

Caractérisation hydrologique des petits barrages

Franck Gourdin

Philippe Cecchi

Daniel Corbin

Jackie Étienne

Soungalo Koné

Alain Casenave

Qu'il s'agisse de « fonctionnement » ou d'« usages », il est évident que la disponibilité de la ressource en eau est l'un des éléments qui conditionnent fondamentalement la valorisation des petits barrages. Édifiés voilà déjà plusieurs années, voire dizaines d'années, on sait maintenant que les chroniques anciennes utilisées pour le dimensionnement des ouvrages diffèrent singulièrement des chroniques mises à jour avec les données des années récentes (HUBERT *et al.*, 1998). Paradoxalement, tandis que les séries pluviométriques se caractérisent par une nette diminution des apports, des travaux récents révèlent simultanément une augmentation des coefficients de ruissellement des bassins versants (MAHE *et al.*, 2003). Le comportement hydrologique des bassins soudano-sahéliens paraît de fait en pleine mutation : l'effet direct d'un changement climatique, l'évolution des couverts végétaux, des états de surface et d'occupation des sols sur les bassins versants, ou encore la perturbation des réseaux hydrographiques par la multiplication d'ouvrages de prise et de stockage sont autant d'éléments susceptibles d'interagir. En tout état de cause, la capacité actuelle des retenues et les conditions (climatiques et hydrologiques) nécessaires à leur remplissage doivent désormais être réévaluées.

D'un autre point de vue et du fait de la saisonnalité des écoulements en régime soudano-sahélien, la variabilité hydrologique au sein même des réservoirs exerce un très fort contrôle sur les ressources diverses associées aux petits barrages. En terme de variabilité, il convient donc de caractériser les divers états des systèmes aquatiques, en fonction des rythmes d'alternance des périodes de crue et d'étiage. Une approche précise, à court pas de temps, du fonctionnement hydraulique des lacs en relation avec les apports et les pertes est donc apparue incontournable.

Introduction

Les résultats présentés ne prétendent pas rendre compte du fonctionnement hydrologique complexe de cette zone de savane de transition, par le passé abondamment étudiée par les hydrologues de l'Orstom (voir notamment CAMUS *et al.*, 1976 ; Équipe Hyperbav, 1990 et références incluses). Cette complexité est encore accrue dans le contexte des bassins versants de petite taille ($\leq 20 \text{ km}^2$) qui sont drainés pour l'alimentation des réservoirs. Les résultats proposés ainsi visent d'abord à examiner les contraintes hydrologiques qui pèsent sur les petits barrages du nord de la Côte d'Ivoire et à aborder leur spécificité.

La pluviométrie dans le nord de la Côte d'Ivoire

Le territoire ivoirien est marqué par une grande hétérogénéité de conditions pluviométriques (fig. 1), depuis les zones soudaniennes du sud du pays, où la pluviométrie est abondante (jusqu'à plus de 2 000 mm an^{-1} à l'extrême sud-ouest, structure bimodale), jusqu'aux régions septentrionales sahélo-soudaniennes, frontalières du Burkina Faso et du Mali (de l'ordre de 1 000 mm an^{-1} , structure monomodale).

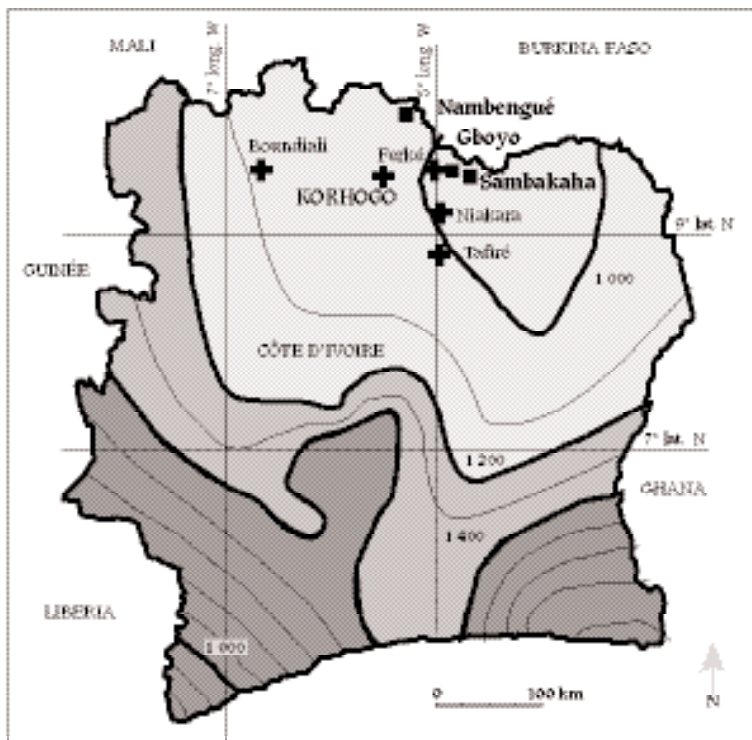


Fig. 1 - Isohyètes interannuelles (mm) sur la période 1966-1995.

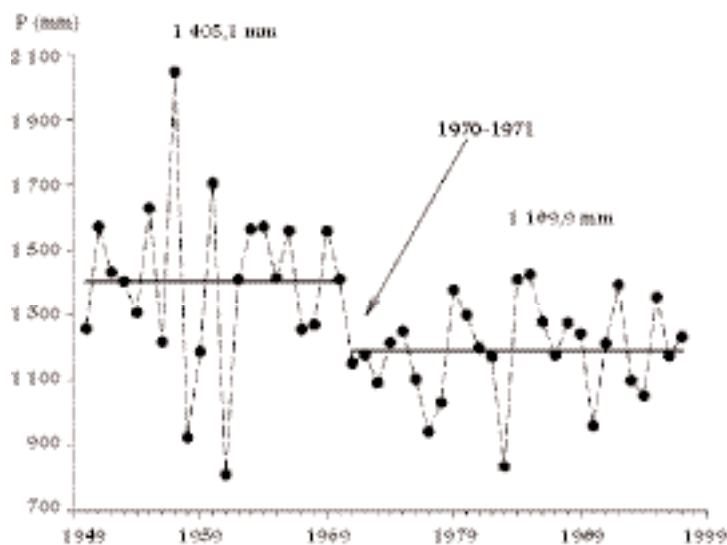
Sont figurés :

- +** : postes pluviométriques dont les séries longues ont été utilisées pour les analyses de segmentation ;
- : les trois réservoirs équipés pour les suivis hydrologiques.

(Source : Direction de l'Eau à Abidjan)

À cette forte hétérogénéité spatiale, se superpose une importante variabilité temporelle, perceptible à diverses échelles, et marquée en premier lieu, à l'échelle ouest-africaine tout entière, par une discontinuité dans les chroniques pluviométriques (MAHÉ *et al.*, 2001). L'utilisation de la méthode de segmentation de Hubert, qui permet de discriminer des séquences stationnaires au sein des séries longues (HUBERT *et al.*, 1989), met clairement en exergue la rupture observée à partir des années 1970 (fig. 2). L'application de cette procédure à l'ensemble des séries longues disponibles pour le nord de la Côte d'Ivoire (Korhogo, Boundiali, Ferkéssédougou, Niakaramandougou et Tafiré, fig. 1) réaffirme le caractère général des tendances observées (tabl. I).

Fig. 2 - Pluviométrie annuelle à Korhogo (P) de 1950 à 1998 ; les pluviométries annuelles moyennes des deux sous-séries stationnaires [50-70] et [71-98], discriminées ($p = 0,05$) par la méthode de segmentation de Hubert (libre accès sur Internet <<http://www.cig.ensmp.fr/~hubert/segment.htm>>) sont indiquées.



Tabl. I - Application de la procédure de segmentation de Hubert ($p = 0,05$) aux séries longues disponibles pour le nord de la Côte d'Ivoire. La longueur des séries (N), et les moyennes (en gras) et écarts-types (en italique) des sous-séries stationnaires sont présentées.

(Sources : Comité interafricain d'études hydrauliques (CIEH), Agence pour la sécurité de la navigation aérienne (Asecna) et IRD.

Boundiali (N = 41)	[1950 - 1975] 1669,2 (<i>354,6</i>)	[1976 - 1990] 1266,4 (<i>214,5</i>)
Korhogo (N = 49)	[1950 - 1970] 1405,1 (<i>266,4</i>)	[1971 - 1998] 1189,9 (<i>146,3</i>)
Ferkéssédougou (N = 47)	[1950 - 1965] 1440,6 (<i>252,3</i>)	[1966 - 1996] 1160,7 (<i>154,7</i>)
Niakaramandougou (N = 38)	[1953 - 1968] 1268,2 (<i>231,5</i>)	[1969 - 1990] 1060,8 (<i>198,2</i>)
Tafiré (N = 39)	[1952 - 1968] 1205,8 (<i>287,4</i>)	[1969 - 1990] 1019,2 (<i>198,6</i>)

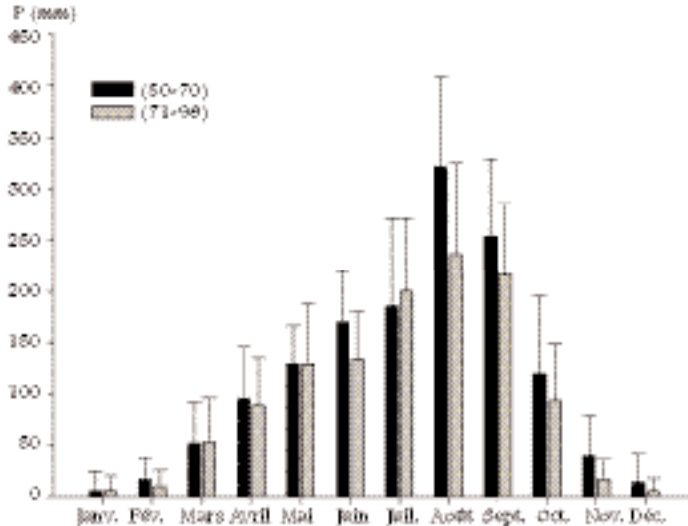


Fig. 3 - Pluviométrie mensuelle moyenne à Korhogo (P) pour chacune des deux sous-séries différenciées par la méthode de Hubert.

Ces résultats indiquent notamment que la péjoration pluviométrique (de l'ordre de 250 mm an⁻¹ en moyenne) qui a débuté fin des années 1960 – début des années 1970 se poursuit encore à l'heure actuelle, puisque aucune segmentation positive n'a été enregistrée depuis.

La structure monomodale de la répartition des pluies demeure en revanche inchangée (fig. 3).

Ce contexte climatique justifie *a posteriori* les efforts entrepris par les autorités ivoiriennes pour sécuriser les ressources en eau dans le nord du pays. Trente-quatre réservoirs de grande taille ont été édifiés dans les années 1970 pour l'irrigation de productions vivrières (riziculture) et commerciales (canne à sucre), tandis que 269 petits barrages dévolus spécifiquement à l'abreuvement du bétail durant la saison sèche y ont été créés à partir des années 1980.

Dans les deux cas, l'objectif était explicitement de rendre saisonnièrement disponibles les ressources en eau, pour l'irrigation de contre-saison et la sédentarisation des troupeaux sur leurs parcours de saison sèche. L'exploitation rationnelle de ces ressources en eau ne s'opposait *a priori* en rien à leur épuisement annuel. Pour autant, la persistance effective de la plupart des retenues a rapidement permis d'envisager le développement d'activités artisanales – pêche en premier lieu – complémentaires de la vocation initiale des réservoirs. Dans le cas des réservoirs à vocation pastorale, le contrôle de l'exploitation halieutique est même devenu un outil de gestion des aménagements (voir Coulibaly *et al.*, ce

**Brumes du petit matin sur les berges
du réservoir de Solomougou.
En hautes eaux, toute la cuvette lacustre
est inondée et de vastes surfaces situées
sur la périphérie du lac sont ennoyées.
Ces aires inondées, très attractives
pour les poissons, constituent autant
de refuges où de nombreuses espèces
viennent se reproduire.**



volume). La pérennisation de la ressource en eau à l'échelle interannuelle devenait alors une condition *sine qua non* au renouvellement des populations de poissons exploitées.

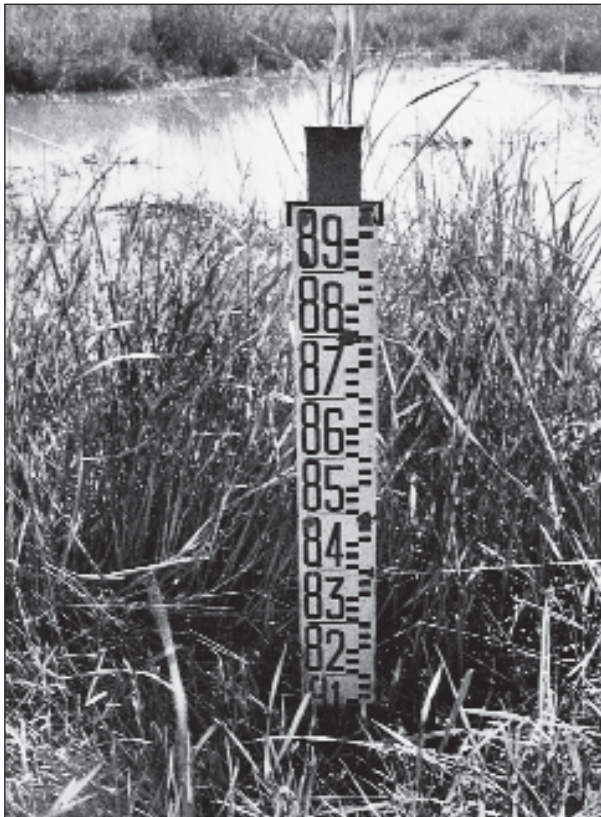
De fait, si la plupart des retenues à vocation pastorale apparaissent généralement pérennes (Gourdin *et al.*, ce volume), elles sont cependant caractérisées par des rythmes saisonniers extrêmement contrastés. Les variations observées (de cote, et donc de surface et de volume) déterminent ainsi les caractéristiques et contraintes d'habitats auxquels sont soumis les peuplements qui, spontanément ou à la faveur d'introductions, ont colonisé les réservoirs.

Fonctionnement hydrologique des réservoirs

L'équipement et le suivi quotidien de quelques réservoirs avec des installations hydrologiques simples (stations limnigraphiques dans les réservoirs, déversoirs et affluents principaux ; un poste pluviométrique au moins par bassin versant) ont permis de réaliser un suivi hydrologique complet au pas de temps journalier durant 16 mois (avril 1997-septembre 1998 ; tabl. II, fig. 4).

	Latitude N	Longitude W	Aire BV (km ²)	Superficie (ha)	Prof. max (m)	Volume (10 ³ m ³)
Nambengué	10° 03' 12"	05° 18' 57"	11,0	9,5	2,85	105
Sambakaha	09° 24' 09"	05° 06' 21"	21,2	14,7	3,00	139
Gboyo	09° 26' 32"	05° 07' 55"	10,2	7,1	2,85	80

Tabl. II - Localisation et caractéristiques des réservoirs équipés (aire des bassins versants ; superficie, profondeur maximale et volume des réservoirs à la cote de déversement).



Échelle limnologique installée dans le réservoir de Nambengué. La lecture d'une échelle limnimétrique est une opération simple et peu coûteuse qui permet de connaître avec précision la surface en eau et la capacité disponible d'un réservoir, une fois calibrées ses courbes de tarage.

Le schéma général du fonctionnement hydrologique des réservoirs repose sur leur remplissage saisonnier à la faveur du gonflement annuel du ou des marigots dont ils sont tributaires. La cote maximale des plans d'eau est définie par la hauteur du seuil qui équipe les déversoirs de la plupart des digues : seule une fraction des écoulements est ainsi retenue. La durée de la période de déversement est généralement limitée aux mois d'hivernage (août-novembre). Des événements pluviométriques intenses peuvent toutefois interrompre le cycle de décrue et induire un remplissage précoce (par exemple en juin 1997 à Sambakaha, suite à une pluie de 87,5 mm en quelques heures ; fig. 4 B).

Si le mécanisme de décrue durant la saison sèche est relativement uniforme et linéaire pour les différentes retenues (variant entre 5,2 mm j⁻¹ à Sambakaha et 8,6 mm j⁻¹ à Gboyo), il n'en va pas de même du mécanisme de remplissage en saison des pluies, où les réponses aux précipitations sont très variables, dépendantes à la fois du niveau de la nappe, du type de sol, du degré de saturation en eau et de la nature du couvert végétal.

Les différences sont franches : la retenue de Nambengué (fig. 4 A) réagit immédiatement aux précipitations (nappe affleurante) tandis que le temps de réaction des retenues de Sambakaha et Gboyo (fig. 4 B et 4 C) est beaucoup plus lent : il faut ainsi 450 mm répartis sur trois mois environ pour amorcer le remplissage de ces réservoirs.

**Limnigraphe sur la digue
du réservoir de Nambengué
(axe Ouangolodougou Niellé).
Si pour l'ensemble des lacs étudiés,
le mécanisme de décrue durant
la saison sèche est relativement
uniforme et linéaire, les réactions
aux précipitations et aux écoulements
sont extrêmement contrastées.
Cette hétérogénéité hydrologique
est conditionnée par des facteurs
morphologiques et édaphiques
mais également contrainte
par l'évolution des états de surface
des petits bassins versants
dont les réservoirs sont tributaires.**



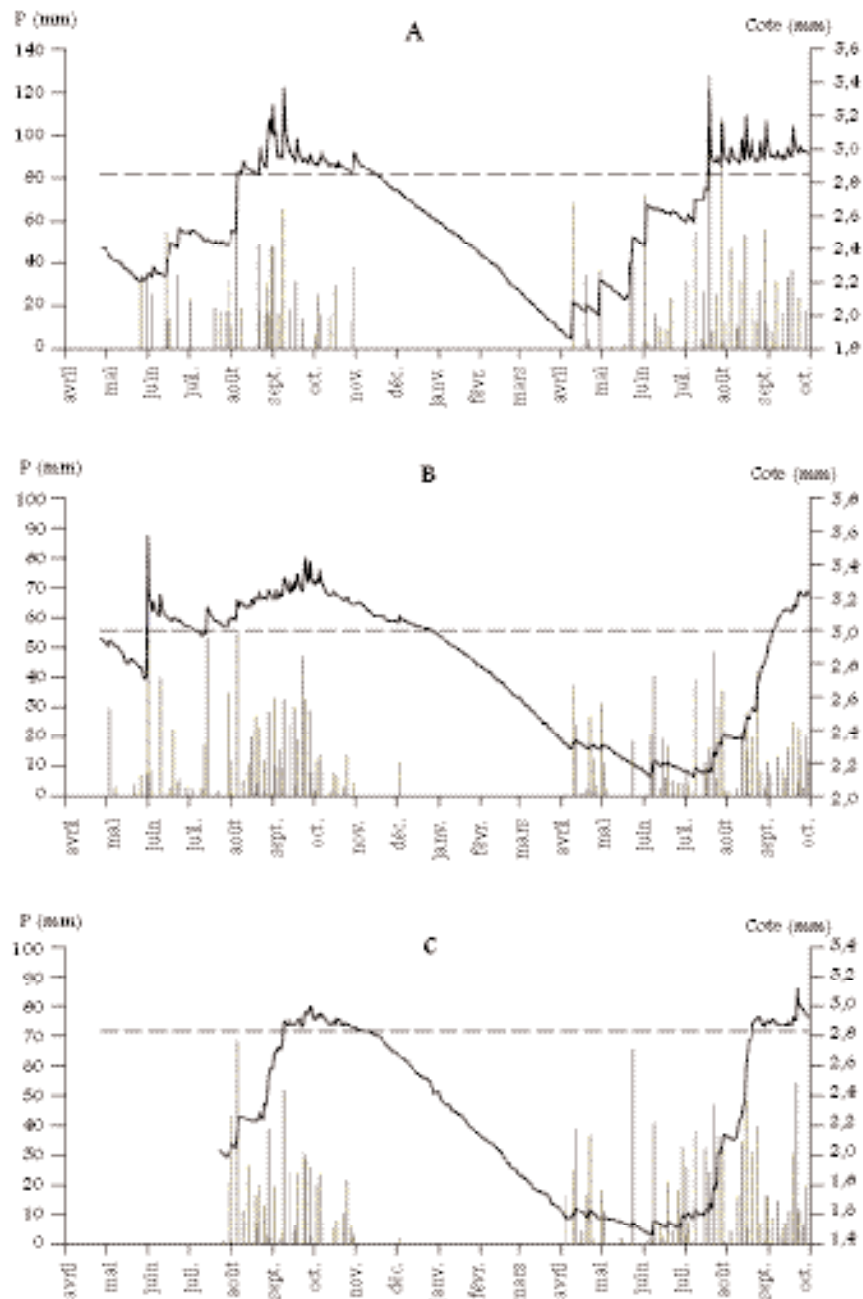


Fig. 4 - Pluviométrie (histogramme) et variation de cote (trait) entre avril 1997 et octobre 1998 de trois petits barrages du nord de la Côte d'Ivoire (A : Nambengué, B : Sambakaha, C : Gboyo ; voir localisation sur la figure 1). La ligne horizontale (tirets) situe la cote de déversement de chacune des retenues.

L'importante hétérogénéité des réactions des petits bassins versants aux événements pluvieux, et, simultanément, la multitude de critères qui décident des capacités de ruissellement des bassins en zone soudano-sahélienne ont maintes fois été relevées (voir ALBERGEL *et al.*, 1993 ; NOUVELOT, 1993 ; FAO, 1996). Ce différentiel dans les réponses des bassins versants n'est pas seulement lié aux caractéristiques intrinsèques des bassins et des réservoirs. Taille, pente, indice de compacité et géologie des bassins, d'une part, forme de l'averse, d'autre part, jouent un rôle déterminant. Pour les bassins cultivés et sans grand relief, l'humidité du sol et l'état végétatif prennent une grande importance, tandis que le rôle de la formation géologique en profondeur devient secondaire : la nature et le travail du sol jouent alors un rôle essentiel dans l'infiltration (JOIGNEREZ et GUIGEN, 1991).

Au-delà des facteurs strictement morphologiques (les bassins) et climatiques (les pluies), l'anthropisation des versants, au travers des cycles de culture, des mises en jachères, ou à l'inverse des brûlis, constitue un facteur dynamique, évolutif dans le temps comme dans l'espace, qui contribue de façon déterminante à structurer tant le ruissellement que l'infiltration et la recharge des nappes. L'incidence des nappes sur le renforcement des écoulements est cependant difficile à prendre en compte : des indices géomorphologiques peuvent suffire pour chiffrer l'ensemble des facteurs d'écoulement. Mais ils ne peuvent rendre compte de l'influence de la nappe souterraine qui, lorsqu'elle affleure, peut augmenter considérablement les volumes d'écoulement. Cette lacune pourra alors entraîner de fortes sous-estimations des débits écoulés, particulièrement dans les zones où les niveaux piézométriques sont sub-affleurants (cas de Nambengué).

La contribution du ressuyage des nappes au bilan hydrique des réservoirs se manifeste durablement après le tarissement des écoulements superficiels. La profondeur moyenne des sites équipés pour cette étude varie entre 0,95 et 1,15 m. Autrement dit, avec une évapotranspiration annuelle supérieure à 1,3 m, ces réservoirs devraient théoriquement s'assécher annuellement en l'absence d'apports phréatiques suffisamment conséquents pour limiter l'impact de cette demande évaporatoire. Les études anciennes menées sur bassins versants expérimentaux avaient de fait largement démontré que la contribution des nappes, pouvant varier entre 40 et 90 % de l'écoulement global, est fondamentale dans le bilan hydrologique des petits bassins versants soudano-sahéliens (CAMUS *et al.*, 1976 ; HYPERBAV, 1990).

Courbe Hauteur-Surface- Volume standard

De nombreux facteurs concourent à induire une forte variabilité dans la géométrie des petits barrages. Les trois paramètres les plus simples qui caractérisent cette géométrie sont sa profondeur (H), sa surface (S) et son volume (V). La notion de base repose sur la caractérisation de la loi volumique des réservoirs, de la forme $V = K (H)^\alpha$. Le coefficient α , appelé coefficient de forme, varie avec la concavité des berges. Le coefficient K, appelé coefficient d'ouverture, varie lui avec la forme de la vallée : plus la vallée est ouverte, plus sa pente est faible, plus grand est ce coefficient. Pratiquement, le coefficient K correspond au volume du réservoir pour une lame d'eau de 1 m. Nous renvoyons le lecteur à la thèse de François MOLLE (1991) qui propose une analyse très détaillée de la géométrie des Açudes du Sertão brésilien. Les mêmes principes géométriques et donc méthodes de calcul sont applicables aux réservoirs ouest-africains.

Des topographies et bathymétries précises ont été réalisées pour huit petits barrages (CORBIN et ÉTIENNE, 1998). Des courbes Hauteur-Volume-Surface (H-V-S) en ont été déduites, affinées ensuite sur la base des suivis limnimétriques réalisés sur les différents sites et après élimination de tous les points parasites. Pour chaque réservoir, les relations liant les différents paramètres de sa géométrie ont été établies. Les moyennes des coefficients des différentes régressions spécifiques obtenues pour chacune des retenues ont ensuite été considérées pour établir les équations moyennes (fig. 5 et 7).

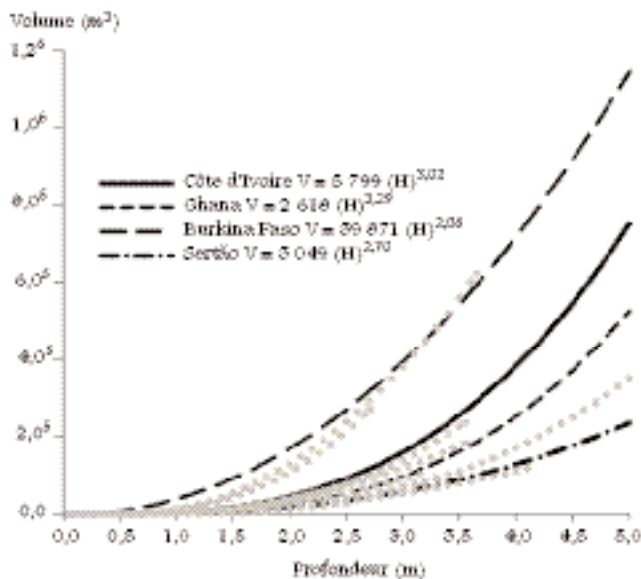


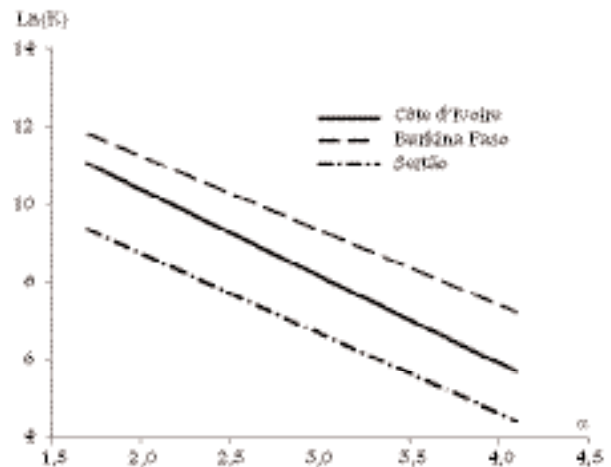
Fig. 5 - Lois volumiques moyennes obtenues pour quatre ensemble de réservoirs :
 Côte d'Ivoire (cette étude) ;
 Ghana (LIEBE, 2002) ;
 Burkina Faso (D'AT DE ST FOULC *et al.*, 1985) ;
 Brésil (MOLLE, 1991).
 Les points gris indiquent les lois volumiques de chacun des huit réservoirs ivoiriens considérés dans cette étude, à partir desquelles la loi volumique moyenne (trait plein) a été calculée.

La loi volumique moyenne $V = 5\,799 (H)^{3,02}$ obtenue à partir de notre échantillon de huit réservoirs du nord de la Côte d'Ivoire est présentée figure 5, en regard des relations de même forme obtenues par d'autres auteurs sur d'autres ensembles de réservoirs (D'AT DE ST FOULC *et al.*, 1985 ; MOLLE, 1991 ; LIEBE, 2002). Ces auteurs ont tous insisté sur la très importante dispersion des courbes individuelles spécifiques de chacun des barrages considérés autour des lois moyennes. Les valeurs des coefficients K et α , caractéristiques d'un réservoir donné, sont en effet assez sensibles, en particulier à la détermination du point le plus bas du réservoir à partir duquel les hauteurs seront mesurées. La faible taille de notre échantillon ne permet pas l'analyse de la variabilité de ces coefficients, et *a fortiori* des causes de cette variabilité.

Pour autant, chaque courbe moyenne est indicatrice d'un comportement général, dans le contexte géomorphologique particulier de la région d'implantation des réservoirs. Sa comparaison avec d'autres courbes moyennes extraites d'autres jeux de données peut être informative. Il existe ainsi généralement une relation linéaire inverse qui lie ces deux coefficients moyens et qui met en exergue les différences géomorphologiques évoquées précédemment, avec, pour des réservoirs dotés de coefficients de forme (α) élevés, des coefficients d'ouverture (K) faibles, et inversement (fig. 6).

À profondeur constante (K correspondant au volume d'un réservoir pour une lame d'eau de 1 m), les réservoirs du Burkina Faso feront face à une demande évaporatoire beaucoup plus élevée que les réservoirs du Nordeste brésilien, et dans une moindre mesure que ceux de Côte

Fig. 6 - Relations entre les coefficients d'ouverture (K) et de forme (α) en Côte d'Ivoire, au Burkina Faso et dans le Sertão brésilien. Il n'existe pas de telle relation pour les réservoirs du Ghana.



d'Ivoire en raison de pentes plus faibles et donc de surfaces de miroir d'eau plus grandes. En conséquence, à un volume stocké déterminé peuvent correspondre des digues d'importance et donc de coûts très différents. De la géométrie du réservoir, en particulier du profil de la vallée à la hauteur du barrage, dépendra donc la qualité économique du projet. Cette qualité peut se ramener à l'étude du rapport volume d'eau stockée/volume de terre de la digue, dont dépendra *in fine* le coût du mètre cube d'eau stockée.

La surface des plans d'eau est une information d'accès aisé par télédétection (voir Gourdin *et al.*, ce volume). Il peut donc être intéressant et utile de rechercher une relation liant surface (S) et volume (V) des réservoirs, qui, si elle existe, ouvrira des perspectives d'évaluation rapide et synoptique des ressources en eau à l'échelle régionale, à partir des surfaces en eau estimées par télédétection (fig. 7).

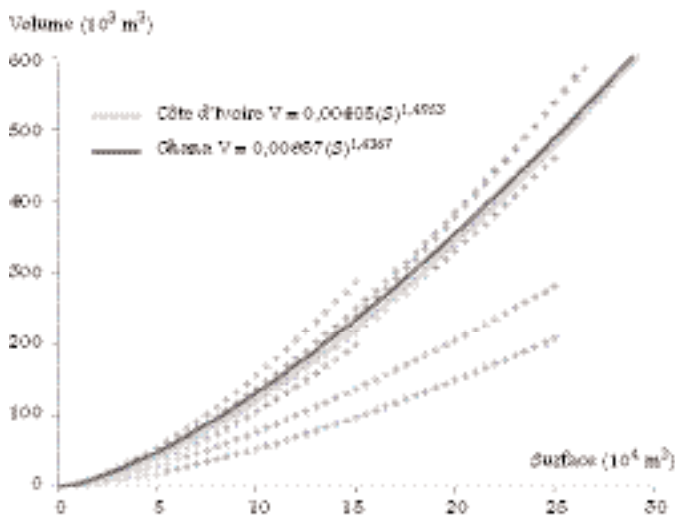


Fig. 7 - Lois d'estimation des volumes à partir des surfaces des réservoirs.
En noir, loi moyenne pour l'échantillon des 8 réservoirs du nord de la Côte d'Ivoire, en gris, pour un échantillon de 61 réservoirs du Ghana.
Les croix représentent les relations spécifiques de chacun des 8 réservoirs de Côte d'Ivoire à partir desquels la relation moyenne a été établie.

Le faible effectif de notre échantillon limite une nouvelle fois la portée de la relation établie pour les réservoirs nord-ivoiriens, tant la diversité géométrique des réservoirs peut potentiellement induire de variabilité lors de la définition des coefficients de l'équation $V = V_0 (S)^{\alpha}$ liant le volume d'un réservoir à sa surface. L'équation moyenne établie à partir des coefficients spécifiques de chacun des huit réservoirs considérés (fig. 7) se révèle toutefois très proche de l'équation moyenne obtenue dans le nord du Ghana (LIEBE, 2002).

S'il paraît difficile de pousser plus avant la comparaison entre ces deux ensembles de réservoirs, deux points sont cependant à souligner :

- le coefficient de la fonction puissance est très proche de 1,5, valeur théorique attendue pour une demi-pyramide parfaite dont le volume croît selon la loi $V = (S)^{3/2}$: les réservoirs considérés, de petite taille, présentent une réelle unité morphologique (MOLLE, 1991) ;
- la rigueur méthodologique mise en œuvre tant sur le terrain que pour l'exploitation des données a permis au Ghana de valider à plus de 95 % les volumes estimés à partir des surfaces mesurées par télédétection par comparaison aux volumes effectivement stockés dans les réservoirs (LIEBE, 2002) : la méthode est robuste. Elle mériterait, par un effort de terrain soutenu sur un large échantillon, d'être appliquée aux réservoirs du nord du pays pour établir et valider une relation véritablement représentative.

Les approches précédentes ne permettent pas d'estimer *a priori* les conditions de remplissage des réservoirs pastoraux du nord de la Côte d'Ivoire. Des diverses méthodes employées en Afrique occidentale pour l'évaluation des écoulements sur des bassins non jaugés, la méthode Vuillaume-Dubreuil (DUBREUIL et VUILLAUME, 1975) était ici la seule utilisable sur la base des informations disponibles. Cette méthode consiste à déterminer l'écoulement moyen annuel des bassins versants non jaugés à partir de leurs caractéristiques physiques et climatiques. Elle est applicable entre les isohyètes 400 et 4 200 mm pour des bassins dont la superficie est comprise entre 10 et 100 km².

Les variables utilisées pour le calcul des coefficients d'écoulement (rapport entre la lame écoulee et la lame précipitée) sont la superficie du bassin, la pente, la nature du sol et un facteur climatique représentant la part disponible pour l'écoulement de l'apport pluvial en tenant compte de l'évapotranspiration. La lame écoulee annuelle moyenne E_c est déterminée à l'aide de relations issues de régressions multiples établies graphiquement. En région de savane arbustive (650 à 1 150 mm), E_c s'écrit (FAO, 1996) :

$$E_c \text{ (mm)} = 0,47 \times P_r - 33 \times \log(S) + 0,54 \times D_s + A$$

Avec :

P_r (pluie réduite, mm) : part disponible pour l'écoulement de l'apport pluvial (après évapotranspiration) considéré à l'échelle mensuelle.

$$P_r = \sum_i \delta_i \times (P_i - \text{ETB}/36)$$

P_i : pluie mensuelle du mois i (mm)

ETB : évaporation annuelle moyenne (mm)

$\delta_i = 0$, si $P_i \leq \text{ETB}/36$; $\delta_i = 1$, si $P_i > \text{ETB}/36$

Évaluation des écoulements annuels à partir de la méthode Vuillaume-Dubreuil

S : superficie du bassin versant en km²,

D_s : dénivelée spécifique en m,

A : terme d'aptitude à l'écoulement, égal à - 85 mm pour des terrains granitiques perméables.

Ces coefficients ont été calculés entre 1977 et 1996 pour 33 petits bassins (S ≤ 50 km²) du nord du pays. Les informations requises relatives aux bassins versants ont été extraites des cartes topographiques au 1/50 000, et des cartes géologiques et pédologiques disponibles à diverses échelles. Les informations pluviométriques ont été reprises des recueils anciens : chaque bassin a été associé au poste pluviométrique le plus proche.

Les valeurs annuelles des coefficients d'écoulement calculés pour chacun des bassins sont assez peu dispersées avec une moyenne égale à 23,2 % et un écart-type de 3,9 % (extrêmes : 2 % et 40 %). Il n'y a pas d'évolution significative du coefficient de ruissellement annuel moyen au cours du temps, et seule l'année 1983, qui correspond à l'une des années les plus sèches connues en Côte d'Ivoire, apparaît remarquable (fig. 8).

Les variations des coefficients d'écoulement paraissent directement liées aux fluctuations des précipitations. Pourtant l'anthropisation croissante de nombre de bassins versants durant cette période s'est traduite par une nette évolution, sinon altération, des états de surface (cf. Gourdin *et al.* ce volume), avec un impact attendu sur leur comportement hydrologique qui n'est pas perceptible ainsi.

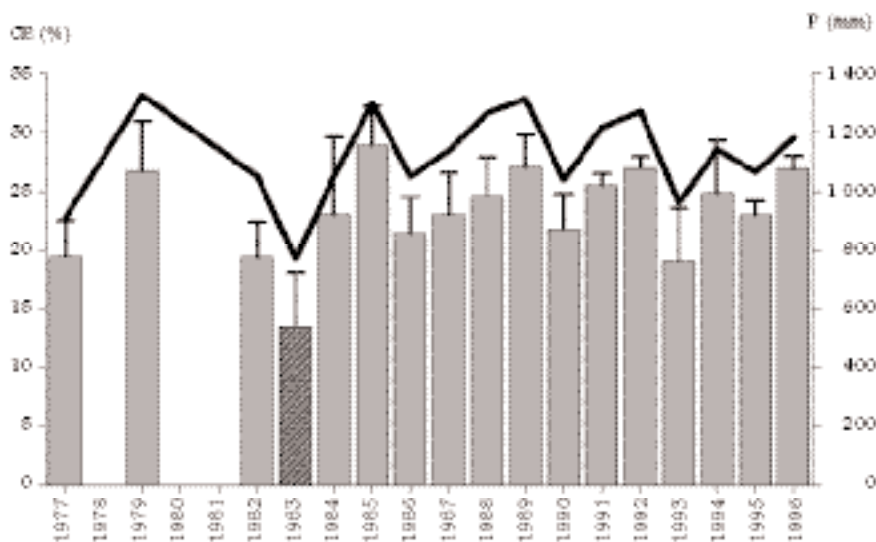


Fig. 8 - Évolution des coefficients d'écoulement moyens (CE %, histogramme) calculés annuellement pour 33 petits bassins versants du nord de la Côte d'Ivoire par la méthode Vuillaume-Dubreuil et de la pluviométrie moyenne annuelle (P mm, trait) sur la zone entre 1977 et 1996. L'année 1983, remarquablement sèche, est indiquée.

En termes de volume, les écoulements associés correspondent en moyenne à $260\,000\text{ m}^3\text{ km}^{-2}\text{ an}^{-1}$ au cours des 20 dernières années. La part du ruissellement a été estimée entre 20 et 30 % de l'écoulement total (régime tropical de transition) à partir des abaques Orstom qui prennent en compte les valeurs de pente et de perméabilité des bassins.

Ainsi de 70 à 80 % des écoulements seraient dus à la restitution des nappes souterraines.

Les approches précédentes ont été complétées par l'étude de trois grands bassins du nord de la Côte d'Ivoire, de superficies comprises entre 300 et 1 500 km², et pour lesquels l'information satellitaire disponible est directement exploitable :

- le Solomougou à Ziébatogo (1 510 km²) ;
- le Lafigué, route de Badikaha (443 km²) ;
- et le Yoréloro à Kategué (338 km²).

Les calculs des coefficients d'écoulement annuels ont été repris à partir de données hydrométriques et pluviométriques fournies par la Direction de l'eau du Service hydrologique d'Abidjan.

Parallèlement, les pourcentages des différentes classes d'occupation des sols sur ces bassins en novembre 1986 et avril 1994 ont été déterminés (cf. Gourdin *et al.*, ce volume). L'évolution de la contribution des différentes classes a été comparée à celle des coefficients d'écoulement sur la même période.

La mise en évidence d'éventuelles tendances dans l'évolution des coefficients d'écoulement a reposé d'abord sur le calcul des moyennes mobiles (pas de temps de deux ans) des séries de chacun des bassins (histogrammes sur les figures 4 a, 4 b et 4 c du cahier couleurs). Pour chaque année, l'écart entre le coefficient d'écoulement précédemment calculé et la valeur moyenne de ce coefficient pour l'ensemble de la série a ensuite été représenté (courbes en trait plein superposées aux histogrammes précédents). L'évolution temporelle de cet indice rend compte de la stationnarité ou non de la série.

Les résultats obtenus pour chacun des bassins sont très contrastés, avec, pour le Lafigué, une nette tendance à l'augmentation des coefficients d'écoulement tandis que pour le Yoréloro, ceux-ci ne paraissent pas avoir évolué sensiblement. La situation est plus complexe pour le Solomougou.

Mise en évidence de l'importance de la variable « occupation du sol » sur l'écoulement à une échelle intermédiaire

		Novembre 1986	Avril 1994
Lafigué	classes [2-4]	41,6%	59,0%
	classes [7-9]	22,0%	10,2%
Solomougou	classes [2-4]	8,9%	18,7%
	classes [7-9]	63,7%	47,2%
Yoréloro	classes [2-4]	3,6%	3,2%
	classes [7-9]	77,2%	79,6%

Tabl. III - Évolution de la contribution des différentes classes d'occupation des sols entre novembre 1986 et avril 1994, sur trois grands bassins versants du nord de la Côte d'Ivoire.

On observe par ailleurs que l'extensification des surfaces cultivées, des sols nus ou dégradés, et des zones d'habitat, au détriment des zones sauvages, savane et forêts (classes [2-4] et [7-9] dans le tableau III, respectivement) a affecté différemment les trois bassins considérés.

Ainsi dans le cas du Lafigué (fig. 4 a du cahier couleurs), les coefficients d'écoulement qui étaient compris jusqu'au début des années 1980 entre 5 et 15 % augmentent ensuite de façon spectaculaire pour atteindre près de 50 % en 1992. La classe des formes d'occupation de l'espace associée à l'anthropisation des milieux augmente dans la même période de près de 20 % (tabl. III).

À l'inverse, pour le bassin du Yoréloro à Kategué (fig. 4 b), sauvage et peu soumis aux diverses pressions anthropiques jusqu'à aujourd'hui, les valeurs des coefficients d'écoulement restent assez stables, et ne dépassent pas 10 %. Simultanément, il n'y a pas d'évolution de la contribution des différentes classes d'occupation de l'espace (tabl. III).

Le cas du bassin du Solomougou est plus complexe (fig. 4 c). La zone marquée par l'influence de la ville de Korhogo, à l'est du bassin, ainsi que le couloir entre Dikodougou et Korhogo (axe nord-sud bien visible au centre du bassin), se dégrade rapidement, tandis que le reste du bassin demeure relativement peu anthropisé. Par ailleurs, les données hydro-métriques disponibles ne vont pas au-delà du début des années 1990. On observe néanmoins une augmentation sensible de l'écoulement qui passe de 5 % à plus de 10 % sur la période.

Une étude plus fine menée en 1998 sur des petits bassins répartis de façon homogène à l'intérieur du bassin du Solomougou n'a pas permis d'évaluer quantitativement et de façon significative l'influence des zones anthropisées par rapport aux zones sauvages en matière d'écoulement, faute notamment de données hydrométriques effectives (KONE, 1998).

Dans un tel cas, il n'existe pas d'alternative à l'utilisation de la méthode Vuillaume-Dubreuil pour l'estimation des coefficients d'écoulement.

Dans le contexte actuel et faute d'études plus poussées, il semble donc prématuré de vouloir mettre en place une relation donnant la valeur de l'écoulement à partir des caractéristiques morphométriques, pluviométriques et d'occupation du sol des bassins. Plusieurs variables complémentaires, aisément accessibles, paraissent requises pour pouvoir progresser dans l'établissement d'une telle relation, en particulier :

- la longueur du rectangle équivalent ;
- l'indice de pente global ;
- une pluie nette annuelle restant à définir, et qui représenterait l'apport pluviométrique net fractionné au cours de l'année après évapotranspiration ;
- un indice Cr qui représenterait la capacité de rétention en eau du bassin par la végétation, calculable simplement à partir des valeurs de l'occupation du sol pour l'année considérée.

Ainsi, si l'on appelle pi le pourcentage en superficie du bassin versant occupé par la classe d'occupation du sol i , et ai un coefficient de pondération représentant la capacité de rétention en eau effective de la classe i , alors :

$$Cr = \sum_i pi * ai$$

Les ai ont été définis pour chaque classe entre 0 et 2 (rétentions nulle et maximale, respectivement ; tabl. IV).

Tabl. IV - Coefficients de capacité de rétention pour chacune des classes d'occupation des sols.

Classe d'occupation des sols	a_i
Habitat	0
Sols nus ou dégradés	0
Cultures	1
Savanes faiblement cultivées	1
Savanes arbustives	1
Savanes arborées	2
Cultures irriguées	2
Forêts	2

Tabl. V - Évolution des coefficients de rétention des bassins versants entre novembre 1986 et avril 1994.

Cr	Lafigué	Solomougou	Yoréloro
Novembre 1986	92,8	119,4	127,6
Avril 1994	78,2	106,6	131,2

Suivant cette définition, le coefficient C_r , compris entre 0 et 200, est utilisable sur des bassins de taille suffisante pour discriminer avec efficacité les différentes classes d'occupation des sols par télédétection (*i. e.* > 25 km²). Les valeurs fortes (> 100) correspondraient alors à des bassins encore sauvages dotés d'une importante couverture végétale, d'une forte capacité de rétention et donc peu propices à l'intensification des écoulements, tandis que les valeurs faibles correspondraient à des bassins anthropisés, voire dégradés, dotés d'une faible capacité de rétention et donc, à l'inverse des précédents, propices à d'importants écoulements.

Dans notre cas, les résultats obtenus par l'utilisation d'un tel indice (tabl. V), compatibles avec les résultats obtenus précédemment, mettent en exergue l'évolution du comportement des bassins du Lafigué et du Solomougou, et l'absence d'évolution perceptible sur le bassin du Yoréloro.

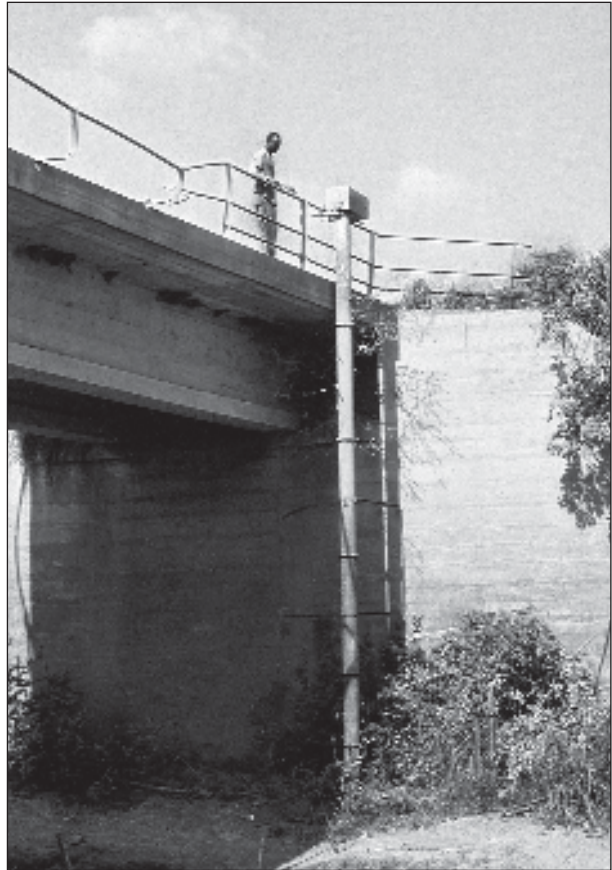
Conclusion

L'édification en grand nombre de barrages de tailles diverses dans le nord de la Côte d'Ivoire s'est imposée à l'État ivoirien en réponse à la péjoration climatique qui a débuté à la fin des années 1960, et qui persiste depuis. À ce déficit pluviométrique, se superposent des dynamiques démographiques actives mais hétérogènes dans l'espace nord-ivoirien. L'extension dans de vastes régions des zones d'habitats et de cultures, au détriment des savanes arborées et des forêts, dans le contexte d'une réelle aridification, se traduit paradoxalement par une augmentation nette des coefficients d'écoulement. Dans ces zones fortement anthropisées, les crues sont ainsi vraisemblablement plus violentes et rapides que par le passé, avec par endroits d'importants risques de dégradation des digues et déversoirs des aménagements, et une intensification des phénomènes érosifs.

L'estimation des coefficients d'écoulements sur les bassins versants de petite taille non jaugés ne peut échapper encore aujourd'hui à l'utilisation des méthodes empiriques, dont pourtant les réserves sont bien connues, en raison en particulier du manque de données locales sur les caractéristiques intrinsèques des bassins, et, trop souvent, de l'absence d'informations pluviométriques pertinentes.

Dans le nord de la Côte d'Ivoire, en année hydrologique normale, la majorité des réservoirs à vocation pastorale est pérenne. Destinées à sécuriser des ressources en eau largement dispersées dans les espaces ruraux, au profit des éleveurs, ces retenues dépendent *pro parte* des

**Pont du Badénou,
sur l'axe Korhogo M'Bengué,
en saison sèche.
Une simple mare très turbide
subsiste encore.
Des crues de plusieurs mètres
de hauteur sont régulièrement
enregistrées sur cet important
affluent du Bandama Blanc.**



écoulements pour leur remplissage mais également de la restitution des nappes pour leur persistance. L'évolution en cours des états de surface, sous l'effet tant de l'aridification que de l'anthropisation des bassins versants, ne sera pas sans influence sur le devenir des précipitations (ruissellement *versus* infiltration ; transports solides) et donc potentiellement sur les conditions de pérennisation des écosystèmes.

Les suivis hydrologiques mis en œuvre sur un petit nombre de réservoirs révèlent des sensibilités assez contrastées aux stimulations pluviométriques : réponses immédiates ou à l'inverse nécessité d'un cumul suffisant pour amorcer leur remplissage en saison des pluies. Dans tous les cas, le remplissage annuel paraît actuellement assuré, selon diverses modalités qui n'interviendront pas sur le volume captif au sein des retenues en fin de saison des pluies, mais dont la temporalité pourra soudainement et violemment perturber l'habitat que ces réservoirs représentent pour les organismes qui s'y développent.

Les petits barrages ont été dimensionnés pour ne retenir qu'une fraction des écoulements transitant par les marigots sur lesquels ils ont été édifiés, l'essentiel des apports étant restitué au réseau hydrographique grâce aux déversoirs qui les équipent. L'étude des caractéristiques géométriques des réservoirs met en exergue leur réelle homogénéité morphologique, qui distingue les réservoirs ivoiriens de leurs homologues implantés dans d'autres régions du monde. En revanche, la relation liant surface et volume est très proche de celle obtenue pour les réservoirs du nord du Ghana. La validation de cette loi, pleinement réalisée au Ghana, ouvre ainsi une perspective synoptique pour l'évaluation quantitative des ressources en eau par télédétection.

Enfin, pérennité des réserves en eau et reproductibilité interannuelle des phénomènes hydrologiques, certes marquée par une relative variabilité dans la succession des épisodes (fréquence et intensité des crues, notamment), contribuent à définir la capacité de résilience des écosystèmes. Pour les peuplements planctoniques qui colonisent ces plans d'eau, par exemple, l'importance des volumes mis en jeu annuellement – qui peut se concrétiser par le renouvellement intégral des masses d'eau – va se traduire par la réinitialisation de l'ensemble des processus qui en conditionnent l'organisation et la structuration. Inversement, pour d'autres compartiments biologiques (macrophytes, poissons, mollusques), les crues permettront de rouvrir momentanément le continuum hydrographique, de rétablir des connexions entre des écosystèmes durablement isolés pendant toute la saison sèche, et donc de favoriser d'éventuels échanges.

Références

- ALBERGEL J., LAMACHÈRE J.-M., LIDON B., MOKADEM A., VAN DRIEL W., 1993 – *Mise en valeur agricole des bas-fonds au Sahel. Typologie, fonctionnement hydrologique, potentialités agricoles*. Rapport final d'un projet Coraf/R3S, CIEH, Ouagadougou, Burkina Faso/Cirad, Montpellier, 335 p.
- CAMUS H., CHAPERON P., GIRARD G., MOLINIER M., 1976 – Analyse et modélisation de l'écoulement superficiel d'un bassin tropical : influence de la mise en culture. Côte d'Ivoire, Korhogo, 1962-1972. Paris, Orstom-IRD, Coll. Travaux et Documents, n° 52, 162 p.
- CORBIN D., ÉTIENNE J., 1998 – *Cartographie de 8 retenues de Côte d'Ivoire étudiées dans le cadre du programme Petits Barrages*. IRD, Bouaké, Côte d'Ivoire, Rapport multigr., 89 p.
- D'AT DE ST FOULC, GILARD O., PIATON H., 1985 – *Petits barrages en terre au Burkina Faso. Bilan et analyse critique*. CIEH, Ouagadougou, Burkina Faso, 180 p. + bibliographie et annexes.
- DUBREUIL P., VUILLAUME, G., 1975 – Influence du milieu physico-climatique sur l'écoulement des petits bassins intertropicaux. *IAHS Publication*, 117 : 205-215.
- FAO, 1996 – *Crues et apports. Manuel pour l'estimation des crues décennales et des apports annuels pour les petits bassins versants non jaugeés de l'Afrique sahélienne et tropicale*. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage, n° 54, 244 p.
- HUBERT P., CARBONNEL J.-P., CHAOUACHE A., 1989 – Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *J. Hydrol.*, 10 : 349-367.
- HUBERT P., SERVAT E., PATUREL J.-E., KOUAME B., BENDJOUDI H., CARBONNEL J.-P., LUBES-NIEL H., 1998 – « La procédure de segmentation, 10 ans après ». In SERVAT E., HUGUES D., FRITSCH J.-M., HULME M. (eds.) : *Water resources variability in Africa during the XXth century*. IAHS Publication, 252 : 267-273.
- HYPERBAV, 1990 – *Structure et fonctionnement hydro-pédologique d'un petit bassin versant de savane humide*. Paris, Orstom, Coll. Études et Thèses, 307 p.
- JOIGNEREZ A., GUIGEN N., 1991 – *Évaluation des ressources en eau non pérennes au Mali* (Tome 1). Projet DNHE-Orstom-Pnud, Orstom, Bamako, Mali, Rapport de campagne 1991, 87 p.
- KONE S., 1998 – *Caractérisation à diverses échelles du comportement hydrologique des petits bassins versants du Nord de la Côte d'Ivoire*. Yamoussoukro, Institut national Polytechnique, mémoire d'élève-ingénieur, 49 p. + annexes.
- LIEBE J., 2002 – *Estimation of water storage capacity and evaporation losses of small reservoirs in the Upper East region of Ghana*. Université de Bonn, RFA, Département de Géographie, Diploma Thesis, 106 p.
- MAHÉ G., L'HÔTE Y., OLIVRY J.-C., WOTLING G., 2001 – Trends and discontinuities in regional rainfall of West and Central Africa, 1951-1989. *Hydrological Sciences Journal*, 46 (2) : 211-226.
- MAHÉ G., LEDUC C., AMANI A., PATUREL J.-E., GIRARD S., SERVAT E., DEZETTER A., 2003 – « Augmentation récente du ruissellement de surface en région soudano-sahélienne et impact sur les ressources en eau ». In SERVAT E., NAJEM W., LEDUC C., AHMED S. (eds.) : *Hydrology of the Mediterranean and Semi-arid Regions*. IAHS Publication, 278 : 215-222.
- MAHÉ G., PATUREL J.-E., SERVAT É., CONWAY D., DEZETTER A., 2005 – Impact of land use change on soil water holding capacity and river flow modelling in the Nakambe River, Burkina Faso. *Journal of Hydrology*, 300 : 33-43.
- MOLLE F., 1991 – *Caractéristiques et potentialités des Açudes du Nord-este brésilien*. Thèse de doctorat, univ. Montpellier-II, 380 p.
- NOUVELOT J.-F., 1993 – *Guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versants ruraux en Afrique tropicale et équatoriale*. Montpellier, CIEH/Orstom, 545 p.

Fig. 1 - Composition colorée des canaux 3, 5 et 7 des scènes Landsat datée du 16/11/86 et localisation des petits barrages.

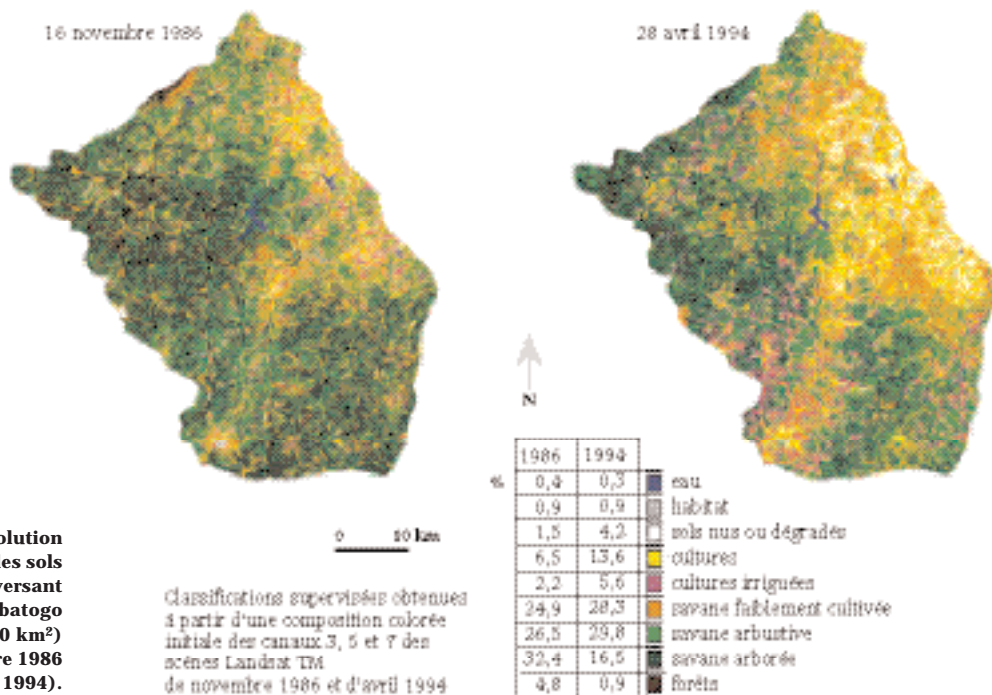
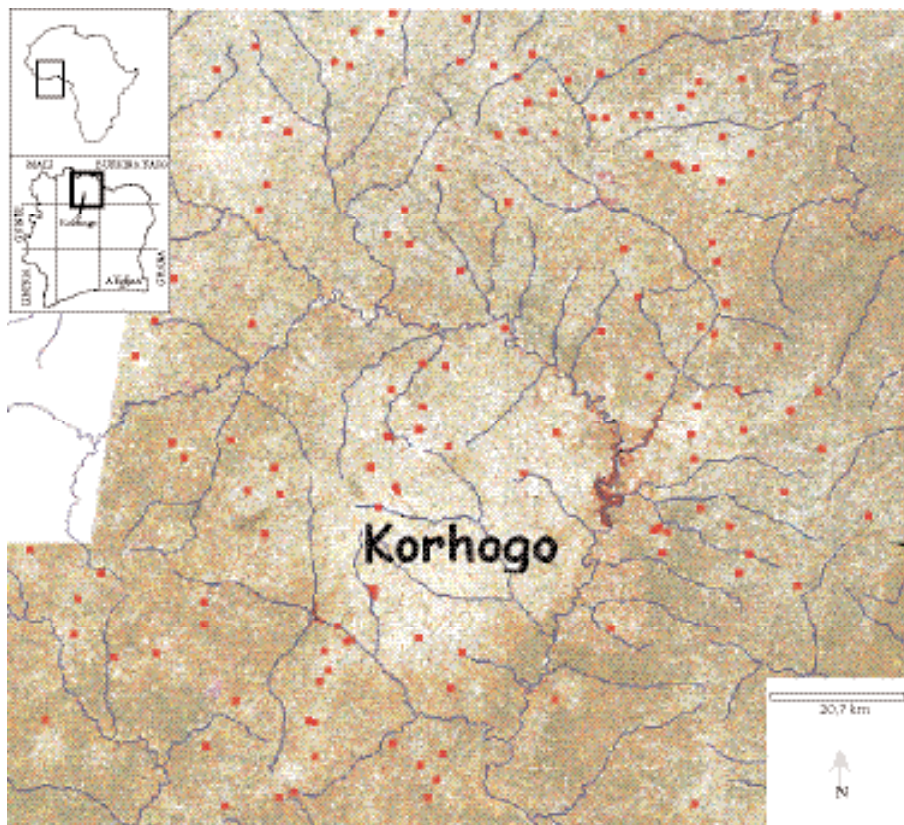


Fig. 2 - Évolution de l'occupation des sols sur le bassin versant du Solomougou à Ziébatogo (1 510 km²) entre novembre 1986 et avril 1994).

Classifications supervisées obtenues à partir d'une composition colorée initiale des canaux 3, 5 et 7 des scènes Landsat TM de novembre 1986 et d'avril 1994

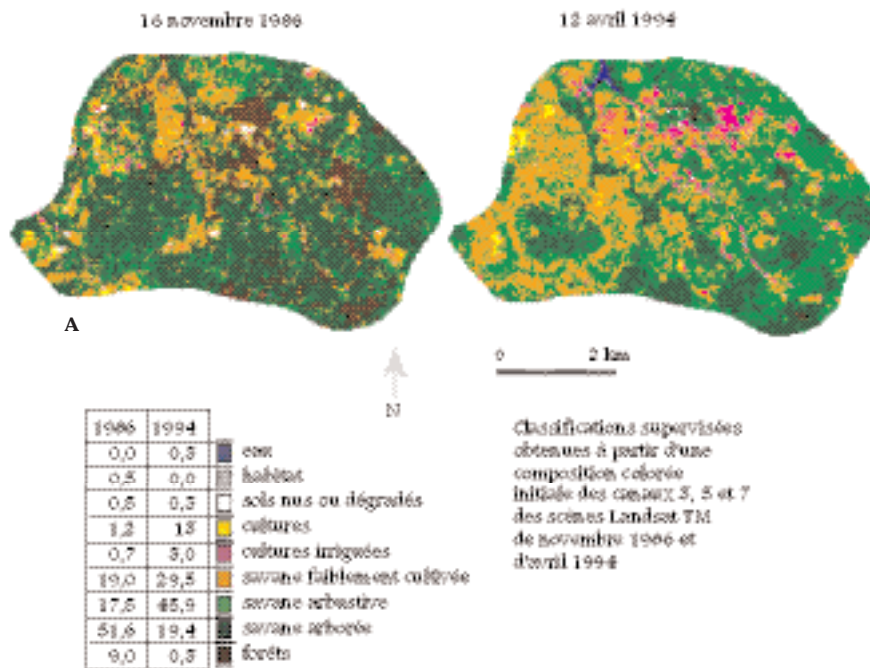


Fig. 3 - Exemples d'évolution de l'occupation des sols sur les bassins versants de deux petits barrages entre 1986 et 1994.

A : Dalengbo situé en zone rurale (24,7 km²) ;
B : Sinématiali, en situation péri-urbaine (8,8 km²).

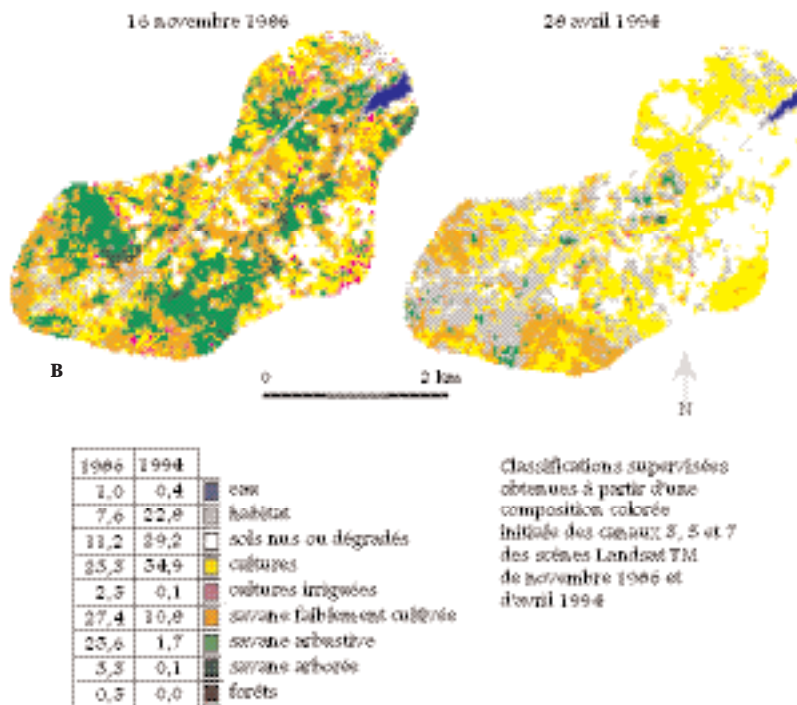


Fig. 4 a - Évolution de l'occupation de l'espace et des coefficients d'écoulement (histogrammes) entre novembre 1986 et avril 1994 sur le bassin versant du Lafigué.

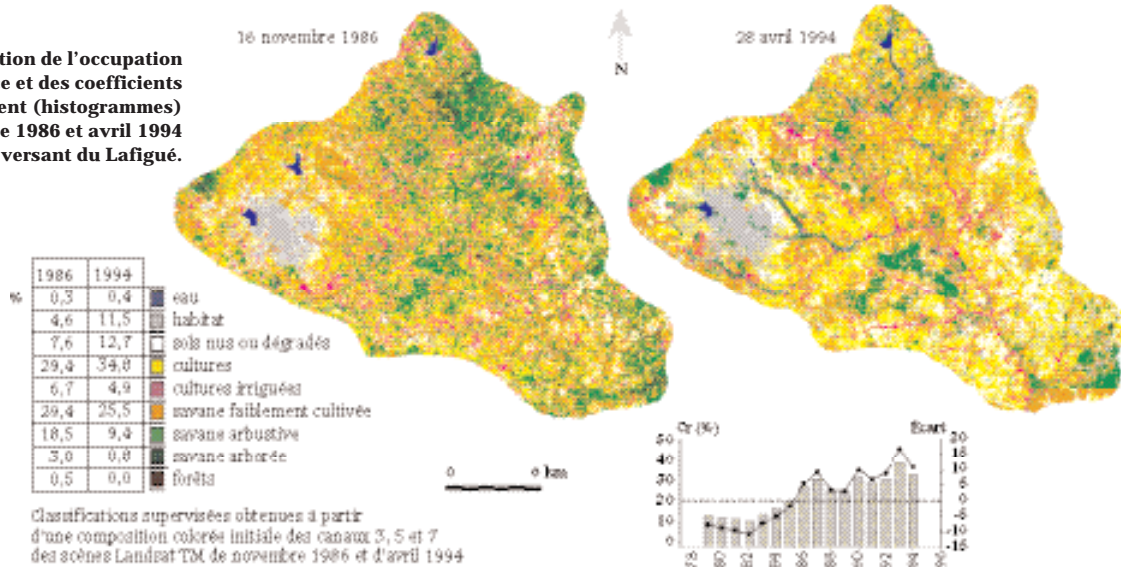


Fig. 4 b - Évolution de l'occupation de l'espace et des coefficients d'écoulement (histogrammes) entre novembre 1986 et avril 1994 sur le bassin versant du Yoréloro.

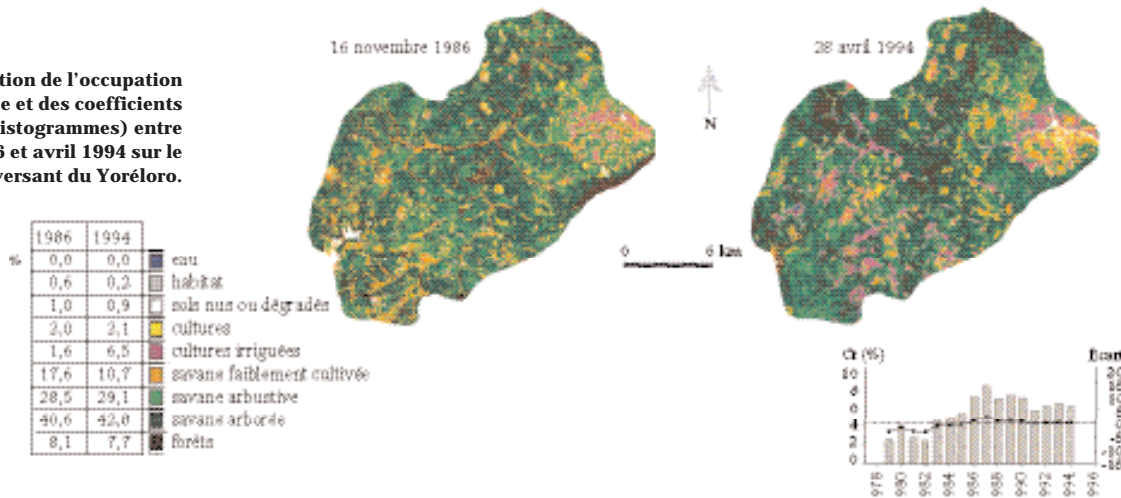
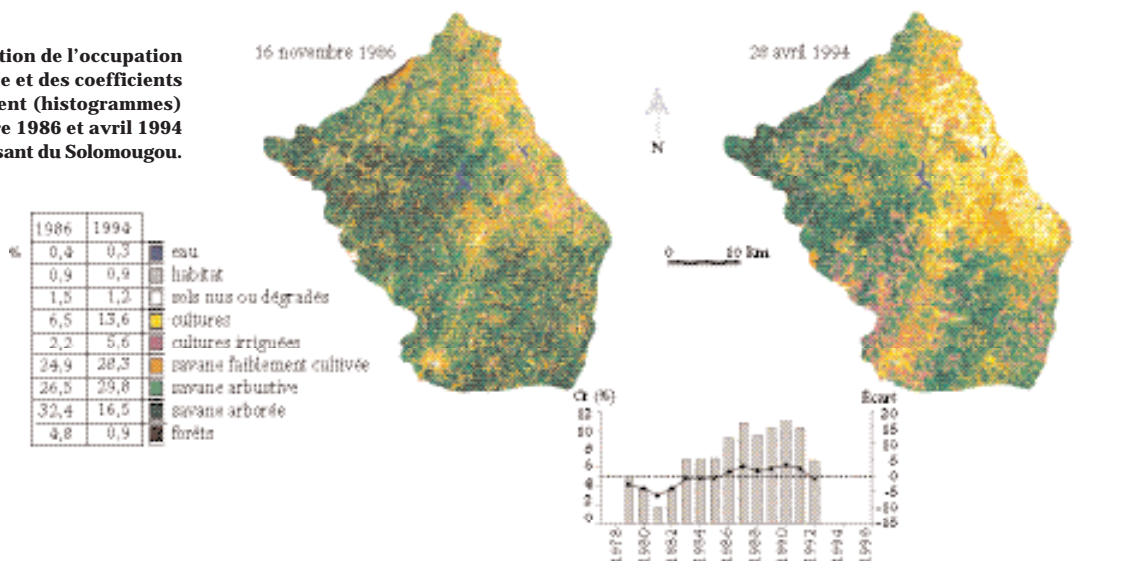


Fig. 4 c - Évolution de l'occupation de l'espace et des coefficients d'écoulement (histogrammes) entre novembre 1986 et avril 1994 sur le bassin versant du Solomougou.



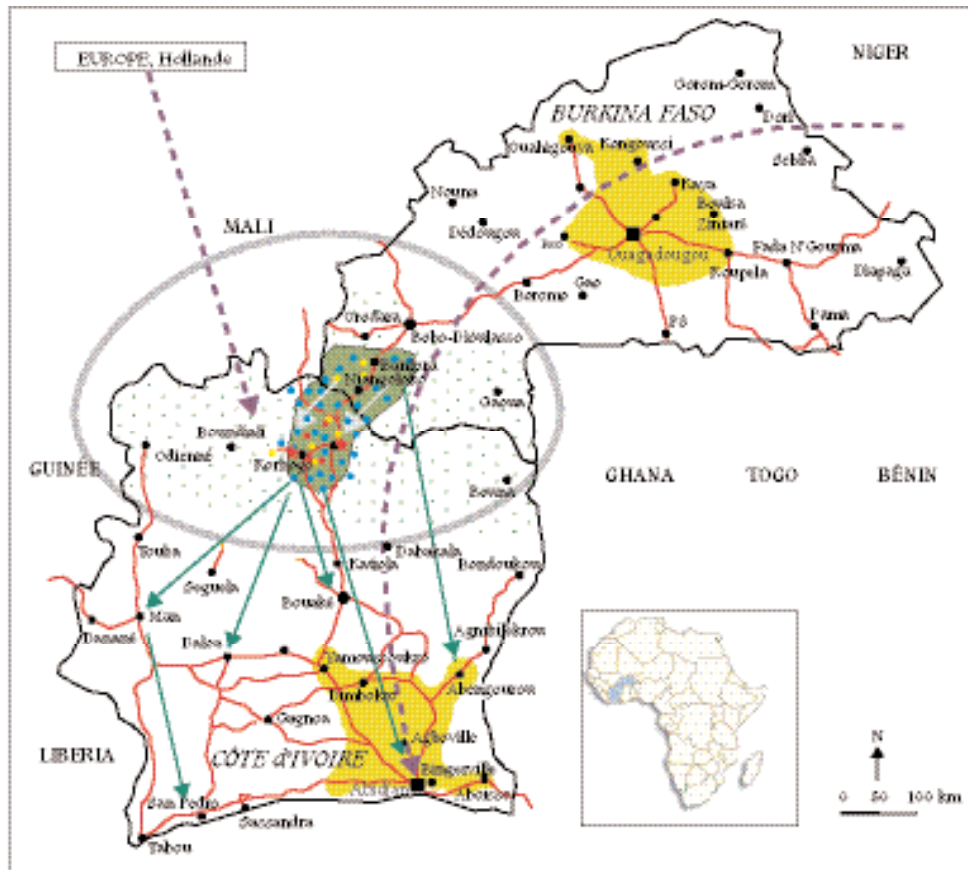


FIG. 5 - Géographie des petits barrages et spécialisation maraîchère dans le nord de la Côte d'Ivoire.

I. Un maraîchage marchand à « contre-modèle »

I.1. Les paradoxes du maraîchage marchand des savanes sénoufo ivoirienne et burkinabé

- L'essor de cultures légumières marchandes :
- malgré l'éloignement des grands marchés urbains métropoles nationales
 - malgré des productions concurrentes ceintures maraîchères des métropoles
- flux légumiers intensifiés pour l'approvisionnement d'Abidjan

PETITE ÉCHELLE

I.2. Spécialisation maraîchère régionale favorisée par...

- des déterminants :
 - le milieu sénoufo
 - la zone cotonnière
- facteurs de développement...
 - du maraîchage de saison sèche

ÉCHELLE RÉGIONALE

I.3. Production locale, dispersée et individuelle qui s'appuie sur :

- les petits barrages hydrauliques multifonctionnels (élevage, pêche, maraîchage, usages domestiques, etc.)

GRANDE ÉCHELLE

II. Maraîchage et reconfigurations spatiales

II.1. De nouveaux liens entre les savanes sénoufo et la métropole abidjanaise

- des échanges accrus
- circuits commerciaux des cultures maraîchères
- des échanges facilités par les routes goudronnées méridiennes

II.2. Restructurations spatiales

- Échanges commerciaux qui accentuent...
- la polarisation des :
 - petites et moyennes villes
 - petits et gros marchés régionaux
 - l'absence d'effacement des échanges transfrontaliers

II.3. Des terroirs aux territoires locaux

- appropriation maraîchère des petits barrages par les communautés rurales sénoufo autochtones