

Les écoulements non pérennes sur les petits bassins du Sénégal

J. ALBERGEL

Orstom, BP 434, 1004 El Menzah, Tunis, Tunisie

H. DACOSTA

Université de Cheikh Anta Diop, Faculté des Sciences et Techniques, Dakar, Sénégal

Résumé Le réseau hydrographique sénégalais est essentiellement constitué de rivières à écoulement non pérenne, à l'exception des fleuves Sénégal et Gambie dans leur bassin amont. Dans ce contexte, la maîtrise et la gestion rationnelle de la ressource en eau nécessite une meilleure connaissance de ces écoulements temporaires. Cet article propose, après un découpage du territoire sénégalais en zone hydrologiques homogènes, une analyse du régime hydrologique des petits bassins versants basée sur l'information existante. Une méthode pratique de prédétermination de la crue décennale est proposée pour quelques unes des zones homogènes.

Non-perennial runoff on small catchments of Senegal

Abstract In Senegal the network of stream channels is formed mostly by non-perennial rivers, except for the upstream basins of the two main rivers: Senegal and Gambia. With such conditions, rational water management requires a good knowledge of ephemeral stream flows. In this paper, the Senegalese territory is divided into homogeneous hydrological units and the water regime of the small basins is analysed using existing information. Useful diagrams are drawn to define the parameters of the 10-year flood for some homogeneous units.

INTRODUCTION

La maîtrise des eaux de surface est indissociable du développement économique et social (ICWE, 1992). En Afrique tropicale, les grandes rivières ont fait l'objet de nombreux projets d'aménagement pour développer l'agriculture, produire de l'énergie ou favoriser la navigation. Les rivières et marigots à écoulements intermittents n'ont été aménagés, jusqu'à une date récente, que pour offrir un petit réservoir, ici ou là, à des pasteurs ou à une communauté villageoise. Par contre leurs crues violentes, mettant en péril les nouveaux axes routiers et ferroviaires, ont toujours retenu l'attention des ingénieurs du génie civil.

Depuis quelques années, devant une certaine déception des performances économiques des grands périmètres irrigués, la petite et moyenne hydraulique devient la favorite des penseurs du développement rural (Conac *et al.*, 1984; Dumont, 1986; Rochette, 1989; Banque Mondiale, 1993). La prédétermination des pluies, des

écoulements et la maîtrise des volumes d'eau résultants devient alors une préoccupation constante. Mais la jeunesse des réseaux pluviométriques et hydrométriques et la difficulté de leur gestion sur le long terme constituent un handicap sérieux à une bonne connaissance de la ressource offerte par les rivières temporaires.

A la demande du développement économique en Afrique francophone, les hydrologues de l'Orstom se sont intéressés, d'abord aux crues des petits bassins (Rodier & Auvray, 1965), puis à leurs écoulements annuels (Rodier, 1975). Plus récemment, c'est l'ensemble de l'hydrosystème représenté par le petit bassin qui devient leur objet d'étude (Pouyaud *et al.*, 1995; Albergel *et al.*, 1995).

Depuis les 1950s, un grand nombre de bassins versants représentatifs ont été étudiés en Afrique de l'ouest et centrale, mais leur répartition n'a pas permis de couvrir tous les écosystèmes tropicaux et leurs nuances (Dubreuil, 1972). Cet article, en hommage au pionnier de cette recherche, se fonde sur les données existantes au Sénégal, pour dégager les particularités hydrologiques et pour prédéterminer, au mieux, les paramètres de l'écoulement et des crues des rivières intermittentes de ce pays.

SITUATION ET CONTEXTE CLIMATIQUE

Situation géographique

Le Sénégal, finistère ouest-africain situé entre 11°30' et 17°30'O et 12°20' et 16°30'N (Fig. 1), s'étend pour l'essentiel sur le bassin sédimentaire sénégalo-mauritanien, sauf

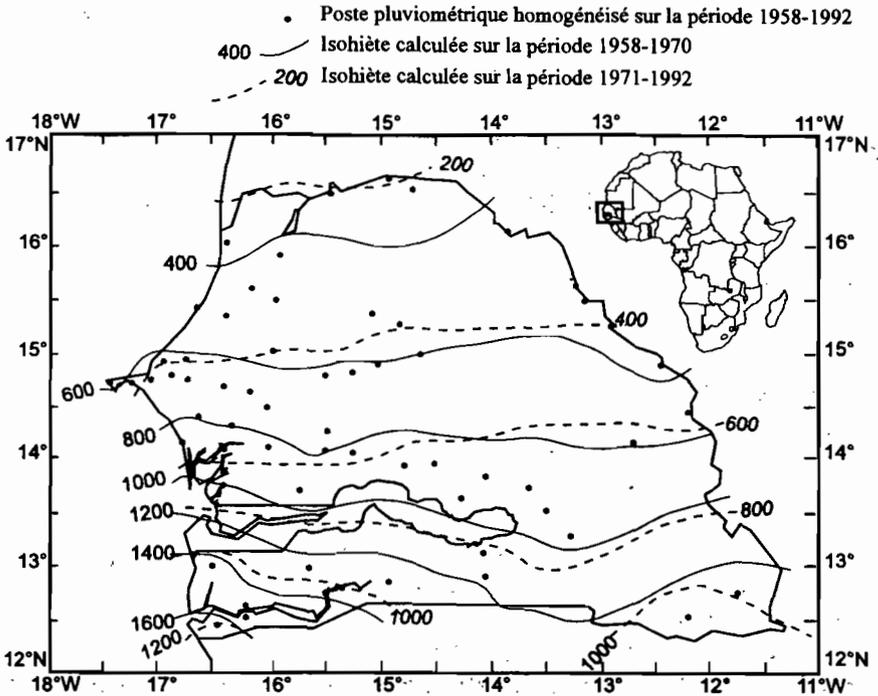


Fig. 1 Evolution pluviométrique au Sénégal.

dans sa partie sud-est où affleurent les formations du socle. Si l'évolution géologique de ce bassin remonte au Secondaire, le Quaternaire a fortement marqué les formations littorales dont celles des estuaires (Casamance, Saloum et Sénégal) avec les transgressions marines lutétienne et nouakchottienne. Ces épisodes expliquent la répartition des formations superficielles sur l'étendue du territoire sénégalais (Michel, 1960, 1973). Cette longue évolution géologique a donné naissance à différentes formations superficielles qui définissent des zones aux comportements hydrologiques différents.

Du point de vue climatique, le Sénégal est à cheval sur les domaines subguinéen, dans sa partie sud-ouest, sahélien, au nord et soudanien au centre. La trame climatique est rythmée par la migration saisonnière du Front Intertropical alternativement vers le tropique du Cancer au nord, en été boréal, et vers le tropique du Capricorne au sud, en hiver boréal. En hiver boréal, sous l'impulsion de l'anticyclone des Açores, des alizés septentrionaux, frais et secs, touchent le littoral. La cellule maghrébine émet un alizé continental, l'Harmattan, qui balaie le Sahara, et se charge de poussières donnant les brumes sèches, très fréquentes en cette saison (Leroux, 1983).

En été boréal, l'anticyclone de Sainte-Hélène prend le relais émettant un flux d'alizé plus méridional qui se transforme en mousson après la traversée de l'Equateur géographique. Son parcours océanique le charge de vapeur d'eau et de chaleur latente qui le rend instable. L'activation de cet énorme potentiel d'eau précipitable dépendra des perturbations (lignes de grains) qui l'animeront (Sagna, 1988).

Le régime des précipitations

Le régime des précipitations au Sénégal est unimodal, les pluies tombant uniquement en été boréal. Les premières pluies surviennent vers le 15 mai en Casamance, au sud-ouest du pays, et progressent vers le nord où elles sont attendues vers la fin du mois de juin. Trois types de précipitations intéressent particulièrement le Sénégal: les précipitations liées aux lignes de grains, en début et en fin de saison; les pluies de mousson, quand la saison est bien installée; et les pluies dites « pluies des mangues », beaucoup plus rares mais observées quelques années entre les mois de décembre et mars.

Les précipitations annuelles ont beaucoup varié depuis deux décennies. La période 1958-1970 conférait au Sénégal des pluies annuelles moyennes variant de 1600, au sud-ouest, à 400 mm au nord. Durant la période 1971-1992, cette moyenne n'est plus que de 1200 à 200 mm, soit une diminution allant de 400 à 200 mm par endroit (Fig. 1).

La détérioration des conditions pluviométriques annuelles se répercutent sur l'écoulement au même pas de temps. En ce qui concerne les crues ponctuelles, des études maintenant nombreuses dans tout le Sahel, montrent que les pluies ponctuelles les plus fortes ont la même probabilité d'apparition dans la période sèche que dans la période humide (Albergel, 1986; Dacosta, 1989; Valentin *et al.*, 1994; Pérez, 1994).

DECOUPAGE EN ZONES HYDROLOGIQUES HOMOGENES

Toutes les rivières du Sénégal n'ont pas fait l'objet d'un suivi hydropluviométrique. Parmi celles qui sont observées, la période d'observation n'est pas toujours la même. Les impératifs de la connaissance de la ressource conduisent à la transposition des

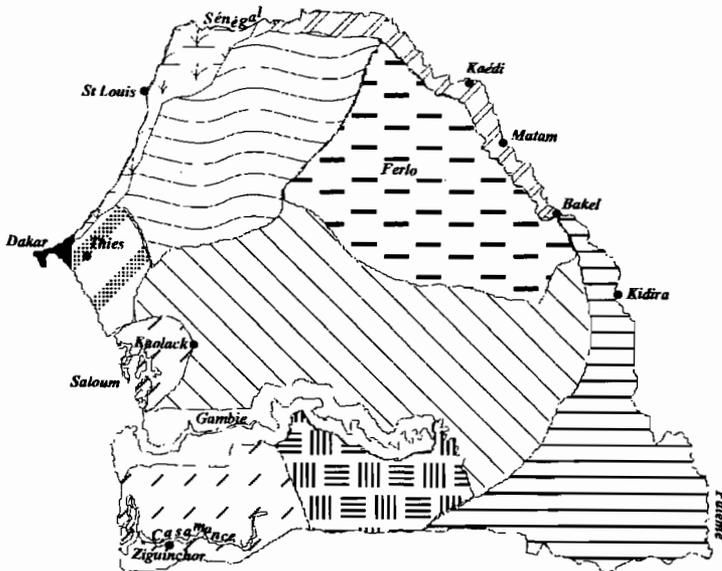
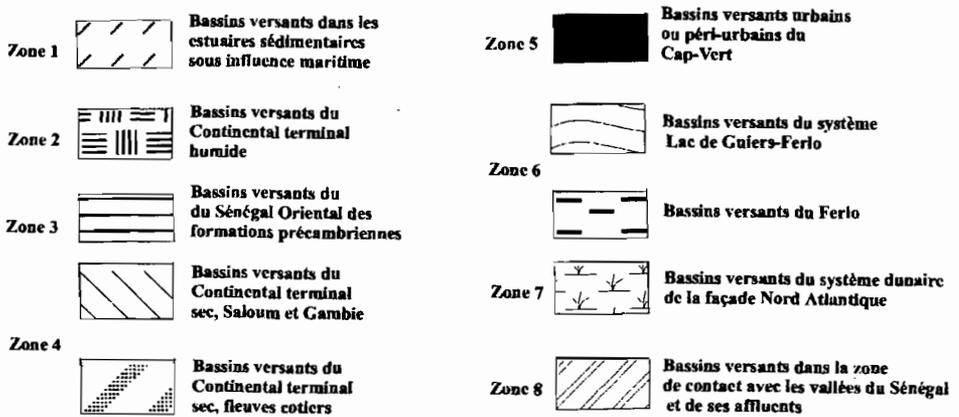


Fig. 2 Zone hydrologiques du Sénégal pour les eaux de surface non pérennes.

observations. Cette opération obéit à des règles très contraignantes, parmi lesquelles l'impérieuse nécessité d'opérer à l'intérieur de zones climatiques homogènes et sans trop de disparités du point de vue du substrat géologique. Le respect de ces règles nous a amené à diviser le territoire sénégalais en huit zones homogènes (Fig. 2):

- **Zone 1:** les bassins versants estuariens de la Casamance maritime et du Saloum, composés de bas-fonds larges et à faibles pentes longitudinale et transversale qui entaillent des formations sédimentaires du Continental Terminal. Ils sont bien arrosés avec des pluviométries interannuelles allant de 900 à 1500 mm.
- **Zone 2:** les bassins du Continental Terminal des régions humides regroupés dans les bassins hydrographiques de la haute Casamance et de la Kayanga. Cette zone reçoit environ 1000 mm par an.

- **Zone 3:** les bassins du Sénégal Oriental humide (bassins hydrographiques de la haute Gambie et Falémé). Ces rivières coulent sur les formations du socle précambrien. La pluviométrie annuelle est comprise entre 800 et 1000 mm.
- **Zone 4:** les bassins du Continental Terminal sec. Il s'agit des têtes de vallées dans les réseaux hydrographiques du Sine, du Saloum et des affluents de la Gambie: Niérikou et Sandougou. Dans cette zone assez sèche (entre 500 et 900 mm de pluviosité interannuelle), la ressource en eau est très sensible à l'état de dégradation des sols et de la végétation. On associe à cette zone celle des bassins côtiers du sud de la péninsule du Cap-vert.
- **Zone 5:** la péninsule urbanisée du Cap-Vert. Résultant de formations volcaniques reliées au continent par des cordons sableux, la péninsule du Cap-Vert regroupe 22% de la population sénégalaise. Une série de villes satellites à Dakar y sont installées. La population de cette région a connue une croissance spectaculaire ces trente dernières années. Les problèmes de ravitaillement en eau douce et d'assainissement urbains y sont très aigus. L'université Cheikh Anta Diop et l'Orstom y ont initié en 1994 un programme d'hydrologie urbaine. La pluviométrie interannuelle est, dans les années récentes, voisine de 400 mm.
- **Zone 6:** les petits bassins des vallées fossiles au sud du fleuve Sénégal. Partant du fait que les sols sont très perméables et les pluies rares (pluviométrie annuelle entre 200 et 400 mm), aucun système d'observation des écoulements de surface y a été réalisé. De plus l'importance des nappes souterraines suffit à la demande en eau d'une population très dispersée. L'aménagement de ce vaste territoire et les projets de sa remise en eau par le Sénégal devraient pourtant prendre en compte les écoulements locaux. De nombreux témoignages montrent que certaines années des crues importantes y sont observées. La géologie subdivise cette zone en deux: à l'ouest un ensemble dunaire ogolien (Sall, 1983) recouvre le Continental Terminal alors que ce dernier affleure à l'est. Le manque de données hydrologiques ne permet pas de prendre en considération cette subdivision.
- **Zone 7:** sur une bande de quelques kilomètres de large, de Dakar à la frontière mauritanienne, des alluvions récentes quaternaires recouvertes de dunes de sables forment une région à l'hydrologie très particulière. Un ensemble lacustre interdunaire offre une ressource en eau importante exploitée par des maraîchers. Certains lacs isolés de la mer par des cordons littoraux sont très saumâtres. Aucune donnée en hydrologie de surface n'est disponible pour tirer des éléments du bilan en eau.
- **Zone 8:** les bassins versants de la zone de contact avec les vallées du Sénégal et de ses affluents (territoire situé près du Sénégal ou de la Falémé). Plus que pour des considérations de ressource en eau, les ruissellements locaux dans cette région occasionnent de nombreux dégâts aux ouvrages de franchissement (route de Matam-Bakel-Kidira). Aucune observation hydrologique de petits bassins n'a été réalisée dans cette zone. Les pluies peuvent être abondantes. La zone se situe entre les isohyètes 250 et 800 mm.

LES ECOULEMENTS NON PERENNES

L'étude des écoulements non pérennes peut être réalisée à partir des observations des bassins versants représentatifs et de celles des stations du réseau contrôlant des bassins

versants de surface inférieure à 5000 km². Les études de bassin versant au Sénégal sont très peu nombreuses, excepté en Casamance. Les données du réseau sur les stations de petits bassins sont très lacunaires.

Les domaines estuariens (zone 1)

Les réseaux hydrographiques des fleuves Casamance et Saloum fonctionnent comme de vastes rias remontées par les eaux marines jusqu'à environ 200 km de leur embouchure. Dans ces estuaires, les affluents serpentent à travers une forêt de palétuviers formant un laciis de bras deltaïques appelés bolons. L'onde de marée semi-diurne se propage, amortie et retardée dans cet ensemble de chenaux.

Ces chenaux servent également d'exutoire à de nombreux bas-fonds où les habitants cultivent du riz avec une maîtrise séculaire des apports en eau douce. Pour améliorer cette maîtrise et récupérer de grandes superficies de sols sulfatés-acides, de nombreux barrages anti-sels de différentes tailles ont vu le jour, suscitant des études et des suivis hydrologiques (SOMIVAC/USAID/ISRA, 1984; Albergel, 1992; Montoroi *et al.*, 1993).

En Basse et Moyenne Casamance, 23 petits bassins ont fait l'objet de prédétermination des caractéristiques de l'écoulement et de la crue décennale (Tableau 1). Sur 11 d'entre eux des observations hydrologiques ont été réalisées et extrapolées aux 12 autres. Au niveau du delta du Saloum, seuls deux bassins versants

Tableau 1 Caractéristiques de la crue décennale sur quelques bassins versants de la Casamance.

Bassin	Surface (km ²)	Lr (mm)	Tm (h)	Tb (h)	Q ₁₀ (m ³ s ⁻¹)	Q _{s10} (l s ⁻¹ km ⁻²)
Essom	125	9,7	10	>50	17	136
Madina	316	7,5	10	>50	26	85
Tanaff	445	6	15	>50	30	67
Toumiataba	31	10,8	7,5	38	9,5	306
Sansakouta	13,4	11,8	5	20	8	597
Samine	122	9,7	10	>50	16	131
Ndiama	170	9,1	12	>50	18	106
Boumkiling	203	7,6	13	>50	22	108
Diatok	11,9	11,9	4,7	20	7,5	630
Balingor	21	10,6	6,5	30	8,5	405
Djimandé	6,5	11,9	4	15	6	923
Toukara*	324	7,7	20	84	16,8	52
Sindian*	11,9	17,4	4,5	24	7,65	640
Sandougou*	85,7	8,5	11	70	8,3	100
Djilakoun*	25,2	8,3	10	36,5	5,22	174
Djiguinoum*	16,8	8,3	5	30	1,9	108
Le Brusq*	2,56	14,1	0,75	3,92	7,2	2667
Djinonaye*	11	22,2	2,75	12	14,2	1285
Tankoron*	43	10,5	8,5	43	7,3	170
Diango*	135	9,2	12	66	13,1	96,8
Diarone*	16,5	12	5,5	26	5,3	320
Badiouré*	24,5	11,9	7	34	5,95	243
Akintou*	7	21,7	2,17	10	10,55	1500
Bakoundi*	30	11,5	7,5	36	6,7	220
Bindaba*	3,2	34,2	0,83	4	19,2	6000

ont été suivis (Djikoye et Néma Ba). La forme générale de ces bassins est celle d'une ellipse dont le grand axe est celui du collecteur principal. La pente longitudinale des bassins est très faible, de l'ordre de 0,5%, tandis que la pente transversale est plus accusée, mais reste inférieure à 2%. Les versants sont de forme convexe et légèrement plus pentus dans la partie aval. Dans leur partie haute les bassins sont formés d'interfluves larges de 2-3 km et longs de 2-10 km. Leur altitude varie entre 20 et 50 m. Les parties basses sont formées d'un bas-fond quasiment plat d'altitude inférieure à 5 m. Ce bas-fond (défini au sens de Raunet, 1985) qui collecte les eaux de surface et l'écoulement des nappes est formée de deux zones bien distinctes:

- (a) une zone fluvio-marine soumise à l'influence océanique directe (eau de surface) et indirecte (eau souterraine) et pour laquelle la construction d'un barrage anti-sel peut supprimer l'influence marine de surface;
- (b) une zone plus continentale bordant la première soit par un raccordement direct avec les versants, soit par l'intermédiaire de terrasses peu élevées.

Les parties hautes des interfluves sont formées de sols rouges ferrallitiques sous forêts. La plus grande partie des versants et les bas-fonds appartient au domaine ferrugineux hydromorphe. De nombreuses déterminations de la perméabilité (anneaux Muntz, BCEOM, 1985, parcelles de ruissellement ou simulation de pluies, Albergel *et al.*, 1993; Montoroi, 1994) montrent que les zones de plateaux sont très perméables alors que les zones de versants le sont moyennement, mais leur perméabilité décroît avec leur mise en culture. Les zones de bas-fonds très argileuses et toujours saturées en eau (mer en saison sèche et eau douce en hivernage) sont quasi imperméables.

La similitude de tous les bassins observés a permis de mettre en oeuvre une méthode de prédétermination des écoulements annuels et de la crue décennale (Olivry & Dacosta, 1984; Albergel, 1992; Albergel *et al.*, 1992). L'écoulement annuel est fortement lié à la pluie annuelle et au rapport de surface « zone de bas-fond » sur « zone de plateau ». Le débit spécifique de pointe de la crue décennale, comme ses autres paramètres peuvent être liés à la surface du bassin et à la hauteur de la pluie journalière de récurrence décennale (Figs 3 et 4). La morphologie des bas-fonds très larges induit un fort amortissement des débits de pointe.

Pour la prédétermination des écoulements annuels les relations suivantes ont été validées (Albergel *et al.*, 1993):

$$Le(\text{mm})(\text{décennale sèche}) = \frac{(0,002 P_s)(S_b - S_{zi})}{S_b} + \frac{(0,8 P_s S_{zi})}{S_b}$$

$$Le(\text{mm})(\text{médiane}) = \frac{(0,06 P_m)(S_b - S_{zi})}{S_b} + \frac{(0,8 P_m S_{zi})}{S_b}$$

$$Le(\text{mm})(\text{décennale humide}) = \frac{(0,1 P_h)(S_b - S_{zi})}{S_b} + \frac{(0,8 P_h S_{zi})}{S_b}$$

où P_s , P_m et P_h sont respectivement les pluviométries annuelles de fréquence 0,1, 0,5, 0,9; S_b est la surface du bassin (km^2); et S_{zi} la surface inondable du bas-fond (km^2). Le représente la lame écoulée annuelle en mm.

Les surfaces des bassins versants étudiés varient entre 3,2 et 500 km^2 . Sur 14 bassins où un nombre suffisants d'événements « averse/crue » a été observé la crue décennale a été déterminée à partir du modèle de l'hydrogramme unitaire. Sur les autres

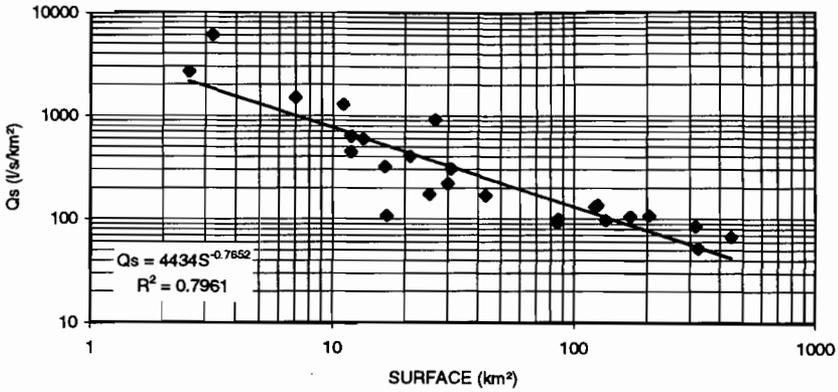


Fig. 3 Relation entre surface des bassins versants et débit spécifique de la pointe de crue décennale (zone 1).

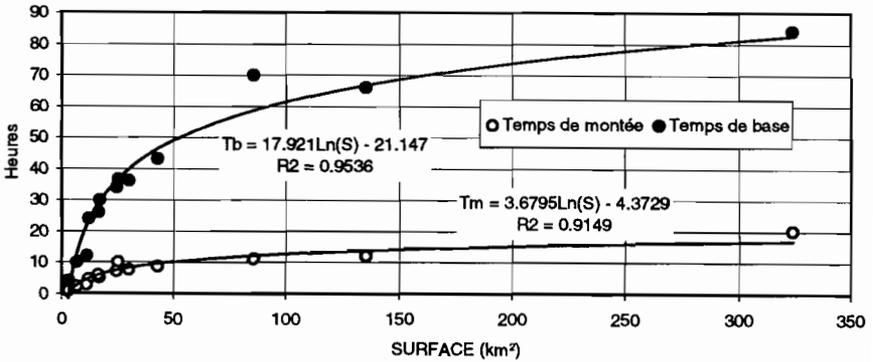


Fig. 4 Abaque de prédétermination des temps caractéristiques de la pointe de crue décennale (zone 1).

bassins la méthode de Rodier & Auvray (1965) a été utilisée en appliquant un coefficient d'amortissement de la pointe de crue. Cet échantillon de bassin versant a permis de construire deux abaques (Figs 1, 2) pour faciliter l'estimation des débits spécifiques de crue décennale, des temps de montée et de base.

L'extrapolation de ces données pour l'estuaire du Saloum, région plus sèche peut apporter une surestimation et doit être faite avec précaution. Les résultats des observations sur les bassins de la Néma et du Djikoye devraient montrer si ces abaques sont réellement utilisables pour le Saloum.

Zone sédimentaire continentale humide de Casamance et Kayanga (zone 2)

Les hauts bassins de la Casamance et de la Kayanga sont formés par la réunion de petits marigots à une altitude de 50 m. Leur lit est à peine marqué au milieu de vallons effacés à fond plat. Le réseau hydrométrique du fleuve Casamance et de la Kayanga est l'un des plus anciens du pays, après celui du Sénégal, puisque sa création remonte à 1964.

Malheureusement les observations hydrologiques disponibles sur 10 bassins versants, dont les superficies varient de 30 à 850 km², sont assez lacunaires.

L'analyse des écoulements annuels ne montre pas de relation entre lame écoulée, pluviométrie et surface du bassin. Les lignes de partage des eaux de la nappe phréatique ne coïncident pas avec les lignes de crête des bassins hydrographiques. Sur ces terrains très perméables, le drainage des nappes, hors des bassins hydrographiques, crée un déficit d'écoulement important. Les lignes de crête principales sont orientées est-ouest, les lignes de partage des eaux de sub-surface sont orientées de la même façon mais décalées vers le sud. A surface égale, les bassins à drains orientés vers le nord ont un écoulement souvent pérenne tandis que ceux orientés vers le sud tarissent en saison sèche. Avant 1970, ces bassins avaient un écoulement pérenne appréciable, mais avec l'installation de la sécheresse et l'amplitude des variations de la pluviométrie d'une année à une autre, l'intermittence de l'écoulement est devenue une règle, y compris à la station de Kolda (Dacosta, 1989). Le Tableau 2 présente les lames d'eau annuelles de diverses fréquences et les modules correspondants.

Tableau 2 Caractéristiques de l'écoulement sur les moyens et hauts bassins de la Casamance.

Station	Surface (km ²)	P (mm)	Le _(0,1) (mm)	Le _(0,5) (mm)	Le _(0,9) (mm)	Q _(0,1) (m ³ s ⁻¹)	Q _(0,5) (m ³ s ⁻¹)	Q _(0,9) (m ³ s ⁻¹)
Kolda	3700	1100	9,5	32,3	62,1	1,12	3,79	7,29
Saré Sara	815	1200	19,2	50	84	0,747	1,29	2,17
Madina Omar	385	1100	17,5	47,3	82,7	0,214	0,578	1,01
S. Koutayel	640	1050	2,2	7,1	14	0,044	0,145	0,283

P = précipitation annuelle; Le_(x) = lame écoulée annuelle de fréquence x, Q_(x) débit journalier maximum de la crue de fréquence x.

Pour des pluviométries moyennes observées et pour les bassins de superficie comprise entre 100 et 800 km², il est possible de faire quatre classes de bassins et de proposer un ordre de grandeur de l'écoulement annuel en fonction de la pluviométrie annuelle (Tableau 3).

Tableau 3 Lame écoulée annuelle (mm) sur les bassins de la haute Casamance et de la Kayanga.

	P (mm) = 1100-1300	P (mm) = 850-1100
	Le moyenne	Le moyenne
Bantakountou ou Saré Sara	110 mm	de 20 à 30 mm
Boukiling ou Saré Koutayel	de 20 à 30 mm	de 5 à 10 mm
Koda ou Madina Omar	de 60 à 80 mm	de 15 à 25 mm
Kayanga	200 mm	30 mm

P = précipitation annuelle; Le = lame écoulée.

L'étude de la crue du 5 septembre 1969 provoquée par une pluie journalière de probabilité nettement plus rare que la centennale à certains postes sur ces bassins permet de donner un ordre de grandeur des débits de pointes pour une crue exceptionnelle que l'on pourrait qualifier de centennale (Brunet-Moret, 1970): $300 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pour un bassin de 200 km^2 , $260 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ pour un bassin de 800 km^2 .

L'écoulement est ici fortement dépendant des impulsions données par les averses. La dégradation du couvert végétal sur une grande partie du bassin a accru la puissance des crues. La longue période d'observation des stations de Kolda et ses affluents en amont permet de donner les caractéristiques des maximums de crue. Cette analyse porte sur les maxima maximorum de chaque année. La crue maximale observée à Kolda et Saré Sara, était respectivement de 116 et $160 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. La distribution statistique donne les résultats consignés au Tableau 4.

Tableau 4 Débits fréquentiels des maxima de crues ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) sur la Casamance.

Bassins	Débit maximum ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) pour une période de retour:					
	Médiane	10 ans	20 ans	25 ans	50 ans	100 ans
Kolda	11,5	49,1	77,4	88,5	130	185
Saré Sara	5,85	19,4	25,3	27,2	33	38,9
Madina Omar	3,71	10,2	13,8	15	19,4	24,5

Les bassins sur formations protérozoïques et paléozoïques de la zone humide, sud-est (zone 3)

Les observations réalisées sur cinq bassins contrôlés par le réseau national dans le bassin hydrographique de la Gambie et sur deux bassins versants représentatifs, affluents de la Falémé, permettent de donner un ordre de grandeur des écoulements et des crues. Les

Tableau 5 Caractéristiques de l'écoulement sur les formations de la zone 3.

Station	Surface (km^2)	P (mm)	$Le_{(0,1)}$ (mm)	$Le_{(0,5)}$ (mm)	$Le_{(0,9)}$ (mm)	$Q_{(0,1)}$ ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	$Q_{(0,5)}$ ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	$Q_{(0,9)}$ ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)
Silj	90	1250	137	202	733	8	21	36
Diarha	760	1250	122	241	467	63	104	156
Thiokoye	950	1250	89	217	380	45	92	128
Diaguéry	1010	1250	62	159	310	23	60	109
Niokolokoba	3000	900	11	41	77	30	65	109
Daléma*	645	1300	-	-	250	-	-	830
Koila Kobé*	1600	1400	-	250	-	-	-	930

P = précipitation annuelle; $Le_{(x)}$ = lame écoulée annuelle de fréquence x , $Q_{(x)}$ débit journalier maximum de la crue de fréquence x ; *: bassin versant représentatif.

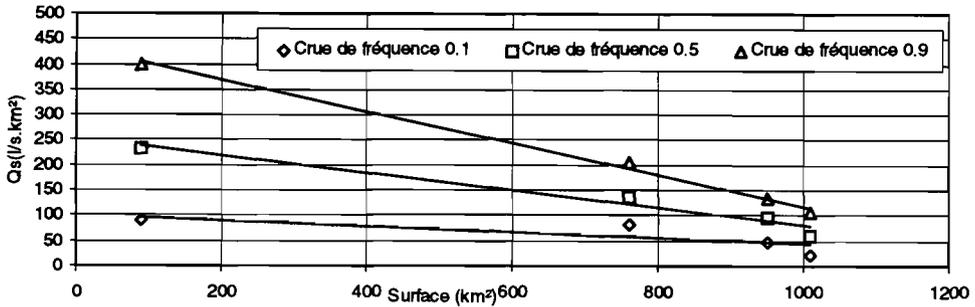


Fig. 5 Relation entre surface des bassins versants et débit spécifique de la pointe de crue (zone 3).

précipitations sont assez abondantes dans cette région. Elles varient entre 1000 et 1400 mm. Signalons que la saison des pluies commence généralement par cette zone, dès le début du mois de mai. Le Tableau 5 donne les caractéristiques de l'écoulement dans cette partie sud-est du pays.

Il s'agit de rivières puissantes, bien alimentées dont l'écoulement devient pratiquement continu en saison des pluies à partir d'une surface drainante de 500 km². Le coefficient d'écoulement interannuel varie entre 15 et 20% excepté pour le Niokolokoba (5%) dont le bassin est à la fois dans une région plus sèche et à pente plus modérée. Quant à la crue décennale, il est possible de distinguer trois types de bassins, ceux d'altitude (altitude moyenne entre 500 et 600 m) comme la Daléma et le Koïla Kobé, ceux de collines ou plateau (altitude moyenne inférieure à 300 m), et ceux comme le Niokolokoba se situant entre 100 et 300 m. Dans ces trois cas les débits spécifiques de pointes de la crue décennale semblent suivre une loi de décroissance en fonction de la superficie du , mais le nombre de points observés ne permet pas d'en calculer l'expression (Fig. 5).

Les bassins de la Daléma et du Koïla Kobé, affluents de la Falémé, ont des écoulements beaucoup plus importants. Quant au Niokolokoba, la grande extension de son bassin joue un rôle de pondération compte de la variation des pluies du sud au nord.

Les bassins du Continental Terminal en zone sèche (500-900 mm) (zone 4)

Dans cette zone, nous disposons d'observations de l'écoulement sur des bassins contrôlés par des stations du réseau (affluents de rive droite de la Gambie, rivières côtières) et sur des bassins versants expérimentaux. L'écoulement est très épisodique sur ces bassins. Les sols sont très perméables et le réseau hydrographique est très lâche, notamment dans la partie ouest de cette zone. Il faut des averses à forte intensité pour déclencher le ruissellement.

Le modelé général de la région est un ensemble de vastes plateaux tabulaires de 30 à 60 m d'altitude, entaillé par un réseau de larges vallées à faible pente (Michel, 1973). Au Quaternaire, les pédogénèses successives se sont imprimées sur les facettes de ce modelé (Bertrand, 1972; Angé, 1991).

Les plateaux, dont la partie centrale est dépourvue de cuirasse, ont des sols ferrugineux tropicaux, jadis couverts d'une savane arborée dense, mais aujourd'hui soumis

à un défrichement intense. Les talus sont riches en éléments grossiers qui les rendent impropres à la culture. Une brousse arbustive plus ou moins dégradée y subsiste, constituée principalement de combrétacées. Au pied des talus, les versants se composent d'un glacis amont (sols peu évolués d'apport colluvial) et d'une terrasse très étendue faite de sols ferrugineux tropicaux, lessivés, remaniés, sur colluvio-alluvions. Elle constitue le lieu d'occupation humaine traditionnelle. Les berges qui relient la terrasse au bas-fond ont une pente qui varie de 3 à 4%. Elles sont formées de sols peu évolués, d'apport alluvial. Sableux et pauvres chimiquement, ces sols sont pourtant mis en culture car faciles à travailler et offrant de bonnes possibilités d'enracinement pour les cultures. Dans les bas-fonds proprement dits, les sols sont peu évolués, d'apport alluvial, hydromorphes sur alluvions récentes.

La dégradation s'exprime dans toutes les unités de paysage par une érosion hydrique importante, plutôt sous forme de ruissellement généralisé diffus dans les parties hautes des toposéquences, sous forme de ravinements aux ruptures de pentes et de dépôts de sables localisés dans les bas-fonds.

Les bassins versants élémentaires (quelques ha au km²) sont drainés par des ravines d'érosion qui alimentent des bassins au réseau hydrographique bien marqué dans le paysage par une forêt galerie. Le bassin versant élémentaire, où les relations pluie/débit sont simples, ont une surface de 10-15 km². Il coule vers des rivières installées sur des réseaux de failles parcourant le bassin sédimentaire. Ces rivières coulent dans de grands bas-fonds larges occupés par des chapelets de mares temporaires. L'écoulement dépend principalement de l'état de remplissage des mares avant la pluie.

La prédétermination des caractéristiques de l'écoulement a été réalisée à partir d'ajustements statistiques pour les stations du réseau et à partir de transformations « pluie-débit » pour les BVRE. Le Tableau 6 présente ces résultats.

Tableau 6 Caractéristiques de l'écoulement sur les formations de la zone 4.

Station	Surface (km ²)	P (mm)	$Le_{(0,1)}$ (mm)	$Le_{(0,5)}$ (mm)	$Le_{(0,9)}$ (mm)	$Q_{(0,1)}$ (m ³ s ⁻¹)	$Q_{(0,5)}$ (m ³ s ⁻¹)	$Q_{(0,9)}$ (m ³ s ⁻¹)
Sima	495	950	<0,1	10	25	<0,1	4	10
Koussanar	2300	900	<0,1	0,15	0,66	<0,1	1,05	16
Niaoulé Tanou	1230	850	<0,1	5	13	2	6	11
Sandougou	6900	800	0,11	0,35	1,08	<0,1	3	7
Ndiba*	16,2	700	11	20	31	2	5	70
K. S. Diama*	75,6	700	8,4	13	23	<1	3	160
Sonkoron*	7,7	700	10	18	37	1	5	12
Somone	419	500	0	0,1	17	0	4	10
B. Bambara*	88,5	500	3	11	35	8	25	55
Kipe-Kipe*	43	500	-	-	33	-	-	60
Damboussane*	84,5	500	-	-	24	-	-	55

P = précipitation annuelle; $Le_{(x)}$ = lame écoulée annuelle de fréquence x; $Q_{(x)}$ débit journalier maximum de la crue de fréquence x; *: bassin versant représentatif.

La faible pente et la grande infiltrabilité des sols rendent le coefficient de ruissellement très sensible aux conditions d'humidité, à l'état de dégradation de sols et à la nature des couverts végétaux. Les relations entre écoulement et surface des bassins dépendent largement de l'état de dégradation des réseaux hydrographiques et des endoréismes locaux. Pour les bassins élémentaires (surface inférieure à 50 km²) l'écoulement interannuel varie entre 2 et 5% et le débit de pointe de la crue décennale entre 1000 et 5000 l s⁻¹ km⁻². Entre 50 et 5000 km², l'écoulement est très irrégulier et dépend avant tout des événements pluvieux les plus forts ou très rapprochés dans le temps lorsque les mares sont pleines.

Pour les plus grands bassins, un rôle régulateur par les écoulements de nappes apparaît. L'écoulement peut devenir pérenne entre les isohyètes 700 et 950 mm les bonnes années. Les crues ne sont jamais très violentes. Les débits spécifiques des crues décennales sont de l'ordre de 20 l s⁻¹ km⁻² pour les bassins intermédiaires et entre 5 et 10 l s⁻¹ km⁻² pour les plus grands (Tableau 6).

La Fig. 6 montre la relation entre débit spécifique de la pointe de crue décennale et la surface du bassin. La dispersion des points est due aux divers états de dégradation des versants et du réseau hydrographique.

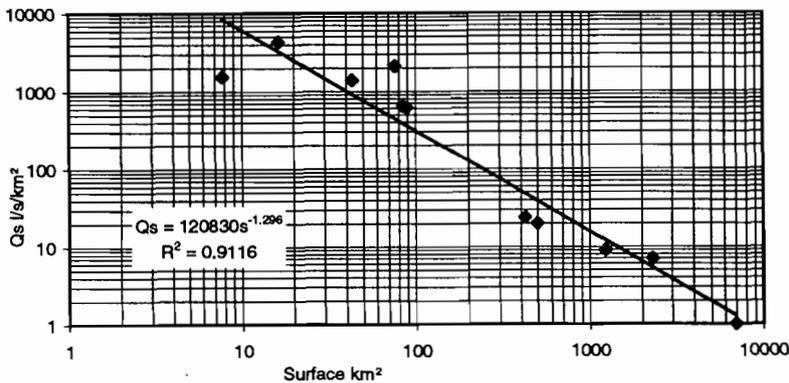


Fig. 6 Relation entre surface des bassins versants et débit spécifique de la pointe de crue décennale (zone 4).

La zone urbanisée de la péninsule du Cap-Vert (zone 5)

De près d'un million d'habitants en 1976, la population dakaroise est passée en 1988 à 1 428 084 habitants. Avec un rythme d'accroissement de 3,1% par an, la population pourrait atteindre 6 millions d'âmes en l'an 2010. Les villes de Pikine et Rufisque, satellites de Dakar, connaissent une même croissance. L'espace bâti dans la péninsule du Cap-Vert connaît une extension de 7% par an (Mairie de Dakar).

La pression démographique accroît le rejet des eaux usées alors que le développement de l'espace bâti augmente le ruissellement des eaux de pluies. Dakar, Pikine et surtout Rufisque (en raison de sa faible altitude) connaissent de plus en plus de difficultés dans l'assainissement et l'évacuation des eaux pluviales.

Ces eaux mal évacuées créent de nombreux problèmes du fait de leur stagnation au niveau des points bas, stagnation suivie d'une infiltration vers les nappes souterraines.

Tableau 7 Paramètres de la crue décennale du bassin versant de Fann-Mermoz.

Pluie (mm)	Intensité (mm h ⁻¹)	Débit maximum (m ³ s ⁻¹)	Volume écoulé (m ³)	Coefficient de ruissellement %
120	138	4	3000	25

Bas-fonds et nappes souterraines, principaux milieux récepteurs, après le milieu marin, connaissent ainsi une dégradation accélérée de leur qualité.

En 1994, une étude d'hydrologie urbaine a démarré en partenariat entre l'Université de Dakar et l'Orstom (Bassel *et al.*, 1994). Ses objectifs sont la caractérisation du ruissellement en zone urbaine et l'identification des éléments chimiques, facteurs de pollution. Une première campagne de mesure durant l'hivernage 1994 a permis d'évaluer les paramètres de la crue décennale sur un bassin versant de 1 km² en zone résidentielle « Fann-Mermoz » (Tableau 7).

Les petits bassins des vallées fossiles au sud du fleuve Sénégal (zone 6)

On peut diviser cette zone en deux parties: une partie est et une partie ouest. La partie ouest est dominée par des formations sableuses dunaires à travers lesquelles les anciennes vallées, souvent envahies par le sable, se frayent péniblement un chemin. Dans les dépressions interdunaires on trouve des sols hydromorphes. Dans la partie est, les principaux sols rencontrés sont les sols minéraux bruts sur cuirasse ferrugineuse, les sols ferrugineux tropicaux peu lessivés sableux et sablo-argileux du Continental Terminal remanié dans les axes alluviaux et les sols hydromorphes sur plateaux cuirassés ou dans les axes alluviaux.

L'importance des nappes souterraines suffit à la demande en eau d'une population très dispersée. Aucune observation des ruissellements de surface n'a été entreprise, les aménagements pastoraux ayant misé sur des forages qui ont été réalisés en grand nombre. Autour de ces forages, la dégradation du milieu est très importante à cause du sur-pâturage (disparition de la végétation naturelle et le piétinement des troupeaux), accélérant le ravinement dû au ruissellement de surface.

Les grands projets de remise en eau de ces vallées fossiles à partir des disponibilités nouvelles dans la vallée du Sénégal (construction des barrages de Manantali et de Diama) sont à l'ordre du jour. Les crues sont évidemment rares dans cette région pré-désertique, mais peuvent être très violentes comme l'indiquent tous les ravinements existants. Le Tableau 8 donne une statistique des pluies journalières dans le Ferlo, pluies dont l'importance peut présager de crues dévastatrices.

Les bassins de la façade Nord Atlantique (zone 7)

Dans toute cette zone les dunes récentes forment des impluviums très filtrants. Les eaux de pluie sont stockées dans ces massifs sableux puis restituées très lentement dans les zones interdunaires. Les bas-fonds interdunaires sont des milieux très humides. Des accumulations de tourbe sont fréquentes dans ces bas-fonds.

Tableau 8 Pluie journalières de fréquence rare dans le Ferlo.

Station	Fréquence 0,5 (mm)	Fréquence 0,9 (mm)	Fréquence 0,05 (mm)	Fréquence 0,01 (mm)	Nombre années observées
Yang-Yang	72	105	120	154	63
Linguère	64	90	116	128	59
Barkedji	63	90	117	129	45
Vélingara F.	72	102	115	146	30

La proximité des centres urbains (Dakar au Sud et St Louis au Nord) a transformé tous les espaces interdunaires en véritables jardins. Lorsque l'eau restituée par les dunes ne suffit pas, les maraîchers ont pris l'habitude d'utiliser soit l'eau de la conduite du lac de Guiers-Dakar, soit des forages profonds, ou bien les effluents des centres urbains. Une bonne connaissance des bilans en eau de ces systèmes permettrait une rationalisation dans le développement de cette agriculture péri-urbaine.

Les bassins sur formations protéro-paléozoïques de la zone de Matam-Kidira (zone 8)

Il n'y a pas eu de suivi hydrologique à proprement dit sur les petits bassins de cette zone, l'attention des aménageurs et du service de l'hydraulique étant focalisée sur le cours du fleuve Sénégal. Pourtant il ne se passe pas une année sans que la route Matam-Kidira ne soit détruite en certains points de franchissement de ces petites rivières.

Les premières estimations de l'écoulement sur les bassins le long des profils routiers Matam-Bakel et Bakel-Kidira datent de 1962 et 1963 (Orstom/Rhein-Rhur). La route repose sur les formations sablo-limoneuses avec localement des sols beaucoup plus argileux. Le relief est accentué à cause de la grande abondance des collines de grès ferrugineux dont l'altitude moyenne de 75 m. L'importance des pentes introduit une grande variété dans les écoulements suivant leur éloignement par rapport au tracé de la route.

Les estimations des débits décennaux ont été réalisées sur tous les marigots franchis par la route. Quelques bassins représentatifs ont fait l'objet d'un suivi hydrologique léger (étude de la variation de la vitesse en fonction de la section mouillée). Nous présentons ci-dessous les résultats de cette étude (Tableau 9 et Fig. 7). Les nombreuses ruptures des points de franchissement sur cette route appelle les questions suivantes:

- les ouvrages ont-ils été bien dimensionnés en fonction des estimations hydrologiques?
- quelle est la validité de ces estimations?
- le régime hydrologique de ces marigots a-t-il varié avec la dégradation des couverts végétaux?

Seul un dispositif de bassins versants représentatifs bien suivi pourrait donner la réponse à ces questions et apporter une solution à la réfection de cet axe routier qui prend une importance de plus en plus grande avec le développement économique de la vallée du Sénégal. C'est par cet axe routier que la vallée du fleuve Sénégal peut faire la jonction avec la voie ferrée Dakar-Bamako (gare de Kidira).

Tableau 9 Crues sur les bassins de l'axe routier Matam-Kidira.

Nom de bassin versant	Surface (km ²)	Long. (km)	Pente moyen (m km ⁻¹)	Crue décennale		Crue annuelle	
				Q_{s10} (m ³ s ⁻¹ km ⁻²)	$Q_{\max 10}$ (m ³ s ⁻¹)	$Q_{s\text{ an}}$ (m ³ s ⁻¹ km ⁻²)	$Q_{\max \text{ an}}$ (m ³ s ⁻¹)
Ogo	420	33	1,8	0,32	134	0,262	82
Sinthiou	38	11	3,3	1,4	53	0,76	29
Garba Sinthiou	33	8,2	4	1,65	55	0,85	28
Fourme Hari 1	25	9	4,5	1,9	47,5	1,1	27
Fourme Hari 2	7,6	4,7	3,3	3,4	26	1,9	14,5
Sinthiou Bamambe	355	23	2,6	0,35	122	0,212	75
Semme 1	7	4,5	7,3	5,45	38	3,4	24
Semme 2	5,6	4	7,8	5,8	34	3,6	20
Aoure	50	12	3,4	1,55	78	0,88	44
Diamounguel 1	12,6	5,1	9	5,4	68	2,95	37,2
Bakeladji	312	31	2,5	0,38	118	0,167	70
Tianiafo 1	6,8	3,8	4,6	4,2	28,5	2,4	16,3
Tianiafo 2	4,8	2,7	6,1	11	54	7,9	38
Bandji	109	16	4,2	0,88	96	0,54	58
Tourime 1	38	8,3	6,6	2,7	102	1,4	53
Tourime 2	6,2	4,1	12	9,4	58	5,6	35
Madina Torobe	32	10,4	3,2	0,9	28,8		
Senopalel	23	7,3	3,1	1	23		
Ndiendouri	24,5	6,7	2,7	1	24,5		
Vindou Bosseabe	118	17	1,8	0,35	41,5		
Diamounguel 2	30	11,5	2,9	0,9	27		
Dounde Koussem	11,6	5,5	4,1	1,1	12,8		
Yerimale	10	5	2	1	10		
Fadiara	15	6,1	2,1	1,2	18		
Tianiafo 3	51	9,8	4,1	0,75	38,4		

Q_{s10} = débit spécifique de récurrence décennale; $Q_{\max 10}$ = débit maximal de récurrence décennale;
 $Q_{s\text{ an}}$ = débit spécifique de récurrence annuelle; $Q_{\max \text{ an}}$ = débit maximal de récurrence annuelle.

CONCLUSION

Malgré l'existence de grands bassins hydrographiques comme ceux des fleuves Sénégal, Gambie ou Casamance, la plupart des rivières au Sénégal ont un écoulement non

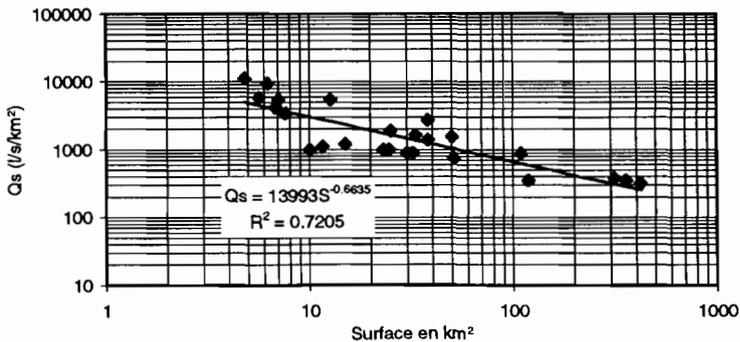


Fig. 7 Relation entre surface des bassins versants et débit spécifique de la pointe de crue décennale (zone 7).

pérenne dont le tarissement est devenu plus fréquent et plus précoce avec la sécheresse actuelle. Ces rivières représentent à la fois un potentiel de ressource en eau réparti dans tout le territoire mais également un risque pour les infrastructures et particulièrement les routes.

Cet article, qui fait la synthèse des résultats obtenus sur l'ensemble du territoire national, met en évidence l'insuffisance des observations et leur mauvaise répartition géographique. Si, en ce qui concerne la moitié sud du pays, allant de la Casamance et du Sénégal oriental au Sine Saloum, la connaissance du régime hydrologique est d'un niveau acceptable, il n'en va pas de même de la partie nord du pays où l'indigence des observations est criante et rend peu fiable toute recherche de relation entre données physiographiques des bassins et débits. La mise en place de bassins versants représentatifs et un suivi sérieux des stations dites secondaires du réseau hydrométrique national doit être une priorité de la recherche hydrologique et un préalable aux aménagements hydrauliques. Les hypothèses sur les changements globaux de climats comme les modifications importantes de l'occupation des sols doivent inciter le suivi du bilan hydrologique sur bassins versants représentatifs observés sur de longues durées.

Les abaques et les formules que nous avons pu tirer des observations existantes au Sénégal sont perfectibles même pour les régions les mieux connues. Leur utilisation doit être faite avec beaucoup de précaution, après une visite minutieuse sur le terrain, et une comparaison des conditions morphoclimatiques entre bassins. En effet les cas particuliers ou les exceptions sont plus fréquentes que ne l'auraient aimé les techniciens.

Malgré la multiplication des méthodes de prédétermination des paramètres hydrologiques sur petits bassins versants et l'utilisation d'outils de plus en plus sophistiqués (télé-détection spatiale, SIG, ...), la comparaison à un bassin connu reste le moyen le plus sûr pour appréhender le fonctionnement d'un marigot sur lequel on ne veut pas faire de mesure. Les programmes d'installation et d'observation de bassins versants représentatifs initiés en 1959 par Jean Rodier devrait trouver un second souffle avec les nouvelles préoccupations d'aménager le territoire en conservant l'environnement.

REFERENCES

- Albergel, J. (1986) Evolution de la pluviométrie en Afrique soudano sahélienne. Exemple du Burkina Faso. In: *Coll. internationale sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences sur la sécheresse*. CIEH, Ouagadougou.
- Albergel, J. (1991) Une méthode « expert » pour la conception des barrages « anti-sel » dans les bas-fonds de basse et moyenne Casamance. *Séminaire Conservation et utilisation durable des ressources naturelles du bassin hydrographique de la Casamance* (ed. par Pegrin, Pomerlot & Albergel) (22-26 octobre 1990, Ziguinchor, Sénégal). UICN.
- Albergel, J., Dacosta, H. & Pépin, Y. (1992) Régionalisation des paramètres hydrologiques à prendre en considération pour l'aménagement d'un bas-fond rizicole dans l'estuaire de la Casamance Sénégal. *J. Hydrol. Montpellier* (Régionalisation en hydrologie: application au développements) 8, 291-306.
- Albergel, J., Diatta, M., Grouzis, M., Pérez, P. & Sène, M. (1995) Réhabilitation d'un hydrosystème semi-aride au Sénégal par les aménagements du paysage. In: *L'Homme peut-il refaire ce qu'il a défilé?* (ed. par R. Pontanier, A. M'Hiri, N. Akrimi, J. Aronson & E. Le Floch), 293-306. John Libbey Eurotext, Paris.
- Albergel, J., Lamachère, J. M., Lidon, B., Mokadem, A. I. & Van Driel, W. (1993) Mise en valeur agricole des bas-fonds au Sahel. Typologie, fonctionnement hydrologique, potentialités agricoles. *Rapport final d'un projet CorafR3S*, CIEH, Ouagadougou.
- Angé, A. (1991) Gestion de la fertilité des sols et stratégies de mise en valeur des ressources naturelles. Exemple du mil dans les systèmes de culture du sud du bassin arachidier sénégalais. In: *Terres de savane, terres fertiles?*, 155-164. Cirad CA Publ.
- Banque Mondiale (1993) Gestion des ressources en eau. In: *Doc. de politique générale de la Banque Mondiale*.
- Bassel, M., Pépin, Y. & Thiébaux, J. P. (1994) Rapport de campagne 1994. *Bassin urbain de Dakar*. Dakar.
- BCEOM (1985) Aménagement de la plaine de Baïla.

- Bertrand, R. (1972) Morphopédologie et orientations culturelles des régions soudanaises du Sine-Saloum (Sénégal). *Agron. Trop.* 17(11), 1115-1190.
- Brunet-Moret, Y. (1970) *Etude hydrologique en Casamance*. Rapport définitif, Orstom, Paris.
- Conac, G., Savonnet Guyot, C. & Conac, F. (1984) Les politiques économiques de l'eau en Afrique. Développement agricole et participation paysanne. *Acte du colloque de la Sorbonne 1983*. Economica edn.
- Dacosta, H. (1989) Précipitations et écoulements sur le bassin de la Casamance. Thèse de doctorat de 3ème cycle géographie, UCAD.
- Dubreuil, P., Chaperon, P., Guiscafré, J. & Herbaud, J. (1972) *Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux: années 1951-1969*. Orstom, Paris.
- Dumont, R. (1986) *Pour l'Afrique, j'accuse. Terre humaine*. Plon, Paris.
- ICWE (1992) *The Dublin Statement and Report of the Conference*. Conférence préparatoire au Sommet de la Terre. Organisation Météorologique Mondiale, Genève.
- Leroux, M. (1983) *Le climat de l'Afrique tropicale*. Champion, Paris.
- Michel, P. (1960) Recherche géomorphologique en Casamance et en Gambie méridionale. Rapport BRGM, Dakar.
- Michel, P. (1973) *Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique*. Mém. Orstom no. 63, Orstom, Paris.
- Montoroi, J. P., Albergel, J., Dobos, A., Fall, M. & Sall, S. (1993) Rehabilitation of rice culture in the acid sulfate soils of Casamance. In: *IV Congrès international de l'AISS, sur les sols sulfatés acides* (ed. par D. L. Dent & M. E. F. Mensvoort) (Ho Chi-Minh, Vietnam, février 1992), 196-203. Selected Papers Publ. 53.
- Montoroi J. P. (1994) Dynamique de l'eau et géochimie des sels d'un bassin versant aménagé de Basse-Casamance (Sénégal). Conséquences sur la gestion durable de l'écosystème de mangrove en période de sécheresse. Thèse de doctorat (Pédologie), Université Nancy I, France.
- Olivry, J. C. & Dacosta, H. (1984) Le marigot de Baïla: bilan des apports hydriques et évolution de la salinité. Campagnes 1980-1983. Rapport Orstom, Dakar.
- Pérez, P. (1994) Genèse du ruissellement sur les sols cultivés du Sud Saloum (Sénégal). Thèse de Doctorat, Ensam Montpellier, France.
- Orstom/Rhein Ruhr (1963) Etude hydrologique des bassins versants sur les profils routiers de Matam-Bakel et Bakel-Kidira Dakar.
- Pouyaud, B., Albergel, J., Camus, H., Chevallier, P. & Lamachère, J. M. (1995) Réhabilitation des régimes hydriques et hydrologiques des terres semi-arides dégradées. In: *L'homme peut-il refaire ce qu'il a défilé?* (ed. par R. Pontanier, A. M'Hiri, N. Akrimi, J. Aronson & E. Le Floch), 49-64. John Libbey Eurotext, Paris.
- Raunet, M. (1985) Bas-fonds et riziculture en Afrique. Approche structurale comparative. *Agron. Trop.* 40(3), 181-200.
- Rochette, R. M. (1989) *Le Sahel en lutte contre la désertification: leçons d'expériences*. CILSS, PAC, GTZ, Berlin.
- Rodier, J. A. (1975) *Evaluation de l'écoulement annuel dans le Sahel Tropical Africain*. Trav. & Doc. de l'Orstom, Paris.
- Rodier, J. A. & Auvray, C. (1965) *Estimation des débits des crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique Occidentale*. Orstom-CIEH, Paris.
- Rodier, J. A. & Auvray, C. (1965) *Estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficies inférieures à 20 km² en Afrique Occidentale*. Orstom-CIEH.
- Sagna, P. (1988) Etude des lignes de grains au Sénégal. Thèse de doctorat de 3ème cycle de Géographie, UCAD, Dakar.
- Sall, M. (1983) Dynamique et morphogenèse actuelles au Sénégal Occidentale. Thèse de doctorat d'Etat-ès-Lettres, Université Louis Pasteur de Strasbourg, France.
- SOMIVAC-USAID-ISRA (1985) Actes de la deuxième table-ronde sur les barrages anti-sel. Ziguinchor, 12-15 juin 1985.
- Valentin, C., Collinet, J. & Albergel, J. (1994) Assessing erosion in west African savannas under global change: overview and research needs. In: *15th World Congress of Soil Science* (Acapulco, Mexico, 10-16 July 1994), 7a, 255-274.