

## **Variabilité spatiale et temporelle des bilans hydriques de quelques bassins versants d'Afrique de l'ouest en liaison avec les changements climatiques**

Bernard Pouyau  
Directeur de Recherches  
Orstom, Laboratoire d'Hydrologie  
Miniparc Bât. 2, Rue de la Croix Verte  
34100 Montpellier, France

RESUME La sécheresse en Afrique de l'Ouest des 15 dernières années a un effet apparemment contradictoire sur l'hydraulicité des petits bassins versants inférieurs à 500 km<sup>2</sup> et sur celle des très grands fleuves, Senegal et Niger par exemple. Le présent article s'attache à définir les termes du bilan hydrique de 8 bassins versants, appartenant à un échantillon de superficies croissantes, 1 000 à 100 000 km<sup>2</sup> soumis à des pluviométries échelonnées de 400 à 1 000 mm. Il s'efforce particulièrement de caractériser la variabilité spatiale et temporelle de ces bilans hydriques et de les relier aux changements climatiques intervenus. Il propose enfin une approche susceptible d'expliquer comment ces bassins de surfaces intermédiaires remplacent finalement sous l'influence de la sécheresse les excédents d'écoulement de leurs parties amont par des baisses significatives et continues de l'hydraulicité de leurs exutoires qui constituent les grands bassins fluviaux. A cette échelle de superficie de bassin versant correspond donc la discontinuité structurelle ou conceptuelle majeure de la liaison entre la précipitation et l'écoulement.

### Mots clefs:

Afrique de l'Ouest, Sahel, Sécheresse, Bassin Versant, Bilan hydrique, Ecoulement, Pluviométrie, Echelle spatiale

ABSTRACT The drought of the last fifteen years in western Africa has a seemingly contradictory influence over the water yield of watersheds smaller than 500 km<sup>2</sup> and that of large river basins such as the Senegal and Niger rivers. This paper is devoted to studying the water balance components over eight watersheds, whose area ranges from 1 000 to 100 000 km<sup>2</sup>, and rainfall from 400 to 1 000 mm. It emphasizes the spatial and temporal variability of the water balance and attempts to link it to the recent climatic changes.

A new approach to this problem is proposed, that should help explain how the increase in runoff of intermediate

watersheds gives place to the deficit observed at the outlet of the great water basins. At this scale the major conceptual discontinuity in the rainfall runoff relationship takes place.

Key words:

Western Africa, Sahel, Drought, Watershed, Water balance, Runoff, Rainfall, Areal scale.

### Introduction

En Afrique de l'Ouest, sahélienne et soudano-sahélienne, au nord de l'isohyète 1 000 mm, la sécheresse des premières années de la décennie 80 est au moins aussi sévère que celle du début des années 70, sans que les années intermédiaires n'aient jamais vraiment permis un retour à la normale. L'analyse des pluviométries, à l'échelle annuelle ou journalière, en des postes spécifiques ou au plan régional, a été abordée par plusieurs auteurs (Albergel, 1984-1985-1986; Carbonnel, 1985; Olivry, 1983; Snidjers, 1983). Un consensus semble se dégager au moins sur la non-stationnarité des hauteurs pluviométriques annuelles en une station donnée, voire sur une discordance des séries pluviométriques vers les années 1969 ou 1970. Certains voient dans cette discordance une véritable "rupture" climatique, tandis que d'autres réservent leur opinion ou ne veulent y reconnaître qu'une persistance, certes singulière, mais aléatoire, d'années déficitaires. L'hydraulicité des grands systèmes fluviaux a elle aussi fait l'objet d'études documentées, essentiellement en ce qui concerne les fleuves Niger et Senegal (Sircoulon, 1985 et 1986; Olivry, 1983). L'effondrement des modules de ces grands fleuves, qui aboutit à l'assèchement historique du Niger à Niamey en 1985 (Billon, 1986) est évident. Les écoulements des petits bassins versants (moins de 500 km<sup>2</sup> de superficie) ont aussi fait l'objet d'études multiples (Albergel, 1985; Ribstein, 1986), toutes convergentes, qui concluent au maintien de leurs apports moyens annuels au moins, à leur niveau d'avant sécheresse. Cela s'explique, malgré la péjoration pluviométrique, par l'augmentation généralisée des taux de ruissellement, due autant à la raréfaction de la végétation annuelle ou pérenne, qu'à l'évolution des états de surface des sols, induite pour une bonne part par l'action anthropique.

Les études concernant des bassins versants de dimension intermédiaire (1 000 à 100 000 km<sup>2</sup>) sont beaucoup plus rares, d'abord parce qu'il est déjà difficile d'identifier dans ces zones climatiques des bassins de cette superficie qui ne soient trop hétérogènes ou touchés par la dégradation hydrographique, ensuite parce qu'il est encore peu fréquent de disposer de données fiables, hydrométriques et pluviométriques, couvrant une période d'observation suffisamment longue. Pourtant cette classe de superficies est bien la plus intéressante pour expliquer comment une augmentation avérée des écoulements sur les petits bassins versants aboutit à une diminution, évidente et considérable des apports des grands fleuves qui en sont les aboutissements.

### Constitution de l'échantillon de bassins versants de référence

Le choix des bassins versants à retenir doit respecter certaines contraintes scientifiques ou techniques évidentes:

- (a) couvrir une large gamme de superficies (1 000 à 100 000 km<sup>2</sup>).
- (b) être représentatif des pluviométries observées dans cette zone climatique au nord de l'isohyète 1000 mm.

Pratiquement l'échantillonnage se heurte à deux limitations:

- (1) Au-dessous de 400 mm de pluie la notion même de bassin versant perd tout sens physique car la dégradation hydrographique devient le caractère dominant.
- (2) Sous ces latitudes sahéliennes, quelle signification même accorder à la notion de pluviométrie moyenne annuelle, quand l'extension spatiale des événements pluvieux, qui forment le total pluviométrique annuel, reste notoirement inférieure à la maille des postes pluviométriques disponibles?

Au plan pratique, mieux vaut donc dénommer pluie moyenne annuelle  $P_m$ , une estimation par moyenne arithmétique des pluviométries ponctuelles observées aux postes disponibles, estimation qui sera considérée comme un "indice de pluviométrie".

C'est sur ces bases, aux prétentions réduites, qu'a été effectué le choix des bassins versants, choix résultant donc plus des données existantes et disponibles que d'une sélection réfléchie, basée sur des critères scientifiques de représentativité.

Les 8 bassins versants retenus peuvent être classés en deux groupes, selon leur complexité:

- . des bassins versants de taille relativement réduite, relativement homogènes et représentatifs d'une zone climatique déterminée, la zone sahélienne: il s'agit des bassins du Gorouol et du Dargol et du bassin du lac de Bam.
- . des bassins versants de taille supérieure, donc plus complexes, concernés tour à tour par des conditions climatiques sahéliennes et soudano-sahéliennes: il s'agit des grands bassins de la Volta Noire, de la Volta Blanche et de la Sirba.

En figure n°1 est rappelée la situation géographique de ces huit bassins versants qui s'étalent entre les 12° et 16° de longitude et appartiennent au bassin des Volta ou au bassin du Niger. La quasi totalité des 8 bassins est dominée par l'omniprésence du socle précambrien constitué essentiellement de granites, mais aussi de schistes et de grès. Des recouvrements de roches vertes métamorphiques birrimiennes donnent localement quelque vigueur au paysage. La dégradation hydrographique est générale: c'est le cas du bassin de Beli, affluent fossile du Gorouol, ou le bassin du Sourou qui sert de deffluent à la Volta Noire, ou encore des semi-endoréismes comme celui du lac de Bam appartenant au bassin de la Volta Blanche.

### Les résultats obtenus

Dans le but de caractériser l'hydraulicité annuelle de chacun des 8 bassins sélectionnés dans l'échantillon de référence, on a rassemblé, pour chaque bassin, les valeurs moyennes annuelles des principaux paramètres hydrologiques. Cela est fait pour la plus longue période

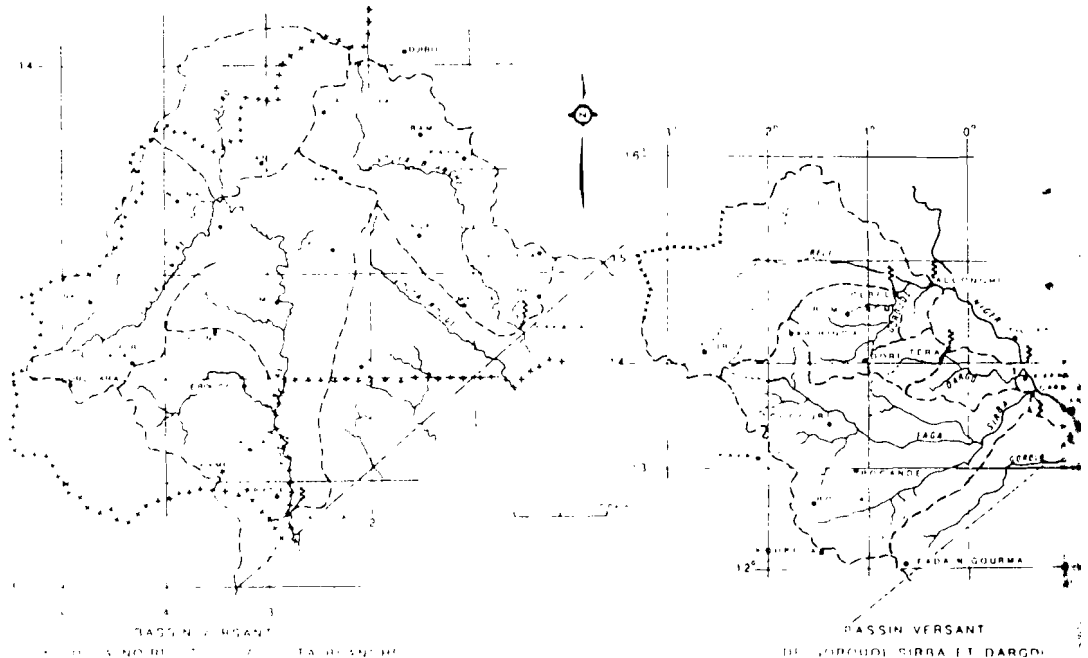


Figure 1

d'observation disponible (cette période fut d'ailleurs l'un des critères de sélection). Il est alors possible de calculer les moyennes interannuelles de ces paramètres hydrologiques, pour toute la période d'observation, ensuite pour la période "humide" allant jusqu'à 1969 inclus, enfin pour la période "sèche" qui débute en 1970.

Parmi les 8 bassins versants retenus, seule la Volta Noire à Dapola, et dans une autre mesure le lac de Bam, sont pérennes avec un étiage situé entre mars et mai. Néanmoins, une présentation en années calendaires, plus simple, a été préférée à celle en années hydrologiques qu'aurait justifiée pourtant l'utilisation d'un paramètre tel que le déficit d'écoulement.

Les tableaux 1 à 8 présentent les valeurs moyennes, annuelles et interannuelles, des principaux paramètres hydrologiques:

- Pm :pluviométrie moyenne sur le bassin, en mm
- Qe :débit écoulé moyen, ou module, à l'exutoire, en  $m^3s^{-1}$
- Re :lame écoulée moyenne rapportée au bassin, en mm
- Ke :coefficient d'écoulement =  $Re/Pm \times 100$ , en %
- De :déficit d'écoulement =  $Pm-Re$ , en mm

#### Interprétation des résultats et tentative d'explication

Malgré les imprécisions des valeurs contenues dans les tableaux 1 à 8 et les simplifications qui ont permis leur estimation, ces résultats

Tableau 1

GOROUOL. à DOLBEL

	Pm mm	Qm m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Re mm	Ke %	De mm
1961	619	13,6	57	9,2	562
1962	503	6,17	26	5,2	477
1963	637	8,63	36	5,7	601
1964	564	8,85	37	6,6	527
1965	652	6,77	28	4,3	624
1966	633	11,2	47	7,4	586
1967	470	8,98	38	8,1	432
1968	404	4,52	19	4,7	385
1969	538	10,8	45	8,4	493
Moyenne 1961-69	558	8,83	37	6,62	521
1970	390	7,26	30	7,7	360
1971	333	6,10	26	7,8	307
1972	373	5,70	24	6,4	349
1973	374	8,22	35	9,4	339
1974	435	7,70	32	7,4	403
1975	399	9,27	39	9,8	360
1976	495	7,12	30	6,1	465
1977	366	10,2	43	11,7	323
1978	499	11,4	48	9,6	451
Moyenne 1970-78	407	8,11	34	8,43	373
Moyenne 1961-78	483	8,47	35,6	7,52	447

Tableau 2

GOROUOL. à ALCONGUI

	Pm mm	Qm m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Re mm	Ke %	De mm
1961	655	17,2	12,1	1,85	643
1962	483	7,22	5,1	1,06	478
1963	643	9,54	6,7	1,04	636
1964	631	16,3	11,5	1,82	620
1965	659	8,39	5,9	0,89	653
1966	587	16,0	11,2	1,91	576
1967	480	12,7	8,9	1,85	471
1968	418	5,47	3,8	0,91	414
1969	535	14,4	10,1	1,89	525
Moyenne 1961-69	566	1,9	8,4	1,46	558
1970	402	8,63	6,1	1,52	396
1971	316	7,05	4,9	1,55	311
1972	371	4,89	3,4	0,92	368
1973	390	9,98	7,0	1,79	383
1974	451	9,85	6,9	1,53	444
1975	400	8,49	6,0	1,50	394
1976	472	6,90	4,9	1,04	467
1977	375	11,5	8,1	2,16	367
Moyenne 1970-77	397	8,4	5,4	1,50	391
Moyenne 1961-77	486	10,1	7,0	1,48	481

Tableau 3

## DARGOL à TERA

	Pm mm	Qm m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Re mm	Ke %	De mm
1961	727	5,46	63	8,7	664
1962	479	2,06	24	5,0	455
1963	601	3,31	38	6,3	563
1964	198	6,42	74	10,6	624
1965	545	1,92	22	4,0	543
1966	568	1,43	16	2,8	552
1967	518	3,37	39	7,5	479
1968	386	-----	----	---	---
1969	534	3,63	42	7,9	492
Moyenne 1961-69	584	3,45	39,8	6,7	544
1970	372	2,68	31	8,3	341
1971	371	2,46	28	7,5	343
1972	406	1,85	21	5,2	385
1973	412	2,75	32	7,8	380
1974	443	3,54	41	9,3	402
1975	361	2,58	30	8,3	331
1976	491	4,11	47	9,6	444
1977	411	4,16	48	11,7	363
1978	480	1,71	20	4,2	460
Moyenne 1970-78	416	2,87	33,1	8,0	383
Moyenne 1961-78	495	3,14	36,2	7,3	459

Tableau 4

## DARGOL à KAKASSI

	Pm mm	Qm m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Re mm	Ke %	De mm
1963	542	4,60	20,9	3,8	521
1964	669	12,6	57,2	8,6	660
1965	533	5,41	24,6	4,6	528
1966	499	1,93	8,8	1,8	497
1967	537	8,23	37,4	7,0	530
1968	373	1,00	4,5	1,2	372
1969	490	3,89	17,7	3,6	486
Moyenne 1963-69	520	5,38	24,4	4,6	515
1970	345	-----	---	---	---
1971	331	-----	---	---	---
1972	393	-----	---	---	---
1973	387	-----	---	---	---
1974	432	5,85	26,6	6,2	426
1975	332	4,69	21,3	6,4	326
1976	505	6,81	30,9	6,1	499
1977	408	8,41	38,2	9,4	399
1978	491	4,36	19,8	4,0	487
Moyenne 1970-78	434	6,00	27,4	6,4	428
Moyenne 1963-78	484	6,65	25,6	5,3	479

Variabilité spatiale et temporelle des bilans hydriques 453

Tableau 5 LAC DE BAM (BURKINA)

	Pm mm	Vm Mm <sup>3</sup>	Re mm	Ke %	De mm
1966	560	13,6	5,2	0,9	555
1967	543	14,7	5,7	1,0	537
1968	588	5,9	2,3	0,4	586
1969	598	15,6	6,0	1,0	592
Moyenne 1966-69	572	12,4	4,8	0,82	567
1970	451	8,3	3,2	0,7	448
1971	579	30,0	11,5	2,0	567
1972	498	15,0	5,8	1,2	492
1973	602	31,0	11,9	2,0	590
1974	698	100,0	34,5	4,9	663
1975	630	65,1	25,0	4,0	605
1976	586	25,1	9,7	1,7	576
Moyenne 1970-76	578	39,2	14,5	2,35	563
Moyenne 1966-76	576	29,5	11,0	1,80	565

Tableau 6 SIRBA à GARBE-KOUROU

	Pm mm	Qm m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Re mm	Ke %	De mm
1962	741	31,4	25,6	3,45	715
1963	720	6,7	5,5	0,76	714
1964	845	35,0	28,5	3,37	816
1965	805	41,0	33,4	4,15	772
1966	665	8,0	6,5	0,98	658
1967	666	44,7	36,4	5,47	630
1968	656	3,27	2,7	0,41	653
1969	654	19,1	15,5	2,37	638
Moyenne 1962-69	719	23,6	19,3	2,62	700
1970	502	11,5	8,4	1,67	494
1971	541	14,7	12,0	2,22	529
1972	549	6,03	4,9	0,89	544
1973	584	22,5	18,3	3,13	566
1974	673	32,4	26,4	3,92	647
1975	632	28,4	23,1	3,66	609
1976	703	12,8	10,4	1,48	693
1977	584	15,1	12,3	2,11	572
Moyenne 1970-77	596	17,9	14,5	2,38	581
Moyenne 1962-77	658	20,8	16,9	2,50	641

sont riches d'enseignements, dont le tableau 9 essaye de présenter une synthèse en faisant apparaître, aux cotes des moyennes interannuelles, sur toute la période d'observation, de Pm, Le, Ke et De, les rapports  $Pm_S/Pm_H$ ,  $Qe_S/Qe_H$  et  $Ke_S/Ke_H$  entre les deux moyennes de ces trois paramètres principaux pour la période sèche (S) d'après 1970, et pour la période humide (H) d'avant 1969.

Les figures 2 à 5 présentent dans deux cas extrêmes (la Volta Noire à Dapola et le Gorouol à Dargol) les variations de la lame

Tableau 7

## VOLTA NOIRE à DAPOLA (BURKINA)

Année	Pm mm	Qm m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Re mm	Ke %	De mm
1951	1127	216,0	71	6,4	1056
1952	1093	201,0	66	6,2	1027
1953	935	114,0	38	4,1	897
1954	999	149,0	49	5,0	950
1956	1001	161,0	53	5,4	948
1957	909	105,0	35	3,9	874
1958	981	124,0	41	4,2	940
1959	987	92,2	30	3,1	950
1960	960	77,0	25	3,3	765
1961	881	117,0	39	4,1	921
1962	979	96,8	32	3,7	849
1963	1014	129,0	43	4,4	936
1964	1007	196,0	65	6,5	949
1965	968	147,0	49	4,9	958
1966	916	139,0	46	4,8	922
1967	845	88,5	29	3,2	887
1968	1031	84,6	28	3,4	817
1969	927	108,0	36	3,5	995
		154	51	5,6	876
Moyenne 1961-69	966	132	44	4,51	922
1970	876	149,0	49	5,7	827
1971	799	120,0	40	5,0	759
1972	758	52,0	17	2,3	741
1973	684	47,0	16	2,3	668
1974	903	127,0	42	4,7	861
1975	802	74,8	25	3,1	777
1976	878	62,7	21	2,4	857
1977	761	74,8	25	3,3	736
1978	842	60,0	20	2,4	822
1979	924	95,4	31	3,5	893
1980	841	80,3	26	3,2	815
1981	800	65,7	22	2,8	778
1982	747	48,8	16	2,2	731
1983	650	31,7	10	1,6	640
Moyenne 1970-83	805	77,8	26	3,18	779
Moyenne 1961-83	898	109	36	3,94	862

écoulée Re et du coefficient d'écoulement Ke en fonction de la pluie moyenne Pm.

L'interprétation de ces résultats peut se faire à plusieurs niveaux, en considérant d'abord les résultats moyens obtenus sur toute la période d'observation, puis en comparant ceux obtenus pour chacune des deux périodes successives: humide puis sèche.

Analyse de la variabilité des paramètres hydrologiques qui concernent la totalité de la période d'observation Pm, Re, Ke et De

Il s'agit des moyennes interannuelles pour toute la période d'observation, rappelées dans le tableau n°9, de paramètres hydrologiques se rapportant à chacun des 8 bassins ou sous bassins.



Tableau 8

## VOLTA BLANCHE à YAKALA (BURKINA)

	Pm mm	Qm m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup>	Re mm	Ke %	De mm
1956	824	51,3	51	6,1	773
1957	756	30,1	30	3,9	726
1958	794	48,2	48	6,0	746
1959	741	47,4	47	6,3	694
1960	749	20,8	20	2,7	729
1961	853	53,2	52	6,1	801
1962	848	49,4	49	5,7	799
1963	729	21,2	21	2,9	708
1964	799	45,7	45	5,6	754
1965	801	23,7	23	2,9	778
1966	727	13,2	13	1,8	714
1967	722	41,4	41	5,7	681
1968	781	12,5	12	1,6	769
1969	766	33,6	33	4,3	733
Moyenne 1956-69	778	35,1	35	4,40	743
1970	610	30,5	30	4,9	580
1971	679	28,2	28	4,1	651
1972	687	17,5	17	2,5	670
1973	653	29,5	29	4,5	624
1974	795	51,9	51	6,4	744
1975	690	32,9	32	4,7	658
1976	751	15,1	15	2,0	736
1977	646	22,7	22	3,5	620
1978	740	11,6	11	1,5	729
1979	702	9,43	9	1,3	693
1980	708	28,8	28	4,0	680
1981	733	31,3	31	4,2	702
1982	620	14,3	14	2,3	606
1983	608	18,0	18	2,9	590
Moyenne 1970-83	687	24,4	24	3,49	663
Moyenne 1956-83	733	29,8	29,5	3,94	703

L'examen des pluviométries moyennes interannuelles Pm vérifie bien le classement des divers bassins selon leur position géographique et leur extension spatiale: les bassins de la Volta Noire, puis de la Volta Blanche, de la Sirba et du lac de Bam sont naturellement les plus arrosés, suivis du Dargol et du Gorouol plus septentrionaux. Mais l'étude détaillée des pluviométries annuelles dans les tableaux 1 à 8 montre bien une variabilité moindre à l'échelle d'un bassin versant que celle observée ponctuellement en une seule station; cela est d'autant plus évident que le bassin est de plus grande dimension et s'étend, du Nord au Sud, sur un champ plus vaste d'isohyètes.

L'Analyse des lames écoulées Re (ou des modules Qe) met en évidence les rôles simultanés et contradictoires de la superficie des bassins et de leur pluviométrie moyenne: à pluviométrie comparable la lame écoulee Re est plus importante sur le Dargol à Tera qu'à Kakassi, ou le bassin a doublé. La lame écoulee par la Sirba est moitié de celle de la Volta Blanche, les rapports de superficie et de pluviométrie jouant dans le même sens. Il faut néanmoins noter que cette analyse est rendue difficile, voire partiellement occultée, par les différences notables entre les dégradations hydrographiques des divers bassins.

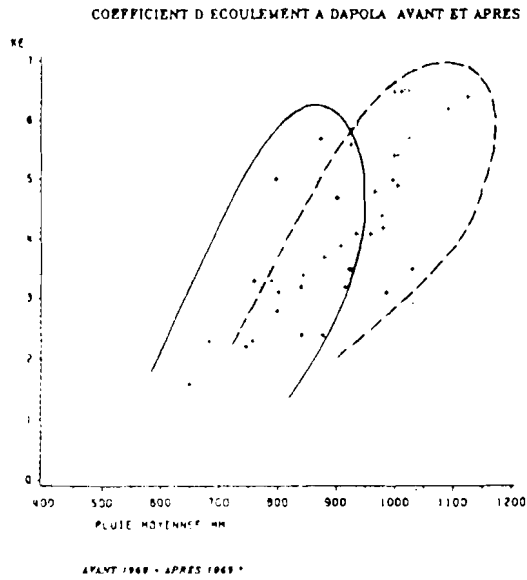


Figure 2

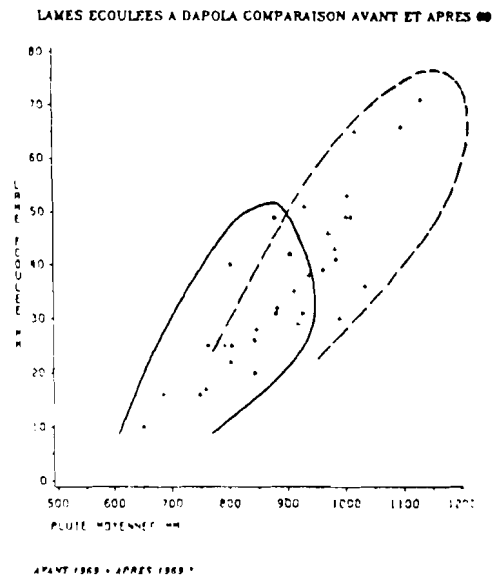


Figure 3

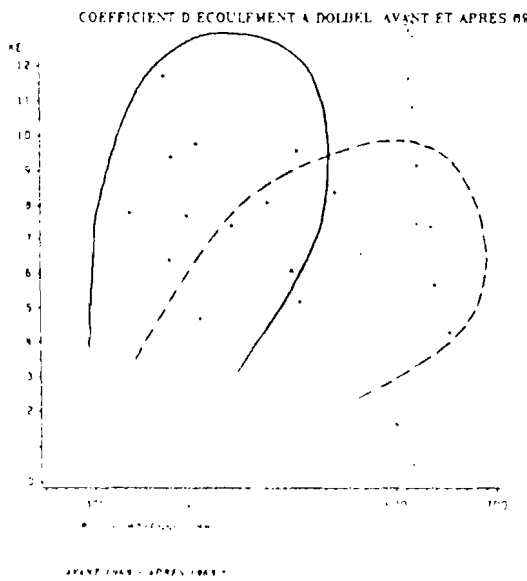


Figure 4

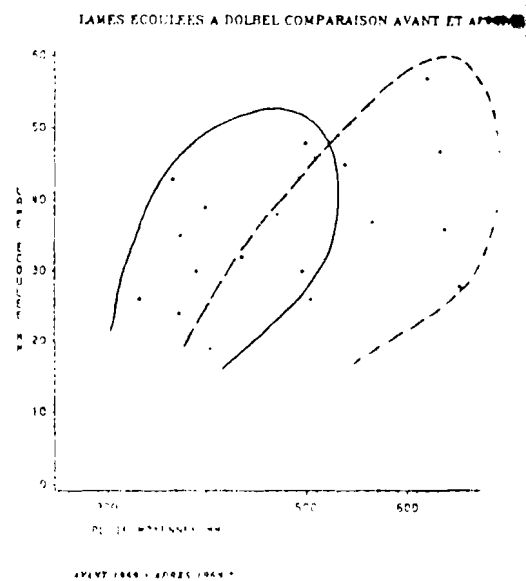


Figure 5

L'examen des déficits d'écoulement  $D_e$  est peu significatif dans ce contexte climatique, car au lieu d'être comme plus au sud représentatif de l'évapotranspiration réelle ou même potentielle, ce paramètre traduit ici en fait la part consommée de l'eau consommable par l'évaporation ou la transpiration végétale et est donc à ce titre davantage lié à la pluviométrie, que caractéristique du bassin en lui-même.

Tableau 9 Synthèse des paramètres hydrologiques

Bassin	Station	Période d'obs	Superf. km <sup>2</sup>	Pm mm	Re mm	Ke %	De mm	Pm <sub>S</sub> /Pm <sub>H</sub> %	Re <sub>S</sub> /Re <sub>H</sub> %	Ke <sub>S</sub> /Ke <sub>H</sub> %
Gorouol	Dolbel	1961-78	7500	483	35,6	7,52	447	73	92	127
Gorouol	Alcongou	1961-77	44850	486	7,0	1,48	481	70	71	102
Dargol	Tera	1961-78	2750	495	36,2	7,3	459	71	83	119
Dargol	Kakassi	1963-78	6940	484	25,6	5,3	479	83	112	139
Lac	de Bam	1966-76	2600	576	11,0	1,8	565	101	316	287
Sirba	Garbe-Kourou	1962-77	38750	658	16,9	2,50	641	83	76	91
Volta Noire	Dapola	1951-83	94000	898	36	3,94	862	83	59	71
Volta Blanche	Yakala	1956-83	32000	733	29,5	3,94	703	88	70	79

Analyse de la variabilité des paramètres hydrologiques qui permettent la comparaison entre la période sèche et la période humide:  $Pm_S/Pm_H$ ,  $Re_S/Re_H$  et  $Ke_S/Ke_H$

L'analyse de ces paramètres permet véritablement une analyse plus fine: en quoi la période sèche s'est-elle traduite par une modification de la variabilité des paramètres hydrologiques traditionnellement représentatifs de l'hydraulicité des bassins? Les trois coefficients réduits  $Pm_S/Pm_H$ ,  $Re_S/Re_H$  et  $Ke_S/Ke_H$  permettent une approche progressive de cette question:

Le rapport  $Pm_S/Pm_H$  est en lui-même déjà significatif: il montre que la période de sécheresse est en valeur relative plus sévère au nord de la zone sahélienne, pour des pluviométries plus faibles, qu'au sud à pluviométrie plus abondante.  $Pm_S/Pm_H$  passe de 70-75% pour le Gorouol et le Dargol à 80-90% pour les Volta Blanche et Noire et la Sirba. Il faut noter que les 100% du lac de Bam résultent du faible échantillonnage où une seule série exceptionnellement pluvieuse en août 1974 suffit à déséquilibrer l'échantillon des années disponibles.

L'analyse du rapport  $Re_S/Re_H$  est nettement inférieure à 100% pour la Volta Noire (59%), Blanche (70%), le Gorouol à Alcongou (71%) et la Sirba (76%). Dans les cas du Gorouol à Dolbel (92%) et du Dargol à Tera (83%), on se rapproche déjà des 100%, dépassés nettement par le Dargol à Kakassi (112%) et le lac de Bam. L'influence de la taille du bassin versant est bien sûr ici dominante et il apparaît déjà un seuil de superficie au-dessous duquel la sécheresse s'est traduite nettement par une augmentation des écoulements absolus.

L'interprétation des variations des coefficients d'écoulement est encore plus évidente, puisque le rapport  $Ke_S/Ke_H$  n'est inférieur à 100% que pour les seuls très grands bassins:

Volta Noire (71%) et Blanche (79%), Sirba (91%). Il devient supérieur à 100% dans tous les autres cas, y compris le Gorouol à Alcongou (102%), encore que dans ce cas la superficie active réelle ou la surestimation de la pluie moyenne sur le bassin pourraient conduire à réviser ce chiffre à la baisse. Mais il est clair que les rapports  $Ke_S/Ke_H$ , de tous les bassins de l'échantillon, de superficie inférieure à 10 000 km<sup>2</sup>, sont systématiquement et parfois très large-

ment supérieurs à 100%: 119 et 139% pour le Dargol à Tera et Kakassi, 127% pour le Gorouol à Dolbel, 287% pour le bassin du lac de Bam.

Ainsi est-il clairement mis en évidence que la sécheresse a certes réduit les écoulements et encore plus les coefficients d'écoulements des bassins de superficie supérieure à 10 ou 20 000 km<sup>2</sup>, mais agit de façon rigoureusement inverse pour les bassins de superficies inférieures. Cette gamme d'échelles de superficies de bassins versants, entre 1 000 et 100 000 km<sup>2</sup>, semble donc bien être celle où se situe un seuil de superficie, variable avec la nature des sols, la pluviométrie et la dégradation hydrographique, seuil qui différencie les comportements classiques et contradictoires des petits et des grands bassins versants, confrontés à une période de sécheresse.

#### Compléments statistiques dans quelques situations particulières

Une étude statistique comparative des modules des périodes humide et sèche successives ne peut être entreprise, par suite de la brièveté des échantillons, sauf dans les cas des Volta Blanche et Noire (Pouyaud, 1976), il est intéressant d'en rappeler ici les résultats:

Dans le cas de la Volta Noire à Dapola, le module médian passe de 124 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> pour la période 51-71 à 65 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (la moitié) pour la période 72-85. Cette tendance est accentuée si on passe à des occurrences plus rares puisque les modules décennaux secs estimés sur les mêmes périodes passent de 89 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> pour 1951-71 à 35 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (le tiers) pour 1972-85.

Il n'en va plus de même pour la Volta Blanche à Yakala, où le module médian de la période 1956-71 de 33 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> ne chute qu'à 21 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (les 2/3) pour la période 1972-85. Cette proportion est conservée pour les modules décennaux secs qui passent de 17 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> à 11 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> pour ces deux mêmes périodes.

Il se vérifie donc ainsi statistiquement que l'impact de la sécheresse sur l'hydraulicité des bassins décroît dans le même sens que les superficies, avant de s'inverser pour les petits bassins versants.

A l'échelle des petits bassins versants, le cas du lac de Bam, pour lequel existe à la fois une chronique des assèchements et des déversements et des relevés pluviométriques depuis 1927, est très instructif; on sait en effet (Pouyaud, 1976) que les déversements succèdent systématiquement aux périodes sèches, conclues par des assèchements. Ainsi est bien vérifiée, sur une très longue période, l'influence positive sur l'accroissement des coefficients de ruissellement des périodes sèches accompagnées de désertification.

#### Essai de synthèse explicative

Les constatations convergentes des paragraphes précédents permettent une synthèse explicative, fondée sur l'originalité de la géomorphologie et surtout du contexte climatique des bassins versants présentés:

Les coefficients de ruissellement élevés des têtes de bassin, avant dégradation hydrographique, s'expliquent aisément par leur géomorphologie et la nature de leurs états de surface. Sur ces bassins, de quelques dizaines à quelques centaines de km<sup>2</sup>,

l'essentiel de l'écoulement provient du ruissellement pur ou légèrement différé. L'absence généralisée de nappes significatives, estant parce que la géomorphologie ne s'y prête guère que parce que les crues passent trop vite pour permettre une infiltration notable, ne permet presque jamais à un écoulement de base de soutenir ces ruissellements dominants. Dans ces conditions l'existence d'un paroxysme sec prolonge exacerbé les capacités de ruissellement, sans qu'une diminution des apports souterrains, de toutes façons insignifiants, n'entrave cette augmentation des écoulements globaux.

Puis avec l'augmentation des superficies et l'appaïetion de la dégradation hydrographique, les apports provenant des têtes de bassin atteignent les vastes zones d'épandage. En années humides, les pertes par évaporation s'y exercent certes largement et longuement, mais sont équilibrées par les infiltrations, d'autant plus importantes que les écoulements sont plus prolongés, sans être nécessairement plus intenses. Dans l'écoulement global, la part des débits de base devient appréciable, voire prépondérante. En période sèche par contre, l'évaporation continue certes à s'exercer sur les épandages, mais ceux-ci ne durent pas assez longtemps pour qu'une infiltration soutenue ait le temps de s'installer et de réalimenter les nappes, qui, au fil des années déficitaires, s'épuisent. Les écoulements ne sont plus alors constitués que de la seule part du ruissellement pur, peu à peu consommée par l'évaporation et l'évapotranspiration, sans être relayée par celle des apports de drainage des nappes. Ce comportement singulier peut s'illustrer par le comportement de la Volta Noire en étiage (Albergel, 1984) qui en 1958-59 passait d'un module de  $308 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  en septembre à un module de  $34.8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  en février; en 1980-81 elle passait au contraire de  $435 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  en septembre à seulement  $3.05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  en février.

#### Conclusion et prospective

L'échantillon des 8 bassins versants traités semble donc montrer, en s'appuyant sur une analyse simple de la variabilité, avant et pendant la période de sécheresse, des principaux paramètres hydrologiques élémentaires, l'influence contrastée de cette évolution climatique sur le comportement hydrologique des bassins versants, selon leur extension spatiale. Cette intervention de l'échelle spatiale est évidemment concomitante de celle de l'échelle temporelle, puisque c'est bien la durée, liée à la superficie, des écoulements de surface et de leurs épandages, soumis à l'évaporation ou alimentant les nappes, qui détermine en définitive l'influence positive ou négative de la sécheresse et de ses corollaires sur le bilan global de l'écoulement. Ainsi s'entrouvre de fait une autre direction de recherche, qui peut constituer un lien élégant entre les deux échelles spatiale et temporelle et voit converger les approches des hydrologues, des climatologues et même des dynamiciens de l'atmosphère: elle concerne l'analyse du bilan global hydrologique de bassins versants de superficies croissantes et particulièrement la part atmosphérique de ce bilan. En effet à l'échelle annuelle ou interannuelle, si l'on estime que s'équilibrent bon an, mal an les pertes par infiltration et le drainage des nappes, on peut toujours écrire que les volumes d'eau qui s'écoulent à l'exutoire du bassin

égalent les variations du stock d'eau atmosphérique qui transitent au-dessus du bassin versant. Autrement formulé, cela signifie que le coefficient d'écoulement (rapport du volume écoulé à l'exutoire au volume précipité) égale le rapport entre le volume de vapeur d'eau incidente et le volume précipité, ou encore est le complément à 1 du taux d'autorecyclage des pluies sur le bassin.

Ainsi qu'avancé précédemment, la signification de cette représentation évolue avec l'échelle spatiale du bassin versant et l'échelle temporelle des écoulements qui s'y produisent. Faute d'approfondissements théoriques et méthodologiques suffisants et compte tenu du petit nombre de résultats de ce type disponibles, cette direction d'étude reste pour l'instant embryonnaire; pourtant une connaissance plus précise des bilans hydrologiques de bassins de surfaces intermédiaires sur de longues périodes serait une étape indispensable dans la compréhension des mécanismes qui relie l'écoulement des petits bassins versants à celui des grands et des très grands bassins versants qu'ils contribuent à former.

#### Références

- Albergel, J., Carbonnel, J.P., Grouzis, M. (1984) Péjoration climatique au Burkina Faso. Incidence sur les ressources en eau et sur les productions végétales. Cah. Orstom, Sér. Hydrol. Vol. XXI n°1, 3-19.
- Billon, B. (1985) Le Niger à Niamey. Décrue et étiage 1985 Cah. Orstom, sér. Hydrol. Vol. XXI n°4, 3-22.
- Carbonnel, J.P., Hubert, P. (1985) Sur la sécheresse au Sahel d'Afrique de l'Ouest. Une rupture climatique dans les séries pluviométriques du Burkina Faso (ex Haute Volta); C.R. Acad. Sc. série Hydrologie Vol VII, tome 301 n°13, 941-944.
- Olivry, J.C. (1983) Le point en 1982 sur la sécheresse en Sénégambie et aux îles du Cap Vert. Examen de quelques séries de longue durée (débits et précipitations) Cah. Orstom, sér. Hydrol. Vol XX, n°1, 47-69.
- Pouyaud, B. (1986) Contribution à l'évaporation de nappes d'eau libre en climat tropical sec, collection Etude et Thèse, Orstom.
- Pouyaud, B. (1985) L'évaporation, composante majeure du cycle hydrologique. Séminaire Climat et Développement, 15-16 Oct. 85. Collection colloque et séminaire Orstom, 130-139.
- Pouyaud, B. (1986) Estimation des apports annuels et des étiages, avant et après la récente phase de sécheresse de la Volta Noire et de la Volta Blanche. Colloque de Ouagadougou sur les normes hydrologiques. Cieh-Ouagadougou.
- Sircoulon, J. (1986) Bilan hydropluviométrique de la sécheresse 1968-84 au Sahel et comparaison avec les sécheresses des années 1910 à 1916 et 1940 à 1949 in: Colloque Nordeste Sahel. Institut des Hautes études d'Amérique Latine, Paris. 16 au 18 janvier 1986.
- Sircoulon, J. (1985) La sécheresse en Afrique de l'Ouest. Comparaison des années 1982-1984 avec les années 1972-1973. Cah. Orstom, sér. Hydrol. Vol n°4, 75-86.

Kidjers, T.A.B. (1983) Interstation correlations and non stationarity of Burkina Faso rainfall. Journal of climate and applied meteorology, Vol.25,524-531.