

L'HYDROLOGIE DES REGIONS SAHELIENNES ET LA SECHERESSE 1968-1973

Au moment où la période de sécheresse désastreuse 1968-1973 ⁽¹⁾ semble prendre fin, et où l'on peut donc faire le bilan, il est urgent :

- de procéder à l'inventaire des ressources en eau du SAHEL,
- d'analyser les caractères des périodes sèches de ce genre,
- de rechercher les moyens de remédier aux conséquences de telles catastrophes naturelles.

Seules les deux premières parties de ce programme concernent directement l'hydrologue. Pour les projets d'aménagement et la politique d'utilisation des eaux qui suivent ces études hydrologiques, il ne peut qu'assister les ingénieurs et les planificateurs. La présente étude se limitera à un domaine encore plus restreint, celui de l'hydrologie de surface. Il est d'ailleurs suffisamment vaste, comme on le verra ci-après. On considérera à la fois le régime subdésertique, qui concerne les régions recevant en moyenne entre 100 et 300 mm de pluie par an, et le régime sahélien dont les limites sont fixées par les courbes de précipitations annuelles 300 mm et 750 mm, la limite sud étant un peu arbitraire. A part certaines variantes dues à l'altitude, principalement dans le Djebel Marra, ou à la proximité du littoral de l'Océan Atlantique, ces régimes présentent des caractéristiques analogues depuis Dakar et Nouakchott jusqu'à l'Est du Nil.

Les ressources en eau superficielle sont constituées par les cours d'eau qui sont nés dans le Sahel et les grands fleuves qui viennent du Sud, c'est-à-dire des régions tropicales, ou même équatoriales, humides : Nil, Chari, Niger et Sénégal, et qui jouent un rôle capital dans l'économie de ces régions.

On examinera quelques traits essentiels du régime des pluies, puis les données les plus importantes concernant les cours d'eau sahéliens depuis les petits ouadi susceptibles d'alimenter un barrage, jusqu'aux quelques grands cours d'eau drainant, à leur manière, des superficies de plus de 10 000 km². A cette occasion, l'étude statistique des volumes annuels nous amènera naturellement à l'analyse des grandes périodes de sécheresse.

(1) - En fait, la période déficitaire a réellement commencé vers 1965 dans certaines régions.

QUELQUES ELEMENTS SUR LE REGIME PLUVIOMETRIQUE DU SAHEL

Le régime d'un cours d'eau en Afrique est déterminé principalement :

- 1) par la quantité annuelle de pluie que reçoit son bassin versant, la répartition au cours de l'année de ses averses et leur intensité ;
- 2) par les caractéristiques du bassin versant lui-même : relief, nature du sol, et parfois du sous-sol, réseau hydrographique, couverture végétale et utilisation des sols.

L'influence de la température sur le régime hydrologique est à peu près la même dans toute la zone sahélienne, sauf pour les massifs montagneux pour lesquels l'altitude conduit à un régime climatique plus tempéré, donc à une baisse de l'intensité de l'évaporation, mais ceci n'est guère sensible qu'à partir de 800 - 1 000 mètres d'altitude.

En zone sahélienne, la superficie cultivée n'occupe pas une partie très importante du sol, cependant, dans certaines vallées mises en valeur systématiquement, le ruissellement superficiel a augmenté de façon très importante depuis le remplacement de la couverture végétale naturelle par des cultures.

Elles résultent essentiellement de l'interaction de deux masses d'air :

— l'air tropical continental, masse d'air chaude et sèche venant de l'Est ou du Nord-Est, il est souvent désigné par le terme « harmattan » ;

— l'air équatorial maritime, originaire de l'anticyclone de Sainte-Hélène ; il vient du Sud-Ouest et est communément désigné sous le nom de « mousson ».

En outre l'alizé boréal maritime provenant de l'anticyclone des Açores a une influence importante dans le régime des déplacements des masses d'air à l'ouest de la Mauritanie et du Sénégal et, par ailleurs, des perturbations correspondant à des mécanismes de circulation typiquement sahariens se produisent quelquefois au printemps, au Nord de la zone qui nous intéresse, mais à l'échelle où on considère ici les régimes sahéliens, ce sont là des phénomènes dont l'influence sur l'écoulement des cours d'eau est négligeable.

Les deux masses d'air principales se déplacent au cours de l'année :

— En janvier, l'anticyclone saharien occupe une position méridionale, l'harmattan souffle en permanence du Nord-Est ou du Nord.

— En juillet-août, l'anticyclone saharien a fait place à la dépression saharienne et l'anticyclone de Sainte-Hélène est remonté vers le Nord, la mousson envahit les régions sahéliennes.

Le contact entre les deux masses d'air s'appelle le front intertropical ou F.I.T., la mousson jouant le rôle de masse froide par rapport à l'harmattan ; elle s'enfonce comme un coin sous cette masse d'air sèche. La trace au sol du F.I.T. est légèrement inclinée sur les parallèles. Le mouvement de bascule annuel évoqué plus haut entre les deux masses d'air entraîne un déplacement du front intertropical et de sa trace au sol. Celle-ci est en janvier vers le tiers Sud de la Côte-d'Ivoire, la ville de Yaoundé au Cameroun et le centre de la grande forêt inondée qui couvre la moitié Nord du Congo. A partir de février-mars, le F.I.T. remonte lentement vers le Nord et sa trace au sol arrive en août vers le Vingtième Parallèle, avec, de temps en temps, quelques incursions vers le Nord. Au début de septembre, il redescend vers le Sud pour rejoindre la position qu'il occupait en janvier.

Généralités

Facteurs principaux déterminant le régime des précipitations

Au contact des deux masses d'air, et plus au Sud dans la masse d'air de la mousson, il se produit des formations orageuses qui donnent lieu, dans certaines conditions, à des précipitations. L'arrivée de la mousson au Sahel est donc suivie d'averses qui se reproduisent plus ou moins régulièrement jusqu'à son retrait vers le Sud. C'est la saison des pluies, qui dure plus ou moins longtemps suivant la durée de la période qui s'écoule entre le passage du F.I.T. vers le Nord et son retrait vers le Sud, donc suivant la latitude. En première approximation, plus la saison des pluies dure longtemps, plus la hauteur de précipitations annuelles est élevée.

Elles sont irrégulières dans l'espace et dans le temps, c'est pourquoi il est assez difficile de déterminer avec précision leur valeur moyenne en un point ; il faudrait pour cela qu'elles aient été observées avec soin pendant au moins cent ans. La comparaison des résultats de stations voisines permet de remédier, dans une certaine mesure, à la brièveté des périodes d'observations. On trouvera ci-après la carte des précipitations annuelles (graphique n° 1) en zones désertiques et subdésertiques. Cette carte tient compte des observations faites durant la dernière période de sécheresse. Les lignes d'égales précipitations annuelles sont grosso modo légèrement inclinées sur les parallèles, la direction étant la même que celle de la trace au sol du F.I.T. avec un certain nombre d'irrégularités dues au relief ou à l'influence de zones marécageuses de grande dimension, comme le delta central du Niger. Si on considérait le régime des averses à très grande échelle (au 1/20 000 ou 1/50 000) par exemple, on trouverait un grand nombre d'irrégularités correspondant à l'influence d'une colline ou d'un lac ; la carte correspond à une simplification de la répartition réelle des pluies.

Précipitations annuelles

Comme on l'a vu plus haut, à part quelques averses de printemps (mars à mai) observées parfois dans les régions subdésertiques, les pluies se produisent au passage de la mousson, pendant une durée fonction de la latitude. En régime subdésertique, la saison des pluies dure essentiellement du début de la mi-juillet à la fin août, début septembre.

Répartition saisonnière des précipitations

En régime sahélien, vers la limite-Sud, elle dure de début juin à début octobre. Il y a parfois quelques averses en mai. La partie de la saison des pluies où les averses se reproduisent assez fréquemment dure du 10 juillet au 15-20 septembre.

Le graphique n° 2 présente les variations des hauteurs mensuelles moyennes à quatre stations caractéristiques. On notera que, pour les mois de saison sèche, les moyennes représentent fort mal les faits ; il suffit d'une année sur cinq pour laquelle le mois de juin a été humide pour donner lieu à une moyenne non négligeable, alors que pour les quatre autres années, le même mois a été rigoureusement sec.

On peut dire qu'en régime subdésertique la saison sèche dure au moins dix mois, et qu'en régime sahélien, elle dure à peu près neuf mois, un peu moins vers le Sud. Cette saison sèche ne comporte, en général, absolument aucune averse.

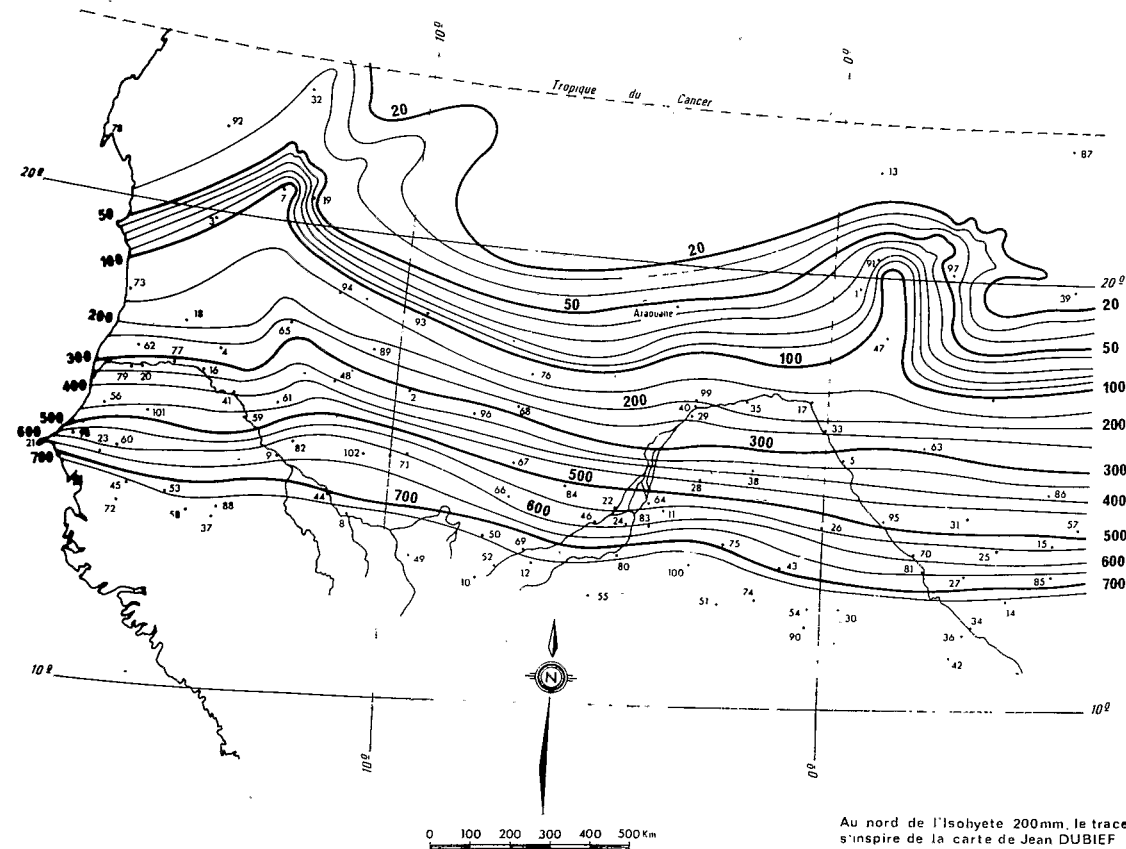
Les précipitations annuelles varient beaucoup d'une année à l'autre. On les représente commodément par des diagrammes, tels que le graphique n° 3, avec une échelle gaussique pour leurs fréquences et une échelle logarithmique pour la hauteur correspondante. Au lieu des fréquences, on a reporté leurs inverses, la période de retour, pour les années sèches ou humides.

Irrégularité interannuelle des précipitations

Hauturs de précipitations annuelles au SAHEL

(Valeurs médianes en mm)

LEGENDE



1	Aguelok	52	Koulikoro
2	Aloun-El-Atrous	53	Koungheul
3	Ak'è	54	Koupela
4	Aleç	55	Koutiala
5	Ansongo	56	Louga
6	Araouane	57	Madaoua
7	Atar	58	Maka
8	Bafoulabe	59	Matam
9	Bakel	60	M'Bake
10	Bamako	61	Mbout
11	Bandiagara	62	Mederdra
12	Baroueli	63	Menaka
13	Bidon	64	Moïti
14	Birni N'Keobi	65	Moudjeria
15	Birni N'Koni	66	Hourdiah
16	Bokhe	67	Nara
17	Bouren	68	Nema
18	Houtilimit	69	Niamina
19	Thinguetti	70	Niamey
20	Jagana	71	Nioro
21	Dakar	72	Nioro-Du-Rip
22	Dia	73	Nouakchott
23	Diourbel	74	Ouagadougou
24	Diègne	75	Ouahigouya
25	Dogondoutou	76	Qualata
26	Dori	77	Podor
27	Dosso	78	Port-Etienne
28	Douentza	79	Rosso
29	El-Oualadi	80	San
30	Fada-N'gourma	81	Say
31	Pilingue	82	Selibaby
32	Fort-Gouraud	83	Sofara
33	Iao	84	Sokolo
34	Jaya	85	Sokoto
35	Jourma Rharous	86	Tahoua
36	Juene	87	Tamanrasset
37	Juonoto	88	Tambacounda
38	Kombori	89	Tamchakett
39	In Mezzam	90	Tenkodogo
40	Kabara	91	Tessalit
41	Kaedi	92	Tichela
42	Kandi	93	Tichitt
43	Kaya	94	Tidjikja
44	Kayes	95	Tillabery
45	Kafrine	96	Timbedra
46	Ke Macena	97	Tin Zaouaten
47	Kidal	98	Tivaouane
48	Kiffa	99	Tomboutou
49	Kita	100	Tougan
50	Kolokani	101	Yang-Yang
51	Koudougou	102	Yelimane

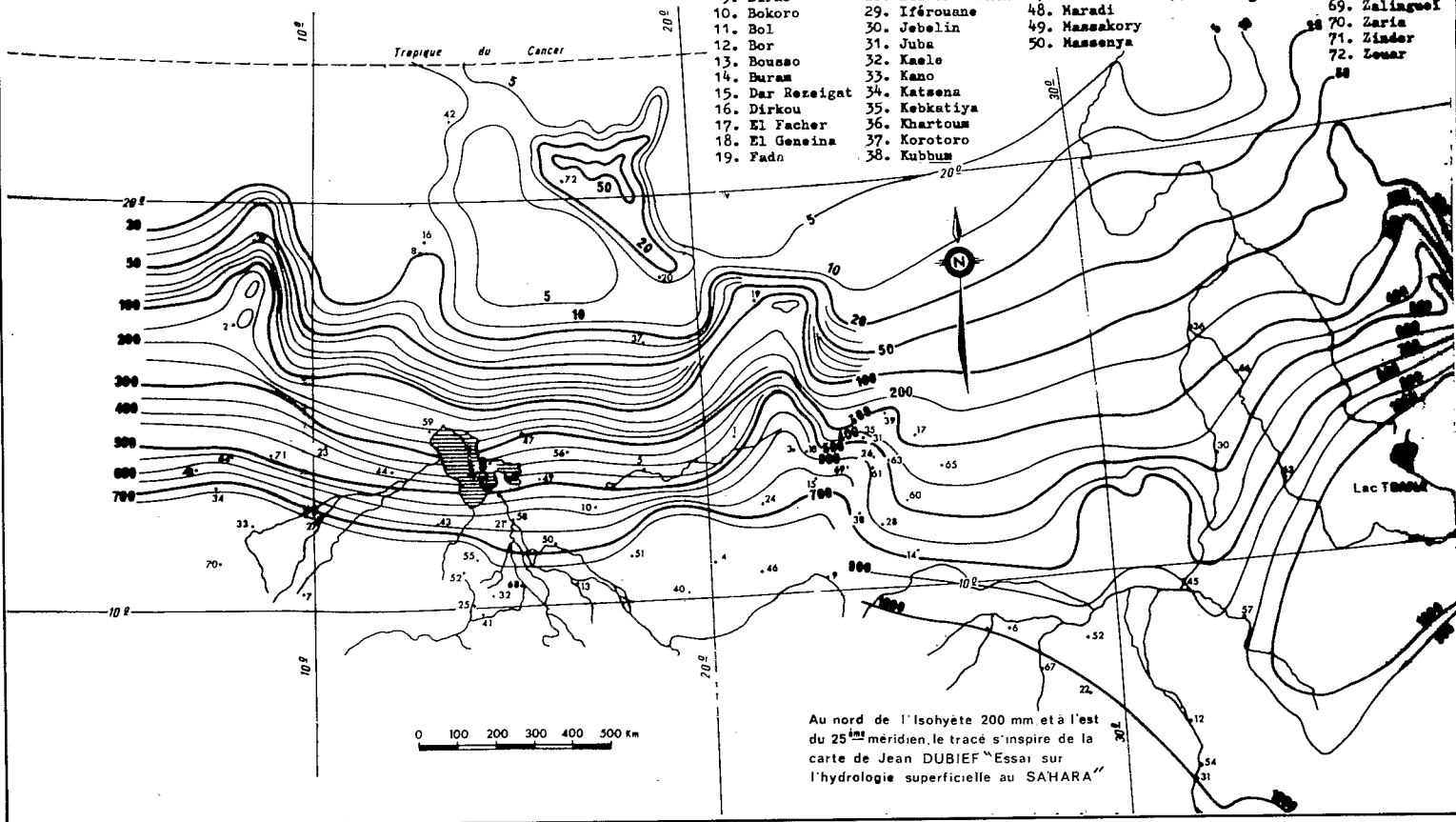
Au nord de l'isohyete 200mm, le trace s'inspire de la carte de Jean DUBIEF

Gr. 1^{bis}

Hauteurs de précipitations annuelles au SAHEL

(Valeurs médianes en mm)

- | | | | | |
|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|----------------|
| 1. Abéché | 20. Faya Largeau. | 39. Kutum | 51. Melfi | 60. Myala |
| 2. Agades | 21. Fort Fourreau | 40. Kyabe | 52. Nankara er Req | 61. Myertetef |
| 3. Adre | 22. Gel | 41. Lere | 53. Mokolo | 62. Roseires |
| 4. Am-Timan | 23. Gouré | 42. Madama | 54. Mongalla | 63. Sani |
| 5. Ati | 24. Goz Beida | 43. Maidougari | 55. Mora | 64. Tassouba |
| 6. Aweil | 25. Gaidder | 44. Mainé-Soroa | 56. Mousoro | 65. Vada'a |
| 7. Bauchi | 26. Gulde | 45. Malakal | 57. Naaser | 66. Vad Nédani |
| 8. Bilaa | 27. Hadedja | 46. Manguaigne | 58. Nadjamena | 67. Wan |
| 9. Birao | 28. Idd-er-Ghaneni | 47. Hao | 59. N'Guigni | 68. Yagou |
| 10. Bokoro | 29. Iférouane | 48. Haradi | | 69. Zaliaguel |
| 11. Bol | 30. Jebelin | 49. Massakory | | 70. Zaria |
| 12. Bor | 31. Juba | 50. Massenya | | 71. Zinder |
| 13. Bousseo | 32. Kaele | | | 72. Zouar |
| 14. Buram | 33. Kano | | | |
| 15. Dar Rezeigt | 34. Katsena | | | |
| 16. Dirkou | 35. Kebkatiya | | | |
| 17. El Facher | 36. Khartoum | | | |
| 18. El Geneina | 37. Korotoro | | | |
| 19. Fada | 38. Kubbum | | | |

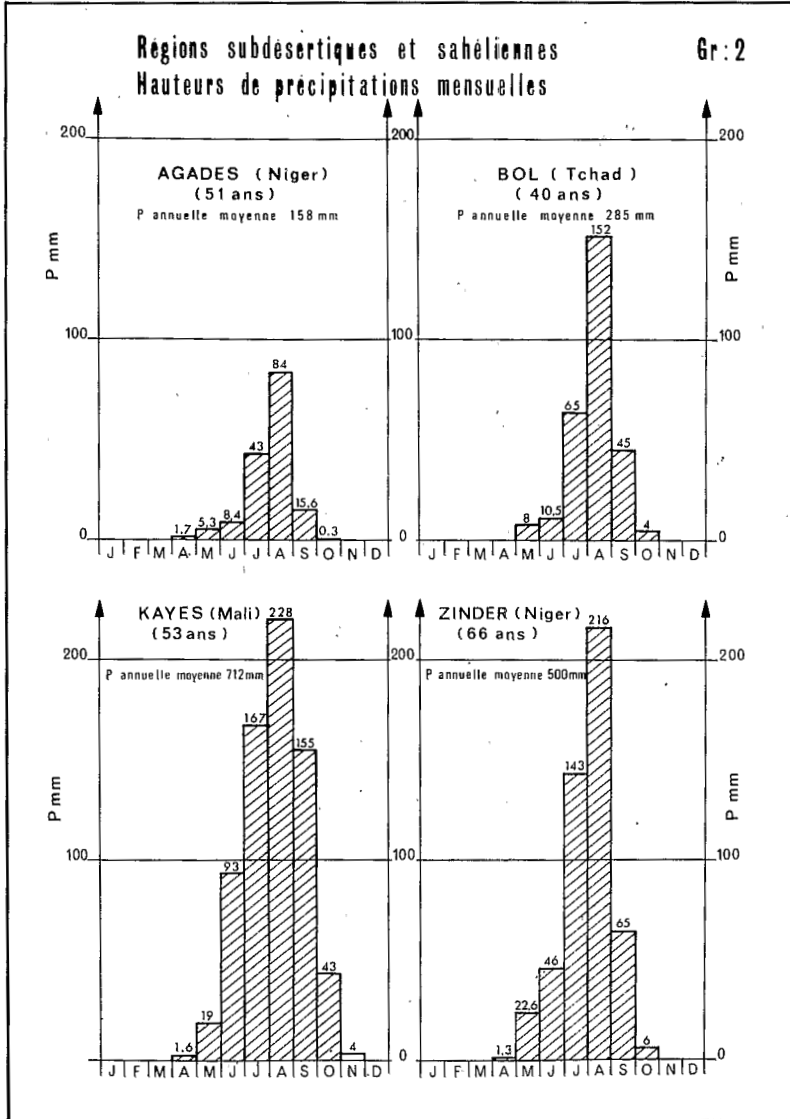


0 100 200 300 400 500 km

Au nord de l'isohyète 200 mm et à l'est du 25^{ème} méridien, le tracé s'inspire de la carte de Jean DUBIEF "Essai sur l'hydrologie superficielle au SAHARA"

Le diagramme 3 a été établi en utilisant à la fois l'ensemble des résultats des stations présentant la même hauteur de précipitation annuelle. L'étude statistique directe des relevés de stations prises une par une n'aurait pas permis d'atteindre avec suffisamment de sûreté les valeurs des précipitations déficitaires qui se reproduisent tous les cent ans, par exemple.

Le réseau de courbes représentées à la figure 3 correspond à des conditions moyennes, et certaines stations correspondant à une situation particulière peuvent avoir une courbe de distribution statistique différente de celle de la courbe du diagramme 3 correspondant à la même valeur médiane de la hauteur de précipitations. Par exemple, il semble que toutes les stations du delta central du Niger présentent en année exceptionnellement sèche des hauteurs de précipitations très supérieures à celles de la moyenne des stations du Sahel recevant en



année médiane la même hauteur de précipitations. D'autres stations, au contraire, paraissent plus éprouvées par la sécheresse.

Pour les calculs sur ordinateur, le réseau de courbes du diagramme 3 a été mis en équation :

Soit F la fréquence au dépassement :

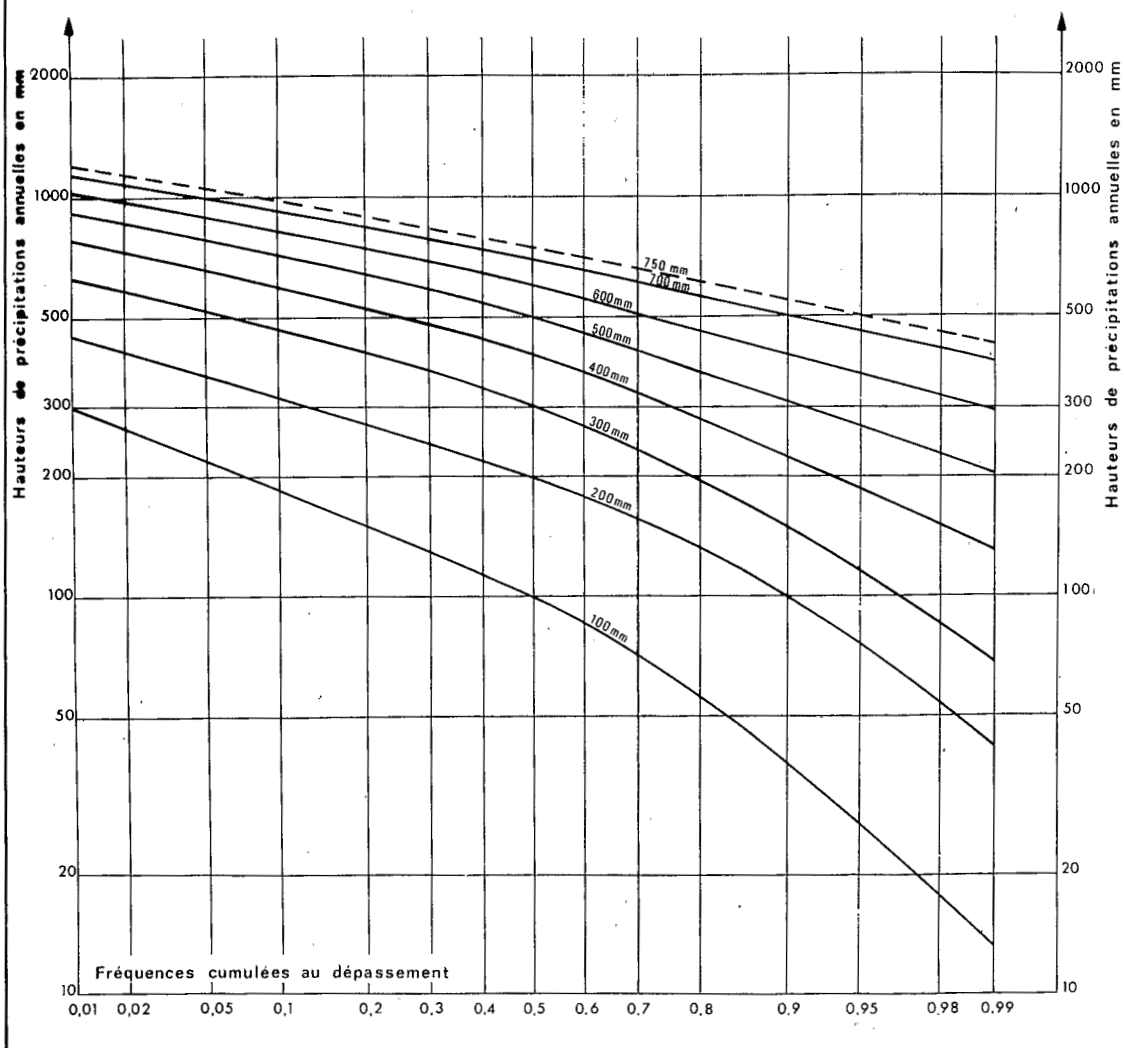
$$F = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x - x_0}{s} \right)^{\frac{1}{d}} \right]$$

$$\frac{1}{d} = x_0 = 7,6 \times 10^{-4} PM^2 - 52,4 \quad S = (PM - x_0) \quad 1,1579$$

PM = valeur médiane de la précipitation annuelle

Distribution statistique temporelle en zone sahélienne

Gr: 3



On trouvera ci-après quelques valeurs de x_0 et s

PM	300 mm	400 mm	500 mm	600 mm	700 mm
x_0	16,0	69,2	137,6	221,2	320,0
s	328,8	383,0	419,6	438,6	440,0

Dans la représentation que nous avons choisie, les courbes plongent très sensiblement vers la droite, d'où des valeurs très faibles pour les précipitations exceptionnellement sèches :

Pour une station en régime subdésertique qui reçoit 250 mm/an (année médiane), la hauteur de précipitation décennale sèche $P_{0,9}$ est de 125 mm, et la hauteur centennale sèche $P_{0,99}$ de 54 mm.

Pour une station en régime sahélien recevant 500 mm en année médiane, les valeurs correspondantes sont respectivement de 310 mm et de 200 mm.

Pendant la sécheresse récente, presque tous les postes pluviométriques du Sahel ont présenté au moins une valeur et souvent plusieurs dont les fréquences étaient comprises entre les fréquences décennale et centennale sèches, certaines régions telles l'ouest de la Mauritanie et du Sénégal étant particulièrement éprouvées, d'autres régions ont été relativement épargnées, avec un déficit désastreux, mais beaucoup moins sévère.

Les valeurs exceptionnellement humides sont élevées. Pour la même station recevant 250 mm en année médiane, les hauteurs de précipitations décennale et centennale humides $P_{0,1}$ et $P_{0,01}$ sont de 385 mm et de 540 mm. En région sahélienne pour une station recevant 500 mm $P_{0,1}$ et $P_{0,01}$ sont respectivement de 720 mm et 910 mm. Certaines stations du Sahel ont reçu des précipitations voisines de $P_{0,01}$ en 1961.

Les rapports entre $P_{0,1}$ et $P_{0,9}$ ou $P_{0,01}$ et $P_{0,99}$ donnent une idée de l'irrégularité interannuelle.

$$\text{Pour l'isohyète 250 mm } \frac{P_{0,1}}{P_{0,9}} = 3,08 \quad \frac{P_{0,01}}{P_{0,99}} = 10$$

$$\text{Pour l'isohyète 500 mm } \frac{P_{0,1}}{P_{0,9}} = 2,32 \quad \frac{P_{0,01}}{P_{0,99}} = 4,55$$

En plus de la répartition statistique des précipitations annuelles, il est utile d'examiner quelle est la succession des années, en particulier d'analyser les séries d'années sèches ou humides. Un premier problème est à résoudre : le déficit pluviométrique observé une année a-t-il une influence sur la plus ou moins grande abondance des précipitations l'année suivante ? C'est ce qu'on appelle le problème de la persistance.

Après les travaux de Y. Brunet-Moret, on peut répondre par l'affirmative. Il est difficile, pour ce genre d'étude, d'utiliser des séries naturelles de relevés pluviométriques, il serait nécessaire que ces séries :

- soient continues,
- soient homogènes, c'est-à-dire que pendant toute la période d'observation, il n'y ait pas de cause d'erreur systématique (un simple changement d'emplacement peut suffire),
- comprennent, à la fois les sécheresses 1913, 1940-1945 et 1970-1973,
- soient représentatives de la situation générale pour chacune de ces périodes.

Il y a extrêmement peu de stations de ce genre, elles sont situées sur le littoral atlantique où le régime des précipitations présente un caracté-

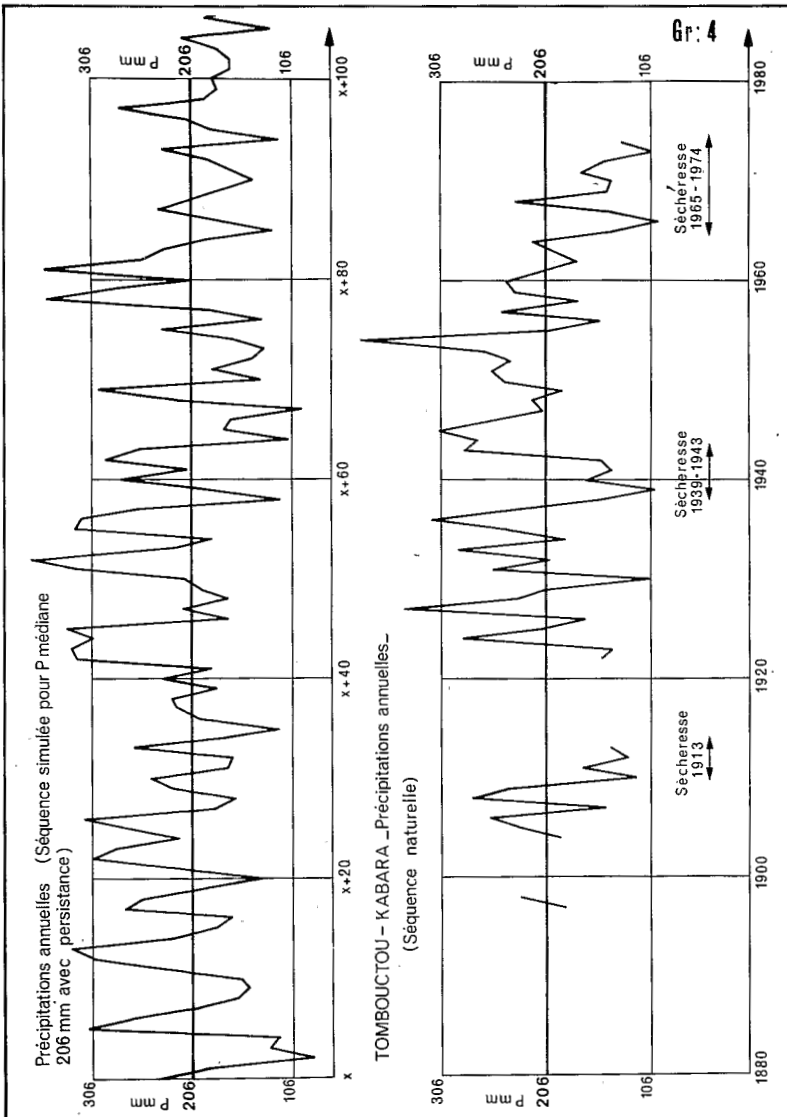
Etudes des séquences des précipitations annuelles

tère particulier. En plus, une durée d'observations de 70 ou 80 ans est courte pour l'étude des différentes combinaisons d'années sèches et humides qu'il peut être utile d'étudier. On préfère donc reconstituer des séries plus longues par une opération comportant un tirage au sort, mais en respectant les conditions de persistance, la distribution statistique des différentes valeurs de précipitations annuelles de la série restant la même que celle du graphique 3. L'équation générale donnant la hauteur de précipitation d'une année $i + 1$ par rapport à l'année précédente i est la suivante :

$$x_{i+1} = z_{i+1} + Ax_i$$

z est une variable aléatoire et A le coefficient de persistance. On a trouvé A voisin de 0,2 pour les régions sahéliennes d'Afrique.

On reconstitue ainsi des séries de 300 ans. On a représenté sur le graphique 4 la série naturelle à la station de Tombouctou-Kabara



de 1897 à 1974 et une partie d'une série de 300 ans reconstituée. Pour une hauteur de précipitation annuelle voisine de 500 mm en moyenne, on retrouve bien les successions d'années sèches et humides sur la période reconstituée. On en trouve même de plus sévères que celle de 1971-1973, ce qui est bien conforme à ce qu'enseignent à la fois les études géomorphologiques et les traditions orales.

Leur étude présente un grand intérêt car le régime hydrologique d'un cours d'eau en zone sahélienne résulte de série de crues de courte durée résultant d'averses journalières et la seule façon de calculer les débits de ces cours d'eau à partir des hauteurs de précipitations pour ce régime consiste à partir de ces averses. Elles doivent être également bien connues pour calculer les crues.

Les deux caractéristiques les plus utiles à connaître pour le calcul des ouvrages sont le volume d'écoulement annuel et la crue de probabilité donnée (décennale, centennale ou millénaire) avec son volume et son débit maximal.

Les averses en régime sahélien, appelées improprement « tornades », sont caractérisées par :

- une période préliminaire de courte durée,
- ce qu'on appelle corps de l'averse : période à intensité moyenne, forte ou très forte, qui peut durer cinq ou dix minutes, mais plus souvent vingt minutes, parfois plus, avec des intensités pouvant atteindre 100 à 120 mm pendant le paroxysme de l'averse. Le corps de l'averse peut se dédoubler;
- une traîne à faible intensité, quelques mm/heure, qui peut durer d'une demi-heure à quelques heures.

C'est le corps de l'averse, période à forte intensité, qui est responsable des phénomènes de ruissellement et d'érosion intenses malgré des hauteurs de précipitations annuelles modérées.

On utilise souvent dans les projets d'aménagement l'averse décennale qui se reproduit en moyenne tous les dix ans en un point. En fait, on peut observer à une station en trois ans deux averses dépassant l'averse décennale et attendre quinze ans sans qu'une seule averse atteigne la valeur décennale.

Au Sahel, sa valeur P 10 est liée en première approximation à la hauteur de précipitations annuelles. Le tableau ci-après représente les hauteurs de précipitations décennales de 24 heures en fonction des hauteurs de précipitations annuelles.

TABLEAU I

Précipit. annuelle	P10 en 24 heures	Précipit. annuelle	P10 en 24 heures	Précipit. annuelle	P10 en 24 heures
100 mm	50 mm	400 mm	90 mm	700 mm	115 mm
200 mm	70 mm	500 mm	95 mm	750 mm	117 mm
300 mm	85 mm	600 mm	100 mm		

Bien entendu, les valeurs de ce tableau sont des moyennes, et des conditions particulières peuvent conduire à des écarts notables par rapport à ces valeurs. Il semble que l'altitude conduise à réduire, par exemple, les hauteurs des précipitations décennales.

On voit que le rapport entre précipitations journalières décennales et précipitations annuelles, élevé en zone subdésertique, décroît rapi-

Précipitations journalières

dement vers les zones sahéliennes : la précipitation décennale tend à se stabiliser vers une valeur voisine de 100 mm. En régime sahélien, pour des petits cours d'eau, la violence des crues dépend peu de la hauteur de précipitation moyenne annuelle. Elle est surtout en rapport avec les caractéristiques des bassins et du réseau hydrographique comme on le verra au chapitre suivant.

REGIME DES COURS D'EAU AYANT LEUR ORIGINE DANS LE SAHEL

Les fortes averses orageuses de la saison des pluies donnent lieu à des phénomènes d'écoulement presque partout dans le Sahel, tout au moins au Sud de la ligne isohyète annuelle 300 mm. Plus au Nord, l'ensablement des bassins est beaucoup plus fréquent, les pluies moins nombreuses et, dans de vastes régions, l'écoulement — assez rare — n'est pas organisé.

Ce qui caractérise la grande majorité des régions sahéliennes est ce qu'on appelle la dégradation hydrographique avec parfois tendance à l'endoréisme. Qu'est-ce que la dégradation hydrographique ? Dans la plupart des cours d'eau normaux, le débit croît de l'amont vers l'aval sur le collecteur principal. Il y a bien quelques pertes, mais une goutte d'eau qui pénètre le réseau hydrographique à son extrémité amont a de fortes chances d'arriver à l'extrémité aval. Il n'en est pas du tout de même dans le régime sahélien. En tête des bassins, alors que la pente est relativement forte et si le sol n'est pas très perméable, on observe, à une assez faible distance de la ligne de partage des eaux, de fines rigoles qui donnent lieu à un ruisseau, à lit assez bien marqué, puis les débits se concentrent et généralement un petit cours d'eau se constitue avec parfois un lit sableux relativement large et des rives encombrées par la végétation, la surface du bassin versant est alors de quelques kilomètres carrés. Très rapidement, les berges s'abaissent, des bras se détachent du cours d'eau principal, et celui-ci se perd assez vite dans une mare à fond argileux encombré de végétation ou transformé en champ de sorgho.

Mais le cours d'eau en question peut avoir la chance de déboucher dans une dépression collectrice. Celle-ci a souvent une pente générale faible. Chaque affluent remplit une mare à l'aval ou à l'amont par rapport à la pente générale du collecteur qui peut être barrée ainsi par un certain nombre de seuils formés par les alluvions des divers affluents lors des crues exceptionnelles. Toutes les mares se remplissent, puis se déversent les unes dans les autres, et il se produit alors un écoulement généralisé de l'amont vers l'aval, qui peut n'avoir lieu qu'en année exceptionnellement humide. Le cas le plus typique est celui du Beli à la frontière du Mali et de la Haute-Volta.

Si la pente est un peu plus forte, les affluents présentent l'allure d'oueds de l'Afrique du Nord et la dépression principale couverte de végétation à l'état naturel est drainée, pas toujours très bien d'ailleurs, par une série de chenaux. Le tout se termine par une zone plus ou moins deltaïque, mais à ce moment le bassin versant atteint 2000 à 4000 km².

En montagne, si la pente du collecteur est forte et continue, l'écoulement est torrentiel et il n'y a pas de dégradation. C'est par exemple le cas du Kori Teloua au nord d'Agades, en région subdésertique. Mais, mis à part le Djebel Marra, il n'y a pas de vraies montagnes en zone sahélienne, avec des vallées à pente forte dépassant 100 km de long, comme dans le désert.

Généralités

Une série de hasards heureux peut conduire à l'existence de cours d'eau sahéliens importants. On citera deux exemples : le Ba Tha (Tchad) et le Bahr Azoum (Soudan et Tchad).

Le Ba Tha prend sa source, si on peut dire, au Ouaddaï, en terrain granitique perméable, avec précipitations assez peu abondantes en année moyenne ; le bassin amont n'apporte rien, puis, plus au sud, il reçoit sur sa rive gauche une série d'affluents venant de l'est qui le régénèrent. Plus à l'aval, au moment où son débit va décroître sérieusement, il reçoit une série d'affluents recevant par an 700 à 750 mm qui le régénèrent complètement, et il peut ainsi arriver sans difficultés jusqu'au lac Fitri où il se jette. Bien entendu, il est à sec pendant toute la saison sèche.

Le Bahr Azoum est constitué par des cours d'eau actifs venant du Djebel Marra. En arrivant dans la cuvette lacustre tchadienne, son débit diminue et il va disparaître au voisinage d'Am Timam, quand il est régénéré par ses affluents rive droite venant du massif du Guera, de sorte qu'il peut rejoindre le Chari sous le nom de Bahr Salamat. En saison sèche, à l'amont d'Am Timam, il ne présente que des mares résiduelles.

On voit que la notion de bassin versant a peu de signification. En particulier le débit spécifique, débit rapporté au kilomètre carré, a peu de sens puisqu'en quelques kilomètres le débit d'un cours d'eau peut passer de 50 m³/s à 0, et qu'une forte crue sur un « bassin » de 5 000 km² résulte généralement d'un épisode pluvieux sur un bassin de 60 km² situé immédiatement à l'amont de la station où on l'observe, le reste du bassin ne présentant aucun écoulement. Dans ce qui suit, on sera donc obligé de considérer plusieurs catégories de superficies de bassin.

Il a été précisé plus haut que tout le Sahel ne présentait pas de phénomènes d'écoulement ; il existe, en effet deux types de sol qui ne donnent pas lieu, en général, à un écoulement organisé : les régions sablonneuses et les régions argileuses très plates. Dans le premier cas, il s'agit de dunes mortes plus ou moins fixées par la végétation (dunes vives en régions subdésertiques), l'écoulement sur les pentes est presque nul, l'excédent des précipitations peut s'accumuler parfois au fond des creux de dunes ; ces mares s'assèchent généralement au début d'octobre mais, dans des cas tout à fait exceptionnels, celui de la Korama au Niger, où le massif sablonneux repose sur un sous-sol imperméable à faible profondeur, il y a écoulement permanent, sauf en année très sèche.

En terrain imperméable et mal drainé, l'eau provenant des précipitations s'accumule sous forme de petites mares et s'évapore. On rappelle que, sous faible profondeur, l'évaporation annuelle dépasse largement 2 m par an au Sahel. Les années très humides il peut y avoir un drainage assez efficace donnant lieu à des débits non négligeables s'il y a une dépression collectrice pas trop loin.

Ces phénomènes de dégradation hydrographique ont trois causes :

- a) une longue saison sèche au cours de laquelle la végétation herbacée disparaît et le sol nu est l'objet d'érosion intense.
- b) la durée de l'écoulement est faible et les cours d'eau n'ont pas le temps d'entretenir un lit continu dès que la pente est faible, d'autant plus que le transport solide est important.
- c) il y a dans ces régions, par suite de l'existence de période de très forte hydraulité dans un passé relativement proche, quelques milliers d'années, d'immenses étendues à très faibles pentes : cuvette tchadienne, marais du Sud, etc., où les crues s'étendent en nappes minces absorbées par l'évaporation.

On retrouve la dégradation hydrographique non seulement dans le Sahel tropical africain, mais en bordure de nombreux déserts dans le monde.

Il n'est pas très facile de présenter avec un peu d'ordre les diverses caractéristiques du régime hydrologique dans des conditions aussi complexes. Nous essayerons de le faire en considérant plusieurs catégories d'aires d'alimentation.

C'est la superficie des bassins versants susceptibles d'alimenter les citernes ou certains lacs collinaires. Il n'y a pas de dégradation hydrographique et pratiquement pas de perte dans le lit du cours d'eau, le rapport entre le volume de pluie tombée sur le bassin et le volume annuel écoulé, ou coefficient d'écoulement, est élevé. Mais, même sur un sol imperméable, les petites pluies de 1 à 2 mm ne donnent pas lieu à écoulement, de sorte qu'en année médiane (1), le coefficient d'écoulement est compris entre 40 et 60 % dans ce cas, la valeur la plus élevée ne correspond pas nécessairement aux zones les plus arides : une couverture végétale inexistante favorise le ruissellement.

Pour des sols assez perméables avec pente assez forte, le coefficient d'écoulement est nettement plus faible : 15 à 20 %.

Pour des sols perméables à pente plus faible et couverture végétale non négligeable, il est compris entre 4 et 8 %.

En année exceptionnellement humide, le coefficient d'écoulement sur ces petites surfaces atteint des valeurs beaucoup plus élevées, mais si l'on met à part les surfaces artificiellement imperméabilisées, et même pour des bassins de quelques hectares, il semble que *dans les conditions les plus favorables*, le coefficient d'écoulement annuel ne puisse pas dépasser 75 %. En terrain légèrement perméable, on peut considérer en zone désertique que la courbe de distribution statistique de l'écoulement annuel serait définie à partir des trois coefficients d'écoulement suivants : année médiane 40 %, année centennale sèche 5 - 10 %, année centennale humide 60 - 70 %.

Les fortes crues sont dues à des périodes de quelques minutes à très forte intensité. Si la pente est assez forte, le coefficient d'écoulement pour cette pointe d'averse décennale varie de 75 à 90 % si le sol est assez imperméable, de 35 à 60 % si la perméabilité est notable, de 10 à 25 % si la perméabilité est assez forte.

En admettant que la crue décennale comporte une pointe d'intensité de 140 mm/heure pendant 5 minutes, on en déduit que le débit de crue décennale varie de 29 à 35 m³/s pour un bassin de 1 km² peu perméable ou imperméable.

Pour un bassin assez perméable, le débit maximal de crue n'est plus que de 14 à 23 m³/s. Pour un bassin perméable, il varie de 3 à 9 m³/s.

Tous ces chiffres diminuent si la pente est modérée et encore plus si elle est faible.

La crue est très brève en terrain imperméable ; elle reproduit avec un certain décalage la pointe d'intensité de la pluie, si cette pointe est isolée, sinon on observe une pointe de crue se superposant à un hydrogramme plus ou moins irrégulier. En terrain perméable, bien en-

**Bassins de
quelques
hectares à 1 km²**

(1) L'année médiane correspond à la fréquence cumulée 50 %. En régime sahélien et surtout en régime subdésertique, cette caractéristique est plus utile pour les applications que la moyenne. La précipitation moyenne ou l'écoulement moyen sont plus élevés que les valeurs médianes correspondantes, mais la différence n'est pas très grande et on peut souvent, sans trop de difficultés, les confondre, tout au moins pour le régime sahélien. Tous les calculs et les diagrammes présentés dans cette étude ont été basés sur les valeurs médianes.

tendu, les variations de débit sont très amorties par rapport aux variations d'intensité, mais le sol retient une part importante des précipitations qui est perdue par évaporation dès que le soleil réapparaît.

Pour ces très petits bassins, on n'a pas encore établi de règles bien définies pour le calcul des volumes de crues.

Sur les bassins perméables, ou à faible pente, il y a déjà dégradation, mais sur les bassins imperméables, son rôle est encore négligeable. On subdivise souvent cette catégorie en deux groupes : les bassins de 5 km² et ceux de 25 km². C'est le genre de bassin qui a été le plus étudié. Ils sont souvent utilisés pour l'alimentation de petits réservoirs et la traversée des cours d'eau correspondants en crue a posé de sérieux problèmes aux constructeurs de routes. Pour de telles surfaces, la dégradation n'a souvent pas amorti les pointes de crues qui sont brutales. On a vu que, malgré des hauteurs de précipitations annuelles modérées, les hauteurs des averses journalières décennales sont voisines de 100 mm et présentent de fortes intensités, la couverture végétale est peu dense et ne freine pas l'écoulement. C'est dans ces régions qu'il est le plus facile d'observer le véritable ruissellement superficiel, la majeure partie du bassin étant couverte d'une nappe d'eau.

Un assez grand nombre de bassins représentatifs a permis de connaître assez bien le régime hydrologique. Comme on a déjà pu l'entrevoir plus haut, ce régime varie très largement suivant les caractères physiques du bassin. Encore reste-t-il à définir ces caractères de façon simple. Les bassins versants de cette importance peuvent rarement être considérés comme étant homogènes. Si on veut les classer en fonction de leur aptitude à l'écoulement, on doit considérer que chaque bassin comporte une association d'un certain nombre de types de sols de perméabilité généralement très différente comme on le montre ci-après.

La liste qui suit, relative à la zone sahélienne, n'est pas limitative, certains types de sols de bassins ne sont pas représentés, mais la plupart des cas courants ont pu être analysés.

Dunes, mortes généralement, ou revêtement éolien, vers les limites du bassin, on trouve des affleurements rocheux, quelquefois peu perméables ou des lambeaux de carapaces latéritiques et, dans les dépressions, des dépôts souvent argileux, l'ensemble est très perméable. En général l'écoulement correspond à moins de 1 % des précipitations en année médiane.

C'est le cas le plus difficile. On rencontre de l'amont à l'aval :

- des affleurements rocheux : perméables s'ils sont décomposés en boules, moins perméables si le rocher est en dalles ou en dômes, mais l'écoulement arrive dans les zones suivantes où souvent il se perd ;
- des arènes granitiques très perméables ;
- des sols sableux plus ou moins profonds ; s'ils sont peu profonds le sol est vite saturé et ils peuvent avoir une bonne aptitude au ruissellement. S'ils contiennent plus de 10 % d'argile, ce sont des sols battants et le résultat est le même ;
- des glacis ou pédiments à pente régulière : sols sablo-argileux compacts (appelés naga au Tchad). Au nord de l'isohyète 450 -

**Bassins
de 2 à 40 km²**

Généralités

**Divers types de
bassins versants**

Sols sableux

**Bassins
sur granites
ou granito-gneiss**

500 mm, ce sont des regs imperméables dès que leur surface est gorgée d'eau. C'est l'importance relative de ces deux catégories de sols qui définit l'aptitude à l'écoulement du bassin ;

— le lit des cours d'eau du bassin avec ses alluvions sableuses et ses bourrelets de berge sablo-argileux ;

— plus à l'aval, si la pente est faible, on trouve des sols hydromorphes, vertisols à larges fentes de retrait en saison sèche. Dès qu'ils ont reçu suffisamment de pluie les fentes se referment et le sol devient imperméable. Mais la pente étant faible, le drainage est généralement mauvais et il est fréquent que ces sols n'apportent pas d'écoulement vers l'aval ;

— enfin, on peut trouver sur les parties amont du bassin, une couverture relativement homogène et épaisse de gravillons latéritiques, assez perméable.

Il est rare qu'un bassin de 25 km² présente à la fois toutes ces catégories de sols. Mais l'écoulement sera d'autant plus important que la proportion de sol imperméable sera plus grande.

Pour en faciliter l'étude, on a défini en Afrique Occidentale trois bassins types en zone sahélienne, auxquels on a donné le nom des « bassins représentatifs » les plus caractéristiques pour chaque type :

— le bassin type *Abou Goulem* : sols perméables dans l'ensemble, avec pente notable, pente moyenne 12 à 14 m/km, pas de sol sablo-argileux compact, pas de sol hydromorphe, pas de sol sableux peu profond. Ces bassins correspondent à la limite de ce que l'on peut utiliser pour créer des réservoirs.

— le bassin type *Barlo* : beaucoup moins perméable, a une pente plus forte, pente moyenne 20 à 30 m/km, avec au moins 25 % de sol sablo-argileux compact et de sol sableux peu profond et une proportion notable de massifs rocheux donnant lieu à ruissellement.

— le bassin type *Cagara ouest* : assez peu perméable, pente moyenne 4 m/km, constitué en majeure partie par des sols argilo-sableux, la masse d'alluvions sableuses dans le lit est négligeable.

Il existe des bassins un peu plus imperméables, constitués de regs homogènes dans le Nord, ou de sols plus argileux que Cagara ouest, avec des pentes notables, dans certaines parties du Sud.

Bassins sur grès (Ader Douchi exclu) : ils comportent les formations suivantes :

Bassins sur grès

— les grès : comme les granites, leur aptitude au ruissellement peut être très différente. S'ils sont très fracturés et sous forme d'éboulis plus ou moins envahis par les sables, ils sont très perméables. S'ils sont en couche subhorizontale, en bon état, et plus ou moins dénudés, ils ruissellent bien.

— les carapaces latéritiques, si elles sont très démantelées, sont perméables, mais, en bon état, elles donnent lieu à un écoulement superficiel important.

— les sols sableux sur grès (voir sols sableux sur granites).

— les alluvions de fond de vallée sablo-argileuses.

— les sols ferrugineux tropicaux lessivés.

Si la proportion de grès peu fissuré est importante ces bassins ont un assez fort écoulement.

Le bassin type est celui de Koumbaka (Mali) sur les grès dogons.

Ils comportent des argiles noires sur marnes ou calcaires marneux ou colluvions sablo-argileuses peu perméables et des sols ferrugineux ainsi que des sols calcimorphes perméables.

Bassins sur sables et marnes

Le bassin type est celui de Sebikotane (Sénégal).

Comme pour les granites, on retrouve de l'amont à l'aval :

- le schiste en place,
- les éboulis qui ruissellent assez mal,
- les glacis argileux plus imperméables en général que sur sous-sol granitique,
- les vallées avec les sols hydromorphes.

Bassins sur schistes

Les bassins les plus connus sont ceux de l'oued Ghorfa (sud-ouest de la Mauritanie). Ils présentent un fort ruissellement en raison de la proportion importante de glacis argileux.

Le bassin type est celui de Kadiel.

On les trouve sur le continental terminal au Niger. Ils comportent :

- des plateaux horizontaux de grès argileux démantelés qui ruissellent peu.
- sur les pentes, des colluvions souvent peu perméables et des sols marno-calcaires imperméables.
- des sols brun-rouge sur matériaux issus de grès, sols cultivés relativement perméables.
- dans le lit des cours d'eau, des sables perméables.
- plus à l'aval des sols hydromorphes peu développés si le bassin ne couvre que 25 km².

Bassins de l'Ader Douchi et de la Maggia

Vers le Nord, les sols des pentes plus argileux se présentent comme des regs.

L'ensemble donne lieu à un fort ruissellement, surtout si la superficie occupée par les grès est faible.

Les bassins types sont ceux de :

- *Kount-Kouzout*, qui ne comporte que 15 % de grès, mais près de 40 % de sols brun-rouge, ou de zones d'éboulis assez perméables,
- et de *Galmi* qui, avec 80 % à 90 % de colluvions argileuses et de sols marno-calcaires, semble correspondre aux conditions optimales pour le ruissellement.

En régions subdésertiques, pour lesquelles il a été plus difficile de constituer une classification en règle, comme pour les régions sahéliennes, on a défini 3 catégories de bassins :

Bassins des zones subdésertiques

- 1) — bassins à très bonne aptitude au ruissellement (Catégorie I), massif montagneux à très forte pente, pratiquement pas de zone d'éboulis ni de recouvrement éolien.
- 2) — bassins à bonne aptitude au ruissellement : quelques zones d'éboulis, une partie du bassin est recouverte de sable (Catégorie II).
- 3) — bassins à aptitude au ruissellement médiocre : ensablement assez important, dégradation hydrographique. Bassins sur granite assez dégradé mais avec une proportion de regs non négligeable (Catégorie III).

La plus ou moins grande dégradation du réseau hydrographique et l'extension des zones endoréiques permet de classer, non sans difficultés, les bassins dans l'une des trois catégories.

On considérera deux des caractéristiques hydrologiques essentielles pour les aménagements : l'écoulement annuel et les débits maximaux de crues.

**Écoulement annuel
en année médiane**

En zone subdésertique, on peut caractériser l'écoulement annuel par les valeurs du coefficient d'écoulement K_e en année médiane, et la lame d'eau écoulée annuelle E en mm sous l'isohyète 200 mm.

Le volume disponible se déduit de E par la relation

$$V \text{ en m}^3 = Emm \times Skm^2 \times 10^3$$

S est la surface du bassin versant.

On trouve pour :

— Catégorie I	$K_e = 28,5 \%$	$E = 57 \text{ mm}$
— Catégorie II	$K_e = 13,5 \%$	$E = 27 \text{ mm}$
— Catégorie III	$K_e = 5 \%$	$E = 10 \text{ mm}$

On peut résumer, en zone sahélienne, l'aptitude à l'écoulement, également par K_e et E en mm pour l'isohyète 500 mm, pour les divers groupes de bassins et les bassins types suivants et pour l'année médiane :

— bassins sableux	$K_e = 0,45 \%$	$E = 2,2 \text{ mm}$
— bassins sur granite ou granito-gneiss		
type Abou-Goulem	$K_e = 3,5 \%$	$E = 17,5 \text{ mm}$
type Barlo	$K_e = 7 \%$	$E = 35 \text{ mm}$
type Cagara-ouest	$K_e = 14 \%$	$E = 70 \text{ mm}$
— bassins sur grès (Ader-Doutchi exclu)		
grès en bon état	$K_e = 14 \%$	$E = 70 \text{ mm}$
— bassins sur sables et marnes (Sebikotane)	$K_e = 9 \%$	$E = 45 \text{ mm}$
— bassins sur schistes (Kadiel)	$K_e = 19,5 \%$	$E = 98 \text{ mm}$
— bassins de l'Ader-Doutchi et de la Maggia		
type Kount-Kouzout	$K_e = 14 \%$	$E = 70 \text{ mm}$
type Galmi	$K_e = 35 \%$	$E = 175 \text{ mm}$

Entre les deux cas extrêmes, l'écoulement annuel passe de 1 à 80. Si on ne considère que les bassins sur granite, il est possible que le rapport des valeurs extrêmes soit de l'ordre de 20. Le type Abou-Goulem est loin de correspondre à un minimum et il y a des bassins sur granite qui ruissellent plus que Cagara-ouest, sans que la limite maximale atteigne ce qui a été trouvé pour les bassins types Kadiel et Galmi.

Ces données concernent des bassins de 25 km². Pour 5 km², on trouverait un peu plus, en général, surtout dans le cas des bassins perméables : dans les mêmes conditions, le coefficient d'écoulement varierait entre 3 et 40 %. Par exemple, ce coefficient pour un bassin type Abou-Goulem serait de 7 % soit le double de la valeur admise pour un bassin de 25 km².

En zone sahélienne, un coefficient d'écoulement médian de 5 % correspond à des possibilités d'aménagement assez peu intéressantes pour un bassin de 25 km². Il conduit, en effet, à un volume annuel de 625 000 m³, dont, en général, une grande partie est perdue par évapo-

ration alors que, comme on le verra plus loin, le débit de crue à évacuer en année très humide, exige de construire un évacuateur de crues coûteux.

Ceci élimine beaucoup plus de bassins qu'on ne pourrait le croire. Les deux premiers types de bassins présentés plus haut correspondent en effet à des cas beaucoup plus fréquents que le cas des bassins type Galmi.

Encore convient-il de tenir compte des variations de ce volume annuel suivant les années, et, en particulier, lors des périodes sèches.

Le nombre d'années d'observation sur chacun des bassins représentatifs est insuffisant pour permettre une étude statistique des lames d'eau annuelles. Aussi on a utilisé un certain nombre de modèles mathématiques simplifiés, mis au point par G. Girard, sur ces bassins, pour transformer chaque averse dans la crue correspondante. On peut donc, à partir de 50 ans d'observations de hauteur de précipitations journalières à une station du réseau météorologique, obtenir pour chacune des années, la série de crues correspondantes (un bon nombre d'averses ne donnant d'ailleurs pas lieu à écoulement) et, par suite, le volume annuel et la lame d'eau écoulée annuelle. On obtient donc une série de lames écoulées pour 50 ans.

En fait, pour chaque bassin spécialement étudié, on a utilisé les précipitations de plusieurs postes pluviométriques. Ce genre d'étude n'a pas été fait pour tous les bassins types, on a souvent procédé par comparaison des conditions d'écoulement pour les bassins pour lesquels il n'y a pas eu d'étude sur modèle.

Dans ces conditions, on a établi pour la zone sahélienne le graphique 5, qui donne la distribution des lames d'eau écoulées en fonction des périodes de retour (inverse des fréquences cumulées). Chaque bassin type est représenté par deux courbes extrêmes : l'une correspond à la distribution des lames d'eau écoulées annuelles, pour le cas où le bassin type reçoit en année médiane 300 mm, l'autre à la distribution des lames d'eau écoulées pour le cas où le bassin-type reçoit 750 mm. En général, la courbe 500 mm vient se placer dans l'intervalle des courbes un peu au-dessus du milieu à une distance de la courbe 300 mm voisine de 0,6 fois l'intervalle entre les deux courbes.

La variabilité de l'écoulement d'une année à l'autre peut se mesurer par les chiffres suivants :

— pour un bassin type Abou-Goulem de 25 km² sous l'isohyète 500 mm, les lames d'eau écoulées sont les suivantes :

année centennale humide	E = 138 mm
année médiane	E = 17,5 mm
année centennale sèche	E = 0

— pour un bassin type Galmi de 25 km² sous l'isohyète 500 mm, les lames d'eau écoulées sont les suivantes :

année centennale humide	E = 465 mm
année médiane	E = 175 mm
année centennale sèche	E = 8,9 mm

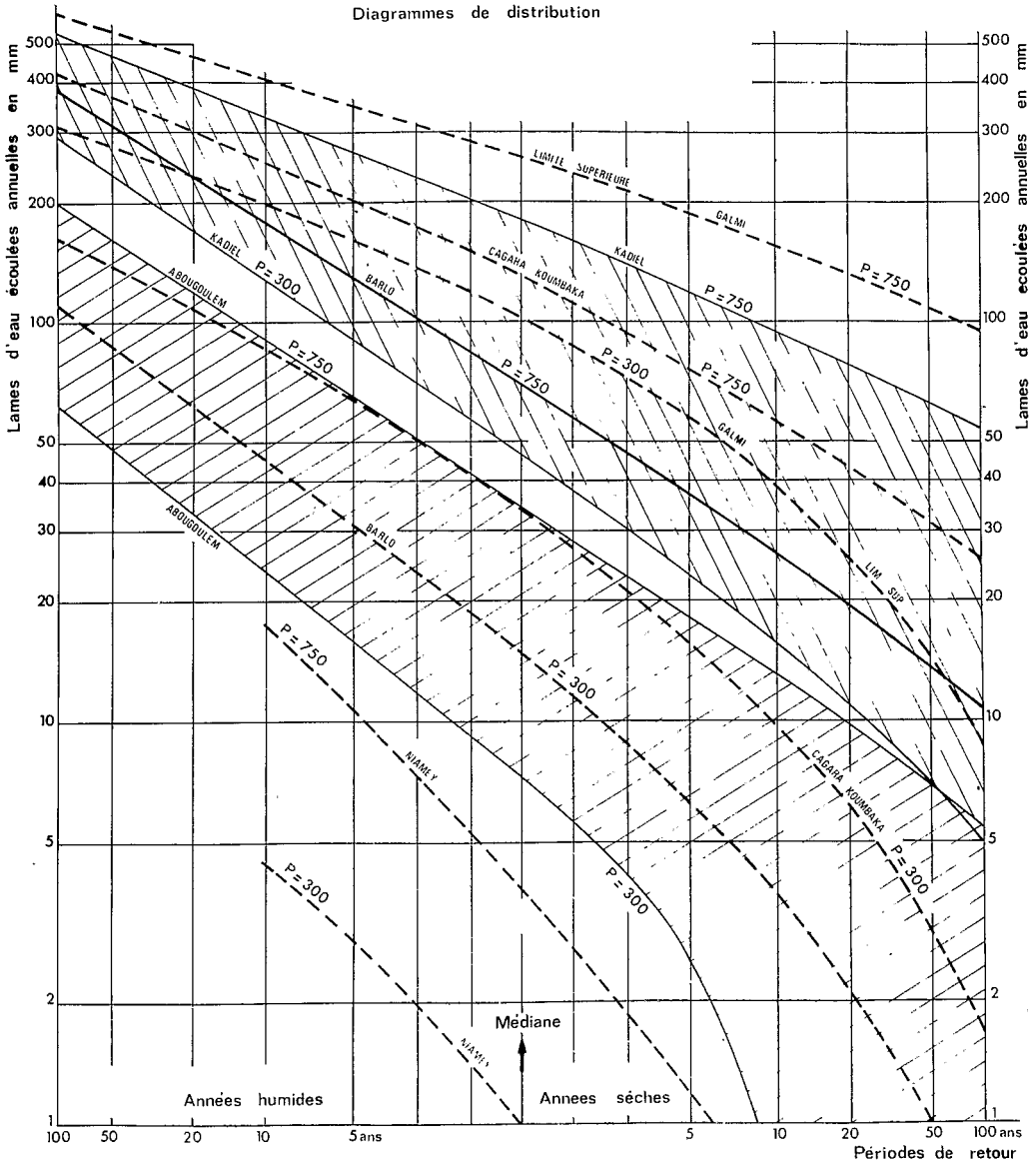
Lors de la période sèche 1970-1973, on a trouvé des valeurs égales ou un peu supérieures aux valeurs centennales sèches données ci-dessus.

Une véritable étude d'exploitation doit, non seulement considérer les valeurs extrêmes, mais aussi une suite chronologique de lames d'eau écoulées annuelles ; on reviendra sur ce point plus loin.

Distribution statistique de l'écoulement annuel

Écoulement annuel pour un bassin versant de 25Km² Gr: 5
Régions sahéliennes

Diagrammes de distribution



Pour la zone subdésertique, on a mis au point, en utilisant des procédés beaucoup plus sommaires, le graphique 6, sur lequel n'ont été représentés que les diagrammes correspondant aux catégories extrêmes I et III évoquées au paragraphe précédent.

En zone subdésertique, l'écoulement annuel est nul beaucoup plus souvent qu'en zone sahélienne.

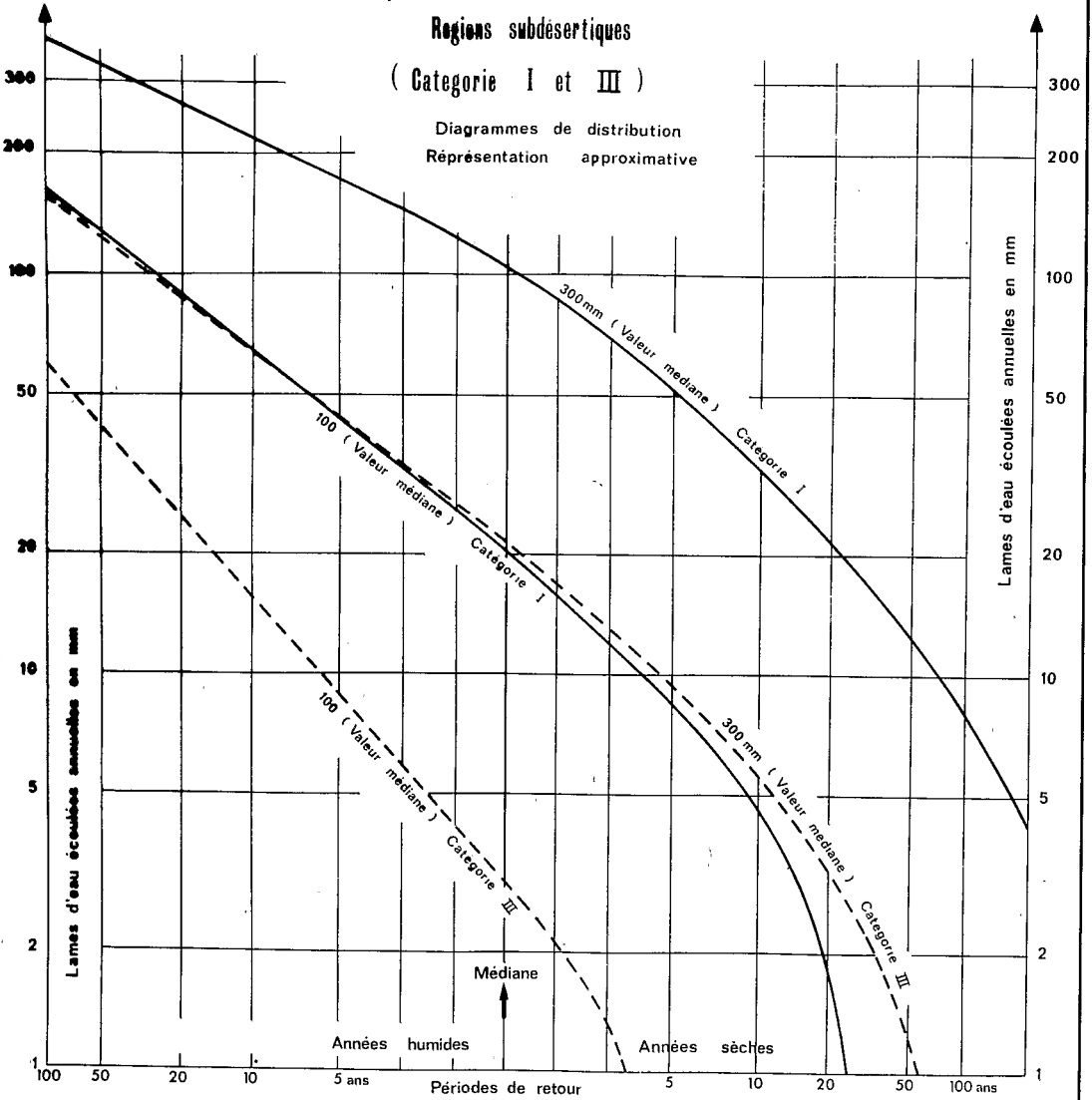
Ecoulement annuel pour un bassin versant de 25 Km²

Gr. 6

Regions subdesertiques

(Catégorie I et III)

Diagrammes de distribution
Représentation approximative



CATEGORIE III

Écoulement = 0

pour

P médiane = 100 mm
annuelle

120 mm

150 mm

200 mm

P = 12 ans

P = 10 ans

P = 29 ans

P = 66 ans

225 mm

250 mm

275 mm

300 mm

P = 100 ans

P = 125 ans

P = 200 ans

P = 250 ans

Pour l'étude des petits ouvrages, on considère, en général, la crue décennale ou centennale, celle qui se reproduit en moyenne une fois tous les dix ans ou tous les cent ans.

Crues exceptionnelles

Il est important de connaître son volume et le débit maximal.

Les crues décennales ont fait l'objet d'études approfondies et on a donné des règles de calcul en fonction de la surface, de la pente et de la perméabilité globale du bassin. Cette dernière a été définie par 5 catégories de P1 à P5, P1 représentant un bassin rigoureusement imperméable, P5 un bassin très perméable. Pour montrer les variations du débit des crues décennales suivant les catégories de bassins, on a repris les bassins présentés plus haut, page 19 et on a calculé : le volume de la crue décennale en milliers de m³, le débit de crue en m³/s et le débit spécifique rapporté à 1 km² en l/s × km², en supposant que les bassins subdésertiques sont situés sous l'isohyète 200 mm (précipitation décennale journalière ponctuelle 70 mm) et que les bassins sahéliens sont situés sous l'isohyète 500 mm (précipitation décennale journalière ponctuelle 95 mm). Les valeurs ainsi obtenues ont été reportées sur le tableau II ci-après.

TABLEAU II

Crues décennales pour des bassins de 25 km² en zones subdésertique et sahélienne

	V en 10 ³ m ³	Q _M en m ³ /s	q _m en l/s × km ²
zone subdésertique Catégorie I P = 200 mm	1 050	240	9 500
zone subdésertique Catégorie II P = 200 mm	700	120	4 700
zone subdésertique Catégorie III P = 200 mm	500	50	2 000
Bassin sableux P = 500 mm	95	2,5	100
Bassin type Abou-Goulem P = 500 mm	500	55	2 200
Bassin type Barlo P = 500 mm	650	115	4 600
Bassin type Cagara-ouest P = 500 mm	1 500	80	3 200
Bassin sur grès P = 500 mm	1 800	160	6 500
Bassin type Sebikotane P = 500 mm	600	45	1 800
Bassin type Kadiel P = 500 mm	750	75	3 000
Bassin type Kount-Kouzout	660	145	5 800
Bassin type Galmi	2 100	300	12 000

Chaque bassin correspond à des conditions géomorphologiques assez bien définies, en particulier, en ce qui concerne la pente et la perméabilité globale. La différence de comportement entre les différents bassins est très grande puisque les deux valeurs extrêmes du débit spécifique sont : 100 l/s × km² et 12 000 l/s × km². La perméabilité globale semble être, dans bien des cas, le facteur essentiel.

Pour des bassins perméables ou très perméables, une pente trois fois plus forte, pour un bassin sableux par exemple, conduit peut-être à doubler le débit maximal décennal ; sur un bassin imperméable, l'augmentation de la pente, si elle conduit à une majoration faible du

volume de la crue, augmenté très sérieusement le débit maximal, mais ces bassins imperméables sont généralement argileux, de sorte que le modelé reste tel que la pente n'est jamais très forte. On notera également que la valeur de la hauteur de précipitation annuelle n'a qu'une faible influence sur le débit de crue décennale. La comparaison des valeurs obtenues en régime sahélien et subdésertique le montre bien. Il est vrai que les catégories I, II et III correspondent toutes à des conditions de ruissellement plus favorables que celles du bassin type Abou-Goulem. On pourrait placer la catégorie III entre les bassins types Abou-Goulem et Cagara-ouest. La catégorie I comprend des bassins de montagnes où les conditions de ruissellement sont plus favorables que celles des bassins type Galmi.

Pour les bassins sahéliens, on trouve très fréquemment pour les débits spécifiques de crues décennales des valeurs comprises entre 1 500 et 3 000 l/s × km².

La conclusion pratique est la suivante : un bassin qui ruisselle bien, tel Galmi ou Kadiel, permet de garantir le remplissage d'un réservoir de volume appréciable, tous les ans, mais, malheureusement, il est nécessaire d'évacuer des crues de fort débit, ce qui nécessite de réaliser des déversoirs coûteux.

En zone sahélienne, le diagramme annuel des débits se présente comme une série de pointes de crues : les premières au début de juillet, les dernières en septembre. Il y a quelquefois des crues en juin ou en octobre, plus rarement en mai. Après chaque crue, l'écoulement cesse, sauf lorsque le sol est perméable. Dans ce cas, dans la seconde moitié de la saison des pluies, si elle a été assez abondante, il y a un écoulement permanent qui cesse en octobre, sauf cas exceptionnel. En général, il y a des phénomènes d'écoulement pendant trois mois et le cours d'eau reste à sec pendant neuf mois. En zone subdésertique, se produisent quelques crues pendant deux mois du 15 juillet au 20 septembre, sans écoulement entre les crues, sauf en année exceptionnellement humide où les rivières peuvent couler pendant un mois de façon continue.

Variations saisonniers des débits

Dans la partie du Sahel au sud du Sahara, s'ils ne présentent pas l'importance qu'ils ont en Afrique du Nord, ils ne sont plus négligeables, surtout en zone subdésertique : on a mesuré au sud d'Agades des concentrations en sédiments de 30 g/l en crue. En zone sahélienne, elles sont un peu moins fortes à l'échelle de 25 km².

Transports solides et qualité des eaux

Sur le bassin de Galmi I, qui correspond à un maximum de ruissellement, les plus fortes concentrations en sédiment atteignent bien 35 g/l mais, en général, elles sont nettement moins élevées. Cependant les crues sont beaucoup plus nombreuses et, en définitive, l'érosion spécifique annuelle est de 18 tonnes/an/ha. La hauteur de précipitation annuelle médiane est de 500 mm.

Les transports solides croissent avec la pente, ils décroissent avec la densité de la couverture végétale, ils sont très sensibles au type de culture.

Au sud du Sahara, les eaux sont extrêmement douces tout au moins en zone sahélienne, c'est là une compensation à toutes les difficultés d'aménagement que nous venons de présenter.

Lorsque la superficie diminue, la pente est en général plus forte ; il n'y a plus du tout de dégradation hydrographique et l'écoulement annuel

Bassins de quelques km²

est plus élevé. L'augmentation des lames d'eau écoulées, très sensible pour les bassins perméables, l'est nettement moins pour les bassins imperméables.

Pour les bassins types Abou-Goulem ou Barlo, lorsque la superficie passe de 25 à 5 km², toutes choses restant égales par ailleurs, l'écoulement annuel double en année médiane, il triple ou quadruple en année centennale sèche. Pour les bassins très perméables qui n'ont pas d'écoulement en année centennale sèche pour 25 km², il y a écoulement pour des bassins de 5 km² dans les mêmes conditions.

Sur des bassins imperméables, l'augmentation de volume d'écoulement est moins élevée : 15 à 30 % en année médiane ; en année centennale sèche la majoration est comprise entre 100 % et 25 %, l'augmentation la plus faible correspondant au bassin type Galmi.

Les crues exceptionnelles sont également majorées : tout d'abord pour une même fréquence, la hauteur de précipitation est plus élevée, l'abattement (rapport à la pluie ponctuelle de même fréquence), est pratiquement égal à 1, le coefficient d'écoulement est plus fort comme on l'a vu plus haut, enfin, pour un même volume de crue, le débit de pointe est plus élevé.

A titre tout à fait indicatif, on a reproduit sur le tableau III ci-après quelques données valables pour des bassins versants de 5 km².

TABLEAU III

Crues décennales pour des bassins de 5 km² en zones subdésertique et sahélienne

	V en 10 ³ m ³	Q _M en m ³ /s	q _m en l/s x km ²
zone subdésertique Catégorie I P = 200 mm	260	125	25 000
zone subdésertique Catégorie II P = 200 mm	180	75	15 000
zone subdésertique Catégorie III P = 200 mm	150	30	6 000
Bassin sableux P = 500 mm	55	3,5	700
Bassin type Abou-Goulem P = 500 mm	115	35	7 000
Bassin type Barlo P = 500 mm	180	65	13 000
Bassin type Cagara-ouest P = 500 mm	340	40	8 000
Bassin sur grès P = 500 mm	320	70	14 000
Bassin type Sebikotane P = 500 mm	170	32	6 400
Bassin type Kadiel P = 500 mm	250	50	10 000
Bassin type Kount-Kouzout P = 500 mm	210	36	7 200
Bassin type Galmi P = 500 mm	430	90	18 000

L'augmentation des débits spécifiques est très sensible par rapport aux crues observées sur les bassins de 25 km².

C'est le genre de bassin dont l'hydrologie est la plus difficile à étudier en régime sahélien : la pente générale du bassin et celle du lit diminuent : en plus, la dégradation s'accroît, surtout dans les régions subdésertiques où le réseau hydrographique actuel s'enchevêtre plus

**Bassins
versants
de 40 à 500 km²**

ou moins avec un réseau fossile, relique de la dernière période humide, et tout ceci conduit à un régime hydrologique fort complexe avec une variété extrême de comportement des bassins dans l'espace et dans le temps, sauf lorsque l'ensemble de la région étudiée est peu perméable.

Ce sont les bassins sur sous-sol de granite ou de granito-gneiss, fort nombreux dans cette partie de l'Afrique, qui présentent les caractères les plus capricieux. L'exemple de l'ouadi Enné au nord du Ouaddaï (Tchad) est particulièrement typique. A Biltine, son bassin versant couvre une superficie de 527 km². Il prend naissance dans le massif du Ouaddaï, où il est nourri par des tributaires dont certains ont des crues assez violentes, mais il se dégrade assez vite vers la zone de piémont à l'ouest du Ouaddaï, son lit se termine par une zone deltaïque, un bras se dégage sur sa rive droite et reçoit l'ouadi Ambar peu dégradé qui, au confluent, draine, pas trop mal, un bassin de 83 km². Vers ce confluent, et jusqu'à la station de Biltine, des zones de regs argileux assez imperméables ruissellent facilement, de sorte qu'en ce qui concerne l'écoulement à Biltine, la situation est la suivante :

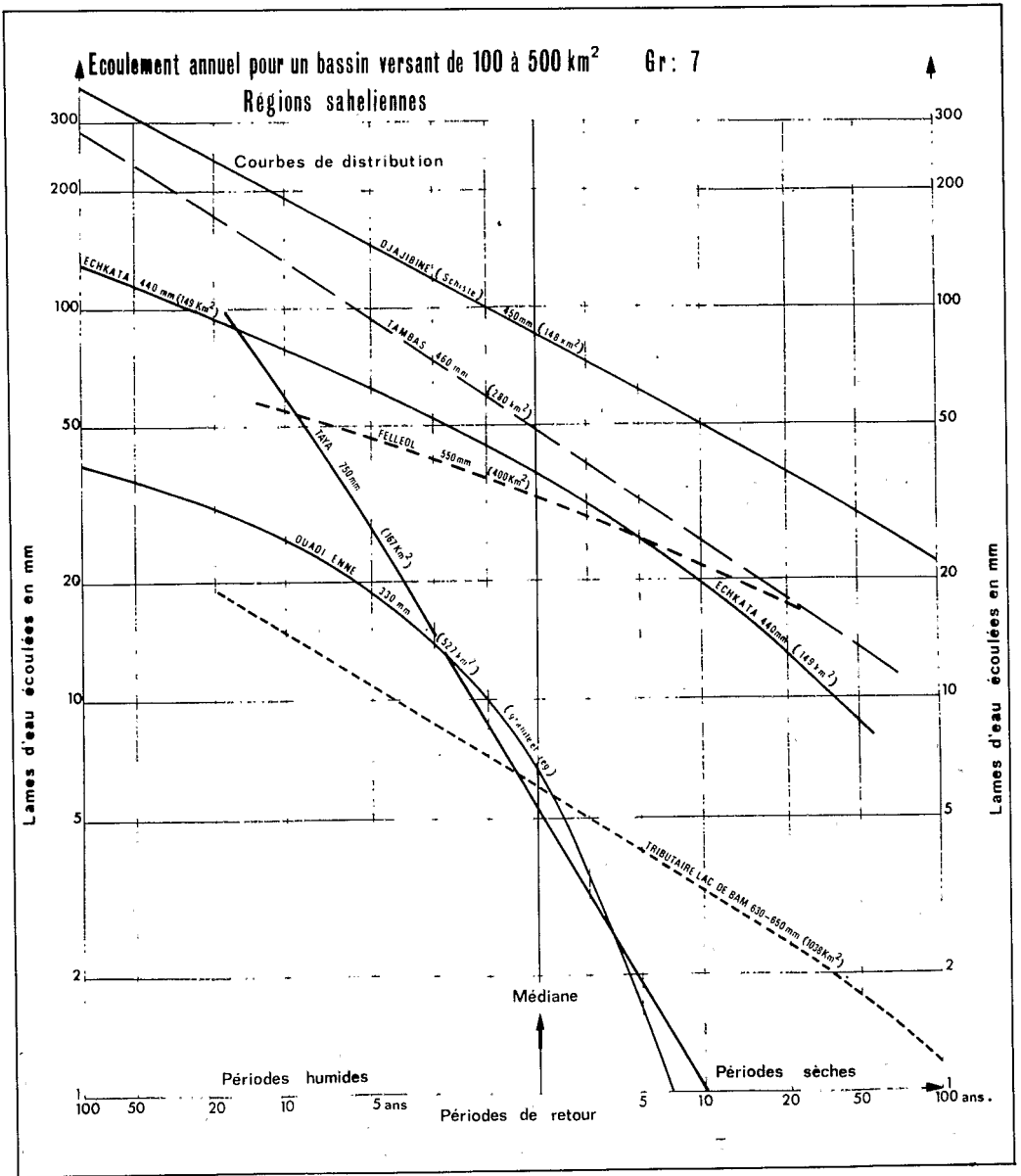
— En année très sèche, seules les zones de regs présentent un écoulement et, effectivement, en 1972, il semblait bien que l'année se passerait sans écoulement, lorsqu'une pluie tombant sur le reg a donné lieu à une crue d'importance moyenne ; l'écoulement total n'a peut-être pas dépassé 20 000 ou 30 000 m³ qui, répartis sur 527 km² correspondent à une lame écoulée dérisoire : 0,05 mm, la fréquence étant peut-être cinquantennale. Notons que si la zone de regs n'était pas au voisinage immédiat de la station, l'écoulement aurait été nul. On a calculé qu'en année décennale sèche ($P = 190$ mm), la lame d'eau écoulée était de l'ordre de 0,1 mm (pour 527 km²).

— En année médiane, la hauteur de précipitation est de 330 mm : à peu près tout l'ouadi Ambar concourt à l'écoulement, mais l'ouadi Enné au confluent n'apporte rien. Répartie sur tout le bassin, 527 km², la lame d'eau écoulée est de 6,6 mm.

— En année centennale humide, comme cela a été observé en 1961, l'ouadi Enné rejoint l'ouadi Ambar et y apporte un volume d'eau important. Pour une hauteur de précipitation voisine de 700 mm, la lame d'eau écoulée, toujours supposée répartie sur le bassin, est de 40 mm, $V = 21\,000\,000$ m³, l'écoulement a duré 26 jours avec des crues de plus de 90 m³/s.

Sur le graphique 7, on verra le diagramme de distribution qui montre le caractère très irrégulier de cet ouadi, lequel constitue un cas assez général. Il est fréquent, d'ailleurs, qu'une année sur deux l'écoulement soit dû uniquement au tributaire situé le plus à l'aval, auquel cas les calculs hydrologiques se ramènent à ceux des caractéristiques présentées page 16 ; mais en année excédentaire, les parties amont interviennent, et en année exceptionnellement humide tout le bassin concourt à l'écoulement. En outre, à partir de quelques centaines de kilomètres carrés, il arrive que les cours d'eau débouchent dans des mares ou des lacs qui ne déversent vers l'aval qu'en année exceptionnellement humide.

En terrain imperméable, dans l'Ader Douchi et la Maggia (Niger), ou sur certains tributaires de l'oued Ghorfa (Mauritanie), et avec des précipitations dépassant 500 mm, la dégradation est moins forte et le comportement du bassin est nettement plus homogène de l'amont à l'aval. Il en est de même dans les massifs montagneux où les lits gardent une forte pente comme en zone subdésertique dans une partie du massif de l'Aïr (Niger). Mais en zone sahélienne, à l'ouest du Nil, il n'y en a pas, à part le djebel Marra, d'où effectivement partent des ouadi importants.



On comprendra que, dans de telles conditions, on ne puisse pas fournir des données hydrologiques aussi précises que dans le cas précédent ; chaque ouadi est souvent un cas d'espèce, il faut bien étudier la géomorphologie du bassin et du lit avant de le rattacher à un cas connu et surtout examiner de très près les tributaires situés le plus à l'aval.

On étudiera à peu près les mêmes catégories de bassins que dans le cas précédent, en laissant de côté les zones à recouvrement sableux pour lesquelles l'écoulement est nul, sauf si les précipitations sont assez fortes et le socle imperméable à faible profondeur. On reviendra plus loin sur ce cas (page 32).

On distingue le cas des régions subdésertiques des régions sahé-
liennes.

**Écoulement annuel
sur des bassins
de 40 à 500 km²**

La dégradation hydrographique se produit dès l'arrivée en plaine. Seuls donnent lieu à écoulement les bassins de montagne ou les bassins sur sols assez peu perméables avec pente notable.

Bassins versants
de 40 à 500 km² en
zone subdésertique

En montagne, en particulier dans l'Aïr, et à condition que la pente du lit principal reste notable, en année voisine de la médiane, le coefficient de ruissellement est compris entre 10 et 20 %, correspondant à des valeurs de la lame écoulée comprises entre 20 et 40 mm sous l'isohyète 200 mm. On peut retrouver les mêmes chiffres pour des surfaces allant jusqu'à 1 000 km² s'il n'y a pas dégradation hydrographique. Même en montagne l'écoulement décroît rapidement dès que l'année devient déficitaire. En année décennale sèche, par exemple, le coefficient d'écoulement total pourrait être compris entre 3 % et 10 %, ce qui correspond à 3 mm et 10 mm. Mais on doit noter qu'en 1971, 1972 et 1973, la plupart des cours d'eau de l'Aïr ont présenté un certain écoulement à chaque saison des pluies. Cependant, en année cinquantennale ou centennale, pour de nombreux bassins de montagne, l'écoulement annuel est nul.

Il existe des bassins à pente moins forte avec des sols assez imperméables, mais également des zones de recouvrement sableux ou d'éboulis rocheux. Si le lit principal garde une certaine pente, le coefficient d'écoulement reste compris entre 3 % et 10 % en année médiane, la seconde valeur correspondant à l'isohyète 300 mm. En année décennale sèche, l'écoulement est souvent nul, mais dans les cas favorables, il atteint 5 %, soit 5 mm sous l'isohyète 200 mm. En année décennale humide, on peut s'attendre à des coefficients d'écoulement de 15 à 20 %, soit 48 à 66 mm. Seuls les bassins les plus propices au ruissellement de cette catégorie peuvent donner lieu à des aménagements dans des conditions relativement confortables, mais on doit retenir qu'entre les années décennales sèches et humides, l'écoulement varie de 1 à 50.

Ces deux catégories de bassins correspondent à une minorité. Il y en a beaucoup dont les conditions d'écoulement sont beaucoup plus mauvaises.

Les bassins sur sous-sol granite ou granito-gneiss couvrent au total de grandes surfaces et se présentent sous différents aspects.

Bassins versants
de 40 à 500 km²
en zone sahélienne

Ils peuvent être situés dans des massifs peu élevés à pente pas très forte et avec sols assez perméables ; c'est le cas de l'ouadi Enné sous l'isohyète 300 mm, à la limite nord de la zone sahélienne. On peut citer l'exemple du bassin versant de Taya (Guerra-Tchad) : avec une pente assez forte et un sol peu perméable, le coefficient d'écoulement pour l'année médiane est un peu inférieur à 1 %, correspondant à un écoulement de 5 mm (isohyète 750 mm), mais ce bassin ne présente pas à l'aval de reg argileux imperméable comme l'ouadi Enné.

La courbe de distribution des écoulements annuels, comme on peut le voir sur le graphique 7, est très raide, c'est pratiquement une droite (distribution gaussio-logarithmique). En année exceptionnellement sèche, l'écoulement est nul, en année centennale humide au contraire, il tombe 1 200 mm sur le bassin de Taya, au bout de un mois ou un mois et demi, les sols sont saturés et ils ruissellent assez bien compte-tenu de la pente d'où des écoulements très supérieurs à ceux de l'année médiane.

Si un bassin du même type, en plus du sol perméable, a une faible pente, la courbe est beaucoup moins raide et l'écoulement médian plus faible. On en a une idée par la courbe du tributaire du lac de Bam, qui garde encore un écoulement pas trop faible en année médiane et non nul en année sèche grâce à quelques zones un peu argileuses à l'aval.

Enfin, les granites ou granito-gneiss sont parfois recouverts de sols vertiques argileux comme en Haute-Volta le Felléol. La pente reste toujours faible. Le coefficient d'écoulement est alors plus élevé, 4 à 6 % en année médiane, soit une lame écoulée de 20 à 30 mm sous l'isohyète 500 mm.

En année décennale sèche, le coefficient d'écoulement ne décroît pas beaucoup grâce à la nature du sol, il reste compris entre 3 et 5 %, la courbe de distribution est peu inclinée.

Les bassins sur schistes de l'oued Ghorfa conservent un ruissellement notable quand ils ne comportent pas de recouvrements éoliens ni de zone d'éboulis perméables. L'oued Djajibine, qui présente à peu près les conditions optimales de ruissellement, pour cette région, a, en année médiane, un coefficient de ruissellement de 19 %, soit une lame écoulée de 86 mm, mais à côté, l'oued Echkata ne présente dans les mêmes conditions qu'une lame d'eau de 38 mm. En année sèche, l'écoulement à Djajibine est encore très acceptable : 22 mm pour l'année cinquantiennale. En année centennale humide l'écoulement est de 365 mm, ce qui correspond comme on le verra à des crues très violentes. La plupart des bassins de cette région naturelle correspondent à des intermédiaires entre les cas de l'oued Djajibine et l'oued Echkata.

Les bassins-types Ader-Doutchi-Maggia au Niger, avec leurs pentes argileuses et les sols marno-calcaires ruissellent assez bien, cependant les grès argileux des plateaux assez démantelés absorbent beaucoup d'eau.

Le bassin de Tambas, en année médiane, présente un coefficient d'écoulement de 10,5 %, ce qui correspond à une lame écoulée de 49 mm ; en année décennale sèche, l'écoulement annuel tombe à 18 mm, en année centennale humide, il atteint 95 mm. Cette région, qui pour les bassins de 25 km² présentait les records d'écoulement passe loin derrière la région de l'oued Ghorfa qui, elle, est dépourvue de plateaux de grès, lorsqu'il s'agit de bassin dépassant 100 km².

Ces exemples ne couvrent pas tous les cas que l'on peut rencontrer en zone sahelienne. Il convient de bien étudier la morphologie de la région et surtout des collecteurs principaux et des tributaires aval avant de chercher à se rattacher à un exemple. Il faut essayer de reconstituer l'écoulement de chaque sous-bassin de 25 km² et voir ce que peut devenir l'écoulement une fois arrivé dans la dépression principale, car, généralement il s'y perd.

Une des données les plus importantes à connaître est la crue décennale ou centennale. La crue de fréquence décennale n'est pas trop difficile à estimer et son débit maximum ou le volume qu'elle produit peut être utile pour comparer des bassins de divers types. On peut même passer de la crue décennale à la crue centennale par un coefficient, mais en zone sahelienne, ce coefficient varie très largement d'un bassin à un autre, surtout lorsqu'une proportion importante de la surface est perméable et que la pente générale est faible.

Pour les bassins de 100 à 500 km², on ne dispose pas d'études générales comme pour les bassins plus petits et, d'ailleurs, ce qui a été exposé page 25 concernant l'ouadi Enné, montre que toute généralisation systématique des résultats est pratiquement impossible. Nous

**Crues
exceptionnelles**

ne pourrions donner que quelques indications pouvant servir de jalons, en précisant que le cas de bassins sur granite avec lit principal à faible pente et sous 200 à 500 mm et le cas de bassins avec recouvrements éoliens partiels sont les plus difficiles.

Dans le tableau IV, on donnera quelques exemples :

- dans la première colonne, on a porté le nom du bassin et de très brèves indications sur sa nature ;
- dans la seconde colonne, la hauteur annuelle des précipitations (valeur médiane) ;
- dans la troisième colonne, la surface ;
- dans la quatrième colonne, le volume de la crue décennale ;
- dans la cinquième colonne, le débit de pointe en m³/s ;
- et dans la sixième, le débit spécifique en l/s x km².

TABLEAU IV

Crues décennales pour des bassins de 100 à 500 km²
en zones subdésertique et sahélienne

Bassins	P méd. mm	S km ²	V 10 ³ m ³	Q 10 m ³ /s	q ₁₀ l/s × km ²
Ouadi Sofaya (Tchad) pente modérée	120-130	345	750 (1)	12	35
Kori El Meki (Niger) pente forte sous-sol cristallin	140-160	165	3 500	200	1 200
Oued Dionaba (Mauritanie) pente assez forte	280	111	3 400	60	540
Ouadi Enné (Tchad) pente modérée sous-sol cristallin reg à l'aval	330-350	527	2 000- 2 500	70-80	130-150
Taya (Tchad) forte pente sous-sol cristallin	850	167	3 800	100	600
Felléol (Haute-Volta) assez faible pente sous-sol cristallin couvert d'argiles vertiques	550	400	5 000	(20)	(36)
Ba Ada (Haute-Volta) pente faible sous-sol cristallin sol perméable	610	500	(1 200)	(10)	(16)
Oued Djajbine (Mauritanie) pente notable sous-sol schiste sol imperméable	450-475	148	4 800	325	2'200
Oued Boudamé à Echkata (Mauritanie) pente assez faible sous-sol schiste sol perméable à l'amont	440-460	149	2 200	35	230
Oued Boudamé à Boudama pente modérée sous-sol schiste perméabilité variable	450-475	564	12 000	66	120
Tambas (Niger) pente modérée grès et argilo-calcaire	460	284	(6 000)	400	870

(1) Nota : 1 500 000 m³ si on considère le volume décennal, avec débit maximal 7 m³/s.

Le tableau IV ne présente que quelques exemples, et il est très délicat dans ces régions de tenter de donner des résultats généraux, car chaque cours d'eau est un cas d'espèce, surtout en région subdésertique ou pour des bassins à faible écoulement. Cependant, un certain nombre de constatations s'imposent :

1) On retrouve en région subdésertique les catégories I, II et III, l'ouadi Sofaya correspondant à peu près à la catégorie III, le Kori El Méki à la catégorie I. C'est un vrai cours d'eau de montagne dont le collecteur principal est à forte pente, il ne présente pas de dégradation hydrographique. On trouve un rapport de 1 à 30 entre la crue décennale du cours d'eau de catégorie III et celui de la catégorie I. Notons que dans la catégorie III, on doit distinguer le débit de crue décennale qui correspond à une averse violente vers l'aval du bassin, et le volume de crue décennale qui correspond à une averse assez intense, couvrant une vaste superficie mais il conduit à un débit de pointe nettement plus faible. L'oued Dionaba a un bassin dont les pentes sont modérées mais avec un sol souvent peu perméable. Un bon nombre de cours d'eau présentent des débits spécifiques de crue beaucoup plus faibles que l'ouadi Sofaya, ils sont généralement sans intérêt pour les aménagements.

2) Sur les bassins sahéliens, on rencontre, d'abord la grande famille des bassins sur granite ou granito-gneiss. Là aussi les débits spécifiques sont très variables : dans l'ordre des débits croissants, le Ba Ada présente une hauteur de précipitation annuelle voisine de 600 mm, c'est un bassin à la fois plat et perméable, aucune surface imperméable ne se trouve vers l'aval. La crue décennale est très faible ; on peut comparer à ce bassin un bon nombre de ceux du Ouadaï, malgré un relief plus marqué, leur débit spécifique est peu élevé. L'ouadi Enné, au bassin hétérogène, a un débit de crue décennale relativement élevé grâce aux regs de la partie aval. Le Felléol est très caractéristique de nombreuses régions du Sahel africain, le granite recouvert de sol argileux a un assez bon ruissellement, mais la pente étant très faible, les lits mal marqués et encombrés de végétations, la crue décennale est faible, bien que l'écoulement annuel soit notable. Le Taya, dans le massif du Guera au Tchad, est favorisé par la pente, mais une partie du bassin est perméable de sorte que le débit de crue décennale est très inférieur à celui des bassins de la catégorie I du régime subdésertique, mais il existe plus au sud, au Nord Cameroun, des bassins à forte pente très cultivés qui contiennent non seulement des arènes mais des sols argileux, et on retrouve alors des débits spécifiques dépassant $1\ 000\ \text{l/s} \times \text{km}^2$.

3) On trouve ensuite trois bassins voisins et tributaires de l'oued Ghorfa dans le Sud-Est de la Mauritanie, caractérisés par des glacis argileux sur schistes. Le maximum de ruissellement correspond à l'oued Djajibine avec $2\ 200\ \text{l/s} \times \text{km}^2$, le minimum par l'oued Echkata qui présente des éboulis, des zones perméables et un lit principal à faible pente encombré par la végétation, d'où un débit de crue décennale dix fois plus faible que sur l'oued Djajibine. Plus à l'aval, les affluents à assez fort ruissellement ont renforcé le volume de crue, mais le lit principal à faible pente freine l'écoulement, le débit de crue décennale est faible.

4) Le Kori Tambas, dans l'Ader Doutchi, a un bassin couvert en grande partie par des pentes argileuses à fort ruissellement, que l'on a déjà rencontrées sur le bassin de Galmi. Il est dans une région assez homogène, cependant, la pente et la morphologie du lit principal jouent un grand rôle. A ce point de vue, le Kori Tambas correspond plutôt à des conditions de ruissellement optimales.

De façon générale, entre les chiffres du tableau II et ceux du tableau IV, les débits spécifiques sont souvent passés de 10 à 1, sans qu'il soit possible de donner de règles générales.

Les crues de fréquences plus faibles, centennales par exemple, sont très mal connues, elles présentent des débits très supérieurs à ceux des crues décennales lorsque le bassin ruisselle mal, plus particulièrement vers les zones subdésertiques.

La concentration en sédiments pendant les crues varie encore plus d'un bassin à l'autre que dans le cas de bassin de 25 km². En effet, certains cours d'eau présentent des crues brutales généralisées sur tout le bassin, sans dégradation hydrographique, auquel cas la concentration en sédiment devrait être élevée, mais, en fait, il s'agit souvent de bassins cristallins où il ne reste que très peu de sol à éroder ; pour d'autres cours d'eau, la crue provient d'un petit bassin vers l'extrémité aval, et, dans ce cas, les eaux peuvent être très chargées ; enfin il peut s'agir d'une crue généralisée mais lente très amortie par la végétation dans le collecteur principal, et, dans ce cas, les eaux sont beaucoup moins chargées.

**Transports
solides**

En régime subdésertique de tels bassins sont rares, sauf en montagne. L'écoulement est souvent arrêté par une dune ou une zone de dunes. En régime sahélien, de tels bassins sont beaucoup plus fréquents, surtout vers le sud, mais si la pente du collecteur principal est faible et s'il est situé en terrain perméable, même sans recouvrement éolien, les apports du cours d'eau sont dérisoires. C'est le cas par exemple des cours d'eau du sud du Ouaddaï ou de la zone au nord du lac de Bam (Haute-Volta). On retrouve, bien entendu, tout ce qui a été dit page 25 concernant les particularités du régime hydrologique, avec cette différence que le lit principal est constitué souvent d'une dépression assez plate et argileuse, encombrée de végétation ou d'une succession de mares. Mais quelquefois le cours d'eau est assez vigoureux et l'écoulement peut se poursuivre assez loin. C'est le cas pour les cours d'eau dont le bassin versant dépasse 10 000 km², ils feront l'objet d'un paragraphe spécial.

**Bassins
versants
de plus
de 1 000 km²**

Généralités

Presque toujours le régime hydrologique est commandé par le tributaire le plus proche de la station où on étudie le cours d'eau. Dans le cas de l'ouadi Fera à Am Nabak, dont le bassin versant couvre 5 600 km², l'écoulement provient, 19 années sur 20, et peut-être 49 années sur 50, d'une zone de 80 km² située immédiatement à l'amont de Am Nabak.

Le seul massif montagneux bien développé avec vallées principales à pente assez forte est le Djebel Marra, dont les cours d'eau ne doivent subir que peu de dégradation hydrographique, et c'est pourquoi le Bahr Azoum qui en est issu parvient jusqu'au Tchad avec un débit important, mais l'hydrologie des cours d'eau de ce massif semble mal connue. Au sud de l'isohyète 750 mm, on trouve dans les montagnes du Nord-Cameroun des cours d'eau avec des bassins de plus de 1 000 km² sans dégradation notable, ce sont de véritables torrents qui rappellent ceux des monts de l'Aïr, avec des débits beaucoup plus importants.

On retrouvera les mêmes types de bassins que plus haut.

On peut se reporter à ce qui a été dit page 28. Il y a tout d'abord les cours d'eau de montagne dont le Kori Téloua dans l'Aïr, dont on peut esquisser la courbe de distribution des écoulements annuels à partir des trois points suivants :

**Écoulement annuel
sur des bassins
couvrant plus
de 1 000 km²**

- année médiane, lame écoulée 25 mm $K_e = 15 \%$
- année décennale sèche, lame écoulée 8 mm $K_e = 8 \%$
- année décennale humide, lame écoulée 50 mm $K_e = 19 \%$

Bassins versants
de plus
de 1000 km²
en zone
subdésertique

Quelques cours d'eau dans le Tagant, en Mauritanie, présentent probablement des conditions aussi favorables. Mais, dès l'arrivée en plaine, il y a dégradation hydrographique. Le Kori Téloua peut perdre 75 % de ses apports en moins de 30 km.

En sol assez peu perméable, avec pente notable, lorsqu'une partie importante à l'aval du bassin est active, le coefficient d'écoulement peut être compris entre 2 à 5 % en année médiane. Mais si la pente est faible et le sol assez perméable, le coefficient d'écoulement descend en dessous de 1 %, dans le cas du ouadi Féra, cité plus haut, il est très voisin de 0. Souvent, dans ce cas, le bassin actif ne peut pas atteindre 1 000 km².

En année décennale sèche, l'écoulement est nul pour cette dernière catégorie de cours d'eau, alors que le coefficient d'écoulement est de l'ordre de 1 % pour les cours d'eau présentant un coefficient d'écoulement compris entre 2 et 5 % en année médiane.

Sur sous-sol granitique et sur granito-gneiss, les bassins à très faible pente et au sol perméable ne coulent pas en année médiane.

Bassins versants
de plus
de 1000 km²
en zone
sahélienne

Ce cas mis à part, on peut schématiser l'écoulement annuel par trois cas types :

- le tributaire du lac de Bam en Haute-Volta, avec sol assez perméable, (une partie du bassin est endoréïque) et pente générale assez faible,
- le Bam Bam, cours d'eau assez torrentiel issu du massif de Guéra (Tchad), avec une pente assez forte mais une forte proportion de sols perméables,
- le Gorouol à Dolbel (Haute-Volta) a un bassin de pente modérée comportant une proportion assez forte de sol assez argileux recouvrant le granite.

On trouvera les trois courbes de distribution des écoulements annuels sur le graphique 8.

En année médiane, les lames d'eau et volumes écoulés sont les suivants :

— Tributaire du lac de Bam :

$$S = 1\,040 \text{ km}^2 ; E = 6 \text{ mm} ; V = 6\,200\,000 \text{ m}^3$$

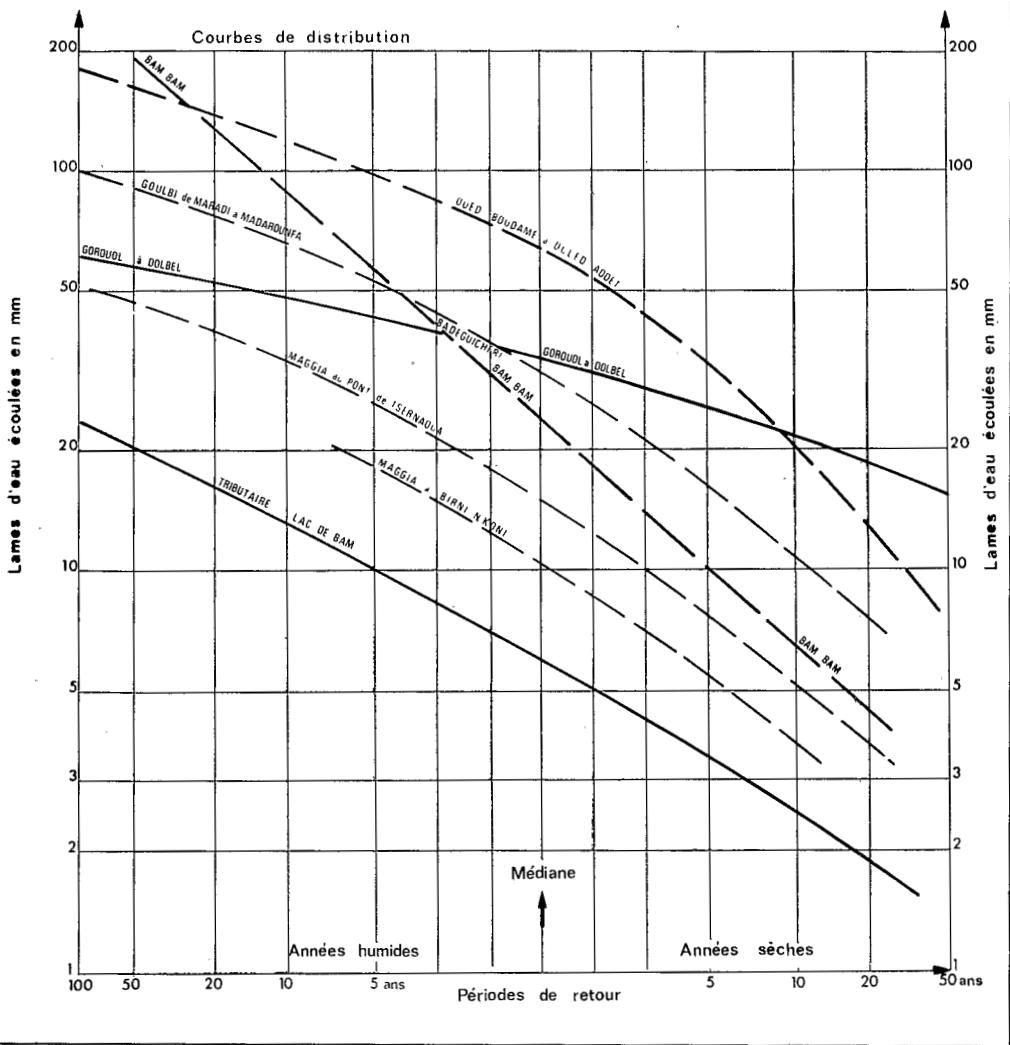
$$\text{— Bam Bam : } S = 1\,200 \text{ km}^2 ; E = 24 \text{ mm} ; V = 29\,000\,000 \text{ m}^3$$

$$\text{— Gorouol : } S = 7\,500 \text{ km}^2 ; E = 34,5 \text{ mm} ; V = 260\,000\,000 \text{ m}^3$$

On constate sur le graphique 8 que les deux bassins perméables présentent de très faibles écoulements en année sèche, encore doit-on noter que le Bam Bam est à la limite sud du Sahel, ce qui lui assure en année sèche des précipitations nettement plus abondantes que pour les deux autres bassins. La forte pente du Bam Bam conduit, en année humide, quand les sols sont saturés, à un fort écoulement, la faible pente du Gorouol joue bien sûr, dans ce cas, en sens inverse, d'où une courbe plus plate. On ne doit pas oublier que toutes ces courbes ont été établies avec des ordonnées logarithmiques, ce qui tend à réduire leurs pentes.

Les bassins argileux sur schistes ou sur les formations du continental intercalaire donnent lieu à des écoulements très acceptables tant que le cours d'eau principal présente une pente notable.

Ecoulement annuel pour un bassin versant de 1000 à 10.000 km² Gr: 8
Régions sahéliennes



Le graphique 8 présente trois exemples de bassins de ce type :

- L'Oued Boudamé à Ouled Addet (Mauritanie) avec un bassin versant de 1 125 km².
- Le Kori de Badeguicheri (Niger) à l'issue d'un bassin de 825 km².
- La Maggia au pont de Tsernaoua (Niger) : bassin versant de 2 525 km².

L'Oued Boudamé correspond à des conditions de ruissellement favorables, tout au moins dans la partie aval de son bassin. Les lames d'eau et volumes écoulés sont les suivants en années médianes :

— Oued Boudamé	E = 65 mm	V = 73 000 000 m ³
— Kori de Badeguicheri	E = 31 mm	V = 25 600 000 m ³
— Maggia	E = 15 mm	V = 38 000 000 m ³

De façon générale ces bassins ruissellent mieux que les bassins sur granite, sauf lorsque ceux-ci sont recouverts de produits d'altération argileux (cas du Gorouol). Mais dans la zone sahélienne proprement dite, le record reste à certains tributaires de l'Oued Ghorfa. Un peu plus au sud, les bassins montagneux du Nord-Cameroun présentent des lames d'eau écoulées qui, en moyenne, sont très supérieures à 65 mm.

En année sèche, les écoulements sont encore acceptables pour l'Oued Boudamé et le Kori de Badeguicheri (20 mm en année décennale pour l'un, 10 mm pour l'autre).

La Maggia présente une lame écoulee beaucoup plus faible, les plateaux de grès démantelés qui recouvrent une partie des bassins ne donnent lieu à aucun écoulement et les pertes dans la vallée du collecteur principal sont importantes.

Notons qu'à l'aval des stations qui ont servi à ces études la pente diminue, il y a une dégradation importante surtout pour les deux derniers bassins.

A Birni N'Koni, pour un bassin versant de 2 800 km² au lieu de 2 525 km², la lame d'eau écoulee de la Maggia décroît de 15 mm à 10,5 mm en année médiane.

De façon générale d'ailleurs, sauf pour l'Ouadi Fera, les chiffres que nous donnons ont été déterminés à l'amont de la partie du cours d'eau pour laquelle la dégradation hydrographique prend de très importantes proportions.

Pour faciliter les comparaisons, on considérera les crues de fréquence décennale comme pour les bassins de 100 à 500 km². Comme dans ce cas on ne peut donner que quelques indications. Sur le tableau V sont reproduites les données des crues décennales pour les bassins déjà cités plus haut ; les colonnes correspondent aux mêmes caractéristiques que dans le tableau IV.

Crues exceptionnelles

Si on compare les chiffres du tableau V à ceux du tableau IV, les débits spécifiques pour des bassins de même catégorie : Kori El Meki et Teloua, Taya et Bam-Bam, Felléol et Gorouol, Tambas et Badeguicheri, on constate une diminution très forte, elle serait encore plus importante si les stations du tableau V correspondaient à des cours d'eau déjà assez dégradés ! C'est-à-dire si on les avait implantés un peu plus à l'aval.

Il n'y a pas de rapport entre le débit spécifique et la hauteur de précipitation annuelle. L'imperméabilité du sol et surtout la pente du collecteur principal jouent un très grand rôle. La valeur la plus forte correspond au Kori Teloua qui est le moins arrosé mais qui est le seul vrai cours d'eau de montagne. On trouvera des chiffres nettement plus élevés au Sud de la limite méridionale du Sahel dans les montagnes du Nord Cameroun.

Le kori de Badeguicheri, vient immédiatement après, il draine une zone comportant une partie importante de terrains argileux d'assez forte pente et, en plus, il reçoit un affluent très actif, le Tambas (voir tableau IV) un peu à l'amont de la station (on a ici une démonstration de l'influence des tributaires aval).

L'Ouadi Fera aurait probablement un débit nul, même en année décennale, sans les quelques surfaces de reg à l'aval, mais le volume de crue très faible montre bien qu'il ne s'agit que d'une crue très locale.

Le Goroual à Dolbel au contraire (bassin argileux à faible pente) présente une crue intéressant l'ensemble de son bassin, d'où son vo-

TABLEAU V

Crues décennales pour des bassins de plus de 1 000 km²
en zones subdésertique et sahélienne

Bassins	P med. mm	S km ²	V 10 ³ m ³	Q max 10 m ³ /s	q ₁₀ l/s x km ²
Kori Telo (Niger) forte pente, sous-sol cristallin, pas de dégradation hydrographique	170	1 170	15 000	450	380
Quadri Fera (Tchad) (1) cristallin, faible pente endoreïsmes	400-450	5 600	1 300	120	21
Bam-Bam (Tchad) cristallin assez perméable, pente assez forte dégradation	800-835	1 200	30 000	350	290
Gorouol à Dolbel (Hte-V.) cristallin recouvert d'argile peu perméable pente faible	520	7 500	200 000	117	15,5
Oued Boudamé (Mauritanie) argile sur schiste pente modérée	450-475	1 125	40 000	200	180
Badeguicheri (Niger) grès et marnes calcaires, pentes transversales assez fortes	470	825	15 000	300	360
Maggia à Tsernaoua (Niger) grès et marnes calcaires, pentes transversales assez fortes	475-200	2 525		140	55

(1) ruissellement partiel à l'aval du bassin

lume ; en raison de la faible pente du lit collecteur sur une grande distance et son encombrement par la végétation le débit spécifique est très faible.

Le Bam-Bam est presque un cours d'eau de montagne, mais une partie notable du bassin est perméable et la pente du collecteur principal est inférieure à celle du Telo d'où un débit spécifique plus faible.

L'Oued Boudamé présente une pente notable, certaines parties de son bassin ruissellent comme l'Oued Djajibine (voir tableau IV), mais la majeure partie a les mêmes caractéristiques que le bassin amont à Echkata, de sorte que le débit spécifique est nettement plus faible que celui de Badeguicheri.

La Maggia reçoit des tributaires très actifs, mais les pertes sont importantes dans le lit principal, et toute la zone de grès démantelée ruisselle peu.

Le tableau V montre l'extrême variété de types de crues décennales d'un bassin à l'autre.

Il y a souvent un rapport entre la lame d'eau annuelle écoulée et le débit spécifique de crue, mais il faut tenir compte de l'origine de la crue. Si elle est provoquée uniquement, ou à peu près, par une pointe de débit d'un affluent situé à l'aval, la montée des eaux peut être très brutale le maximum relativement élevé, mais le volume total plus faible qu'une crue affectant tout le bassin avec un maximum beaucoup plus faible.

La morphologie du réseau hydrographique est assez caractéristique pour des bassins tels que le Telo, les lits du cours d'eau principal et de ses affluents sont comparables à ceux des Oueds d'Afrique du Nord.

Les crues de plus faible fréquence centennale, par exemple, peuvent présenter des débits très supérieurs à ceux des crues décennales, surtout pour les bassins qui en temps ordinaire ruissellent mal. A la limite, en zone sahélienne, certaines dépressions peuvent rester 30 ans sans aucun écoulement et être submergées par une crue comme cela a été le cas pour l'émissaire du lac de Bourzanga en 1974. Il est impossible bien entendu de donner des règles pour passer de la crue décennale à la crue centennale en zone sahélienne. Même le calcul de la crue décennale est difficile pour des bassins de plus de 1000 km², et il exige une très bonne connaissance du bassin et du réseau hydrographique.

De l'océan Atlantique au Nil il y en a très peu qui parviennent à drainer plus ou moins bien une superficie pareille sans dégradation totale : ce sont de l'ouest à l'est : le Korakoro (Mauritanie), la Kolimbine (Mauritanie) tous deux affluents du Sénégal, la Volta Blanche (Haute-Volta) dans son cours supérieur, le Gorouol (Haute-Volta, Niger) et la Sirba (Haute-Volta, Niger) affluent du Niger moyen, le Goulbi de Maradi (Nigeria, Niger), la Komadougou Yobe (Nigeria, Niger), tributaire du lac Tchad, le Ba Tha (Tchad) qui se jette dans le lac Fitri et le Bahr Azoum (Soudan, Tchad) qui en principe est un affluent du Chari. Ils proviennent de zones qui ruissellent bien comme le Karakoro et la Kolimbine, ou de massifs montagneux comme le Bahr Azoum, ou de la limite sud de la zone sahélienne comme la Sirba, le Gorouol ou même de la zone tropicale comme la Komadougou et le Goulbi de Maradi. Les régimes du Karakoro et de la Kolimbine sont à peu près inconnus. Les autres rivières ont été observées depuis près de 20 ans et il est donc possible de déterminer les principales caractéristiques de leur régime. En général lorsque ces cours d'eau coulent du nord au sud, l'influence de la partie septentrionale du bassin est presque nulle, ceux qui viennent du sud, comme la Komadougou, perdent une bonne partie de leurs apports en progressant vers le nord.

La valeur médiane de la lame d'eau écoulee annuelle est en général deux à trois fois plus faible que dans le cas des bassins de 100 à 500 km².

On distingue deux groupes : 1) La Volta Blanche, le Gorouol, la Komadougou dont l'écoulement annuel est voisin de 5 mm (valeur médiane) soit 0,7 à 1,2 % des précipitations. Ces bassins à faible pente comportent une partie importante de leur superficie à très faible écoulement, ou présentent des zones de pertes très importantes comme la Komadougou. 2) Le Ba Tha, le Bahr Azoum et la Sirba dont les bassins ruissellent mieux : les premiers parce que la pente générale du bassin est notable, le troisième parce que le sol est argileux. La lame d'eau écoulee annuelle médiane est voisine de 15 mm correspondant à un coefficient d'écoulement compris entre 2 et 3 %.

Bien entendu l'écoulement diminue quand la superficie augmente. Par exemple, pour le Ba Tha à Oum Hadjer (S = 32 950 km²) la lame d'eau écoulee E est égale à 14 mm, plus à l'aval à Ati pour 45 290 km² E est égale à 9,7 mm.

La Koumadougou à Bagara (S = 115 000 km²) présente une valeur de E égale à 5,4 mm ; à Gueskerou (S = 120 000 km²) E est seulement de 3,7 mm.

Les courbes de variation de la lame d'eau écoulee E, en fonction de la fréquence, ont été tracées pour les deux groupes : en année cinquantennale sèche toutes les courbes tendent à converger vers E = 2 mm, (1,5 mm peut-être pour la Sirba, 2,5 mm pour le Bahr Azoum).

En année humide l'écoulement croît rapidement pour les cours d'eau du second groupe, sauf pour le Bahr Azoum. En année centennale

Bassins versants sahéliens de superficie supérieure à 10 000 km²

humide E = 66 mm pour le Ba Tha à Ati, E = 100 mm pour la Sirba (S = 38 750 km²). Le Bahr Azoum à Am Timam (S = 80 000 km²) a une histoire fort compliquée. Il est créé par une série de torrents issus du Djebel Marra, arrive non sans difficultés à la frontière du Tchad et débouche dans la cuvette tchadienne où il se dégrade ; à l'amont de Am Timam plusieurs bras ont déjà quitté le Bahr principal ce qui explique qu'une certaine régularisation se produise en année humide. En année centennale humide à Am Timam E n'atteint que 24 mm. A l'aval de Am Timam le Bahr Azoum se perd, il est plus ou moins régénéré par les Bahrs qui viennent du Sud-Est du massif du Guera pour constituer le Bahr Salamat qui rejoint le Chari.

Pour les cours d'eau du premier groupe, les pertes deviennent très importantes en année humide pour la Komadougou et le Gorouol, de sorte que la valeur de E en année centennale humide reste comprise entre 5 et 10 mm, la Volta Blanche fait exception car elle coule du nord au sud et ses affluents méridionaux ont un régime un peu comparable à celui de la Sirba, en année centennale humide E est peut-être de l'ordre de 20 mm à la station de Wayen (S = 20 000 km²).

Le régime saisonnier est différent de celui des cours d'eau précédents. On ne se trouve plus en présence de pointes de crues isolées, mais d'une période annuelle d'écoulement continu. Sur le Ba Tha ou le Bahr Azoum le lit reste à sec pendant 9 mois. Le flot de crue arrive au début du mois d'août, en quelques heures le débit atteint 100 m³/s, et en quelques jours le débit moyen de hautes-eaux ; pendant deux mois l'hydrogramme présente quelques fluctuations, la décrue s'amorce début octobre et dure un mois ou deux, et il ne reste plus après que quelques mares résiduelles à l'amont de Am Timam.

Sur la Komadougou la crue est beaucoup plus tardive par suite des pertes très importantes dans le cours moyen. La Sirba presque tropicale présente un hydrogramme un peu différent.

On peut avoir une idée de l'importance des crues par le tableau suivant qui présente les débits de crues de fréquence décennale.

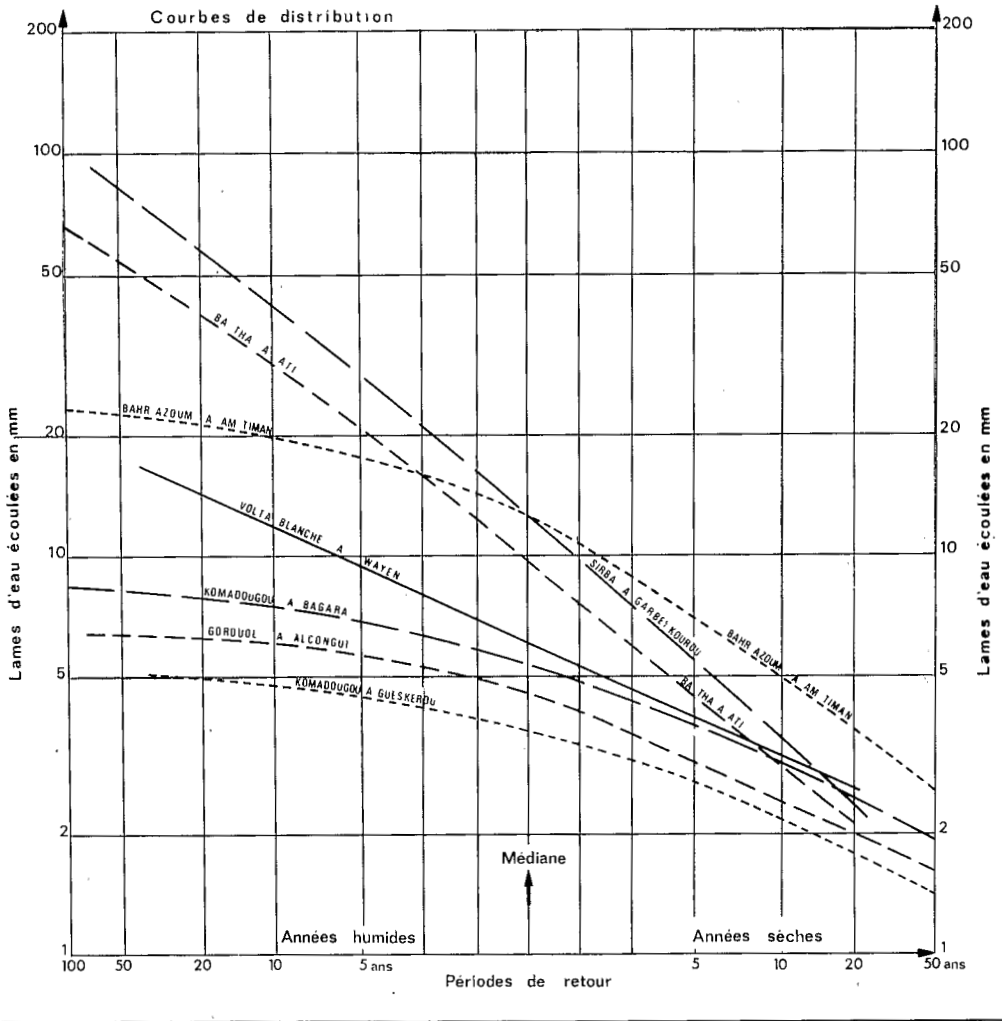
TABLEAU VI

Crues décennales pour des bassins de plus de 10 000 km²
en zone sahélienne

Stations	Surface km ²	Débit maximal de crue m ³ /s	Débit spécifique 1/s x km ²
Komadougou à Bagara	115 000	90	0,8
Komadougou à Geskerou	120 000	39	0,3
Gorouol à Alcongou	44 850	100	2,2
Volta Blanche à Wayen	20 000	250	12,5
Bahr Azoum à Am Timan	80 000	360	4,5
Ba Tha à Oum Hadjer	32 950	550	17
Ba Tha à Ati	45 290	500	11
Sirba à Garbey Kourou	38 750	500	13

On n'a pas indiqué ici le volume de crue, il est très difficile d'individualiser une pointe de crue sur l'hydrogramme annuel.

Les débits spécifiques sont très faibles. On reconnaît les rivières dont la lame écoulée est faible en année humide, le Bahr Azoum et surtout le Gorouol et la Komadougou où les pertes sont énormes. Il serait trop long d'ailleurs d'expliquer ici les particularités de l'écoulement du flot d'inondation dans les différents cas qui sont assez bien connus. La



Volta Blanche, le Ba Tha et la Sirba ont des débits spécifiques de crues faibles mais beaucoup plus élevés que les précédents. La Kolimbiné et le Karakoro seraient à rattacher à ce dernier groupe.

FLEUVES TROPICAUX PARVENANT AU SAHEL

Ce sont essentiellement le Nil, le Logone, le Chari, le Niger et le Sénégal. Tous ont un bassin supérieur bien arrosé et coulent vers le nord, ils y rencontrent à la fois le climat sahélien et des zones très plates, restes d'immenses lacs où ils subissent la dégradation hydrographique sous la forme suivante : en saison des pluies l'inondation s'étend sur des superficies énormes ; des bras se détachent du fleuve, il s'agit d'un chenal net faisant une coupure dans les berges du lit principal ou plus souvent derrière le léger bourrelet de berges, de légères dépressions se forment et se rejoignent pour constituer un chenal. Ce chenal

peut rejoindre le bras principal après un parcours plus ou moins long, se perdre dans la plaine, alimenter un lac, ou rejoindre un autre fleuve comme dans le cas du Logone.

Deux dépressions partant du Logone rejoignent : l'une les lacs Toubouris puis le Mayo Kebbi affluent de la Bénoué elle-même affluent du Niger, l'autre un affluent du Mayo Kebbi. Les eaux du Logone rejoignent donc pour une faible part l'Océan, et pour la majeure partie le Chari et le lac Tchad.

Les réseaux hydrographiques sont donc très compliqués et peuvent se prêter à des aménagements hydrauliques intéressants, mais les pertes par évaporation sont énormes : de 1 à 2 m par an suivant la durée de la submersion. En schématisant à l'extrême on peut décrire l'hydrographie de ces grands fleuves comme suit :

La branche mère principale du Sénégal, le Bafing vient de Guinée, reçoit le Bakoy et le Baoulé. Sur sa rive droite il reçoit deux affluents sahéliens : la Kolimbiné et le Karakoro vus plus haut. A Bakel, à l'amont des zones de dégradation hydrographique sur un bassin théorique de 270 000 km², 50 % sont situés en zone sahélienne. Il coule alors vers le nord-ouest au milieu d'une large plaine d'inondation avec bras secondaires, îles, etc. puis son cours s'infléchit vers l'ouest, des bras importants quittent le fleuve sur la rive droite et la rive gauche pour alimenter des lacs dont le plus important est le lac de Guiers, et il rejoint l'océan à Saint-Louis.

Le Niger est en fait constitué par trois branches mères venant de Guinée : le Niger, le Niandan et le Milo. Jusqu'à Bamako puis Segou où il rejoint la zone sahélienne, c'est un fleuve tropical normal ; à Segou un premier bras plus ou moins fossile se détache vers le nord et le Niger débouche dans la cuvette lacustre dont l'étendue couvre 80 000 km² avec des bras innombrables en un grand nombre de lacs.

A une centaine de kilomètres à l'aval de Segou, le Diaka quitte le Niger sur la rive droite et finit par rejoindre péniblement le lac Débo ; mais après le départ du Diaka le fleuve principal reçoit plus en aval, à Mopti, le Bani affluent important.

La plaine entre les deux cours d'eau est traversée par de nombreux bras qui assurent des liaisons bien avant le confluent, puis le Niger rejoint le lac Débo, d'où partent deux bras : l'Issa Ber vers le nord et le Bara Issa vers le nord-est, celui-ci alimente une série de lacs vers la rive droite, alors que l'Issa Ber alimente d'autres lacs sur sa rive gauche, les deux bras se réunissent à l'amont de Diré, quelques bras se séparent du fleuve sur la rive gauche pour alimenter une série de lacs dont le plus grand est le lac Faguibine ; enfin vers Tombouctou les inondations prennent des proportions raisonnables et le lit majeur se rétrécit encore avant d'atteindre le seuil de Tossaye où s'est effectuée autrefois la capture du Niger qui s'oriente vers le sud-est et quitte progressivement le Sahel. Il recevra sur sa rive droite des affluents sahéliens : le Gorouol, la Sirba dont il a été question plus haut, avant de rejoindre les zones tropicales.

Le Logone est constitué de la M'vina et de la M'béré qui descendent de l'Adamaoua, le fleuve s'infléchit peu à peu vers le nord et vers Moundou, entre dans la cuvette tchadienne. A partir de Laï ses ennuis commencent, sur sa rive droite se détache une dépression constituant le Ba Illi qui, après bien des pertes, le rejoindra beaucoup plus loin ; puis, sur sa rive gauche s'en séparent les deux dépressions qui alimentent la capture. Au-delà de Bongor plusieurs bras quittent le Logone et essayent de rejoindre directement le lac Tchad avec un succès très limité ; le bras principal du Logone se jette dans le Chari immédiatement à l'amont de N'Djamena.

Description générale

Le Chari a une histoire plus compliquée, l'hydrographie étant fortement marquée par les traces de la forte hydraulicité des millénaires passés et les fleuves plus ou moins fossiles qu'ils ont laissés. On a pris l'habitude d'appeler Chari un petit cours d'eau constitué par la réunion de trois rivières : le Bangoran, le Bamingui et le Gribingui issus de la chaîne des Kaga en République Centrafricaine, ces cours d'eau ont un régime tropical humide normal.

Le Chari débouche immédiatement à l'extrémité sud de la cuvette tchadienne correspondant à la mer paléotchadienne, c'est-à-dire que dès sa naissance il aura une certaine tendance à la dégradation hydrographique. Il reçoit alors sur sa droite l'Aouk collecteur plus ou moins efficace des petits cours d'eau actifs qui, issus des collines et petites montagnes du Nord de la R.C.A., se jettent dans la plaine marécageuse qui constitue au sud-est du Tchad le prolongement de la cuvette tchadienne.

Certains affluents du Bahr Aouk communiquent peut-être avec des affluents du Nil, mais les échanges de débits sont certainement insignifiants. Puis le Chari à l'aval de la ville de Sahr reçoit le Bahr Sara, cours d'eau très analogue au Logone supérieur, mais à débit spécifique plus faible. Il reçoit sur sa droite le Bahr Salamat cours d'eau sahélien dont on a exposé l'hydrographie plus haut. C'est le dernier représentant des importants cours d'eau qui, issus des montagnes à l'ouest du Tchad, étaient autrefois les principaux tributaires de la mer paléotchadienne. Actuellement il est réduit à fort peu de chose.

La plaine d'inondation assez large sur la rive droite, communique avec un bras qui rejoint le collecteur des torrents issus des contreforts du massif du Guera, le Ba Tha Lairi, communication sans importance, puis un bras important quitte le Chari, le Ba Erguig qui ne restitue au fleuve qu'une petite partie de ses eaux ; enfin le Chari reçoit le Logone en amont de N'Djamena après que quelques bras de communications aient joint les deux cours d'eau. Il se jette dans le lac Tchad par un vaste delta. Depuis Sahr ses pertes sont relativement moins importantes que le Logone.

En ce qui concerne le Nil, on traitera séparément le Nil Blanc et le Nil Bleu puisque le confluent avec le Nil Bleu se situe au nord du 15° parallèle en zone désertique, donc au-delà du Sahel.

Bien qu'après la traversée du Sahel, le Nil Blanc présente un régime aussi régulier que le Logone, à Logone Birni son cas est assez différent. Il arrive en effet dans les zones sahéliennes au voisinage de Bor avec un hydrogramme annuel déjà assez régulier. Mais la zone inondée couvre une étendue beaucoup plus grande et les pertes y sont relativement plus élevées.

On sait que le Nil Blanc, ou Bahr El Jebel, dans sa partie amont, est constitué par la réunion de deux systèmes hydrographiques : celui des lacs Albert et Edouard, et celui des lacs Victoria et Kioga. Du lac Victoria au lac Albert, le collecteur du second système s'appelle le Nil Victoria sur lequel se trouvent les très belles chutes Murchinson. Le premier système correspond surtout à des rivières de montagne. Le second comporte beaucoup plus de marécages depuis le tributaire principal du lac Victoria, la Kagera. Le régime de ces rivières est équatorial avec en principe deux périodes de hautes-eaux qui se transforment souvent en une très longue saison de hautes-eaux de décembre à août, mais les différences de perméabilité du sol, de pente, de régime pluviométrique, résultant de différences d'altitude et d'exposition, sont telles que la variété de l'abondance des rivières est très grande. Elles sont régularisées par les marécages et les lacs. L'ensemble du bassin étant encore l'objet de mouvements tectoniques, les captures sont nombreuses, le sens de l'écoulement a changé dans un

certain nombre de rivières et il existe des communications entre les deux systèmes telles que la Kafou entre le lac Albert et le lac Kioga. Il résulte de cette régularisation, que sur la Kagera, le rapport des débits moyens mensuels extrêmes $\frac{318 \text{ m}^3/\text{s}}{143 \text{ m}^3/\text{s}}$ n'est que de 2,2 ; à Mongalla nettement après la sortie du lac Albert et avant l'entrée du Bahr El Jebel dans le Sahel, le rapport n'est plus que de $\frac{1\ 050 \text{ m}^3/\text{s}}{655 \text{ m}^3/\text{s}}$ 1,6.

Les deux systèmes hydrographiques se rejoignent à l'extrémité nord du lac Albert pour former le Nil Albert qui est un cours d'eau calme jusqu'à la frontière du Soudan. Il prend alors le nom de Bahr El Jebel et présente une série de rapides, puis à Juba à l'amont de Mongalla, il entre dans la plaine sédimentaire aussi plate que la cuvette tchadienne et malgré une hauteur de précipitation de l'ordre de 1 000 mm par an, la dégradation hydrographique commence. C'est le début des marais du Sudd. Elle s'accroît en progressant vers le Nord. Après Bor des bras importants quittent le fleuve principal dont le plus connu est le Bahr El Zeraf ; le Bahr El Jebel reçoit dans les marais de sa rive gauche quelques affluents tropicaux venant de la frontière de la R.C.A. Il reçoit enfin toujours à travers ces marais, le Bahr El Ghazal qui se comporte un peu comme l'Aouk : c'est un collecteur qui reçoit d'autres cours d'eau tropicaux actifs, mais fonctionne plus mal que l'Aouk, et en plus, il reçoit venant du nord par l'intermédiaire du Bahr El Arab, quelques ouadis comparables au Bahr Salamat venant comme lui du Djebel Marra. Le Nil Blanc tourne alors vers l'est, reçoit le Sobat, cours d'eau tropical, qui lui aussi a subi des pertes très importantes dans les marais de son cours moyen que l'on englobe généralement dans les marais du Sudd, et se dirige avec une pente très faible vers Khartoum, mais sans dégradation notable. Il est bordé alors d'un lit majeur où les pertes sont encore notables et son cours est très lent.

La traversée du Sahel conduit à des pertes très importantes, comme on le verra plus loin. La superficie totale du Sudd, 80 000 km², est d'ailleurs comparable à celle du Delta central nigérien. Mais l'hydrogramme déjà très mou au départ a une forme beaucoup moins modifiée par le Sahel.

Le Nil Bleu, qui vient du lac Tana, est alimenté par le plateau éthiopien. C'est un fleuve tropical puissant qui débouche en plaine non loin de Roseires après la frontière soudano-éthiopienne, il entre alors en région sahélienne où il subit également des pertes notables, dont une partie est particulièrement bénéfique puisqu'elle résulte de la dérivation à Sennar d'une partie de ses eaux pour la riche plaine d'irrigations de la Gezireh entre le Nil Blanc et le Nil Bleu. Le Nil Bleu reçoit sur sa rive droite deux affluents importants à régime sahélien : le Dinder et le Rahad, dont le régime rappelle celui du Ba Tha, avec des débits beaucoup plus importants. A Khartoum, le volume annuel du Nil Bleu est le double de celui du Nil Blanc.

Le régime du dernier affluent du Nil, l'Atbara, est intermédiaire entre les régimes sahéliens et tropicaux, son débit moyen est la moitié de celui du Sénégal.

Il serait trop long de présenter ici le bilan hydrologique de façon complète, même pour un seul fleuve. On considérera seulement la différence des volumes annuels arrivant dans la zone de dégradation hydrographique, et en sortant pour chaque fleuve, sauf pour le Chari qui lui arrive au lac Tchad sous l'isohyète 300 mm, où ses eaux s'évaporent pour 95 %, les pertes par infiltration étant de l'ordre de 5 %. Les données sont présentées dans le tableau n° VII.

Les valeurs qui y figurent correspondent à l'année médiane et les cours d'eau y sont présentés de l'ouest à l'est.

Quelques indications sur l'évolution des débits à la traversée des zones sahéliennes

TABLEAU VII

Stations	Débit moyen annuel	Volume annuel milliards de m ³
Sénégal à Bakel	750 m ³ /s	23,6
Sénégal à Dagana	700 m ³ /s	22
Niger à Koulikoro + Bani à Mopti	2 135 (1 480 + 655) m ³ /s	67 (46,5 + 20,5)
Niger à Diré	1 140 m ³ /s	36
Niger à Niamey	990 m ³ /s	31,2
Logone à Laï	530 m ³ /s	16,7
Logone à Logone Birni	380 m ³ /s	12
Chari à N'Djamena	1 220 m ³ /s	38,5
Bahr El Jebel à Mongalla	880 m ³ /s	27,8
Affluents du Nil de Mongalla à Khartoum (1)	990 m ³ /s	31 (14 + 17)
Nil Blanc à Khartoum	825 m ³ /s	26
Nil Bleu à Roseires + Affluents	2 860 m ³ /s	90
Nil Bleu à Khartoum	1 650 m ³ /s	52

(1) Débits comptés avant l'entrée dans la zone sahélienne, pour tous les affluents.

Le Sénégal semble ne présenter que des pertes faibles, mais Dagana est situé à l'amont de l'émissaire alimentant le lac de Guiers et du Delta.

L'ensemble Nil Blanc, Nil Bleu et affluents apporte, dans la zone sahélienne, près de 150 milliards de m³ et à Khartoum il n'en sort que 78 milliards, soit 52,5 %.

Le fleuve serait deux fois plus puissant sans la traversée de la zone sahélienne, mais on doit ajouter que dans les pertes on a tenu compte de la consommation en eau des réservoirs aménagés par l'homme, en particulier le réservoir créé par le barrage de Sennar, et surtout de la dérivation importante des eaux destinées aux irrigations de la Gezireh, mais ces pertes sont beaucoup moins importantes que celles provoquées par les marécages du Sudd.

Le Niger est presque aussi éprouvé puisqu'il ne reste plus que 53,5 % à Diré de ce qui a été apporté par l'ensemble Niger et Bani au delta central nigérien.

Si on considère le Niger à Niamey, le volume annuel est réduit à 46,6 % des apports au delta central nigérien.

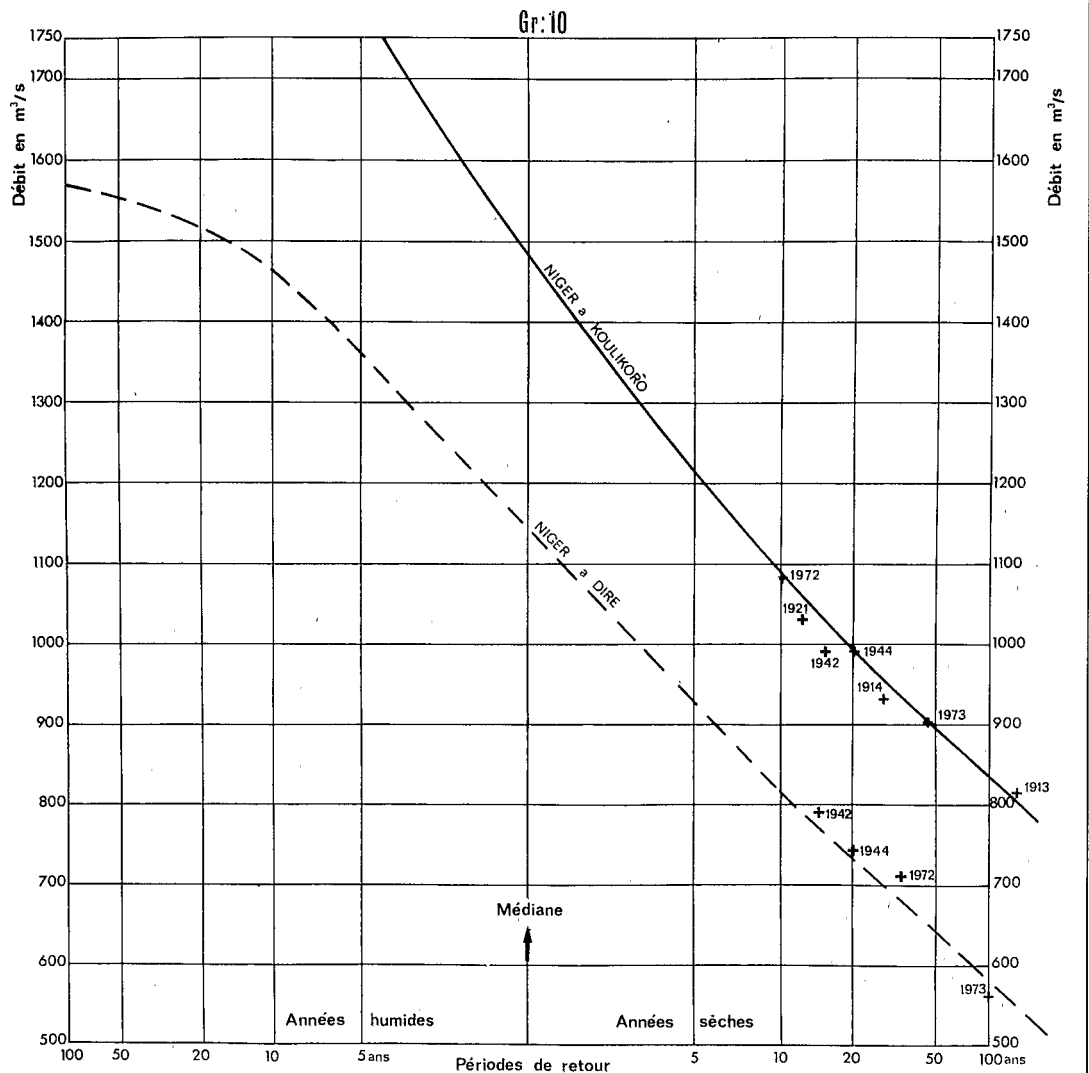
Bien entendu la proportion d'apport perdu par évaporation varie d'une année à l'autre. Les pertes sont beaucoup plus faibles en année déficitaire pour certains cours d'eau.

A Dagana, sur le Sénégal, en année de période de retour 5 ans le débit est le même qu'à Bakel. Pour d'autres fleuves, comme le Niger, si en valeur absolue les pertes diminuent, elles restent encore notables. Par exemple si en année médiane les apports sur le Niger et le Bani correspondent à un débit moyen annuel total de 2 135 m³/s, donnant lieu à Diré à 1 140 m³/s soit 53,5 %, en année centennale sèche le débit moyen annuel total passe à 1 200 m³/s environ ne laissant plus à Diré que 570 m³/s, soit 42 %, mais la perte dans le delta central nigérien n'est plus que de 19,4 milliards de m³, au lieu de 31 milliards de m³ en année médiane.

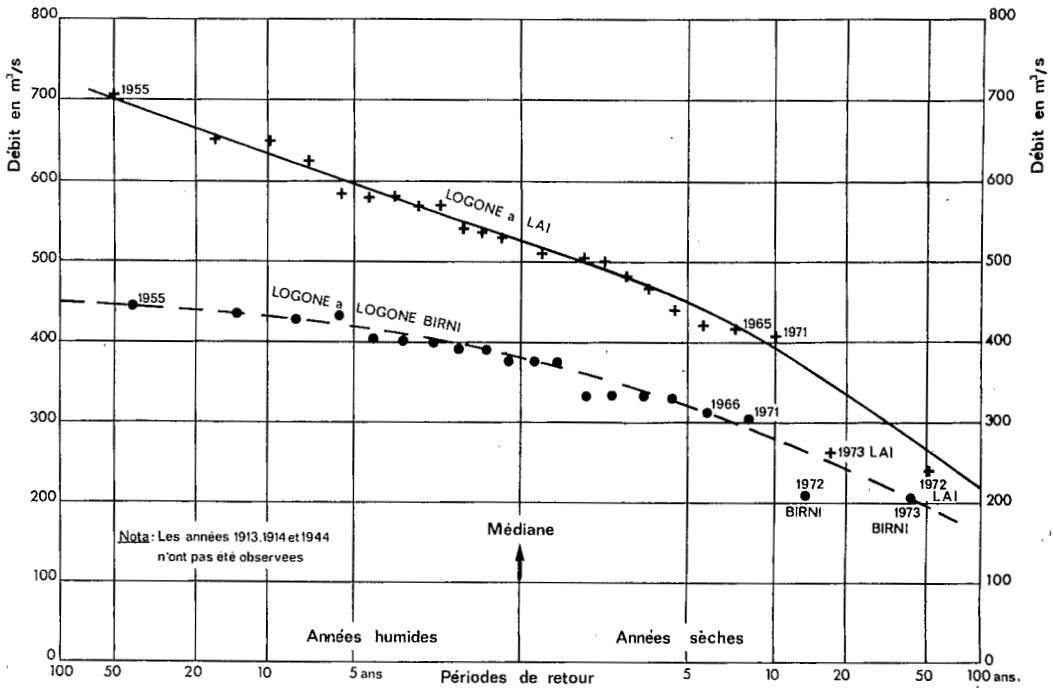
En année très humide les pertes augmentent très fortement dans le Sahel. En année centennale humide par exemple, la somme des débits moyens apportés par le Niger et le Bani est de 3 250 m³/s, dont 1 565

parviennent à Diré, soit 48 %, les pertes sont de 53 milliards de m³. La courbe de distribution des modules du Niger à Diré tend à s'aplatir vers les années humides montrant l'importance de la régularisation (voir graphique n° 10). Le phénomène est beaucoup plus net sur le Logone. A Logone Birni, la courbe tend presque vers une asymptote correspondant à 460 m³/s. La raison en est simple, le flot d'inondation s'étalant sur une très grande largeur dans les plaines, la cote dans le lit principal ne monte que de quelques cm de plus pour une crue tout à fait exceptionnelle, et le débit maximum tend vers une constante (voir graphique n° 11).

Modules annuels du NIGER à KOULIKORO et à DIRE _Courbes de distribution statistique_



Nota: Les années 1913 et 1914 n'ont pas été observées à DIRE



Cet aplatissement des courbes de distribution est un phénomène courant à la sortie des plaines d'inondation sahéniennes ; on l'observe également sur le Sénégal, le Nil Blanc. Il est déjà sensible sur les grands cours d'eau sahéniens tels que la Komadougou ou le Bahr Azoum.

Ces marais immenses où les grands fleuves tropicaux perdent par évaporation, une grande partie de leurs apports présentent, sur le plan économique, des aspects bénéfiques non négligeables.

— Tout d'abord, dans des régions où l'alimentation des populations est déficitaire en protéines, ce sont des zones de pêche particulièrement productives. Même les régions inondées temporairement sont utiles du point de vue de l'hydrobiologie, car ce sont des zones de reproduction du poisson.

— En pleine saison sèche les plaines d'inondation fournissent des pâturages très appréciés. Il y pousse même une graminée aquatique le « bourgous » précieuse pour la nourriture du bétail.

— Enfin, le système hydrographique très complexe se prête facilement aux aménagements d'hydraulique agricole, les cultures de riz et de coton étant les plus fréquentes, ainsi que les cultures de décrues telles que celle du Sorgho, culture que l'on retrouve non seulement dans les deltas intérieurs des grands fleuves tropicaux, mais aussi dans les plaines d'épandage des petits cours d'eau sahéniens.

En année très déficitaire, comme pendant la période 1971-1973, on voit d'après les graphiques 10 et 11 que le volume de la crue annuelle devient très faible, la superficie de ces plaines inondées diminue for-

Intérêt économique des zones de dégradation hydrographique des grands fleuves tropicaux

tement, il arrive même comme pour le Logone que la rivière ne déborde pas de son lit apparent, ce qui bouleverse complètement l'agriculture, l'élevage et la pêche dans ces régions, alors que dans les régions sahéliennes situées à côté de ces plaines d'épandage, le déficit des précipitations a conduit à la réduction des surfaces des pâturages, et à une diminution du nombre de points d'eau ; ceci nous conduit à un bref examen de la sévérité de la sécheresse de la période 1968-1973.

ASPECT HYDROLOGIQUE DE LA SECHERESSE 1968-1973

On doit noter, tout d'abord, que le déficit de précipitations annuelles peut avoir des conséquences diverses suivant la répartition de pluies dans le temps. Des averses bien réparties peuvent donner lieu à une récolte de mil acceptable, même si leur hauteur totale annuelle est déficitaire. Au contraire, des averses très concentrées dans le temps peuvent conduire à un fort écoulement dans les oueds alors que les cultures et les pâturages sont en mauvaise condition.

On ne considérera dans ce qui suit que l'aspect hydrologique des sécheresses, c'est-à-dire le déficit d'alimentation des cours d'eau. On constate alors qu'une grande sécheresse pour les pâturages ou les cultures correspond bien à une grande sécheresse du point de vue hydrologique, mais que la sévérité n'est pas nécessairement la même.

Comme dans ce qui précède, on a analysé séparément le cas des cours d'eau qui ont pris naissance dans le Sahel, et celui des cours d'eau tropicaux qui y parviennent.

Les informations dont on dispose ne couvrent qu'une partie de la zone sahélienne, elles sont tout à fait insuffisantes pour la partie occidentale du Sahel, du Delta central nigérien à l'Océan Atlantique, or c'est peut-être la région qui a été la plus durement touchée.

Il n'existe aucune donnée hydrologique concernant les cours d'eau sahéliens sur la sécheresse 1940-1945, et aucune bien entendu sur la sécheresse 1913-1914. Cependant, malgré la brièveté de la période d'observation, l'établissement d'une vingtaine de courbes de distribution statistique des écoulements annuels permet de dégager un certain nombre de conclusions :

— Conformément aux indications données par les relevés pluviométriques, le caractère déficitaire de *chacune* des quatre années varie beaucoup d'un cours d'eau à l'autre, sur toute la bande sahélienne. L'année 1970 est même largement excédentaire pour une partie importante du Sahel alors que sur le Goudebo en Haute-Volta, elle a donné lieu à un déficit que l'on n'observe que tous les dix ans ou vingt ans.

— L'année la plus déficitaire n'est pas la même suivant les régions. En général c'est l'année 1972. Il est à noter que si on considère la période 1965-1973, au lieu de la période 1970-1973, l'année 1968 correspond en général à un déficit plus grave, mais elle est très souvent séparée des années sèches 1971, 1972 et 1973 par une année excédentaire généralement en 1970, comme on l'a dit plus haut.

— En général même, si l'on englobe l'année 1968 dans la période sèche considérée, la période de retour n'est pas très élevée. Dans un bon nombre de cas où les observations s'étendent sur quinze ou vingt ans, les années 1957, 1960 ou 1965 sont plus déficitaires ou présentent des débits moyens annuels voisins des plus faibles de la période 1965-1973 ce qui prouve, malgré la brièveté des périodes d'observa-

Cours d'eau sahéliens

tion, que pour les cours d'eau sahéliens la période de retour est nettement inférieure à cinquante ans, on peut se demander quel serait le classement si on connaissait les données de la période sèche 1940-1945.

Ceci est probablement inexact pour la Mauritanie ou le Sénégal où la sécheresse paraît avoir présenté un caractère tout à fait exceptionnel. Par contre, sur une partie du Niger (Bassin de la Maggia) ou de la Haute-Volta (Nord de Ouagadougou), les déficits les plus faibles de la période 1965-1973 ne sont pas très rares. Sur la Maggia la période de retour de l'année 1968 est de cinq ou six ans, celle de l'année 1971 est de quatre ans seulement ; sur le lac de Bam la période de retour de 1968 est de dix ans, celle de 1972 de six ans.

En général, du Mali au lac Tchad, les périodes de retour de l'année la plus sèche de la période 1970-1973 varient de cinq à douze ans. L'année 1968 présente parfois une période de retour de vingt-cinq ans.

— Au Tchad, la sécheresse a été plus sévère, les périodes de retour pour les grands cours d'eau varient de dix à vingt ans.

— Ce qui paraît beaucoup plus rare — et qui a eu des conséquences dramatiques — c'est la succession de deux ou trois années sèches de 1970 à 1973, et les cours d'eau dont le régime hydrologique d'une année est lié à l'abondance de l'année précédente, c'est-à-dire ceux qui traversent de vastes zones plus ou moins marécageuses, comme la Komadougou, ou qui sont alimentés par de grandes nappes souterraines à faible profondeur, comme la Korama, présentent à la fin de la période des déficits beaucoup plus graves : la période de retour pour la Komadougou de l'année 1973 est de quarante ans avec un écoulement égal à 34 % de l'écoulement médian. Sur la Korama, dont l'écoulement annuel a été nul en 1973, la période de retour est d'au moins vingt ans, peut-être quarante ans, alors que l'année sèche 1968 isolée n'a pas eu de conséquences aussi graves.

— On ne peut rien dire sur les zones subdésertiques et désertiques pour lesquelles on ne dispose pas de longues séries d'observations des débits.

Pour les cours d'eau tropicaux traversant le Sahel la sécheresse, si elle a présenté un déficit moins important en valeur relative, a été d'un caractère beaucoup plus rare et les conséquences pour le Sahel ont été aussi graves.

En fait, la Komadougou est déjà un exemple de ce type de cours d'eau. Ils sont caractérisés par un déficit relatif beaucoup moins important que pour les cours d'eau sahéliens, mais la fréquence d'occurrence de la sécheresse y est beaucoup plus faible. Dans la partie amont de ces cours d'eau, où l'eau est relativement abondante, ce déficit a eu des conséquences beaucoup moins dramatiques qu'au Sahel malgré le caractère de plus grande rareté des phénomènes observés. Il n'en a pas été de même sur les cours inférieurs ou moyens, en zone sahélienne : on peut résumer par le tableau ci-après les données relatives aux stations les plus importantes.

Notons que sur le Sénégal à Bakel, comme à Dagana, le volume annuel de 1972 est très voisin de celui de 1913, alors que sur le Niger à Koulikoro le débit annuel de 1973 est nettement supérieur à celui de 1913 qui est le plus faible observé, et un peu inférieur à celui de 1914. Le débit moyen annuel de 1944 est nettement supérieur à celui de 1973. Plus à l'aval à Diré il est fort possible que la fréquence de 1973 ait été plus faible que celle de 1913. On retrouve le même phénomène à Logone Birni. A l'aval des zones d'inondations les dernières années sèches ont toujours tendance à être plus déficitaires qu'à l'amont.

**Grands cours
d'eau tropicaux
débouchant dans
le Sahel**

TABLEAU VIII

Stations	Superficie du bassin km ²	Débit moyen annuel m ³ /s	Période de retour ans	Débit maximal m ³ /s	Période de retour ans	Débit minimal m ³ /s
Sénégal à Bakel	218 000	1972 : 255 1973 : 355 1968 : 426	100 20 17	1 430 2 550 2 880	50 15 13	1974 : 0 1973 : 0,25
Sénégal à Dagana	268 000	1972 : 276 1973 : 384 1968 : 447	100 20 17	1 090 1 660 1 660	100 15 15	
Niger à Koulikoro	120 000	1973 : 903 1972 : 1 080	50 10	1972 : 3 680 1973 : 4 140	50 20	1973 : 16 1974 : 17,4
Niger à Diré	330 000	1973 : 560 1972 : 711	50 à 100 30	1973 : 1 710 1972 : 1 860	50 à 100 30	
Niger à Niamey	700 000	1973 : 605 1972 : 737	50 à 100 10	1973 : 1 560 1972 : 1 700	25 à 50 10	1974 : 0,6
Logone à Lai	56 700	1972 : 241 1973 : 265 1971 : 408	50 40 10	1972 : 964 1973 : 1 420 1971 : 2 320	50 à 100	1974 : 21,4
Logone à Logone Birni	76 000	1973 : 208 1972 : 212 1971 : 306	50 50 6	1972 : 565 1973 : 681 1919 : 919	100	1974 : 18,5
Chari à N'Djaména	600 000	1972 : 537 1973 : 572 1968 : 1 020	50 à 100 5	1972 : 1 430 1973 : 2 130	50 à 100	1974 : 38,6

Sur le bassin du Nil la période sèche 1965-1973 a été comparable à la période 1911-1915, comme sur le Sénégal et sur le Niger.

On a fait figurer sur le tableau les valeurs maximales annuelles des débits qui jouent un rôle très important dans l'alimentation en eau des zones d'inondations sahéniennes ; les fréquences sont comparables à celles des valeurs moyennes des débits.

En 1972 ou en 1973, les grands fleuves tropicaux ont abordé la zone sahénienne avec des volumes annuels ou des valeurs maximales de crues très faibles correspondant à une sécheresse cinquantennale ou centennale et les deux années ont été particulièrement déficitaires à la fin d'une période assez déficitaire. Les zones d'inondations présentées page 39 ont donc particulièrement souffert de cette sécheresse, le déficit d'une année ayant une influence très nette sur l'inondation de l'année suivante, contrairement à ce que l'on observe sur les petits cours d'eau de la zone sahénienne pour lesquels, de toute façon, le lit et les zones d'épandage sont complètement à sec à l'arrivée de la saison des pluies suivantes.

Mais pour porter un jugement objectif sur la sécheresse 1968-1973, il importe de considérer à la fois l'aspect hydrologique, les répercussions sur les pâturages, sur les cultures sèches ou irriguées, les deux étant liées à la répartition des précipitations pendant la saison des pluies, et enfin l'augmentation des besoins de la population et du bétail depuis 1913. Sans cette vue globale il n'est pas possible de procéder à une comparaison acceptable de la sécheresse 1968-1973 à celle de 1913.

Ce que l'on peut affirmer c'est que, à supposer que la densité de population reste la même :

- l'importance du cheptel reste équivalente à celle de 1965,
- le mode de culture reste inchangé,
- les aménagements hydrauliques ne subissent aucun développement.

On peut revoir en moyenne tous les cinquante ans une période de sécheresse comparable à celle de 1965-1973 avec les mêmes conséquences, et il peut y en avoir de pires comme il y en a eu au cours des derniers siècles. Il y a donc une stratégie qui ressort d'abord de la politique, de la sociologie et de l'économie et enfin de la technologie du pastoraliste, de l'agronome ou de l'ingénieur du Génie Civil, pour lutter contre ces fléaux naturels.

Les ressources en eau du Sahel présentent dans l'espace et le temps une variété infinie, et il est essentiel de les connaître à fond avant de les utiliser.

L'exemple de la dernière période de sécheresse a bien mis en évidence la nécessité de définir un volume annuel disponible, non seulement par sa valeur moyenne, sa médiane ou sa valeur la plus fréquente, mais par sa variabilité caractérisée par sa distribution statistique étudiée jusqu'aux valeurs extrêmes (décennales et même cinquantiennes sèches), et si possible par la succession vraisemblable dans le temps des valeurs de diverses fréquences. Il faut également bien connaître les débits de crues.

Il est possible de donner des directives générales, de présenter des exemples pour faciliter le calcul sur des cours d'eau non étudiés, mais l'extension de ces résultats est particulièrement délicate, elle exige une excellente connaissance du bassin versant que l'on veut étudier, non seulement à partir d'études sur photographies aériennes, mais aussi par des études sur le terrain et des enquêtes. L'emploi aveugle d'abaques ou de formules empiriques ne peut conduire qu'à de graves mécomptes.

La gravité des périodes sèches, qu'il s'agisse des cours d'eau sahéliens ou des cours d'eau tropicaux débouchant dans le Sahel, est telle qu'il n'est pas possible d'y remédier uniquement par une politique de grands réservoirs. Le problème déborde d'ailleurs très largement les domaines de la technologie, mais les hydrologues, comme les autres spécialistes auxquels on doit faire appel pour la mise en valeur du Sahel, ont besoin de mettre en œuvre toutes leurs expériences pour apporter une contribution positive à cette grande entreprise.

CONCLUSION

ETUDES SCIENTIFIQUES

JUIN 1975

L'HYDROLOGIE DES REGIONS SAHELIENNES ET LA SECHERESSE 1968-1973

J.A. RODIER

**Conseiller scientifique à Electricité de France - DAFECO
Chef du service hydrologique de l'ORSTOM**