

RESUME DE LA THESE

(Version française)

Modeling of vegetation dynamics and its contribution to the water balance in semi-arid lands of West Africa

(Modélisation de la dynamique de la végétation et de sa contribution au bilan hydrologique des régions semi-arides de l'Afrique de l'Ouest)

Dissertation

pour

Obtention du diplôme de doctorat (Dr.rer.nat.)

de la

Faculté de Mathématiques et Sciences Naturelles

de

Université de Bonn - Rheinischen Friedrich-Wilhelms

Présenté par

Lazare TIA

de

Man, Côte d'Ivoire

Bonn, 2007

Table des Matières

1	INTRODUCTION.....	4
2	PROBLEMATIQUE.....	5
3	JUSTIFICATION DE L'ETUDE.....	7
4	OBJECTIFS DE RECHERCHE.....	8
4.1	OBJECTIF GENERAL.....	8
4.2	OBJECTIFS SPECIFIQUES.....	8
5	STRUCTURE DE LA THESE.....	9
6	SITE D'ETUDE.....	10
7	METHODES DE RECHERCHE.....	11
7.1	METHODE 1 : ESTIMATION DE LA DENSITE ABSOLUE DES ARBRES.....	11
7.2	METHODE 2 : PREDICTION DE LA DENSITE RELATIVE DES ARBRES.....	12
7.2.1	<i>Variables d'analyse.....</i>	<i>12</i>
7.2.2	<i>Processus de prédiction de la densité relative.....</i>	<i>12</i>
7.3	METHODE 3 : MESURES DE FLUX DE SEVE.....	14
7.3.1	<i>Choix des sites de mesure.....</i>	<i>14</i>
7.3.2	<i>Principe de mesure de flux de sève.....</i>	<i>15</i>
7.3.3	<i>Echantillonnage de l'aubier.....</i>	<i>16</i>
7.3.4	<i>Mesure de l'aubier et calcul du flux de sève.....</i>	<i>17</i>
7.4	METHODE 4 : EQUATION DU BILAN HYDROLOGIQUE DE SURFACE.....	18
7.4.1	<i>Equation du bilan hydrologique de surface.....</i>	<i>18</i>
7.4.2	<i>Estimation de l'Evapotranspiration réelle.....</i>	<i>19</i>
7.5	METHODE 5 : ESTIMATION DE LA CONTRIBUTION DES ARBRES AU BILAN HYDROLOGIQUE DE SURFACE.....	19
7.5.1	<i>Extrapolation du flux de sève.....</i>	<i>19</i>
7.5.2	<i>Estimation de la transpiration du couvert végétal.....</i>	<i>20</i>
8	PRINCIPAUX RESULTATS.....	21
8.1	DENSITE ABSOLUE DES ARBRES.....	21
8.2	ESTIMATIONS DE LA DENSITE DES ARBRES PAR LE HOUPPIER, LE DBH ET LA HAUTEUR DES ARBRES.....	22
8.3	PREDICTION DE LA DENSITE RELATIVE DES ARBRES PAR MODELISATION.....	24
8.3.1	<i>Modèle de prédiction des densités relatives des arbres.....</i>	<i>24</i>
8.3.2	<i>Prédiction du DBH.....</i>	<i>27</i>
8.3.3	<i>Prédiction de la surface du houppier.....</i>	<i>27</i>
8.4	ESTIMATION QUANTITATIVE DE LA CONSOMMATION EN EAU DES ARBRES.....	28

8.5	VARIATION SAISONNIERE DE L'EVAPOTRANSPIRATION REELLE	31
8.6	ESTIMATION DE LA TRANSPIRATION	32
8.6.1	<i>Transpiration des peuplements d'arbres</i>	32
8.6.2	<i>Transpiration des arbres et ETa</i>	33
8.6.3	<i>Cartographie de la transpiration du couvert végétal</i>	33
8.7	CONTRIBUTION DE LA VEGETATION AU BILAN HYDROLOGIQUE DE SURFACE	34
8.7.1	<i>Transpiration, ETa et précipitation</i>	34
8.7.2	<i>Déficit pluviométrique, ETa, transpiration et eaux souterraines</i>	35
9	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	37
10	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	39

1 INTRODUCTION

Initialement considérée comme un simple spectateur dans le fonctionnement du système terrestre, la végétation est maintenant reconnue comme une importante composante du système climatique global à travers son contrôle des flux d'énergie au-dessus de parties substantielles de la surface terrestre. En outre, il a été prouvé que les interactions végétation-atmosphère règlent le temps, les cycles hydrologiques locaux et le climat régional. Aussi, est-il jugé indispensable d'inclure le feedback végétation-climat dans les études portant sur le changement climatique.

La présente étude qui s'inscrit dans cette logique se focalise sur l'estimation de la contribution des peuplements arborescents au bilan hydrologique de surface à travers la transpiration et l'évapotranspiration réelle (*ET_a*). Cela a été possible grâce à la modélisation de la densité des arbres et à l'estimation des taux journaliers d'utilisation de l'eau par l'arbre. L'étude est partie de la réserve naturelle de Bontioli (RNB) au sud-ouest du Burkina Faso, puis a été étendue à l'échelle de plus vastes régions à l'intérieur du bassin versant de la Volta.

Les travaux de cette recherche ont été exécutés dans le cadre des programmes de recherche internationaux et interdisciplinaires conduits par les projets GLOWA Volta et BIOTA West Africa dont les objectifs généraux sont respectivement:

- *“analyser les déterminants physiques et socio-économiques du cycle hydrologique dans le bassin versant de la Volta dans le contexte du changement global”* (GLOWA, 2000);
- *“identifier les facteurs et les processus qui conduisent à la perte de la biodiversité; développer des méthodes pour la préservation de la biodiversité à différentes échelles intégrant les scénari portant sur les effets du changement global; créer et proposer des outils qui contribuent à l'utilisation durable de la biodiversité”* (BIOTA, 2007).

2 PROBLÉMATIQUE

Une attention particulière a été accordée aux régions arides au cours des dernières décennies parce que les terres arides, qui comprennent une gamme d'écosystèmes terrestres dans les zones arides, semi-arides et les zones sub-humides (Lambert *et al.*, 2005), souvent avec des paysages saisissants, couvrent plus d'un tiers des terres émergées de la planète, c'est-à-dire, environ 49 millions de km² (Lambert *et al.*, 2005; Lehouérou, 1992; Wickens, 1998). Dans ces zones, la pluviométrie est inférieure à l'évapotranspiration potentielle, aux eaux de ruissellement, etc. (Kassas, 1992). La rudesse du climat exacerbée par une mauvaise gestion de l'homme conduit souvent à la misère humaine (Dregne, 1992).

En général, tous les scénari et les projections sur la demande mondiale de l'eau prévoient que la demande en eau au cours du 21ème siècle sera encore plus grande que celle du 20ème siècle (Hoekstra, 1998). Dans les régions sèches, le problème de la rareté de l'eau sera aigu. La demande en eau sera confrontée à une fourniture en eau plus faible en raison des conditions du changement climatique et du réchauffement climatique: au cours des 100 dernières années, la température de la surface de la Terre a augmenté de façon spectaculaire entre 0,4 °C et 8,0 °C (NASA, 2002). La plupart des récents modèles portant sur le climat prévoient une augmentation globale de la température moyenne annuelle à la surface de la Terre, comprise entre 1,4 et 5,8 °C, d'ici à la fin du 21ème siècle (NASA, 2002; Yasunari, 2002a). Ainsi, le taux moyen de réchauffement serait probablement le plus élevé au cours des 10.000 dernières années (Watson, 1998). Cette détérioration profonde et progressive des conditions climatiques et environnementales conduira à des changements dans le cycle hydrologique mondial (Hoekstra, 1998; Yasunari, 2002a) qui menaceront la sécurité de l'eau de plus de 1,2 milliard de personnes vivant dans les zones arides et semi-arides (Wickens, 1998).

L'analyse du tableau de Dregne (1992) portant sur la distribution des zones arides dans le monde, basé sur l'indice d'aridité de Budyko (1956), révèle que 52 % des terres émergées de l'Afrique appartiennent à un climat aride (3,57 millions de km²) et les terres semi-arides (2,95 millions de km²), où vivent plus de 39 % des 688 millions d'habitants du continent (PNUE, 1997). Les proportions des terres arides sont plus élevées en Afrique occidentale où le Burkina Faso, un pays ayant un climat tropical sec, a 29 % de sa surface partagée entre les terres arides (10.000 km²) et les terres semi-arides (70.000 km²). Avec une longue saison sèche (de mi-novembre à mi-avril) souvent dominée par l'Harmattan, le Burkina Faso doit faire face à des températures élevées et le manque de précipitations. En

outre, seulement 0,15 % de la surface du pays est couvert par les eaux de surface. Cela augmente le problème de la rareté de l'eau et affecte le bien-être de la population en termes de demande en eau (Sawadogo, 1997).

Au Burkina Faso, l'insuffisance des précipitations ou de l'eau pour l'irrigation des cultures vivrières crée de perpétuelles pénuries alimentaires. En effet, la grande sécheresse qui avait sévi au début des années 1970 et à la mi-1980, avait détruit en grande partie la végétation naturelle (Sawadogo *et al.*, 2001). En outre, les sols pauvres en phosphate et en azote, peu profonds et secs sont faciles à éroder. Environ 20 % de la population souffrent d'insécurité alimentaire chronique et 40 % supplémentaires sont à risque d'insécurité alimentaire (FIDA, 2004). Les questions mentionnées ci-dessus suscitent une importante question à deux volets:

Comment améliorer le bien-être et les perspectives de la population au Burkina Faso en ce qui concerne l'approvisionnement en eau et la sécurité alimentaire, et en même temps contribuer de manière significative à établir l'utilisation durable des terres et atténuer les changements climatiques?

La lutte contre la désertification, la pénurie de l'eau et le changement climatique est un défi constant pour les agriculteurs, les organismes gouvernementaux, les ONG et les planificateurs de projets de développement. C'est pourquoi le pays a mobilisé les partenaires du milieu rural pour y réfléchir. Pour les aider dans leur processus de prise de décision, les professionnels de la gestion des ressources naturelles et les décideurs ont pris conscience de la nécessité de mettre en place des Système d'Aide à la Décision (*en anglais*, Decision Support Systems (DSS)). Ces systèmes nécessitent un grand nombre d'informations consolidées et des données sur l'utilisation des terres, les changements du couvert végétal et la dynamique des ressources naturelles (FIDA, 2004). Pour de nombreux pays en développement, les DSS sont de nouvelles techniques qui permettent d'aborder le développement durable (Kersten *et al.* 2000). En guise de contribution scientifique à l'élaboration de ces DSS, la recherche actuelle vise à produire une solide base de données scientifiques portant sur les composants du bilan hydrologique de surface en fonction des paramètres de la végétation.

3 JUSTIFICATION DE L'ÉTUDE

Dans sa formulation et son exécution, la présente étude se justifie par :

- l'urgence d'aborder les questions relatives aux problèmes de l'eau : la rareté de l'eau, les changements du cycle hydrologique, etc. ;
- l'importance de comprendre la dynamique de la végétation dans le changement global ;
- le besoin de données fiables pour la gestion durable des ressources naturelles ;
- l'importance de la Forêt Classée de Bontioli qui constitue un échantillon représentatif de la biodiversité du sud-ouest du Burkina Faso ;
- la force des techniques de la géomatique (le Système d'Information Géographique et la Télédétection) dans la modélisation et l'extrapolation spatiale des variables géographiques.

4 OBJECTIFS DE RECHERCHE

4.1 Objectif général

Cette étude vise principalement à estimer la contribution des peuplements arborescents au bilan hydrologique de surface au moyen de la transpiration et l'évapotranspiration réelle (*ETa*), de l'échelle du site jusqu'à une grande zone dans le bassin de la Volta.

Cet objectif est basé sur l'hypothèse que les arbres jouent un rôle important dans le fonctionnement et le contrôle de l'équilibre de l'eau de surface des régions semi-arides, particulièrement pendant les périodes sèches.

4.2 Objectifs spécifiques

(1) Caractériser la physionomie de la végétation de savane et créer des zones phytoécologiques sur la base de la diversité des espèces arborescentes, la densité des arbres et la distribution spatiale des arbres;

(2) Modéliser et estimer à grande échelle la densité des arbres par la méthode de régression multivariée et les techniques de la télédétection optique appliquées aux indices de végétation et aux dérivés du bilan énergétique de surface;

(3) Estimer la consommation journalière en eau par arbre par la méthode du bilan thermique du xylème et les paramètres biométriques des arbres, puis mise à l'échelle des résultats pour quantifier les flux de transpiration des peuplements d'arbres par la méthode la régression linéaire;

(4) Estimer la contribution des peuplements d'arbres dans l'équilibre des eaux de surface;

(5) Analyser les effets de la conversion de la couverture végétale sur le climat local et les relations arbre-eau à des fins de prévision.

5 STRUCTURE DE LA THÈSE

Dans sa monture initiale, cette thèse comporte huit chapitres, qui peuvent être regroupés en trois parties. La première partie présente les questions de la recherche (chapitre 1) et le site d'étude (chapitre 2). Le chapitre 3 décrit la méthode générale de recherche.

La deuxième partie de la thèse porte sur la dynamique de la distribution spatiale des arbres. Cette partie fournit les outputs de base requis pour résoudre le principal problème relatif à la compréhension des relations arbre-eau. Le chapitre 4 traite de la diversité des espèces d'arbres et leur distribution spatiale à des fins de classification, et le chapitre 5, un chapitre clé de synthèse, élabore un modèle de régression multivariée sur la base des indices de végétation et les dérivés du bilan énergétique de surface obtenus à partir de la télédétection afin de prédire la densité des arbres et le diamètre à hauteur de poitrine (DBH) sur un espace donné. En fin de compte, le chapitre 6 présente des données sur l'utilisation des terres et la conversion de la couverture végétale à des fins prédictives.

Enfin, dans la troisième partie, au chapitre 7, les principaux résultats de l'étude sont utilisés pour traiter la principale question de recherche, à savoir, la contribution des arbres dans l'équilibre des eaux de surface. Les principaux résultats sont résumés et discutés dans le chapitre 8, qui comprend la conclusion générale et les recommandations.

6 SITE D'ÉTUDE

La zone d'étude est la réserve de faune de Bontioli également appelée réserve naturelle de Bontioli ou forêt classée de Bontioli. Elle a été classée comme réserve naturelle (25.000 ha) par le gouvernement burkinabé selon l'arrêté ministériel n° 3147/SEF du 29 mars 1957 (MET, 1994).

La Réserve de faune se compose de la réserve totale et de la réserve partielle. Les activités de recherche portent sur la réserve totale parce que la réserve partielle de Bontioli présente une couverture végétale profondément dégradée par la forte pression anthropique.

La réserve totale est située dans la province de Bougouriba, au sud-ouest du Burkina Faso, entre les latitudes 10° 70' et 10° 95' N et les longitudes 3° 02' et 3° 20' W. Avec un périmètre de 83,39 km, elle couvre une superficie de 13,71 ha et se situe dans un rectangle de 17,41 km sur 16,58 km.

7 MÉTHODES DE RECHERCHE

De façon générale, les méthodes de recherche employées se résument à la collecte des données sur le terrain et aux différentes techniques d'estimation et de modélisation par traitements statistiques, par la télédétection et du SIG. Ces méthodes visent à:

- quantifier avec exactitude la consommation en eau par l'arbre entier par la technique de mesure thermique du flux de sève (Granier, 1987);
- déterminer la phytosociologie et la physionomie des paysages de savane afin de délimiter cartographiquement les ensembles phytoécologiques de la réserve naturelle.
- coupler les deux premiers ensembles de données avec les techniques de la télédétection et du SIG en vue d'estimer la contribution des arbres au bilan hydrologique de surface sur un grand espace à l'intérieur du bassin versant de la Volta.

Les études de terrain ont été menées à l'échelle de la réserve totale de Bontioli (avril-juin, septembre-octobre 2005 et avril-juin 2006) et les premiers résultats ont été rapportés l'échelle de la couverture de l'image satellite du sous-bassin.

7.1 Méthode 1 : Estimation de la densité absolue des arbres

La méthode d'échantillonnage systématique a été adoptée du fait de sa simplicité d'application sur le terrain (Krebs, 1989). Tenant compte de cette méthode, la surface de la réserve naturelle a été divisée en grille régulière de 1 km d'intervalles. (Figure 1). Des quadrats de 30 m x 30 m (900 m²) ont été délimités sur la base des grilles.

La densité absolue a été calculée en faisant le ratio entre la surface du quadrat et la fréquence des pieds d'arbre/DBH. Les résultats obtenus ont été compilés dans une base de données SIG pour les manipulations ultérieures.

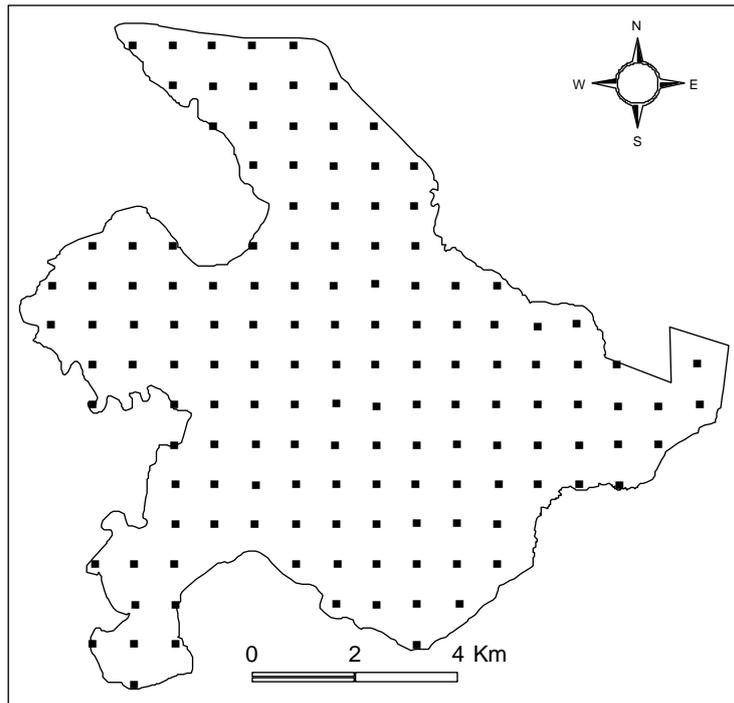


Figure 1: Echantillonnage systématique. Grilles régulières de 1 km d'intervalle

7.2 Méthode 2 : Prédiction de la densité relative des arbres

7.2.1 Variables d'analyse

Plusieurs variables dépendantes et indépendantes sont utilisées pour obtenir la densité relative des arbres. Le modèle ATCOR, développé par Geosystems (2006) a été utilisé pour calculer automatiquement les indices de végétation spectrales et les produits du bilan de l'énergie de surface à partir de la scène Aster. ATCOR est un algorithme de correction atmosphérique rapide pour l'imagerie de moyenne et haute résolution spatiale des capteurs satellitaires tels que Landsat TM, SPOT, ASTER, Ikonos ou Quickbird.

7.2.2 Processus de prédiction de la densité relative

Le scénario de la prédiction est exécuté une fois que les différentes variables sont déterminées. Il commence par la calibration multivariée basée sur deux matrices: la matrice X de variables indépendantes (LAI, SAVI, flux de chaleur latente, flux de chaleur sensible...) et la matrice Y de variables dépendantes (Densités des arbres, DBH). Le scénario consiste à utiliser les variables X pour prédire les variables Y.

Il s'agit d'établir d'abord, un modèle de régression multivariée entre les variables dépendantes et indépendantes sur une petite échelle, ensuite, utiliser le modèle de régression sur de nouvelles séries de X pour prédire de nouvelles données Y à grande échelle. Le logiciel *The Unscrambler* (CAMO Software Inc, NJ) est utilisé pour calculer les coefficients du modèle de régression. Cette méthode est très pratique en ce sens que le logiciel divise l'ensemble des échantillons de densités absolues en deux ; il utilise une part pour la calibration des données, puis la seconde part pour valider le résultat de la prédiction, c'est-à-dire les densités relatives des arbres.

L'algorithme obtenu à l'issue de cette modélisation est utilisé en télédétection pour calculer l'image de densité relative des arbres. Cela est possible grâce au logiciel *Erdas Imagine* et tout autre logiciel de télédétection qui comporte une interface de modéleur spatial. (Figure 2)

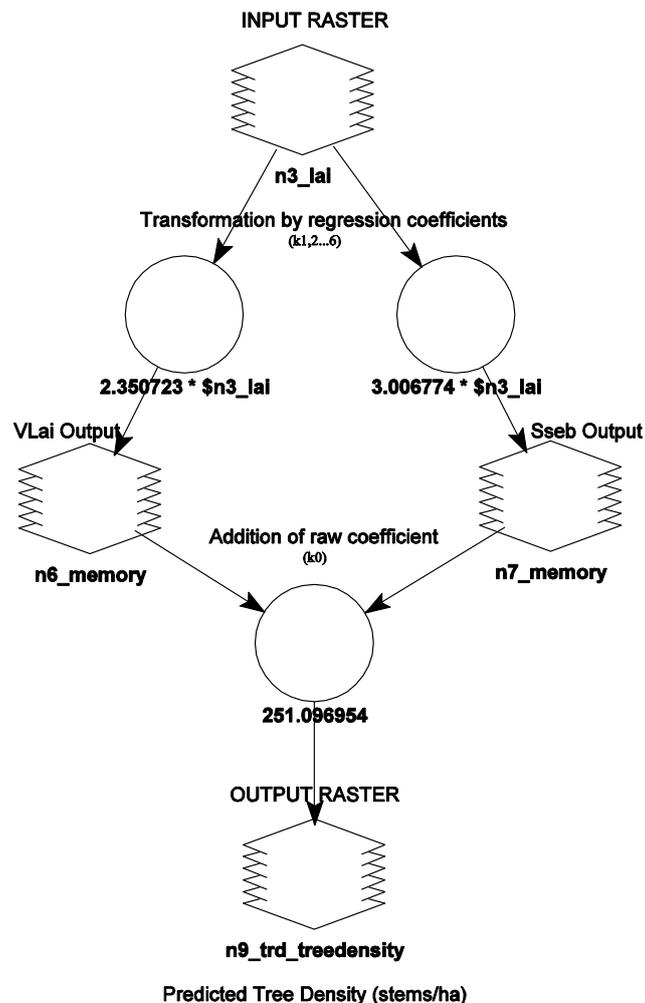


Figure 2: Organigramme du Modèle LAI-SEB conçu dans le modéleur spatial de *Erdas Imagine*

7.3 Méthode 3 : Mesures de flux de sève

L'équipement de mesure de flux de sève (UP GmbH) est composé de deux systèmes de mesure: un système fixe et un système mobile (Prosalog, Small Edition). Les deux systèmes ont le même principe de mesure, à la différence que le premier a au maximum 12 capteurs et fonctionne avec des panneaux solaires et le second a 3 à 5 capteurs et utilise une petite batterie de 12 Volts.

7.3.1 Choix des sites de mesure

Avant la sélection des sites et l'installation de l'équipement de flux de sève, des survols aériens (Figure 3), suivis des enquêtes de terrain ont été entrepris afin de déterminer la physionomie et la phytosociologie des unités de végétation, et d'obtenir un aperçu des espèces d'arbre dominantes en fonction des types de végétation et des unités de relief.

Le type d'avion utilisé était approprié pour effectuer des survols à basse altitude. Cela a permis de prendre des images de haute résolution avec l'appareil photo TETRACAM multispectral pour l'agriculture de précision. Cependant, même avec la vitesse de vol la plus lente, il a été constaté des lacunes dans la série d'images prises. Cela n'a pas permis de faire une mosaïque d'ensemble des images. Elles ont donc été analysées les unes après les autres. Le traitement des images multispectrales (bandes rouge, vert et bleu) a fourni une gamme d'indices de végétation, à savoir, SAVI, NDVI et IPVI.

Les informations obtenues à partir des images multispectrales ont été couplées à celles de l'image satellite Landsat 7 ETM+, scène 152/56, bandes 4-5-7, du 28 octobre 2002 (fourni par l'Université de Maryland) pour le choix définitif des sites de mesure de sève (Figure 3). Pour l'installation de système fixe de mesure de sève, priorité a été donnée à des sites situés à moins de 2 km des stations micrométéorologique et d'Eddy Covariance en vue du couplage des données climatiques avec l'analyse ultérieure des données de flux de sève.

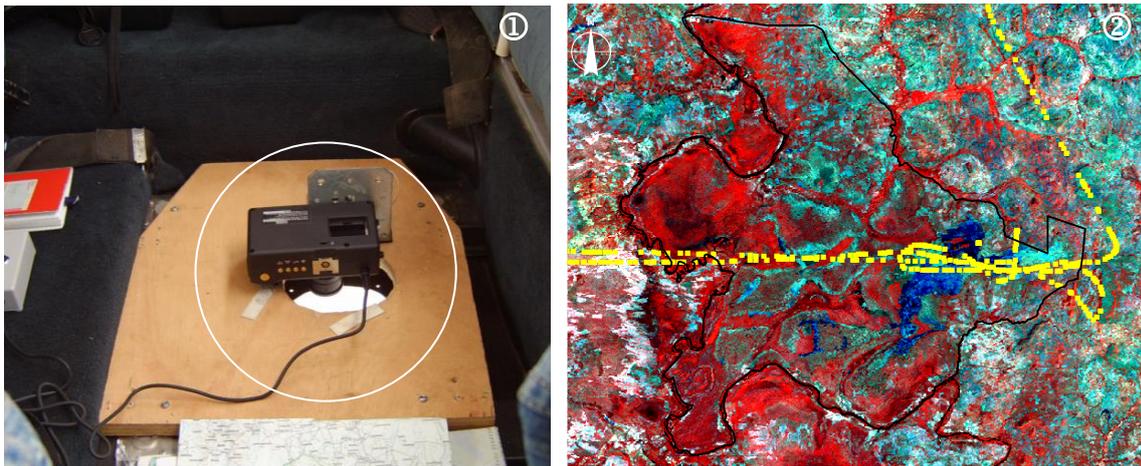


Figure 3: Survol aérien du site d'étude. Encart 1: Appareil photo TETRACAM, à bord de l'avion (entouré), prenant des images de haute résolution; encart 2: Image satellite indiquant l'itinéraire de vol au dessus du site d'étude (en lignes discontinues).

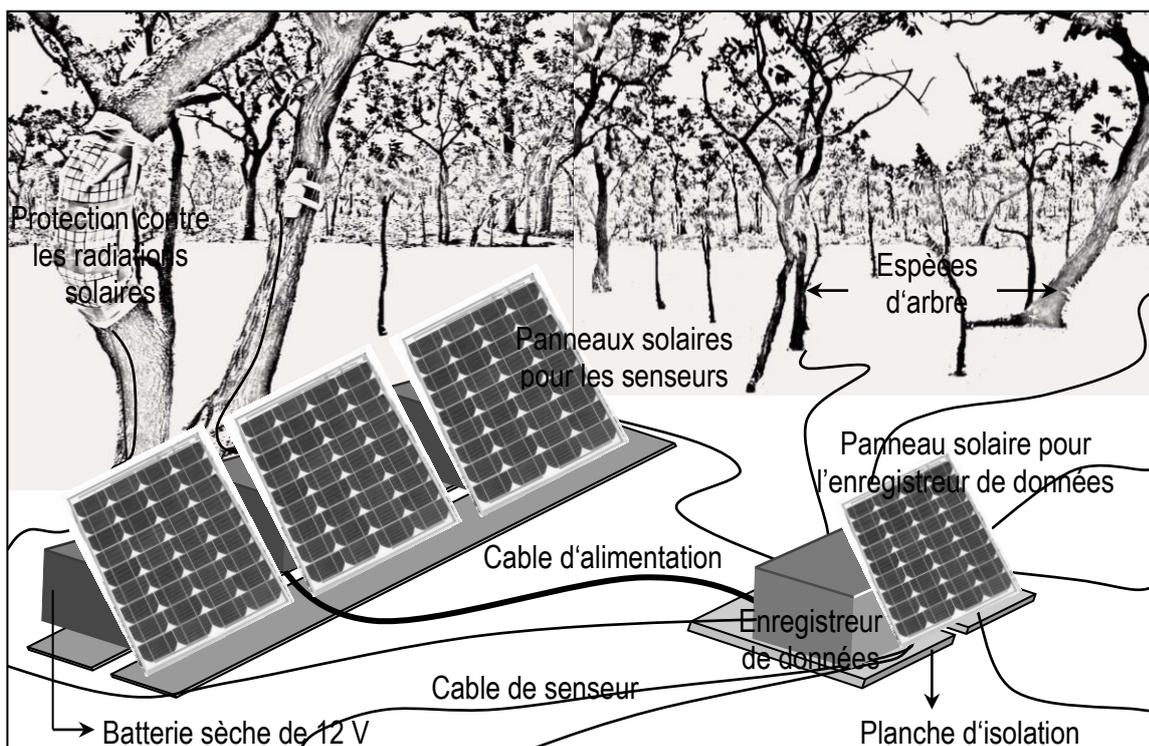


Figure 4: Dispositif du système fixe de mesure de flux de sève

7.3.2 Principe de mesure de flux de sève

Après l'installation des équipements de mesure de flux de sève (Figure 4), deux aiguilles d'un senseur sont insérés dans des trous de 2,1 mm creusés le tronc de l'arbre à hauteur de poitrine.

Les senseurs sont disposés l'un au-dessus de l'autre, sur le côté nord de l'arbre afin d'éviter les effets des radiations solaires.

L'aiguille supérieure (jaune) est chauffée par un courant constant de 84 mA fourni par les batteries des panneaux solaires. Il en résulte une différence de température entre les deux aiguilles qui dépend de la vitesse de la sève. Les grands flux de sève correspondent à de faibles températures alors que les faibles flux provoquent de grandes différences de température (UP, 2001). Les données extraites de l'enregistreur de données sont couplées aux paramètres du tronc de l'arbre pour calculer la consommation en eau de l'arbre.

7.3.3 Echantillonnage de l'aubier

Pour calculer le flux de sève de façon précise, l'échantillon de l'aubier a été prélevé à proximité du senseur, dans l'espace compris entre les deux aiguilles. La tarière de Pressler (Suunto) a été insérée dans l'arbre perpendiculairement au tronc de manière à couper transversalement les capillaires de l'aubier (Figure 5). Les premières mesures de l'aubier ont été faites sur les carottes fraîchement prélevées à l'aide de l'extracteur, puis les échantillons ont été conservés dans l'alcool (éthanol, 70 %). Les mesures sur le terrain ont été consolidées par les analyses microscopiques effectuées au laboratoire.

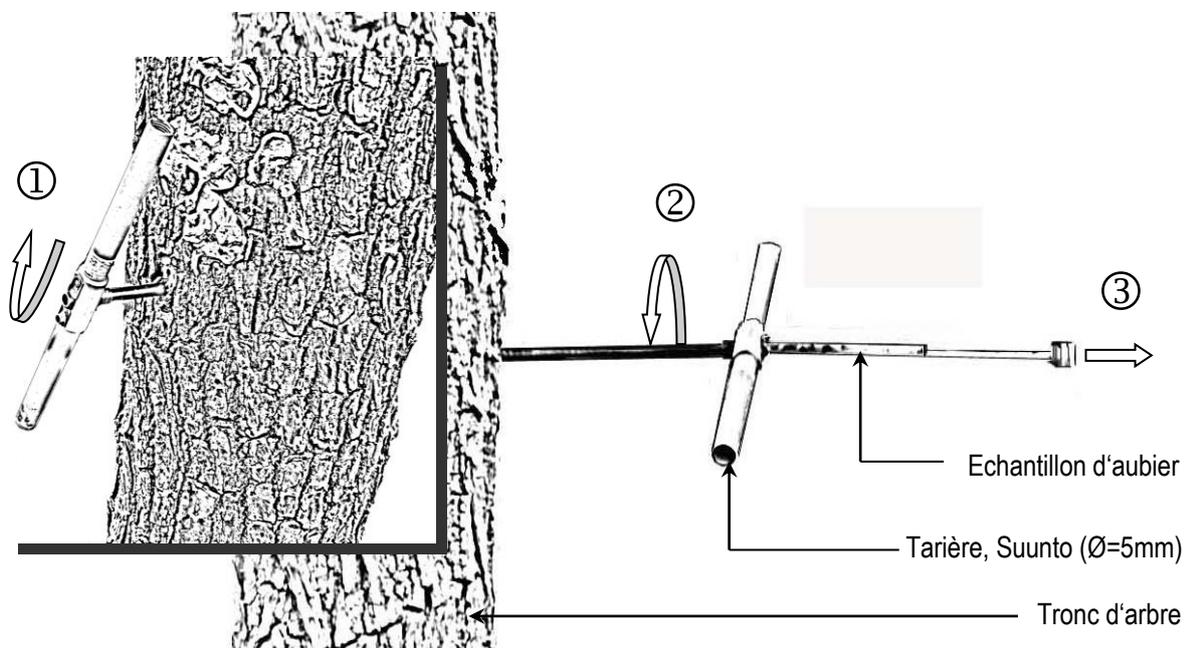


Figure 5: Les étapes de l'échantillonnage de l'aubier

7.3.4 Mesure de l'aubier et calcul du flux de sève

Les échantillons de l'aubier ont été séchés dans un four électrique à 61 °C pendant 2 à 3 jours. Ensuite, ils ont été analysés à l'aide d'un microscope (Figure 6). La longueur totale de chaque échantillon a été mesurée avant et après le séchage au four afin de déterminer le taux de rétrécissement de chaque échantillon. A la fin de la mesure au microscope, ce taux a été utilisé pour obtenir la superficie réelle de l'aubier.

Le principe de la détermination de la surface de l'aubier est basé sur la présence de capillaires le long de l'échantillon; la surface de l'aubier commence avec la présence des capillaires et se termine lorsque les capillaires sont absents.

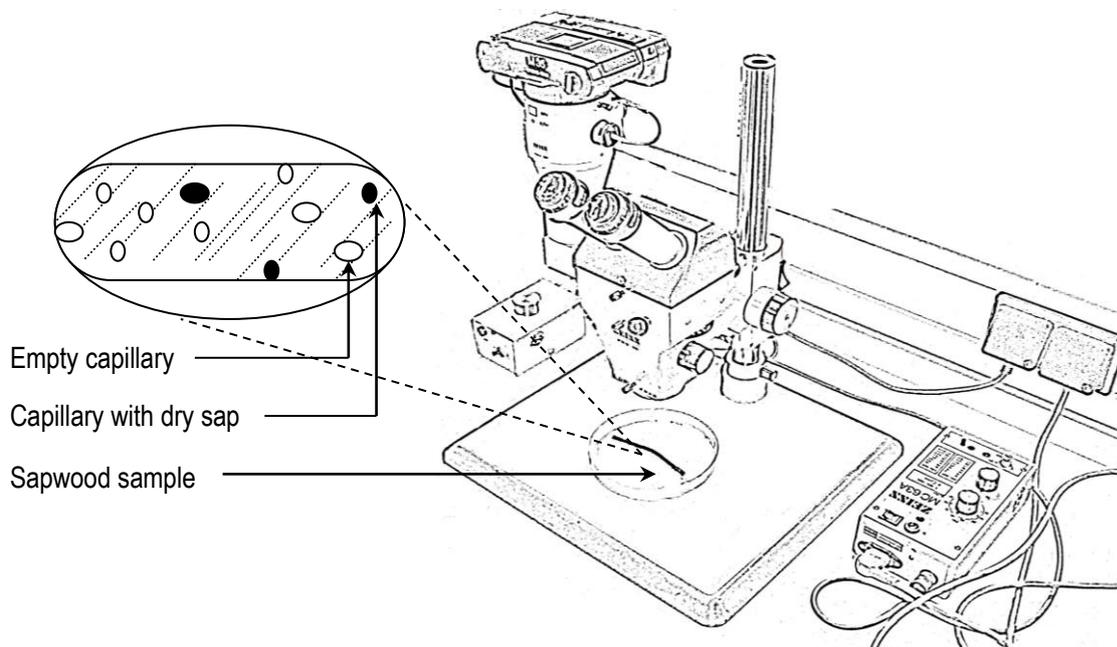


Figure 6: Principe de détermination de la surface de l'aubier. Utilisation du microscope ZEISS

En fait, la surface de l'aubier, c'est à dire, l'espace de circulation de la sève (cm^2), ne peut être déterminée directement à partir de l'observation visuelle directe. Le rayon de l'aubier peut être mesuré à l'aide du microscope et un outil de mesure. En supposant que le pourtour du tronc de l'arbre peut être assimilé à un cercle parfait, la surface de l'aubier (sa) est dérivée du rayon de l'aubier (sr) et du diamètre du tronc à hauteur de l'espace de mesure du flux de sève (ds), comme suit:

$$sa = \left[\left(\frac{ds}{2} \right)^2 \times \pi \right] - \left[\left(\frac{ds}{2} - sr \right)^2 \times \pi \right] \quad (1)$$

Une fois la surface de l'aubier connue, le calcul du flux de sève (sf) d'une espèce d'arbre donnée se fait selon les équations suivantes (Granier, 1987):

$$sf = sd \times sa \left(ml \cdot \min^{-1} \right) \quad (2)$$

$$sd = 0.714 \times \left(\frac{\Delta T_{night}}{\Delta T_{actual}} - 1 \right)^{1.231} \left(ml \cdot cm^{-2} \cdot \min^{-1} \right) \quad (3)$$

avec ΔT_{night} = Différence de température la nuit (Valeur minimal des données)

ΔT_{actual} = Différence de température mesurée

sa = Surface de l'aubier (cm^{-2})

sd = Densité de flux de sève

Le calcul des flux de sève a été fait pour toutes les espèces d'arbre des sites de mesure. Ainsi, la quantification de la transpiration de l'ensemble de la savane est faite en fonction de la densité des arbres selon un processus de mise à l'échelle basé sur les techniques de la télédétection.

7.4 Méthode 4 : Equation du bilan hydrologique de surface

7.4.1 Equation du bilan hydrologique de surface

L'équation du bilan hydrologique de surface est la suivante (Beven et O'Connell, 1983; UNESCO, 1974):

$$P = Q + ET_a + L + \Delta S \quad (4)$$

avec P = Pluviométrie moyenne annuelle, Q = Ecoulement de surface, ET_a = Evapotranspiration réelle, L = Ecoulement souterrain et ΔS = Variation de stockage.

L'évapotranspiration est la principale composante du bilan hydrologique de surface. Elle constitue les plus importantes pertes d'eau de la surface des terres arides (Beaumont, 1989).

7.4.2 Estimation de l'Evapotranspiration réelle

Du fait des difficultés de mesure directe de l'Evapotranspiration réelle (ET_a), il a été préférable de l'estimer en utilisant l'approche d'Eddy Corrélation dont les résultats sont scientifiquement satisfaisants (Zhang *et al.*, 2002).

Les données de flux de chaleur latente (LE) provenant de la station d'Eddy Corrélation, installée à moins de 200 m des sites de mesure de flux de sève, sont converties en ET_a selon l'équation suivante (Monteith et Unsworth, 1990):

$$ET_a = 3600 \times \frac{LE}{\lambda} \quad (mm \ h^{-1}) \quad (5)$$

$$\lambda = 2500300 - 2359 \times t \quad (6)$$

avec λ = Chaleur latente d'évaporation, t (°C) = Température moyenne horaire.

7.5 Méthode 5 : Estimation de la contribution des arbres au bilan hydrologique de surface

7.5.1 Extrapolation du flux de sève

Vu que seulement 24 % (17/71) des espèces d'arbres de la réserve naturelle de Bontioli ont fait l'objet des mesures de flux de sève, les taux de flux de sève des espèces d'arbres restantes (54/71) ont été estimés à partir de la corrélation entre le DBH et le flux de sève, selon l'équation de la régression linéaire suivante :

$$sf_e = a_1 + b_1 \times Dbh_m \quad (7)$$

avec a_1 = Constante, b_1 = Coefficient de régression (pente), sf_e = taux de flux de sève extrapolé, et Dbh_m = DBH mesuré sur le terrain.

7.5.2 Estimation de la transpiration du couvert végétal

Ensuite, l'estimation de la transpiration des peuplements d'arbres (T_p) sur un quadrat donné est obtenu en divisant la valeur totale des flux de sève des arbres se trouvant sur ce quadrat par la surface du quadrat comme l'indique l'équation ci-dessous :

$$T_p = \frac{\sum sf + \sum sf_e}{900 \text{ m}^2} \quad (8)$$

Une fois que le taux de transpiration est connu à l'échelle du quadrat, il est établi une corrélation entre la transpiration du quadrat et le DBH total du quadrat, selon l'équation suivante :

$$T_p = a_2 + b_2 \times Dbh_p \quad (9)$$

avec a_2 = Constante, b_2 = Coefficient de régression (pente), T_p = Taux de transpiration sur un quadrat donné, et Dbh_p = DBH total sur le même quadrat.

Enfin, la carte de la transpiration prédite est obtenue en appliquant l'équation 9 à la bande DBH dérivé de l'imagerie de la télédétection. La prédiction du DBH des peuplements arborescents se fait selon la méthode décrite dans la section ci-dessus (7.4).

8 PRINCIPAUX RÉSULTATS

8.1 Densité absolue des arbres

La densité moyenne des arbres sur les quadrats est de 331 (± 4) pieds ha⁻¹, l'écart-type = 250, minimum = 11, maximum = 1233 pieds ha⁻¹. L'analyse détaillée de la densité des arbres en fonction des facteurs environnementaux révèle que les plus grandes densités ont été enregistrées dans la savane arborée, sur les sols argileux des plaines alluviales (Tableau 1 et Figure 7). Cela peut s'expliquer par la proximité de la rivière Bougouriba dans cette partie du site d'étude, où les sols argileux restent humides pendant la saison sèche en raison de leurs propriétés de rétention d'eau. En outre, dans le sud-ouest du site (10° 49' 22" N; 03° 09' 40" W), la densité des arbres est particulièrement élevée en raison de l'incursion dans la réserve d'un important bras intermittent de la rivière Bougouriba. Ces résultats sont très proches de la description de Fontès et Guinko (1995), qui ont cartographié la couverture végétale et l'occupation du sol au Burkina Faso. Ils ont soutenu que la zone Sud-soudanienne (région de la réserve) est caractérisée par de fortes densités de végétation.

Dans l'ensemble, il n'existe pas de fortes disparités dans la densité des arbres entre les savanes arborées et arbustives (Figure 7). Cependant, une combinaison de conditions environnementales particulières, à savoir des sols humifères sur des reliefs peu accidentés associés aux rivières intermittentes, peuvent favoriser le développement de zones isolées de hautes densités d'arbres à travers les paysages.

Tableau 1: Distribution de la densité absolue des arbres (pieds/ha) en fonction des facteurs environnementaux. L'estimation de la densité moyenne des arbres est basée sur le nombre d'arbres par quadrat (900 m²)

Facteurs environnementaux	Nombre de pied	Quadrat total	Densité moyenne	Max.	Min.
Type de végétation					
Savanne herbeuse	749	24	347	1011	11
Savanne arbustive	608	22	307	1233	78
Savanne arborée	187	5	416	544	278
Forêt claire	46	2	256	433	78
Forêt galerie	19	1	211	211	211
Total / Moyenne	1609	54	307	687	131
Unité de relief					
Plaine alluviale	730	26	312	1233	56
Bas glacis	792	22	400	1011	11
Moyen glacis	20	2	111	156	67

Butte tabulaire	67	4	186	344	78
Total / Moyenne	1609	54	252	686	53

Type de sol					
Sol cuirassique	591	19	346	933	11
Sol argileux	678	26	290	1233	56
Sol remanié	301	8	418	1011	89
Sol humifère	39	1	433	433	433
Total / Moyenne	1609	54	372	903	147



Figure 7: Dérivation de la carte de la densité des arbres par l’application du modèle d’interpolation Inverse Distance Weight (IDW) aux points des densités absolues

8.2 Estimations de la densité des arbres par le houppier, le DBH et la hauteur des arbres

En général, la hauteur des arbres dominants (42,2 %) varie de 3,50 à 6,55 m. Seuls 2,75 % des arbres ont des hauteurs comprises entre 16 m et 22 m, et 5,86 % sont entre 11 m et 16 m (Figure 8). Ces résultats confirment ceux de Fontès et Guinko (1995). La faible présence de grands arbres est principalement due à des perturbations anthropiques, tels que les feux de brousse annuels et la coupe de bois pour les besoins de l’agriculture. Les activités humaines sont omniprésentes à l’intérieur de la réserve naturelle de Bontioli. Exceptionnellement, les

grands arbres observés dans les zones de plantation à faible densité d'arbres sont les espèces commerciales telles que *Vitellaria paradoxa* ou arbre de karité (Karité) et *Parkia biglobosa* (Néré), qui sont protégées par les paysans pour leurs valeurs économiques. Bagayoko (2006) fait la même observation dans l'est du Burkina Faso sur des terres d'intenses exploitations agricoles où *Vitellaria paradoxa* est dominante (17 pieds·ha⁻¹). D'autres grandes espèces d'arbre comme *Danielia oliveri*, *Burkea africana*, et *Kaya senegalensis* poussent dans des zones hors de portée des feux de brousse et des besoins humains.

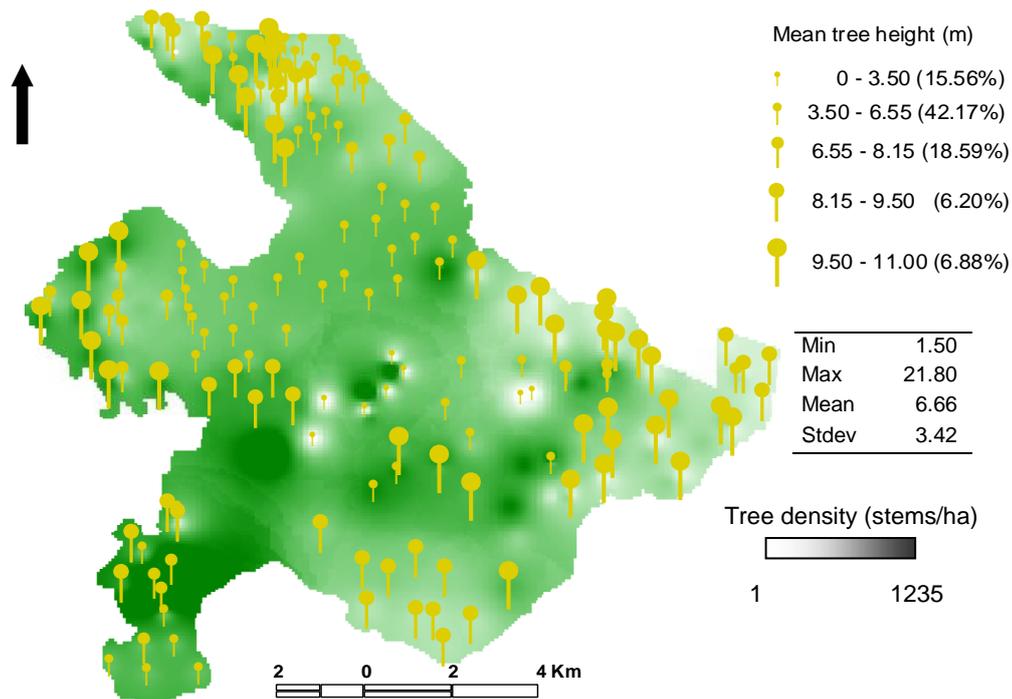


Figure 8: Distribution spatiale de la hauteur moyenne des arbres en fonction de la densité des arbres

L'analyse des paramètres biométriques des arbres montre que la hauteur des arbres et la hauteur du houppier sont fortement corrélés ($r = 0,81$), comme c'est le cas pour la hauteur des arbres et le DBH ($r = 0,71$): les grands arbres ont de grandes hauteurs de houppier et de grands DBH. En outre, il y a de très bonnes corrélations entre la densité des arbres et le DBH total ($r = 0,91$), et entre la surface du houppier et le DBH total ($r = 0,78$). Mais la corrélation entre la densité des arbres et la surface du houppier ($r = 0,56$) est faible (Figure 9). De plus faibles corrélations ont été trouvées entre la hauteur des arbres et la surface du houppier ($r = 0,19$), et entre la hauteur du houppier et la surface du houppier ($r = 0,15$).

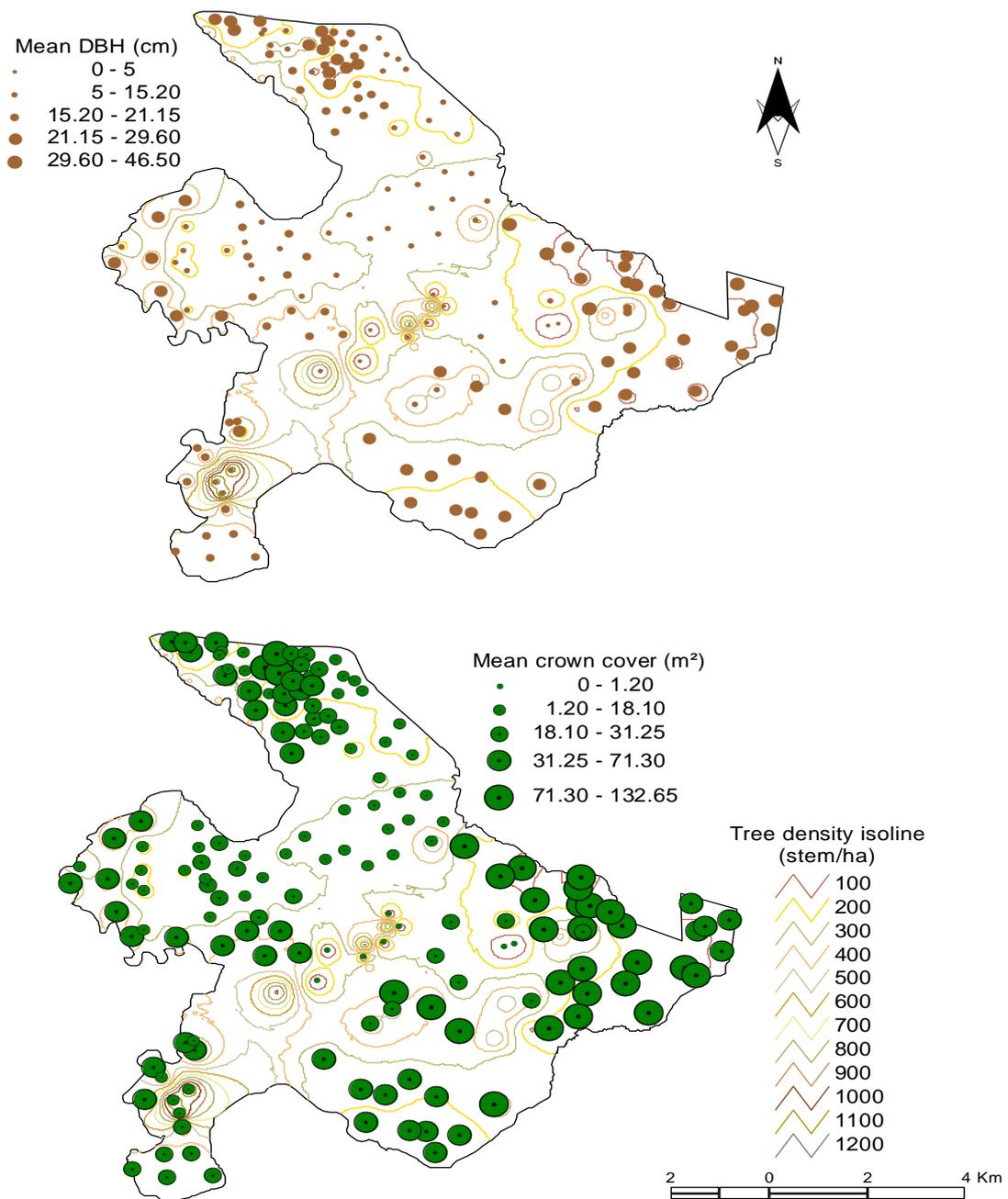


Figure 9: Distributions spatiales de la surface moyenne du houppier et du DBH en fonction de la densité des arbres.

8.3 Prédiction de la densité relative des arbres par modélisation

8.3.1 Modèle de prédiction des densités relatives des arbres

L'équation du modèle de prédiction (LAI-SEB) est la suivante :

$$T_{rd} = k_0 + V_{Lai} + S_{Seb} \quad (10)$$

où

$$V_{Lai} = k_1 * LAI + k_2 * SAVI + k_3 * FPAR \quad (11)$$

$$V_{Lai} = 0.322 * LAI - 0.565 * SAVI - 2.453 * FPAR \quad (12)$$

$$S_{Seb} = k_4 * H + k_5 * E + k_6 * G \quad (13)$$

$$S_{Seb} = 2.447 * H + 2.713 * LE - 4.996 * G \quad (14)$$

et $k_0 = 288.205$ (Coefficient pondéré)

avec $T_{rd} =$ Densité relative des arbres ($pieds ha^{-1}$)

H (Hs) = Flux de chaleur sensible ($W m^{-2}$)

E (LE) = Flux de chaleur latente ($W m^{-2}$)

G = Flux de chaleur dans le sol ($W m^{-2}$)

SAVI = Soil Adjusted Vegetation Index

LAI = Leaf Area Index

FPAR = Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation

$k_{(0,1,...,n)}$ = Coefficients de regression

L'application de ce modèle à l'imagerie satellitale Aster, de résolution 30 x 30 m ; permet d'obtenir la carte ci-dessous (Figure 10) :

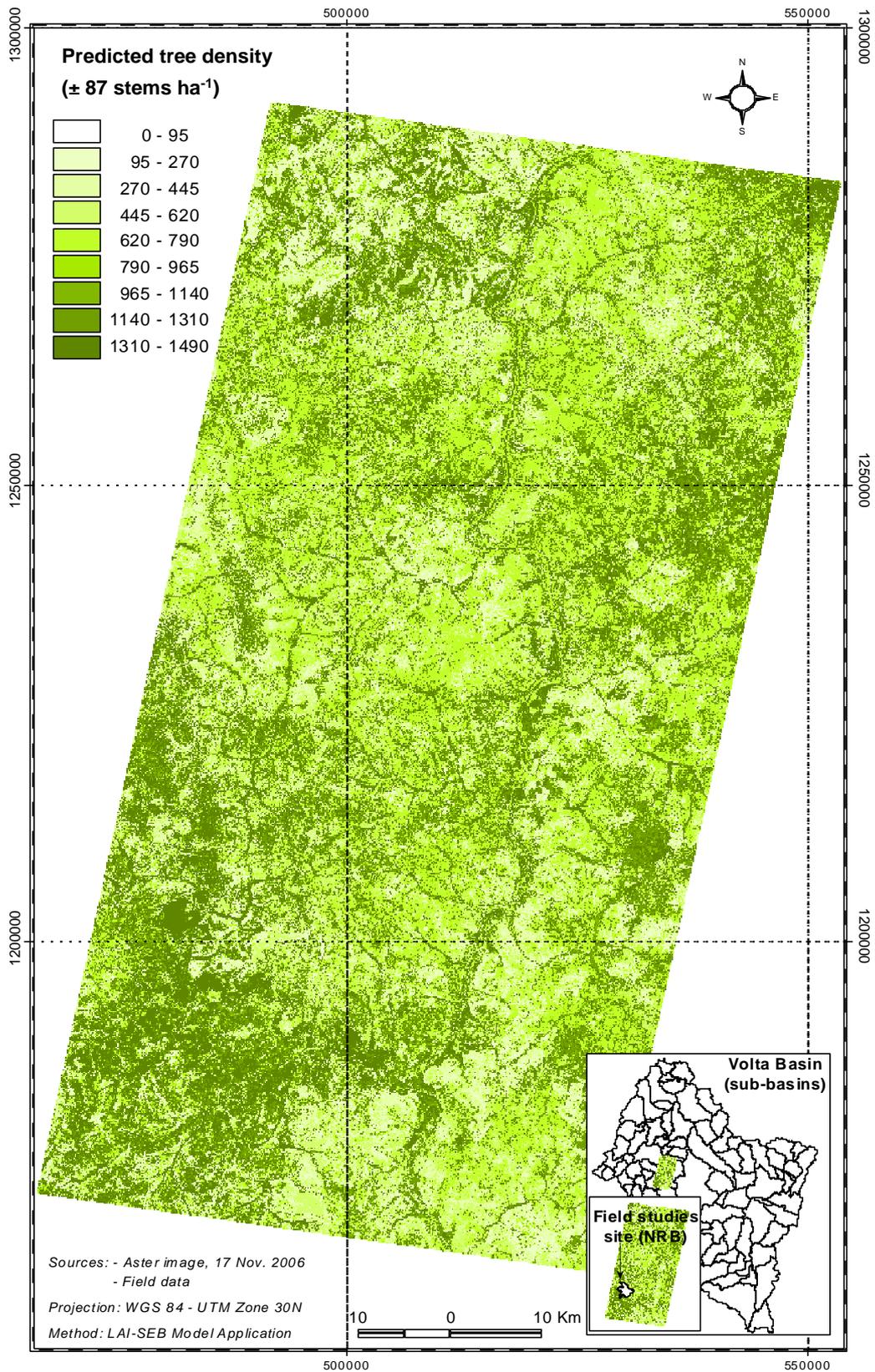


Figure 10: Carte de prédiction de la densité des arbres. Min. - Max. = 0 - 1486 pieds·ha⁻¹, Moy. = 325 pieds·ha⁻¹; Stdeva. = 259.5

8.3.2 Prédiction du DBH

La prédiction du DBH est fonction des données de densité relative des arbres (Figure 10) en raison de la forte corrélation entre les deux variables ($r = 0,91$). Les résultats de l'analyse de régression (Figure 11) montrent une bonne précision dans la prédiction des DBH. La marge d'erreur de prédiction, qui est de $\pm 68,9$ cm / 900 m² (soit ± 3 pieds/quadrat), peut être considérée comme négligeable, même si elle s'ajoute à la marge d'erreur de la densité relative des arbres (± 8 pieds / pixel).

8.3.3 Prédiction de la surface du houppier

La corrélation entre la densité des arbres et la surface du houppier ($r = 0,56$) est plus faible que la corrélation entre le DBH total et la surface du houppier ($r = 0,78$) (Figure 12). Par conséquent, la surface du houppier est prédite en fonction des résultats du DBH total (Figure 13). Comme sa carte de référence (DBH Total), la carte de la surface du houppier a une bonne précision avec une erreur de prévision de 7 % (c'est-à-dire ± 3 pieds/quadrat) ajoutée aux erreurs de la densité relative des arbres et du DBH.

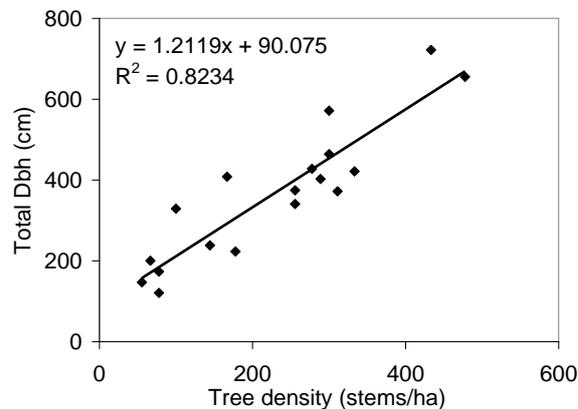


Figure 11: Prediction du DBH Total. Variables de l'analyse de regression = X (Densité des arbres) et Y (DBH Total); erreur de prédiction $\pm 68,90$ cm (soit, $\pm 3,28$ pieds/quadrat).

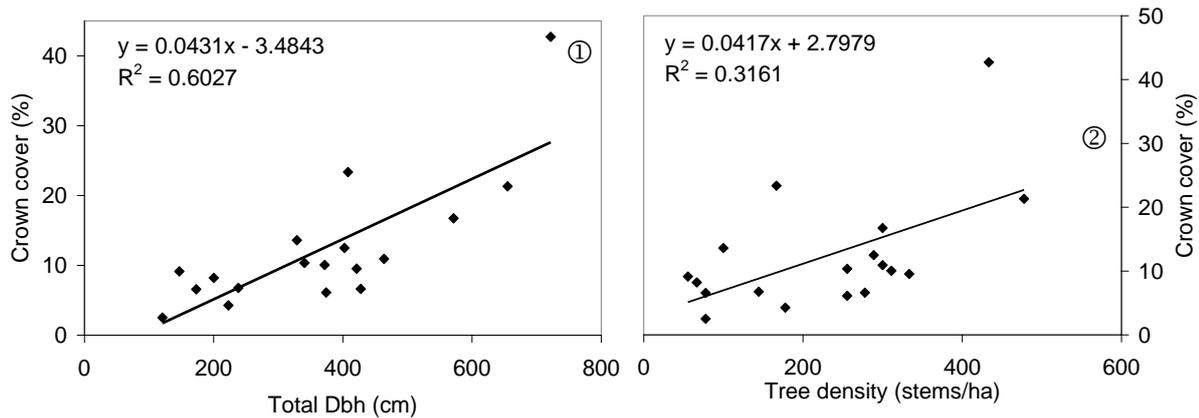


Figure 12: Prédiction de la surface du houppier. Variables de l'analyse de régression = Densité des arbres, DBH Total et surface du houppier. Encart 1: X = Densité des arbres et Y = surface du houppier; encart 2: X = DBH total et Y = surface du houppier.

8.4 Estimation quantitative de la consommation en eau des arbres

Les estimations des taux de consommation en eau des espèces d'arbres dominantes sur la base d'une minute indiquent que la consommation moyenne journalière par arbre varie de 10,1 kg/jour pour *Crossopteryx febrifuga* à 492,1 kg/jour pour *Pterocarpus erinaceus* (Tableau 2). La comparaison de la consommation en eau de l'arbre sur la base de la consommation moyenne normalisée de l'arbre par centimètre de DBH, indique les 10 principales espèces consommatrices d'eau suivantes (en kg/jour/cm): *Detarium microcarpum* (4,3), *Pterocarpus erinaceus* (4,1), *Parkia biglobosa* (3,1), *Lannea microcarpa* (2,4), *Daniellia oliveri* (2,2), *Burkea africana* (2,2), *Lanea acida* (1,9), *Terminalia laxiflora* (1,8), *Terminalia macroptera* (1,8), et *Combretum fragrans* (1,7).

L'analyse de la consommation en eau par rapport au DBH révèle que les gros arbres dont les DBH varient entre 20,3 et 119 cm (75,9 %) ont de forts taux de consommation en eau (22,5 à 492 kg/jour). Le coefficient de corrélation indique qu'il existe une très forte corrélation entre les taux de consommation en eau des arbres et les DBH ($r = 0,95$), tandis que les corrélations entre la consommation en eau et la surface du houppier ($r = 0,74$) et la hauteur des arbres ($r = 0,70$) sont sensiblement plus faibles. Ces résultats confirment les analyses de Granier *et al.*, (2003) qui indiquent que « le flux de sève est plus élevé dans les grands arbres que dans les petits arbres ». Ils affirment que les taux maximum de flux de sève varient entre 10 kg/jour pour les arbres de 12 cm de DBH et 400 kg/jour pour les arbres de 60 cm de DBH, tandis qu'au niveau des jeunes peuplements, les taux journaliers de flux de sève varient dans l'intervalle 2 - 25 kg/jour.

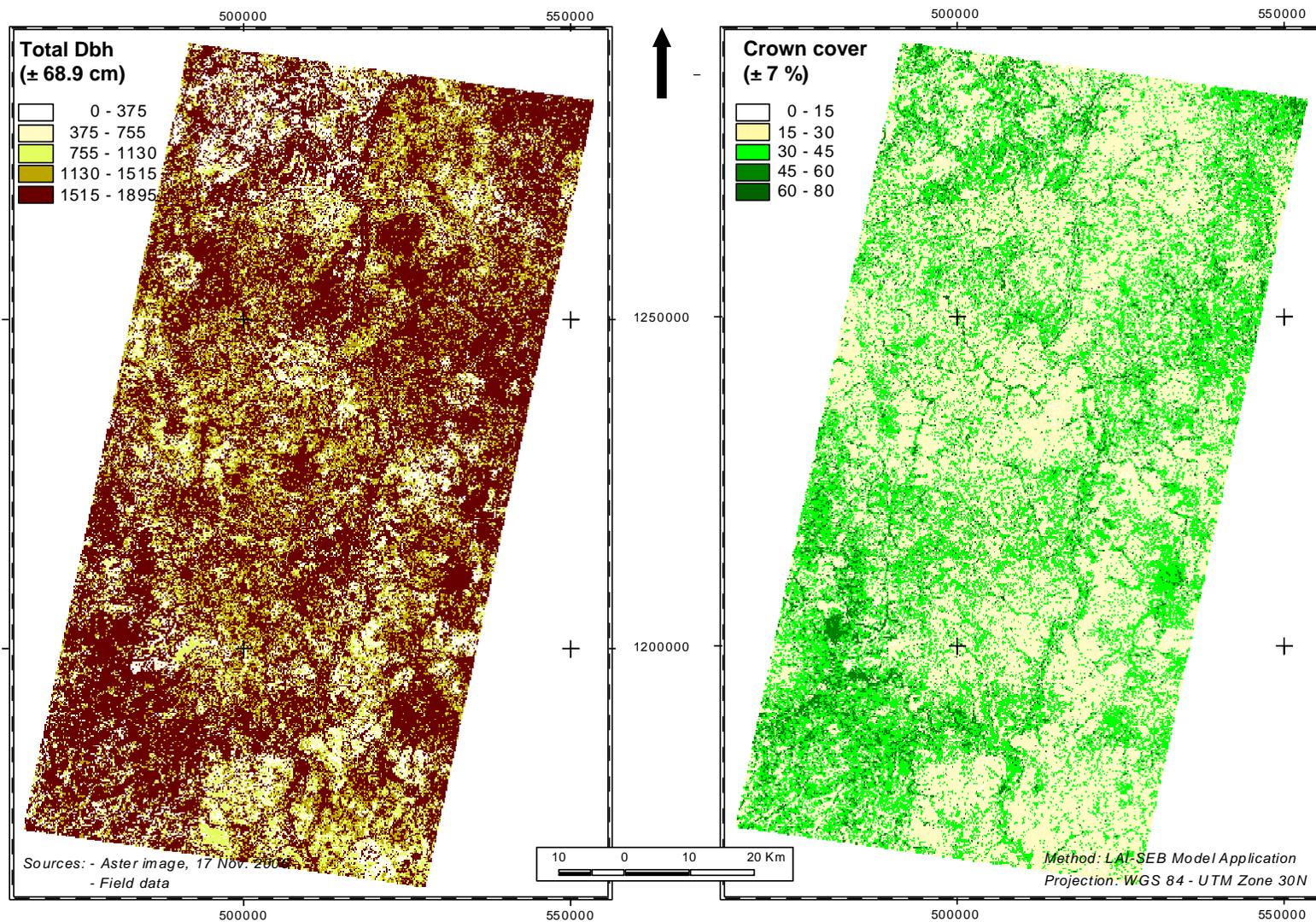


Figure 13: Résultats comparés de la surface du houppier et du DBH total. Surface du houppier: Min. - Max. = 0 - 77; Moy. = 16,9; Stdeva. = 13,5. DBH total: Min. - Max. = 0 - 1891,16; Moy. = 460,3; Stdeva. = 344,5

Tableau 2: Taux moyens journaliers de consommation en eau des arbres. Consommation moyenne en eau = 86,94 kg/jour/arbre. Erreur moyenne d'estimation = $\pm 9,81$ %. Ces estimations sont faites pour les périodes d'avril-juin 2005 et 2006.

Nom de l'espèce	Hauteur (m)	Surface du houppier (m ²)	DBH (cm)	Surface d'aubier (cm ²)	Consommation en eau (kg/jour)			
					Min.	Max.	Moy.	Stdeva
Site 1								
<i>Detarium microcarpum</i>	8.5	96.4	66.0	1395.7	65.0	417.5	285.4	55.7
<i>Vitellaria paradoxa</i>	4.5	39.8	37.0	156.2	3.2	19.6	13.4	2.9
<i>Terminalia laxiflora</i>	8.0	87.9	35.0	668.4	20.7	162.9	62.7	31.2
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	13.0	241.6	55.0	769.8	58.1	280.5	139.9	62.4
<i>Terminalia laxiflora</i>	9.0	106.0	45.0	373.1	9.4	63.0	40.9	7.7
Site 2								
<i>Burkea africana</i>	13.8	197.7	53.8	399.5	65.5	154.7	116.5	22.3
<i>Anogeissus leiocarpus</i>	18.8	215.8	67.9	947.7	77.3	281.3	206.3	42.1
<i>Daniellia oliveri</i>	12.9	111.6	33.5	1320.6	18.9	96.6	73.7	19.1
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	19.0	246.4	119.1	1318.2	103.9	783.5	492.3	172.2
<i>Lannea microcarpa</i>	6.0	17.9	43.0	173.3	27.0	113.8	85.4	22.5
Site 3								
<i>Pseudocedrela kotschyi</i>	12.0	80.9	22.4	371.9	3.3	77.7	26.3	19.6
<i>Combretum fragrans</i>	7.5	8.9	11.1	93.4	5.0	71.7	14.7	19.2
<i>Terminalia macroptera</i>	11.0	124.2	29.3	577.4	13.5	106.8	52.0	31.8
Site 4								
<i>Entada africana</i>	9.0	52.1	23.3	176.6	0.6	49.1	29.4	12.8
<i>Combretum glutinosum</i>	4.3	18.6	12.7	124.8	8.6	31.2	19.8	5.5
<i>Acacia dudgeoni</i>	4.8	23.0	12.1	92.0	1.0	26.1	12.2	5.6
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	7.0	23.9	9.6	71.1	3.6	85.3	22.1	20.6
<i>Parkia biglobosa</i>	7.8	32.7	22.3	286.7	17.1	145.8	68.6	29.8
<i>Anogeissus leiocarpus</i>	7.3	36.5	12.0	112.2	8.4	85.9	29.4	15.6
<i>Lannea microcarpa</i>	6.6	18.8	14.8	171.4	5.2	115.9	35.4	22.7
<i>Combretum collinum</i>	6.0	23.1	22.6	70.8	3.9	34.3	19.9	7.8
<i>Lanea acida</i>	6.3	39.5	20.5	328.5	0.8	109.7	38.2	22.7
Site 5								
<i>Pseudocedrela kotschyi</i>	7.5	19.6	21.7	186.8	3.9	22.6	18.1	7.1
<i>Terminalia macroptera</i>	8.4	28.6	25.5	347.6	10.6	31.4	28.2	8.4
<i>Combretum fragrans</i>	8.3	29.3	20.3	303.2	7.5	32.1	22.5	8.8
Site 6								
<i>Terminalia macroptera</i>	6.8	54.1	21.5	316.2	29.3	28.1	28.4	17.0
<i>Crossopteryx febrifuga</i>	6.8	16.6	14.1	147.9	2.0	11.2	10.1	4.9
<i>Combretum fragrans</i>	10.8	52.3	24.4	467.4	24.9	42.8	42.5	12.7

8.5 Variation saisonnière de l'évapotranspiration réelle

La contribution des arbres au bilan hydrologique des eaux de surface, à travers l'évapotranspiration (Et_a) (équation 4), est fonction des conditions météorologiques. Le processus de la photosynthèse joue un rôle important dans la régulation de l'absorption d'eau par les arbres. Dans la matinée, la contribution des arbres se fait à partir de l'évaporation de l'humidité se trouvant à la de surface des feuilles. Lorsque la photosynthèse commence du fait des rayonnements solaires, la contribution maximale se produit à la mi-journée par la transpiration.

Plus l'eau est disponible, plus les arbres contribuent au bilan hydrologique des eaux de surface selon la loi de la conservation de la masse. Par conséquent, de la saison sèche à la saison des pluies, la contribution des arbres au bilan hydrologique des eaux de surface augmente, atteignant un pic pendant la saison des pluies, c'est-à-dire de la mi-juin à la mi-septembre (Figure 14).

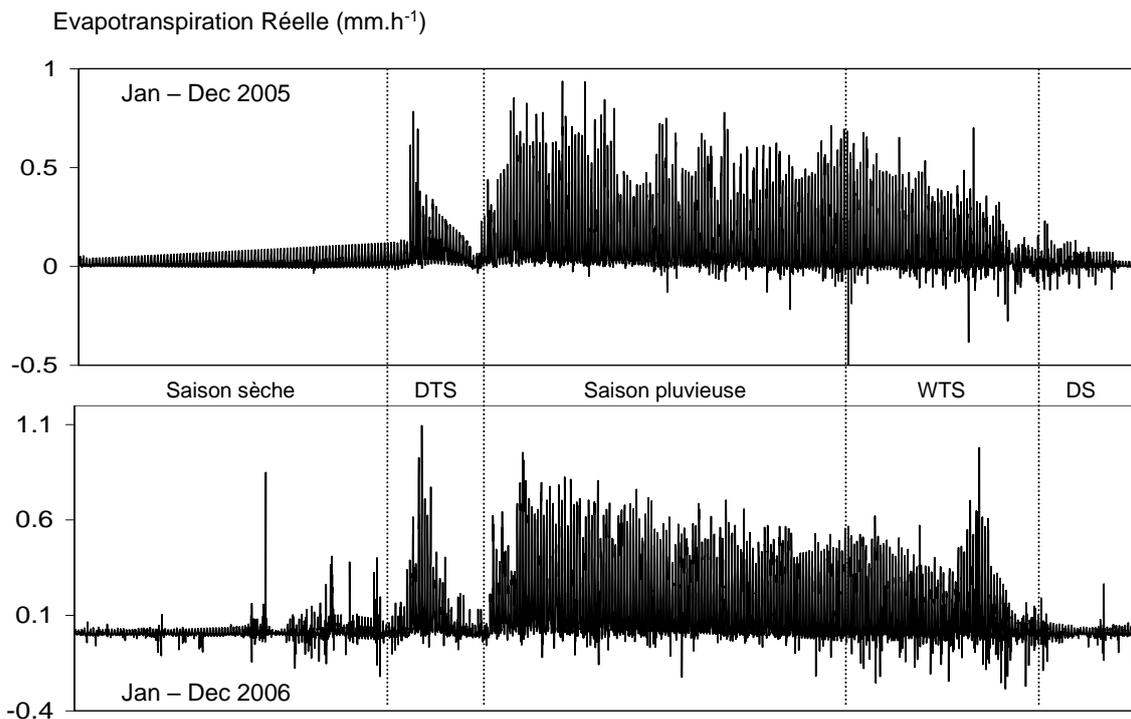


Figure 14: Variation saisonnière de l' Et_a horaire durant deux années. Les données de flux de chaleur latente et de la température de l'air (utilisées dans le calcul de Et_a) ont été simultanément enregistrées par les stations microclimatique et d'Eddy Corrélation. Valeurs récapitulatives pour 2005: Moyenne $Et_a = 0,09$, Max. = $0,94$, Min. = 0 mm/jour. Pour 2006: Moyenne $Et_a = 0,09$, Max. = $1,09$, Min. = 0 . Les valeurs négatives sur les graphiques indiquent une absence de Et_a . Abréviations: DTS = Saison sèche de transition, WTS = Saison humide de transition, et DS = Saison sèche. (Sources des données: J. Szarsynski – BIOTA West et C. Brümmer – Virtual Institute)

8.6 Estimation de la transpiration

8.6.1 Transpiration des peuplements d'arbres

La corrélation entre le flux de sève et le DBH est beaucoup plus importante que celle du flux de sève et de la surface du houppier (Figure 15). Sur cette base, l'équation 7 est appliquée pour estimer les taux de flux de sève des espèces d'arbres non couvertes par les mesures *in-situ* de flux de sève. Le coefficient de régression et la constante de l'équation 7 sont définies comme suit:

$$sf_e = -57.849 + 4.179 \times Dbh_m \quad (15)$$

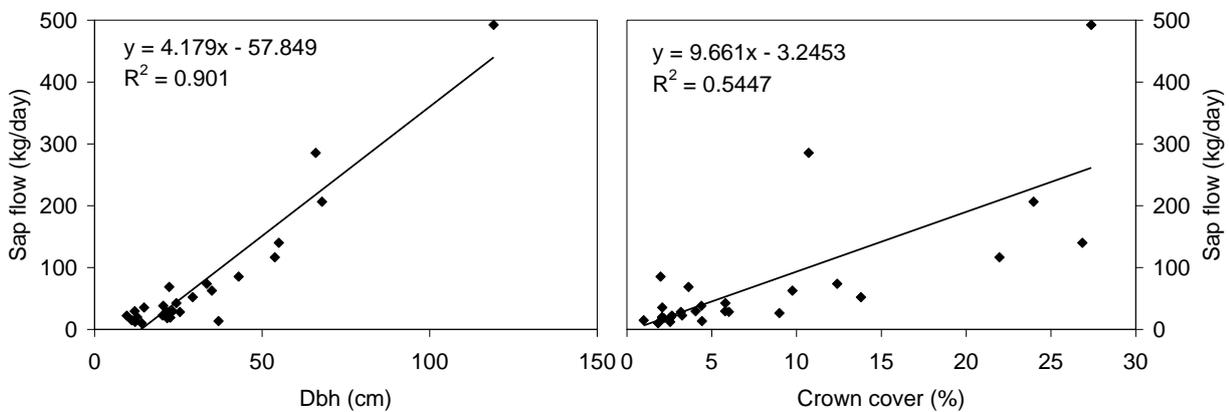


Figure 15: Relation entre flux de sève, DBH et surface du houppier au niveau de l'arbre.

Une régression linéaire est établie entre le DBH des grands arbres et leurs taux de flux de sève. Cependant, il est impossible d'estimer les taux de flux de sève de jeunes arbres dont les DBH sont inférieurs à 14 cm (53,3 %). Pour y remédier, l'équation suivante est utilisée :

$$sf_e = \frac{Dbh_e \times 0.66}{14} \quad (16)$$

avec sf_e = taux de flux de sève d'un jeune arbre donné et Dbh_e = son diamètre à hauteur de poitrine.

Le total des sf_e permet de calculer la valeur totale de T_p , avec T_p moyen = 0,7 mm/jour, max. = 3 mm/jour, min. = 0,1 mm/jour et Stdeva = 0,4 mm/jour.

8.6.2 Transpiration des arbres et *ETa*

Le calcul de *ETa* dans la même période d'estimation de T_p moyen révèle que la moyenne journalière de $T_p = 3,6$ mm/jour, max. = 6,8 mm/jour, min. = 0,3 mm/jour et Stdeva = 1,7 mm/jour. La moyenne journalière de *ETa* au cours d'une année était de 0,1 mm/jour (en 2005 et 2006).

Sur la base de T_p moyen et de *ETa* moyen, sur la période allant du 27 avril au 31 juin 2005, la contribution des peuplements d'arbres à l'évapotranspiration réelle dans la réserve naturelle de Bontioli était de 20,6 %. La contribution des jeunes arbres (DBH < 5 cm), des arbustes, des plants, plantules et du couvert d'herbes ainsi celle de l'évaporation des sols et de la surface des eaux (marécage, eau de barrage, rivières, etc.) était estimée à 79,4 %.

8.6.3 Cartographie de la transpiration du couvert végétal

En principe, la carte de la prédiction de la transpiration du couvert végétation (Figure 17) devrait être obtenue sur la base des paramètres de la surface du houppier dans la mesure où le coefficient de corrélation entre la surface du houppier et le taux de transpiration ($r = 0,87$) est plus élevé que le coefficient de corrélation entre le DBH et le taux de transpiration ($r = 0,82$) (Figure 16).

Cependant, cette carte a été obtenue à partir des valeurs du DBH car la bande de la surface du houppier (image satellite Aster) a été obtenue à partir de la bande de DBH, qui à son tour est dérivée de la bande de densité des arbres. Aussi, l'utilisation de la bande de la surface du houppier pour prédire la transpiration des arbres à grande échelle accroît-elle significativement la marge d'erreur finale par addition des marges d'erreur des autres bandes. Par conséquent, la meilleure carte de prédiction de la transpiration des arbres est obtenue sur la base des DBH, selon l'équation suivante:

$$T_p = 26 * 10^{-4} + 18 * 10^{-4} \times Dbh_p \quad (17)$$

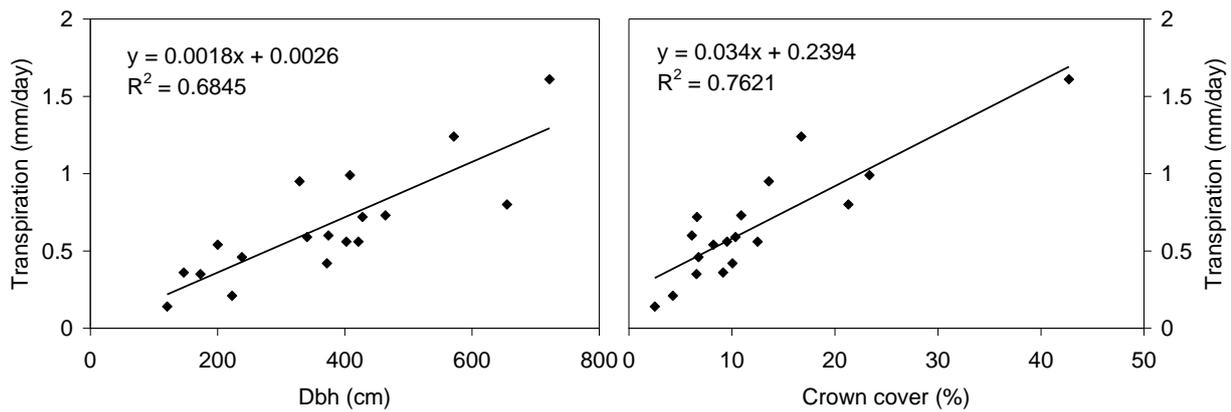


Figure 16: Relations entre la transpiration, le DBH et la surface du houppier au niveau du quadrat.

8.7 Contribution de la végétation au bilan hydrologique de surface

8.7.1 Transpiration, *ETa* et précipitation

En 2005, 94,1 % des précipitations sont retournés dans l'atmosphère sous forme de *ETa*. En outre, au cours de la période allant du 27 avril au 31 Juin 2005, les précipitations ont satisfait à la demande en eau des arbres les empêchant de prendre l'eau de la nappe phréatique. La contribution moyenne des arbres à l'*ETa* était de 20,6 %. Sur cette base, la contribution moyenne des arbres au bilan hydrologique de surface est estimée à 19,4 % de précipitations dans la zone de végétation dense (Tableau 3). En fait, ce taux varie selon le type de végétation (Huggett et Cheesmen, 2002), la saison, les conditions météorologiques et environnementales.

Au cours de l'année humide (2006), la contribution des peuplements d'arbres au bilan hydrologique de surface était moins importante que celle de l'année sèche (2005). Les taux étaient respectivement de 16,5 % et 9,4 % pour les zones de végétation dense et clairsemée. Ces proportions étaient donc plus élevées en saison sèche qu'en saison des pluies. De même, la contribution de *Eta* au bilan hydrologique de surface était plus élevé au cours de l'année sèche (94,1 %) comparée à l'année humide (80,2 %) (Tableau 3). Cette dernière conclusion est en accord avec les résultats de Martin (2005) qui a travaillé sur le bilan hydrologique de la rivière Atankwidi à Navrongo, au sud du Burkina Faso.

Tableau 3: Contribution de la végétation au bilan hydrologique de surface. La zone de **végétation dense** correspond au site d'étude (Surface de houppier moyenne = 31 %); la zone de **végétation clairsemée** correspond à la zone d'extrapolation de l'image satellite (Surface de houppier moyenne = 17 %). L'astérisque indique les valeurs de déficit de précipitation

Année	Saison	Précipitation (mm)	ET_a (mm)	$ET_a /$ précipitation (%)	Contribution des arbres (en % des précipitations)	
					Végétation dense	Végétation clairsemée
	Total	744.8	700.9	94.1	19.4	11.0
2005	Saison sèche	19.0	71.2	374.7*	77.2*	43.8*
	Saison des pluies	455.4	356.3	78.3	16.1	9.2
	Total	922.2	739.5	80.2	16.5	9.4
2006	Saison sèche	8.8	48.1	546.0*	112.5*	63.9*
	Saison des pluies	584.6	351.3	60.1	12.4	7.0

8.7.2 Déficit pluviométrique, ET_a , transpiration et eaux souterraines

Pendant la saison sèche, la rareté des pluies conduit à de fréquents déficits de précipitations. Pour combler ces déficits tout en maintenant l' ET_a (tableau 7.2), les arbres aux profondes racines utilisent les ressources des eaux souterraines pour maintenir la transpiration selon un processus naturel. Au cours de la saison sèche, l' ET_a est égale à la transpiration car la valeur de l'évaporation de l'eau contenue dans le sol est presque égale à zéro. C'est un processus naturel qui régule les écosystèmes des zones arides.

Malheureusement, les processus naturels sont perturbés par les activités anthropiques qui menacent la survie des arbres dans les régions arides et semi-arides. Comment concilier l'existence des arbres à la survie de l'homme? Dans ce contexte, il n'est pas réaliste de préconiser le reboisement à l'échelle locale. Des actions régionales concertées devraient être entreprises pour restaurer les cycles naturels en rétablissant les peuplements d'arbres.

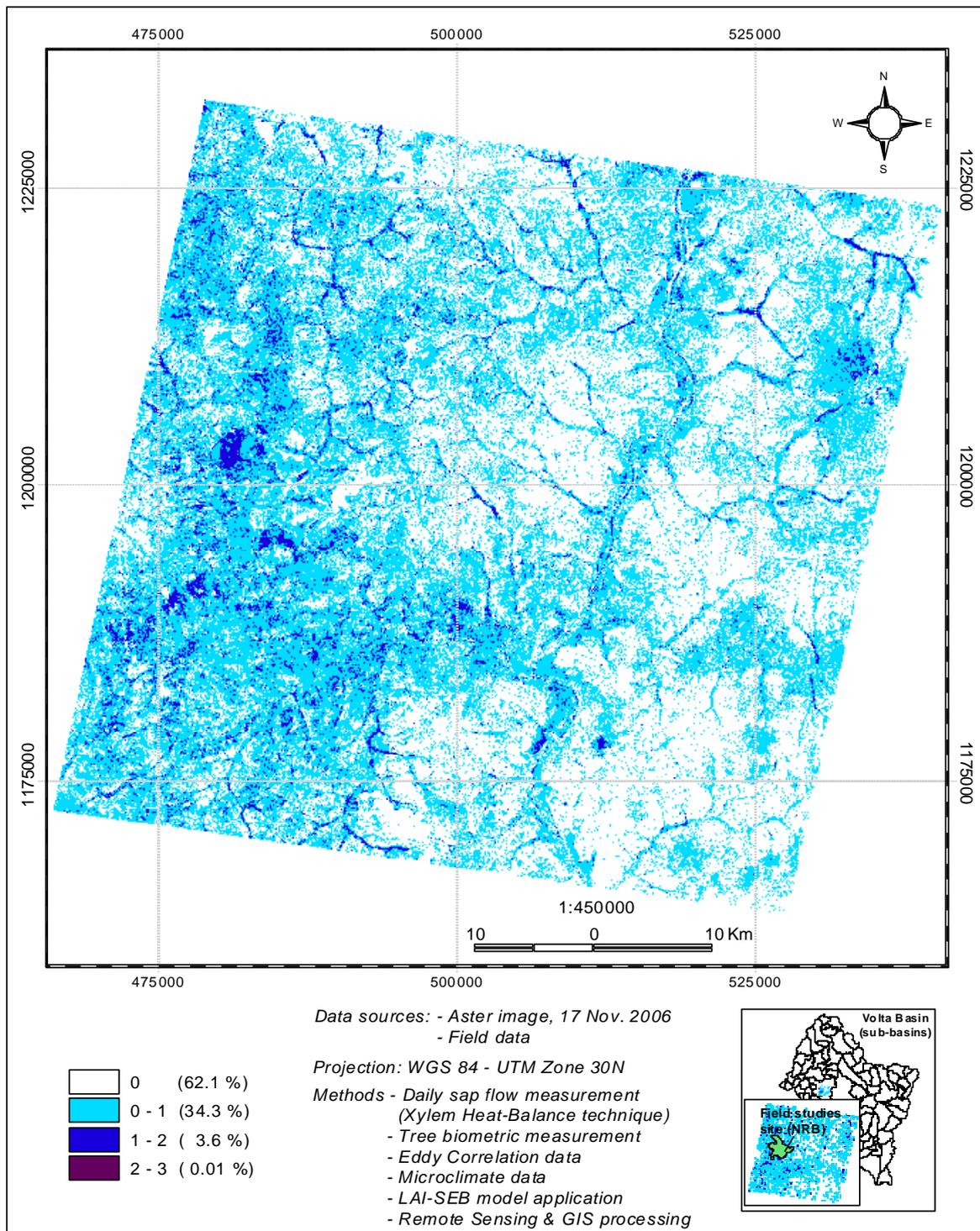


Figure 17 : Carte de la transpiration moyenne journalière. Moyenne = 0,4 mm/jour, Min. – Max. = 0 – 3 0,4 mm/jour, et Stdeva = 0.6 0,4 mm/jour (\pm 0.6 0,4 mm/jour). Données de terrain: avril 2005 – Déc. 2006.

9 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Les arbres jouent un rôle important dans le fonctionnement du bilan hydrologique de surface et la régulation du climat. Dans les régions semi-arides, cela est particulièrement avéré, en particulier pendant la saison sèche lorsque les arbres sont les principaux acteurs du maintien de l'évapotranspiration. Les arbres jouent leur rôle de maintien du cycle hydrologique à travers la capture des précipitations, puis par la transpiration. Par conséquent, préconiser l'abattage des arbres pour maintenir les niveaux des eaux souterraines dans les zones arides aura pour conséquence une diminution de la pluviométrie ; ce qui peut éventuellement conduire à une réduction des niveaux des eaux souterraines.

Les perturbations dans les cycles naturels, à savoir la déforestation, la pénurie d'eau, la sécheresse et la sécurité alimentaire sont dues à l'homme et non aux arbres. Le réchauffement climatique et le changement climatique sont les effets directs de la croissance économique. Par conséquent, les combats efficaces contre la sécheresse, la pénurie d'eau, la pauvreté, les menaces de la subsistance et la sécurité alimentaire devraient commencer par prévenir les effets destructeurs des activités anthropiques sur la couverture végétale. Dans ce contexte, il est réaliste de préconiser des efforts régionaux et concertés pour restaurer la végétation naturelle par des campagnes de reboisement. Voilà comment les décideurs peuvent concilier l'existence des arbres avec la survie de l'homme.

Pour renforcer les conclusions scientifiques sur les relations arbres-eaux souterraines, d'autres études devraient être entreprises sur les relations entre les systèmes racinaires des arbres et les eaux souterraines afin de déterminer les espèces d'arbres spécifiques comme indicateurs de la présence et du niveau d'eau souterraine. A partir de ces résultats, les peuplements d'arbres peuvent être classés et cartographiés en fonction de la profondeur de leurs systèmes racinaires et en fonction de leur degré d'utilisation des ressources d'eaux souterraines.

L'approche de la modélisation pour la gestion à grande échelle des ressources naturelles est une stratégie efficace. En dépit de quelques limites, le simple modèle LAI-SEB semble être un outil utile et adapté à l'estimation de la densité des arbres et la transpiration des couverts végétaux dans les régions semi-arides de l'Afrique de l'Ouest. Les recommandations ci-dessous sont formulées pour améliorer le modèle :

- Nécessité d'utilisation de l'imagerie à haute résolution
- Utilisation des données de terrain LAI pour ajuster les intrants
- Expérimentation avec d'autres capteurs

Le modèle LAI-SEB peut être appliqué sur de vastes régions en Afrique de l'Ouest pour cartographier la densité des arbres et l'occupation du sol, puis pour dériver un transect de transpiration des arbres allant des régions arides aux régions humides (Ex.: transect Burkina - Ghana).

10 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bagayoko F (2006) Impact of land-use intensity on evaporation and surface runoff : Processes and parameters for eastern Burkina Faso, West Africa. PhD Thesis, University of Bonn, Bonn
- BIOTA (2007) The project: Biota West Africa. http://www.biota-africa.org/1024o/biota_west_english/structure_west.htm. Cited 2 February 2008
- Budyko MI (1956) The heat balance of the Earth's surface. (English translation Stepanova NA, 1958, Office of Technical Services, Washington). In: Yair A and Berkowicz SM (eds) Arid and semi-arid environments: Geomorphological and pedological aspects, Vol 14. Catena Verlag, Cremlingen-Destedt
- Dregne HE (1992) Degradation and restoration of arid lands. Lubbock: International Center for Arid and Semi arid Land Studies. Texas Tech University
- Fontès J and Guinko S (1995) Cartographie de la végétation et de l'occupation du sol du Burkina Faso. Note explicative. Projet Campus 88 313 101, Ministère de la Coopération Française
- Geosystems (2006) Atcor for Imagine 9.1. Haze reduction, atmospheric and topographic correction. User manual Atcor 2 and Atcor 3. Germering, Germany
- GLOWA (2000) Sustainable water use under changing land use, rainfall reliability and water demands in the Volta Basin. GLOWA Project Proposal 1. ZEF, Bonn
- Granier A (1987) Mesure du flux de sève brute dans le tronc du Douglas par une nouvelle méthode thermique. *Annales des Sciences Forestières*. 44(1):1-14
- Granier A, Aubinet M, Epron D et al (2003) Deciduous Forests (Beech): Carbon and water fluxes, balances, ecological and ecophysiological determinants. In: Valentini R (ed) Flux of carbon, water and energy of European forests. Ecological Studies 163. Springer, Berlin, p274
- Hoekstra AY (1998) Perspective on water. An integrated model-based exploration of the future. International Books, Utrecht
- Huggett R and Cheesmen J (2002) Topography and the environment. Prentice Hall - Pearson Education, London, New York, England
- Kassas M (1992) Desertification. In: Dregne HE Degradation and restoration of arid lands. International Center for Arid and Semi arid Land Studies, Texas Tech University, pp11-25
- Kersten GE, Mikolajuk Z and Yeh AG (eds) (2000) Decision support systems for sustainable development: a resource book of methods and applications. IDRC, Ottawa
- Krebs CJ (1989) Ecological methodology. Harper Collins Publishers, University of British Columbia

- Lambert JDH, Ryden P.A and Esikuri EE (2005) Capitalizing on the bio-economic value of multi-purpose medicinal plants for the rehabilitation of drylands in Sub-Saharan Africa. Global Environment Facility Program. The World Bank, Washington
- Lehouérou HN (1992) An overview of vegetation and land degradation in world arid lands. In: Dregne HE Degradation and restoration of arid lands. International Center for Arid and Semi arid Land Studies. Texas Tech University, pp99-126
- Monteith JL and Unsworth MH (1990) Principles of environmental physics. 2nd edn. Edward Arnold, London
- NASA (2002) Global warming. NASA Facts, The Earth Science Enterprise Series, June 2002 - NF 222, Maryland
- Sawadogo H, Hien F, Sohero A and Kambou F (2001) Pits for trees: How farmers in semi-arid Burkina Faso increase and diversify plant biomass. In: Reij C and Waters-Bayer A, (eds), Farmer innovation in Africa: A Source of inspiration for agricultural development. Earthscan, London
- Sawadogo K (1997) La pauvreté au Burkina Faso: une analyse critique des politiques et des stratégies d'intervention locales. Document de travail ECDPM No 51. Maastricht: ECDPM
- Wickens GE (1998) Ecophysiology of economic plants in arid and semi-arid lands. Springer-Verlag, New York
- Yasunari T (2002a) How will the global hydrological cycle change with "global warming"? Frontier Newsletter n° 19 – Jul. 2002. Joint Promotion Office, Frontier Research System for Global Change
- Zhang L, Walker GR and Fleming M (2002) Surface water balance for recharge estimation. Part 9 of The basics for recharge and discharge. CSIRO Publishing, Victoria, Australia