

## *Caractéristiques des ressources en eau de surface en zones arides de l'Afrique de l'Ouest*

Variabilité et évolution actuelle

### INTRODUCTION

En se référant à des critères basés sur l'écoulement, les hydrologues (RODIER, 1964) font correspondre la zone aride d'Afrique de l'Ouest au régime subdésertique, limité au nord par l'isohyète 100 mm, et la zone semi-aride au régime sahélien, limité au sud par l'isohyète 750 mm. Les auteurs s'entendent à l'heure actuelle pour estimer que la limite entre zone aride et zone semi-aride correspond à une hauteur annuelle de précipitations comprise entre 400 et 500 mm.

Ces 2 zones forment une bande d'environ 600 km de large qui traverse tous les pays francophones au sud du Sahara. Les limites de cette bande sont très mouvantes sur le terrain, car, en l'espace de quelques décennies, les isohyètes précitées peuvent se déplacer de plusieurs centaines de kilomètres vers le nord (période humide 1950-1965) ou régresser encore plus nettement vers le sud (sécheresse actuelle).

La mobilisation de toutes les ressources en eau (précipitations, eaux de surface, eaux souterraines) se révèle nécessaire pour permettre le maintien de l'homme dans un environnement climatique difficile.

Les eaux de surface, traitées ici, constituent un capital remarquablement variable dans le temps et dans l'espace. Après de longs mois de saison sèche, il survient un écoulement plus ou moins bref et localisé qui peut se montrer, selon les années, insignifiant ou représenter des crues violentes au caractère aussi dévastateur que momentané.

Une bonne connaissance de cette ressource et de ses fluctuations est un préalable indispensable à une gestion efficace de cette richesse fugace. Les données disponibles sur l'écoulement sont malheureusement limitées, souvent fragmentaires, voire inexistantes en certaines régions. De solides raisons l'expliquent :

- la faible densité des réseaux de mesures, limités le plus souvent aux zones les plus facilement accessibles ;
- leur exploitation très onéreuse ;
- les mesures souvent rendues délicates ou dangereuses par la brièveté de l'écoulement ou par la violence des crues ;
- le personnel spécialisé peu nombreux et souvent mal préparé aux dures contraintes du terrain.

Cependant, le développement de ces régions et l'accroissement démographique continu, entraînent une augmentation constante des besoins en eau ; ceux-ci sont d'autant plus difficiles à satisfaire que l'on observe une diminution très préoccupante des précipitations depuis maintenant deux décennies.

## HISTORIQUE DE LA CONNAISSANCE DE LA RESSOURCE

Avant les années quarante, dans l'ensemble des zones sahéliennes et sahariennes, il n'existe aucune donnée d'ordre quantitatif sur l'écoulement, si l'on fait abstraction des fleuves tropicaux qui parviennent aux régions arides, pour lesquels quelques stations anciennes sont bien connues (cf. *infra*).

DUBIEF (1953) a publié des renseignements d'ordre qualitatif à propos des écoulements qui ont pu se produire sur les oueds sahariens depuis le début du xx<sup>e</sup> siècle. Il s'agit d'indications sommaires et fragmentaires sur le nombre de crues, leur durée, et les points extrêmes atteints en aval. Cet important inventaire est constitué des informations obtenues auprès des populations nomades et des militaires ;

il concerne un certain nombre de cours d'eau qui empruntent en général des lits fossiles et qui appartiennent aux principaux massifs montagneux, depuis le Maroc et l'Algérie jusqu'au Mali actuel. Les éléments recueillis montrent que des écoulements très localisés peuvent se produire chaque année, même en zone désertique.

La connaissance correcte du régime des petits cours d'eau devenait cruciale dès 1951 - une date qui coïncide par ailleurs avec le début d'une phase climatique plus humide -, car les crues détruisaient de nombreux ouvrages ou aménagements (ponts, barrages réservoirs).

Cette période allait connaître la mise en place des premières mesures indispensables de terrain ; alors de création récente, le Service hydrologique de l'ORSTOM, associé à l'Électricité de France, allait jouer un rôle majeur, secondé progressivement par un certain nombre d'organismes (Services de l'hydraulique ou du Génie rural, missions d'aménagements des grands fleuves, Office du Niger, Mission des vallées sèches du Niger, etc.).

Dès l'origine, l'insertion de l'ORSTOM dans les structures hydrologiques de l'Afrique de l'Ouest prenait ainsi des formes très variées, depuis la mise à disposition d'hydrologues (missions d'aménagement des grands fleuves) jusqu'à la gestion directe de réseaux (comme celui du Tchad).

Les missions dévolues (ROCHE, 1983) s'énonçaient ainsi :

- la mise au point de méthodes d'observations et de mesures ;
  - l'organisation de la gestion des stations permanentes (adaptées aux conditions locales) ;
  - la détermination des grands traits des régimes et des caractéristiques hydrologiques ;
- l'assistance au développement intervenait dans les nombreux domaines concernés par les ressources en eau (hydroélectricité, navigation, transports routiers et ferroviaires, aide à l'agriculture, etc.).

La connaissance des crues (pointe et volume) était le premier objectif hydrologique à réaliser. Dès 1953-54, commençait l'installation de bassins représentatifs où l'on recueillait une information précieuse sur les précipitations, en plus des données sur l'écoulement ; à partir de 1956, ces actions devaient se multiplier considérablement avec l'appui des administrations et des bureaux d'étude. En 1956-57 enfin, des campagnes extensives de mesure dans les régions les plus arides étaient lancées.

Ce sont ces actions dans les diverses zones climatiques que nous allons évoquer brièvement.

### **Bassins d'études et campagnes extensives**

Les grands massifs en zone désertique (moins de 100 mm annuels de pluie) ont fait l'objet de campagnes de mesures à caractère extensif dans des conditions souvent difficiles. Ces véritables expéditions, qui commençaient en véhicules tous-terrains, se ter-

minaient souvent à dos de dromadaire ou à pied. Citons les campagnes de l'Ennedi (BRAQUAVAL, 1957 ; ROCHE, 1958), de l'Aïr (LEFEVRE, 1959 ; ROCHE, 1965), du Tibesti (BRUNET-MORET, 1963). Trois bassins représentatifs étaient aménagés dans l'Ennedi, en 1958-59, et dans l'Aïr, en 1959-60. Dans ce dernier massif, les études sur le Teloua, qui avaient repris en 1975, se poursuivent actuellement.

Les études en zone subdésertique, commencées à la même époque, sont déjà plus nombreuses. Outre les campagnes déjà mentionnées, on doit citer les missions ORSTOM dans le Brakna et le Tagant (1958-59), celles du nord de l'Ouaddaï (1961) et de l'Affole en Mauritanie (1960). D'autres études ont été conduites par les services du Génie rural de Mauritanie (Oued Ketchi, lac Aleg) et par ceux du Niger en 1966 et en 1967 notamment.

Les bassins représentatifs, au nombre d'une dizaine, couvrent en général le centre de la zone subdésertique depuis la Mauritanie (Dionaba, 1958-59) jusqu'au Tchad (Kadjemeur, 1965-66, Razelmamoulni, 1959-60). Ces bassins, qui n'ont fonctionné que deux ou trois ans, ont été installés pour la plupart à la fin des années cinquante, au cours d'une période climatique plus favorable. Le seul bassin récent, celui de l'Oued de Kidal dans l'Adrar des Iforas a été suivi en 1984 et surtout en 1986 (PEPIN *et al.*, 1987). Comme pour le régime désertique, il n'existe pas de stations permanentes de réseau dans ces régions.

En zone sahélienne au sens strict (hauteur annuelle de précipitations comprise entre 400 et 750 mm), les données recueillies depuis une trentaine d'années, bien que plus abondantes, demeurent cependant très insuffisantes dans certaines régions. Des études régionales, menées sur des périodes de deux à quatre ans, couvrent toute la zone sahélienne, avec des lacunes toutefois. Des séries d'observations nettement plus longues concernent le Burkina Faso uniquement (lac de Bam, 1966-1974 ; mare d'Oursi, 1976-1981). Environ 35 ensembles de bassins représentatifs ont été étudiés dans des conditions très variées (perméabilité des divers types de sol, pente et réseau hydrographique, couverture végétale).

## Réseaux sahéliens

Les stations permanentes des réseaux de mesure nationaux concernent uniquement des cours d'eau situés au sud de l'isohyète 400 mm ; jusqu'au milieu des années soixante-dix, elles couvrent une zone à l'est du méridien international depuis le Burkina Faso jusqu'au Tchad :

- sur les affluents rive droite du fleuve Niger, comme le Gorouol (station d'Alcongou, ouverte en 1957 ; de Dolbel, ouverte en 1961 ; de Koriziena, suivie de 1955 à 1965, puis reprise en 1970) ;

- les rivières des vallées sèches, le long de la frontière Niger-Nigeria (comme la Maggia, suivie depuis 1954), ou qui se jettent dans le lac Tchad (Komadougou, dès 1957) ;

- les rivières de l'est du Tchad (Bahr Azoum, à partir de 1953 ; le Ba Tha, à partir de 1955).

À la fin des années soixante-dix, si le programme Agrhymet permet, en Mauritanie, la réouverture de quelques stations suivies avec des fortunes diverses (Gorgol Blanc et Noir, Oued Ghorfa, etc.), celles de l'est du Tchad, en revanche, ne sont plus lues.

Ces stations contrôlent des superficies, qui vont de quelques milliers à quelques dizaines de milliers de kilomètres carrés, où la dégradation hydrographique est très variable (*cf.* cet ouvrage, BOUTEYRE et LOYER : 69-80). On dispose, dans le meilleur des cas, de 30 années d'observations qui présentent souvent des lacunes.

Nous évoquerons plus loin les difficultés de gestion de ces réseaux sahéliens.

## Les fleuves tropicaux qui parviennent au Sahel

Les fleuves tropicaux qui parviennent au Sahel (Sénégal, Logone-Chari) ou qui le traversent (Niger) représentent des conditions d'écoulement exogènes puisque les têtes de bassins se trouvent dans des régions beaucoup plus arrosées (Fouta Djalon, notamment). Néanmoins, il est utile de les prendre en compte, non seulement pour leurs apports, qui conditionnent la survie de vastes régions, mais encore pour leur rôle comme précieux indicateurs des variations climatiques. Les plus longues séries d'observation, qui dépassent quatre-vingts ans, montrent des fluctuations interannuelles de l'écoulement, très sensibles aux variations spatio-temporelles des régimes pluviométriques.

Respectivement situées sur le Sénégal et sur le Niger, les stations de Bakel et de Koulikoro (tabl. I, II et III), suivies depuis le début du siècle pour des raisons de navigation fluviale, fournissent des données chiffrées largement exploitées dans les études qui portent sur la sécheresse (SIRCOULON, 1976 ; OLIVRY, 1983 ; SIRCOULON, 1986a et b ; etc.).

Tableau I - Caractéristiques des modules ( $m^3.s^{-1}$ )

STATION	NBRE AN. D'OBSERV.	MODULE INTERANNUEL	COEF. VARIATION	MODULE MAX.	AN	MODULE MINI.	An
Sénégal à Bakel	84	702	0,38	1 247	24	215	84
Niger à Koulikoro	80	1 437	0,18	2 300	25	636	84
Chari à N'Djamena	54	1 115	0,31	1 720	55	213	84

Tableau II - Modules moyens extrêmes sur 5 ans consécutifs

STATION	HUMIDE		SÈCHE	
	Module	Période	Module	Période
Sénégal à Bakel	1 027	54 - 58	285	1982 - 1986
	941	32 - 36		
	917	24 - 28		
Niger à Koulikoro	2 024	24 - 28	773	1983 - 1987
	1 942	51 - 55		
Chari à N'Djamena	1 500	60 - 64	533	1981 - 1985
	1 450	52 - 56		

Tableau III - Apports des fleuves tropicaux au Sahel (en 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>)

	SÉNÉGAL à BAKEL	NIGER à KOULIKORO	BANI à DOUNA	CHARI à N'DJAMENA	Total
Début des observations à 1985	22,3	46,2	17,3	35,1	120,9
Début des observations à 1967	24,7	48,7	22,1	40,4	135,9
Période 1968-1985	13,7	37,7	8,3	24,6	84,3
Année 1984	6,9	20,1	2,2	6,3	35,5

## CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉCOULEMENT EN ZONE ARIDE

Dans les régimes hydrologiques où l'écoulement est pérenne, la ressource en eau est représentée par un certain nombre de paramètres hydrologiques classiques comme :

- son abondance (module annuel exprimé en m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, ou volume d'eau annuel écoulé en mètres cubes ou lame d'eau écoulée moyenne en millimètres) ;
- ses variations saisonnières et interannuelles ;
- ses valeurs extrêmes (étiages et crues).

En zones aride et semi-aride, l'écoulement est un phénomène ni régulier ni permanent ; il est caractérisé :

- par son intermittence (due à des pluies concentrées sur quelques semaines ou sur quelques mois) ;
- sa forte hétérogénéité spatio-temporelle (provoquée par le caractère, lui-même très hétérogène, des précipitations et des conditions très diversifiées de perméabilité des sols).

De plus, les effets de la dégradation hydrographique se font sentir très rapidement lorsque la superficie du bassin dépasse quelques dizaines ou quelques centaines de kilomètres carrés. Dans ce cas, on assiste à un affaiblissement des lames d'eau écoulées et des coefficients d'écoulement lorsque la taille des bassins croît, avec diminution du débit d'amont en aval (sauf exceptions, *cf. infra*).

Sous ces régimes, certains paramètres usuels perdent donc de leur signification ou de leur intérêt ; que signifie, par exemple, un débit moyen annuel ou un débit minimal d'étiage pour un cours d'eau à sec onze mois par an ? En revanche, les notions de volume écoulé, de durée de l'écoulement et de pointe de crue (maximum, forme et durée) prendront un relief tout particulier.

## Dégradation hydrographique

Décrit en détail par RODIER (1975), ce phénomène, généralisé dans toutes les zones arides, se produit dès que la pente des cours d'eau diminue et d'autant plus vite que

l'on se rapproche des conditions désertiques. Il apparaît, en Afrique de l'Ouest, dès que la hauteur de précipitation interannuelle est inférieure à 750 mm (d'où la limite adoptée par les hydrologues pour la frontière méridionale du Sahel) et tous les cours d'eau sahéliens contrôlés par les réseaux de mesures le connaissent peu ou prou (tabl. IV). Cette dégradation est causée par plusieurs facteurs :

- longueur de la saison sèche, qui favorise la dénudation du sol ;
- crues sporadiques, incapables d'évacuer tous les matériaux érodés du lit ;
- grandes étendues à faible pente en aval, qui permettent l'étalement de l'écoulement et donc sa disparition progressive par évaporation.

Tableau IV - Quelques crues estimées de fréquence décennale

BASSIN	P. an <sup>-1</sup> (mm)	S (km <sup>2</sup> )	Q <sup>10</sup> (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	q <sup>10</sup> (l.s <sup>-1</sup> .km <sup>2</sup> )	DÉGRADATION
Sofaya (Tchad)	120	345	12	100	+
Haouach (Tchad)	120	7 700	3	0,4	+++
El Meki (Niger)	150	165	200	1 200	0
Teloua (Niger)	170	1 170	450	380	0
Enne (Tchad)	530	525	75	140	++
Fera (Tchad)	420	5 600	120	21	+++
Djajibine (Mauritanie)	450	148	325	2 200	0
Boudame (Mauritanie)	450	149	35	230	+
Boudame (Mauritanie)	450	1 125	200	180	+
Tambas (Niger)	460	280	400	870	0
Maggia (Niger)	475	25 25	140	55	0
Bam Bam (Tchad)	800	1 200	350	290	+
Mayo Oulo (Cameroun)	1 000	1 160	(1 000)	800-900	0

## Intermittence

En zones désertiques au nord de l'isohyète 100 mm, les enquêtes menées par DUBIEF (1953) et les campagnes extensives effectuées (*cf. supra*) montrent que dans les zones les plus favorables (fort relief montagneux et sols imperméables), il peut se produire une crue par an sur des bassins de quelques kilomètres carrés bien exposés. Cependant, dès que la superficie du bassin croît, l'événement devient beaucoup plus rare. RODIER (1964) cite le cas de l'Enneri Bardagne à Bardaï (4 050 km<sup>2</sup>) qui a connu, de 1954 à 1962 (période humide), les crues annuelles suivantes : 425 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> ; 0 ; 0 ; 0 ; > 5 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> ; 0 ; > 5 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> ; 5 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> ; 3 crues de 4, 9 et 32 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. En zones subdésertiques, dans les massifs montagneux et les zones de piémont, il peut se produire quelques crues chaque année, pendant une courte période de juillet à fin août. Un exemple intéressant est donné par le bassin, peu dégradé, du Kori Teloua dans l'Aïr (1 300 km<sup>2</sup>, 150 mm de hauteur de pluie interannuelle). Les observations qualitatives réalisées par les sœurs d'Azél, depuis 1956, et les mesures quantitatives, relevées en 1959, en 1960, en 1964 et depuis 1975, montrent que le nombre de jours d'écoulement par an semble osciller autour de 25 dans les années moyennes, atteindre 50 dans les années plus arrosées (1980) et s'abaisser à 5 ou 6 dans les années très déficitaires, comme 1972. Toutefois, en 1984, année de loin la plus sèche (la pluie moyenne sur le bassin est estimée à seulement 15 mm, contre 169 mm en 1980), la durée totale de l'écoulement n'est plus que de 35 heures. Ce qui semble bien indiquer qu'il n'y ait pas du tout d'écoulement une fois par siècle.

En zones sahéliennes, une série de crues, avec souvent un écoulement continu durant les intervalles, s'observe chaque année, sur une période qui peut dépasser trois à quatre mois. Sur les petits bassins des réseaux, les conditions de sécheresse ne semblent pas trop influencer sur la durée totale de l'écoulement ; ainsi, au Burkina Faso, le Gorouol à Koriziena (2 500 km<sup>2</sup>) connaît 80 à 100 jours d'écoulement par an, même les années à pluviométrie très médiocre. En revanche, sur les grands bassins, la durée est beaucoup plus sensible aux aléas climatiques. Dans le cas du bassin de la Komadoukou à Gueskérou (120 000 km<sup>2</sup>) et en 1984, l'écoulement s'observe seulement quatre mois, du 4 août au 30 novembre, alors qu'il dure en général neuf mois, de juillet à fin mars, grâce à un soutien par les nappes souterraines.

## Hétérogénéité spatio-temporelle

Le premier facteur d'hétérogénéité est dû aux précipitations. Celles-ci se produisent sous la forme d'averses convectives de courte durée (15 min à 2 h), les intensités les plus fortes du corps de l'averse peuvent atteindre 150 mm.h<sup>-1</sup> en 5 min (sous 200-300 mm de total annuel). Ces averses couvrent en général plusieurs dizaines de kilomètres carrés et dépassent rarement 100 à 200 km<sup>2</sup>. Vers l'isohyète 750 mm, la saison des pluies, qui dure environ quatre mois, est constituée d'une cinquantaine de pluies alors que vers l'isohyète 100 mm, réduite à quelques semaines, elle n'est constituée que d'une dizaine de pluies. L'irrégularité interannuelle est d'autant plus forte que la hauteur de précipitations annuelle est plus faible. CARBONNEL et HUBERT (*cf. cet ouvrage* : 37-51) décrivent en détail les caractéristiques des précipitations en Afrique de l'Ouest et leur évolution actuelle.

Le second facteur d'hétérogénéité est dû aux conditions physio-géographiques (types de sol, nature du sous-sol, végétation, relief). Les averses, déjà localisées, donneront des coefficients de ruissellement très variables, qui, en cas de forte pluie, peuvent très bien varier de 5 %, sur des sables granitiques, jusqu'à 75 %, sur les regs argileux

(DUBREUIL, 1985). De plus, un sol verra sa perméabilité évoluer de façon sensible, au cours de la saison des pluies, en fonction de son état de saturation, de la pousse de la végétation et de la formation de pellicules de battance (VALENTIN, 1985).

La connaissance des parties «actives» des bassins (RODIER, 1985a) sera essentielle dans l'évaluation des crues. Le bassin de type Maggia, où un plateau de grès à très faible ruissellement domine des pentes de colluvions argileuses très imperméables, est l'exemple le plus connu.

La dégradation hydrographique va encore aggraver cette hétérogénéité en provoquant parfois des pertes très rapides d'amont vers l'aval (cas du Kori Teloua, dès que la dégradation se fait sentir).

## ÉVALUATION DE LA RESSOURCE

### Problème de la mesure

#### CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

La détermination des paramètres de l'écoulement rendue très difficile par les caractéristiques mêmes de la ressource (*cf. supra*), l'hydrologue se voit confronté à de nombreux problèmes. Les observations en zone aride exigent donc une méthodologie adaptée aux dures conditions de terrain, une stratégie opératoire spécifique, un matériel approprié et le respect d'une organisation générale rigoureuse (RODIER et ROCHE, 1978).

Il sera souvent combiné 3 sortes d'opérations (*cf. supra*) :

- les études extensives (déplacements rapides dans la zone choisie avec visite des stations installées, mesure des débits ou des délaissées de crues, préparation cartographique minutieuse des campagnes, missions préparatoires de reconnaissance en saison sèche, etc.) ;
- les bassins représentatifs (présence à temps plein pendant la saison des pluies, matériel installé à l'avance, stations aménagées, protocoles de mesures au point) ;
- les stations de référence avec station permanente de jaugeage (coûteuses, donc suivies avec beaucoup de soin, notamment en ce qui concerne le choix du site, sa dégradation éventuelle et sa stabilité, la maintenance rigoureuse des appareils et une préparation poussée des procédés de mesure comme dans le cas des bassins représentatifs).

#### SITUATION ACTUELLE

Au cours de ces vingt dernières années, l'opinion internationale a été régulièrement sensibilisée au drame vécu par les populations sahéennes, et les gouvernements respectifs des pays concernés ont pris conscience de la nécessité d'un renforcement des moyens qui permettent de mieux connaître et de suivre les ressources en eau. La création du Comité permanent inter-États de lutte contre la sécheresse dans le Sahel (CILSS), après le paroxysme de sécheresse des années 1972-73, comme le lancement, en 1975, du programme Agrhymet pour réactiver les réseaux sahéens (avec la formation de personnel spécialisé) ont été des réponses à ces préoccupations et jouent un rôle important grâce à l'aide internationale. Malheureusement, la gestion des réseaux se révèle une charge très lourde et très difficile à assumer car le suivi de la ressource



exige un combat de tous les instants ; aux zones non couvertes par les mesures viennent s'ajouter les lacunes d'observation des stations existantes, leur détérioration ou le détarage des cours d'eau. Le développement des modèles mathématiques, lié à l'explosion de l'informatique, a parfois créé l'espoir fallacieux que les mesures de terrain deviendraient secondaires ; bien vite, on a dû constater que la vérité terrain demeurait indispensable à l'emploi de ces modèles dont l'aide, par ailleurs, se montre extrêmement précieuse (au niveau de la simulation de l'écoulement, par exemple ; cf. *infra*).

S'il faut donc affronter les difficultés et poursuivre les mesures (POUYAUD, 1986), cette tâche peut néanmoins bénéficier des développements technologiques de ces dernières années à 2 niveaux :

- celui de la collecte de l'information et de son traitement, grâce à l'emploi de stations de mesures autonomes avec enregistrements sur mémoire statique et chaînes de traitement informatisé ;

- celui de la transmission de l'information, grâce aux possibilités de télétransmission des données par satellite, très bien rodée à l'heure actuelle (les opérations Hydroniger ou de lutte contre l'onchocercose sont des exemples réussis).

Cependant, ces nouveaux moyens demandent des disponibilités financières non négligeables et une maintenance appropriée qui freinent encore leur diffusion.

## Résultats obtenus

De nombreuses études allaient être réalisées à mesure que progressaient les connaissances sur les ressources superficielles et leurs caractéristiques. Les synthèses les plus notables ont été effectuées à l'instigation du Comité interafricain d'études hydrauliques (CIEH) créé en mars 1960.

Dès 1964, les caractéristiques générales des régimes arides et subarides (abondance annuelle, variations saisonnières, crues, coefficient d'écoulement, irrégularité interannuelle) étaient formulées dans un ouvrage de base (RODIER, 1964) consacré à l'ensemble de l'Afrique noire à l'ouest du Congo.

Dès l'origine, l'estimation des crues décennales sur petits bassins était l'un des objectifs assignés aux hydrologues. La note de RODIER et AUVRAY (1965) représente une contribution fondamentale à la résolution de ce problème en fournissant la méthode de calcul de ces crues (essentiellement pour les zones comprises entre 150 et 800 mm de pluie annuelle et pour des bassins inférieurs à 200 km<sup>2</sup>, en donnant des abaques qui fournissent le coefficient de ruissellement, en fonction de classes de perméabilité et de relief, ainsi que les temps de montée et de baisse de ces crues).

En 1972, les mesures acquises sur bassins représentatifs faisaient l'objet, sous la direction de DUBREUIL, de la publication d'un recueil qui exploite sous une forme standardisée les résultats hydrologiques de 106 ensembles de bassins versants (dont une proportion notable en zone aride et subaride).

Dans les années suivantes, en liaison avec les besoins diversifiés qui concernaient les zones arides soumises au début d'une période déficitaire, RODIER (1975) réalisait une synthèse sur l'évaluation, dans le Sahel tropical africain, de l'écoulement annuel exprimé en volume annuel et de sa variabilité temporelle. Opérée à partir d'un certain nombre de bassins types de référence, cette évaluation s'appuyait sur l'étude des courbes de distribution des précipitations annuelles et sur l'utilisation d'un modèle simplifié, élaboré par GIRARD (1975) qui a permis de simuler de longues séries d'écoulement annuel.

Pour le calcul des crues, l'utilisation plus complète de l'information obtenue sur bassins représentatifs et l'emploi du minisimulateur de pluie pour caractériser l'aptitude

des états de surface au ruissellement (*cf.* en particulier les travaux de CASENAVE et VALENTIN et leur publication la plus récente, 1990) permettaient les révisions et les améliorations nécessaires de la note RODIER et AUVRAY (1965) ; d'une part celle-ci voyait ses éléments de calcul repris et affinés (RODIER, 1984), d'autre part elle bénéficiait de l'amélioration très sensible des connaissances sur les caractéristiques des crues des bassins sahéliens de moins de 10 km<sup>2</sup> (RODIER, 1984-1985). Une synthèse générale, qui est en voie d'achèvement et dont certains éléments ont déjà été esquissés (RODIER et RIBSTEIN, 1986 et 1988), doit favoriser la prédétermination des fortes crues (programme de recherche Forcrusa, de l'ORSTOM) et l'estimation des apports au Sahel.

L'amélioration progressive de la connaissance sur les phénomènes contributifs de l'écoulement a également permis la formation de notes synthétiques qui récapitulent les acquis des trente années écoulées (DUBREUIL, 1985).

Enfin, l'exploitation des fichiers de données, informatisés à partir de 1967, assurait l'édition régulière d'annuaires (très vite assumée par les services nationaux) et permettait surtout la publication de monographies hydrologiques. Ces vastes études régionales fournissent les facteurs physiques et climatiques qui conditionnent les régimes, et facilitent la recherche de liaisons significatives entre facteurs conditionnels (surface, relief, pluviosité, nature du sous-sol et caractéristiques hydrologiques). Citons, notamment, la monographie du Sénégal (ROCHETTE, 1974), en cours de refonte, et celle du Niger, dont la troisième version date de 1986, qui renferme des données d'un certain nombre de cours d'eau sahéliens.

## ÉVOLUTION ACTUELLE

L'appréciation de la variabilité interannuelle de la ressource en eau superficielle, des fluctuations ou des tendances qui peuvent affecter ce capital, demande une continuité des observations et de longues séries de mesures.

Ces conditions ne sont guère remplies en Afrique de l'Ouest, où l'on dispose seulement :

- de quelques stations de longue durée sur les grands fleuves tropicaux ;
- d'une quinzaine de stations sahéliennes, suivies depuis trente ans dans le meilleur des cas ;
- des résultats fournis par les bassins versants représentatifs, suivis pendant deux ou trois ans dans la majorité des cas.

Depuis une vingtaine d'années, la diminution des précipitations au Sahel (*cf.* cet ouvrage : 37-51) a entraîné un sévère déficit de l'écoulement.

La synthèse la plus importante est celle de SIRCOULON (1976) avec des compléments (1986a et b, 1987). Il est à noter également que la synthèse UNESCO/OMM (Organisation météorologique mondiale), *Aspects hydrologiques des sécheresses*, consacre une part notable à l'Afrique de l'Ouest.

## Évolution des cours d'eau tropicaux

Depuis 1968, les grands cours d'eau présentent :

- un effondrement des volumes écoulés annuels ; par rapport aux moyennes établies jusqu'à 1967 inclus, le déficit de la période 1968-1985 atteint 44 % sur le Sénégal, à Bakel, 22 % sur le Niger, à Koulikoro, 39 % sur le Chari, à N'Djamena. Pour 1984, année record, le déficit s'élève à 83 % ;

- un effondrement des crues maximales, les débordements dans la basse vallée du Sénégal, le remplissage de la cuvette intérieure du Niger et l'inondation des plaines au sud du lac Tchad sont de moins en moins assurés ;

- des étiages records certaines années, avec un arrêt de l'écoulement, pour le Sénégal à Bakel, pour le Niger à Niamey et pour le Chari en amont de sa confluence avec le Logone.

Les tableaux I à III (d'après SIRCOULON, 1987) résument quelques résultats (année 1986 incluse).

## Évolution des cours d'eau sahéliens

Bien qu'il soit impossible de dresser un bilan exact de l'évolution des ressources en eau endogènes et de leurs caractéristiques, les résultats obtenus aux stations qui contrôlent des bassins sahéliens de plusieurs milliers de kilomètres carrés se révèlent en contradiction avec ceux observés sur les grands cours d'eau tropicaux pour la dernière période de sécheresse.

### CAS DES CRUES

Le tableau IV (RODIER, 1989) présente quelques valeurs de crues estimées de fréquence décennale ( $Q^{10}$ ). L'examen des débits spécifiques  $q^{10}$  montre une très grande variabilité pour des hauteurs annuelles de précipitations ( $P.an^{-1}$ ) identiques (cas de Djajibine et de Boudamé). Ces différences s'expliquent par la perméabilité, par la pente et par la dégradation hydrographique également (0 = nulle à peu marquée, +++ considérable).

Les études qui portent sur les crues récentes ne montrent pas de diminution des pointes de crues maximales. Ainsi (SIRCOULON, 1986b) dans le cas du Gorouol, à Dolbel (7 500 km<sup>2</sup>), l'estimation de la crue de récurrence décennale, sur un échantillon glissant constitué des crues maximales annuelles, fait apparaître une stationnarité des crues avec même une augmentation des valeurs basées sur les deux dernières années observées (tabl. V).

Tableau V - Crues du Gorouol à Dolbel (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>)

PÉRIODE	CRUE MÉDIANE	CRUE DÉCENNALE $Q^{10}$ (PEARSON III)
1961-1985	96,2	157
1961-1970	93,9	119
1966-1975	90,5	117
1971-1980	97,8	182
1976-1985	124,0	198

### CAS DES ÉLÉMENTS DU BILAN HYDROLOGIQUE

Le tableau VI (RODIER, 1989) donne des valeurs de lame d'eau écoulee annuelle (fréquence médiane et décennale) pour des bassins types sahéliens de 25 km<sup>2</sup> de superficie sous une pluie annuelle moyenne ( $P. an^{-1}$ ) de 400 mm.

Tableau VI - Écoulement annuel

BASSIN	SOL	Le (med)	Le (dec)
Galmi réduit (Niger)	Colluvions argileuses	140 mm	50 mm
Gountoure (Burkina Faso)	Granit sain avec dépressions peu profondes comblées par des sols sableux	86 mm	30 mm
Gagara (Burkina Faso)	Vertisols imperméables sur granit sur une partie du bassin	52 mm	17 mm
Barlo (Tchad)	Sols de Gountouré + sols perméables	24 mm	7 mm
Abou Goulem (Tchad)	Majorité de sols perméables sur granit	12 mm	3 mm
Niamey (Niger)	Sols sableux perméables ± cultivés	(2) mm	0 mm

Au cours d'une étude qui portait sur 8 bassins (de 7 500 à 95 000 km<sup>2</sup>), POUYAUD (1987) s'est attaché à suivre sur toute la période d'observation les valeurs moyennes des principaux paramètres hydrologiques.

La synthèse des résultats (tabl. VII) fournit en particulier la pluie moyenne (P.an<sup>-1</sup>), la lame d'eau écoulee annuelle (Le), le coefficient d'écoulement (Ke) ainsi que les rapports entre les moyennes de ces 3 paramètres à partir de 1970, pour la période sèche (S), et jusqu'à 1969 inclus, pour la période humide (H).

L'analyse de ces paramètres montre que pour les bassins les plus petits, la période sèche n'a pas réduit les écoulements (LeS/LeH > 100 %) et encore moins les coefficients d'écoulement (KeS/KeH > 100 %), alors que les précipitations actuelles sont plus faibles (P.an<sup>-1</sup> S/P.an<sup>-1</sup> H < 100 %).

Toutefois, on doit noter que ces stations n'intéressent que la partie centrale du Sahel, moins durement touchée par la sécheresse que l'Ouest ou le Tchad, où ces conclusions seraient probablement moins nettes.

En revanche, pour les plus grands bassins, on retrouve bien une diminution générale des valeurs de tous les paramètres hydrologiques.

Les résultats obtenus sur petits bassins sont expliqués par ALBERGEL *et al.* (cf. cet ouvrage : 123-130) ; à partir d'une expérimentation entreprise sur de nombreux bassins ou parcelles du Burkina Faso, ils montrent que, en zone sahélienne, le ruissellement (ou l'infiltrabilité) est sous la dépendance quasi exclusive des états de surface. La sécheresse actuelle a considérablement favorisé le développement des zones érodées et des surfaces encroûtées, d'où une augmentation très nette des coefficients de ruissellement (ALBERGEL, 1987).

Lorsque la superficie des bassins augmente, l'apparition de la dégradation hydrographique, l'action de l'évaporation sur les zones d'épandage et l'absence d'infiltration en période sèche sont des facteurs qui se conjuguent pour réduire de façon dramatique l'écoulement.

Tableau VII - Synthèse des paramètres hydrologiques

BASSIN	STATION	PÉRIODE D'OBSERVATION	SUPERFICIE km <sup>2</sup>	P. an <sup>-1</sup> mm	Le mm	Ke mm	P. an <sup>-1</sup> S/P. an <sup>-1</sup> H %	LeS/LeH %	KeS/KeH %
Gorouol	Dolbel	1961-1978	500	483	35,6	7,52	73	92	127
Gorouol	Alcongui	1961-1977	44 850	486	7,0	1,48	70	71	102
Dargol	Tera	1961-1978	2 750	495	36,2	7,3	71	83	119
Dargol	Kakassi	1963-1978	6 940	484	25,6	5,3	83	112	139
Lac de Bam	-	1966-1976	2 600	576	11,0	1,8	101	316	287
Sirba	Garbe-Kourou	1962-1977	38 750	658	16,9	2,50	83	76	91
Volta Noire	Dapola	1951-1983	94 000	898	36	3,94	83	59	71
Volta Blanche	Yakala	1956-1983	32 000	733	29,5	3,94	88	70	79

## CONCLUSION

Cet article a évoqué les difficultés inhérentes à la connaissance des ressources en eau superficielles dans les zones arides d'Afrique de l'Ouest.

Depuis le début des années cinquante environ, les travaux entrepris par les infrastructures hydrologiques qui œuvrent dans ces pays (et auxquelles l'ORSTOM a fourni une contribution très diversifiée) représentent une riche moisson. Les études réalisées apportent des éléments d'appréciation sur les caractéristiques des divers régimes hydrologiques, les conditions de formation de l'écoulement, la prédétermination des crues et les ordres de grandeur relatifs à la ressource. La valorisation des études faites sur bassins représentatifs, l'emploi du minisimulateur de pluie, la mise au point d'outils statistiques, la modélisation de l'écoulement et l'utilisation de la télédétection pour la cartographie des états de surface, notamment, ont facilité à des degrés divers ces résultats.

Toutefois, dans ce domaine où existent de nombreuses lacunes et des zones encore non étudiées, rien n'est jamais définitivement acquis :

- la grande variabilité spatio-temporelle de la ressource impose la continuité des mesures, la mise à jour régulière des synthèses ou des monographies anciennes et un effort accru dans le fonctionnement des réseaux sahéliens actuels. Au niveau du captage-codage, de la transmission et du traitement des paramètres hydrologiques, les technologies nouvelles apportent des solutions séduisantes mais onéreuses pour les services nationaux ;

- la persistance de conditions sévères de sécheresse bouleverse les certitudes acquises, soulève le problème des normes hydrologiques à choisir pour réaliser des aménagements toujours plus nombreux en vue de satisfaire des besoins accrus en eau. Une grande prudence s'impose néanmoins dans la modification des normes actuellement employées ; les résultats des campagnes de simulation de pluie sur des bassins anciennement exploités par l'ORSTOM montrent bien l'extrême importance des états de surface et de leurs modifications sous l'action anthropique et sous l'effet de la sécheresse persistante.

---

J. SIRCOULON : *hydrologue*, ORSTOM, 213 rue Lafayette, 75480 Paris cedex 10

---

## BIBLIOGRAPHIE

- ALBERGEL (J.), 1987. - Sécheresse, désertification et ressources en eau de surface. Application aux petits bassins du Burkina Faso. *Symposium AISH* n° 168, Vancouver : 355-365.
- BRAQUAVAL (R.), 1957. - Études d'écoulement en régime désertique. Massif de l'Ennedi et région nord du Moutcha. Campagne 1957. ORSTOM, CSLT Paris, 90 p., 27 pl.
- BRUNET-MORET (Y.), 1963. - Le bassin du Zoumri au Tibesti. *Annuaire hydrologique de l'ORSTOM*, Paris. Année 1959 : 9-18.
- CASENAVE (A.) et VALENTIN (C.), 1990 - Les états de surface de la zone sahélienne. Influence sur l'infiltration. *Didactiques*, ORSTOM, Paris, 229 P., 196 pl. couleur.
- CHEVALLIER (P.), CLAUDE (J.), POUYAUD (B.) et BERNARD (A.), 1985. - Pluies et crues au Sahel. Hydrologie de la mare d'Oursi (1976-1981). *Trav. et Doc.* ORSTOM, n° 190, Paris, 251 p.

- DUBIEF (J.), 1953. - Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. Gouvernement général de l'Algérie. SES Clairbois-Birmandreis. Algérie.
- DUBREUIL (P.), 1985. - Review of field observations of runoff generation in the Tropics. *Journal of Hydrology*, 80 : 237-264.
- DUBREUIL (P.), CHAPERON (P.), GUISCAFRE (J.) et HERBAUD (J.), 1972. - Recueil des données de base des bassins versants représentatifs et expérimentaux de l'ORSTOM. Années 1951 à 1969. ORSTOM, Paris, 916 p.
- FAO, 1981 - Arid Zone Hydrology, FAO Irrigation and Drainage paper n°37, 271 p. + 96 p. (annexes), Rome.
- GIRARD (G.), 1975. - Les modèles hydrologiques pour l'évaluation de la lame écoulée en zone sahélienne et leurs contraintes. *Cah. ORSTOM, sér. hydrol.*, vol. XII, n° 3 : 189-221.
- GIRARD (G.) et RODIER (J. A.), 1979. - Application de modèles mathématiques déterministes à l'étude des crues et de l'écoulement annuel en zone sahélienne. *AISH, Canberra, Publication n° 128* : 65-78.
- LEFEVRE (R.), 1959. - Études d'écoulement dans le massif de l'Air. Alimentation en eau de la zone des grès d'Agadès. Campagne 1959. ORSTOM, Paris, 131 p. + figures, *multigr.*
- MARGAT (J.), 1979. - Aridité et ressources en eau (79 SGN 255 HYD) CIEH/CEFIGRE, Niamey.
- OLIVRY (J.-C.), 1983. - Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégal et aux îles du Cap Vert. Examen de quelques séries de longue durée (débits et précipitations). *Cah. ORSTOM. sér. hydrol.*, vol. XX, n°1.
- PÉPIN (Y.), BERTHAULT (C.) et KOME (B.), 1987. - Bassin versant de l'oued de Kidal (Adrar des Iforas). Campagne 1986. Direction de l'Hydraulique et de l'Energie. ORSTOM, Bamako, 71 p.
- POUYAUD (B.), 1986. - Normes hydrologiques des réseaux de mesure hydrométriques et sécheresse. Colloque CIEH sur les normes hydrologiques, Ouagadougou, mai 86.
- POUYAUD (B.), 1987. - Variabilité spatiale et temporelle des bilans hydriques de quelques bassins versants d'Afrique de l'Ouest en liaison avec les changements climatiques. *Symposium AISH, n° 168*. Vancouver : 447-461.
- ROCHE (M.), 1958. - Études d'écoulement en régime désertique. Massif de l'Ennedi. Campagne 1958. ORSTOM, organisation commune des régions sahariennes, Paris, 80 p. + annexes, *multigr.*
- ROCHE (M.), 1965. - Étude des nappes d'infero-flux des rivières de la bordure ouest de l'Air (campagne 1964). ORSTOM, Paris, 54 p. + annexes, *multigr.*
- ROCHE (M.), 1983. - L'apport de l'ORSTOM dans l'hydrologie de l'Afrique de l'Ouest. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XX, n° 3-4 : 205-211.
- ROCHETTE (C.), 1974. - Le Bassin du fleuve Sénégal. *Monogr. Hydrol. n°1*, ORSTOM, Paris, 442 p. et 3 cartes.
- RODIER (J. A.), 1964. - Régimes hydrologiques de l'Afrique noire à l'ouest du Congo. *Mém. ORSTOM, n° 6*, Paris, 137 p.
- RODIER (J. A.), 1975. - Évaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel Tropical Africain. *Trav et Doc. ORSTOM, n° 46*, Paris, 121 p.
- RODIER (J. A.), 1979. - Évaluation des ressources en eau de surface dans les régions tropicales arides. CIEH/CEFIGRE. Doc. BE5, 15 p. Niamey.
- RODIER (J. A.), 1984. - Évaluation hydrométéorologique des critères de conception des ouvrages de drainage routiers et des évacuateurs de crues des petits barrages dans la région du Sahel. Projet UNSO/RAF/83/504. Genève.
- RODIER (J. A.), 1984-1985. - Caractéristiques des crues des petits bassins versants représentatifs au Sahel. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XXI, n° 2, 65 p.

- RODIER (J. A.), 1985 - Aspects of Arid Zone Hydrology, in Facets of Hydrology, chapter 8, vol. II, Ed. J.C. Rodda John Wiley and Sons Ltd : 205-247.
- RODIER (J. A.), 1989. - Caractères généraux de l'hydrologie superficielle des zones arides et semi-arides en Afrique. Leurs conséquences sur les études des ingénieurs in Proceedings of the Sahel Forum «État de l'Art en hydrologie et en hydrogéologie». Unesco/CIEH/AIRE. Ouagadougou, 13-18 février 1989 : 19-37.
- RODIER (J. A.) et AUVRAY (C.), 1965. - Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km<sup>2</sup> en Afrique Occidentale. ORSTOM, CIEH, Paris, 30 p., 13 gr.
- RODIER (J. A.) et RIBSTEIN (P.), 1986. - Utilisation des bassins représentatifs pour la prédétermination des crues et l'estimation des apports au Sahel. Colloque CIEH sur les normes hydrologiques, Ouagadougou, mai 1986.
- RODIER (J. A.) et RIBSTEIN (P.). - 1988. - Estimation des caractéristiques de la crue décennale pour les petits bassins versants du Sahel couvrant de 1 à 10 km<sup>2</sup>. ORSTOM, Montpellier, 108 p. + annexes, *multigr.*
- RODIER (J. A.) et ROCHE (M.), 1978. - River flow in arid regions, in R.W. Herschy (Ed.) Hydrometry. Principles and Practices, John Wiley and Sons (Chichester) chapter 13 : 453-472.
- SIRCOULON (J.), 1976. - Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique Intertropicale. Comparaison avec les sécheresses «1913» et «1940». *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XIII, n° 2 : 75-174.
- SIRCOULON (J.), 1986a. - La sécheresse en Afrique de l'Ouest. Comparaison des années 1982-84 avec les années 1972-73. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, vol. XXI, n° 4, 1984-85 : 75-86.
- SIRCOULON (J.), 1986b. - Caractéristiques de la sécheresse actuelle en Afrique de l'Ouest et centrale. Colloque CIEH sur les normes hydrologiques, Ouagadougou, mai 1986.
- SIRCOULON (J.), 1987. - Variation des débits des cours d'eau et des niveaux des lacs en Afrique de l'Ouest depuis le début du xx<sup>e</sup> siècle. *Symposium AISH*, Vancouver, n° 168 : 13-25.
- UNESCO/OMM , 1988. - Aspects hydrologiques des sécheresses. *Collection Études et Rapports en hydrologie*, n° 39. Paris, 149 p. (rapporteurs M. Beran et J. A. Rodier).
- VALENTIN (C.), 1985. - Organisation pelliculaire superficielle de quelques sols de régions subdésertiques. *Études et Thèses ORSTOM*, Paris, 260 p., 11 pl. photos.