Télédétection, 2005, Vol. 4, n°4, p 339-353
Droit de photocopie soumis à autorisation

© 2005 CONTEMPORARY PUBLISHING INTERNATIONAL
Publié sous l'enseigne *Éditions scientifiques GB*

APPORT DE DONNÉES DE HRV DE SPOT POUR L'ÉTUDE DES VARIATIONS PHÉNOLOGIQUES DANS LE BASSIN DE L'OUÉMÉ (BÉNIN)

SYLVAIN BIGOT[1], ISABELLA ZIN[2] ET ARONA DIEDHIOU[3,4]

[1] *Laboratoire de géographie des milieux anthropisés (LGMA, CNRS UMR 8141), Université des Sciences et Technologies de Lille, avenue Paul-Langevin, 59655 Villeneuve d'Ascq, cedex, France ; courriel : sylvain.bigot@univ-lille1.fr*
[2] *Centre d'étude des environnements terrestres et planétaires, Département Interfaces Océan Terre Atmosphère, 10-12, avenue de l'Europe, 78140 Vélizy, France*
[3] *Laboratoire des transferts en hydrologie et environnement (UMR 5564, CNRS-INPG-IRD-UJF), B.P. 53, 1025, rue de la Piscine, Domaine Universitaire, 38041 Grenoble, Cedex 9, France*
[4] *Antenne IRD de Niamey, Niger*

(soumis : 17 mars 2004 ; révisé : 4 août 2004 ; accepté 12 octobre 2004)

Ce travail porte sur l'étude géographique d'un bassin versant du centre-ouest du Bénin. Cette région a été instrumentée dans le cadre du programme CATCH (Couplage de l'atmosphère tropicale et du cycle hydrologique) pour améliorer la connaissance des processus climatiques aux échelles fines. Grâce à un travail de géostatistique, reposant sur des données provenant de la télédétection satellitaire, les analyses fournissent, dans un premier temps, une carte d'occupation du sol (avec cinq formations végétales principales) puis, dans un second temps, plusieurs résultats touchant aux variations phénologiques saisonnières et inter annuelles, permettant de mieux comprendre la perte d'information en fonction de la résolution spatiale utilisée. L'indice de végétation NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) est aussi confronté à différents indices pluviométriques afin de juger de la stabilité dans le temps et dans l'espace des relations bioclimatiques régionales, notamment en fonction des principaux types de formations savanicoles.

Mots-clefs : Bénin ; occupation du sol ; analyse multiéchelle ; NDVI ; phénologie ; bioclimatologie.

CONTRIBUTION OF SPOT DATA FOR THE STUDY OF PHENOLOGICAL VARIATIONS IN THE BASIN OF OUÉMÉ (BENIN)

This work concerns the geographical study of a catchment area of the mid-west of Benin. This area was instrumented within the framework of the program CATCH (Couplage de l'atmosphère tropicale et du cycle hydrologique) to improve knowledge of the climatic processes on fine scales. Thanks to a work of geostatistic resting on data providing by satellites, the analyses initially provided a map of the land use (with the five main vegetation units) then, in the second time, several results related to the seasonal and interannual phenology. Theses results make it possible to better understand the loss of information according to the spatial resolution used. The vegetation index NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) is also confronted with various rainfall indices in order to study stability in time and space of the regional bioclimatic relations, in particular according to main types of savannas.

Keywords : Benin; land cover; multiscale analysis; NDVI; phenology; bioclimatology.

1. INTRODUCTION

L'étude du cycle hydrologique, aussi bien pour la gestion des ressources en eau que pour l'amélioration des prévisions climatiques régionales, reste excessivement complexe car elle fait interagir les processus météorologiques et les caractéristiques de la surface (sol et végétation). Cette dernière composante est en outre extrêmement sensible aux dynamiques anthropogéniques liées notamment à l'agriculture, au déboisement, à l'urbanisation et à la surexploitation des ressources en eau. En conséquence, une des priorités pour améliorer la modélisation physique de la variabilité hydroclimatique est d'améliorer la compréhension des rétroactions entre le bilan hydrologique et les variations phénologiques, ces relations bioclimatiques évoluant significativement en fonction des échelles spatio-temporelles choisies (Lebel *et al.*, 1997). Les études doivent donc pouvoir fournir des bilans multiéchelles dans le temps et dans l'espace (approche dite en agrégation/désagrégation d'échelle) en fonction des différents objectifs scientifiques, par exemple une résolution spatiale particulièrement fine de quelques centaines de mètres pour une modélisation écologique, jusqu'aux résolutions multikilométriques pour les modèles de circulation générale atmosphérique travaillant avec des mailles de 1 à 2 degrés, en passant par les modèles climtiques régionaux à une résolution kilométrique. Il est donc nécessaire de définir quelles sont les

échelles spatiotemporelles critiques auxquelles la variabilité des propriétés de surface doit être représentée explicitement (Hay, 2002) en choisissant le degré de complexité minimum qu'il faut introduire pour pouvoir prendre en compte de manière réaliste l'hétérogénéité de ces champs de surface (i.e. champ d'humidité du sol).

L'apport de la télédétection est donc crucial, car elle permet de suivre pas à pas, en faisant varier la résolution spatiale, les différentes corrélations bioclimatiques, notamment en fonction de modifications saisonnières des états de surface mais aussi en fonction des changements des paysages liés à des dynamiques anthropiques. Ce type de travail est essentiel pour l'étude des espaces tropicaux africains où les modifications du climat et des paysages sont particulièrement significatives depuis les dernières décennies (Bigot *et al.*, 2003). Ainsi, dans le cadre d'un programme de recherches international financé par l'AUF (Agence universitaire de la Francophonie) et mené au LGMA (Laboratoire de géographie des milieux anthropisés) de l'Université Lille-1, une étude est menée sur ces thématiques sur des zones tests en Côte d'Ivoire et au Bénin (figure 1). En parallèle, dans le programme CATCH (Couplage de l'atmosphère tropicale et du cycle hydrologique) mené au LTHE (Laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et environnement) de Grenoble, on y analyse depuis plusieurs années les processus hydroclimatiques et leur variabilité à différentes échelles spatiotemporelles en climat soudanien. Une instrumentation renforcée et des études à méso-échelle sont notamment menées dans le Nord-Bénin, soit sur le haut bassin de l'Ouémé de 12 000 km^2 (figure 2). L'objectif final du programme est de se servir des différents résultats régionaux pour développer une modélisation hydrologique transposable dans l'espace climatique soudanien. En 2003, 46 pluviographes à acquisition numérique et plus de 40 piézomètres sont opérationnels dans ce bassin versant. L'étude d'une sous-région d'environ 500 km^2 particulièrement bien instrumentée au niveau du bassin versant de la rivière Donga permet par ailleurs de renforcer les études des interactions à l'interface sol/végétation/atmosphère, notamment la modélisation de l'impact de la végétation sur les différents flux hydrologiques.

Les analyses s'attachent donc, d'une part, à délimiter et à classifier les différents types physionomiques de la végétation présents sur le bassin de la Donga, ainsi que leur dynamique saisonnière, à partir d'une série de 13 images à haute résolution spatiale HRV de SPOT acquises sur la période 1998-2003. D'autre part, l'étude porte sur les variations intra- et inter-saisonnière de l'activité chlorphyllienne de la phytomasse (au moyen de l'indice de végétation normalisé – NDVI) et leur relation avec les champs pluvieux observés sur tout le haut bassin de l'Ouémé (environ 20 000 km^2).

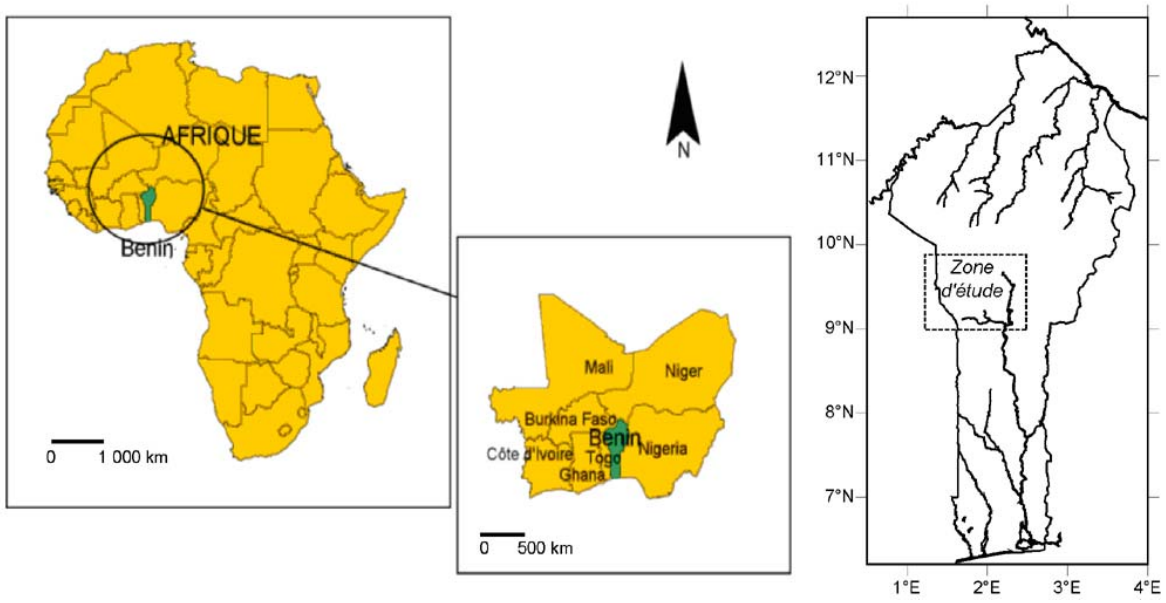


FIGURE 1 Localisation du Bénin et de la zone d'étude (bassin de la rivière Donga) dans le Centre-Ouest du pays. *Localization of Benin and the studied area (catchment area of Donga river) in the mid-west of the country.*

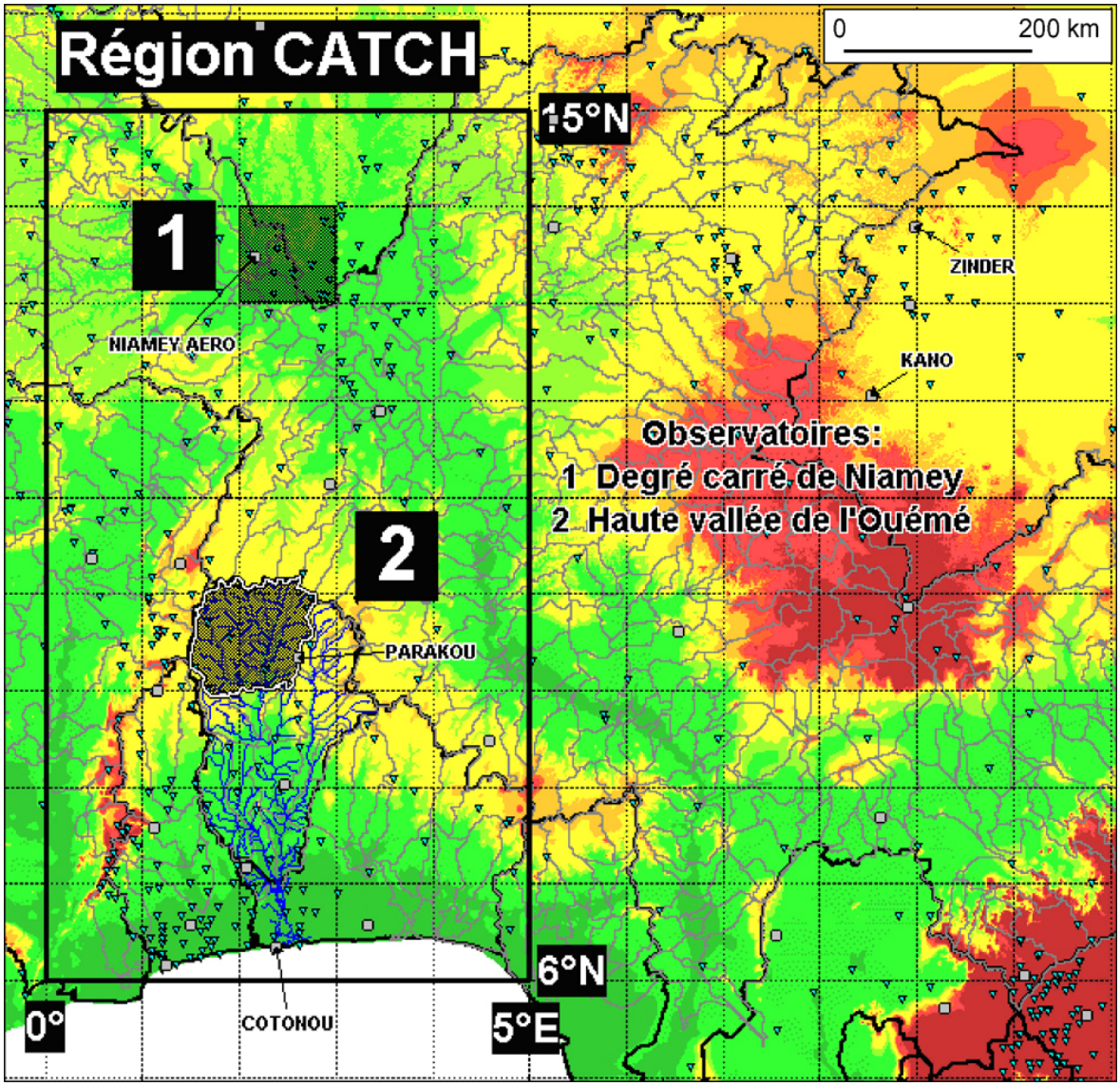


FIGURE 2 Localisation de la zone atelier de la vallée du Haut-Ouémé (Bénin) instrumentée dans le cadre du programme CATCH (source : programme CATCH, LTHE-Grenoble). *Localization of the workshop area, the valley of Haut-Ouémé (Benin), instrumented within the framework of the CATCH program.*

2. CARTOGRAPHIE DE L'OCCUPATION DU SOL DU BASSIN VERSANT DE LA DONGA

Ce chapitre présente la méthodologie générale utilisée pour aboutir à une synthèse de la mosaïque paysagère de la région d'étude.

2.1. Identification des principales formations végétales par classification automatique

Une série de sept images HRV de SPOT couvrant la totalité du bassin versant de la rivière Donga est sélectionnée sur la période 1998-2003 afin d'établir une carte d'occupation du sol à une résolution spatiale de 20 m. L'information géographique fournie est assez variable d'une image à l'autre, en fonction de la date d'acquisition et donc des différents stades phénologiques des divers types de végétation. Cependant, comme les mêmes unités de végétation sont reconnaissables sur les images après examen visuel, il semble que les changements d'occupation du sol sont faibles pendant la période d'étude considérée. En outre, le type de traitement d'image résulte du choix des objets géographiques étudiés, choix

contraint par la façon dont ils se présentent sur les images selon la taille, l'homogénéité, les formes, les limites apparentes ou non, etc. Le traitement d'image est donc consécutif à une analyse initiale des objets d'étude, analyse essentiellement visuelle.

Ensuite, les images sont géoréférencées, puis superposées pour former un vecteur multidate segmenté en classes disjointes (ou *clusters*) par un algorithme FCM (F*uzzy C-Means*) (Bezdek *et al.*, 1984).

Une classification bayésienne du vecteur d'images est ensuite effectuée par l'algorithme itératif ICM (*Iterated Conditional Modes*) (Besag, 1986) et optimisée selon le critère MAP (maximum a posteriori). Une analyse de sensibilité du processus de classification au nombre de classes et à la valeur du critère de convergence est opérée et une première classification non dirigée du vecteur d'images est obtenue sur la base de la seule information spectrale, avec 16 classes optimales (pour une convergence de 98,5 %) (figure non montrée).

Étant donné la complexité de ce premier résultat cartographique, extrêmement difficile à analyser, il est nécessaire de simplifier le résultat de la classification automatique grâce à un regroupement de classes. Si trop de niveaux sont analysés de façon simultanée, l'information pertinente de chacun est brouillée par les signaux des autres qui sont alors perçus comme un bruit blanc : plus la typologie de départ est diversifiée, plus les classes seront complexes et difficiles à caractériser. La réalisation d'une carte de la végétation par classification dirigée est alors satisfaisante au sens où elle permet d'identifier la majorité des unités de végétation distinguées sur le terrain. Mais la diminution des erreurs grâce au regroupement successif des classes apparentées implique une interprétation des classes a posteriori. De toute façon, il faut admettre que seules quelques classes (entre 4 et 6) sont la plupart du temps suffisantes pour la réalisation de cartes d'occupation du sol en zone savanicole arborée. Cette étape nécessite cependant des points de validation obtenus sur la fenêtre d'analyse. La télédétection, associée à la réalité de terrain, reste en effet la solution appropriée pour la validation d'une cartographie analytique à l'échelle du paysage. En conséquence, 52 relevés au sol géoréférencés sont utilisés, observations recueillies lors d'une campagne sur le terrain effectuée en août 2003. Ainsi, sur la base de ces relevés, les 16 classes initiales sont regroupées en 6 types d'occupation du sol (figures 3 et 4) :

1. Zones anthropisées (villes, villages, routes) ;
2. Parcelles cultivées ;
3. Forêts (forêt claire et forêts galeries, ainsi que quelques forêts denses décidues en saison sèche, ces dernières étant largement minoritaires sur le bassin) ;
4. Savanes boisées (recouvrement par les ligneux inférieurs à 40 %) ;
5. Savanes arborées (hautes graminées avec moins de 20 % de recouvrement des arbres) ;
6. Savanes arbustives et jachères (avec la présence d'arbustes et une végétation herbacée haute et dense, notamment pendant la saison des pluies).

Certains biais compliquent la bonne distinction interclasse. Les difficultés sont liées, d'une part, aux dates d'acquisition des images, car cinq images sur sept sont acquises en saison sèche, ce qui explique par exemple la confusion entre cultures et sol nu. La faible distinction provient, d'autre part, des caractéristiques phénologiques et spectrales de la végétation naturelle qui présentent des variations spatiales progressives et peu prononcés entre les différents stades de régression. L'homogénéité spatiale est en fait une information fondamentale pour les traitements numériques à partir de l'imagerie satellitaire. Les classifications d'image, en particulier, se basent sur la similitude des radiométries intra-thèmes et la ségrégation inter-thèmes. Les zones à thème uniforme doivent donc présenter des radiométries similaires à une date donnée entre pixels voisins, ce qui n'est pas toujours le cas à cause de facteurs écologiques (stades phénologiques, état physiologique, facteurs édaphiques, etc.), anthropiques (interventions agricoles, hydrauliques, etc.) ou encore d'artefacts de l'image (nébulosité notamment). De plus, la notion de signature spectrale n'est pas exacte car, en fait, elle correspond à un assemblage d'éléments divers et non pas à un ensemble d'objets identiques. Finalement, le principe de classification, s'il est statistiquement très cohérent, ne l'est pas toujours géographiquement, et ce d'autant plus que la résolution spatiale augmente. L'amélioration de la résolution spatiale augmente la variance locale et rend complexe l'utilisation de la classification dirigée.

Pour ce cas d'étude, la matrice de confusion indique cependant une bonne concordance entre les résultats géostatistiques obtenus par la classification et l'information recueillie au sol, notamment à l'échelle des formations boisées (tableau 1).

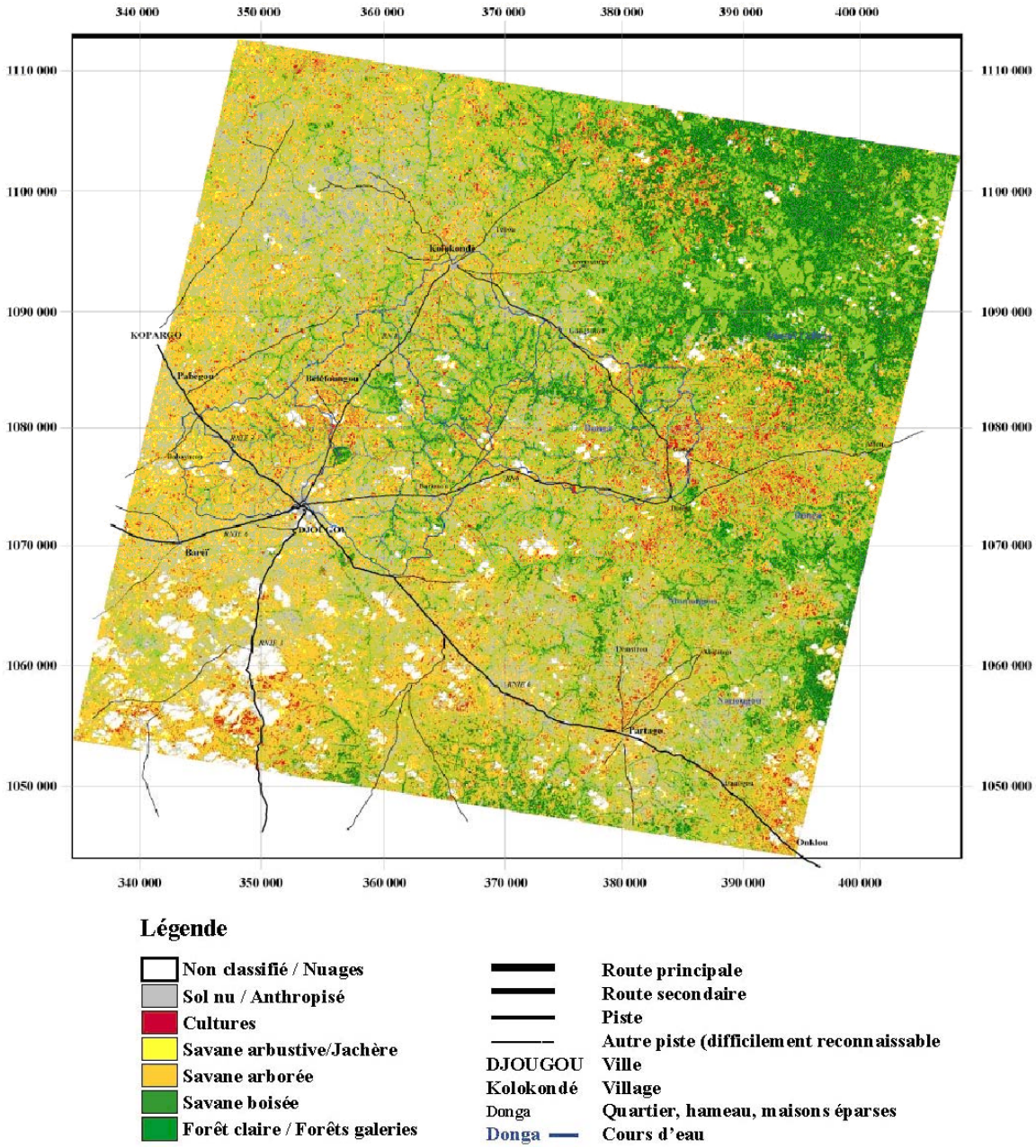


FIGURE 3 Classification automatique en six classes d'occupation du sol sur la région du bassin de la rivière Donga (centre-ouest du Bénin) en 2003. Pour l'analyse, on utilise une méthode bayésienne à partir d'images HRV de SPOT du 22/10/2003 et RSO de ERS du 23/04/2003 ; la projection est de type UTM WGS84, zone 31N, avec coordonnées métriques. *Automatic classification in six classes of land cover on the area of Donga river basin (mid-west of Benin) in 2003. Analysis uses a bayesian method from SPOT-HRV imagery of the 22/10/2003 and RSO-ERS imagery of the 23/04/2003 (UTM WGS84 projection, zone 31N, with metric geo-references).*

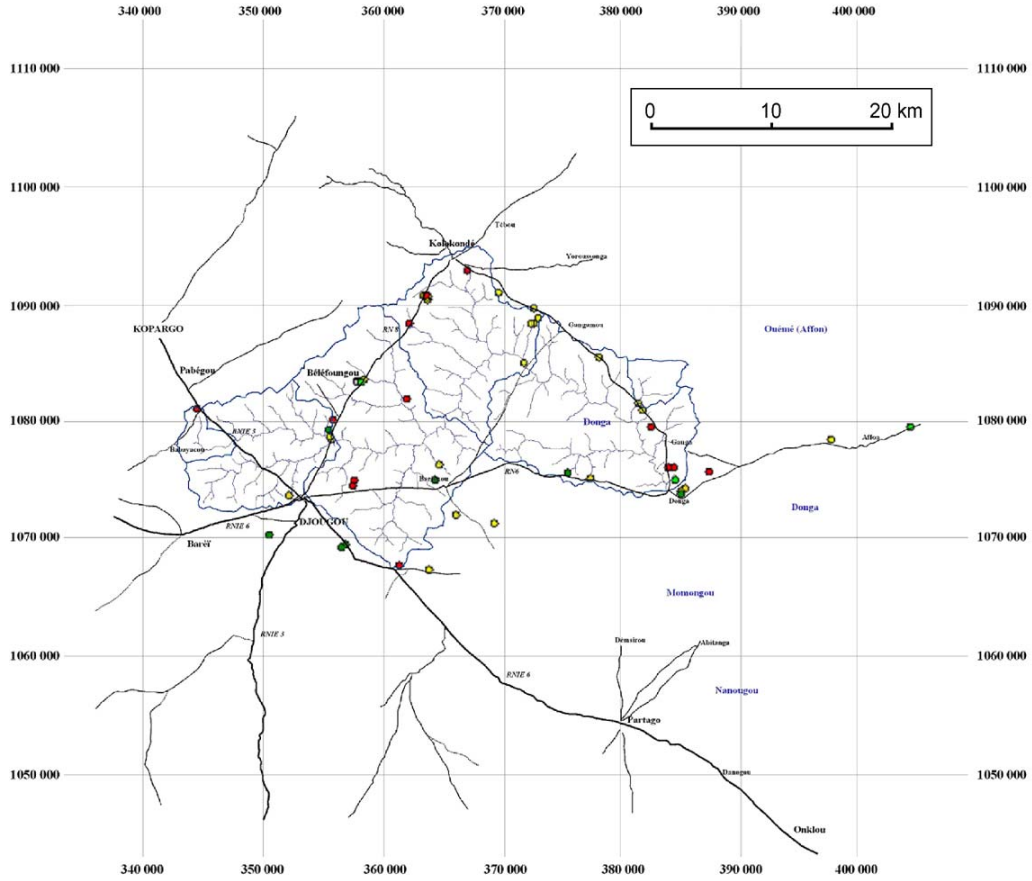


FIGURE 4 Localisation des 52 relevés au sol utilisés pour la validation de la classification automatique (mission de terrain effectuée en août 2003) ; la légende fait référence à celle de la figure 3. *Localization of the 52 statements on the ground used for the validation of automatic classification (mission of ground carried out in August 2003); the legend refers to that of figure 3.*

TABLEAU 1 : Matrice de confusion calculée à l'issue de la classification automatique en six classes effectuée sur le bassin versant de la rivière Donga (voir figure 3). *Matrix of confusion computed after an automatic classification in six classes carried out on the catchment area of Donga river (see figure 3).*

		Classification					
		Sol nu *	**Cultures**	**Savane arbustive**	**Savane arborée**	**Savane boisée**	**Forêt claire ****
Relevés Au sol	**Sol nu ***	0	0	0	100 *	0	0
	Cultures	27	**40**	20	0	0	13
	Savane arbustive	16	0	**53**	5	21	5
	Savane arborée	0	0	17	**50**	17	16
	Savane boisée	0	0	20	30	**50**	0
	Forêt claire	0	20	0	0	20	**60**

** Un seul échantillon disponible*

*** Les forêts galeries sont intégrées à ce groupe, associées aux autres formations fermées*

2.2. Analyse de la mosaïque paysagère

Ces premiers résultats cartographiques permettent une description de l'agencement dans l'espace de la fragmentation de la superficie forestière du bassin versant de la Donga, sans devoir recourir à une approche plus complexe par échantillonnage pour estimer l'état de fragmentation du paysage. Ils complètent par ailleurs les monographies régionales qui n'abordent pas les échelles fines (Le Barbé *et al.*, 1993). La classification révèle une dichotomie spatiale entre le nord-est, principalement occupé par des formations ligneuses (savanes boisées et forêts claires) et le reste de l'image, essentiellement recouvert de formations herbeuses plus ou moins arborées (figure 3). Le bassin versant de la Donga (approximativement au centre de l'image, encadré par les routes RN6 et RN8 reliant Djougou, Kolokondé et Donga) a en fait une position biogéographique intermédiaire puisqu'il possède les différents types de paysages. Mais, ce sont les forêts galeries qui demeurent le facteur dominant.

La carte d'occupation du sol révèle aussi que les paysages de la Donga possèdent une forte composante anthropogénique, les espaces agricoles étant particulièrement nombreux sur les interfluves périphériques du bassin, surtout dans les régions de Béléfoungou, Kolokondé et Ganga (figure 3). Au cœur du bassin versant, la mosaïque paysagère est très complexe car elle associe des zones de culture, de savanes arborées et de ripisylves. Cette diversité agricole, associée à différents calendriers saisonniers et techniques culturales, aboutit à une grande palette de réponses radiométriques qu'il n'est pas possible de différencier à partir de cette seule classification. Même avec une résolution spatiale élevée telle celle de HRV, la télédétection ne permet pas, par exemple, de détecter les défrichements de faible ampleur liés à certaines formes d'agriculture vivrière. La lisibilité de certaines cultures, du fait de leur caractère très extensif, demeure aussi quelquefois difficile. L'étude des relations entre climat tropical, phénologie végétale, agrosystèmes et formations végétales passe donc avant tout par un choix judicieux des niveaux d'observation et de comparaison car la notion de paysages en mosaïques est typique des zones savanicoles plus ou moins densément arborées.

3. ÉTUDES DES VARIATIONS BIOCLIMATIQUES EN FONCTION DE L'OCCUPATION DU SOL

Dans ce chapitre, on cherche à déterminer l'intensité des corrélations entre les variations hydroclimatiques et l'activité végétale, tout en insistant sur l'influence de la résolution spatiale sur les résultats statistiques ainsi que sur les différenciations régionales liées aux différentes unités de végétation.

3.1. Variations phénologiques et choix de la résolution spatiale

En dehors de la seule cartographie statique des principales formations végétales (i.e. un simple inventaire biogéographique), le climatologue et le modélisateur ont besoin de connaître précisément les variations saisonnières et interannuelles de la productivité végétale, c'est-à-dire une cartographie fonctionnelle et dynamique qui permette de calculer avec plus de réalisme les bilans hydrologique et énergétique de surface. Cependant, les modèles numériques du climat possèdent actuellement une résolution spatiale trop large pour tenir compte de toute la gamme d'interactions liées à la mosaïque du paysage. Une approche dite de désagrégation peut alors être utilisée, visant à approcher une vision sous-maille réaliste à partir de données initiales obtenues à une maille supérieure. Des outils théoriques existent, par exemple pour parvenir à la désagrégation des précipitations (Lebel *et al.*, 1997). La désagrégation des paysages basée sur les données satellitaires est plus complexe, car reposant uniquement sur des critères radiométriques, alors que le fonctionnement d'un milieu forestier ou savanicole est avant tout le résultat de processus écologiques complexes.

Mais le phénologiste se bute sur l'impossibilité de pouvoir réaliser de très nombreuses observations de terrain, continues sur plusieurs années, pour cartographier ces champs fonctionnels. L'apport de la télédétection est alors déterminant, les données radiométriques permettant d'estimer l'activité photosynthétique de surface, notamment par le biais d'indices multibandes. Ainsi, il est maintenant établi qu'un indice, tel le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), basé sur le proche-infrarouge et le visible, et variant approximativement entre 0 (aucune activité photosynthétique) et 1 (valeur théorique jamais atteinte indiquant une très forte activité végétale), est lié à la proportion de radiations photosynthétiques absorbées par la végétation (Tucker *et al.*, 1991). Il reflète donc le comportement des couverts dominants, la correspondance entre la composition floristique et le comportement phénologique permettant une nouvelle approche de la cartographie phytogéographique basée sur le comportement saisonnier et non sur la composition statique des couverts végétaux (Bigot, 1997).

Les produits retenus ici pour analyse sont les synthèses décadaires du NDVI, valeurs provenant de la combinaison de l'ensemble des acquisitions réalisées par périodes de dix jours. Ces synthèses

permettent d'éliminer les nuages et les effets directionnels (inhérents aux variations de la position relative du soleil, de la cible et du capteur) et elles sont également corrigées des effets atmosphériques. Un indice régional calculé à partir de ces données révèle deux pics saisonniers d'activité photosynthétique active, en juin et en octobre (figure 5). Au-delà de ce rythme phénologique moyen, les écarts de l'activité chlorophyllienne révélée par le NDVI peuvent cependant être importants, et cela tout au long de l'année. Ainsi, en octobre, mois qui possède les valeurs moyennes de NDVI les plus élevées (~0,62), les valeurs enregistrées à l'intérieur de la fenêtre géographique retenue pour le calcul de l'indice régional sont en fait comprises entre 0,43 et 0,72. Cet écart s'explique par la mosaïque végétale qui associe un grand nombre de phénophases, pas toujours en phase, en fonction des espèces et de différents stades physiologiques. Cet élément montre bien la difficulté d'associer une phénologie moyenne lorsqu'elle est résumée par un pixel de 1 km qui intègre théoriquement plusieurs rythmes bioclimatiques. L'agrégation du NDVI en fonction de deux autres résolutions spatiales utilisées en modélisation régionale (10 et 40 km) renforce ce constat (figure 5). Ainsi, les valeurs maximales du NDVI avec une résolution de 40 km correspondent au NDVI moyen calculé avec une résolution de 1 km. Ce résultat, quoique connu et explicable par le lissage des données et la perte de variance, n'en demeure pas moins une source de simplification exagérée dans des travaux de bioclimatologie ou de paramétrisation réaliste de modèles. Par ailleurs, les valeurs minimales sont quasiment équivalentes, indépendamment de la résolution spatiale choisie à 10 ou 40 km, indiquant qu'il existe sûrement des seuils géostatistiques qui influencent la représentation spatiale des données environnementales provenant de la télédétection.

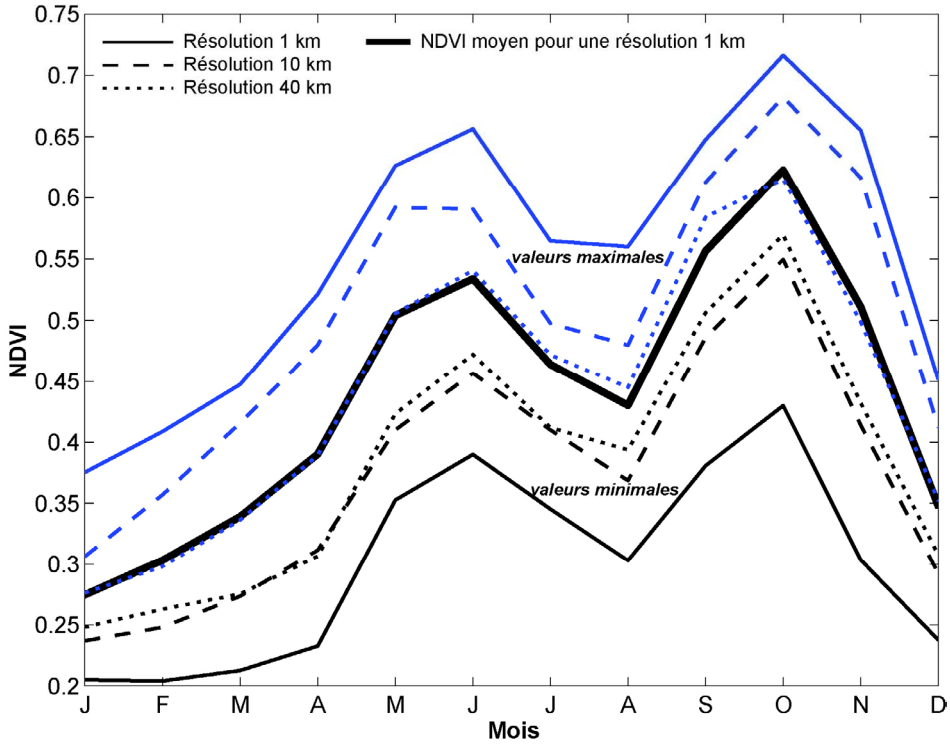


FIGURE 5 Variations saisonnières moyennes (1999-2002) des valeurs minimales et maximales du NDVI sur la fenêtre géographique du bassin de la Donga selon une résolution spatiale de 1 km (trait), 10 km (tirets) et 40 km (pointillés) ; la moyenne du NDVI pour une résolution de 1 km est indiquée en trait gras. *Average seasonal variations (1999-2002) of the minimal and maximum NDVI values on the geographical window of Donga basin according to a spatial resolution of 1 km (line), 10 km (dashes) and 40 km (dotted lines); the average of the NDVI for a 1 km resolution is indicated in bold line.*

L'étude de deux mois spécifiques, janvier (mois sec) et juillet (mois pluvieux) suggère, qu'en effet, le choix de la résolution spatiale de base influence considérablement les résultats bioclimatiques potentiels