20.....	27
4.1.4.2	Comparaison avec les formules empiriques de la littérature.....	27
4.1.4.3	Comparaison avec des débits décennaux calculés sur d'autres périodes.....	28
4.1.4.4	Débit de projet.....	28
5.	Calcul et tracé du Climatic Moisture Index (CMI)	28
5.1	Définition et données	28
5.2	Observations et commentaires	29
6.	Etude de 3 paramètres pluviométriques simples	30
6.1	Etudes de la variabilité au cours du temps des 5 paramètres	30
6.1.1	Approche succincte de la variation autour de l'année 1970.....	30
6.2	Comparaison de la valeur des paramètres sur le bassin pour une même période	31
6.2.1	Cartographie des paramètres sur 1971-2000.....	31
6.2.2	Commentaires.....	32
6.3	Cartographie de la variation temporelle des paramètres	32
6.3.1	Principe et cartes.....	32
6.3.2	Commentaires.....	33
6.3.3	Conclusions sur ces 5 paramètres.....	33
7.	Etude des sécheresses via des indices	34
7.1	Intérêt et choix du Standardized Precipitation Index	34
7.2	Définition et calcul pratique	35
7.3	Application à notre cas	36
7.4	Résultats	37
7.4.1	Nombre de sécheresses.....	37
7.4.1.1	Cartes et graphiques.....	37
7.4.1.2	Commentaires sur le nombre d'épisodes et son aggravation.....	38
7.4.2	Durée des sécheresses.....	38
7.4.2.1	Cartes et graphiques.....	38
7.4.2.2	Commentaires.....	39
7.4.3	Valeur seuil de pluie en deçà de laquelle on passe en sécheresse.....	39
7.5	Conclusion de l'étude par le SPI	40
7.5.1	Sur la situation du bassin.....	40
7.5.2	Sur l'utilisation du SPI avec des données journalières.....	41
7.6	Comparaison avec un autre indice : l'Effective Drought Index	41
7.6.1	Description.....	41
7.6.2	Résultats.....	41
7.6.2.1	Au sujet de la comparaison avec le SPI.....	41
8.	Conclusion générale	45
8.1	Sur l'étude : limites et ouvertures	45
8.1.1	Généralités.....	45
8.1.2	Sur le bassin.....	46
8.1.3	Ouverture.....	46

8.2 Sur le stage	46
BIBLIOGRAPHIE	47
ANNEXES	51
1. Organigramme de la MSE.	52
2. Diverses données sur le Mali (World Ressources Institute, 2003)	52
NB : Ces données ne sont malheureusement pas disponibles à une échelle locale	52
3. Géologie du bassin du Bani	53
4. Détails sur les différentes classifications de la vulnérabilité	54
5. Détail d'un indice global : le Water Poverty Index	58
6. Détail technique sur la méthode des L-moments.	61
7. Stations qui présentent une anomalie après étude par Khronostat	62
8. Tableau de résultats des P_{10}, P_{20}	62
9. Cartographie des bornes inférieures et supérieures des pluies décennales et vicennales.	63
10. Tableau de rupture, bilan du traitement par Khronostat des maxima annuels de pluie. 65	
11. Précision sur le comblement de lacunes de débit	66
12. Valeurs des Q_{10} et Q_{20} avec leurs bornes	66
13. Méthode d'interpolation	66
14. Coefficient de Variation du CMI	67
15. Cartes liées aux 5 paramètres	68
16. Définition du Standardized Precipitation Index	69
17. Détails sur l'évolution temporelle du nombre de sécheresses avec le SPI	70
18. Cartes relatives aux résultats issus du SPI	71
19. Méthode de calcul de l'Effective Drought Index (EDI)	71

INDEX DES FIGURES

Figure 1 : carte de la situation du bassin du Bani (Picouet, 2001)	9
Figure 2 : baisse de la pluviométrie au Mali	10
Figure 3 : hydrogramme du Bani à Douna (Kong A Siou, 2008)	10
Figure 4 : approche en 8 points de l'évaluation de la vulnérabilité (Schröter et al, 2005)	13
Figure 5 : Vulnerability Scoping Diagram. Aléa : sécheresse et unité exposée : système d'eau de la communauté.....	13
Figure 6 : stations pluviométriques choisies.....	16
Figure 7 : isohyètes obtenues avec les 2 méthodes de comblement.....	18
Figure 8 : diagramme des L-moments pour les 51 stations.....	20
Figure 9: groupement en 5 groupes.....	21
Figure 10 : valeur de Zdistrib selon les groupes	22
Figure 11 : cartes des pluies décennales et vicennales.....	24
Figure 12 : débit journalier maximal annuel à Bénény Kegny	26
Figure 13 : évolution du CMI sur une maille de 1940 à 1995	29
Figure 14 : comparaison du Climatic Moisture Index entre 1940-1970 et 1971-1995	29
Figure 15 : cartographie de 3 des 5 paramètres sur 1971-2000	32
Figure 16 : cartes de la variation de 3 des 5 paramètres autour de l'année 1970.....	33

Figure 17 : correspondance entre une loi de probabilité cumulée Pearson III (à gauche) et normale (à droite) pour calculer le SPI associé à une valeur de pluie. (Lloyd-Hughes et Saunders, 2002)	35
Figure 18 : Evolution temporelle du nombre de jours classés en sécheresse sur tout le bassin (63-00).....	37
Figure 19 : nombre de sécheresses (définies par le SPI) et aggravation	38
Figure 20 : évolution de la durée maximum annuelle et de la durée moyenne annuelle des sécheresses (moyenne des 51 stations).....	39
Figure 21 : cartes-bilan de l'étude de la durée des sécheresses	39
Figure 22 : valeur limite de la moyenne.....	40
Figure 23 : bilan du danger potentiel créé par les sécheresses définies par le SPI	40
Figure 24 : nombre de sécheresses (EDI<0 et EDI<-1.5) et variation autour de 1970	42
Figure 25 : durée moyenne, maximum et variation de la durée des sécheresses (EDI<0).....	43
Figure 26 : bilan du danger potentiel des sécheresses définies par l'EDI.....	44
Figure 27 : comparaison des cartes bilan des 3 études.....	44
Figure 28 : carte de la géologie du Bani à Douna (Brunet-Moret et al, 1986).....	54
Figure 29 : emboitement des différentes définitions de vulnérabilité selon Birkmann (2007)	56
Figure 30 : schéma et différences entre <i>outcome</i> et <i>contextual vulnerability</i>	57
Figure 31 : outil pour le choix entre contextual et outcome vulnerability	58
Figure 32 : pentagramme du SPI pour 4 bassins en Inde, Népal et Pakistan. Données collectées par O. dube (Leicester University), diagramme présenté par Sullivan et al (2006)	60
Figure 33 : stations présentant une anomalie aux tests de Khronostat.....	62
Figure 34 : valeurs des pluies décennales et vicennales pour les 51 stations	63
Figure 35 : cartes des bornes supérieures et inférieures des pluies vicennales et décennales.....	64
Figure 36 : coefficient de variation associé au CMI	68
Figure 37 : variation de la valeur des pluies P<5 et P>20.....	68
Figure 38 : valeur annuelle moyenne des pluies P<5 et P>20	69

INDEX DES TABLEAUX

Tableau 1 : comparaison entre <i>outcome</i> et <i>contextual vulnerability</i>	12
Tableau 2 : homogénéité en fonction de H_1	21
Tableau 3 : valeur de H_1 selon les différents groupes	21
Tableau 4 : distribution statistique choisie	22
Tableau 5: stations rejetées par le test d'Anderson-Darling	23
Tableau 6 : valeur de p pour les stations refusées, pour différentes distributions.....	23
Tableau 7 : période choisie et lacunes à combler	25
Tableau 8 : statistique p du test d'Anderson-Darling pour les débits	27
Tableau 9 : valeurs des débits décennaux et vicennaux	27
Tableau 10 : variabilité autour de l'année 1970 pour les 5 paramètres.....	31
Tableau 11 : bilan de l'étude sur les 5 paramètres	34
Tableau 12 : nomenclature du SPI	35
Tableau 13 : classes associées à l'EDI	41
Tableau 14 : comparaison des classifications issues des 2 indices	42
Tableau 15 : points négatifs et positifs de l'EDI et du SPI	45
Tableau 16 : détails de paramètres sélectionnables dans chacun des 5 composants du WPI. .	60
Tableau 17 : bilan de l'étude des ruptures avec Khronostat pour les pluies maximales annuelles.....	65
Tableau 18 : comblement des lacunes de débit	66

Tableau 19 : valeurs des débits décennaux et vicennaux, bornes inférieures et supérieures ... 66
Tableau 20 : variation du nombre de sécheresses (SPI) selon leur catégorie autour de 1970 . 71

1. Généralités

1.1. Structure d'accueil

Le présent stage, encadré par Gil Mahé, s'est déroulé du 1^{er} février au 1^{er} août 2008 à la Maison des Sciences de l'Eau de Montpellier dans le département Hydrosciences dirigé par Eric Servat et sous tutelle de L'Institut de la Recherche pour le Développement. L'organigramme du service est présenté **en annexe**

1.2. Introduction

1.2.1. Importance du sujet

Le réchauffement climatique est désormais très majoritairement reconnu par la communauté scientifique et les institutions internationales. De même, il a été affirmé que les conséquences pour de nombreuses zones du globe allaient être importantes, mais réparties inégalement : l'Afrique risque d'être durement touchée (IPCC, 2007) et plus particulièrement l'espace soudano-sahélien dont les populations sont majoritairement rurales et vivent de l'agro-pastoralisme. Il apparaît donc fondamental de s'intéresser à la vulnérabilité de ces populations qui sont soumises à une forte exposition de manière à pouvoir dans le futur trouver des moyens de lutte contre les conséquences néfastes du changement du climat.

1.2.2. Evolution de l'énoncé

Le sujet initial était « vulnérabilité des populations aux changements climatiques en contexte soudano-sahélien : approche par indicateurs ». Une recherche bibliographique approfondie, développée par la suite, a permis de montrer qu'il ne serait pas possible de conclure sur la vulnérabilité dans sa globalité tant ce concept est vaste et les données manquantes.

Le sujet est donc devenu « **vulnérabilité des ressources en eau superficielle d'un bassin soudano-sahélien dans un contexte de changement climatique, approche par indicateurs** », ce qui semble mieux adapté.

Afin de détailler les attentes de ces 6 mois on peut préciser qu'il s'agira d'effectuer un bilan sur la notion de vulnérabilité et de calculer des éléments, en particulier des indices, pour son évaluation future. Certains indices calculés sont également nécessaires dans la suite du projet et pour des réalisations futures : ainsi le calcul des pluies et débits décennaux est indispensable pour le calcul d'ouvrages hydrauliques. L'évolution temporelle des différents paramètres sera également un point important : le lien de causalité avec le réchauffement du climat ne sera pas réalisé : on constatera donc juste les évolutions et leur répartition sur le bassin.

1.2.3. Cadre du sujet

Ce travail aura lieu dans le cadre du programme RESSAC (vulnérabilité des Ressources en Eau Superficielle au Sahel aux évolutions Anthropiques et Climatiques à moyen terme), financé par l'Agence Nationale de la Recherche et qui s'échelonne entre fin 2007 et fin 2010.

1.3. Présentation de la zone d'étude

1.3.1. Situation et topologie

L'étude sera réalisée sur le bassin versant du Bani¹, un affluent du Niger, dont l'exutoire sera pris à Bénény-Kégné (recommandation de M. Mahé) : avec cette définition le bassin a une superficie de 120 000 km² et se répartit sur 3 pays : la Mali très majoritairement, la Côte d'Ivoire à l'extrémité Sud et le Burkina Faso à l'Est.

Ce bassin est parcouru par différents cours d'eau créant un chevelu : on note notamment comme principaux composants la Bagoé, le Banifing et le Baoulé qui forment après leur confluence le Bani. Ce dernier se jette à Mopti dans le Niger, dont il est le principal affluent.

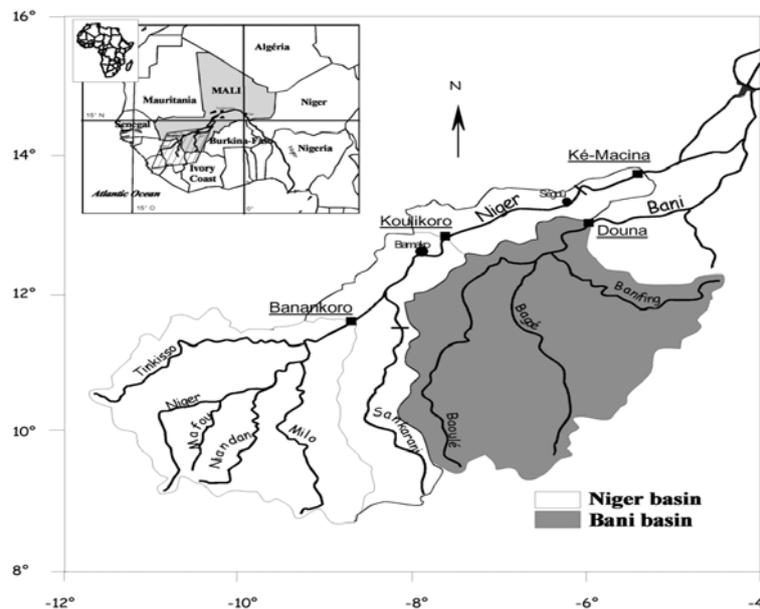


Figure 1: carte de la situation du bassin du Bani (Picouet, 2001)

1.3.2. Climat

Le climat est globalement tropical et présente une saison humide centrée en août dominée par la Mousson apportant de l'humidité du Sud. La saison sèche est quant à elle dominée par l'Harmattan, vent chaud et sec venant du Nord-est.

Les isohyètes qui ont pu déjà être tracées présentent un gradient positif du Nord vers le Sud, qui permet de définir classiquement trois grandes zones :

- la zone sahélienne au Nord (climat tropical semi aride) comprise entre les isohyètes 300 mm et 750 mm. Elle ne touche que le quart Nord du bassin. L'élevage bovin est l'activité principale, les cultures sont très aléatoires étant donné les ressources en eau (Autorité du bassin du Niger, 2002)
- la zone soudano-sahélienne (climat tropical pur) au centre du bassin, qui est comprise entre les isohyètes 750 et 1000 mm. Cette zone fait la transition entre les 2 autres. On y pratique majoritairement la culture du mil/sorgho du maïs et de l'igname ; l'élevage est également une pratique importante (Autorité du bassin Niger, 2002)

¹ Voir photographies en annexe

- la zone soudano-guinéenne au Sud du bassin avec des valeurs annuelles de pluie supérieures à 1000mm. La saison des pluies y dure au moins 6 mois (mars-avril jusqu'à octobre-novembre). Les cultures traditionnelles sont le riz, le fonio et le maïs. On y trouve « une forêt tropophile très sensible aux feux de brousse ». (Autorité du bassin Niger, 2002)

1.3.3 Connaissances précises sur ce bassin

Relativement peu d'études se sont intéressées spécifiquement au Bani et aux eaux de surface, elles concernent en effet plutôt le delta du Niger dans sa globalité ou l'hydrogéologie du bassin du Bani (Mahé, 2000). Néanmoins on peut y trouver des éléments intéressants comme la cartographie des isohyètes et la baisse de pluviométrie sur l'Afrique de l'Ouest

(Olivry et al, 1993 ; Traoré et al, 2000), le comportement hydraulique général (Brunet-Moret et al, 1986), des informations sur la géologie (Picouet, 1999 ; Brunet-Moret et al, 1986), sur

quelques paramètres chimiques des eaux (Picouet, 2002). On présente notamment pour informations en **annexe** une carte de la géologie du bassin (exutoire à Douna) et une carte du déplacement des isohyètes ci-contre, qui illustre la baisse de la pluviométrie.

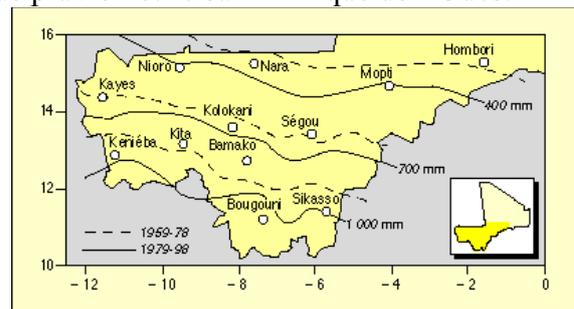


Figure 2 : baisse de la pluviométrie au Mali (Traoré et al, 2000)

Ce manque d'études spécifiques explique les nombreuses recherches en cours dans le cadre de RESSAC concernant ce bassin, dont on peut déjà tirer des éléments instructifs comme le graphique d'évolution des débits ci-dessous provenant d'un stage tout juste achevé (soutenance en juin 2008) de Line Kong A Siou (M2 Recherche Eau et Environnement, Université de Montpellier)

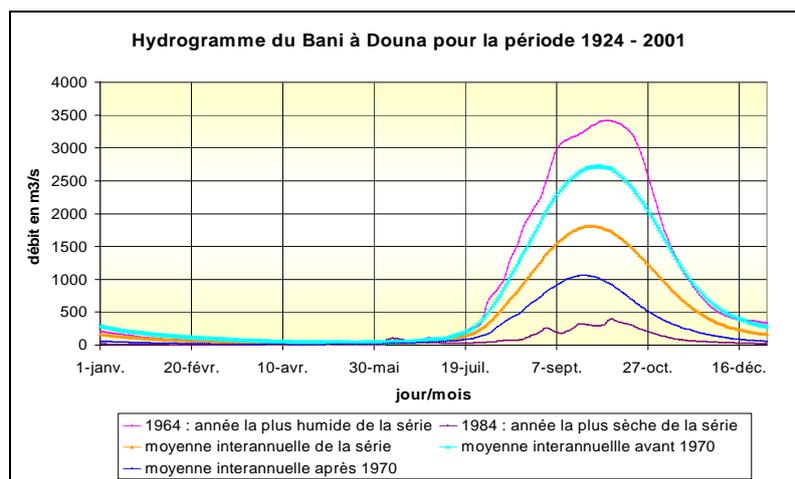


Figure 3 : hydrogramme du Bani à Douna (Kong A Siou, 2008)

On note donc une période d'étiage en de mars à juin environ et une période de hautes eaux en septembre. Il est intéressant de noter que le débit peut devenir nul pour ce fleuve.

2. Notion de vulnérabilité

2.1. Généralités

On a vu que certaines régions vont bénéficier du changement climatique alors que d'autres vont en pâtir (Tol et al, 2004) : la vulnérabilité des différents systèmes aux conséquences des changements climatiques devient donc maintenant un élément de recherche fondamental (pour permettre des stratégies d'adaptation) mais difficile à cerner. Car si ce terme paraît évident (Larousse : « qui peut être attaqué, atteint facilement »), les définitions trouvées dans la littérature scientifique varient d'auteurs à auteurs. Il est alors nécessaire de définir clairement de quoi on désire parler. Loin d'être un inutile débat entre théoriciens, cette définition stricte est fondamentale puisqu'elle décide d'une orientation de l'étude dans un sens ou dans un autre (O'Brien et al, 2007)

Déjà en 1981, la vulnérabilité apparaît comme « un concept d'un usage si général qu'il est presque inutile actuellement pour une description avec précaution, exception faite des zones de plus grand intérêt, en tant qu'indicateur rhétorique » (Timmermann, 1981). De plus, le mot vulnérabilité est souvent « relié ou confondu avec des concepts tels que la résilience, la marginalité, la susceptibilité, l'adaptabilité, la fragilité et le risque » (Liverman, 1990).

Dans un effort de synthèse, les auteurs développent peu à peu des moyens pour essayer de classer les différentes définitions que l'on trouve dans la littérature scientifique

2.2. Les différentes approches théoriques : survol rapide

On présente ici succinctement les différentes tentatives de la part de plusieurs auteurs pour classer les différents types de vulnérabilité. On pourra pour plus de précision se reporter aux **annexes** et à la bibliographie.

2.2.1 Classification « simple » en 3 points de Downing et Patwardhan

- approche par aléa
- approche par réduction de la pauvreté
- approche par changement climatique

2.2.2 Classification « en poupées russes » de Birkmann

Il s'agit d'un emboîtement des concepts de vulnérabilité : le plus restreint est « la vulnérabilité comme un facteur de risque interne » et le plus large est « vulnérabilité multidimensionnelle qui englobe les aspects physiques, sociaux, économiques, environnementaux et institutionnels » (Birkmann, 2007). On peut trouver le schéma illustrant cette approche en **annexe**.

2.2.3 Classification en *outcome* et *contextual vulnerability* de O'Brien

Cette approche est peut-être la plus intéressante car elle apporte réellement un nouveau point de vue sur la vulnérabilité, de plus une sorte d'outil (sous forme de diagramme) a été créé (O'Brien et al, 2007) pour choisir concrètement dans quel cas on se trouvait. Les auteurs ne se sont occupés que de la vulnérabilité concernant le changement climatique, qui est celle qui est majoritairement traitée actuellement. Ce concept est séparé en deux catégories, l'*outcome vulnerability* (vulnérabilité liée aux conséquences) et la *contextual vulnerability* (vulnérabilité liée au contexte). La première est liée à un cadre scientifique et la seconde à un cadre concernant la sécurité humaine.

On dresse dans le tableau suivant un résumé des commentaires faits par l'auteur sur les deux approches ; on pourra pour plus de précisions sur ces concepts se reporter **aux annexes**.

Outcome vulnerability	Contextual vulnerability
<ul style="list-style-type: none"> -la vulnérabilité est le « point final », elle découle des impacts du changement climatique -résultats linéaires des impacts projetés du changement climatique sur un système -voit le changement climatique comme un problème des impacts humains sur le système climatique. -la recherche se concentre sur les changements qui peuvent être attribués aux gaz à effet de serre. -la définition de l'IPCC vue auparavant se range dans cette catégorie -étudiée <u>très majoritairement</u> (IPCC...) -solutions plutôt techniques 	<ul style="list-style-type: none"> -la vulnérabilité est le « point de départ ». Elle est créée par le contexte. -voit le changement climatique comme un processus de transformation qui affecte les humains de différentes manières -cette vulnérabilité est considérée comme influencée par des conditions biophysiques changeantes, mais aussi par des processus dynamiques sociaux, économiques, politiques, institutionnels, des structures technologiques et des conditions contextuelles. -étudiée par les ONG, les mouvements sociaux -solutions proposées plutôt sociales que techniques

Tableau 1 : comparaison entre *outcome* et *contextual vulnerability*

2.3. La définition précise de la vulnérabilité : une étape nécessaire

Mais si savoir se situer dans ces classifications est nécessaire, il n'en reste pas moins qu'il convient d'adopter une définition personnelle plus pointue de la vulnérabilité (EEA technical report, 2005 ; Downing et Patwardhan, 2006 ; Fussel et Klein, 2006) puisqu'elle dépend du contexte et de l'échelle à laquelle on travaille. Ce travail doit être réalisé avec la plus grande précision.

Downing et Patwardhan suggèrent ainsi un cadre pour une bonne définition². La vulnérabilité est vue ainsi comme un paramètre nécessitant la définition d'un groupe, d'un secteur, d'un danger et d'une conséquence.

2.4. Méthodologie de l'évaluation de la vulnérabilité

2.4.1. Approche en 8 points

² Pour plus de renseignements, on peut se reporter à l'annexe 3 de Downing et Patwardhan (2006) et à Fussel et Klein, 2006

On a vu que de nombreux chercheurs travaillent sur la vulnérabilité et essaient d'en produire une évaluation, mais bien souvent les méthodes employées sont très différentes et donnent des résultats qui sont difficiles à comparer. C'est pourquoi un effort de méthodologie doit être fait : dans cette optique, Schröter (2005) propose une approche de l'évaluation de la vulnérabilité en 8 points, dont le schéma est présenté ci-contre. Il s'agit ici de vulnérabilité liée aux conséquences.

Une meilleure définition de chaque étape peut être trouvée dans : Assessing vulnerabilities to the effects of global change: an eight step approach (Schröter et al, 2005). Notons que ces étapes ne sont pas nécessairement à réaliser dans cet ordre, mais cela est une proposition.

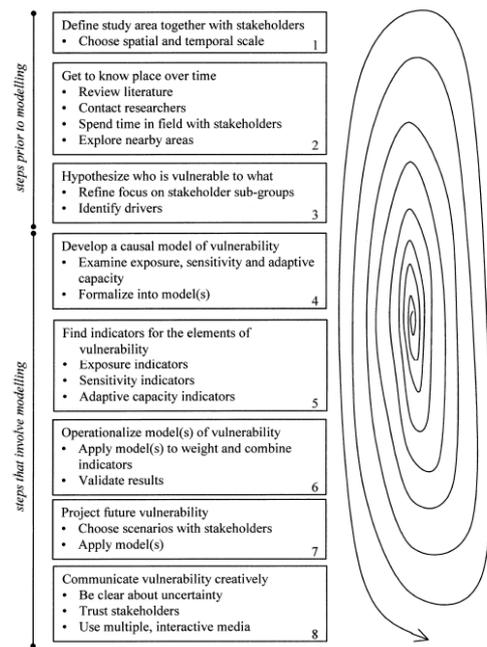


Figure 4 : approche en 8 points de l'évaluation de la vulnérabilité (Schröter et al, 2005)

2.4.2. Vulnerability Scoping Diagram

2.4.2.1. Définition

Afin de compléter cette méthode analytique, un outil permettant de mieux visualiser la situation a été développé : le Vulnerability Scoping Diagram (Polsky et al, 2007) qui se présente sous la forme suivante (déjà complété ici avec comme aléa la sécheresse et comme unité exposée le système d'eau de la communauté

Les champs *Components of Dimensions* (composants des dimensions) et *Measures of Components* (mesures des composants) sont ceux qui sont à remplir.

Le premier champ cité indique les caractéristiques des 3 dimensions de la vulnérabilité (exposition, capacité d'adaptation, sensibilité).

Le second comporte une façon d'évaluer les caractéristiques observables des composants sous-jacents.

Ce diagramme permet donc de :

- construire une base pour effectuer des comparaisons d'évaluation faites à des périodes et lieux différents.
- Offrir un point de départ pour comprendre les détails de la vulnérabilité dans un ensemble qui pourra être étudiée plus en détail par la suite.

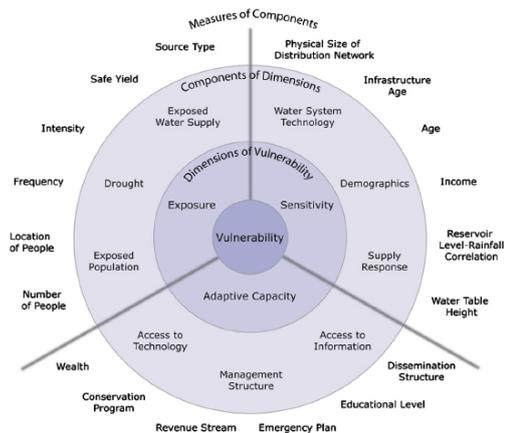


Figure 5 : Vulnerability Scoping Diagram. Aléa : sécheresse et unité exposée : système d'eau de la communauté

Le VSD permet en fait d'arriver à l'étape 5 des 8 précédemment citées. Enfin il faut préciser que pour des procédures déjà formalisées (le Water Poverty Index par exemple, voir plus bas) ce diagramme n'est pas indispensable (puisque une méthodologie plus ou moins stricte existe déjà) mais est toujours un outil intéressant, il peut notamment permettre de bien imaginer le raisonnement.

2.5. Choix d'une approche par indicateurs

2.5.1. Rôle des indices

Comme on l'a vu en introduction, cette étude se fonde sur une recherche des indicateurs existants pour mesurer la vulnérabilité. On peut alors se poser la question du rôle d'une telle approche et de sa pertinence.

Les indices ont divers atouts : ils permettent d'avoir rapidement une approche et une compréhension de phénomènes qui peuvent être très complexes comme la pauvreté. Cela permet des prises de décision adéquate par les décideurs qui sont les premiers utilisateurs de ce type d'outil (Eriksen et Kelly, 2006 ; Feitelson et Chenoweth, 2002).

Au niveau global, ces indices permettent des comparaisons entre pays et servent ainsi à déterminer les zones ayant le plus besoin d'aide. A l'échelle locale ils permettent de révéler les hétérogénéités, qui sont masquées à petite échelle (Sullivan et Meigh, 2006), et de cibler encore une fois les zones prioritaires.

Enfin, ils permettent, on en a déjà parlé, de comparer des situations à différentes périodes et donc de voir une évolution, ce qui est d'ailleurs indispensable pour une bonne efficacité (Eriksen et Kelly, 2006).

2.5.2. Indices trouvés dans la littérature

De nombreux indices peuvent servir à étudier la vulnérabilité, on peut les classer en 3 catégories. La première réunit les indices « globaux » qui étudient les différents paramètres de la vulnérabilité et essayent de les synthétiser en une valeur. Ces indices utilisent souvent sous-indices. On trouve par exemple dans ce cas le **Watershed Sustainability Index** (Chaves et Alipaz, 2006), le **Water Poverty Index** (Sullivan et Meigh, 2005) ou encore le **Climate Vulnerability Index** (Sullivan et Meigh, 2005).

La deuxième catégorie regroupe des indices moins globaux, mais qui tiennent généralement compte de plusieurs variables ou qui demandent un temps d'élaboration : ils peuvent permettre d'évaluer une partie de la vulnérabilité. On trouve par exemple le **Water Reuse Index**, le **Climate Moisture Index** (Vörösmarty et al, 2005), le **Standardized Precipitation Index** (McKee, 1993), le **Crop Water Stress Index** (Emekli et al, 2007), l'**Effective Drought Index** (Byun et Wilhite, 1999).

NB : bon nombre de ces indices concernent une évaluation du phénomène de sécheresses (qui est une part de la vulnérabilité).

Enfin, la troisième catégorie représente des indices très simples, parfois même des variables mesurables, qui sont prises en compte dans les indices globaux. Ils peuvent aussi donner à eux seuls une vision succincte de la vulnérabilité, par exemple : terres irriguées en tant que pourcentage de terre cultivées, pourcentage de terres cultivées par rapport à la surface totale, mortalité des enfants de moins de 5 ans, durée des sécheresses... On peut trouver une liste des indicateurs traditionnels de vulnérabilité chez Leichenko et O'Brien (2001) par exemple.

2.6. Bilan sur l'applicabilité dans le contexte du stage

On a maintenant une vision plus détaillée de la vulnérabilité et de comment procéder pour en faire une étude efficace. Il faut donc s'intéresser désormais à ce qui est faisable dans le contexte du stage, avec le temps et les données disponibles.

Le problème majeur est le grand nombre de domaines qui ont un rapport avec la vulnérabilité. Pour calculer des indices comme le WPI, qui donne un bon aperçu du problème il faut des données diverses¹. Par exemple, le Vulnerability Scoping Diagram fictif qu'on a présenté au-dessus montre bien que même pour une vulnérabilité bien définie comme celle du réseau d'eau d'une commune aux sécheresses, les informations nécessaires sont diverses. Or le programme RESSAC commence juste et on ne dispose pas de données comme l'occupation du sol, la démographie, les systèmes d'AEP en place à la résolution du bassin versant... Il semble donc difficile de calculer ces indices de façon correcte.

On dispose tout de même de données fiables pour certains paramètres nécessaires mais pas suffisants, comme les pluies, les débits, et dans une moindre mesure l'évapotranspiration (uniquement au pas de temps mensuel et au demi-degré carré). Il ne paraît donc possible que de proposer une évaluation des évolutions spatiales et temporelles de certains aléas dues notamment aux changements climatiques. L'étude faite pourra être reprise par la suite pour une évaluation de la vulnérabilité. Par exemple, si l'on ne peut pas pour le moment étudier vraiment la vulnérabilité aux sécheresses on peut tout de même en évaluer la fréquence, la répartition afin de n'avoir par la suite que des informations d'ordre démographique à superposer.

Le choix d'indicateurs ne peut donc être que parmi ceux qui sont les moins globaux. On s'intéressera ainsi dans un premier temps au calcul de valeurs classiques et répertoriées : les pluies et les débits d'une certaine période de retour. Le calcul de ces valeurs est utile puisqu'il permet d'une part de fournir des informations nécessaires pour la construction d'ouvrage mais il permet aussi de définir un certain type de vulnérabilité, on y reviendra.

A la suite de cela on s'intéressera à des indices trouvés dans la littérature et qu'on peut calculer. Le Climatic Moisture Index nous donnera une première approche du stress hydrique sur le bassin que nous compléterons par l'étude de différents paramètres issus de données journalières.

On se concentrera spécialement sur les sécheresses importantes pour l'agronomie (durant la saison pluvieuse) à l'aide dans un premier temps de valeurs simples (jours de pluie < 5mm...) puis du Standardized Precipitation Index qu'on essaiera de calculer avec des données journalières. On essaiera enfin de le comparer avec l'Effective Drought Index, un indice moins connu et plus ardu à calculer mais créé spécialement pour des données journalières.

3. Calcul des pluies décennales et vicennales

3.1. Préliminaires

3.1.1. Rôle et importance de ce calcul

Le lien entre les pluies décennales (ou vicennales) et les éléments nécessaires à l'étude de la vulnérabilité n'est pas forcément évident : cette valeur ne permet pas en effet de montrer l'évolution dans le temps d'un paramètre qui a un impact direct sur le bassin comme le nombre de jours sans pluie par exemple. Cependant, connaître la pluie décennale peut

¹ Voir annexes pour une meilleure définition du WPI

permettre d'évaluer la vulnérabilité des ouvrages existants qui ont été dimensionnés dans le passé. On peut citer dans ce cas les buses permettant de faire passer l'eau sous les routes, dimensionnées notamment avec les valeurs de pluie de référence.

De façon plus pratique, calculer de tels indices est utile pour la construction des ouvrages : il est fréquent sur ces zones que les bureaux d'étude se tournent vers l'IRD pour les valeurs de pluie décennales.

3.1.2. Données journalières utilisées

Il existe deux types de données, celles provenant de la base de données de Luc Ferry (notation BDpluie) et celles provenant du fichier de la MSE fournies par Nathalie Rouché (fichiers donnees bani..)

Il semble que le plus complet soit le second. Cela dit, il ne couvre pas forcément de façon adéquate tout l'espace, surtout au pas de temps journalier, pour lequel les stations récentes sont majoritairement regroupées à l'Est, parfois en dehors du Bassin. On considère des chroniques allant au moins jusqu'en 2000. Cela semble être un bon compromis entre données récentes et disponibilité.

Comme on l'a vu, il faut donc d'autres stations pour avoir une information complète. On utilise donc la **BDpluie**, qui a une meilleure résolution spatiale mais qui comporte plus de trous. C'est une solution de dépannage puisque ce n'est pas tellement une bonne chose de mélanger des stations de sources différentes. Remarquons qu'on ne pourrait pas non plus se contenter de données **BDpluie** puisque la région sud du bassin (en Côte d'Ivoire) n'est pas couverte.

La période choisie est 1963-2000, ce qui permet d'englober le plus grand nombre de stations.

Pour **la BD pluie**, on prend la même période, même si une plus grande (2 ou 3 ans en plus) était envisageable.

Notons que 5 stations ont des données qui s'arrêtent au 31/12/1999. Elles ont été choisies malgré tout car il fallait des stations à l'ouest en dehors des limites du bassin versant. En effet, il est important d'avoir une bonne précision dans cette zone de pluviométrie élevée.

Pour la sélection de toutes les stations, on a gardé comme critère moins de 10% de lacunes (Romero, 1998) afin de ne pas avoir de trop nombreux trous à combler. De plus, ce sont les stations dans le bassin et dans une zone comprise à 75km de la limite du BV qui ont été utilisées.

Le problème dans la répartition des stations est au S/SO en grande partie avec de grandes zones sans stations ; dans toutes celles disponibles de la zone, une seule (Tengrela) a une période de couverture à peu près correcte mais elle comporte beaucoup de lacunes (2616 sur environ 14.000 jours). Il y aura également un problème aux limites du bassin dans l'extrême Sud puisqu'il n'existe aucune station convenable, même en faisant varier un peu les critères de sélection.

3.1.3. Comblement des données

Le comblement de données de pluie au pas de temps journalier est un exercice difficile au sujet duquel il n'existe pas beaucoup de travaux, spécialement sur la zone étudiée (ou



Figure 6 : stations pluviométriques choisies

même sur l'Afrique de l'Ouest). On a donc essayé de réaliser de faire cela le plus correctement possible en fonction du temps disponible et du nombre de stations.

On a essayé dans un premier temps de corrélérer les mesures des différentes stations, avec toutes les données disponibles.

3.1.3.1. Corrélation

Cela n'est pas probant puisque au mieux le coefficient de corrélation est de 0.40 (on a essayé toutes les combinaisons de corrélation possible grâce au logiciel Tanagra).

En revanche si on essaye de faire ce travail mois par mois, on s'aperçoit que pour des mois, en général de faible pluviométrie (novembre, décembre, janvier, février mars), on a une corrélation bien meilleure, parfois proche de 1. Il sera donc possible de reconstituer les lacunes dans ces cas la, en trouvant l'équation de la droite de régression.

Pour toutes les régressions, on a également réparti les stations en 5 groupes. Cela a été réalisé de manière à obtenir des groupes de pluviométrie le plus homogène possible. On s'est fondé sur la cartographie des isohyètes (voir p.) pour réaliser les groupes.

Par suite, les corrélations ont été réalisées au sein de ces groupes pour des stations ayant un coefficient de corrélation supérieur à 0.65, choisi pour ne pas avoir un nuage de points trop éparpillé mais pour pouvoir également réaliser un nombre conséquent de corrélations.

Notons que, même avec cette méthode, il restera des lacunes dans les séries de données. En effet si une station n'a une corrélation correcte qu'avec une autre et qu'elles ont des lacunes à la même période, il est impossible de conclure. Les trous restants seront comblés avec la même méthode que les mois ne pouvant pas être corrélés, décrite ci-dessous :

3.1.3.2. Comblement par fréquences cumulées

- Pour une station X, on prendra l'ensemble des mesures disponibles avec la date associée
- On sépare cette chronique mois par mois puis on sélectionne les mois problématiques (4 à 10 inclus)
- On classe ces mesures en différentes classes, qui sont choisies en fonction du cas étudié à chaque fois (de 21 à 30 classes selon le mois)
- On calcule classiquement les fréquences et les fréquences cumulées pour chaque classe
- A l'aide du logiciel R on simule un échantillon de valeurs issues d'une distribution uniforme (bornes : 0 et 1, 100 colonnes, 2000 lignes)
- Ceci est réalisé pour toutes les lacunes des 51 stations et pour les mois évoqués plus haut.

NB sur la corrélation et les fréquences cumulées : on a appliqué ces méthodes sur 1963-1993 et on a gardé les 7 années restantes pour faire une sorte de validation. On a simulé ces années et on les a comparé à la réalité en calculant un coefficient de correction $K = (\text{valeur observée}) / (\text{valeur simulée})$ pour chaque mois.

Pour chacun des mois, le coefficient K est moyenné sur les 7 années et la valeur comblée devient alors : valeur finale = $K * (\text{valeur comblée après première simulation})$

3.1.3.3. Limites de la méthode

La répartition en classe, même si elle est fine, n'est pas comme une distribution continue, on perd, par exemple dans l'intervalle [0mm, 1mm] la différence entre une pluie de 0.1 et de 0.9mm. On aurait pu essayer de modéliser la courbe représentant les valeurs de pluie en fonction du temps par une fonction continue, mais cela ne donnait pas non plus forcément quelque chose de très probant puisqu'on a pu remarquer, sur des essais, que les diverses courbes ne collaient pas forcément bien aux points.

D'autre part, comme on a séparé la chronique mois par mois et non pas jour par jour il y a forcément une imprécision sur le jour précis de la pluie, puisqu'on a une méthode statistique. On ne peut même pas essayer de donner un poids plus important à certains jours pour un événement pluvieux puisque la corrélation entre différentes stations est très faible.

Mais, si cette méthode n'est sûrement pas la plus précise pour boucher des lacunes de pluie (surtout au pas de temps journalier) il faut rappeler que les mesures disponibles sont déjà atteintes d'une certaine imprécision. Il serait donc inutile d'essayer de caler les modèles de prédiction pour avoir une erreur résiduelle inférieure à l'erreur sur les mesures.

3.1.3.4. Deuxième méthode de comblement

Pour ne pas avoir ce biais de la répartition des jours au sein d'un mois on a quand même essayé de produire un jeu de données fondé uniquement sur des corrélations comme décrites auparavant. Les résultats sont alors sensiblement différents au niveau des valeurs, comme on peut le remarquer si on trace les isohyètes pour les deux méthodes.

Si cette méthode peut paraître plus juste au premier abord, la forme du nuage de point lorsqu'on tente une corrélation entre 2 stations montre qu'elle est tout de même relativement hasardeuse.

3.1.3.5. Bilan sur le comblement

Finalement, on gardera la première méthode puisque la deuxième a toujours tendance, même avec un coefficient de correction, à sous-estimer les valeurs.

Rappelons qu'il est nécessaire d'être conscient de l'imprécision de ce comblement.

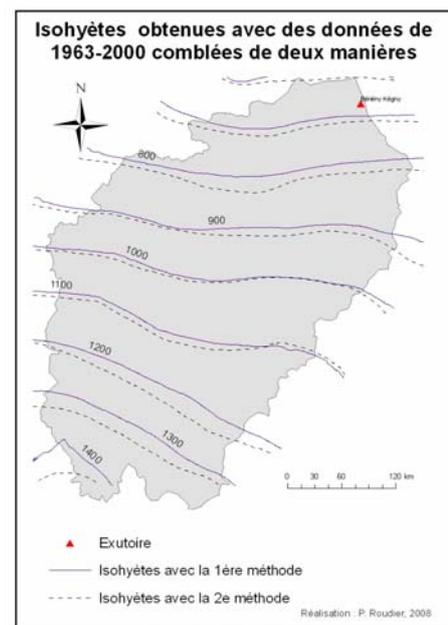


Figure 7 : isohyètes obtenues avec les 2 méthodes de comblement

3.2. Calculs

Après avoir comblé les trous dans les données, on peut passer à une nouvelle phase qui est celle de l'inférence statistique : il s'agit de voir quelle loi statistique s'applique le mieux à nos valeurs. On pourra alors calculer la valeur de la pluie de référence, décennale par exemple.

Nous disposons de plus de 30 années de données (38 exactement) ce qui permet pour les calculs d'utiliser directement les maxima annuels (Meylan et Musy, 1996). On utilisera pour cela le jeu de données qui comprend une simulation avec les fréquences cumulées.

Mais avant de tester les différentes distributions possibles, il faut vérifier si le jeu de données qui va être employé a bien un caractère aléatoire et simple (Meylan et Musy, 1996), ce qui n'est pas forcément le cas. Pour vérifier cela, on dispose de divers tests.

4.2.1 Utilisation du logiciel Khronostat

On a soumis les chroniques de pluies maximales annuelles aux différents tests disponibles dans le logiciel Khronostat, développé par l'IRD et déjà employé pour de nombreuses études. Les tests sont les suivants, on peut en trouver une description dans l'aide de Khronostat, logiciel libre d'accès :

- test de vérification du caractère aléatoire (hypothèse aléatoire : tendance) : test sur le rang (Kendall et Stuart)
- tests de détection de rupture : test de Buishand, méthode de Pettitt (évolution du test de Mann-Whitney), méthode bayésienne de Lee, segmentation de Hubert
- test de normalité (facultatif, pour information)

On a obtenu des « anomalies » sur 11 stations (**voir annexe**), mais toutes ne sont pas réhilitaires.

3.2.2 Commentaires sur les stations ayant des problèmes

On peut tout d'abord remarquer que les problèmes ne semblent pas dus à la reconstitution de la série de données puisqu'Odiene n'a presque pas de lacunes et présente des problèmes à tous les tests.

On note de plus que ce sont majoritairement des stations qui ne sont pas au Mali (surtout lorsque tous les tests sont rejetés comme pour Odiene).

Si on peut se passer de certaines stations comme Baroueli qui a des voisins proches, ce n'est pas possible dans la majorité des cas (Dogo Bougoui, Manankoro...)

On rejettera finalement

3.2.3 Détection de valeurs aberrantes (« ouliers »)

La présence de valeurs aberrantes dans la série de données peut être très importante sur le résultat du traitement statistique (Ashkar et al, 1994) surtout pour les valeurs aberrantes dans la partie supérieure, il paraît donc important de les détecter.

Ashkar recommande l'utilisation d'une méthode systématique de type statistique pour ne pas avoir à prendre uniquement de décisions sur des critères subjectifs. Le logiciel R permet de détecter, grâce au test de Grubbs (Hamed et Rao, 2000), s'il y a dans un jeu de donnée des valeurs aberrantes probables. Notons que ce test n'est pas possible à mettre en place pour des gros échantillons, c'est pourquoi nous ne l'avons pas fait auparavant. On dénombre 16 stations dont la chronique des maxima annuels présente une valeur aberrante. Cela ne signifie pas forcément qu'elle est effectivement aberrante, mais que statistiquement il y a une forte chance qu'elle le soit. Notons que les valeurs aberrantes peuvent très bien être les plus élevées (on a déjà essayé d'en enlever une partie auparavant) comme les plus basses.

Pour décider si cette valeur sera enlevée ou pas, on s'est fondé sur la connaissance du terrain de **M. Mahé** mais aussi sur une cartographie des maxima et des minima de la série de données, pour chaque station.

En effet si on remarque que, dans une zone, toutes les stations ont une valeur minimale qui oscille autour de 50 et une seule station autour de 30, il se peut fort qu'il y ait une erreur. On efface ainsi quelques données. Les données effacées seront remplacées par la deuxième valeur maximale de l'année, de manière à ne pas avoir de trous.

La gestion des valeurs aberrantes après leur détection est une question qui reste très problématique et les avis divergent sur ce point. On a choisi ici cette solution car elle est assez simple et pas saugrenue ; rappelons que la gestion des valeurs aberrantes n'est pas le sujet ici.

On aboutit ainsi à des chroniques de pluies maximales le plus correct possible avant de faire les calculs statistiques.

3.2.4 Choix de la loi statistique

Une des principales difficultés est le choix de la loi statistique car il en existe de nombreuses. Bien souvent plusieurs sont potentiellement applicables. Dès lors, il faut un critère de choix. Si cela est bien souvent fait en essayant toutes les distributions possibles et en comparant les résultats des tests d'adéquation, cela ne paraît en fait pas être une méthode très efficace. En effet, premièrement, mathématiquement « les tests ne permettent pas de comparer entre eux [...] plusieurs modèles », de plus ils sont peu puissants (Meylan et Musy, 1996).

Pour choisir une loi a priori on peut soit se fonder sur l'expérience des études sur la zone, ce qui est difficile ici, et/ou s'aider du diagramme des L-moments (Azmon et Ben-Zvi, 1996 ; Chen et al, 2006). Ce n'est qu'après ce choix qu'on pourra tester qu'on ne s'est pas trompé avec un test d'adéquation.

Rappelons que la loi qu'on choisit ne représentera jamais la réalité, c'est un modèle qui est donc forcément imparfait.

Il faut également choisir un test d'adéquation qui soit assez puissant *ie* qui soit capable de rejeter l'hypothèse H_0 assez sûrement quand il le faut. Les tests les plus fréquemment employés sont le χ^2 et celui de Kolmogorov-Smirnov. Or il a été montré qu'ils sont justement peu puissants (Meylan et Musy, 1996). On leur préférera donc le test d'Anderson-Darling, plus performant (Azmon et Ben-Zvi, 1996 ; Meylan et Musy, 1996).

3.2.4.1 Le diagramme des L-moments

Cet outil, qui est une évolution du diagramme des moments, permet *in fine* de choisir la loi qui serait potentiellement le mieux adaptée à un jeu de données. Pour cela, on va tracer le diagramme qui représente le paramètre τ_4 en fonction de τ_3 (voir annexe). En théorie, on regarde comment le nuage de points se place en fonction des tracés des lois connues.

On obtient dans notre cas un diagramme comme ci-contre, à l'aide du logiciel R et de la fonction `plotlmrda` du package `lmomco` :

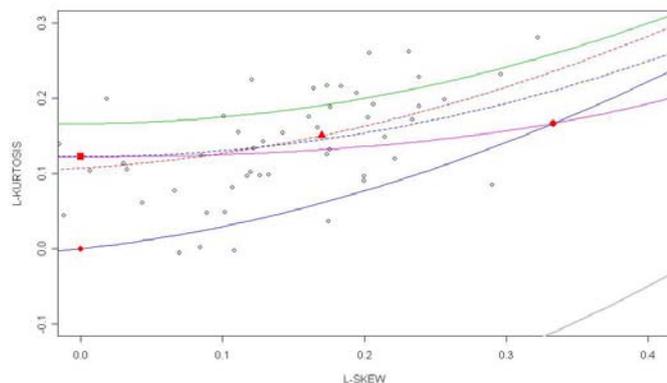


Figure 8 : diagramme des L-moments pour les 51 stations

Le nuage de points ne semble pas être en très bonne adéquation avec une loi en particulier, il faudrait donc des critères objectifs pour effectuer un choix.

Selon Hosking et Wallis (Hosking et Wallis, 1993) il faut tout d'abord évaluer deux paramètres¹. Il s'agit du paramètre de discordance D et surtout de celui d'homogénéité H . D indique si une station diffère significativement du reste du groupe (en terme de L-moments) et

¹ Pour une explication complète, il est nécessaire de se reporter à Hosking et Wallis (1993), il serait trop long de tout détailler ici.

H₁ estime le degré d'homogénéité d'un groupe pour savoir si la région concernée peut être considérée comme homogène, ce qui est nécessaire pour le choix de la loi statistique.

Dans le cas présent, avec toutes les stations, on obtient H₁=1.8 (avec les codes créés par Hosking pour le logiciel R, fonction *REGTST* du package *nsRFA*, 500 simulations) ce qui selon Hosking et Wallis, repris par divers auteurs (Chen et al, 2006), représente un groupe avec une hétérogénéité potentielle. On précise qu'on a les critères ci-contre pour une région.

H₁ < 1	acceptablement homogène
1 < H₁ < 2	hétérogénéité potentielle
H₁ > 2	sûrement hétérogène.

Tableau 2 : homogénéité en fonction de H₁

Notons que si le paramètre H₁ est le critère de décision prépondérant, H₂ et H₃ existent aussi mais sont moins fiables.

Dans notre cas, on ne peut pas conclure à une région homogène, d'autant plus qu'on se situe vers la limite supérieure avec 1.8.

3.2.4.2 Découpage en régions homogènes

Il s'agit donc maintenant de découper le bassin versant en régions homogènes. Il existe des procédés codifiés pour cela (fonction *roi* (*region of influence*) de R mais cela prendrait beaucoup de temps supplémentaire et les régions homogènes ne sont pas le cœur de ce travail.

On a donc décidé d'utiliser les 5 groupes formés en fonction des isohyètes (voir ci-contre). On obtient alors les résultats suivants :

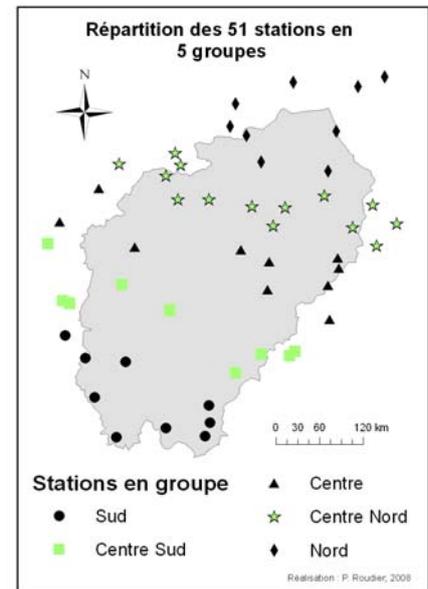


Figure 9: groupement en 5 groupes

- valeurs de H₁

Groupe	H ₁ (décision)
Centre Nord	0.9354 (homogénéité acceptable)*
Centre	-0.9924 (homogénéité acceptable)*
Nord	-0.4416 (homogénéité acceptable)
Sud	0.32 (homogénéité acceptable)
Centre Sud	0.9899 (homogénéité acceptable)*

Tableau 3 : valeur de H₁ selon les différents groupes

*Pour ces groupes, on est vraiment à la limite, et il arrive qu'en répétant les simulations qui sont fondés sur des expériences aléatoires, on arrive à H₁=1.02 par exemple. Cependant, on acceptera l'homogénéité tout en gardant en mémoire ce choix.

NB : conformément à ce que recommande Soumaguel (Soumaguel, 1996) citant Cochonneau les régions homogènes sont prises en prenant compte de la forme des isohyètes, à l'intérieur d'une bande ou l'écart entre les stations varie entre 200 et 500 mm.

- note sur les valeurs de D

Aucune station, au sein de son groupe respectif, n'a un paramètre de discordance D suffisamment élevé (*ie* > 3) pour être considérée comme discordante vis-à-vis du groupe.

- valeurs de Zdistrib

Le dernier paramètre à calculer est Z_{distrib} : il permet d'estimer en se fondant sur le paramètre τ_3 si une distribution donnée (parmi les distributions à 3 paramètres : Generalized Logistic, Generalized Extreme Value, Generalized Normal (lognormal), Pearson III, generalized Pareto) est potentiellement représentative de l'échantillon de données.

Notons que des lois classiques comme celle de Weibull ou de Gumbel ne sont pas explicitement prises en compte car elles sont « comprises » dans la loi Generalized Extreme Value.

Selon Hosking et Wallis on peut affirmer cette adéquation potentielle entre les valeurs et la distribution si la valeur absolue de Z_{distrib} est inférieure à 1,63.

D'autre part, parmi plusieurs distributions candidates, on peut en choisir une simplement en plaçant sur le diagramme le point moyen de la série et en regardant (Kumar et al, 2003 ; Chen et al, 2006) de quelle distribution ce point est le plus proche.

On a, toujours grâce au logiciel R les résultats ci-contre.

	GL	GEV	GN	P. III	Pareto
Centre Nord	1.67	0.44	0.51	0.35	-2.04
Centre	1.59	0.41	0.27	-0.12	-2.17
Nord	1.61	-0.24	-0.42	-0.98	-4.26
Sud	2.40	0.18	0.27	-0.045	-4.33
Centre Sud	3.48	1.19	1.09	0.54	-3.65

Figure 10 : valeur de Z_{distrib} selon les groupes et les distributions

Les lois qui sont possibles sont en gras. Cependant une loi avec $Z_{\text{distrib}}=1.2$ sera moins efficace qu'avec $Z_{\text{distrib}}=0.07$. Quand la différence est moins flagrante, on a besoin de tracer le diagramme avec le point moyen, comme pour le groupe 2.

On ne peut le montrer par les graphiques faute de place, mais le choix n'est pas évident : on prendra une loi des valeurs extrêmes généralisées (GEV)

De même, pour le groupe 1, le choix est très difficile, on prendra une GEV a posteriori étant donné que les zones encadrant la zone 1 semblent être régies par des lois GEV.

3.2.4.3 Bilan

Pour l'homogénéité finale il semble bon de rester sur 5 régions (on a tenté également un autre regroupement, plus en 2 zones qui ne fonctionne pas). On va finalement tester pour ces 5 régions les distributions ci-contre :

Région homogène	Distributions à tester
Centre-Nord	Generalized Extreme Values
Centre	Generalized Extreme Values
Nord	Generalized Extreme Values
Sud	Pearson III
Centre-Sud	Generalized Extreme Values

Tableau 4 : distribution statistique choisie

NB : pour ne pas oublier la loi Log-Pearson III, on a fait ce travail avec le Log des valeurs de pluie (Ben-Zvi et Azmon, 1997), mais les résultats pour Z_{distrib} ne sont pas concluants.

Remarque : il est intéressant de voir que cela semble assez logique : les 2/3 nord du bassin semblent régis par une loi des valeurs extrêmes généralisées et le sud par une loi de Pearson III.

3.2.5 Tests de conformité

Il est nécessaire de vérifier que les distributions choisies peuvent représenter le jeu de données que l'on a. Pour cela, on peut effectuer un premier contrôle visuel quand cela est possible mais la décision n'est pas possible dans les cas litigieux (acceptation ou pas ?). Il faut

alors se référer à un test qui validera ou pas l'hypothèse H_0 : « la fonction F peut représenter le jeu de données ».

Comme on l'a vu, un test puissant pour ce genre d'exercice est celui d'Anderson-Darling ; Laio recommande même (Laio, 2004) pour l'étude d'événements extrêmes, ce qui est notre cas, un test modifié qu'on emploiera. On utilise pour cela la fonction *A2_GOF_{laio}* du package *nsRFA* de R.

On obtient alors une valeur de p, ie la probabilité que le test soit faux (par exemple si $p=0.91$ alors le test à 10% est rejeté (exemple issu de la notice d'utilisation du test¹))

On a donc testé les lois que l'on avait sélectionnées. On a présenté ci-contre le bilan des stations rejetées, en fonction du seuil de confiance.

Groupe	Rejetées (à 95%)	Rejetées (à 90%)
Centre-Nord	3/12	Id
Centre	0	0
Nord	0	1/9
Sud	0	0
Centre- Sud	0	0

Tableau 5: stations rejetées par le test d'Anderson-Darling

NB : si on prend un seuil de 80%, ce qui est plus restrictif encore, on n'ajoute que 3 stations en plus.

Pour ces stations, on a alors cherché une autre distribution pour laquelle le test serait possible. On a essayé la distribution dont le Z_{dist} avait la deuxième plus petite valeur. On récapitule dans le tableau ci-dessous les valeurs de p pour les autres distributions, uniquement pour les stations évoquées auparavant.

Distribution	Beleko	Tansilla	Solenzo	Segou
GEV	Dt*	Dt*	Dt*	Dt*
Log normal	0.958	0.953	0.988	0.917
Pearson III	0.901	0.992	0.997	0.750

Tableau 6 : valeur de p pour les stations refusées, pour différentes distributions

*Dt : Déjà testée (1^{ère} loi choisie)

Finalement, on parvient à trouver une distribution adéquate pour Segou, mais pas pour Tansilla et Solenzo pour lesquelles aucune ne convient. Ces deux stations sont contiguës, ce qui peut laisser présager qu'un phénomène local empêche une adéquation à une loi.

Quant à Beleko, une loi de Pearson III serait à la limite acceptable, mais rigoureusement non.

En conclusion, on remarque que les lois choisies donnent de bons résultats à part dans le groupe 1 ou 25% des stations ne s'adaptent pas à une loi.

3.3. Résultats et commentaires

Maintenant qu'on a acceptée telle ou telle distribution (en toute rigueur il faudrait valider ces distributions avec des valeurs qu'on n'aurait pas utilisées pour le calage, mais on ne dispose pas d'un nombre de valeur suffisant et d'assez de temps) il faut calculer la valeur des pluies pour une période de retour donnée.

Cette valeur est forcément accompagnée d'un intervalle de confiance qui matérialise l'incertitude liée à la distribution statistique. C'est en quelque sorte la mesure de la confiance à accorder au résultat (quelquefois, cet intervalle de confiance intervient dans le calcul de la « valeur de projet », la valeur utile de la pluie décennale pour le projet, ce n'est pas le cas ici). On prendra ici un intervalle de confiance de 80% ($\alpha=20\%$).

¹ <http://finzi.psych.upenn.edu/R/library/nsRFA/html/GOF_{laio}2004.html>

La mesure du quantile et de l'intervalle de confiance sera faite avec R en utilisant la fonction *qua2ci* dont on peut trouver une description dans la rubrique d'aide de R¹. Il est important de savoir que cette estimation de l'erreur ne prend en compte que l'erreur due à l'opération d'échantillonnage : tout ce qui est de l'ordre de l'erreur dans les mesures, dans les comblements des lacunes ou dans les diverses opérations de traitement est quasiment impossible à estimer précisément.

Dans notre cas, il est clair que l'imprécision est importante et que les valeurs données par la suite sont à prendre avec les plus grandes précautions.

On obtient finalement pour chaque station les résultats **présentés en annexes** (on a choisi des périodes de retour T=10 ans et T=20 ans, car l'échantillon ne comportant que 37 années, on ne peut pas calculer de période plus longue)

La cartographie de ces valeurs (P₁₀ d'une part et P₂₀ d'autre part) interpolées par krigeage² est présentée ci-dessous, la cartographie des 2 bornes est en **annexes**

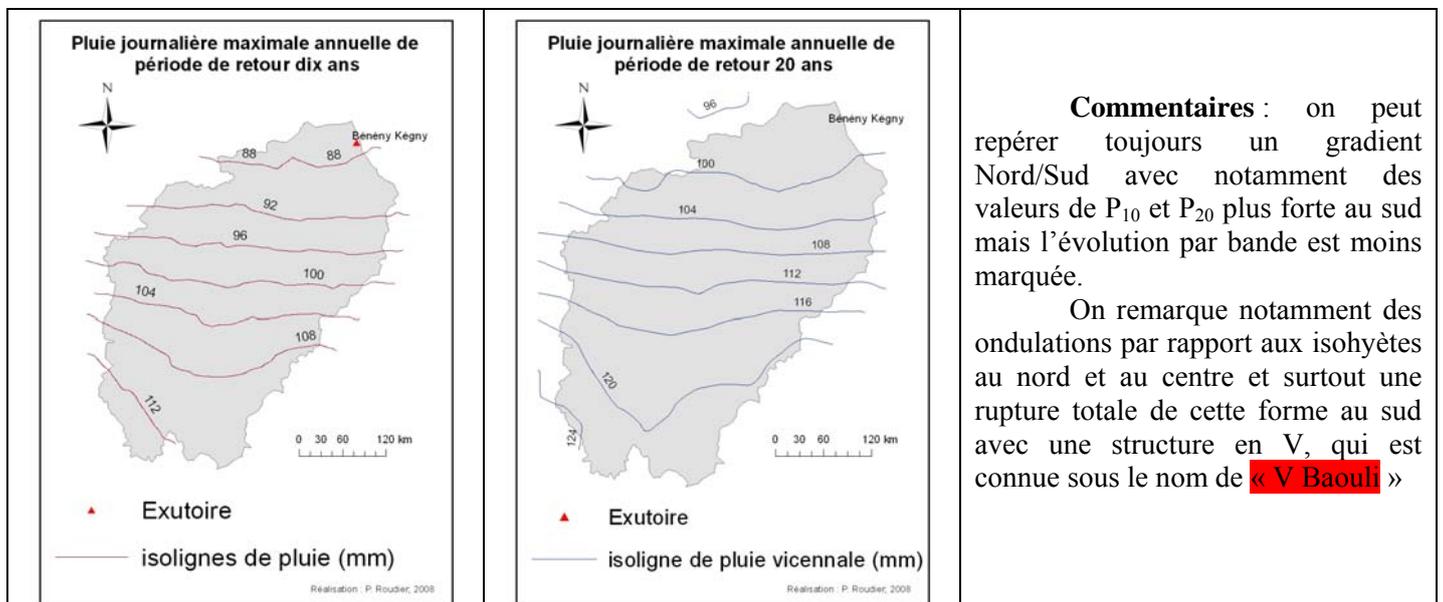


Figure 11 : cartes des pluies décennales et vicennales

Commentaires : on peut repérer toujours un gradient Nord/Sud avec notamment des valeurs de P₁₀ et P₂₀ plus forte au sud mais l'évolution par bande est moins marquée.

On remarque notamment des ondulations par rapport aux isohyètes au nord et au centre et surtout une rupture totale de cette forme au sud avec une structure en V, qui est connue sous le nom de « V Baouli »

Ces résultats peuvent ainsi être utilisés pour des dimensionnements d'ouvrage, en gardant toujours en tête la forte imprécision due aux données.

4. Etude des débits

L'ensemble de l'étude s'intéresse aux eaux de surface, il faut donc également travailler sur les débits. Mais cela est moins important que la pluie dans le cadre de notre sujet, c'est pourquoi on s'y attardera moins. La variation des débits est en effet moins fondamentale que celle des de la pluie dans des domaines comme l'agriculture, et pour l'eau de boisson en général. **Cependant, ce paramètre peut avoir une importance notamment pour la pêche, la vulnérabilité aux inondations...**

¹ <http://finzi.psych.upenn.edu/R/library/lmomco/html/qua2ci.html>

² Pour les commentaires sur l'interpolation, voir les annexes

C'est pourquoi on s'intéressera en premier lieu au calcul des débits de crue décennaux et vicennaux (dans un but assez pratique de dimensionnement d'ouvrage). On parlera très rapidement de l'étiage puisque ce thème est le sujet d'un autre mémoire qui n'est pas fini.

4.1 Calcul des débits décennaux et vicennaux

4.1.1 Données et choix des stations

Les données sont celles qui ont été mises en place par Luc Ferry, ce sont les plus récentes et les plus au point. On dispose dans le jeu de données de 20 stations : parmi celles-ci on a choisi celle qui avait un jeu de données utilisable pour calculer le débit décennal. Il faut donc une période d'au moins 30 ans sans trop de lacunes, ou du moins pas de lacunes dans les mois de forts débits (puisque pour le calcul du Q_{10} on gardera uniquement le débit maximal annuel). Il reste finalement après cette sélection 6 stations : les autres ont en effet soit des périodes trop courtes, soit beaucoup trop de lacunes (plusieurs années manquent en entier). Ces stations sélectionnées ont une distribution spatiale qui n'est pas trop mauvaise sur le bassin, à part au Nord où on manque d'information. Notons que l'une de ces stations est en dehors des limites du bassin (plus au Nord).

Par la suite il faut choisir une période pour chaque station. Le mieux serait de trouver une longue période commune mais si on fait cela, le meilleur choix en tenant compte de tous les paramètres est 1971-2002. D'une part cette plage est assez restreinte, d'autre part elle gêne beaucoup d'années pour certaines stations.

On a donc décidé de prendre une plage de temps différente pour chaque station. Cela ne permettra pas une comparaison rigoureuse entre station, mais on aura déjà une bonne idée et chaque valeur prise indépendamment sera plus précise. En effet il est important d'effectuer les calculs de valeurs de références sur les débits avec des données les plus récentes possibles pour éviter un mauvais dimensionnement des ouvrages comme cela a été le cas du barrage de Barge au Burkina-Faso. Celui-ci a connu un débit de pointe en 1994 bien supérieur à celui pour lequel il avait été dimensionné (Paturel et al, 2003). Ce barrage avait été conçu en 1992 avec des données d'avant 1980.

Si ce choix des données les plus récentes semble être justifié pour le calcul des débits de référence, il est nécessaire pour les constructeurs d'ouvrages comme des barrages de ne pas prendre uniquement la valeur de référence mais de prendre aussi en compte l'évolution possible des débits. Ainsi « la conception [de ces ouvrages] doit être robuste à l'effet de plusieurs années de sécheresse ou de surabondance » (Paturel et al, 2003)

Finalement, les périodes sont les suivantes :

Notons que ces périodes ne sont pas exemptes de lacunes, même en ne prenant en compte que les mois de haut débit (sur 40 années, on a souvent une fois le mois de septembre ou d'octobre manquant).

Stations	Période choisie	Lacunes à combler
Dioila	1971/2005	Septembre 98
Bougouni	1964/2002	Août à octobre 99+ octobre 02
Pankourou	1956/2006	Septembre 74
Sofara	1952/2006	Octobre 98 et 00
Douna	1951/2004	Août à octobre 98
Bénény-Kegny	1951/2002	Août à octobre 00

Tableau 7 : période choisie et lacunes à combler

4.1.2 Comblement des données

On va combler ces lacunes problématiques en essayant des corrélations (linéaires ou pas selon le cas).

On effectuera la corrélation entre des stations proches et des stations sur le même bief pour voir ce qui est le plus probant (avoir les mêmes conditions climatiques ou être sur un même affluent du Bani). Le choix se fera par le tracé des graphiques et par le coefficient de régression (voir annexe)

On prendra la période de régression la plus longue possible (en général quelque chose comme 52-01) en laissant les années après 2001 pour une validation : on simulera les données sur cette période pour voir si les simulations s'adaptent à la réalité. Cela permettra de créer un coefficient de correction ($K = \text{valeur simulée} / \text{valeur réelle}$) pour corriger les données simulées des lacunes. Précisons de plus que l'étape de corrélation se fera mois par mois, c'est-à-dire qu'entre 2 stations, l'équation de régression pour le mois de septembre sera différente de celle d'octobre.

4.1.3 Calculs

4.1.3.1 Test avec Khronostat pour vérifier le caractère aléatoire et indépendant des séries

On applique donc aux 6 stations les tests déjà réalisés pour les pluies (Buishand, Pettitt...). 5 stations sur 6 sont alors refusées aux tests de détection de rupture et du caractère aléatoire. La seule acceptée est Dioila dont la chronique commence en 1970.

Notons que la rupture a lieu dans les 5 cas en 1970 ou en 1971, ce qui confirme les valeurs trouvées dans la littérature (la rupture en 1970 est admise).

Il n'est donc pas possible de faire des calculs d'inférence statistiques sur ces valeurs. Pour essayer d'éviter ce problème, on tronque les séries en 1971 pour passer la rupture (idée suggérée par la réussite de Dioila aux tests).

Avec ces séries tronquées (mais comportant toujours plus de 30 ans de données) on obtient cette fois une acceptation à tous les tests. Le calcul du débit de période de retour 10 ans se fera donc en commençant en 1970.

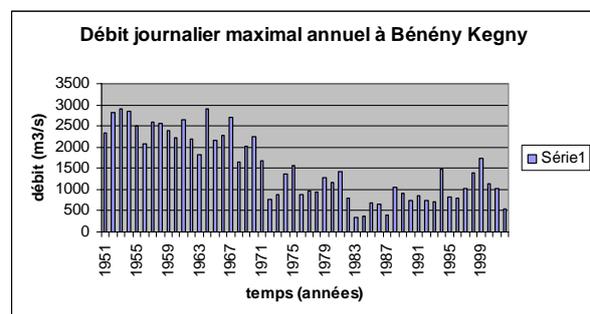


Figure 12 : débit journalier maximal annuel à Bénény Kegny

4.1.3.2 Choix de la répartition statistique

On essaye, comme avec les pluies, de voir avec la fonction *REGTST* de R si les 6 stations sont comprises dans une zone qui peut être considérée comme homogène. Le paramètre H_1 est égal à 1.31 ce qui montre l'hétérogénéité de la zone, ce qui était très prévisible.

On groupe alors Bénény-Kegny, Sofara et Douna d'une part et Pankourou, Bougouni, Dioila d'autre part.

Le premier groupe obtient alors $H_1=0.30$, il peut donc être considéré comme homogène. Quant à la loi choisie, la valeur de Z dont on a déjà parlé permet de choisir

plusieurs distributions, la valeur la plus faible étant pour la distribution valeurs extrêmes généralisées (GEV, $Z=-0.39$)

Le second groupe est également homogène avec $H_1=-0.43$. La distribution choisie est cette fois une Pearson III (PIII).

4.1.3.3 Test de conformité

On utilise toujours le test d'Anderson-Darling (fonction $A2_GOFlaio$), qui accepte les distributions choisies pour les 6 stations, avec un intervalle de confiance de 10% ou même 20%, comme le montre les valeurs suivantes :

Stations	Bé.-Ké	Douna	Sofara	Pankourou	Bougouni	Dioila
Statistique p*	0.34	0.22	0.41	0.64	0.15	0.68

Tableau 8 : statistique p du test d'Anderson-Darling pour les débits

*p est comme décrit auparavant

4.1.4 Résultats

4.1.4.1 Q10 et Q20

Stations	Bé-Ké	Douna	Sofara	Pankourou	Bougouni	Dioila
Q10 (m ³ /s)	1579.2	1908.0	1142.5	1049.3	589.1	753.3
Q20 (m ³ /s)	1818.2	2249.0	1250.1	1269.9	665.4	860.2

Tableau 9 : valeurs des débits décennaux et vicennaux

En observant ces valeurs on remarque une apparente aberration : en effet, les valeurs du Q₁₀ (et du Q₂₀) de Sofara sont nettement inférieures à celles de Douna alors que Sofara est bien plus en aval. Cela ne vient pas d'une erreur de calcul ou de traitement des données puisqu'on s'aperçoit, en utilisant des données brutes sans lacunes, qu'en hautes eaux il en est toujours de même.

On trouve à cela un élément d'explication dans la Monographie du Niger (Brunet-Moret et al, 1986). Il y est en effet expliqué qu'en période de hautes eaux, ce phénomène est courant. Il est apparemment dû à une forte évaporation entre ces stations et à des prises d'eau nombreuses sur le cours d'eau. Les valeurs trouvées ne sont donc finalement pas aberrantes.

NB : on devrait en toute rigueur appliquer un coefficient de pointe r aux débits journaliers pour passer aux débits instantanés. Pour cela on pourrait appliquer la formule empirique de Fuller, préconisée par Laborde (Laborde, 2003) : $r=1+(2.66/S)^{0.3}$ où S est la surface en km².

Seulement, pour des bassins de très grandes tailles comme dans notre cas, r tend vers 1 donc les valeurs de débit instantané et journalier sont quasiment égales. Sachant que cette formule donne une valeur approchée de r, il ne semble pas pertinent d'effectuer ce calcul.

4.1.4.2 Comparaison avec les formules empiriques de la littérature

Si des formules empiriques ont été mises en place par l'ORSTOM pour calculer le débit décennal, elles ne sont valables que pour des petits et moyens bassins.

On n'a pas trouvé dans les publications d'autres formules empiriques que celle de Roche (Roche, 1963) qui préconise pour le Bani jusqu'à Douna une formule simple mais qui semble fonctionner :

$$Q_{10} = 1.32 * S^{0.671}$$

On a vu que les débits journaliers maximaux décroissaient après 1970, cette formule n'est donc plus valable (ce qui est confirmé en comparant avec les valeurs qu'on a calculées). Par une régression linéaire sur les logarithmes, en se servant de 4 stations (ce qui est très peu) on trouve désormais :

$$Q_{10}=1.58*S^{0.614}$$

Cette formule est clairement grossière mais peut permettre une première approximation du débit décennal. Notons que son application ne peut pas aller en aval de Douna puisqu'on a déjà vu que les débits décennaux diminuaient en allant vers l'aval entre Douna et Sofara ; or la fonction proposée est croissante.

4.1.4.3 Comparaison avec des débits décennaux calculés sur d'autres périodes

On a déjà vu que la période choisie allait avoir une influence sur la valeur finale du débit de référence. Il semble donc intéressant de présenter des résultats qu'on a trouvés dans la littérature (Brunet-Moret et al, 1986) afin de pouvoir les comparer avec ceux présentés ci-dessus mais aussi pour offrir un élément de réflexion dynamique aux décideurs : un débit décennal n'est pas une valeur figée et peut dépendre des périodes.

Ainsi dans la monographie du Niger, on voit qu'à Douna et pour la période 1951-1979, $Q_{10}=3359 \text{ m}^3/\text{s}$. Cela représente une valeur 76% plus grande que les $1908 \text{ m}^3/\text{s}$ qu'on a trouvée avant. Cela est facile lorsqu'on voit la chronique des débits maximaux journaliers : les plus grandes valeurs sont toutes avant 1963 et oscillent autour de $3000 \text{ m}^3/\text{s}$

De même à Sofara, $Q_{10}=1630 \text{ m}^3/\text{s}$ soit + 43% par rapport à notre valeur.

4.1.4.4 Débit de projet

Fréquemment, le débit dit de projet, qui sert au dimensionnement des ouvrages n'est pas le débit décennal mais le débit centennal. Celui-ci n'est pas accessible directement par une méthode d'inférence statistique car on ne dispose pas de suffisamment de données. On a alors diverses méthodes pour le calculer, citera comme exemple celle recommandée par l'ORSTOM (ex-IRD) qui applique l'équation suivante

4.2 Commentaire sur les débits d'étiage

On ne traitera quasiment pas cette partie puisque c'est le sujet d'un autre stage qui n'est pas encore fini, on l'a vu. On peut tout de même citer quelques uns des premiers résultats. Pour plus de détails on pourra se reporter au mémoire de Line Kong A Siou (2008)

5. Calcul et tracé du Climatic Moisture Index (CMI)

Afin d'avoir un premier aperçu du stress hydrique sur le bassin, on essaye dans un premier temps d'utiliser les jeux de données qui sont déjà organisés et complétés et d'en extraire une information. On utilisera par la suite les données journalières, pour effectuer le calcul d'autres indices.

5.1 Définition et données

Cet indice a été utilisé par divers chercheurs (Vörösmarty, 2005 ; Willmott, 1992) et représente le ratio de la pluie annuelle sur l'évapotranspiration potentielle annuelle. Pour avoir un indice compris entre -1 et 1 il est strictement défini par :

$$\begin{cases} \text{CMI} = (P/ETP) - 1 & \text{si } P < ETP \\ \text{CMI} = 1 - (ETP/P) & \text{autrement} \end{cases}$$

Les données utilisées ici ne seront pas les mêmes que pour le reste de l'étude. Il s'agit en effet pour les pluies de données mensuelles du CRU (Climatic Research Unit de l'université d'East Anglia) qui ont déjà été commentées et pour les ETP de valeurs issues de la plateforme hydrologique Modmens. La résolution spatiale est au demi-degré carré et les données couvrent la période 1940-1995. Ce sont les valeurs d'ETP qui limitent la longueur de la plage puisque les chroniques de pluie vont jusqu'à 2000.

On obtient donc pour chaque année une valeur de l'indice. On donne par exemple le graphe ci-contre pour une maille du sud du bassin. On voit qu'il y a une évolution certaine et une rupture à partir de 1970, idée qui est confirmée par les études trouvées dans la littérature (L'hôte et al, 2002 ; Paturol et al, 2003). On va donc calculer la moyenne du CMI sur 1940-1970 puis sur 1971-1995 et tracer les cartes correspondantes.

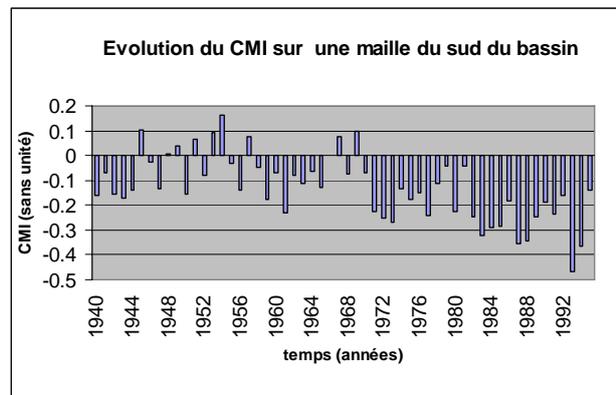


Figure 13 : évolution du CMI sur une maille de 1940 à 1995

De plus on cartographiera aussi le coefficient de variation CV (voir annexe)

utilisé par Vörösmarty (Vörösmarty, 2005) et qui est tel que : $CV = \sigma / \text{moyenne}$. Cela permet de donner une idée de la variabilité de l'indice sur la période donnée.

On obtient finalement les résultats suivants :

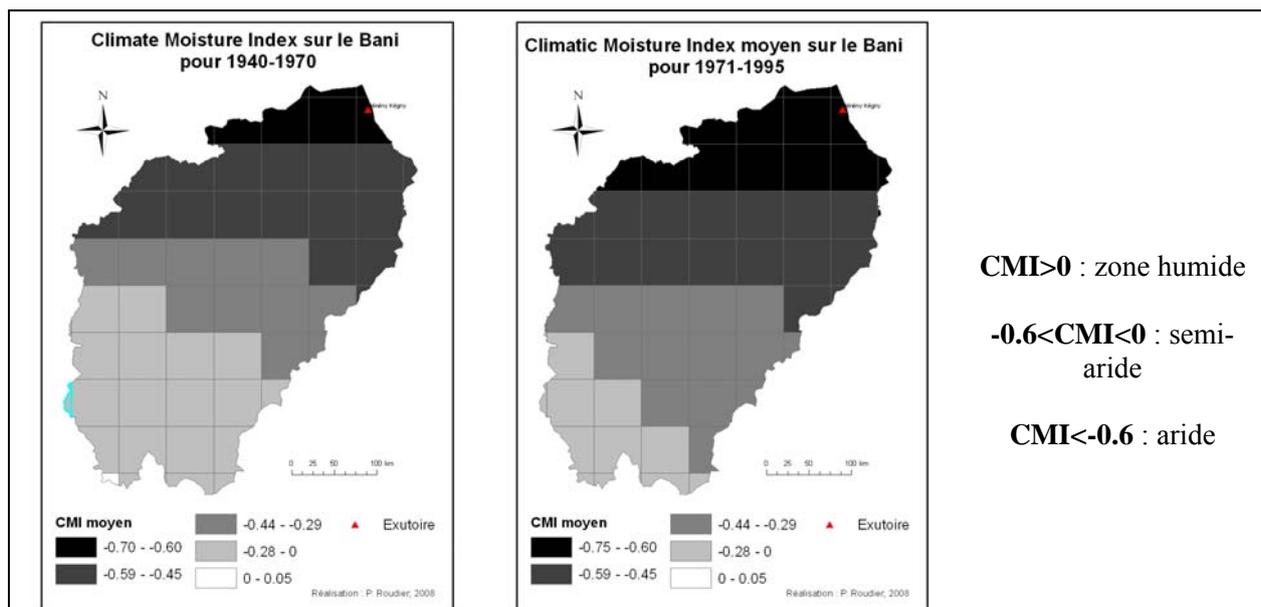


Figure 14 : comparaison du Climatic Moisture Index entre 1940-1970 et 1971-1995

5.2 Observations et commentaires

Tout d'abord, notons que l'on retrouve de façon assez marquée la structure des isohyètes trouvées dans la littérature (L'hôte et al, 2002 ; Traoré et al, 2000) et qu'on également pu tracer dans cette étude (voir plus haut), mais avec une déformation, une ondulation sur la partie centre Est.

On observe de plus nettement que les lignes « d'iso-indice » se déplacent vers le Sud entre les 2 périodes (d'un demi degré environ) : on a une tendance de baisse de l'indice, surtout sur le centre du bassin. Notons que, si entre 1940 et 1970 la zone aride se limite à l'extrémité nord du bassin, elle descend beaucoup plus bas sur la période 1971-1995.

De même, il y avait une très petite partie au sud du bassin qui était en « zone humide », elle ne l'est plus sur la seconde période.

Quant aux coefficients de variation (**voir annexe**), les valeurs sont beaucoup plus fortes sur la période 1940-1970 : cela peut être dû à une erreur dans les données, étant donné que Vörösmarty ne semble pas trouver de valeur supérieure à 1. Il est cependant certain que les zones de forte variabilité temporelle de l'indice sont au Sud du bassin, et cela pour les 2 périodes.

Notons de plus qu'une grande valeur de coefficient de variation dans le sud (où le CMI moyen est relativement faible) indique qu'on pourra tout de même avoir certaines années avec un CMI positif (donc classification *humide*) ce qui n'est pas le cas du Nord et du centre du bassin où on sera toujours en CMI négatif.

En conclusion, on assiste donc à une aggravation du stress hydrique sur la totalité du bassin ainsi qu'une apparente baisse de la variabilité interannuelle du CMI. Notons de plus que la zone Sud-est semble plus touchée par l'évolution temporelle que la zone Sud-ouest.

Il est nécessaire de garder à l'esprit que cette étude utilise des données qui s'arrêtent en 1995.

6. Etude de 3 paramètres pluviométriques simples

On va calculer pour chaque année disponible et pour chaque station le nombre de jours sans pluie, le nombre de jours où la pluie est inférieure à 5 mm (notation $P < 5$) et le nombre de jours où la pluie est supérieure à 20 mm (notation $P > 20$). De plus, on a aussi évalué la valeur moyenne par an des $P > 20$ et des $P < 5$ (sans compter les pluies nulles).

Ces paramètres, choisis en concertation avec M. Mahé, permettent d'avoir une idée sur la composition du total annuel. Cela est important car une petite et une forte pluie n'ont évidemment pas le même impact sur la recharge de la réserve utile par exemple.

6.1 Etudes de la variabilité au cours du temps des 5 paramètres

6.1.1 Approche succincte de la variation autour de l'année 1970

Comme on l'a vu, d'après de nombreux auteurs il existe en Afrique une rupture dans la chronique des pluies aux alentours de l'année 1970 (baisse de pluviométrie), nous avons donc calculé la moyenne de 1963 à 1970 et de 1971 à 2000 afin d'effectuer une première comparaison succincte entre ces deux périodes et de voir si on retrouve ces résultats.

On a obtenu les résultats suivants :

	Nbre de jours où $P=0$ mm	Nbre de jours où $P<5$ mm	Valeur moyenne de	Nbre de jours où $P>20$ mm	Valeur moyenne de $P>20$ mm
--	------------------------------	------------------------------	----------------------	-------------------------------	--------------------------------

			P<5mm		
Stations avec hausse du paramètre	11/51	19/51	17/51	1/51	7/51
Stations avec baisse du paramètre	1/51	27/51	21/51	41/51	7/51
Stations avec hausse/baisse faible (<5%)	39/51	5/51	13/51	9/51	37/51

Tableau 10 : variabilité autour de l'année 1970 pour les 5 paramètres

Premières conclusions :

On note une tendance de variation des extrêmes : en effet il est clair que le nombre de jours de forte pluviométrie diminue entre les deux périodes ; le nombre de jours secs semble légèrement augmenter même si cette tendance n'apparaît pas comme significative. En revanche la valeur moyenne des événements $P>20$ ne varie pas significativement.

Quant aux événements $P<5$, ils ont tendance à diminuer également (nombre de jours et valeur de la pluie) et leur valeur baisse, mais pas non plus de façon significative. Notons que cette étude est peu précise puisqu'elle prend le bassin comme un tout homogène, on détaillera région par région par la suite.

6.1.2 Tentative de détection de la rupture avec Khronostat

Par la suite, on utilise donc le logiciel Khronostat pour appliquer les tests de détection de rupture précédemment évoqués.

On obtient des résultats présentés dans un tableau **en annexe** qui consigne les années de rupture potentielle. On peut en tirer les commentaires suivants :

- pour $P>20$: Khronostats ne dénombre pas un nombre important de stations ayant une rupture (13/51) ce qui peut paraître étonnant par rapport aux résultats vus précédemment (diminution marquée du nombre de jour où $P>20$ mm)
- Pour $P<5$: 32 séries présentent une rupture allant de 1970 à 1990
- Pour $P=0$: 30 séries présentent une rupture allant de 1970 à 1990.

Finalement, l'emploi de Khronostat ne s'avère pas déterminant, il est probable qu'il n'y a pas assez d'années avant 1970 pour déterminer la rupture.

6.2 Comparaison de la valeur des paramètres sur le bassin pour une même période

6.2.1 Cartographie des paramètres sur 1971-2000

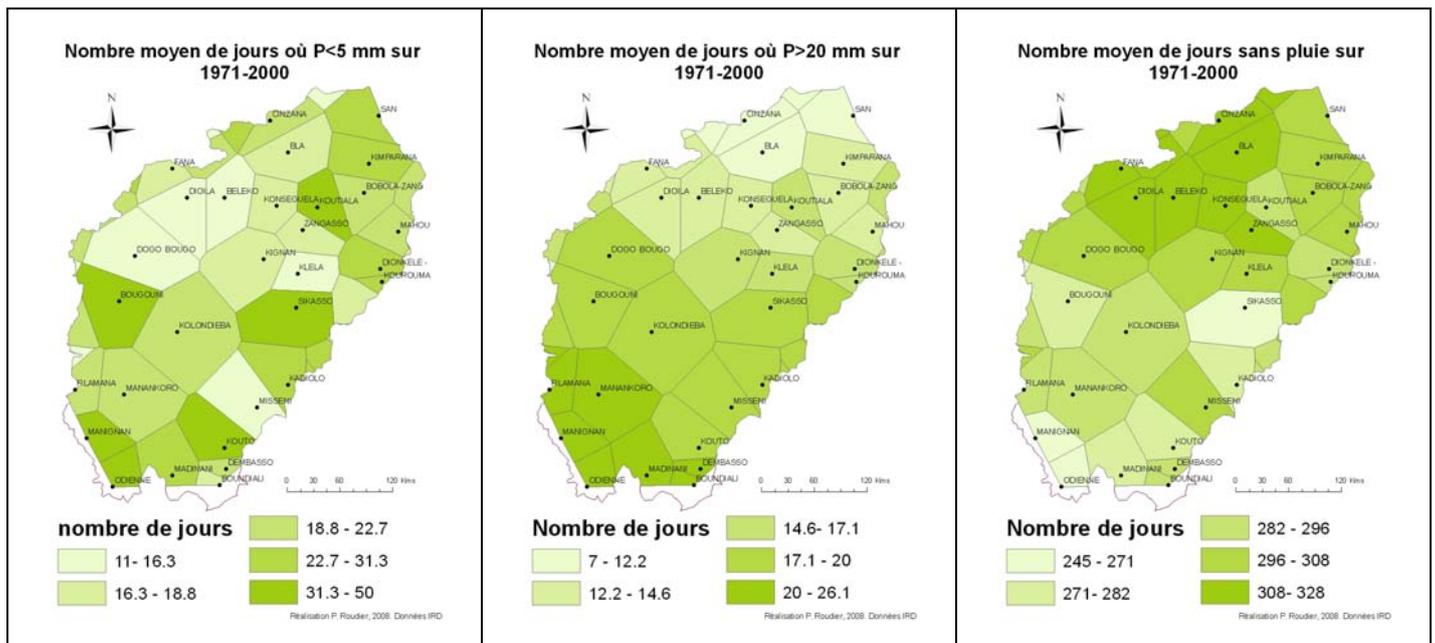


Figure 15 : cartographie de 3 des 5 paramètres sur 1971-2000

Note sur la technique d'interpolation : on a cette fois (et pour le reste de l'étude) choisi une méthode plus traditionnelle : les polygones de Thiessen (module *Geostatistical Wizard*). Le krigeage n'a pas été utilisé ici car dans plusieurs cas on n'arrivait pas à ajuster correctement les paramètres : la validation croisée était très mauvaise ce qui donnait des cartes de couleurs presque uniforme. Etant donné le nombre de cartes et le temps qu'il faut pour réaliser un krigeage, la méthode ci-dessus a été préférée. Comme pour le krigeage, le Sud du bassin n'est pas renseigné pour les paramètres étudiés. On prend cette décision pour ne pas introduire de station « imaginaire » plus au Sud.

6.2.2 Commentaires

- Jours sans pluie : on note clairement un gradient Nord/Sud qui est assez logique mais également des différences, pour une même latitude entre l'Est et l'Ouest du bassin. La région de Cinzana, Bla, Beleko, Fana présente en effet un nombre de jours de sécheresse plus élevé que vers Dionkele, Kourouma, Bobola-Zangasso.
- Nombre de jours où $P < 5\text{mm}$: ces jours sont nombreux dans l'extrême Sud du bassin et dans une moindre mesure sur le Nord-est (San, Kimparana, Bobola-Zangasso). Le Centre-ouest (Beleko, Dioila, Fana...) connaît peu de pluie de ce type (jusqu'à 4.5 fois moins)
- Nombre de jours où $P > 20\text{mm}$: il y a clairement une diminution de ce paramètre en allant vers le Nord : on retrouve une structure qui suit à peu près celle des isohyètes avec tout de même une poche de valeurs plus élevées au Nord-est.
- Valeur moyenne des pluies $< 5\text{mm}$ (voir annexe) : il n'y a pas de différence Nord/Sud remarquable. En revanche, on note une poche importante de valeur plus élevées dans la région Centre-ouest déjà citée (Beleko, Dioila, Fana...)
- Valeur moyenne des pluies $> 20\text{mm}$ (voir annexe) : il s'agit des mêmes commentaires que précédemment, à cela après que le gradient Nord/Sud est moins marqué.

6.3 Cartographie de la variation temporelle des paramètres

6.3.1 Principe et cartes

Etant donné la grande taille du bassin et sa diversité au niveau de la pluviométrie, il est difficile de décrire une évolution temporelle globale pour tout le bassin en se fondant seulement sur quelques stations, c'est pourquoi on a décidé tracer les cartes de la variation (en %) de chaque paramètre entre 1963-1970 et 1971-2000 : cela permettra de montrer des zones d'évolution ce que ne permettait pas la petite **approche du 6.1.1 qui** ne spatialisait pas les variations.

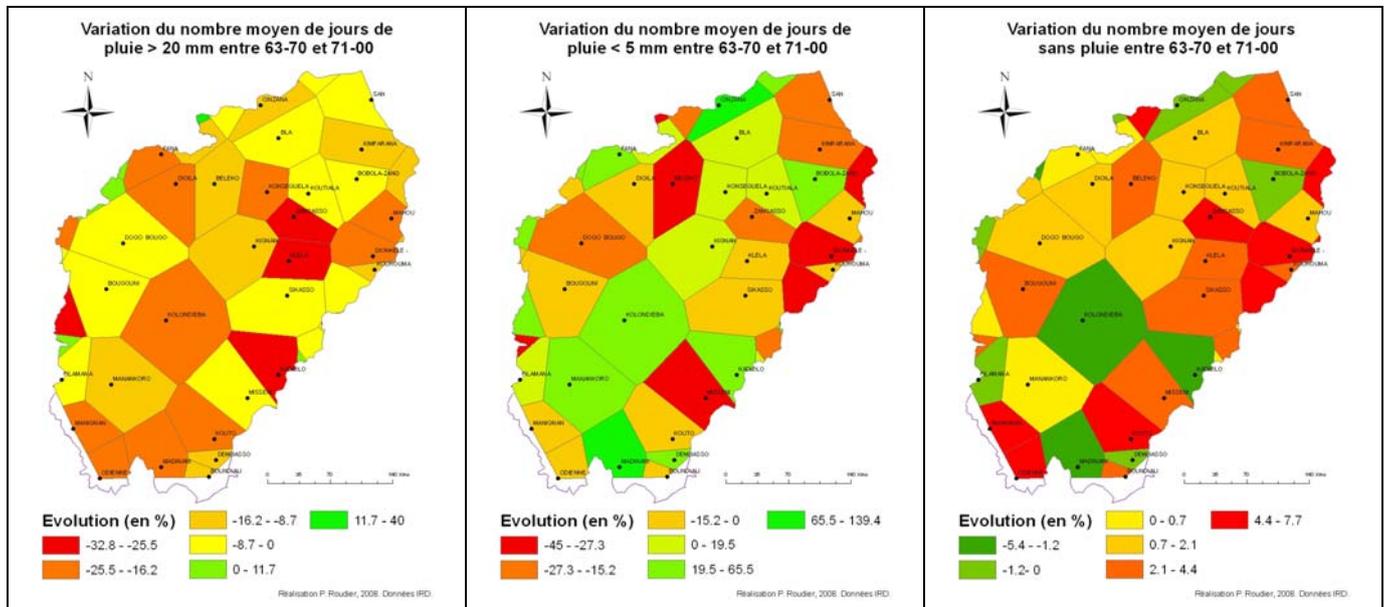


Figure 16 : cartes de la variation de 3 des 5 paramètres autour de l'année 1970

NB : Choisir 1970 est arbitraire et n'est pas parfait, mais il semble que cela corresponde avec la rupture. D'autre part, il est clair qu'il aurait été mieux d'avoir une période plus longue que 1963-1970, mais on aurait alors perdu énormément en résolution spatiale.

6.3.2 Commentaires

- Jours sans pluie : on remarque une augmentation globale même si elle est faible en valeur comme on a pu le voir. Les zones majoritairement concernées sont au Nord-est vers Zangasso, Dionkele et au Sud vers Manignan.
- Nombre de jours où $P < 5$ mm : il y a une opposition entre le Nord où le nombre de jours diminue et le Sud où c'est majoritairement l'inverse. On note encore la présence d'une zone vers Zangasso et Dionkele où la baisse du nombre de jour est importante, cette zone s'étend d'ailleurs plus au Sud.
- Valeur moyenne des pluies < 5 mm : c'est à peu près le négatif de précédemment. La moyenne de ces pluies augmente au Nord (ou plutôt au centre nord) et baisse au Sud ; la poche de Zangasso montre des valeurs en augmentation.
- Nombre de jours où $P > 20$ mm : La partie Nord du bassin est peu touchée et n'évolue pas beaucoup. A l'inverse, au Sud, le nombre de jours diminue de façon significative. C'est encore vers la poche de Zangasso (Klela, Dionkele, Mahou) que la baisse est la plus forte.
- Valeur moyenne des pluies > 20 mm : comme on l'a vu, les variations ne sont pas flagrantes ici (voir légende). Néanmoins, on peut voir plutôt une diminution au Nord et une augmentation au Nord avec une poche beaucoup moins marquée qu'avant.

6.3.3 Conclusions sur ces 5 paramètres

Zone	P = 0 mm	P < 5mm	P > 20mm
Nord	Différence Est/Ouest. Pas de vraie tendance.	Moitié est : baisse du nombre de jours Moitié ouest : augmentation	Baisse générale
Centre-Nord	Différence Est/ouest : situation plus critique à l'Est. Tendance à l'aggravation de tous les paramètres		
Centre	Evolution semblable au centre-Nord, en moins marquée. Les valeurs des P>20 augmentent dans le temps.		
Centre-Sud			
Sud	Augmentation légère	Augmentation en nombre Petite baisse en valeur (mm)	Forte baisse

Tableau 11 : bilan de l'étude sur les 5 paramètres

Il est très intéressant de voir que le nombre de petites pluies augmente uniquement sur le Sud du bassin. Cela serait dû au fait que **la zone de convergence venant** du Sud reste de plus en plus bloquée sur ces zones, plus longtemps. En contrepartie, elle remonte moins au Nord d'où les baisses au Nord.

Retenons également une différence Est/Ouest sur plusieurs zones, et une tendance générale d'aggravation, qui n'est qu'un reflet de la baisse de pluviométrie (une cartographie du déplacement des isohyètes)

7. Etude des sécheresses via des indices

7.1 Intérêt et choix du Standardized Precipitation Index

L'un des paramètres (le nombre de jours sans pluie) que nous avons choisis ci-dessus approchait le phénomène de sécheresses. Il est important de s'y intéresser dans de telles zones, notamment pour la gestion de l'irrigation des cultures. C'est pourquoi on avait dans un premier temps étudié, sur la saison des pluies, le nombre de jours consécutifs où il n'y avait pas de pluie (travail qui n'est pas présenté ici mais dont on trouve **le bilan au 6. avec une carte**). Mais cette approche posait le problème de la définition de « sécheresse ».

Les sécheresses sont en effet des phénomènes pour lesquels de nombreuses définitions existent (McKee et al, 1993) ce qui peut poser un problème lors de confrontation de résultats. C'est pourquoi, comme on l'a vu auparavant, divers indices ont été développés pour tenter de normaliser le terme « sécheresse ». On trouve par exemple le Palmer Drought Severity Index (PDSI ; **Palmer, 1965**), le Crop Moisture Index (CMI), le Standardized Precipitation Index (SPI ; McKee et al, 1993), l'Effective Drought Index (EDI ; Byun et Wilhite, 1999)... qui permettent de quantifier ce paramètre.

On peut trouver une description plus complète de tous ces indices sur www.drought.unl.edu/whatis/indices.htm et chez divers auteurs (Ntale et Gan, 2003 ; Smakhtin et Hugues, 2006).

Nous avons donc décidé par la suite d'employer un de ces indices, afin de ne pas créer encore une nouvelle définition de « sécheresse » comme on l'avait fait en comptant le nombre de jours sans pluie. On a donc choisi le **SPI**, développé en 1993 par McKee et qui a été employé par de nombreux auteurs sur diverses régions du globe (Giddings et al, 2005 ; Wu et al, 2001, Sönmez et al, 2005) : selon Lloyd-Hughes et Saunders (Lloyd-Hughes et Saunders, 2002), cet indice donne une meilleure représentation spatiale que le PDSI qui a été également

beaucoup utilisé. Il semble également, d'après les recherches faites, que le SPI n'ait jamais été calculé pour le bassin du Bani. Enfin, on ne dispose pas dans notre cas de nombreuses variables qui sont parfois nécessaires, mais pas dans le cas du SPI.

Le SPI dispose de 3 avantages majeurs (Lloyd-Hughes et Saunders, 2002) : il est simple à calculer car il se fonde uniquement sur des données de pluie, il peut-être calculé pour des pas de temps variables ce qui permet d'adapter la fenêtre temporelle au but de l'étude (les agronomes seront plutôt intéressés par des pas de temps courts, on y reviendra), et enfin sa normalisation, issue de sa méthode de calcul, assure que la fréquence d'occurrence des événements extrêmes est la même partout.

Notons en particulier que si le SPI permet de déterminer le classement d'une sécheresse, on peut aussi calculer sa durée moyenne et la valeur de précipitation à partir de laquelle on passe en sécheresse.

Néanmoins, des désavantages sont à noter, particulièrement le 3^e cité par Lloyd-Hughes et Saunders : « un troisième problème peut apparaître en appliquant le SPI à de petites échelles de temps sur des régions avec des saisons sèches : dans ce cas, des valeurs élevées trompeuses peuvent apparaître ».

7.2 Définition et calcul pratique

Pour mieux comprendre tout cela, il est nécessaire de décrire cet indice, dont une plus grande description sera faite **en annexe**.

Le SPI est donc un indice où les valeurs négatives représentent des sécheresses (et les positives des situations humides). Selon la valeur de l'indice, on a la nomenclature ci-contre :

$2 < \text{SPI}$	Humidité extrême
$1.5 < \text{SPI} < 1.99$	Humidité sévère
$1 < \text{SPI} < 1.49$	Humidité modérée
$0 < \text{SPI} < 0.99$	Humidité légère
$0 < \text{SPI} < -0.99$	Sécheresse légère
$-1 < \text{SPI} < -1.49$	Sécheresse modérée
$-1.5 < \text{SPI} < -1.99$	Sécheresse sévère
$\text{SPI} < -2$	Sécheresse extrême

Tableau 12 : nomenclature du SPI

Le SPI est calculé en adaptant une fonction de densité de probabilité à la distribution de la fréquence des précipitations sommées (ou moyennées) sur un intervalle de temps donné. On aura donc une courbe des probabilités cumulées pour la distribution qu'on va transformer en une courbe de densité cumulée de la loi normale standard.

On détaille le travail pour le calcul du SPI-3M (SPI sur une période de 3 mois), qu'on retrouve souvent dans la littérature :

- On choisit une période de m mois dans l'année pour laquelle on a au moins 30 années de données sans trous (McKee et al, 1993). Très souvent $m=12$.
- Pour chaque station, on somme les précipitations sur 3 mois (*ie* JFM, FMA, MAM...) sur les 30 années.
- On ajuste alors une loi de probabilité à ces valeurs, pour chaque station. Il s'avère que c'est dans la plupart des cas la loi de Pearson III (loi Gamma) qui convient le mieux (Guttman, 1999).
- Pour chaque station, on vérifie que la loi peut décrire le jeu de valeurs (test d'Anderson-Darling à 5%)
- Chaque valeur (de précipitations sommées) est alors transformée en une valeur normalisée

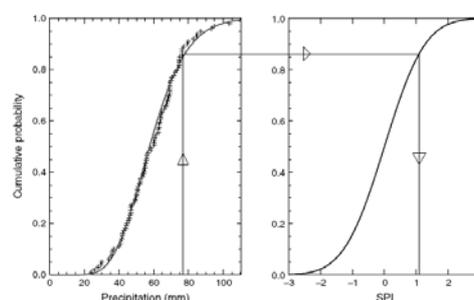


Figure 17 : correspondance entre une loi de probabilité cumulée Pearson III (à gauche) et normale (à droite) pour calculer le SPI associé à une valeur de pluie. (Lloyd-Hughes et Saunders, 2002)

suivant le procédé ci-dessus.

Cela permet finalement de voir, ici pour n'importe quelle triplète de mois, si – à une station donnée- il s'agit d'une période plutôt humide ou sèche comparée au reste de la période étudiée

7.3 Application à notre cas

Dans notre cas, on voudrait étudier les sécheresses pour en faire par la suite une utilisation par les agronomes du CIRAD, il faut donc travailler à un pas de temps relativement court (McKee et al, 1993). En effet, le calcul du SPI avec une « fenêtre glissante » de 12 ou 24 mois est plutôt utile pour des questions d'adduction d'eau alors que pour des périodes de 1, 3 mois ou même quelques semaines cela est plutôt du ressort de l'agronomie.

Ainsi, il nous faut travailler à une petite échelle de temps. Mais il ne serait pas du tout pertinent de calculer le SPI-3 sur ce bassin, en effet on verrait des valeurs élevées durant les 3 mois de pluie, et négatives pendant la saison sèches, ce qui n'apporte rien.

Ce qui est ici intéressant est d'étudier les sécheresses pendant la saison des pluies qui est également celle pendant laquelle poussent les cultures. On peut prendre une période m de l'année (voir plus haut) égale à 3 (juillet, août septembre par exemple) et calculé le SPI-1M. Cela n'est pas très utile pour comparer les mois entre eux, mais permet de voir l'évolution temporelle des sécheresses dans cette fenêtre de temps. Il faut remarquer que, comme on l'a vu dans la présentation du bassin, la saison des pluies sur le quart Sud est plus longue (on peut prendre de mai à septembre, mais cela n'est pas vrai pour le Nord. Afin d'avoir une période commune, on prendra donc ces 3 mois.

Nous disposons de données journalières, il est donc judicieux de les utiliser, d'autant plus que les agronomes travaillent sur des décades.

Notons que le SPI est généralement utilisé pour des pas de temps de 1 à 24 mois (Byun, 1999), mais il semble qu'on puisse descendre à de tels pas de temps (Guttman, 1999 et confirmation par correspondance avec Henry Ntale). **On choisit donc finalement une « fenêtre glissante » de 10 jours** pour étudier les sécheresses décadaires relatives à la saison des pluies. On a tenté de calculer le SPI-1j mais la nécessité d'adéquation à une loi de probabilité ne le permet pas (refus par le test d'Anderson-Darling, voir ci-dessous)

On choisira comme période **juillet/août/septembre** pour éviter que le mois de juin, qui a une pluviométrie tout de même plus faible que les trois autres surtout au Nord, ne crée le problème précédemment cité.

On applique donc la fenêtre de 10 jours sur ces 3 mois. Une fenêtre glissante de 1 jour sur 90 jours et pendant 38 années donne donc un jeu de 3400 valeurs environ pour chaque station. Mais le test d'Anderson-Darling rejette la plupart des stations (même en essayant avec d'autres lois) avec ces données.

En revanche si on **fait glisser la fenêtre décadaire de 5 jours** et non plus de 1 jour, seules 3 stations sont rejetées (à 5 %) qui sont, fort heureusement, à l'extérieur du bassin.

On réalise les opérations techniques décrites **en annexe** avec le logiciel R, les applications permettant de le faire « automatiquement » étant payantes¹. On réalisera donc les opérations suivantes : calcul des paramètres alpha et bêta de la loi Gamma avec la fonction *pargam* du package *lmomco*, calcul de la probabilité d'occurrence associée à chaque valeur avec *cdfgam* et transposition de cette valeur en SPI par la fonction *qnorm* du package *stats*.

¹ Le lecteur intéressé par un calcul standardisé et automatique du SPI et de différentes indices peut se reporter à Smakhtin et Hughes (2006) pour la description du package SPATSIM

7.4 Résultats

7.4.1 Nombre de sécheresses

7.4.1.1 Cartes et graphiques

On obtient finalement pour chaque valeur décadaire une valeur du SPI associée. On s'intéressera par la suite, à la répartition des différents types de sécheresses ainsi qu'à l'évolution sur la période 63-00. Notons qu'on s'intéressera principalement aux sécheresses extrêmes et sévères ainsi qu'aux sécheresses en général ($SPI < 0$)

On peut déjà présenter un petit bilan de l'évolution temporelle sur l'ensemble du bassin : cette approche n'est pas suffisante car le bassin n'est pas homogène mais donne une première idée, notamment pour voir si on retrouve une rupture en 70

On a tout d'abord tracé des graphiques par année du **nombre de jours classés en sécheresse** (en indice centré réduit), en sommant sur tout le bassin.

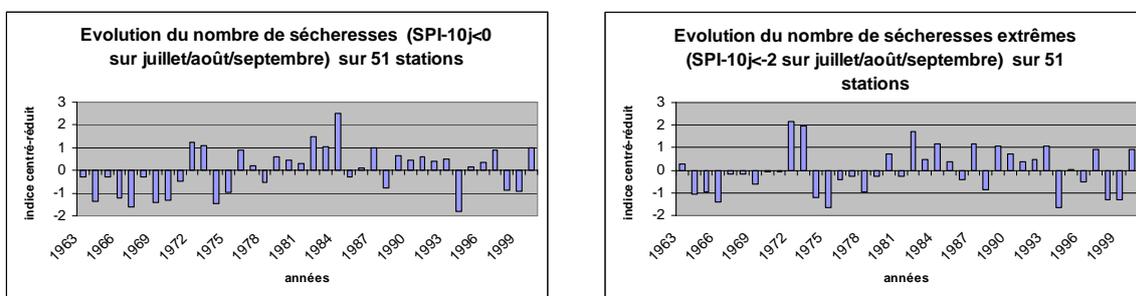


Figure 18 : Evolution temporelle du nombre de jours classés en sécheresse sur tout le bassin (63-00)

On remarque bien la rupture déjà évoquée en 1970 : à partir de cette date, le nombre de jours en sécheresse augmente significativement. Le logiciel Khronostat le confirme.

De plus, on a choisi de comparer dans un tableau **présenté en annexes** 63-70 avec 71-00 et 63-70 avec 93-00. La première comparaison autour de l'année 70 permet d'utiliser l'ensemble des données alors que la seconde cherche à être plus cohérente en utilisant un même nombre d'années.

Une augmentation du nombre de jours en sécheresse est clairement remarquable lorsqu'on prend le bassin dans sa globalité (et surtout pour les sécheresses sévères), et même si on compare uniquement 63-70 à 93-00, ce qui atténue l'augmentation potentielle puisqu'on ne prend pas en compte la sécheresse des années 80.

Cependant, cette approche ne prend pas en compte l'hétérogénéité du bassin. Pour voir la répartition des sécheresses sur chaque station ainsi que l'évolution temporelle, il est nécessaire de tracer des cartes. De plus on ne s'intéresse plus maintenant au nombre de jours en sécheresses mais au nombre de sécheresses : si plusieurs jours consécutifs ont un SPI négatif, cela ne compte maintenant que comme une sécheresse.

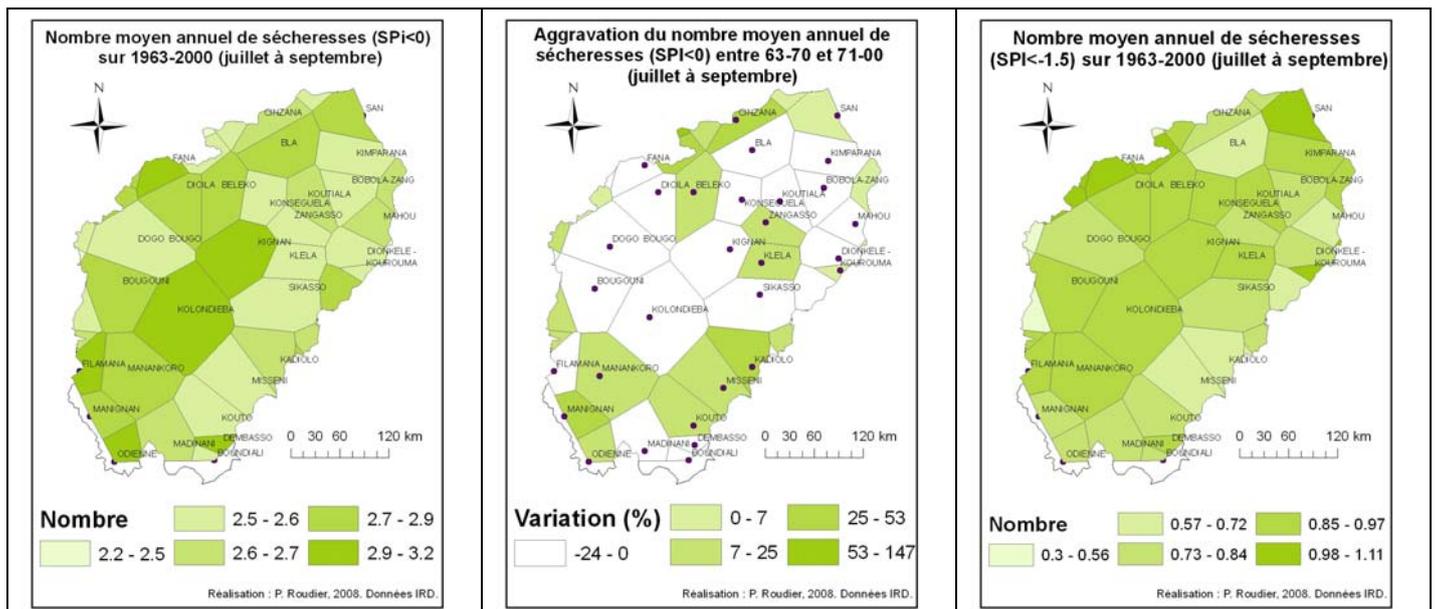


Figure 19 : nombre de sécheresses (définies par le SPI) et aggravation

7.4.1.2 Commentaires sur le nombre d'épisodes et son aggravation

- **Répartition du nombre de sécheresses sur 1963-2000**

On voit clairement que la moitié Ouest est plus sujette aux sécheresses (SPI<0) que la moitié Est. Cela est surtout vrai dans le Sud.

Pour les événements extrêmes et sévères (SPI<-1.5), on retrouve la même tendance, en moins marquée. Il sera intéressant de voir si cette tendance s'inverse sur l'étude de la durée.

- **Variation temporelle entre 1963-1970 et 1971-2000**

Il est très intéressant de voir que si le nombre de jours classés en sécheresse augmente, quand on tient compte du cumul, il y a une diminution sur le global (voir carte). Cela semble donc indiquer que la durée des sécheresses augmente. Cela n'est pas vrai pour la bordure Nord-ouest et le Sud où, même en cumul, le nombre de sécheresses augmente.

7.4.2 Durée des sécheresses

7.4.2.1 Cartes et graphiques

Il est possible de calculer la durée de chaque épisode : cela est intéressant puisque le nombre de sécheresses ne nous donne pas ce type de renseignement. Notons que, d'après la méthode de calcul, la durée minimum d'une sécheresse telle qu'on l'a définie est de 10 jours, avec une résolution de 5 jours : les différentes valeurs possibles sont : 10, 15, 20...90 jours.

Ce calcul est effectué pour chaque station. On obtient par la suite des valeurs moyennes et les maxima pour les différentes périodes choisies (63-70, 71-00 et 63-00) que l'on peut alors cartographier.

Prendre encore une fois l'année 1970 comme point de pivot semble bien se justifier lorsqu'on s'intéresse aux graphes ci-dessous qui représentent avec un indice centré-réduit

l'évolution temporelle (en moyennant sur tout le bassin) des maxima annuels et des moyennes. On voit nettement un changement de comportement après le début des années 70.

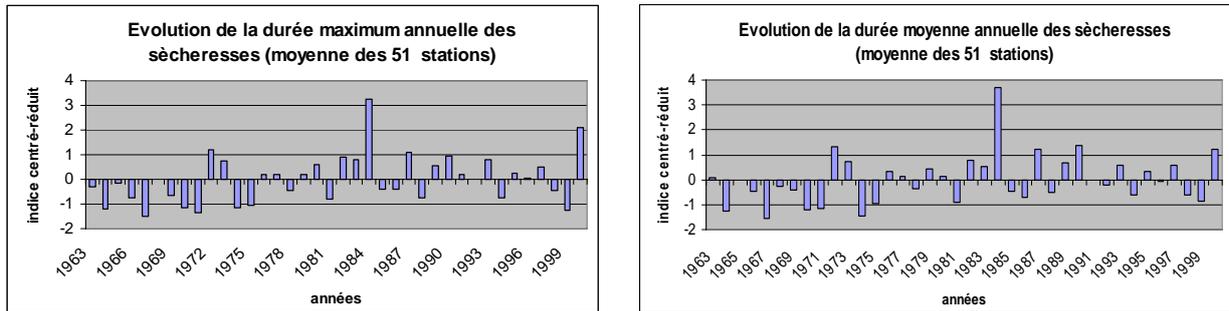


Figure 20 : évolution de la durée maximum annuelle et de la durée moyenne annuelle des sécheresses (moyenne des 51 stations)

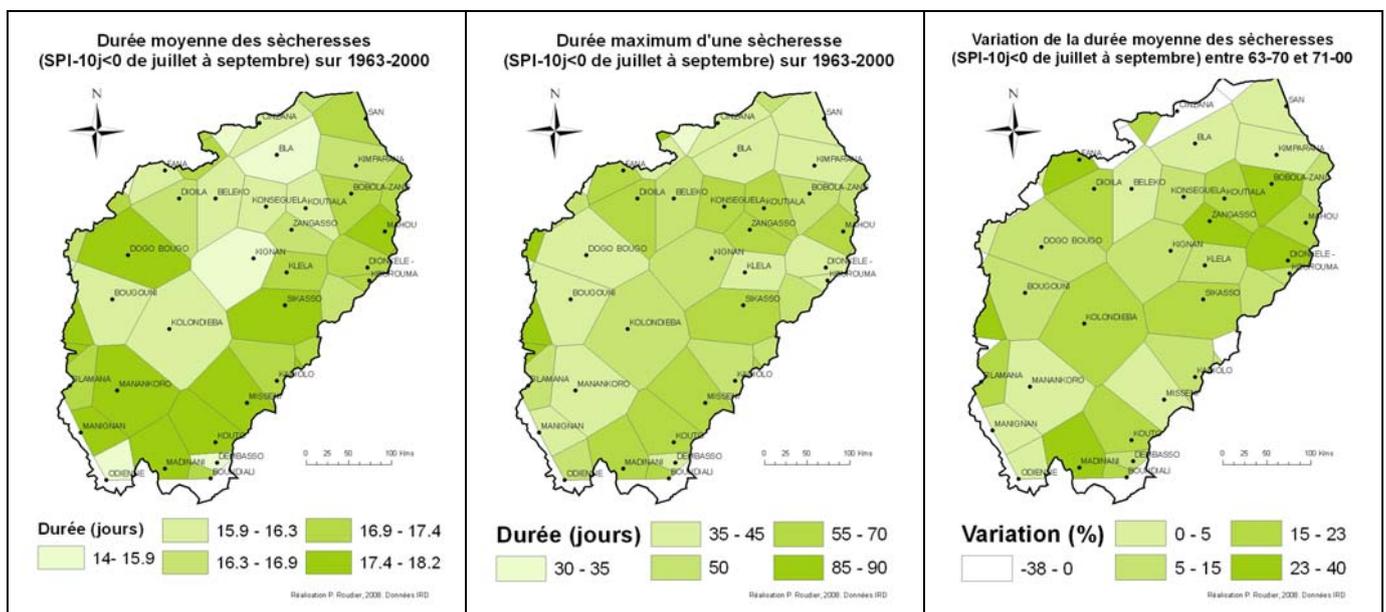


Figure 21 : cartes-bilan de l'étude de la durée des sécheresses

7.4.2.2 Commentaires

A l'inverse du nombre de sécheresses, c'est la moitié Est (ainsi que le Sud) qui connaît les épisodes les plus longs en moyenne. On peut faire à peu près la même constatation pour la durée maximale, bien que le Sud-est et la zone de Konseguela, Koutiala, Bobola-Zangasso se démarquent. Notons pour les valeurs maximales qu'on peut atteindre 90 jours ce qui signifie qu'il y a des années où on est en sécheresse durant les 3 mois de pluie.

L'étude de la variation temporelle met en relief la zone de Konseguela, Koutiala, Bobola-Zangasso mais aussi l'extrême Sud-est. Quasiment tout le bassin connaît une augmentation de la durée, et cela de façon notable (voir légende).

7.4.3 Valeur seuil de pluie en deçà de laquelle on passe en sécheresse.

On peut facilement calculer la valeur de pluie critique en deçà de laquelle on passe en sécheresse ou en sécheresse extrême par exemple. Cela peut avoir une utilisation pratique pour des décisions d'irrigation. Les valeurs présentées dans les cartes ci-dessous sont des valeurs de pluies journalières, mais moyennées sur 10 jours. Pratiquement, pour affirmer qu'on est en sécheresse, il faut calculer la moyenne sur 10 jours et la comparer à la valeur critique.

On retrouve une structure qui adopte la forme des isohyètes, ce qui est assez logique étant donné la méthode de calcul. Les valeurs ont ici surtout une utilité pour les agronomes : cela permet de savoir dans tel ou tel type de sécheresse (lié à une probabilité d'occurrence donnée) quelles cultures peuvent résister par exemple.

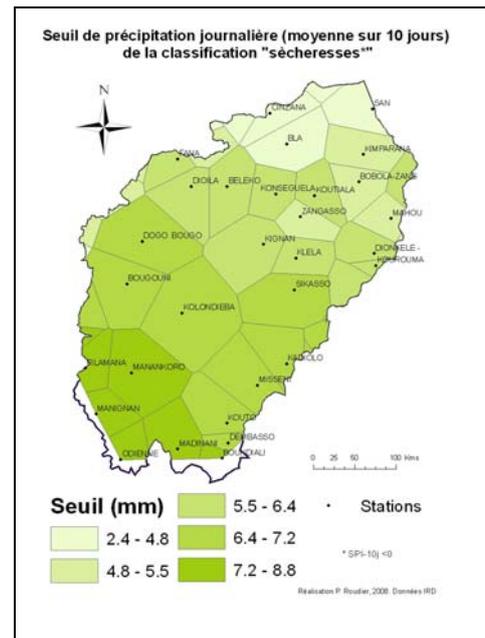


Figure 22 : valeur limite de la moyenne des pluies sur 10 jours pour passer en classification « sécheresse »

7.5 Conclusion de l'étude par le SPI

7.5.1 Sur la situation du bassin

Le problème de ces diverses études est le grand nombre de paramètres (durée moyenne, durée maximum, nombre...) et de cartes qui en ressortent : il est difficile d'avoir une idée globale de ce que représentent les « sécheresses » sur le bassin. C'est pour cela qu'on propose une méthode d'évaluation globale qui n'est pas parfaite mais qui a pour but d'avoir une vue d'ensemble.

Ainsi on va effectuer un classement de chaque station de mesure (et donc chaque polygone de Thiessen) de manière à voir quelle zone est potentiellement la plus mise en danger par les sécheresses, dans leur globalité. On ne peut conclure vraiment sur la vulnérabilité puisque on n'a pas accès aux données comme les zones irriguées, les points d'eau...

Ce classement va se faire en prenant en compte **4 critères** : le nombre de sécheresses sur 1963-2000, leur durée moyenne, leur durée maximum et l'évolution temporelle. Pour chaque critère, on effectue un classement. Le classement final est la moyenne des 4. Notons que pour chaque paramètre on considère les sécheresses telles que $SPI < 0$ mais aussi celles telles que $SPI < -1.5$.

Par exemple, pour la « durée moyenne », on effectue d'abord un classement des stations sur la durée des sécheresses « $SPI < 0$ », un autre classement sur la

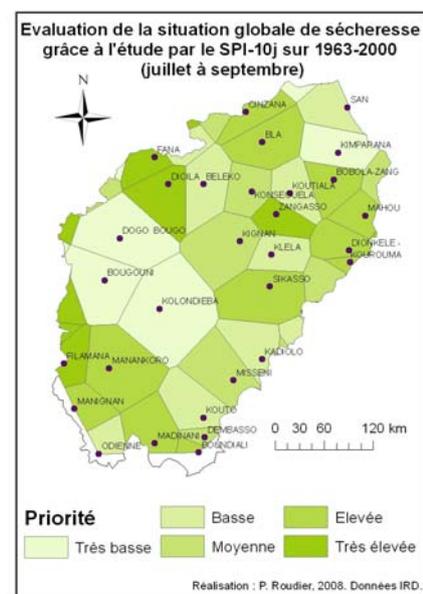


Figure 23 : bilan du danger potentiel créé par les sécheresses définies par le SPI

durée des sécheresses « SPI<-1.5 » puis, pour avoir le classement de « durée moyenne », on fait la moyenne des 2.

Cela permet de donner un poids plus important aux sécheresses extrêmes et sévères. De même, le fait d'avoir mis dans les 4 critères 2 concernant la durée donne un poids plus important à la durée qu'au nombre de sécheresses.

On obtient le résultat ci-contre, avec une répartition en 5 classes. **3 zones ressortent finalement** : l'une au Sud-ouest (Filaman, Manignan...), une autre au centre Nord-est (Mahou, Dionkele...) et une dernière plus petite au centre Nord-ouest (Dioila, Fana). On peut retrouver le poids de chacun des 4 critères dans les cartes plus haut.

7.5.2 Sur l'utilisation du SPI avec des données journalières.

On a déjà vu que la pleine utilisation de données journalières était ici limitée par la bonne adéquation d'une loi de probabilité aux valeurs. Cela oblige donc à faire glisser la fenêtre de 5 jours en 5 jours, ce qui fait perdre en résolution temporelle, notamment pour l'étude de la durée. Néanmoins, on peut trouver dans une telle étude des éléments intéressants sur la variation spatiale et temporelle du nombre de sécheresses et de leur durée.

Mais, comme cet indice n'a été que très rarement utilisé avec des données journalières, il peut paraître intéressant d'essayer de le comparer avec un indice, récemment développé et qui est fait pour le pas de temps journalier, l'**Effective Drought Index** (Byun et Wilhite, 1999). Si on n'avait pas choisi cet indice en premier lieu, c'est parce qu'il a été beaucoup moins utilisé que le SPI ; et parce que son calcul est plus ardu. Enfin, la nomenclature associant les valeurs de l'EDI aux types de sécheresse n'apparaît que tardivement. Néanmoins, l'EDI semble présenter de bons résultats (Morid et al, 2006).

7.6 Comparaison avec un autre indice : l'**Effective Drought Index**

7.6.1 Description

On pourra trouver un descriptif détaillé de l'index en annexe. Notons que celui est fondé sur le principe d'*Effective Precipitation* qui consiste à calculer chaque jour de la série une valeur d'eau disponible en prenant en compte les précipitations des jours passés (on peut aussi bien choisir 10 jours que 365, c'est la *dummy DS*) avec un poids décroissant.

EDI	Description
-0.69 à 0	Sécheresse légère
-0.7 à -1.49	Sécheresse modérée
-1.5 à -2.49	Sécheresse sévère
<-2.5	Sécheresse extrême

Tableau 13 : classes associées à l'EDI

On obtient après calcul l'EDI avec la classification ci-contre (Morid et al, 2006). Notons qu'ici, la terminologie correspond exactement au SPI.

NB : la valeur de sommation factice (*dummy DS*) est à choisir avec soin avant tout calcul. Ici on prend 10 jours pour pouvoir effectuer une comparaison avec le SPI où l'on sommait aussi sur 10 jours. Pour d'autres études, par exemple la détection du début et de la fin de la saison des pluies, on peut prendre DS=365j ou plus.

7.6.2 Résultats

7.6.2.1 Au sujet de la comparaison avec le SPI

On obtient finalement une valeur d'indice pour chaque jour de juillet, août et septembre. On voit déjà que c'est un progrès comparé au SPI puisque avec ce dernier, on avait une résolution de 5 jours uniquement (la « fenêtre glissante » était de 5 jours). De ce fait,

si on veut tout de même essayer de comparer les résultats des deux indices, il faut dégrader la résolution temporelle de l'EDI. On va donc, spécialement pour cette comparaison (qui ne sera pas vraiment rigoureuse), moyenner l'Effective Precipitation sur 10 jours et retenir par la suite les valeurs de l'EDI pour les jours 0, 5, 10, 15... de chaque mois.

On peut alors comparer la classification que chaque indice fait pour les périodes choisies,

Classification	Moyenne (%)	Ecart-type
bonne	58.5	7.6
moyenne	31.8	3.6
mauvaise	9.7	4.6

on récapitule cette comparaison dans le tableau **Tableau 14 : comparaison des classifications issues des 2 indices** ci-contre. « Bonne » signifie que les 2 indices ont classé dans la même catégorie, « moyenne » qu'il y a seulement une catégorie de différence, et « mauvaise » plus d'une catégorie.

On voit finalement que les 2 indices ont tout de même une assez grande cohérence même si cela n'est pas parfait. Rappelons que cette comparaison n'aurait pu être rigoureuse que si le SPI avait pu être calculé au pas de temps journalier. Une comparaison rigoureusement mathématique n'est donc malheureusement pas possible. Etudions maintenant, comme pour le SPI, les 2 types de variabilité.

7.6.2.2 Cartographie des résultats de l'EDI

- Nombre de jours classifiés en sécheresses

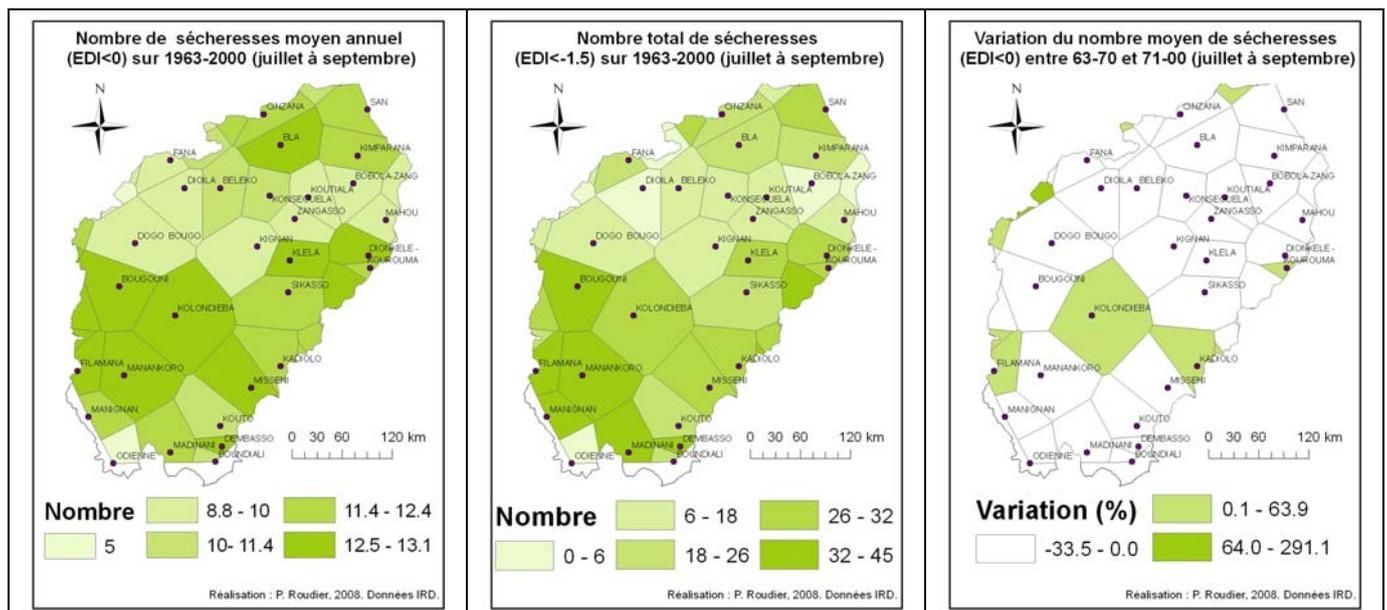


Figure 24 : nombre de sécheresses (EDI<0 et EDI<-1.5) et variation autour de 1970

- Durée des sécheresses (nombre de jours cumulés)

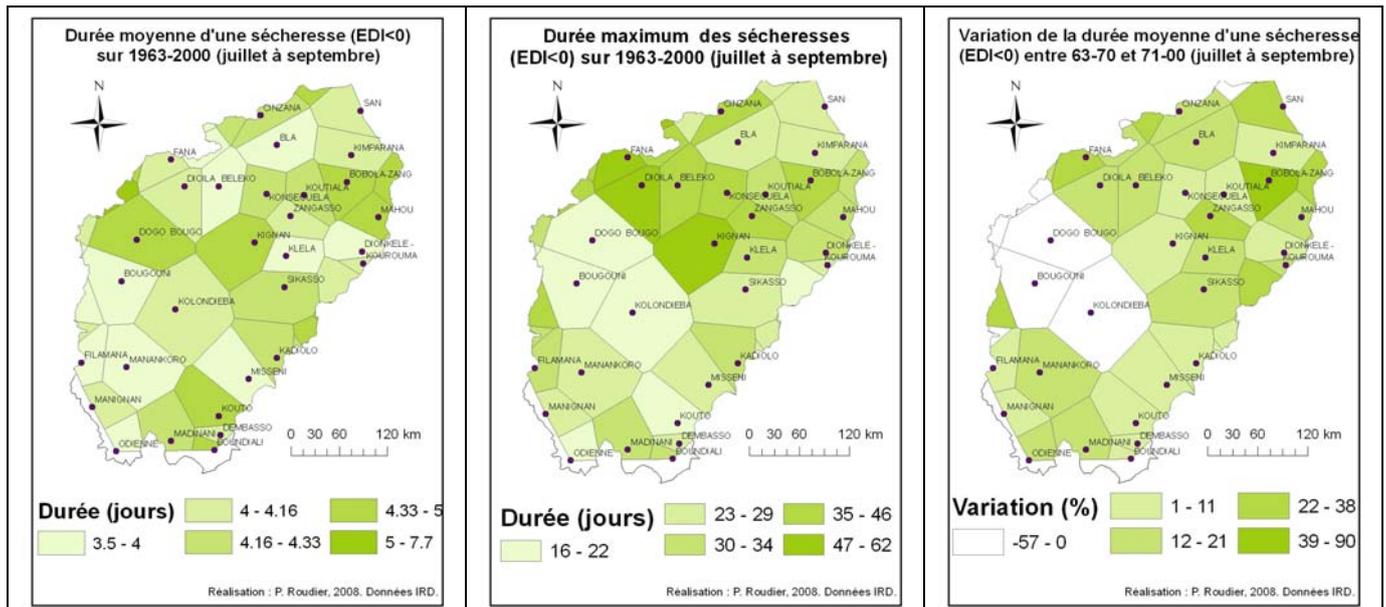


Figure 25 : durée moyenne, maximum et variation de la durée des sécheresses (EDI<0)

7.6.2.3 Commentaires

- Variabilité spatiale

Il y a clairement dans la moitié Sud plus d'événements (*ie* de jours ayant un EDI<0 consécutifs) mais ils sont moins longs que ce soit en moyenne (environ un jour de moins) mais surtout pour les maxima. En effet dans le Nord on peut avoir des durées maximales jusqu'à 40 jours plus longues. Cela est surtout vrai pour le quart Nord-ouest, très exposé, à l'exception de l'extrême Nord qui a un comportement plus proche du sud du bassin.

- Variabilité temporelle

La première chose importante à remarquer est que le nombre de jours de sécheresses (*ie* ayant un EDI<0) augmente globalement sur le bassin mais la répartition de ces jours n'est plus la même. En effet **on rencontre un moins grand nombre d'événements** (*ie* de jours ayant un EDI<0 consécutifs) mais **leur durée augmente globalement** de façon significative. Cela est donc plutôt négatif pour le domaine agronomique.

Il faut noter cependant que pour une poche au centre Ouest (Bougouni, Dogo-Bougouni...) les deux paramètres diminuent.

7.6.3 Conclusion sur l'EDI

Comme pour le SPI on réalise une évaluation globale à l'aide de la carte suivante : il existe clairement 3 zones où les sécheresses peuvent potentiellement représenter un danger : au Sud-est, sur la bordure Sud-ouest et dans le tiers Nord, particulièrement vers Dionkele et sur la bordure à l'Ouest. Il est intéressant de voir que l'extrême Nord n'est pas le plus touché.

7.7 Conclusion sur les indices et bilan sur les sécheresses

7.7.1 Sur les sécheresses

On a donc testé 2 indices, qui ont finalement mesuré 2 types de sécheresses différents mais qui peuvent donner des informations complémentaires. Si on compare les 2 cartes bilan (les 2 les plus à droite), on peut remarquer quelques différences notables comme au Sud-est ou à Dioila mais également des similitudes dans la tendance globale.

La troisième carte est issue d'une étude préliminaire qui comptait le nombre de jours secs cumulés et leur durée. On voit qu'une telle étude n'aurait pas permis de voir la situation « dangereuse » au Sud.

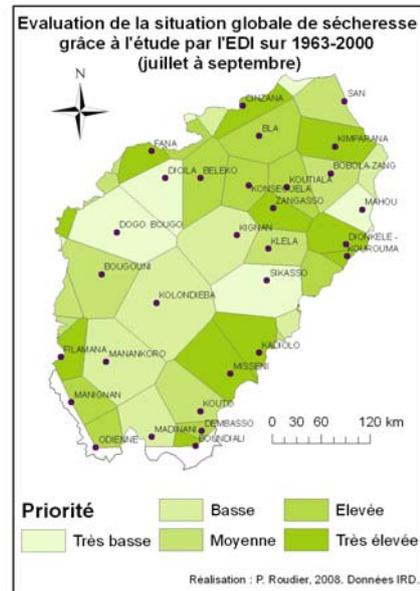


Figure 26 : bilan du danger potentiel des sécheresses définies par l'EDI

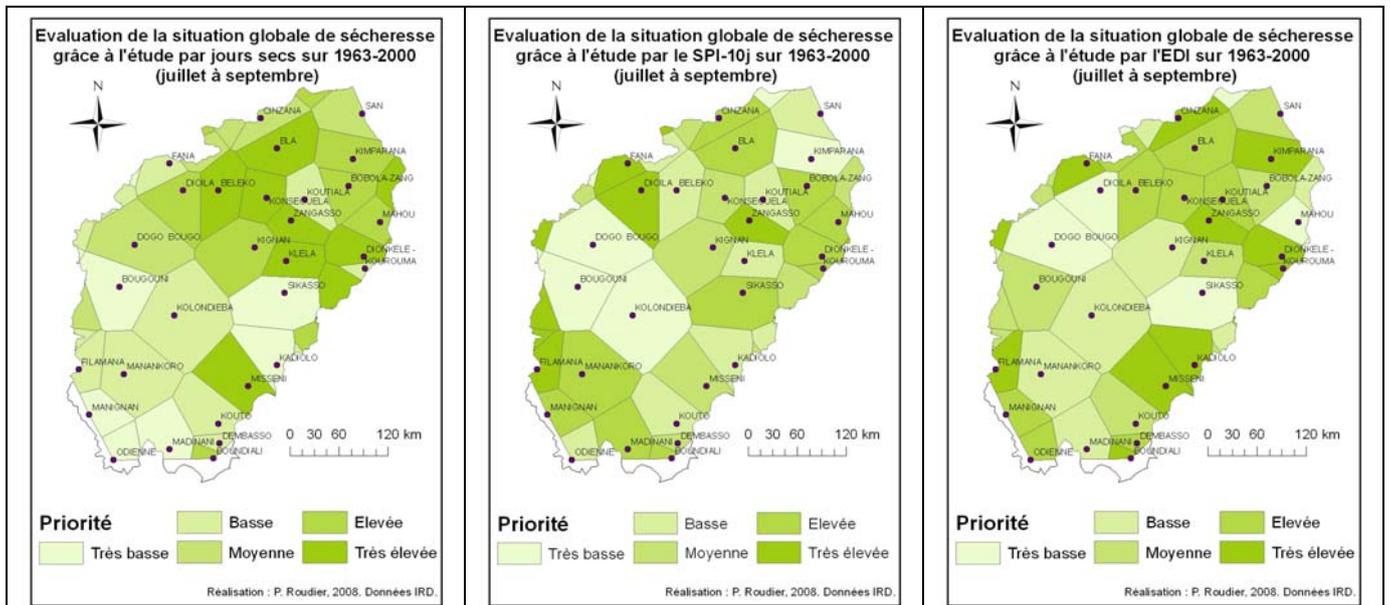


Figure 27 : comparaison des cartes bilan des 3 études

Il semble finalement plus judicieux de se fier à l'EDI puisque cet indice est vraiment créé pour le pas de temps journalier. La carte des résultats semble également plus réaliste car plus homogène. On note 3 grandes zones sur lesquelles il semblera important de se concentrer

dans le futur pour les questions agricoles par exemple : **le Sud sur les bordures Est et Ouest et le tiers Nord à part l'extrême Nord.**

Notons qu'un intérêt de plus en plus grand devrait être apporté aux sécheresses dans ces zones, et dans l'ensemble du bassin, puisqu'on a vu que le phénomène allait globalement en s'aggravant.

Si on a conclu avec l'EDI, le SPI n'est pas inintéressant (d'ailleurs nos conclusions appliquées au SPI fonctionnent assez bien). On résume par la suite les avantages et désavantages des 2 indices.

7.7.2 Sur les indices

Dans nos 2 études, les résultats sont sensiblement différents puisqu'on n'a pas travaillé avec le même pas de temps, la méthode de calcul du SPI ne le permettant pas. Ainsi, on n'a pas utilisé pleinement avec le SPI nos données journalières qui ont été dégradé par la moyenne sur 10 jours. Pour une évaluation des sécheresses dans un tel but, à de petits pas de temps l'EDI semblerait donc plus recommandé. Si on peut se contenter de travailler en décadaire, le SPI peut être préféré. On récapitule pour les deux indices le positif et le négatif :

	SPI	EDI
+	Standardisé (chaque sécheresse a une fréquence de retour connue), connu et reconnu Relativement facile de calcul Logiciel existant de calcul direct	Conçu pour le journalier Exploitation au mieux des données Pas de rejet de station
-	Très difficile à faire marcher en journalier Limitation due à l'adéquation de la loi Gamma (rejet de station) Ici : perte d'information due à la moyenne	Compréhension difficile pour la mise en place Calculs très longs Encore peu connu Pas de logiciel créé pour le journalier Plus sensible aux incertitudes de comblement

Tableau 15 : points négatifs et positifs de l'EDI et du SPI

7.7.3 Limites de l'étude

Outre les limites induites par le comblement des données, qu'on a essayé de faire le mieux possible (et il n'y a jamais plus de 10% de lacunes), un autre problème de cette étude peut venir du choix de la période de pluie.

On a pris en effet juillet, août, septembre pour toutes les stations et cela de manière peut-être un peu arbitraire bien que fondée sur des sources bibliographique. Il est finalement probable qu'on aurait du prendre durant l'étude de l'EDI une période plus longue pour bien couvrir toute la période des pluies, ou une période différente pour le Nord et le Sud. Mais comme l'EDI était à la base calculé pour une comparaison avec le SPI, on a du prendre la même période. Et le SPI, à cause de soucis techniques n'acceptait pas de période plus longue.

8. Conclusion générale

8.1 Sur l'étude : limites et ouvertures

8.1.1 Généralités

Les résultats présentés ici ne permettent pas, comme on l'a expliqué, de conclure sur la vulnérabilité mais donnent de bonnes bases pour une étude future. On a essayé de choisir tout au long de ce stage des paramètres qui soient utiles pour une l'étude finale de la vulnérabilité, mais qui aient aussi une utilité pratique pour d'autres personnes (ingénieurs d'ouvrage, agronomes...)

Concernant ces résultats, on a répété plusieurs fois l'importance de les considérer avec caution étant donnée la méthode de comblement mais également les données brutes quelquefois aberrantes. On ne peut d'ailleurs qu'une fois de plus appeler à la création de bases de données solides et rigoureusement construites qui sont la base de toute étude.

8.1.2 Sur le bassin

8.1.3 Ouverture

Les possibilités d'extension partant de ce sujet sont multiples et ne cesseront de s'accroître au fur et à mesure de l'arrivée de nouvelles données. Il y a bien sûr le calcul d'indices comme le WPI ou d'autre plus récents mais aussi des voies à approfondir - sur ce bassin ou un autre – dans l'utilisation de l'EDI par exemple. En effet on a vu que prendre strictement juillet, août et septembre comme mois de la saison des pluies était une limite.

Il vaudrait donc mieux désormais calculer pour chaque station une date de début et fin à l'aide d'une variante de l'EDI (*l'Available Water Resources Index*) utilisée avec une valeur de sommation fictive (*dummy DS*) de 365 jours (ce qui est vraiment très long avec les calculs développés pendant ce stage) comme l'ont fait Han et Byun (Han et Byun, 2006).

Quant au calcul de cet indice, il semble fondamental de développer un algorithme ou un programme qui puisse l'automatiser. Ce n'est qu'à ce prix là que l'EDI, encore méconnu, pourra prendre tout son essor et devenir aux données journalières ce que le SPI est aux données mensuelles.

D'un point de vue agronomique, des comparaisons entre les valeurs limites de chaque type de sécheresses et les besoins en eau des cultures paraissent intéressantes. L'évolution de la date de fin et de début de la saison des pluies via l'AWRI est un également un point à étudier : si ces deux dates ne semblent pas avoir bougées sensiblement depuis l'après-guerre (Traoré et al, 2000), peut-être un critère nouveau d'évaluation de la date de commencement et de fin mettra-t-il en lumière de nouveaux résultats.

Enfin, il est certain qu'il faudrait mener des recherches sur le comblement de données au pas de temps journalier, avec un récapitulatif des méthodes existante, leur comparatif et, si besoin est, le développement d'une nouvelle technique.

8.2 Sur le stage

Beaucoup plus qu'en M1, j'ai réalisé dans ce stage un réel travail de recherche avec beaucoup de bibliographie et d'essais de différentes techniques, connues ou que j'ai développées à ma manière : cela a été plus ou moins concluant mais a permis de faire avancer le raisonnement. Cela a donc été un point très positif.

De plus j'ai appris beaucoup de points techniques, en statistiques ou dans la maîtrise de certains programmes et logiciels comme R, Visual Basic et ArcGis : il est désormais fondamental de maîtriser bien de tels outils et de ne pas se cantonner au tableur Excel.

J'ai également aimé le sujet de ce stage puisque le développement des pays du Sud est quelque chose qui m'importe beaucoup et qui me semble fondamental.

Enfin, si je regrette évidemment de ne pas avoir pu aller au Mali, il me semble que ces déplacements ne doivent être réalisés durant des stages que quand cela est vraiment nécessaire, pour que l'attrait du voyage ne prenne pas le pas sur la motivation première, le développement et la lutte contre la pauvreté.

BIBLIOGRAPHIE

AUTORITE DU BASSIN DU NIGER. **Programme pluriannuel de développement de l'autorité du bassin du Niger**. Autorité du bassin du Niger, 2002. p.6-12

AZMON B. et BEN-ZVI A. **Joint use of L-moment diagram and goodness-of-fit test : a case study of diverse series**. Journal of hydrology 198, 1997. p. 245-259

BIRKMANN J. **Risk and vulnerability indicators at different scales: Applicability, usefulness and policy implications**. Environmental hazards vol.7, 2007. p.20-31

BOHLE H., DOWNING T.E., WATTS M. **Climate change and social vulnerability: the sociology and geography of food insecurity**. Global environmental change vol. 4 (1), 1994. p.37-48.

BRUNET-MORET Y, CHAPERON P, LAMAGAT J-P, MOLINIER M. **Monographie hydraulique du Niger, Tome I – Niger supérieur**. ORSTOM. **Collection MONOGRAPHIES HYDROLOGIQUES No 8**, Paris, 1986.p **???**

BYUN H-R., WILHITE D.A. **Objective Quantification of Drought Severity and Duration.** Journal of Climate vol.12, 1999. p.2747-2756

CHAVES H.M.L., ALIPAZ S. **An integrated indicator based on basin hydrology, environment, life and policy : the Watershed Sustainability Index.** Water Resources Management N°21, 2007. p.883-895

CHEN Y., HUANG G., SHAO Q., XU C-Y. **Regional analysis of low flow using L-moments for Dongjiang basin, South China.** Hydrological Sciences, 51, 2006. p. 1051-1064

DOWNING T.E et PATWARDHAN A. Assessing vulnerability for climate adaptation. Adaptation Policy Framework for Climate Adaptation: Developing Strategies, Policies and Measures, chapitre 3. UNDP, Cambridge University Press. Cambridge, 2005. p. 61-90

ERIKSEN S.H., KELLY P.M. **Developing credible vulnerability indicators for climate adaptation policy assessment.** Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change n°12, 2006. p.495-524

ERIKSEN S.H., SILVA J. **The impact of economic liberalisation on climate vulnerability among farmers in Mozambique.** Présentation à l'Open Meeting of Human Dimensions Research Community. Montreal 16 au 18 Octobre 2003 [en ligne] - Center for International Earth Science Information Network.
<<http://sedac.ciesin.columbia.edu/openmeeting>>

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. **Vulnerability and adaptation to climate change in Europe.** EEA technical report n°7, 2005. p 26-29

FEITELSON E., CHENOWETH J. **Water poverty: towards a meaningful indicator.** Water Policy n°4, 2002. p. 263-281.

FÜSSEL H.M., KLEIN R.J.T. **Climate change vulnerability assessments: an evolution of conceptual thinking.** Climate change n°75, 2006. p.301-329

GIDDINGS L., SOTO M., RUTHERFORD B.M., MAAROUF A. **Standardized Precipitation Index Zones for México.** Atmosféra, 2005. p. 33-56.

GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'EVOLUTION DU CLIMAT. **Glossaire : Annexe B du 3^e rapport du GIEC.** 3^e rapport du GIEC, New York, 2001. p.196

GUTTMAN N.B. **Accepting the Standardized Precipitation Index : a calculation algorithm.** Journal of the American Water Resources Association, Vol 35, No 2, April 1999. p.311-322

HAMED K., RAO R. **Flood frequency analysis.** CRC press. Boca Raton, 2000. Chapitre 1, **xxxxx**, p. 1-50

HAN S-U., BYUN H-R. **The existence and the climatological characteristics of the spring rainy period in Korea.** International Journal of Climatology 26, 2006.p.637-654.

HIPEL K. **Stochastic and statistical methods in hydrology and environmental engineering volume 1 : Extreme values : floods and droughts.** Water Science and Technology Library. Dordrecht, 1994. ISBN: 0-7923-2756-X (vol. 1). p. 1-15

HOSKING J., WALLIS J. **Some statistics useful in regional frequency analysis.** Water resources research, vol. 29, n°2. New York, 1993.p. 271-281

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2007: synthesis report. Summary for policymakers.** An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. 22 p.

MC KEE T.B, DOESKEN N.J, KLEIST J. **The relationship of drought frequency and duration to time scale.** Report of the eighth Conference on Applied Climatology. Anaheim (California), 1993. 6 p.

MEYLAN P., MUSY A. **Hydrologie fréquentielle, version provisoire.** Département de Génie rural, Institut d'Aménagement des terres et des Eaux, Lausanne, 1996. 220 p

KONG A SIOU, L. **Méthodologie de caractérisation et d'évaluation des débits d'étiage : application au bassin du Bani**. Mémoire de Master 2 : Université de Montpellier 2, 2008. 60 p.

KUMAR R. et al. **Development of regional flood frequency relationships using L-moments for Middle Ganga Plains Subzone 1(f) of India**. Water Resources Management vol 17, 2003. p 243-257

L'HÔTE Y., MAHE G., SOME B., TRIBOULET J.P. **Analysis of a sahelian rainfall index from 1896 to 2000: the drought continues**. Hydrological Sciences vol. 47(4), 2002. p. 563-572

LABORDE J.P. **Eléments d'hydrologie de surface**. Support de cours, 2003.192 p.

LAIO F. **Cramer-Von Mises and Anderson-Darling goodness of fit tests for extreme value distributions with unknown parameters**. Water resources research, vol. 40, 2004. 10 p

LEICHENKO R.M., O'BRIEN K. **The dynamics of rural vulnerability to global change : the case of Southern Africa**. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change vol 7, 2002. p.1-18.

LLOYD-HUGHES B., SAUNDERS M.A. **A drought climatology for Europe**. International Journal of Climatology vol. 22, 2002. p. 1571-1592.

MAHE G., Olivry JC, DESSOUASSI R., ORANGE D, BAMBA F et SERVAT E. : *Relations eau de surface – eau souterraine d'une rivière tropicale au Mali*, 2000.

MORID S., SMAKHTIN V., MOGHADDASI M. **Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran**. International Journal of Climatology vol. 26, 2006. p. 971-985

O'BRIEN K. et al. **Why different interpretations of vulnerability matter in climate change discourses**. Climate Policy n°7, 2007.p.73-88

OLIVRY JC, BRICQUET J.P, BAMBA F, DIARRA M. **Le régime hydrologique du Niger supérieur et le déficit des deux dernières décennies**. Colloque INSU/ORSTOM « grands bassins fluviaux », Paris, 1993. p.54-57

PALMER W.C. **Meteorological drought**. Research Paper vol. 45, US department of Commerce, Weather Bureau, 1965. 58 p.

PATUREL J-E, OUEDRAOGO M. **The concept of rainfall and stream flow normals in West and Central Africa in a context of climatic variability**. Hydrological Sciences, vol. 48(1), 2003. p. 125-137

PICOUET C. : **Géodynamique d'un hydrosystème tropical peu anthropisé- le bassin supérieur du Niger et son delta intérieur**, Thèse de doctorat : Université de Montpellier 2 , 1999

PICOUET C. et al. **Empirical and conceptual modelling of the suspended sediment in a large tropical river: the upper Niger river basin**. Journal of Hydrology n°250, 2001. p. 19-39

POLSKY P. et al. **Building comparable global change vulnerability assessments : the vulnerability scoping diagram**. Global Environmental Change vol. 17, 2007. p 472-485

ROCHE M. **Hydrologie de surface**. ORSTOM. Paris, 1963. **Chapitre VIII** : crues des grands et moyens bassins. p. 289-291

ROMERO R, GUIJARRO J., ALONSO S. **A 30 year (1964-1993) daily rainfall data base for the Spanish Mediterranean regions: first exploratory study**. International Journal of Climatology 18, 1998. p. 541- 560

SCHRÖTER D., POLSKY C., PATT A.G. **Assessing vulnerabilities to the effects of global change : an eight step approach**. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change n°10, 2005. p.573-596

- SMAKHTIN V.U, HUGHES D.A. **Automated estimation and analyses of meteorological drought characteristics from monthly rainfall data**. Environmental Modelling and Software 22, 2007. p.880-890.
- SÖNMEZ F.K., KÖMÜSCÜ A.Ü., ERKAN A., TURGU E. **An analysis of spatial and temporal dimension of drought vulnerability in Turkey using the Standardized precipitation Index**. Natural Hazards n° 35. 2005. p. 243-264
- SOUMAGUEL A. **Elaboration des fichiers opérationnels pour le calcul régionalisé des pluies sur le bassin versant du Niger par la méthode du vecteur régional (MVR)**. Rapport d'activité non publié, Bamako, 1996. p.7
- SULLIVAN C., MEIGH J. **Targeting attention on local vulnerabilities using an integrated index approach : the example of the Climate Vulnerability Index**. Water Science and Technology n°51, 2005. p.69-78.
- SULLIVAN C., MEIGH J. **Integration of the biophysical and social sciences using an indicator approach : Addressing water problems at different scales**. Water Resources Management n°21, 2007. p.111-128
- SULLIVAN et al. **Mapping the links between Water Poverty and Food Security**. Report on the Water Indicators workshop held at the Centre for Ecology and Hydrology n°1, Wallingford, 2005. 58p
- SULLIVAN C., MEIGH J., LAWRENCE P. **Application of the water poverty index at different scales : a cautionary tale**. Water International, volume 31, n°3, 2006. p. 412-426
- TALLAKSEN L.M., VAN LANEN H.A.J. **Hydrological drought : processes and estimation methods for streamflow and groundwater**. Developments in water science 48, 2003. p.110-126
- TANG Y-B. **Comparison of semivariogram models for kriging monthly rainfall in eastern China**. Journal of Zhejiang University SCIENCE Vol. 3, No 5, 2002. p. 584 -590.
- THOM H.C.S. **A note on the Gamma distribution**. Monthly Weather Review, Vol 86, No 4, Washington D.C, April 1958. p. 117-122.
- TIMMERMANN P. Vulnerability, Resilience and the Collapse of Society, No. 1 in Environmental Monograph, Institute for Environmental Studies, University of Toronto, Toronto, 1981**
- TOL R.S.J et al. **Distributional aspects of climate change impacts**. Global environmental change n°14, 2004. p.259-272
- TRAORE S.B. et al. **Adaptation à la sécheresse des écotypes locaux de sorghos au Mali**. Science et changements planétaires / sécheresse vol. 11, n°4, décembre 2000. p. 227-237.
- UN-WATER. **L'eau, une responsabilité partagée : 2^e rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau, résumé**. UNESCO, 2006. p. 2-5
- UNDHA. **Glossaire international multilingue agrégé de termes relatifs à la gestion des catastrophes**. Département des affaires humanitaires des Nations Unies, 1992. p.77
- VÖRÖSMARTY C.J et al. **Geospatial indicators of emerging water stress : an application to Africa**. Ambio Vol. 34, n°3, 2005. p. 230-237
- WILLMOTT C.J., FEDDEMA J.J. **A more rational Climatic Moisture Index**. The Professional Geographer 44, 1992. p.84-88.
- WORLD RESSOURCES INSTITUTE. **Population, health and human well-being-Mali**. Earthtrends country profiles [en ligne] - WRI, 2003 [visité le 8/02/2008]
<http://earthtrends.wri.org/pdf_library/country_profiles/pop_cou_466.pdf>
- WU H, HAYES M.J, WEISS A., HU Q. **An evaluation of the Standardized Precipitation Index, the China Z-index and the statistical Z-score**. International Journal of Climatology 21, 2001. p. 745-758.

ANNEXES

1. Organigramme de la MSE.

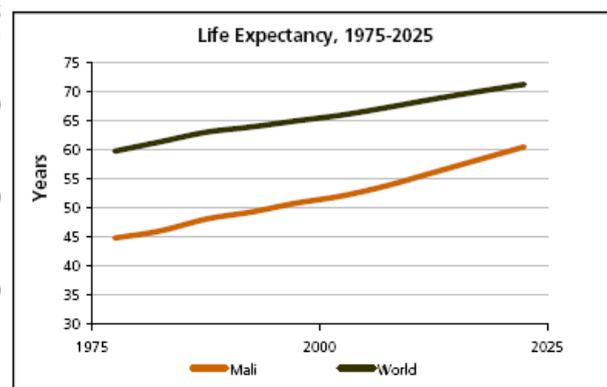
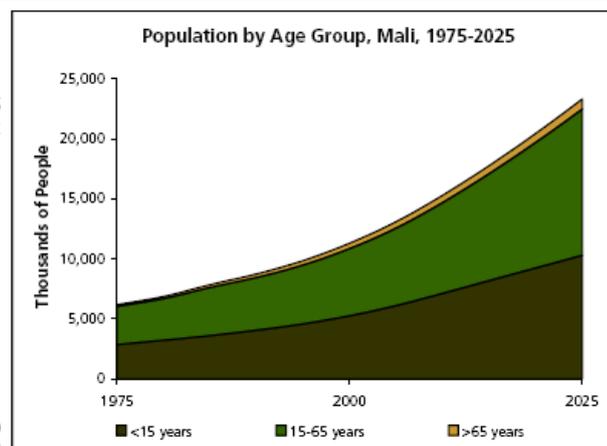
2. Diverses données sur le Mali (World Ressources Institute, 2003)

NB : Ces données ne sont malheureusement pas disponibles à une échelle locale

Population, Health, and Human Well-Being-- Mali

EarthTrends
Country Profiles

Demographic and Health Indicators	Mali	Sub-Saharan Africa	World
Total Population (in thousands of people)			
1950	3,520	176,775	2,519,495
2002	12,019	683,782	6,211,082
2025 (projected)	23,461	1,157,847	7,936,741
Population Density (people per square km), 2000:	9.2	25.3	45.1
Average Annual Population Growth Rate, 1980-2000			
Total	2.5%	2.7%	1.6%
In rural areas	1.7%	1.9%	0.9%
In urban areas	4.9%	4.7%	2.4%
Percentage of Population:			
Under age 15, 2002	46%	44%	29%
Over age 65, 2002	4%	3%	7%
Living in Urban Areas, 2000	30%	34%	47%
Average Total Fertility Rate (a)			
1975-1980	7.1	6.7	3.9
2000-2005	7.0	5.6	2.7
Infant Mortality Rate (b), 2000-2005	120	89	55
Under-Five Mortality Rate (b), 2000	233	175	83
Life Expectancy at birth (years), 2000-05			
Female	53.0	49.8	68.1
Male	51.1	48.3	63.9
Births Attended by Trained Personnel, 1994-2000 (c)	24%	39%	57%
Adults and Children Infected with HIV/AIDS, 2001 (number)	110,000	28,500,000	40,000,000
Percent of Adults Ages 15-49 infected with HIV or AIDS, 2001	1.7%	9.0%	1.2%
Number of Children Orphaned by AIDS since the beginning of epidemic, 2001	70,000	11,000,000	14,000,000
Safe Water and Sanitation (c)			
Access to Improved Sanitation, 2000			
Urban	93%	72%	85%
Rural	58%	44%	40%



3. Photographies du Bani et de ces affluents



Figure 28 : le Baoulé à Bougouni



Figure 29 : le Banifing à Kouoro



Figure 30 : la Bagoé à Pankourou



Figure 31 : le Kobafini à Loulouni

Ces photos ont toutes été réalisées par Line Kong A Siou (IRD Montpellier) en 2008

4. Géologie du bassin du Bani

Sous-bassins du Bani et géologie

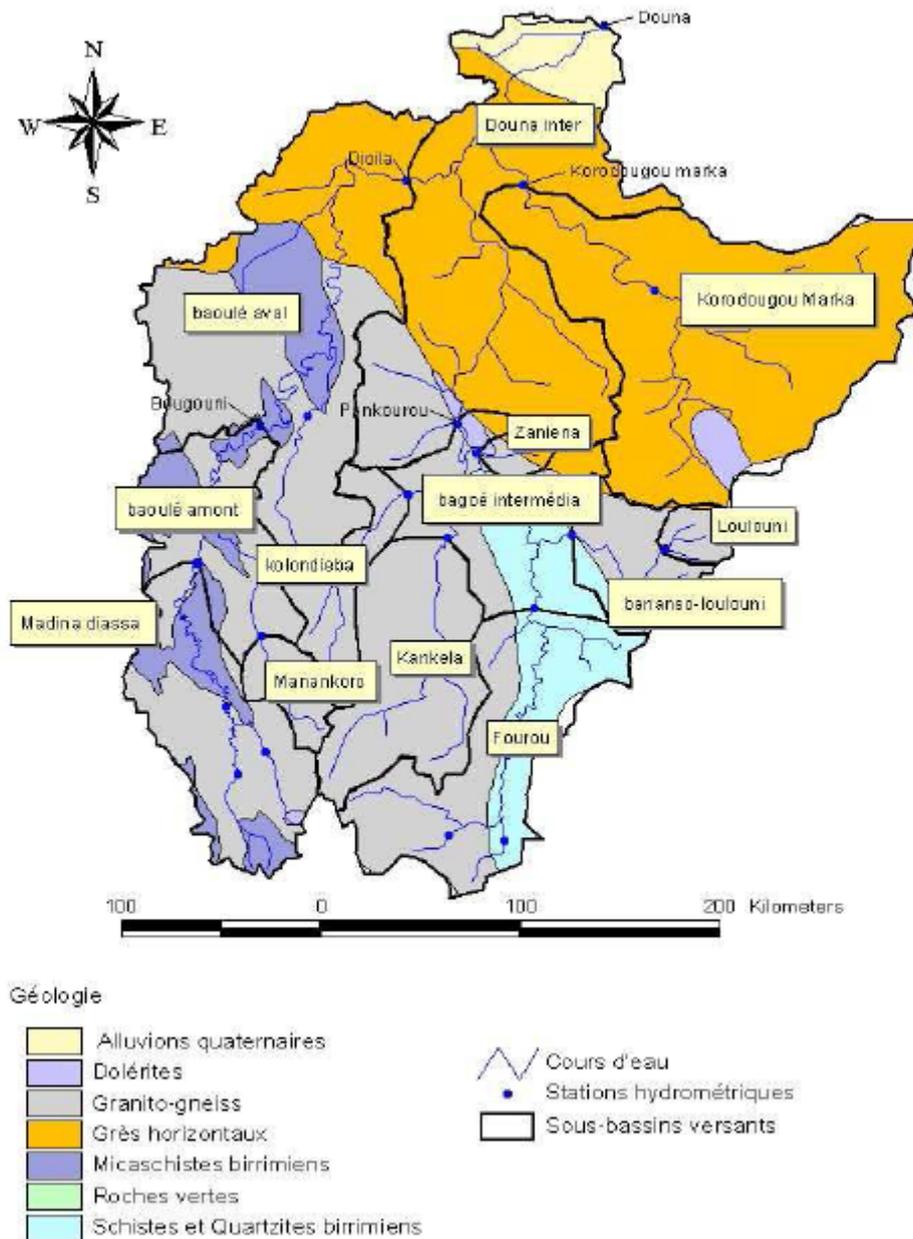


Figure 32 : carte de la géologie du Bani à Douna (Brunet-Moret et al, 1986)

5. Détails sur les différentes classifications de la vulnérabilité

- **Classification « simple » en 3 points de Downing et Patwardhan**

Pour eux on trouve trois grands courants de pensée autour de la notion de vulnérabilité : l'approche par aléas, celle par la pauvreté et celle par changement climatique

- approche par aléa

C'est l'approche la plus traditionnelle qui provient des risques naturels et qu'on peut définir par : « le degré de perte résultant d'un phénomène potentiel pouvant causer des dommages » (UNDHA, 1992)

La vulnérabilité y est bien différenciée de l'aléa.

- approche par réduction de la pauvreté

Dans cette approche concernant la pauvreté qui considère la vulnérabilité comme « une mesure globale du bien-être humain qui inclut une exposition environnementale, sociale, économique et politique à une gamme de perturbations nuisibles » (Bohle et al, 1994). Ici la définition est très globale puisque la pauvreté a de nombreuses causes, elle est de plus très anthropocentrique.

- approche par changement climatique

Les institutions internationales ont essayé de cerner la vulnérabilité au mieux pour éviter une trop grande variabilité du terme, dans sa version « vulnérabilité au changement climatique ». Ainsi, selon le glossaire du 3^e rapport du GIEC (GIEC, 2001), la vulnérabilité est le « degré par lequel un système risque de subir ou d'être affecté négativement par les effets néfastes du changement climatique, y compris la variabilité climatique et les phénomènes extrêmes. La vulnérabilité dépend du caractère, de l'ampleur et du rythme des changements climatiques auxquels un système est exposé ainsi que sa sensibilité et sa capacité d'adaptation ».

Ici, la vulnérabilité est donc considérée comme un indicateur de réaction à un facteur externe. Il est très important de bien voir qu'on ne parle pas ici seulement d'exposition, mais aussi de capacité d'adaptation et de sensibilité.

- **Classification « en poupées russes » de Birkmann**

Une autre division des différentes définitions peut être résumée par le schéma ci-dessous :

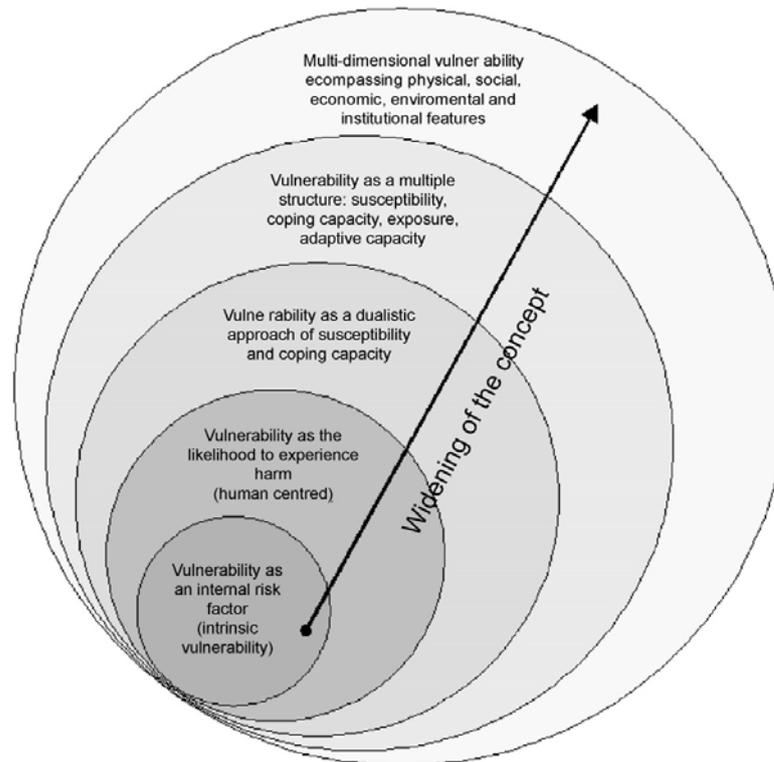


Figure 33 : emboîtement des différentes définitions de vulnérabilité selon Birkmann (2007)

La sphère la plus large correspondrait plus ou moins avec la vulnérabilité par « approche pauvreté », et la suivante avec « l'approche changement climatique »

- **Classification en *outcome* et *contextual vulnerability* de O'Brien**

- **Définition**

Ici, les auteurs ne se sont occupés que de la vulnérabilité concernant le changement climatique, qui est celle qui est majoritairement traitée actuellement. Ce concept est séparé, comme on l'a vu dans le corps du rapport, en deux catégories, *l'outcome vulnerability* (vulnérabilité liée aux conséquences) et la *contextual vulnerability* (vulnérabilité liée au contexte). La première est liée à un cadre scientifique et la seconde à un cadre concernant la sécurité humaine.

On peut formaliser par le schéma ci-dessous les deux approches, l'une très linéaire, l'autre multidimensionnelle.

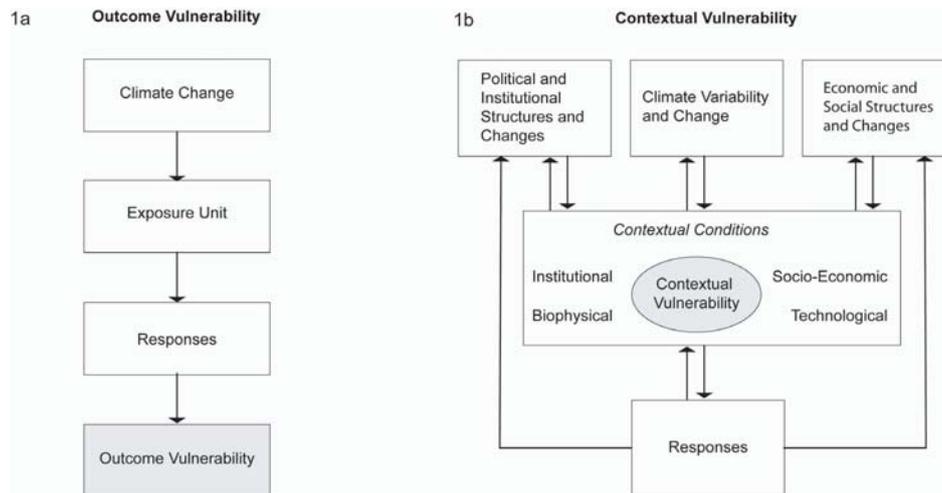


Figure 34 : schéma et différences entre *outcome* et *contextual vulnerability*

Ces deux définitions ne sont pas tellement éloignées de celles de Downing et Patwardhan. Seulement, si ces derniers emploient le terme « approche par changement climatique » pour la définition de l’IPCC, cela semble plus être en fait une sous-approche étant donné que l’approche concernant la sécurité humaine, la pauvreté fait aussi partie d’une réflexion sur le changement climatique.

- tentative d’application à notre sujet

Afin de donner des éléments aux futures personnes qui vont travailler sur le Bani et sur la vulnérabilité, on va essayer de se situer dans cette classification.

Pour cela, O’Brien a mis au point un outil, présenté ci-dessous :

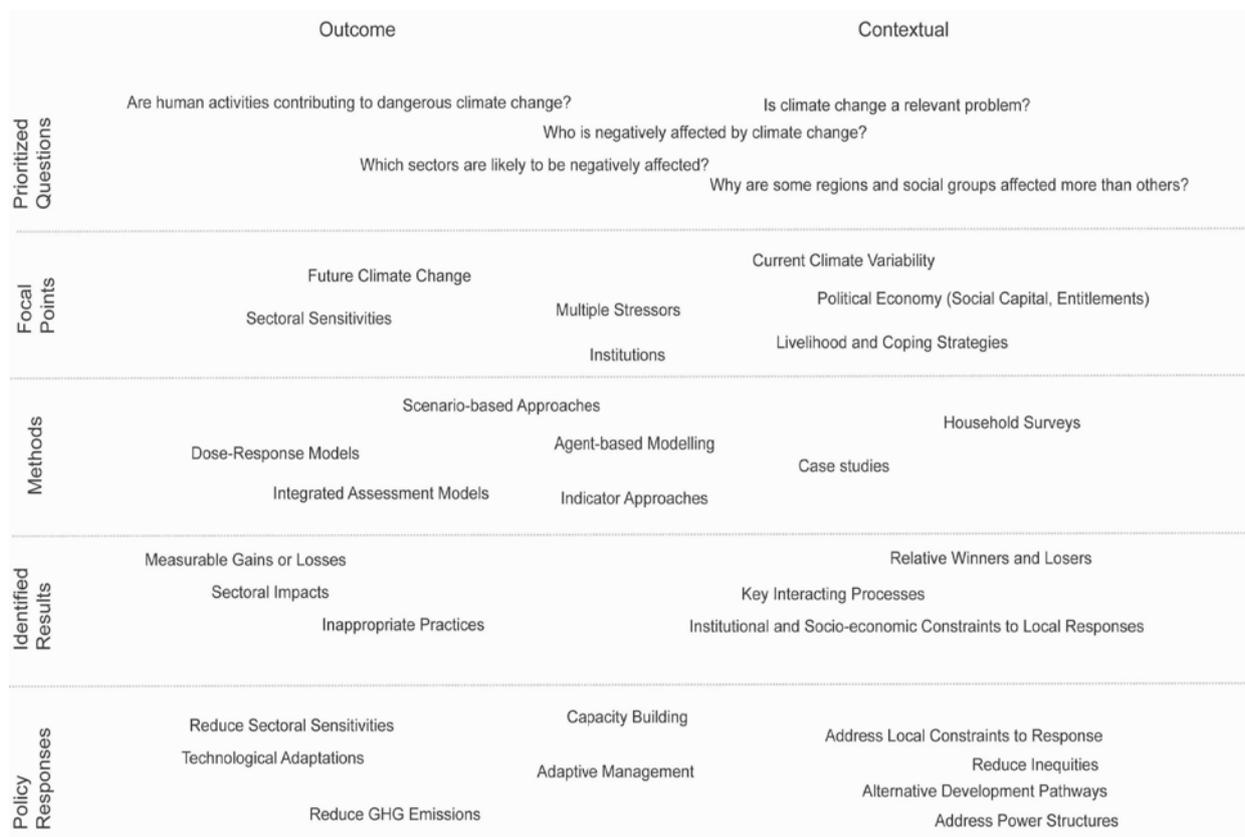


Figure 35 : outil pour le choix entre contextual et outcome vulnerability

Le point central de notre étude étant les indicateurs, il peut être intéressant de voir où ils se situent dans le diagramme ci-dessus : on voit que cette approche ne joue pas (position neutre) et l'auteur nous apprend que ce type de méthode peut avoir lieu pour les deux types de vulnérabilité, selon les cas. Il faudra donc choisir les indices en fonction de la dimension de la vulnérabilité dans laquelle on va se trouver.

Il semble dans notre sujet qu'on se rapproche plutôt d'une approche par *outcome vulnerability*. En effet selon les orientations du projet RESSAC il y a une intention de simulation par choix de scénarii et les réponses à la vulnérabilité se feront plus par des aménagements techniques. De plus, l'étude sera préférentiellement réalisée par des mesures de gains ou de pertes par secteurs (surface agricole, volume d'eau...)

Notons que cette approche par « vulnérabilité liée aux conséquences » peut très bien être multidimensionnelle (on aura comme *exposure unit* la ressource en eau, l'occupation du sol...) il n'y a cependant pas les mêmes boucles d'interaction.

On essaiera alors de d'identifier la sensibilité des différents secteurs et de la réduire à travers une adaptation.

Cela dit, il n'est pas impossible que dans un projet vaste comme RESSAC, il y est un intérêt pour la vulnérabilité contextuelle, d'autant plus que O'Brien précise bien que ce type de vulnérabilité est complémentaire de la vulnérabilité liée aux conséquences. Il pourrait donc être intéressant dans une autre branche du projet de se concentrer sur ce type de vulnérabilité. Pour un exemple de ce type de stratégie, on peut se référer à **Eriksen et Silva (2003)**, résumé par O'Brien.

6. Détail d'un indice global : le Water Poverty Index

On a décidé de détailler succinctement un des indices qui donnent une vision globale de la vulnérabilité afin que le lecteur puisse se rendre compte par lui-même de l'intérêt d'un tel calcul. On a de plus choisi le WPI car c'est celui qui a été le plus étudié (et le plus utilisé). Les informations suivantes et nécessaires à la compréhension du WPI peuvent se trouver dans les ouvrages de Sullivan et Meigh.

- **Calcul**

Cet indice est calculé à l'aide de 5 autres sous-indices qui servent à évaluer 5 « composants clefs » : **R**essource, **A**ccès, **C**apacité, **U**tilisation et **E**nvironnement. Chaque composant est construit à partir de différents sous-composants qui sont calculables dans la plupart des cas à partir de données existantes. On passe des 5 indices au WPI par la formule de moyenne pondérée suivante :

$$WPI = \frac{w_r R + w_a A + w_c C + w_u U + w_e E}{w_r + w_a + w_c + w_u + w_e}$$

Chacun des coefficients w est choisi en fonction de la situation étudiée. La valeur finale du WPI est comprise entre 0 (pire situation) et 100 (meilleure), afin d'avoir des résultats standards.

Pour donner une idée des paramètres pris en compte dans chaque catégorie, Sullivan et Meigh propose l'exemple suivant (Sullivan et Meigh, 2006)

WPI component	Data used
Resources (R_i) - Provides some assessment of a qualitatively adjusted value of the per capita quantitative measure of ground and surface-water availability for region <i>i</i>	<ul style="list-style-type: none"> Assessment of surface water and groundwater availability using hydrological and hydrogeological techniques Quantitative and qualitative evaluation of the variability or reliability of resources Quantitative and qualitative assessment of water quality
Access (A_i) - Indicates access people have to water for effective use for their survival in region <i>i</i> .	<ul style="list-style-type: none"> Access to clean water as percent households having piped water supply Reports of conflict over water use Access to sanitation as percent of population Percent water carried by women Time spent in water collection, including waiting Access to irrigation coverage adjusted by climate and cultural characteristics
Capacity (C_i) - Indicates level of human and financial capacity to manage the system for region <i>i</i> .	<ul style="list-style-type: none"> Wealth equivalent to ownership of durable items Mortality rate for children under 5 years Educational level Membership in water users associations Percent households reporting illness due to water supply Percent households receiving a pension, remittances or wages
Use (U_i) - Indicated by level of water use by different sectors of the economy and the economic returns from same in region <i>I</i>	<ul style="list-style-type: none"> Domestic water consumption rate Agricultural water use, expressed as the proportion of irrigated land to total cultivated land Livestock water use based on livestock holdings and standard water needs Industrial water use (purposes other than domestic and agricultural)
Environment (E_i) – For lack of acceptable figures to represent environmental integrity or environmental water needs, these alternative proxy data were used.	<ul style="list-style-type: none"> People's use of natural resources Reports of crop loss during last 5 years Percent households reporting erosion on their land

Tableau 16 : détails de paramètres sélectionnables dans chacun des 5 composants du WPI.

• Résultats

Le résultat d'un tel calcul est non seulement une valeur synthétique du WPI, qui permet une comparaison directe entre différentes zones, mais également un pentagramme permettant de visualiser la participation de chacun des 5 composants. Le pentagramme se présente sous la forme suivante (Sullivan et Meigh, 2006) :

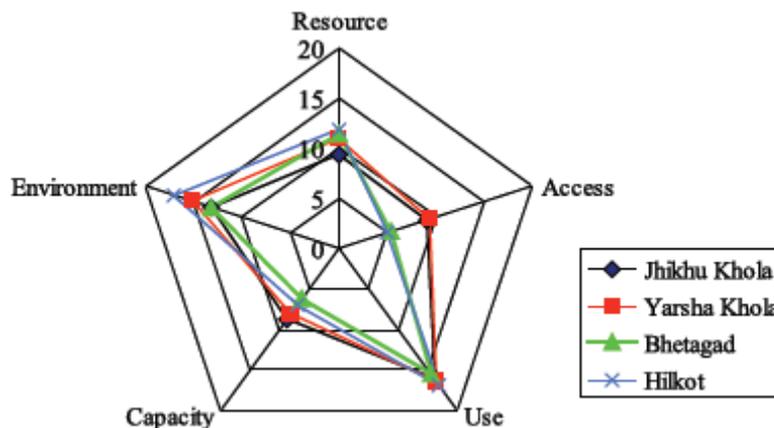


Figure 36 : pentagramme du SPI pour 4 bassins en Inde, Népal et Pakistan. Données collectées par O. dube (Leicester University), diagramme présenté par Sullivan et al (2006)

- Notion d'échelle

La notion de l'échelle à laquelle on travaille avec le WPI est un problème important. Si il a été créé pour être utilisé à l'échelle de la communauté, on peut aussi le faire à l'échelle nationale : cela peut aussi être intéressant, dans certains cas. Pour de plus amples informations, on peut se reporter à 2 articles de Sullivan et Meigh : Application of the water poverty index at different scales : a cautionary tale (2006) et Integration of the biophysical and social sciences using an indicator approach : Addressing water problems at different scales (2007)

7. Détail technique sur la méthode des L-moments.

Il s'agit ici de la reproduction à l'identique de l'annexe a.3 de Meylan et Musy (1996). Il s'agit ici de donner une définition des paramètres de base. Pour les détails sur l'analyse regional il est préférable de se reporter directement à Hosking et Wallis : *Some statistics useful in regional frequency analysis* (1993). Pour être clair cela serait en effet trop long.

Définition des L-Moments

En 1986 HOSKING a défini les *L-moments* comme des combinaisons linéaires des moments de probabilité pondérés [Hosking 93]:

$$\lambda_{r+1} = \sum_{k=0}^r p_{r,k}^* \cdot \beta_k, \quad (\text{a-52})$$

où :

$$p_{r,k}^* = (-1)^{r-k} \binom{r}{k} \binom{r+k}{k}. \quad (\text{a-53})$$

Rapports des L-Moments

Les *rapports des L-moments* sont les quantités:

$$\tau_r = \frac{\lambda_r}{\lambda_2}, \quad r = 3, 4, \dots \quad (\text{a-54})$$

Interprétation des rapports des L-Moments

Les *L-moments* sont directement dérivés des moments de probabilités pondérées mais sont plus commodes à interpréter: en particulier les *rapports des L-Moments*:

- λ_1 est un paramètre de position;
- λ_2 est un paramètre d'échelle;
- τ_3 est une mesure de symétrie et
- τ_4 une mesure d'aplatissement.
- le « L-CV », $\tau = \lambda_2 / \lambda_1$, est analogue au coefficient de variation usuel.

On a dans la formule a-5 :

$$\beta_j = M(1, j, 0) = E[X \cdot F^j] = \int_0^1 x(F) F(x)^j dF$$

Avec : $x(F)$ la valeur de la variable X correspondant à la valeur F de la fonction de répartition théorique. j est réel.

8. Stations qui présentent une anomalie après étude par Khronostat

Station	Caractère aléatoire	Absence de rupture	normalité
Dogo Bougouni	oui	Non pour Buishand à 90%	Oui*
Kouka	Non (à 90% et 95%) oui (à 99%)	Non pour Buishand à 90% et 95%	Oui*
Odienne	Non (tous les intervalles)	Non pour Buishand et Pettitt (tous les intervalles). Rupture en 1987	Oui*
Manignan	Non (à 90%)	Non pour Buishand à 90%, rupture 1977	Oui*
Manankoro	oui	Non pour Pettitt à 90%	Oui*
Kourouma	Non (tous les intervalles)	Non pour Buishand à 90% et 95%, rupture 1991	Oui*
Baroueli	Non (tous les intervalles)	Non pour Buishand à 90% Non pour Pettitt (tous les intervalles)	Oui*
Baguineda	Non (à 90%)	Non pour Pettitt à 90%	Oui*
Tansilla	oui	Oui**	non
Beleko	oui	Oui**	non
solenzo	oui	Oui**	non

Figure 37 : stations présentant une anomalie aux tests de Khronostat

*pour le test de normalité, cela peut être après transformation (racine carrée...)

**la distribution n'étant pas normale, le test de Buishand ne peut pas être réalisée, ni la méthode bayésienne.

9. Tableau de résultats des P_{10} , P_{20}

	Borne inf	P_{10}	Borne sup	Borne inf	P_{20}	Borne sup
DIOILA	81.96	89.85	97.69	88.23	101.24	113.78
KATIBOUGOU	86.72	92.38	97.84	93.06	99.51	106.74
KONOBOUGOU	89.01	98.82	107.56	99.07	112.49	125.10
TANSILLA	92.22	98.57	104.85	99.11	107.07	115.17
SOLENZO	83.19	90.04	96.27	89.68	100.12	109.03
KOUTIALA	75.87	81.36	86.89	81.57	88.11	95.14
MAHOU	84.38	92.54	99.90	93.55	103.31	114.51
FANA	79.85	83.17	86.58	83.06	87.20	91.27
BOBOLA.ZANGASSO	83.70	91.01	97.69	90.71	100.73	109.84
KONSEGUELA	81.46	85.51	89.71	86.07	91.31	97.10
ZANGASSO	85.53	93.25	99.68	93.07	103.84	115.80
BELEKO	89.06	97.32	104.48	97.43	107.96	118.38
KIGNAN	94.82	105.28	115.72	105.56	120.40	135.08
DOGO..BOUGOUNI	94.23	102.64	110.15	102.18	113.72	124.28

BAGUINEDA	75.73	82.55	88.60	82.63	91.36	99.49
DIONKELE...N.DOROLA	87.44	97.78	106.72	97.02	112.00	128.24
SAMOROGOUAN	92.05	99.49	106.21	99.61	109.40	119.09
ORODARA	102.77	112.93	122.22	112.91	126.77	138.59
SIKASSO	94.81	106.07	117.22	105.38	122.28	138.07
BANKOUMANA	81.26	89.09	96.03	88.64	100.51	112.11
KLELA	88.57	96.62	103.62	97.16	107.29	118.79
MARKALA	76.56	81.17	85.54	81.14	86.97	92.75
SAN	79.34	88.61	97.83	89.22	102.18	114.92
BLA	80.80	90.26	98.38	90.00	103.36	116.78
CINZANA	83.81	94.22	104.28	94.28	108.72	122.89
DJENNE	84.29	92.75	100.18	93.20	103.62	113.00
KE...MACINA	76.10	85.01	92.44	83.85	97.98	110.37
KIMPARANA	80.90	89.77	97.46	90.29	101.78	113.68
SEGOU	71.71	78.30	84.90	78.03	87.91	97.34
SOFARA	68.79	74.81	80.50	74.64	82.74	90.05
KOUTO	104.72	114.09	125.39	114.73	127.34	142.27
MADINANI	92.95	97.97	103.13	98.09	104.79	111.41
MANIGNAN	116.99	127.26	136.99	126.96	140.63	152.54
BOUNDIALI	109.49	118.25	126.37	118.35	129.44	140.66
FILAMANA	103.98	110.12	116.93	110.84	119.13	128.33
KALANA	112.31	121.91	131.67	122.22	134.66	146.85
MANANKORO	90.62	95.22	100.24	95.47	101.47	107.25
DEMBASSO	102.68	112.29	122.60	112.24	125.34	138.64
BAGUERA	101.92	110.50	119.45	111.69	123.02	134.64
LOUMANA	110.21	121.51	131.80	121.41	137.11	152.36
GOUALALA	106.52	117.00	126.52	116.64	130.21	142.49
KADIOLO	88.66	95.03	101.11	95.48	103.20	111.77
KOLON DIEBA	103.58	112.07	120.60	112.98	124.12	135.47
MISSENI	99.93	108.87	116.90	108.65	121.27	133.42
BOUGOUNI	89.04	96.57	103.50	96.73	107.22	117.98
KANGABA	91.38	102.43	113.93	101.70	118.83	134.18
YANFOLILA	97.24	103.96	110.35	104.11	112.64	120.41

Figure 38 : valeurs des pluies décennales et vicennales pour les 51 stations

10. Cartographie des bornes inférieures et supérieures des pluies décennales et vicennales.

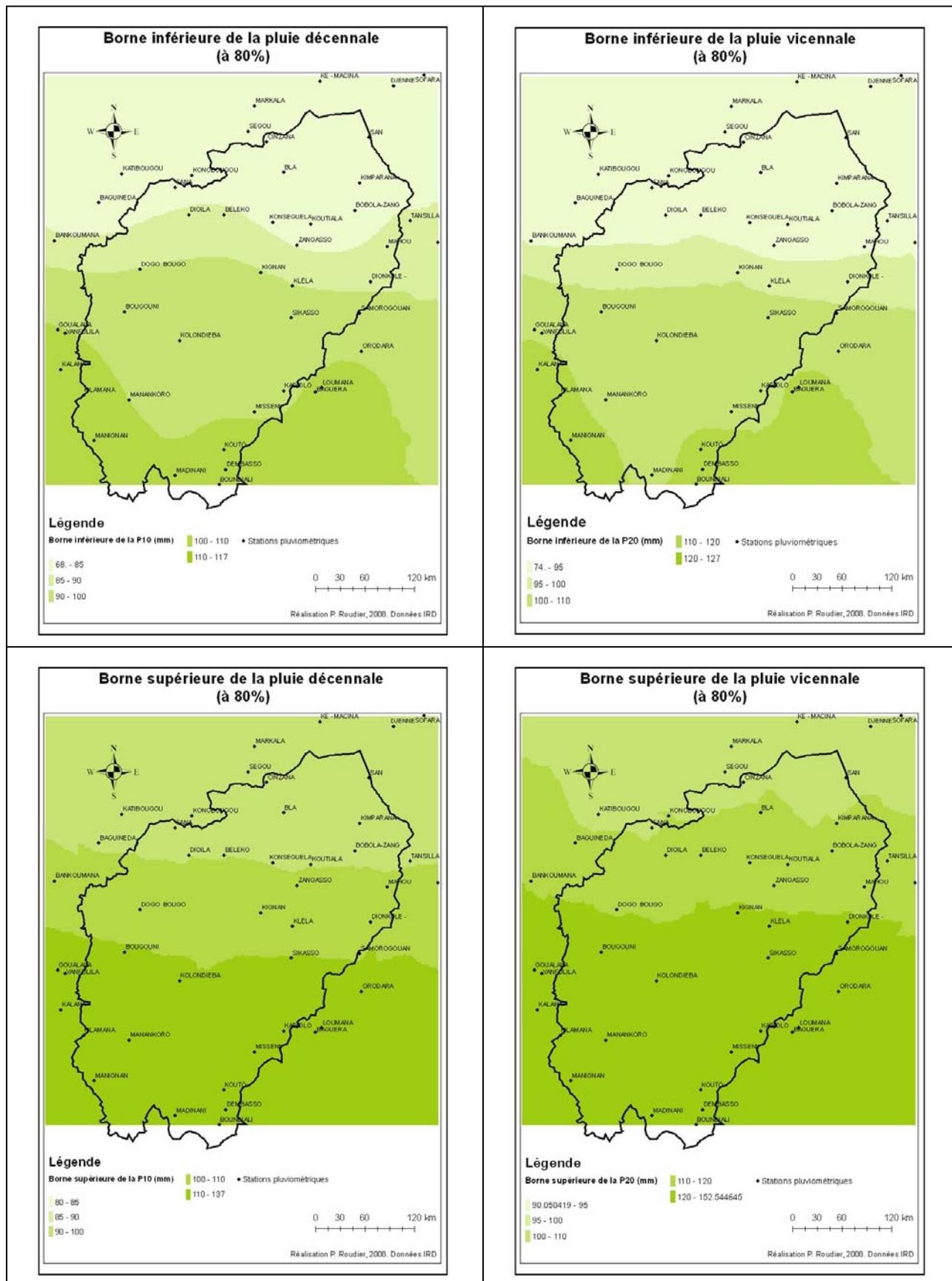


Figure 39 : cartes des bornes supérieures et inférieures des pluies vicennales et décennales

11. Tableau de rupture, bilan du traitement par Khronostat des maxima annuels de pluie.

Station	Rupture pour (P>20)	Rupture pour (P<5)	Rupture pour (P=0)	Station	Rupture pour (P>20)	Rupture pour (P<5)	Rupture pour (P=0)
DIOILA	1979	0	0	DJENNE	0	0	1969
KATIBOUGOU	0	1966/1979	1987	KE...MACINA	0	1982	0
KONOBOUGOU	0	0	0	KIMPARANA	1980	1968	1969
KOUKA	0	1972	1972	SEGOU	0	1979	1979
TANSILLA	0	1978	1982	SOFARA	0	0	70/79
SOLENZO	0	1970	1982	ODIENNE	1982	0	0
KOUTIALA	0	1991	0	KOUTO	71/74	1978	1979
MAHOU	0	0	0	MADINANI	1972	1968	1973
FANA	0	0	0	MANIGNAN	71/81	0	1982
BARUELI	0	1984	1984	BOUNDIALI	1976	1985	1979
BOBOLA.ZAN	0	1974	0	FILAMANA	0	1980/1988	1988
KONSEGUELA	1978	0	1979	KALANA	0	1974	0
ZANGASSO	1976	1977	1977	MANANKORO	0	1975	0
BELEKO	1976	1974	0	DEMBASSO	0	1977	0
KIGNAN	0	0	0	BAGUERA	0	1992?	1979
DOGO..BOUGO	0	0	1989	LOUMANA	0	1968	1980/1967
BAGUINEDA	0	0	0	GOUALALA	0	1978	1978
DIONKELE...N.DO	1970	1975	1982	KADIOLO	0	1987	1988
SAMOROGOUAN	0	1979	1979	KOLON DIEBA	1971	1990	1993
ORODARA	0	0	1982	MISSANI	0	0	1982
SIKASSO	0	0	0	BOUGOUNI	0	0	1979
KOUROUMA	0	0	0	KANGABA	0	1968	0
BANKOUMANA	0	1991	1991	YANFOLILA	1969	0	1982
KLELA	0	0	0				
MARKALA	0	0	0				
SAN	0	0	1968/1979				
BLA	0	1981	1980				
CINZANA	0	1968	0				

Tableau 17 : bilan de l'étude des ruptures avec Khronostat pour les pluies maximales annuelles.

NB1 : 0 signifie absence de rupture.

NB2 : dans certains cas, les tests donnaient des valeurs d'année de rupture différentes, le choix s'est donc fait en visualisant les données.

Carte de variation

12. Précision sur le comblement de lacunes de débit

Station à boucher	Station utilisée pour la régression	Type de régression	Coefficient R ²
Bénény Kegny	Douna	Tout linéaire	
Douna	Bénény Kegny	Tout linéaire	
Sofara	Bénény Kegny	Puissance	
Pankourou	Douna	Tout linéaire	
Bougouni	Dioila	Tout linéaire	
Dioila	Bougouni	2 mois : linéaire/ 1 mois : puissance	

Tableau 18 : comblement des lacunes de débit

13. Valeurs des Q₁₀ et Q₂₀ avec leurs bornes

Stations	Bé-Ké	Douna	Sofara	Pankourou	Bougouni	Dioila
Q10 : Borne sup (à 20%)	1820.2	2194.2	1255.2	1252.6	668.2	864.2
Q10 : Valeur centrale	1579.2	1908.0	1142.5	1049.3	589.1	753.3
Q10 : Borne inf à 20%	1326.5	1565.1	1025.7	849.4	504.8	643.7
Q20 : Borne sup (à 20%)	2088.8	2609.5	1372.5	1529.9	751.9	982.2
Q20 : Valeur centrale	1818.2	2249.0	1250.1	1269.9	665.4	860.2
Q20 : Borne inf à 20%	1538.4	1890.9	1119.4	1031.4	574.7	733.0

Tableau 19 : valeurs des débits décennaux et vicennaux, bornes inférieures et supérieures

14. Méthode d'interpolation

Afin de pouvoir cartographier une variable quelconque sur tout un territoire à partir d'un nombre donné de stations, il est évidemment nécessaire de procéder à une interpolation. La question de la méthode à employer se pose alors : il en existe en effet plusieurs comme le spline, les méthodes de partitionnement de l'espace (polygones de Thiessen...), méthodes barycentriques, krigeage etc... Cette dernière a été employée majoritairement par les auteurs depuis quelques temps (Tang, 2002) et semble bien être la méthode qui permette la meilleure interpolation (Baillargeon, 2005). De plus, elle permet de produire une carte des erreurs ce qui est très pratique pour localiser les zones où l'interpolation n'est pas précise.

On utilisera donc ici le krigeage ; il faudrait alors déterminer maintenant quel est le type le plus adéquat (ordinaire, simple, universel) puis trouver tous les paramètres afin d'avoir l'interpolation la plus fidèle. Ce processus est long et peut être à lui seul un sujet d'étude, donc on essaiera de simplifier, tout en restant cohérent, la méthodologie décrite par Baillargeon (Baillargeon, 2005), d'autant plus que plusieurs cartes avec différentes variables sont à choisir dans notre cas.

On procédera tout d'abord à une exploration rapide des données avec le tracé d'un histogramme et d'un graphique « Q-Q normal » comme il est possible de le faire avec Geostatistical Analyst sous Arcview : cela permettra de voir si elles suivent une loi normale et de faire, si besoin est, une transformation de type Log ou Box-Cox. On choisira par la suite le krigeage ordinaire (puisque'on n'**a pas de données auxiliaires et suivant les conseils de**) : il faut alors déterminer à l'aide du variogramme le choix du modèle variographique (exponentiel, gaussien , sphérique...) et la valeur de paramètres comme le « lag-size » et « number of lags ». Notons que ces deux paramètres n'ont pas une incidence forte sur le résultat final (Baillargeon, 2005). On testera plusieurs possibilités et le choix se fera par validation croisée avec la comparaison des erreurs résiduelles mais aussi la visualisation du graphique qui compare valeur réelle/valeur simulée.

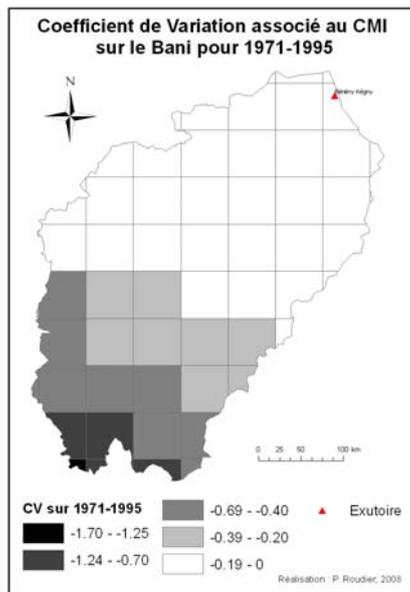
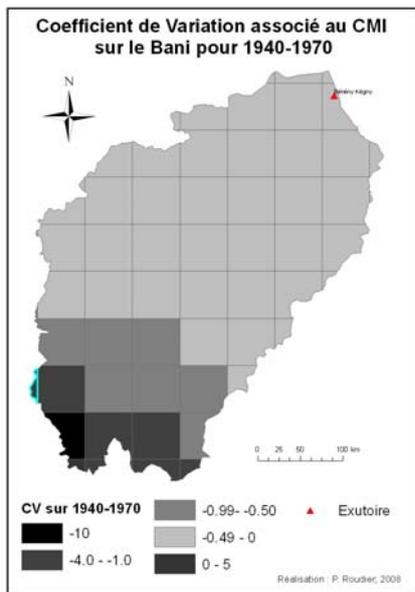
Il semble ainsi qu'on obtienne une interpolation correcte même si elle n'est sûrement pas la plus juste, mais il ne semblait pas judicieux de passer un temps plus important sur ce point, surtout avec des données à interpoler déjà atteintes d'une grande imprécision. Notons que si on pensait présenter dans un premier temps présenter des cartes représentant le krigeage avec des classes de valeurs, il a semblé plus adéquat de tracer des isohyètes, ce qui nécessite une interpolation.

Pour cela, on a converti la couche krigée en raster (pixel de sortie de 0.1 avec ArcGIS, unité non précisée) et utilisé la fonction *Contour* de Geostatistical Analyst.

Malgré ces études montrant la performance du krigeage , il arrive dans de nombreux cas, que l'interpolation soit très mauvaise, ce que nous montre la validation croisée, on a donc tracé les polygones de Thiessen, moins précis et moins aisés à interpréter mais qui ne donnent pas les sous-estimations (et surestimations) énormes du krigeage (jusqu'à 100% dans ce cas).

Notons enfin que, quelle que soit la technique employée, il y a une petite partie du Sud du bassin qui n'est pas renseignée puisqu'il n'y a pas de stations en dehors des limites. Plutôt que d'inventer un stratagème artificiel pour remplir cette zone, on a préféré la laisser sans information.

15. Coefficient de Variation du CMI



$$CV = \sigma / \text{moyenne}$$

Figure 40 : coefficient de variation associé au CMI

16. Cartes liées aux 5 paramètres

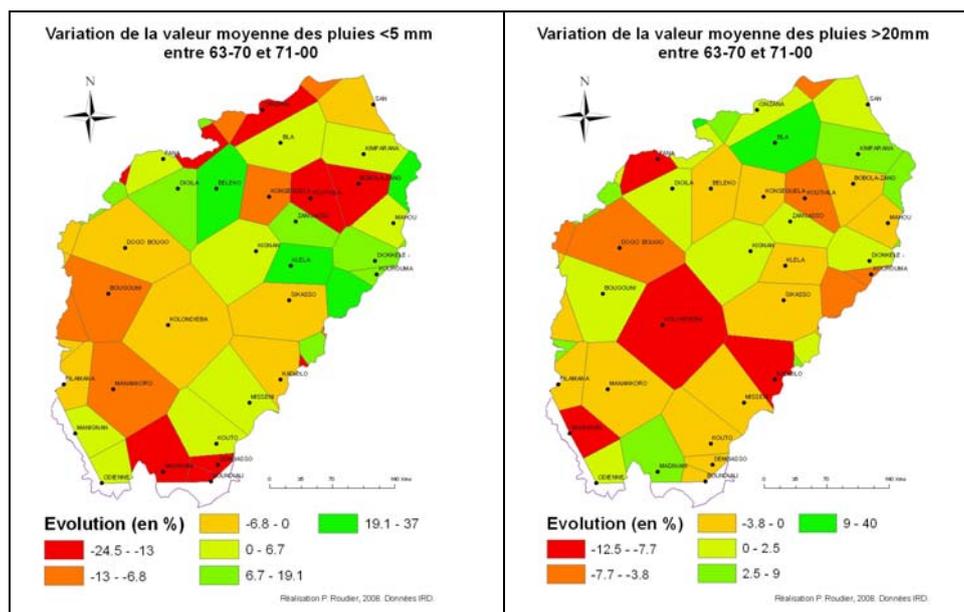


Figure 41 : variation de la valeur des pluies P<5 et P>20

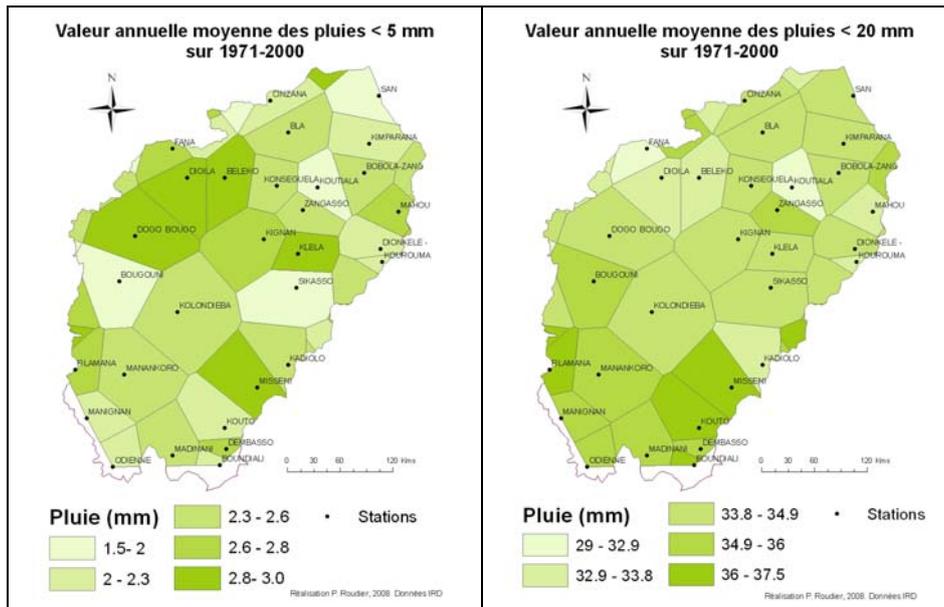


Figure 42 : valeur annuelle moyenne des pluies P<5 et P>20

17. Définition du Standardized Precipitation Index

On donne, en complément des explications du mémoire, des détails techniques pour le calcul du SPI, principalement repris de : Lloyd-Hughes et Saunders (2002), Giddings et Soto (2005) et Thom (1958) pour détails sur la loi Gamma.

On effectue tout d'abord la moyenne sur 10 jours (ici) des précipitations : cela constitue un jeu de variables, nommées x . On doit donc appliquer une loi gamma à ces valeurs. Cette loi à une densité de probabilité suivante, **pour $x>0$** :

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}$$

Avec :

α : paramètre de **forme**

β : paramètre d'échelle

Et Γ la fonction gamma définie ainsi :

$$\Gamma(\alpha) = \lim_{n \rightarrow \infty} \prod_{v=0}^{n-1} \frac{n! n^{y-1}}{y+v} \equiv \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy$$

Il faut, pour adapter la distribution aux données, calculer α et β . Cela est fait dans notre cas avec la fonction *pargam* de R qui utilise les paramètres issus des L-moments. Lloyd-Hughes et Saunders (2002) proposent une autre méthode de calcul se fondant sur des valeurs approchées.

Il faut maintenant calculer pour chaque x la valeur $G(x)$, probabilité cumulée définie ainsi, pour $x>0$.

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx$$

La fonction *cdfgam* de R permet de faire cela. Mais on a remarqué que, pour cette définition, $x > 0$, or il existe des périodes pour lesquelles $x = 0$. On va donc utiliser une fonction auxiliaire H définie pour $x \geq 0$ par :

$$H(x) = q + (1 - q)G(x)$$

Avec q , la probabilité sur chaque station d'avoir une précipitation nulle sur toute la période considérée (ici 1963-2000).

On obtient donc pour chaque x une valeur $H(x)$ correspondante. Cela permet enfin de calculer le SPI, comme suit :

$$Z = \text{SPI} = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad \text{for } 0 < H(x) \leq 0.5$$

$$Z = \text{SPI} = + \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad \text{for } 0.5 < H(x) < 1$$

Avec :

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(H(x))^2} \right]} \quad \text{for } 0 < H(x) \leq 0.5$$

$$t = \sqrt{\ln \left[\frac{1}{(1 - H(x))^2} \right]} \quad \text{for } 0.5 < H(x) < 1$$

Et les coefficients suivants :

$$c_0 = 2.515\,517 \quad c_1 = 0.802\,853 \quad c_2 = 0.010\,328$$

$$d_1 = 1.432\,788 \quad d_2 = 0.189\,269 \quad d_3 = 0.001\,308$$

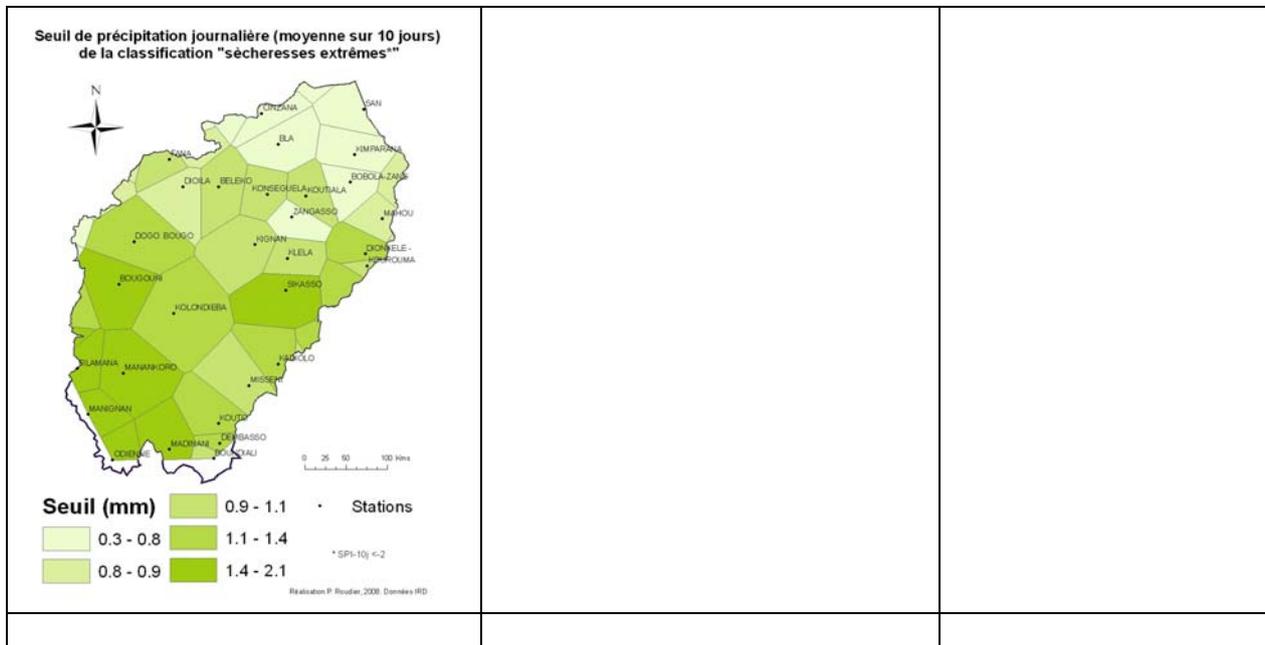
18. Détails sur l'évolution temporelle du nombre de sécheresses avec le SPI

Sécheresses	Description	Valeurs
Extrêmes	Nombre (63-00)	707
	Variation entre 63-70 et 93-00 (%) du nombre moyen	+16
	Variation entre 63-70 et 71-00 (%)	+43
Sévères	Nombre (63-00)	1466
	Variation entre 63-70 et 93-00 (%) du nombre moyen	+37
	Variation entre 63-70 et 71-00 (%)	+56
Modérées	Nombre (63-00)	2264
	Variation entre 63-70 et 93-00 (%) du nombre moyen	+15
	Variation entre 63-70 et 71-00 (%)	+32
Légères	Nombre (63-00)	9273
	Variation entre 63-70 et 93-00 (%)	+12
	Variation entre 63-70 et 71-00 (%)	+19
Totales	Nombre (63-00)	13 751

(extrêmes+sévères+modérées +légères)	Variation entre 63-70 et 93-00 (%) du nombre moyen	+15
	Variation entre 63-70 et 71-00 (%)	+25

Tableau 20 : variation du nombre de sécheresses (SPI) selon leur catégorie autour de 1970

19. Cartes relatives aux résultats issus du SPI



20. Méthode de calcul de l'Effective Drought Index (EDI)

L'Effective Drought Index est une fonction de la PRN (Precipitation needed for a Return to Normal) *ie* la précipitation pour combler le déficit accumulé depuis le début de la sécheresse. On a les relations suivantes, où **j** est la durée de la sommation réelle (*ie* la durée de sommation fictive **i** (=10 jours ici) plus la durée sèche, voir Byun et Wilhite (1999)) et **ST(PRN)** l'écart type de la PRN :

$$EDI_j = PRN_j / ST(PRN_j)$$

On va calculer la PRN (avec **i** la durée de sommation fictive (10 jours ici), **P_m** la précipitation de **m-1** jours avant, **MEP** la moyenne des EP de chaque jour)

$$\left\{ \begin{array}{l} PRN_j = DEP_j / \sum_{N=1}^j (1/N) \\ DEP = EP - MEP \\ EP_i = \sum_{n=1}^i \left[\left(\sum_{m=1}^n P_m \right) / n \right] \end{array} \right.$$

La première chose à faire est donc de calculer pour chaque jour la valeur d'EP (Effective Precipitation). Si $i=2$ par exemple, $EP_2 = P_1 + (P_1 + P_2)/2$.

On peut trouver plus de détails avec Byun et Wilhite (1999) et Morid et al (2006). Par la suite, il suffit d'appliquer une à une les équations.

