

Localisation des petits barrages et caractérisation des bassins par télédétection

Franck Gourdin

Philippe Cecchi

Daniel Corbin

Jackie Étienne

Luc Séguis

Alain Casenave

Les petits barrages du nord de la Côte d'Ivoire ont été édifiés principalement pour y structurer l'espace rural en vue de sa mise en valeur pastorale. Les sociétés d'État en charge de ces aménagements ont malheureusement progressivement perdu la mémoire de l'historique de leur implantation. L'Anader¹ de Korhogo, ultime sanctuaire de la littérature officielle, technique ou informelle ayant accompagné leur implantation et les premières années de leur exploitation, ne recèle plus aujourd'hui qu'une infime partie des informations alors accumulées (Ba Malick, *comm. pers.*).

Différents projets de développement sectoriels appuyés généralement par des ONG (Volontaires du Progrès, par ex.), ont entrepris pour leur propre compte d'actualiser ces données anciennes et fragmentées. Parfois fantaisistes, souvent difficilement accessibles, rarement exhaustives, les informations potentiellement disponibles demeurent peu validables. En tout premier lieu, le nombre et la localisation précise de ces petits barrages, données de base pourtant fondamentales, font l'objet d'informations contradictoires.

Le seul inventaire publié est celui de la Direction des grands travaux à Abidjan (*Inventaire des retenues*, 1992), qui fait état de 269 barrages Sodepra pour l'ensemble du nord du pays, sans que pour autant les informations de base précédemment évoquées ne soient systématiquement fournies. Le recensement exhaustif réalisé sous l'égide du programme Petits Barrages a quant à lui dénombré 217 retenues pour les seuls départements de Korhogo et de Ferkéssédougou (CECCHI, 1998) à l'occasion d'un passage unique sur chacune d'entre elles (liste en annexe de l'introduction générale de l'ouvrage).

Introduction

¹ L'Anader regroupait toutes les structures étatiques d'encadrement agricole, et notamment depuis 1994 les services de la Sodepra, principal artisan de la création des petits barrages.

Il est donc apparu nécessaire de mettre en œuvre à l'échelle régionale une approche synoptique destinée en premier lieu à soutenir une cartographie et un inventaire précis des aménagements.

En parallèle, du fait de l'hétérogénéité des paysages et surtout de leurs évolutions vives et récentes, il est apparu souhaitable d'appréhender à cette même échelle régionale les dynamiques d'occupation de l'espace qui structurent les savanes nord-ivoiriennes. La mise en valeur des bas-fonds en général, des bas-fonds aménagés en particulier, est en effet fortement liée à l'intensité de la pression anthropique (qu'elle soit urbaine ou agricole) exercée sur les versants (AHMADI, 1997). L'évaluation des potentialités associées aux nombreux réservoirs disséminés dans le nord de la Côte d'Ivoire ne pouvait ainsi s'envisager sans une caractérisation des dynamiques récentes, en premier lieu en regard de l'évolution des paysages qui environnent les retenues.

D'un autre point de vue, l'influence déterminante des états de surface sur le comportement des sols à l'infiltration et au ruissellement est connue de longue date (CAsENAVE et VALENTIN, 1989). Cette influence est particulièrement exacerbée dans le cas de bassins versants de petite taille et fortement anthropisés (cultures, parcours, etc.). Des travaux de modélisation des relations pluie-débit dans le nord de la Côte d'Ivoire ont de fait révélé l'importance des types d'occupation des sols sur les réponses des bassins versants en terme d'écoulement (DEZETTER et SERVAT, 1992). L'impact potentiel de l'évolution des paysages durant les dernières décennies sur les régimes hydrologiques sera discuté au chapitre suivant (Gourdin *et al.*, ce volume).

L'approche par télédétection a été privilégiée (THENKABAIL et NOLTE, 1995) en raison de son caractère synoptique et de la complémentarité qu'elle autorise en associant aux données satellitaires les connaissances de terrain localement accumulées. Deux jeux de scènes Landsat TM centrées sur la ville de Korhogo et acquises à huit ans d'intervalle (1986 et 1994) ont ainsi été utilisés. Leur traitement et leur comparaison ont permis d'envisager une analyse synchronique à perspective diachronique des petits barrages et de leur environnement à diverses échelles de résolution : depuis l'espace régional jusqu'aux bassins versants élémentaires dont les réservoirs sont tributaires.

Mise en place de cartes d'occupation des sols

Toutes les méthodologies mises en œuvre pour la réalisation de ce travail ont été adaptées aux supports cartographiques et satellitaires disponibles, grâce à la collaboration de spécialistes de la Maison de la Télédétection à

Montpellier (M. Lointier et N. Dessay). Ces méthodes s'appuient sur un très vaste corpus technique spécialisé qui ne sera pas rappelé ici. Le lecteur, s'il le désire, pourra se rapporter à différents ouvrages génériques qui en détaillent les principes (FOIN, 1987 ; FOIN et BAUDOIN, 1985, 1988, 1990 ; BONN, 1996 ; BONN et ROCHON, 1992 ; BONNETT, 1993 ; etc.).

Quatre scènes satellites Landsat TM (résolution 30 m), datées du 16/11/86 pour les deux premières, du 12/04/94 pour la troisième et du 28/04/94 pour la dernière, ont été utilisées (fig. 1). Les deux scènes de 1986 permettent de couvrir environ 90 % de la zone d'étude, la scène du 12/04/94 recouvre seulement la partie sud (30 % de la zone d'étude) et la scène du 28/04/94 recouvre la partie nord (60 %).

Importation et géoréférencement des scènes, création d'une image globale de la zone d'étude

Une fois les caractéristiques des canaux images répertoriées, les quatre scènes ont été importées sur le système d'information géographique Idrisi. Le géoréférencement (en coordonnées UTM) de chaque scène s'est fait par étapes successives :

- visualisation à l'écran du canal 5 (le plus contrasté) et recherche des points de correspondances (ou points d'amers) identifiés à partir des cartes topographiques disponibles sur la zone au 1/50 000 ou au 1/200 000 (pont, confluence ou tout autre élément stable dans le temps et dans l'espace) ;

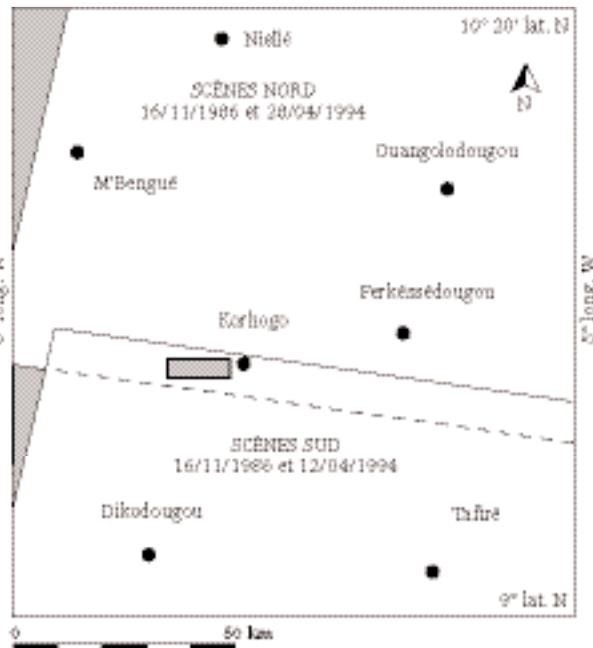


Fig. 1 - Couverture de la zone d'étude par les scènes Landsat TM de 1986 et 1994. La zone en grisé à l'ouest de Korhogo (25 x 6 km) a été utilisée comme parcelle d'entraînement pour valider les correspondances entre les scènes Nord et Sud acquises en avril 1994 à deux dates différentes (16 jours d'écart, dont 3 jours pluvieux).

— après saisie du fichier de correspondance, utilisation d'un polynôme de degré deux (quadratique) de façon à minimiser les déformations dans les zones où l'échantillonnage était le plus faible ;

— utilisation d'une quinzaine de points pour géoréférencer chaque scène, en corrigeant ceux pour lesquels l'erreur calculée était trop importante. Le résultat est très satisfaisant : l'incertitude finale pour chacune des scènes est inférieure à 0,8 pixel soit 24 m dans la réalité, ce qui représente moins de 0,5 mm sur une carte au 1/50 000 ;

— association des deux jeux de scènes (1986 et 1994) pour chaque canal-image. Si le résultat est satisfaisant dans le cas des scènes datées du 16/11/86, qui s'ajustent parfaitement au niveau de Korhogo, il n'en va pas de même pour les deux scènes de 1994 : il est en effet tombé environ 25 mm de pluie (trois jours pluvieux) sur la zone entre le 12/04/94 et le 28/04/94 qui ont suffisamment modifié le couvert végétal et la couleur du sol pour rendre impossible l'association directe des deux scènes ;

— les traitements et analyses ultérieurs ont donc été réalisés sur trois scènes, les deux scènes de 1994 différenciées et la scène globale de 1986.

Le réseau hydrographique de Côte d'Ivoire, le contour du pays et les limites des régions administratives avaient été numérisés au cours du programme Onchocercose mené par l'OMS. Ces données ont été réimportées sous Idrisi et sont utilisées ici pour l'habillage des images.

Analyses statistiques et compositions colorées

Trois analyses en composantes principales ont été réalisées dans le but d'associer les canaux véhiculant le maximum d'informations. Les matrices de corrélation et de covariance obtenues ont permis d'isoler trois associations principales que l'on retrouve pour chacune des trois scènes : les combinaisons des canaux (1-5-7), (3-5-7) et (4-5-7). Le canal thermique 6 n'a bien entendu pas été pris en compte dans l'analyse.

La réalisation sous Idrisi des compositions colorées obtenues à partir de ces trois combinaisons a permis de comparer *de visu* la qualité et la richesse des images : la composition colorée des canaux 1-5-7 (mode RGB) était la moins intéressante tandis que les deux autres compositions n'étaient pas différenciables. Finalement, la composition colorée issue de l'association des canaux 3-5-7 a été retenue, en raison des couleurs assez proches des teintes naturelles observables sur le terrain qu'elle fournit (fig. 1 du cahier couleurs).

Les classifications supervisées

Des cartes d'occupation des sols au 1/100 000, réalisées par la Direction et Contrôle des grands travaux d'Abidjan (DCGTx) à partir de l'interprétation visuelle de compositions colorées de scènes SPOT et Landsat TM datées entre 1986 et 1990 ont été utilisées comme support de base pour l'interprétation des compositions colorées réalisées.

Afin de disposer d'autres supports interprétatifs et pour améliorer la qualité et le positionnement des parcelles d'entraînement sur les compositions colorées (zones homogènes au niveau végétatif et qui vont servir à définir les différentes classes d'occupation du sol pour les classifications du 12-04-94 et du 28/04/94), une campagne de terrain avec GPS a été effectuée sur la zone d'étude au cours du mois d'avril 1998, en suivant les recommandations de LAMACHÈRE et PUECH (1995).

Une première classification avait été réalisée sur Imagine à la Maison de la Télédétection à Montpellier pour la scène du 12/04/94, qui 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 avait d'abord été appliquée à la moitié ouest de la scène (calage), puis elle a été validée sur la partie est de cette même scène. Cette procédure a ensuite été reprise sur Idrisi pour faciliter la mise en place de la classification du 28/04/94.

Neuf classes ont finalement été distinguées : Eau, Habitat, Sols nus ou dégradés, Cultures, Cultures irriguées, Savane faiblement cultivée, Savane arbustive, Savane arborée, Forêts. Plusieurs classifications supervisées ont été nécessaires (utilisation du théorème de Bayes suivant la théorie du Plus Proche Voisin, PPV) pour obtenir des images qui rendent compte assez fidèlement (concordance) à la fois des parcelles échantillonnées sur le terrain, des cartes d'occupation des sols disponibles et des nuances observées sur les compositions colorées initiales.

Une parcelle test (fenêtre commune aux deux scènes d'avril 1994) a été découpée au niveau de Korhogo (25 km de long pour 6 km de large ; zone grisée à l'ouest de Korhogo sur la figure 1). Les pourcentages en superficie de chacune des classes d'occupation des sols y ont été calculés pour les deux dates (tabl. I) à l'aide des classifications obtenues pour chacune des deux scènes. Ces deux séries ne sont pas statistiquement différentes ($P < 0,001$, test de Wilcoxon pour échantillons appariés), ce qui a permis par la suite 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. Il n'est pas étonnant de retrouver sur la parcelle test une association extrêmement forte entre deux classifications qui utilisent les mêmes supports interprétatifs.

Classes (%) sur la parcelle test	Scènes Landsat TM de 1994	
	12 avril	28 avril
Eau	0,1	0,1
Habitat	9,1	9,7
Sols nus dégradés	3,5	2,6
Cultures	18,1	17,8
Savane faiblement cultivée	34,9	33,3
Savane arbustive	30,8	32,7
Savane arborée	1,4	1,5
Forêts	2,1	2,3
Total	100	100

Tabl. I - Correspondance des classes entre les deux scènes Landsat de 1986 au niveau de la parcelle test de Korhogo.

Le résultat est néanmoins concluant, et les différences relatives que l'on observe peuvent très bien s'expliquer par les précipitations survenues entre les deux dates.

Après numérisation des cartes topographiques au 1/50 000 disponibles, les contours de 33 des 49 bassins (il n'existe pas de carte topographique pour les 16 autres) associés aux petits barrages étudiés par le programme (voir Arfi *et al.*, ce volume) et de trois grands bassins versants ont été tracés. Ces contours ont été couplés aux classifications pour caractériser l'état d'occupation des sols en novembre 1986 et avril 1994 et son évolution entre les deux dates. L'analyse pourra ainsi être portée à différentes échelles, depuis l'ensemble de la zone jusqu'aux bassins versants élémentaires.

Évolution de l'état d'occupation des sols entre novembre 1986 et avril 1994

Une simple comparaison visuelle à l'échelle globale des scènes suffit pour être frappé par l'importance de l'évolution de l'occupation du sol entre 1986 et 1994. Pour quantifier les contrastes observés, le pourcentage des surfaces occupées pour chacune des 9 classes sur l'ensemble de la zone a été calculé (tabl. II), après avoir isolé à l'intérieur des images classifiées 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.

Tabl. II - 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)
Habitat	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 x 130 km)				

Il y a 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.

À l'échelle des trois grands bassins versants, les situations apparaissent plus contrastées, mais les mêmes tendances sont confirmées (fig. 2 du cahier couleurs).

Enfin, à l'échelle locale des bassins élémentaires associés aux retenues (< 25 km²), les cas de figure sont très diversifiés. Les incertitudes sont telles qu'il est difficile de donner plus qu'une simple tendance ou perspective d'évolution et les interprétations devront se faire alors au cas par cas (fig. 3 du cahier couleurs ; tabl. III).

Tabl. III - Variations entre 1986 et 1994 des différentes classes d'occupation des sols sur 33 petits bassins versants du nord de la Côte d'Ivoire (l'ensemble de la zone correspond aux écarts d'occupations des sols présentés dans le tabl. II).

Classes d'occupation des sols	Ensemble de la zone	33 petits bassins versants			
		médiane	moyenne	maximum	minimum
Eau	- 0,2 %	- 0,2 %	- 0,3 %	+ 0,3 %	- 2,3 %
Habitat	+ 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 %

Critiques et réserves émises pour les classifications

La vraie nature des classes

Les deux scènes qui sont comparées correspondent à deux saisons climatiques différentes : fin de saison des pluies en 1986 et cœur de saison sèche en 1994. Il y a donc un phénomène d'uniformisation (« tout est vert » ou « tout est sec ») qui réduit les différences entre certaines classes.

Classe Eau : il n'y a pas de problème d'interprétation. Les étendues d'eau subissent des variations saisonnières qui ne sont pas les mêmes d'une année sur l'autre et qui sont reliées au stock d'eau dans les retenues.

Classe Habitat : nous avons d'abord essayé d'identifier les villages et campements, à partir notamment des parcelles d'entraînement repérées sur le terrain. Malheureusement mais logiquement, les villages en terre n'ont pas la même réflectance que les villes comme Korhogo ou Ferkéssédougou, et leur signature spectrale s'apparente beaucoup plus à celle des sols nus ou dégradés. Cette classe possédait ainsi une signature bimodale. Par la suite, seules les villes et agglomérations importantes (Tafiré, Ouangolodougou, etc.) ont été prises en considération, et cette classe s'apparente donc plus généralement aux zones urbaines.

Dans le même ordre d'idée, de nombreuses zones de brûlis qui appartiennent en théorie à la classe des Sols nus et dégradés, voire à la classe Savane faiblement cultivée, se retrouvent dans la classe Habitat : essayer de « forcer » ces zones dans les classes 3 ou 4 ne fait qu'accroître la bande de distribution et donc réduire simultanément les zones effectives d'habitat.

Classe Sols nus ou dégradés : si les superficies de sols nus ou dégradés identifiés en 1986 correspondent bien à la réalité, elles sont globalement surestimées en 1994 (elles interfèrent avec les zones de cultures non levées ou la végétation sèche par exemple) avec une incertitude que l'on peut estimer voisine de 15 %, chiffre obtenu à partir de la concordance entre les parcelles d'entraînement échantillonnées sur le terrain et la classification proprement dite.

Classe Cultures : il n'y a pas de problème d'interprétation. Les périmètres de cultures industrielles proches de Ferkéssédougou (cane à sucre) qui perturbaient fortement les différentes classes à chaque fois qu'ils étaient pris en compte ont finalement été laissés de côté lors de la classification finale.

Classe Cultures irriguées : cette classe est la plus sensible. Les parcelles d'entraînement correspondant à cette classe sont peu nombreuses et ne couvrent que des surfaces réduites. Cette classe 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 estimer autour de 15 à 20 %. C'est le cas de certains

bas-fonds non aménagés notamment, ou dans le cas d'une résurgence de nappe. Plus simplement encore, il suffit de quelques pluies fortement localisées quelques jours avant la prise de la scène pour introduire des perturbations que l'on ne peut pas ou peu corriger.

Classe Savane faiblement cultivée : si cette classe 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.

Classe Savane arbustive et classe Savane arborée : elles correspondent respectivement à des zones de savane claire et à des zones de savane dense. Ce sont des classes bien différenciées mais pour lesquelles on peut parfois retrouver le problème évoqué précédemment : ainsi, certaines zones classées en savane arbustive correspondent en fait à de la savane arborée qui a subi momentanément le contrecoup d'une saison sèche exceptionnelle, de même certaines zones de savane arborée correspondent effectivement à de la forêt. L'incertitude peut être estimée autour de 10 %.

Se pose également le problème de certaines cultures « sous parc », comme le coton, qui se développent sous couverture arborée, ce qui conduit à prendre ces zones de cultures pour de la savane sauvage. C'est un cas de figure récurrent, notamment au nord de Korhogo, où les champs de coton sous parcs à néré (*Parkia biglobosa*) et (ou) à karité (*Butyrospermum parkii*) sont largement répandus.

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 de telles parcelles. Les augmentations de contribution de cette classe parfois observées aux diverses échelles entre 1986 et 1994 (cf. tabl. III) pourraient partiellement être expliquées par ce processus de régénération de terroirs plus ou moins récemment exploités. Dans une moindre mesure, ce phénomène est applicable à la classe précédente. Dans les deux cas, toutefois, une augmentation de la contribution de ces classes sous l'effet d'une éventuelle augmentation des jachères ne ferait que sous-estimer le processus dominant d'anthropisation des bassins.

Classe Forêts : cette classe est certainement légèrement sous-estimée pour les scènes d'avril 1994 (cf. remarque précédente). Elle peut être à l'inverse localement influencée par les vergers de manguiers (*Mangifera indica*) et d'anacardiens (*Anacardium occidentale*), en forte expansion notamment dans le centre et le sud de la zone d'étude. Les fruits de ces



Coton après collecte, région de Korhogo. La collecte du coton est une activité manuelle qui mobilise toute la main-d'œuvre familiale disponible. De plus en plus de groupements de femmes s'organisent « pour louer » leurs services aux producteurs. La constitution de tels groupements permet aux femmes d'avoir accès aux ressources foncières et d'exploiter des champs (coton comme vivrier) pour leur propre compte. L'Afrique de l'Ouest compte plusieurs millions de cotonculteurs.

deux arbres correspondent aux deux plus importantes cultures de rente pérennes dans le nord du pays, le succès de ces filières d'exportation ayant particulièrement rejailli sur leurs productions. L'augmentation continue des vergers dans toutes les savanes de la région a eu ainsi pour effet l'accroissement du couvert arboré, estimé (pour toute la région Nord) à environ 3 000 à 4 000 hectares par an pour l'anacardier et 200 à 300 hectares par an pour le manguier à la fin des années 1990 (N'Da APOPO, 2001).

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 %).

L'influence de la taille du bassin versant, un problème d'échelle

Il est clair que la qualité de l'information fournie grâce à la télédétection est implicitement corrélée à la taille des zones examinées. Trois grandes catégories de bassins versants doivent être distinguées, sur la base des travaux réalisés à l'aide des scènes Landsat TM (résolution 30 m).

— Bassins dont la superficie est inférieure à 10 km² : pour cette première catégorie, on ne peut que dégager des tendances, en relation notamment avec la pression démographique, le caractère sauvage ou anthropisé, la densité de la végétation. Hormis les surfaces en eau qui restent facilement mesurables, il est très difficile de quantifier à cette échelle l'occupation du sol de façon précise.

— Bassins dont la superficie est comprise entre 10 et 25 km² : il devient possible de travailler de façon quantitative et de faire des commentaires détaillés sur l'occupation du bassin, en tenant néanmoins compte d'une incertitude liée dans notre cas au caractère particulier des dates d'acquisition des deux scènes. Certaines incongruités devront être interprétées par ailleurs. Les valeurs données pour chaque classe sont entachées d'une incertitude que l'on peut estimer autour de 20 %.

— Bassins dont la superficie est supérieure à 25 km² : les taux d'occupation du sol fournis par les classifications sont directement utilisables. Il apparaît bien entendu parfois quelques inexactitudes mais ces problèmes, très localisés, sont « nivelés » par la taille des bassins dont l'image globale est relativement fiable.

Si les classifications ont donné d'assez bons résultats pour ce qui est de l'occupation du sol, la simple composition colorée offre cependant les meilleures perspectives pour l'identification et le positionnement des retenues à l'échelle globale de la zone d'étude (140 x 130 km) et pour le calcul des surfaces en eau. La télédétection satellitaire permet en effet de constituer un inventaire exhaustif de toute mare dépassant un hectare (10 pixels) et de définir avec une précision acceptable sa géométrie pour une surface minimale de 10 hectares. La précision sur les surfaces est alors comprise entre 2 et 10 %. À titre indicatif, les mesures topographiques ont un coût par hectare environ dix fois plus élevé, induisent des problèmes logistiques et des délais bien plus importants, tandis que la précision sur les surfaces est de l'ordre de 1 %.

L'inventaire a permis d'identifier sur la zone d'étude couverte par les scènes Landsat 155 des petits barrages (fig. 1 cahier couleurs) dont la

Inventaire des petits barrages

surface en eau au cœur de la saison sèche est au moins égale ou supérieure à un hectare. Ce sont pour la plupart des ouvrages situés en tête de bassins et à proximité d'un ou plusieurs villages.

Si l'on admet que la période d'avril 1993 à avril 1994 correspond à une année moyenne (voire sèche) en terme de pluviométrie, on pourra alors considérer sur un plan purement hydrologique 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 des ouvrages situés à l'exutoire de bassins versants de très petite taille (< 5 km²). Globalement situés « trop » en amont, avec des altitudes moyennes relativement élevées, ils ne peuvent bénéficier d'apports phréatiques conséquents. Les retenues sont là souvent de très petite taille, et, du fait de leur faible profondeur et de l'intense évaporation, leurs réserves ne peuvent se reconstituer. Ce même comportement avait été observé sur des bassins versants de faible superficie au sud du Mali, dans une région voisine et comparable à notre zone d'étude (JOIGNEREZ *et al.*, 1992).

La comparaison des distributions des surfaces des 114 réservoirs pour lesquels l'information est disponible aux deux périodes (les barrages manquants n'étaient pas édifiés en 1986) révèle que la surface médiane des aménagements en pleine eau était de 4,5 hectares (85 % d'entre eux faisant moins de 15 ha). Les 15 % de réservoirs de plus grande taille forment une classe nettement différente, dont la surface médiane est de 35,5 ha (fig. 2). Durant la saison sèche, la surface médiane est ramenée à 1,7 hectare. Pour seulement 10 % des réservoirs, la superficie du plan d'eau a été ramenée au quart de la taille en pleine eau, tandis que pour la majorité d'entre eux, cette réduction n'excède pas 50 % de la taille initiale (fig. 3).

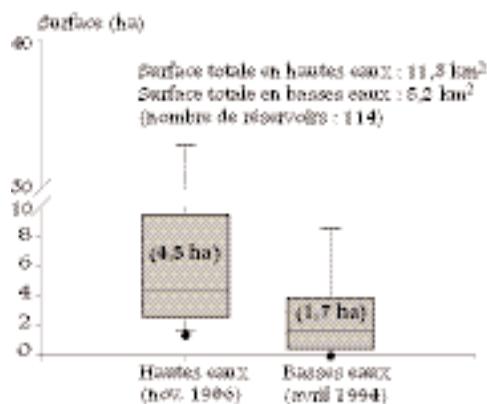
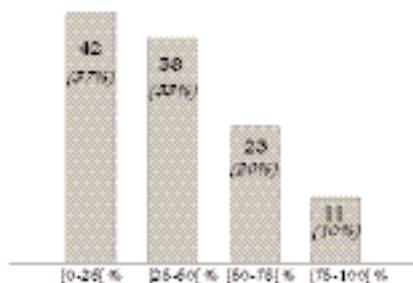


Fig. 2 - Distribution des surfaces en eau déterminées à partir des scènes Landsat TM de novembre 1986 (hautes eaux) et d'avril 1994 (basses eaux).

Les médianes des distributions sont indiquées entre parenthèses, les 1er et 3e quartiles définissent les limites des box plots (25 % et 75 % respectivement des valeurs sont comprises dans cet intervalle) tandis que les traits horizontaux indiquent les limites inférieures (5 %) et supérieures (95 %) de l'intervalle de distribution.

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.

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



Les surfaces en eau occupées par les réservoirs aux périodes critiques de leur cycle hydrologique (11,3 km² et 5,2 km² respectivement en hautes et basses eaux) montrent que les petits barrages jouent à l'échelle régionale (celle couverte par les scènes Landsat, soit 18 200 km²) un rôle déterminant dans le stockage des ressources en eau. Les classifications supervisées ont ainsi révélé qu'en novembre (tabl. II), 60 km² étaient en eau : 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 très largement distribués dans les espaces ruraux.

Petit barrage en fin de saison sèche.
Le siphon installé au premier plan est utilisé pour l'irrigation du bas-fond situé en aval de la digue.
 Cette technique demeure peu utilisée, alors qu'elle permet le transport de l'eau souplement (le siphon peut être déplacé), sans effort (aidé en cela par la gravité) et à moindre frais (quelques mètres de tuyaux). Un tel système permet par exemple de sécuriser un cycle cultural pour compenser un déficit des apports naturels.



Conclusion

La caractérisation géographique entreprise par télédétection à l'aide d'un jeu de quatre scènes Landsat TM révèle les 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, il est vraisemblable que ces dynamiques globales auront un fort impact sur les coefficients d'écoulements et le ruissellement des bassins versants, et donc sur le fonctionnement hydrologique des retenues (cf. Gourdin *et al.*, ce volume).

L'inventaire par télédétection des retenues situées dans la région, réalisable tant en saison de hautes eaux (novembre 1986) qu'en cœur de saison sèche (avril 1994), révèle que, dans leur grande majorité, les réservoirs seront généralement pérennes en dépit de leurs faibles dimensions et conserveront 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 terme de sécurisation des ressources en eau de contre-saison : en avril 1994, 30 % des ressources régionales étaient ainsi stockées dans les petits barrages. D'un tout autre point de vue, les surfaces périphériques des réservoirs, libérées à la faveur du tarissement saisonnier des retenues, vont constituer une autre ressource, foncière, stratégique car située à proximité immédiate des plans d'eau et aisément irrigable par le simple creusement de puits peu profonds (céanes qui se remplissent grâce à la nappe affleurante). Ces marges sont de plus en plus intensément exploitées pour des cultures maraichères à vocation marchande (Fromageot, ce volume) et vont contribuer significativement à l'anthropisation globale des écosystèmes.

Enfin, 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 résultats obtenus montrent toutefois que cette situation ne se vérifie pas pour les petits barrages qui sont situés en

**Piste d'accès au lac de Sologo
au sud de Korhogo.
Cette zone est l'une des plus
densément peuplées de la région.
Quelques arbres utiles
ont été sélectionnés
dans un espace principalement
occupé par des champs de coton.
En arrière-plan, la rive gauche
du réservoir laisse encore place
à quelques bouquets forestiers.**



extrémité des têtes de bassins, où ils drainent des bassins versants de toute petite taille et où, surtout, les nappes ne se maintiennent pas durablement après le tarissement des écoulements. *A contrario*, dans de telles situations, l'implantation d'un petit réservoir peut se révéler suffisante pour « sécuriser » la ressource en eau localement disponible durant quelques mois après la fin de la saison des pluies. Cette sécurisation peut être une garantie de succès pour des cultures de bas-fonds traditionnelles, comme le riz, en protégeant les exploitants d'aléas hydrologiques d'autant plus contraignants que les bassins versants concernés sont de petite taille.

Références

- AHMADI N., 1997 – *Aménagement et mise en valeur des bas-fonds au Mali*. Collection Colloques, Montpellier, Cirad-CA, 500 p.
- BONN F., ROCHON G., 1992 – *Précis de télédétection*, Vol. n° 1 : *Principes et méthodes*. Québec, PUQ/Aupelf, 477 p.
- BONN F. (sous la direction de), 1996 – *Précis de télédétection*, Vol. n° 2 : *Applications thématiques*. Québec, PUQ/Aupelf, 642 p.
- BONNETT R., 1993 – *Land observation by remote sensing: Theory and applications*. Londres, CRC Press, 642 p.
- CASENAVE A., VALENTIN C., 1989 – *Les états de surface de la zone sahélienne*. Paris, Orstom, Coll. Didactiques, 227 p.
- CECCHI P., 1998 – De la construction d'un objet pluridisciplinaire : les Petits-Barrages du Nord de la Côte d'Ivoire. *Natures, Sciences, Sociétés*, 6 (2) : 73-83.
- DEZETTER A., SERVAT E., 1992 – « 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 BARBE L., SERVAT E. (éd.) : *Régionalisation en hydrologie. Applications au développement*. Paris, Orstom, Colloques et Séminaires : 549-559.
- FOIN P., 1987 – *Cartographie topographique et thématique*. Paradigme, Coll. Télédétection satellitaire, (4), 127 p.
- FOIN P., BAUDOIN A., 1985, 1988, 1990 – *Cours de télédétection*. Fascicule 1 : *Bases physiques* (1988). Fascicule 2 : *Bases sur la connaissance du milieu naturel et humain* (1985). Fascicule 4 : *Système de télédétection, Géométrie des images* (1990). Fascicule 5 : *Méthodologie* (1990). Paris, IGN, 53 + 78 + 95 + 83 p.
- Inventaire des retenues et barrages de Côte d'Ivoire*, 1992 – Direction des grands travaux, Abidjan, Côte d'Ivoire, 151 p. + annexes.
- JOIGNEREZ A, OLIVRY J.-C., GUIGEN, N., 1992 – *Évaluation des ressources en eau non pérennes au Mali*. Rapport final, Projet DNHE, Orstom, Pnud, Orstom Bamako, Mali, 85 p.
- LAMACHÈRE J.-M., PUECH C., 1995 – « Télédétection et régionalisation de l'aptitude à l'écoulement et à l'infiltration des sols en Afrique sahélienne et nord-soudanienne. » In LE BARBE L., SERVAT E. (éd.) : *Régionalisation en hydrologie. Applications au développement*. Paris, Orstom, Colloques et Séminaires : 205-228.
- N'DA APOPO A., N'GUESSAN K. A., KEHE M., DEA G. B., KOFFI E., 2001 – « Impact de l'anacardier et du maniguier sur l'environnement et les revenus des paysans au Nord de la Côte d'Ivoire. » In CIRAD (éd.) : *L'avenir des cultures pérennes. Investissement et durabilité en zone tropicale humide*, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire, 05-09 novembre 2001.
- THENKABAIL P. S., NOLTE C., 1995 – *Mapping and characterizing inland valley agroecosystems of West and Central Africa: A methodology for integrating sensing, global positioning system, and ground-truth data in a geographic information system framework*. Research Monograph n° 16. Resource and Crop Management Division, IITA, Ibadan, Nigeria, 62 p.