

Les petits barrages du nord de la Côte d'Ivoire : inventaire et potentialités hydrologiques

Philippe Cecchi¹
 Franck Gourdin²
 Soungalo Koné³
 Daniel Corbin⁴
 Jackie Etienne⁵
 Alain Casenave⁵

¹ IRD UR 167, UMR 5119
 Université Montpellier-II
 Case courrier 093
 34095 Montpellier cedex 05
 France

<philippe.cecchi@ird.fr>
² Service équipement rural et hydraulique
 DAF Guadeloupe
 Jardin botanique
 97109 Basse-Terre
 Guadeloupe

<franck.gourdin@agriculture.gouv.fr>
³ MIE-DHH-Hydrologie
 01 BP V 161
 Abidjan 01

Côte d'Ivoire
 <k_soung@hotmail.com>
⁴ IRD UR 167

Antenne de Bel-Air
 Route des Hydrocarbures
 BP 1386 Dakar
 Sénégal

<corbin@ird.sn>
⁵ IRD

BP 64501
 34394 Montpellier cedex 05
 France
 <alain.casenave@bondy.ird.fr>

Résumé

Des milliers de petits barrages ont été édifiés dans toute l'Afrique de l'Ouest à la suite des épisodes de sécheresse des années 1970 et 1980. Nombreux et dispersés, ces réservoirs constituent dans le nord de la Côte d'Ivoire un réseau de masses d'eau, le plus souvent pérennes, malgré leur petite taille. Des approches synoptiques conduites par télédétection, couplées à des études de terrain, ont permis : 1) d'évaluer leur contribution à la disponibilité des ressources en eau, notamment en saison sèche ; 2) de préciser à diverses échelles les contraintes qui en contrôlent le fonctionnement hydrologique ; 3) de proposer des lois génériques simples qui en résument les capacités ; 4) de mettre en exergue l'impact déterminant qu'exerce l'anthropisation croissante des bassins-versants sur leurs potentialités. Si par le passé les déficits pluviométriques constituaient l'une des principales contraintes, les apports excessifs liés à l'augmentation des coefficients d'écoulement représentent probablement aujourd'hui l'une des principales menaces.

Mots clés : barrage, Côte d'Ivoire, hydrologie, inventaire, télédétection.

Abstract

Small reservoirs of Northern Côte d'Ivoire: Inventory and hydrological potentialities

Thousands of small reservoirs were built after the severe droughts that occurred in West Africa during the seventies and eighties. Numerous and scattered, these small masses of water constitute a perennial network in the northern part of the Côte d'Ivoire. Synoptic studies, associated to field works, made it possible to: 1) evaluate the contribution of these small reservoirs to the availability of water resources, particularly during the dry season; 2) assess at different scales the constraints that control their hydrological properties; 3) propose simple and fundamental relations to summarize their capacities; 4) highlight the growing impact that the anthropogenic evolution of watersheds exerts on their hydrological potentialities. If for a long time drought and decreased rainfall have been the principal constraints, it seems that in the future excess runoff could constitute one of the major threats to their continued existence.

Key words: Côte d'Ivoire, dam, hydrology, inventory, remote sensing.

L'aridité est une contrainte au développement. Ce peut être parfois aussi une opportunité, comme celle saisie par la Côte d'Ivoire lors des crises climatiques des années 1970, puis 1980, quand de nombreux pasteurs peuls

des pays riverains (Burkina Faso et Mali) s'arrêtèrent dans le nord du pays pour échapper aux sécheresses. Le gouvernement ivoirien entreprit alors de favoriser la sédentarisation de ces troupeaux avec un double objectif :

- alléger la balance extérieure d'une partie du poids des importations de viande bovine [1] ;
- dynamiser et accompagner le développement d'une région marginalisée et laissée à l'écart des retombées du « miracle ivoirien » [2].

L'édification de plusieurs centaines de petits barrages fut au centre de la stratégie adoptée pour cela [3].

L'évaluation du rôle et de l'impact de ces infrastructures a fait l'objet d'une étude pluridisciplinaire, récemment synthétisée [4], où bénéfiques et risques, contraintes et potentialités sont détaillés. Les résultats présentés, ici, procèdent de cette évaluation. D'un point de vue hydrologique, on sait que les chroniques anciennes utilisées pour le dimensionnement d'ouvrages, édifiés voilà déjà plusieurs dizaines d'années, diffèrent singulièrement des chroniques actualisées [5] : les modifications des états de surface affectent en effet depuis quelques années de façon très importante l'hydrologie des régions de savane africaine et du Sahel [6]. L'importance des types d'occupation des sols sur les réponses des bassins-versants en termes d'écoulement a été avérée [7]. Cette influence est particulièrement exacerbée dans le cas de bassins-versants de petite taille et fortement anthropisés (cultures, parcours, etc.). Paradoxalement, tandis que les séries pluviométriques se caractérisent par une diminution nette des apports, on observe par endroits et simultanément une augmentation des coefficients de ruissellement des bassins-versants [8]. Le comportement hydrologique des bassins soudanosaéliens 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.

La capacité des retenues et les conditions (climatiques et hydrologiques) nécessaires à leur remplissage se devaient donc d'être réévaluées. 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 [9, 10]. Cette complexité est encore accrue dans le contexte des bassins-versants de petite taille ($\leq 25 \text{ km}^2$) qui sont drainés pour l'alimentation des réservoirs. Les résultats proposés, ici, 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, en relation avec les importantes modifications de l'occupation de l'espace qui caractérisent cette région.

Téledétection

Quatre scènes Landsat™ (résolution 30 m), centrées sur la ville de Korhogo et acquises à huit ans d'intervalle (16 novembre 1986 pour les deux premières, 12 et 28 avril 1994 pour les deux autres), ont été utilisées (figure 1). Plusieurs analyses en composantes principales ont été réalisées dans le but d'associer les canaux véhiculant le maximum d'informations : la composition colorée issue de l'association des canaux 3-5-7 a finalement été retenue (figure 2). Le réseau hydrographique de Côte d'Ivoire, le contour du pays et les limites des régions administratives, numérisés au cours du programme Onchocercose mené par l'OMS, ont été utilisés pour l'habillage des images.

Bien qu'imparfaites (les différentes morphologies n'étant pas toujours bien distinctes dans cette zone), des cartes d'occupation des sols au 1/100 000, réalisées par la Direction des grands travaux d'Abidjan (DCGTx) à partir de l'interprétation visuelle de compositions colorées de scènes SPOT et Landsat™ datées entre 1986 et 1990, ont été utilisées pour l'interprétation des compositions colorées réalisées. Des campagnes de terrain ont également été effectuées en suivant les recommandations de Lamachère et Puech [11] afin de disposer d'autres supports interprétatifs et pour améliorer la qualité et le positionnement des parcelles d'entraînement sur les compositions colorées. Une première classification, réalisée sur IMAGINE à la maison de la télédétection à Montpellier pour la

scène du 12 avril, avait donné de très bons résultats : signatures des classes bien différenciées et image en accord avec les cartes d'occupation du sol disponibles. La procédure, d'abord appliquée à la moitié ouest de la scène (calage), a ensuite été validée sur la partie est de cette même scène. Cette même procédure a ensuite été reprise sur IDRISI pour faciliter la mise en place de la classification du 28 avril. Neuf classes ont finalement été distinguées : eau, habitat, sols nus ou dégradés, cultures, cultures irriguées, savane faiblement cultivée, savane arbutive, savane arborée, forêts. Une parcelle test, commune aux deux scènes d'avril 1994, a été découpée au niveau de Korhogo (figure 1), et les pourcentages en superficie de chacune des classes d'occupation des sols y ont été calculés pour les deux dates. Les deux séries ne sont pas statistiquement différentes ($p < 0,001$; test de Wilcoxon pour échantillons appariés), ce qui a permis d'associer les deux scènes de 1994 lors des comparaisons avec la scène globale de 1986, de façon à pouvoir travailler à l'échelle de l'ensemble de la zone d'étude.

Après numérisation des cartes topographiques au 1/50 000 disponibles, les contours de 33 petits bassins-versants ($< 25 \text{ km}^2$) et de trois grands bassins ($> 150 \text{ km}^2$) ont été tracés. Ces contours ont été couplés aux classifications pour caractériser à diverses échelles l'état d'occupation des sols, en novembre 1986 et avril 1994, et son évolution entre ces deux dates.

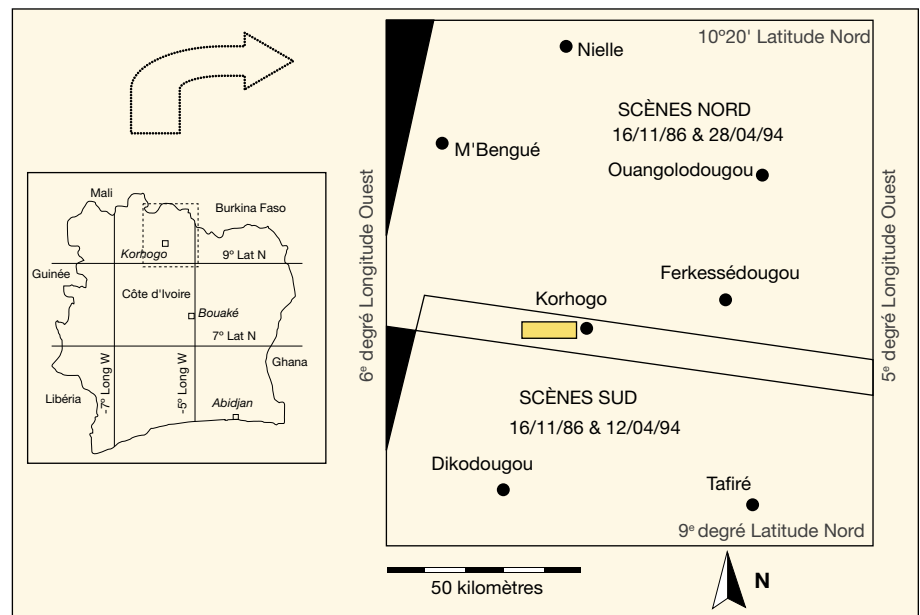


Figure 1. Couverture de la zone d'étude par les scènes Landsat™ de 1986 et 1994. La zone en jaune à l'ouest de Korhogo (25 × 6 km) a été utilisée comme parcelle d'entraînement pour valider les correspondances entre les scènes nord et sud acquises en avril 1994 à deux dates différentes.

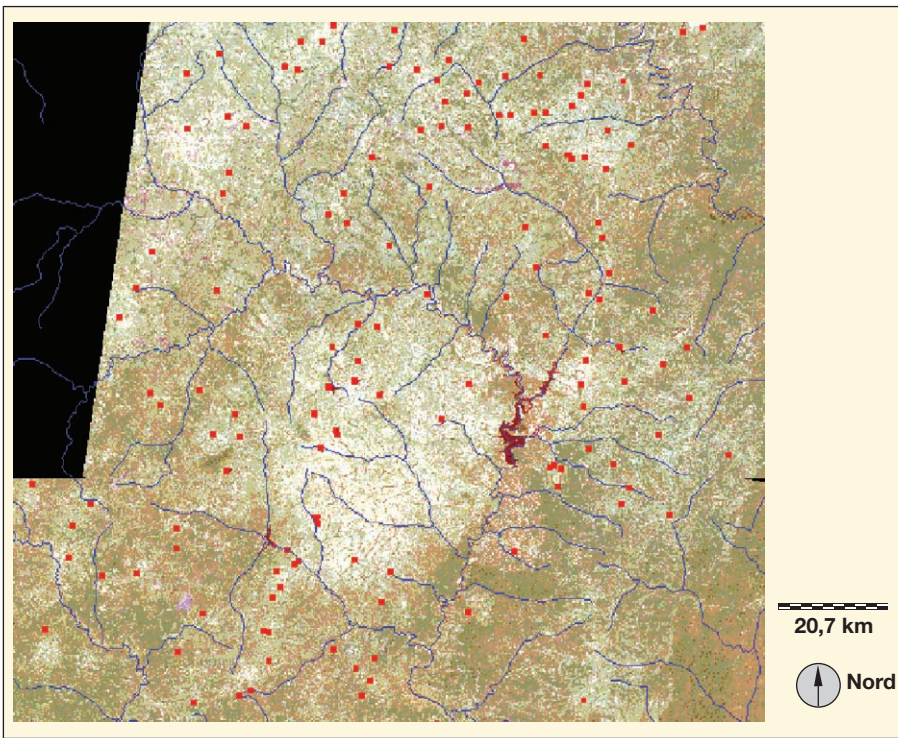


Figure 2. Composition colorée des canaux 3, 5 et 7 des scènes Landsat™ datées du 16 novembre 1986 et localisation des petits barrages.

Évolution de l'occupation de l'espace entre novembre 1986 et avril 1994

Le pourcentage des surfaces occupées pour chacune des neuf classes sur l'ensemble de la zone a été calculé (tableau 1), après qu'on a isolé les parcelles communes aux scènes de 1986 et 1994 (recouvrement > 90 %). Le constat est saisissant : les forêts disparaissent à un rythme rapide (diminution de 60 % de la contribution de cette classe entre 1986 et 1994), la savane laisse de plus en plus de place aux cultures (+50 %) et aux sols nus et dégradés (+40 %). Enfin, de vastes superficies autour des centres urbains ne comportent plus que des sols cultivés. Il y a donc globalement un glissement des zones naturelles vers les zones anthropisées, dû probablement en grande partie à l'augmentation de la pression humaine dans une région sensible et déjà fragilisée par des déficits hydriques répétés.

Les situations apparaissent plus contrastées aux échelles intermédiaires (bassins > 150 km²), mais les mêmes tendances sont confirmées (voir infra). Enfin, à l'échelle locale des bassins élémentaires associés aux retenues (< 25 km²), les cas de figure sont très diversifiés (tableau 2). Les incertitudes sont telles qu'il est difficile de donner plus qu'une simple tendance ou perspective d'évolution, et les interprétations devront alors se faire au cas par cas.

Critiques et réserves

Les deux scènes qui sont comparées correspondent à deux saisons climatiques différentes : fin de la saison des pluies en 1986 et cœur de la saison sèche en 1994, avec un phénomène d'uniformisation qui réduit les différences entre certaines classes. Certaines classes ne posent pas de problème d'interprétation (eau, habitat, cultures). D'autres, en revanche, sont marquées par diverses incertitudes. Les superficies de sols nus ou dégradés identifiées correspondent bien à la réalité en 1986, mais elles sont surestimées (jusqu'à 15 %), en 1994, en raison d'interférence avec des zones de cultures non levées ou avec de la végétation sèche. La classe des cultures irriguées regroupe en fait la majorité des zones humides, qui sont effectivement cultivées dans la plupart des cas, avec toutefois quelques exceptions ou « brouillages » que l'on peut également estimer voisins de 15 %. La classe des savanes faiblement cultivées peut interférer avec les classes savane arbustive ou cultures dans quelques rares cas : elle est néanmoins généralement bien différenciée et permet de marquer la transition des zones encore sauvages vers les zones anthropisées.

Tableau I. Évolution de l'occupation des sols entre 1986 et 1994 à l'échelle de l'ensemble de la zone d'étude.

Classes d'occupation des sols	Novembre 1986 (%)	Avril 1994 (%)
Eau	0,3 (60 km ²)	0,1 (18 km ²)
Habitats	1,3 (235 km ²)	2,2 (400 km ²)
Sols nus dégradés	2,2 (407 km ²)	3,1 (564 km ²)
Cultures	4,6 (842 km ²)	7,6 (1 384 km ²)
Cultures irriguées	3,2 (582 km ²)	4,2 (764 km ²)
Savane faiblement cultivée	19,2 (3 486 km ²)	18,3 (3 331 km ²)
Savane arbustive	28,5 (5 174 km ²)	34,0 (6 188 km ²)
Savane arborée	32,3 (5 881 km ²)	27,1 (4 932 km ²)
Forêts	8,4 (1 533 km ²)	3,4 (619 km ²)

Superficie totale traitée : 18 200 km² (140 × 130 km).

Tableau II. Variations entre 1986 et 1994 des différentes classes d'occupation des sols sur 33 petits bassins-versants du nord de la Côte d'Ivoire.

Classes d'occupation des sols	Ensemble de la zone (%)	Trente-trois petits bassins-versants			
		Médiane (%)	Moyenne (%)	Maximum (%)	Minimum (%)
Eau	-0,2	-0,2	-0,3	+0,3	-2,3
Habitats	+0,9	+0,4	+2,2	+15,2	-1,2
Sols nus dégradés	+0,9	0,0	+2,4	+44,5	-4,6
Cultures	+3,0	+5,1	+5,7	+30,8	-5,1
Cultures irriguées	+1,0	+1,6	+4,6	+31,8	-11,1
Savane faiblement cultivée	-0,9	+2,0	-0,6	+27,8	-39,7
Savane arbustive	+5,5	-2,6	+0,7	+47,2	-34,7
Savane arborée	-5,2	-7,7	-10,7	+41,1	-52,4
Forêts	-5,0	-1,6	-3,9	+10,9	-18,0

L'ensemble de la zone correspond aux écarts d'occupation des sols présentés dans le Tableau 1.

Les classes des savanes arbustives et arborées correspondent, respectivement, à des zones de savane claire et à des zones de savane dense. Ce sont des classes bien différenciées, la confusion n'excédant pas 10 %. Certaines cultures « sous parc », notamment au nord de Korhogo, où les champs de coton se développent sous couverture arborée (nééré, *Parkia biglobosa* et/ou karité, *Butyrospermum parkii*), peuvent conduire à prendre ces zones de cultures pour de la savane sauvage. Enfin, peuvent se retrouver dans cette classe des zones de jachères peu récentes, voire anciennes, où la reprise de la végétation arbustive peut masquer le caractère anthropisé des parcelles. La classe des forêts est légèrement sous-estimée pour les scènes d'avril 1994 ; elle peut être à l'inverse localement influencée par les vergers de manguiers (*Mangifera indica*) et d'anacardiés (*Anacardium occidentale*), en forte expansion notamment dans le centre et le sud de la zone d'étude.

Malgré ces réserves, les résultats obtenus ne peuvent toutefois pas être remis en cause fondamentalement : la forêt est bel et bien en train de disparaître (que ce soit 50 ou 60 % de forêts qui aient disparu entre 1986 et 1994 ne change pas grand-chose), de même que les cultures progressent effectivement fortement (de 40 à 50 %), ainsi que les sols nus et dégradés (de 30 à 40 %). Ce constat préoccupant fait écho à des observations comparables récemment mises en exergues pour d'autres régions de la Côte d'Ivoire [12-14].

Ressources en eau associées aux petits barrages

L'utilisation des scènes Landsat™ a permis la localisation sur la zone couverte (140 × 130 km) de 155 petits barrages (figure 2), dont la surface en eau au cœur de la saison sèche est supérieure à un hectare (10 pixels). Ce sont, pour la plupart, des ouvrages situés en tête des bassins et à proximité d'un ou de plusieurs villages. Leur forme peut être approchée avec une précision acceptable (2 à 10 %), lorsque leur surface dépasse dix hectares.

Si l'on admet que la période d'avril 1993 à avril 1994 correspond à une année moyenne (voire sèche) en termes de pluviosité, on peut considérer que les retenues qui n'étaient pas à sec, en avril 1994 (138/155, soit près de 90 % d'entre elles), seront généralement pérennes. La majorité des réservoirs à sec en fin de saison sèche correspond à de très petites retenues, où, du fait des faibles profondeurs et de l'intense évaporation, les réservoirs

ne peuvent se reconstituer. Globalement situés « trop » en amont, avec des altitudes moyennes relativement élevées, situés à l'exutoire de bassins-versants de taille très modeste (< 5 km²), ces réservoirs ne peuvent bénéficier d'apports phréatiques conséquents. Ce même comportement avait été observé sur des bassins-versants de faible superficie au sud du Mali, dans une région voisine et comparable [15].

La comparaison des distributions des surfaces des 114 réservoirs pour lesquels l'information est disponible aux deux périodes révèle que la surface médiane des aménagements en pleine eau était de 4,5 hectares, 85 % d'entre eux faisant moins de 15 hectares (figure 3). Les 15 % de réservoirs de plus grande taille forment une classe nettement différente, dont la surface médiane est de 35,5 hectares.

Durant la saison sèche, la surface médiane est ramenée à 1,7 hectare, mais pour la majorité des réservoirs cette réduction n'excède pas 50 % de la taille initiale. Les surfaces en eau, occupées par les réservoirs aux périodes critiques de leur cycle hydrologique (11,3 et 5,2 km², respectivement en hautes et basses eaux), révèlent le rôle déterminant que jouent les petits barrages à l'échelle régionale dans le stockage des ressources en eau. En fin de saison des pluies, 60 km² étaient en eau (tableau 1) : la contribution des petits barrages s'élevait alors à environ 19 % de

cette surface totale. En saison sèche, en revanche, tandis que 18 km² de la surface totale étaient en eau, la contribution des petits barrages s'élevait, elle, à près de 30 % au travers de plans d'eau, certes de petite taille, mais nombreux et très largement distribués dans les espaces ruraux.

Relations profondeur-volume-surface et loi volumique

Les trois paramètres les plus simples qui caractérisent la géométrie d'un petit barrage sont sa profondeur (H), sa surface (S) et son volume (V). Sa loi volumique, de la forme $V = K(H)^{\alpha}$ [16], en est une caractéristique fondamentale. Les lois volumiques obtenues à partir de l'étude fine de huit petits barrages, tous localisés dans le nord de la Côte d'Ivoire, révèlent d'abord une forte dispersion (figure 4). Deux classes semblent apparaître : la première est caractérisée par des coefficients d'ouverture très élevés, comme c'est le cas pour les retenues du plateau central au Burkina Faso [17], tandis que les lois volumiques des réservoirs de la seconde se rapprochent de celles obtenues dans le Nord-Est du Ghana [18] et dans le Nordeste brésilien [19].

Si de fait chaque courbe n'a de signification que pour le seul réservoir où elle a été établie, modulée dans le temps selon l'âge

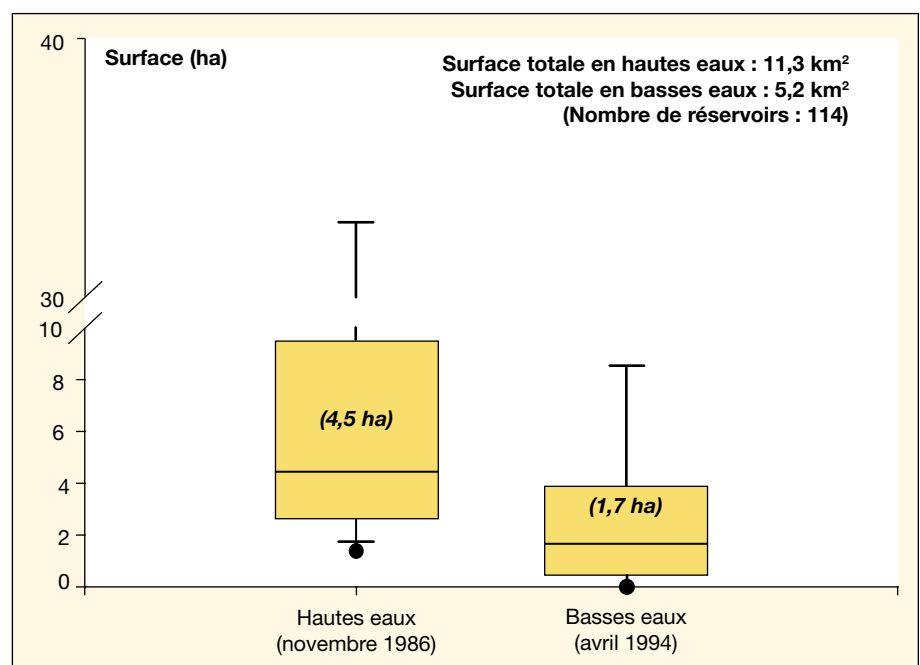


Figure 3. Distribution des surfaces en eau déterminées à partir des scènes Landsat™ de novembre 1986 (hautes eaux) et d'avril 1994 (basses eaux).

Les médianes des distributions sont indiquées entre parenthèses. Les surfaces totales en eau occupées par les 114 petits barrages que l'on peut localiser sur les deux scènes et aux deux saisons sont précisées.

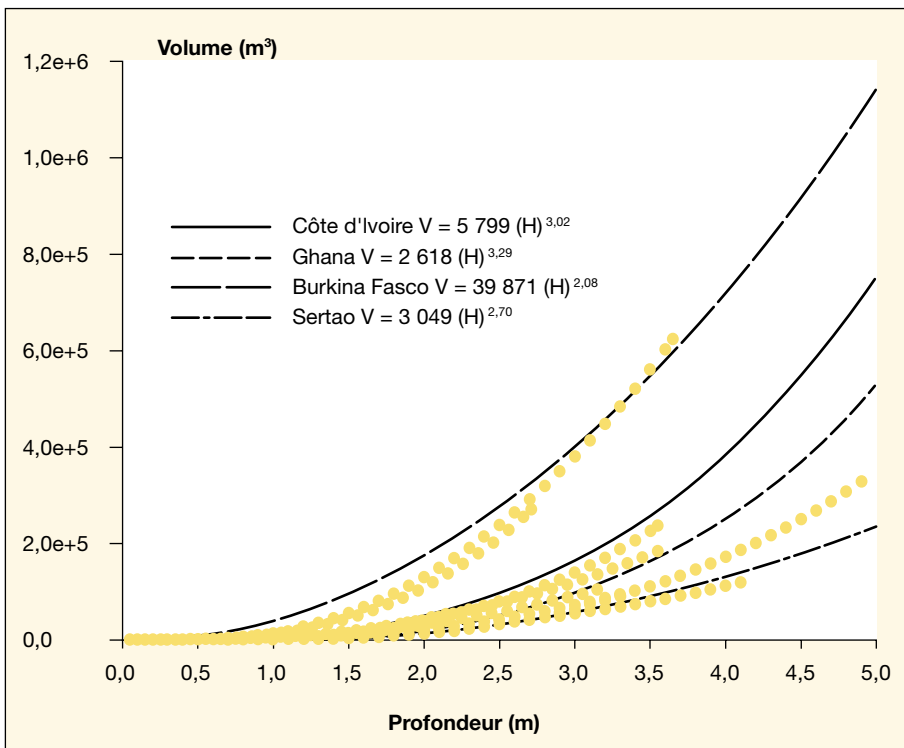


Figure 4. Comparaison des lois volumiques moyennes des réservoirs du nord de la Côte d'Ivoire, du plateau central au Burkina Faso, du Nord-est du Brésil et de l'Upper East Region du Ghana. Les points jaunes indiquent les lois volumiques de chacun des huit réservoirs ivoiriens considérés dans cette étude, à partir desquelles la loi volumique moyenne (trait plein) a été calculée.

du réservoir et les conditions de transport solide ou de développement des végétaux qui le caractérisent, l'allure moyenne des courbes d'une même région est toutefois indicatrice d'un comportement général, dans le contexte géomorphologique particulier de la zone d'implantation des réservoirs. Il existe ainsi généralement une relation linéaire inverse qui lie les deux coefficients de l'équation, avec, pour des réservoirs dotés de coefficients de forme (α) élevés, des coefficients d'ouverture (K) faibles et inversement (figure 5). À profondeur constante (K correspondant au volume d'un réservoir pour une lame d'eau de 1 m), les réservoirs du Burkina Faso feront ainsi face à une demande évaporatoire beaucoup plus élevée que les réservoirs du Nordeste brésilien, et dans une moindre mesure que ceux de la Côte d'Ivoire en raison de pentes plus faibles et donc de surfaces de miroir d'eau plus grandes.

La surface des plans d'eau étant une information d'accès aisé par télédétection, il est peut-être utile de rechercher une relation liant S et V des réservoirs. L'équation moyenne établie à partir des coefficients spécifiques de chacun des huit réservoirs considérés (figure 6) se révèle remarquablement proche de l'équation moyenne

obtenue dans le nord Ghana [19]. Deux points en particulier sont à souligner :
 – le coefficient de la fonction puissance est très proche de 1,5 valeur théorique atten-

due 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 ;
 – 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 [18] : la méthode est robuste et ouvre des perspectives d'évaluation rapide et synoptique des ressources en eau à l'échelle régionale, à partir des surfaces en eau estimées par télédétection.

Fonctionnement hydrologique

Contexte pluviométrique

Le territoire ivoirien est marqué par une grande hétérogénéité de conditions pluviométriques, depuis les zones soudanaises du sud du pays (jusqu'à plus de 2 000 mm/an à l'extrême sud-ouest, structure bimodale) jusqu'aux régions frontalières du Burkina Faso et du Mali (de l'ordre de 1 000 mm/an, structure monomodale). À cette forte hétérogénéité spatiale, se superpose une importante variabilité temporelle marquée en premier lieu par une discontinuité dans les chroniques pluviométriques [20]. L'utilisation de la méthode de segmentation d'Hubert, qui permet de discriminer des séquences

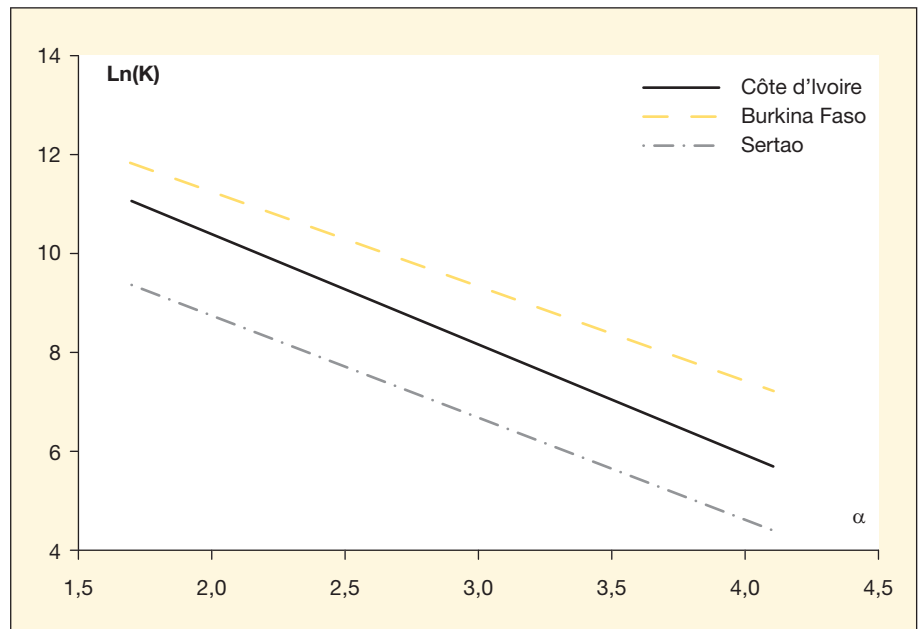


Figure 5. Relations entre les coefficients d'ouverture (K) et de forme (α) dans le nord de la Côte d'Ivoire, pour le plateau central au Burkina Faso et dans le Sertao brésilien. Il n'existe pas de telle relation pour les réservoirs de l'Upper East Region du Ghana.

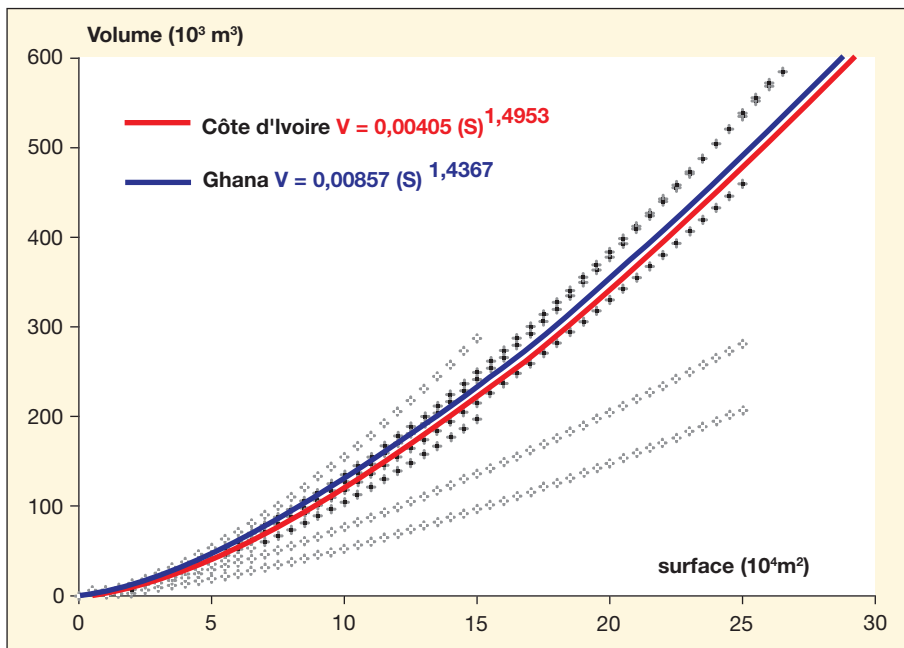


Figure 6. Lois d'estimation des volumes à partir des surfaces des réservoirs. En rouge, loi moyenne pour l'échantillon des huit réservoirs du nord de la Côte d'Ivoire, en bleu, pour un échantillon de 61 réservoirs de l'Upper East Region du Ghana. Les croix représentent les relations spécifiques de chacun des huit réservoirs de Côte d'Ivoire à partir desquels la relation moyenne (trait rouge) a été établie. Chaque relation spécifique est potentiellement modulée dans le temps par l'âge du réservoir et donc selon son évolution morphologique, notamment son comblement progressif sous l'effet du développement de végétaux aquatiques, des apports solides provenant du bassin-versant ou encore des activités domestiques (petite irrigation, briqueteries, etc.), susceptibles de se développer sur son pourtour.

stationnaires au sein des séries longues [21], met clairement en exergue la rupture observée à partir des années 1970

(figure 7). L'application de cette procédure à l'ensemble des séries longues disponibles pour le nord de la Côte d'Ivoire réaf-

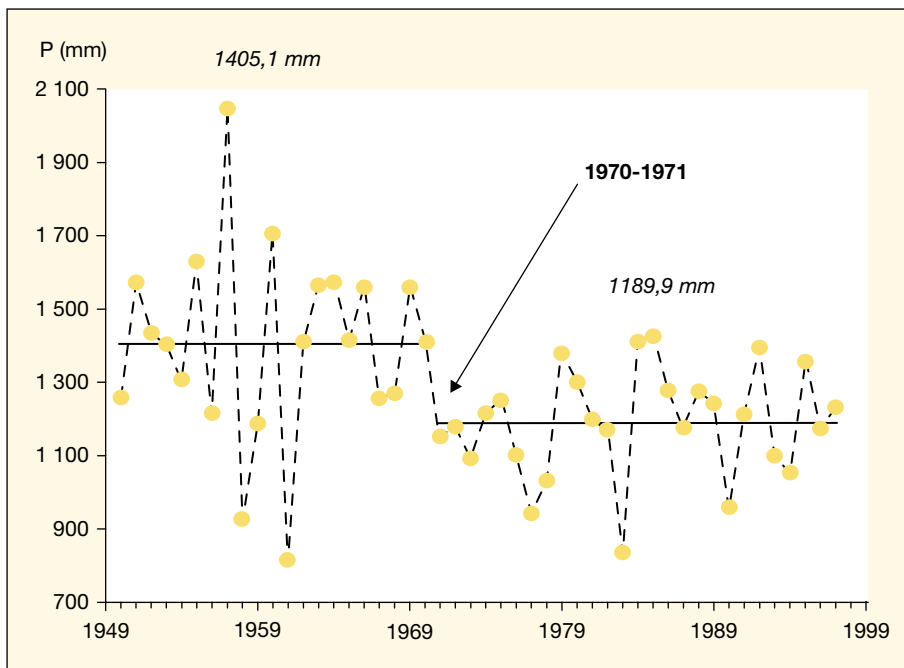


Figure 7. Pluviométrie annuelle à Korhogo (P mm) de 1950 à 1998. Les pluviométries annuelles moyennes des deux sous-séries stationnaires [1950-1970] et [1971-1998], discriminées ($p = 0,05$) par la méthode de segmentation d'Hubert sont indiquées.

firme le caractère général des tendances observées (tableau 3). Ces résultats indiquent notamment que la péjoration pluviométrique (de l'ordre de 250 mm/an en moyenne), qui a débuté fin des années 1960-début des années 1970, se poursuivait encore à la fin des années 1990, puisqu'aucune segmentation positive n'a été enregistrée depuis.

Ce contexte climatique justifie *a posteriori* les efforts entrepris par les autorités ivoiriennes pour sécuriser les ressources en eau dans le nord de la Côte d'Ivoire. 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 [22].

Importance des échanges phréatiques

L'équipement de quelques retenues pastorales du nord de la Côte d'Ivoire avec des installations hydrologiques simples a permis de réaliser un suivi hydrologique complet, au pas de temps journalier durant 16 mois (avril 1997-septembre 1998 ; tableau 4, figure 8). La saisonnalité hydrologique des réservoirs est très marquée, avec un remplissage annuel à la faveur du gonflement annuel du ou des marigots dont ils sont tributaires. La cote maximale des plans d'eau est alors définie par la hauteur du seuil qui équipe les déversoirs 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 (comme par exemple en juin 1997 à Sambakaha, suite à une pluie de 87,5 mm en quelques heures ; figure 8B).

Si le mécanisme de décrue durant la saison sèche est relativement uniforme et linéaire pour les différentes retenues (variant entre 5,2 mm/j à Sambakaha et 8,6 mm/j 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 : la retenue de Nambengué (figure 8A) réagit immédiatement aux précipitations (nappe affleurante), tandis que le temps de réaction des retenues de Sambakaha et Gboyo (figure 8B, C) est beaucoup plus lent : il faut ainsi 450 mm répartis sur trois mois environ pour amorcer le remplissage de ces réservoirs.

L'importante hétérogénéité des réactions des petits bassins-versants aux événements

Tableau III. Application de la procédure de segmentation d'Hubert ($p = 0,05$) aux séries longues disponibles pour le nord de la Côte d'Ivoire.

Boundiali ($n = 41$)	[1950-1975] 1 669,2 (354,6)	[1976-1990] 1 266,4 (214,5)
Korhogo ($n = 49$)	[1950-1970] 1 405,1 (266,4)	[1971-1998] 1 189,9 (146,3)
Ferkessédougou ($n = 47$)	[1950-1965] 1 440,6 (252,3)	[1966-1996] 1 160,7 (154,7)
Niakaramandougou ($n = 38$)	[1953-1968] 1 268,2 (231,5)	[1969-1990] 1 060,8 (198,2)
Tafiré ($n = 39$)	[1952-1968] 1 205,8 (287,4)	[1969-1990] 1 019,2 (198,6)

Sources : Comité interafricain d'études hydrauliques (CIEH), Agence pour la sécurité de la navigation aérienne (ASECNA) et IRD ex-Orstom). La longueur des séries (n), les moyennes (en gras) et écarts types (en italique) des sous-séries stationnaires sont présentés.

Tableau IV. Localisation et caractéristiques de trois des réservoirs équipés.

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

Aire des bassins-versants en kilomètre carré ; superficie, profondeur maximale et volume des réservoirs, respectivement en hectares, mètres et milliers de mètre cube à la côte de déversement.

pluvieux et, simultanément, la multitude de critères qui décident des capacités de ruissellement des bassins en zone soudano-sahélienne ont maintes fois été relevées [23-25]. 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 [26]. 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'écoulements, 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). 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 soudanosaéliens [12, 13].

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

Des diverses méthodes employées en Afrique de l'Ouest pour l'évaluation des écoulements sur des bassins non jaugés, la méthode Vuillaume-Dubreuil [27] était, ici, la seule utilisable sur la base des informations disponibles. Cette méthode, qui consiste à déterminer l'écoulement moyen annuel des bassins-versants non jaugés à partir de leurs caractéristiques physiques et climatiques, 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 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 écoulée

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 [25] :

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

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 $P_i > \text{ETB}/36$.

– S : superficie du bassin-versant en kilomètre carré ;

– D_s : dénivelé 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 ($S \leq 25$ km²) du nord de la Côte d'Ivoire. 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 (figure 9), 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. 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, avec un impact attendu sur leur comportement hydrologique qui n'est pas perceptible ici. En termes de volume, les écoulements associés correspondent en moyenne à 260 000 m³/km² par an, au cours des années étudiées. 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

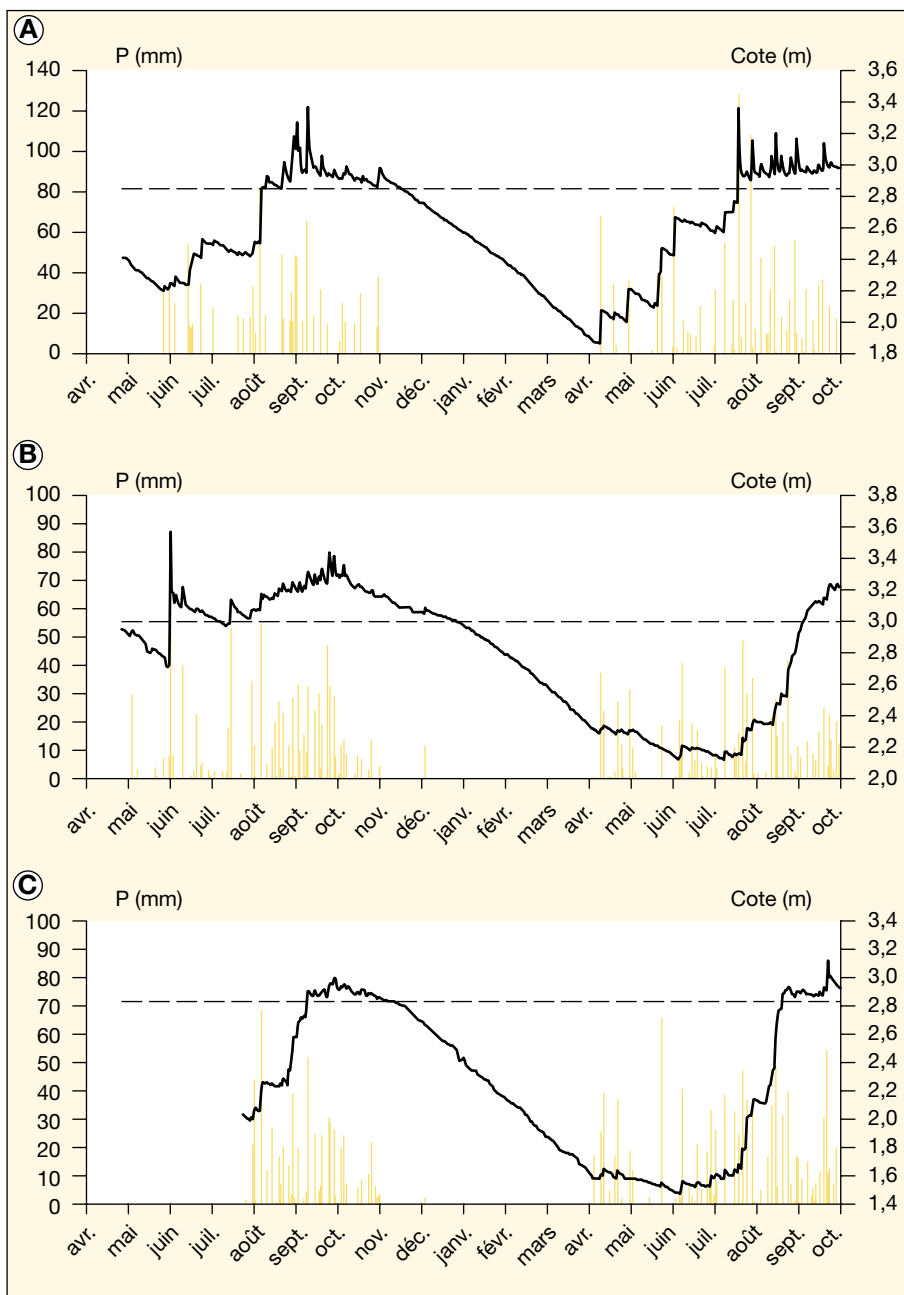


Figure 8. Pluviométrie (histogramme) et variation de côte (trait) entre avril 1997 et septembre 1998 de trois petits barrages du nord de la Côte d'Ivoire.

A. Nambengué. B. Sambakaha. C. Gboyo. La ligne horizontale (tirets) situe la côte de déversement de chacune des retenues.

souterraines, comme les mesures réalisées sur les trois sites témoins l'avaient déjà montré.

Impact de l'anthropisation sur les écoulements

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 rela-

tive à l'occupation de l'espace était directement exploitable :

- le Solomougou à Ziébatogo (1 510 km²) ;
- le Lafigué, route de Badikaha (443 km²) ;
- 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 : 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 10A, 10B, et 10C. 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 assez 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. 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 5, respectivement), a de fait affecté différemment les trois bassins considérés.

Pour le bassin du Lafigué (figure 10A), 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 % (tableau 5).

À l'inverse, pour le bassin du Yoréloro à Kategué (figure 10B), sauvage et peu soumis aux diverses pressions anthropiques, 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 (tableau 5).

Le cas du bassin du Solomougou est plus complexe (figure 10C). 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. On observe néanmoins une augmentation sensible de l'écoulement qui passe de 5 à plus de 10 % sur la période : la classe des formes d'occupation de l'espace, associée à l'anthropisation des milieux, augmente quant à elle de près de 10 %.

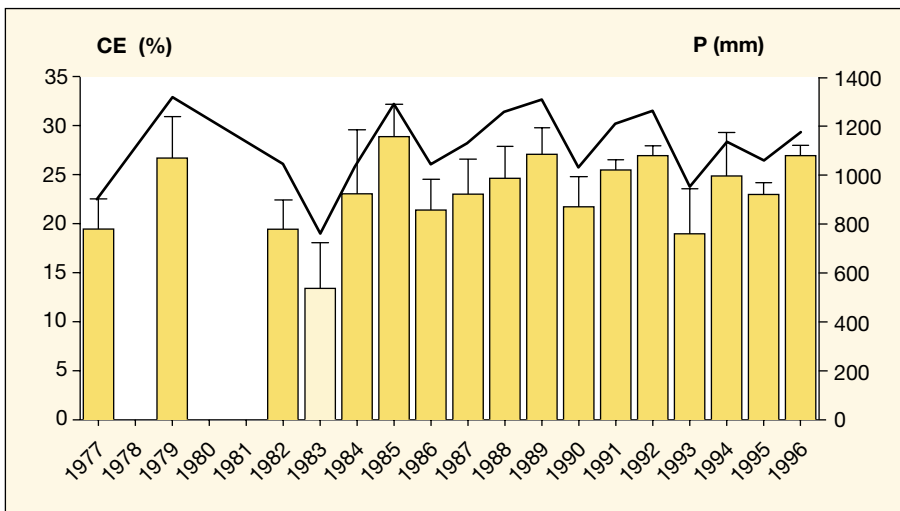


Figure 9. Évolution des coefficients d'écoulement moyens (CE en pourcentage, histogramme) calculés annuellement pour 33 petits bassins-versants du nord de la Côte d'Ivoire par la méthode Vuillaume-Dubreuil et de la pluviométrie moyenne annuelle (P en millimètre, trait) sur la zone entre 1977 et 1996. L'année 1983, remarquablement sèche, est indiquée.

Tableau V. 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.

		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

Faute d'études plus poussées, il semble déraisonnable 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 p_i le pourcentage en superficie du bassin-versant occupé par la classe d'occupation du sol i et a_i un coefficient de pondération représentant la capacité de rétention en eau effective de la classe i , alors :

$$Cr = \sum p_i * a_i$$

Les a_i ont été définis pour chaque classe entre 0 et 2 (rétentions nulle et maximale, respectivement ; tableau 6).

Suivant cette définition, le coefficient Cr, 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 (c'est-à-dire > 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

Tableau VI. 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

Tableau VII. Évolution des coefficients de rétention (cr) 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

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 (tableau 7), 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

La caractérisation réalisée par télédétection à l'aide de deux jeux de scènes LandsatTM, espacées de huit ans, révèle les vifs changements de l'occupation des sols dans le nord de la Côte d'Ivoire. Les analyses montrent qu'à différentes échelles, l'anthropisation des paysages est active, se traduisant par une nette diminution des espaces naturels (savanes arborées et forêts) au profit de zones altérées ou mises en culture. La part de l'édification des petits barrages dans ces dynamiques globales n'est pas clairement perceptible, tant en raison de la faible taille de leurs bassins-versants, qui rend délicates les interprétations diachroniques à cette échelle, que du fait de tendances lourdes qui semblent concerner assez uniformément toute la zone. À l'inverse, ces dynamiques globales ont un fort impact sur les coefficients d'écoulement et le ruissellement des bassins-versants, et donc sur le fonctionnement hydrologique des retenues.

L'inventaire par télédétection des retenues en saison sèche révèle que dans leur grande majorité, les réservoirs du nord de la Côte d'Ivoire sont généralement pérennes en dépit de leurs faibles dimensions et conservent en saison sèche une surface libre significative. Cette observation est fondamentale en regard des objectifs assignés à ces aménagements (productions vivrières *sensu largo*) et souligne leur intérêt en termes de sécurisation des ressources en eau de contre-saison : en plein cœur de saison sèche, ce sont de l'ordre de 30 % des ressources régionales qui sont ainsi stockées dans les petits barrages.

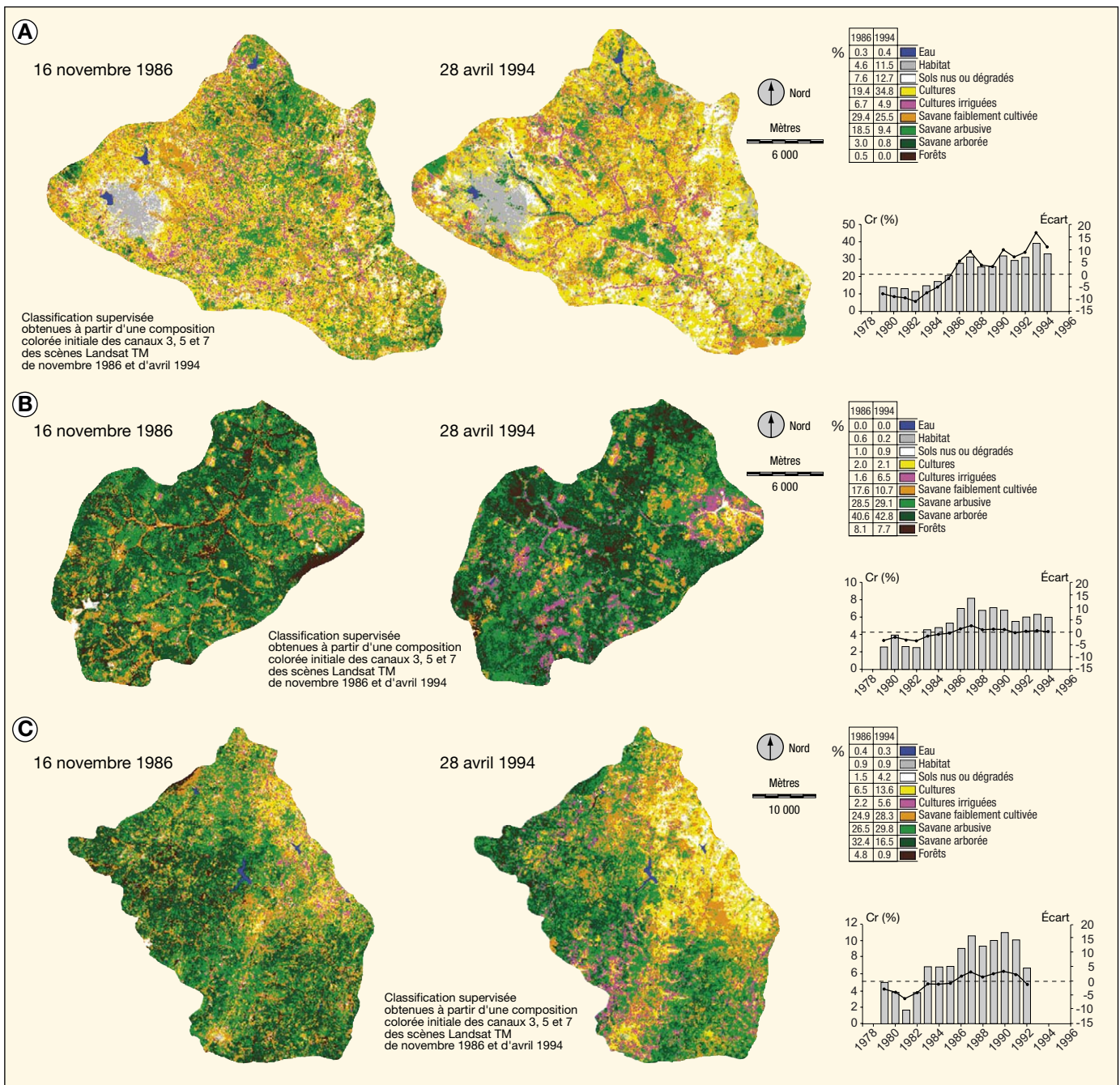


Figure 10. Évolution de l'occupation de l'espace et des coefficients d'écoulement (histogrammes) entre novembre 1986 et avril 1994. A) sur le bassin-versant du Lafigué ; B) sur le bassin-versant du Yoréloro ; C) sur le bassin-versant du Solomougou.

Sauf perturbation majeure (comblement, sécheresse, absence d'écoulement ou à l'inverse rupture de l'ouvrage), le maintien en toute saison – en premier lieu en saison sèche – de stocks d'eau exploitables au sein de la majorité des réservoirs met en exergue l'importance et la durée des échanges qui lient les eaux de surface aux nappes phréatiques et qui sont seuls à même de justifier la persistance des retenues tout au long de l'année.

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 du nord de la Côte d'Ivoire met en exergue leur réelle homogénéité morphologique, qui les distingue de leurs homologues implantés

dans d'autres zones du pays ou *a fortiori* d'autres régions du monde. En revanche, la relation moyenne liant S et V 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.

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 systèmes. L'extension des zones d'habitats et de cultures, au détriment des savanes arborées et des forêts, dans le contexte d'une réelle aridification, se traduit ainsi logiquement par une augmentation nette des coefficients d'écoulement. Dans les zones fortement anthropisées, les crues sont ainsi vraisemblablement plus violentes et rapides que par le passé, avec par endroit d'importants risques de dégradation des digues et déversoirs et une intensification des phénomènes érosifs. Ce sont aujourd'hui les excès d'une politique conçue pour répondre aux déficits en eau qui menacent la durabilité des digues et donc des réservoirs, situation paradoxale dont le Burkina Faso voisin fait lourdement l'expérience depuis quelques années. ■

Références

1. Ancey V. Les Peuls transhumants du Nord de la Côte d'Ivoire entre l'État et les paysans : la mobilité en réponse aux crises. In : Contamin B, Memel-Fote H, eds. *Le modèle ivoirien en question. Crises, ajustements, recompositions*. Paris : Karthala ; IRD Éditions, 1997.
2. Aubertin C. Histoire et création d'une région sous-développée : le Nord ivoirien. *Cah Orstom, Ser Sci Hum* 1983 ; 19 : 23-57.
3. Cecchi P. De la construction d'un objet pluridisciplinaire : les « Petits-Barrages » du Nord de la Côte d'Ivoire. *Natures, Sciences, Sociétés* 1998 ; 6 : 73-83.
4. Cecchi P. *L'Eau en partage. Les Petits-Barrages de Côte d'Ivoire*. Latitudes, n° 23. Paris : IRD Éditions, 2007.
5. Hubert P, Servat E, Paturel JE, et al. La procédure de segmentation, dix ans après. In : Servat E, Hugues D, Fritsch JM, Hulme M, eds. *Water resources variability in Africa during the xxth century*. IAHS Publication, n° 252. Wallingford : IAHS, 1998.
6. Casenave A, Valentin C. *Les états de surface de la zone sahélienne*. Didactiques. Montpellier : Orstom éditions, 1989.

7. Dezetter A, Servat E. Évaluation régionale des ressources en eau : la régionalisation des paramètres des modèles pluie-débit. Exemple de la zone Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire. In : Le Barbé L, Servat E, eds. *Régionalisation en hydrologie. Applications au développement*. Colloques et Séminaires. Montpellier : Orstom éditions, 1995.

8. Mahé G, Paturel JE, Servat E, Conway D, Dezetter A. Impact of land use change on soil water holding capacity and river modelling of the Nakambe River in Burkina-Faso. *J Hydrol* 2005 ; 300 : 33-43.

9. Camus H, Chaperon P, Girard G, Molinier M. *Analyse et modélisation de l'écoulement superficiel d'un bassin tropical : influence de la mise en culture*. Côte d'Ivoire, Korhogo, 1962-1972. Travaux et Documents, n° 52. Montpellier : Orstom éditions, 1976.

10. Hyperbav. *Structure et fonctionnement hydro-pédologique d'un petit bassin-versant de savane humide*. Études et Thèses. Montpellier : Orstom éditions, 1990.

11. Lamachère JM, Puech C. Télédétection et régionalisation de l'aptitude à l'écoulement et à l'infiltration des sols en Afrique sahélienne et nord soudanienne. In : Le Barbé L, Servat E, eds. *Régionalisation en hydrologie. Applications au développement*. Colloques et Séminaires. Montpellier : Orstom éditions, 1995.

12. Brou YT, Akindès F, Bigot S. La variabilité climatique en Côte d'Ivoire : entre perceptions sociales et réponses agricoles. *Cah Agric* 2005 ; 14 : 533-40.

13. Brou YT, Oszwald J, Bigot S, Servat E. Risques de déforestation dans le domaine permanent de l'état en Côte d'Ivoire : quel avenir pour ces derniers massifs forestiers ? *Télédétection* 2005 ; 5 : 105-21.

14. Bigot S, Brou TY, Oszwald J, Diedhiou A. Facteurs de la variabilité pluviométrique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales. *Sécheresse* 2005 ; 16 : 5-13.

15. Joignerez A, Olivry JC, Guigen N. *Évaluation des ressources en eau non pérennes au Mali*. Rapport final. Bamako (Mali) : DNHE-ORSTOM-PNUD / Orstom, 1992.

16. Molle F. *Caractéristiques et potentialités des Açudes du Nordeste brésilien*. Thèse de doctorat, université Montpellier II, 1991.

17. D'At de St Foulc J, Gilard O, Piaton H. *Petits barrages en terre au Burkina Faso. Bilan et analyse critique*. Ouagadougou (Burkina-Faso) : CIEH, 1985.

18. Liebe J. *Estimation of water storage capacity and evaporation losses of small reservoirs in the Upper East region of Ghana*. Diploma Thesis, université de Bonn, 2002.

19. Liebe J, van de Giesen N, Andreini M. Estimation of small reservoir storage capacities in a semi-arid environment. A case study in the Upper East Region of Ghana. *Phys Chem Earth* 2005 ; 30 : 448-54.

20. Mahé G, L'Hôte Y, Olivry JC, Wotling G. Trends and discontinuities in regional rainfall of West and Central Africa, 1951-1989. *Hydrol Sci J* 2001 ; 46 : 211-26.

21. Hubert P, Carbonnel JP, Chaouche A. Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *J Hydrol* 1989 ; 10 : 349-67.

22. Direction centrale des grands travaux (DCGTx). *Inventaire des retenues et barrages de Côte d'Ivoire*. Abidjan (Côte d'Ivoire) : Direction des grands travaux, 1992.

23. Albergel J, Lamachère JM, Lidon B, Mokadem A, Van Driel W. *Mise en valeur agricole des bas-fonds au Sahel. Typologie, fonctionnement hydrologique, potentialités agricoles*. Ouagadougou ; Montpellier : CIEH ; Cirad, 1993.

24. Nouvelot JF. *Guide des pratiques hydrologiques sur les petits bassins versants ruraux en Afrique tropicale et équatoriale*. Ouagadougou ; Montpellier : CIEH ; Orstom éditions, 1993.

25. FAO. *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, no.54. Rome : FAO, 1996.

26. Joignerez A, Guigen N. *Évaluation des ressources en eau non pérennes au Mali. Rapport de campagne 1991 (Tome 1)*. Bamako : Projet DNHE-Orstom-PNUD/Orstom, 1991.

27. Dubreuil P, Vuillaume G. Influence du milieu physicoclimatique sur l'écoulement des petits bassins intertropicaux. *IAHS Publication* 1975 ; 117 : 205-15.