

ILWAC



**GESTION INTEGREE DE LA TERRE ET DE L'EAU
POUR L'ADAPTATION A LA VARIABILITE ET AU CHANGEMENT
CLIMATIQUE AU MALI**

**Guide Méthodologique
ESTIMATION DU POTENTIEL DE SEQUESTRATION DU
CARBONE AU MALI**



Novembre 2013

GUIDE METHODOLOGIQUE

ESTIMATION DU POTENTIEL DE SEQUESTRATION DU CARBONE AU MALI

Contenu

Contexte.....	3
I. Ecosystèmes et changement climatique.....	4
1. Réservoirs de carbone.....	4
2. Rôle des forêts.....	5
3. Cycle de carbone et sa séquestration par les écosystèmes.....	6
II. REDD/REDD+	7
III. Estimation des stocks de carbone au Mali.....	9
1. Intérêt du mali pour la séquestration du carbone.....	9
2. Techniques existantes.....	9
3. Méthodologie adoptée	12
a. Mesures sur terrain	12
b. Calcul du stock de carbone à l'échelle nationale.....	17
Références	20

Liste des illustrations

Encadré (1) : La biomasse.....	5
Encadré (2) : UN-REDD Programme.....	8
Encadré (3) : Mesure des diamètres des arbres.....	14
Encadré (4) : Calcul de la biomasse vivante sèche (AGB).....	15
Encadré (5) : Calcul des émissions de CO2 pour une superficie déboisée.....	16
Encadré (6) : Les indices de végétation	18
Figure 1: Les émissions mondiales de GES par secteur (source : WRI, IPCC).....	6
Figure 2: Cycle global du Carbone (source: B. SAUGIER).....	7
Figure 3: Découpage du Mali en zone bioclimatique.....	12
Figure 4: Stations de mesure superposées avec le NDVI moyen.....	17
Figure 5: Courbe de tendance carbone = f (NDVI).....	19
Figure 6: Carbone séquestré sur tout le Mali	19

Contexte

Il est devenu évident que l'augmentation des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère et le changement climatique qui en résulte auront des effets majeurs au 21ème siècle. Même si les scénarios exacts sont encore incertains, on prévoit des effets négatifs sérieux et il est essentiel que plusieurs actions soient entreprises afin de réduire les émissions de GES et d'augmenter leur séquestration.

On se rend compte que la conservation et l'aménagement responsable des forêts et le développement de nouvelles forêts font part des stratégies les plus rentables de la modération du changement du climat par voie de séquestration de carbone et en même temps engendrant d'autres bénéfices comme l'atténuation de la pauvreté et la conservation de la biodiversité. Particulièrement dans les pays en développement, il existe des vastes opportunités pour réaliser des réductions d'émission de carbone et en même temps contribuer au développement durable.

Ce potentiel était rencontré pour la première fois par les projets de reboisement développés comme part du « Clean Development Mechanism (CDM) » du Protocole de Kyoto. Après, des marchés volontaires de carbone servaient à innover des projets et méthodologies de carbone forestier et à développer des nouveaux marchés. Depuis quelques années un mécanisme visant à Réduire des Emissions provenant de la Déforestation et de la Dégradation des forêts (REDD+) est en négociation pour une nouvelle Convention Climatologique de l'ONU, mais entre temps REDD+ démarre déjà par voie de l'ONU, la Banque Mondiale et des programmes d'ONG, qui, eux aussi, comprennent des marchés volontaires de carbone.

Le développement des outils permettant le lancement d'un processus REDD+ dans un pays sahélien (du circum-sahara), du Mali en l'occurrence, exige des adaptations méthodologiques et techniques pour tenir compte des couverts et des sols de ce pays.

Forte de l'appui financier de la Banque Mondial, l'OSS a lancé depuis 2011 le projet national ILWAC qui vise la mise en place d'un système global, cohérent et intégré de gestion des informations et des données permettant le renforcement du partage des connaissances et des capacités en vue d'une prise de décision éclairée sur les questions liées à la gestion durable des terres et des risques liés au changement climatique.

Le projet ILWAC est structuré autour de trois composantes étroitement liées et interdépendantes.

- **La première composante** porte sur le développement d'un système d'information, y compris la collecte et la cartographie des données. Cette composante a été réalisée lors de la première période au terme du mois de mai 2013.
- **La deuxième composante** est axée sur l'analyse des données et l'évaluation de la vulnérabilité ainsi que la quantification du potentiel de séquestration du carbone et l'identification des bonnes pratiques de GDTE. Il s'agit de réaliser des analyses spatiales à l'échelle national à travers des croisements de couches d'informations afin d'identifier les zones les plus vulnérables et choisir trois zones pilotes dans lesquelles une analyse de vulnérabilité sera mise en œuvre. Les bonnes pratiques de GDTE ont été identifiées, spatialisées et ajoutées au SIGDT. Le potentiel de séquestration de carbone sera quantifié avec le but de participer au mécanisme REDD+.
- **La troisième composante** est dirigée sur le renforcement des capacités, la formation et la sensibilisation. Une stratégie de communication a été élaborée pour compiler et diffuser les

produits élaborés dans les composantes A et B aux différentes parties prenantes et pour informer le grand public.

Ce guide méthodologique présente l'approche adoptée pour quantifier la teneur en carbone superficielle et enfouie et le potentiel de séquestration au Mali dans le but de fournir des données de référence et de suivi pour les projets pilotes REDD+.

Pour le Mali, il est fondamental et stratégique de tenir compte de toutes les composantes intervenant dans la séquestration du carbone. En effet, telles que l'exigent les caractéristiques climatiques et écologiques du pays, l'estimation du potentiel de stockage tiendra compte aussi bien des forêts, des brousses, des territoires cultivés, etc. C'est ainsi que la cartographie de la couverture végétale et de l'utilisation du sol, élaborée par le projet, constitue un outil de travail essentiel pour les activités de la composante B.

La rigueur du choix des modèles et des formules à utiliser ne doit pas cependant empêcher d'offrir un minimum de souplesse permettant l'adaptation des outils à mettre en place pour tenir ultérieurement compte des lignes directrices en cours de définition dans le cadre du mécanisme de négociation internationale.

I. Ecosystèmes et changement climatique

1. Réservoirs de carbone

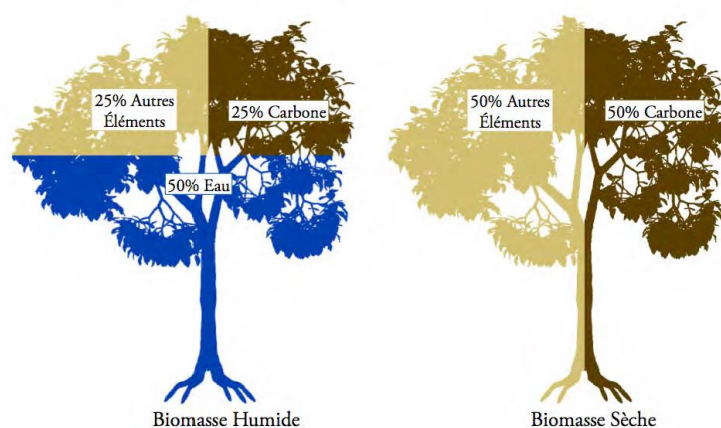
Le changement climatique est dû à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Plusieurs gaz à effet de serre voient leur concentration augmentée, mais le dioxyde de carbone (CO₂) est de loin le plus important.

Toutes les plantes, y compris les arbres et les autres plantes forestières, utilisent la photosynthèse pour absorber le CO₂ et le transformer en différents composés organiques qui constituent le matériel végétal comme le bois, l'écorce ou les feuilles. Cela contribue donc à la diminution du CO₂ dans l'atmosphère.

La quantité de carbone piégée dans les écosystèmes terrestres est environ 3 fois plus élevée que celle atmosphérique. Ce carbone du sol est 700 fois plus important que l'augmentation annuelle en CO₂ (CIRAD, 2002). Par conséquent, des modifications mêmes faibles de la capacité de séquestration de cet énorme réservoir pourraient avoir des répercussions déterminantes sur l'évolution du taux de CO₂ atmosphérique. Le stockage de Carbone (C), sous forme de biomasse à la surface du sol et sous forme d'humus dans le sol, peut ainsi constituer une solution à développer à grande échelle. Cette solution est efficace et peu coûteuse si elle se fait à partir de systèmes de culture facilement appropriables par les agriculteurs, qui répondent à leurs besoins et exigences technico-économiques.

Encadré (1) : La biomasse

La biomasse d'un arbre signifie le poids ou la masse de son tissu vivant de la plante et elle est généralement exprimée en unités de tonnes métriques (t). Une biomasse vivante peut être séparée en composantes aérienne (feuilles, branches et tiges) et en sous-sol (racines). Elle est plus fréquente pour estimer la biomasse vivante sèche (AGB) d'un arbre, qui est le poids du tissu de la plante vivante en surface, après que toute l'eau ait été enlevée, c'est à dire, après que les feuilles, les branches, et les tiges aient été soigneusement séchées, en utilisant souvent un four de laboratoire spécial. En général, l'eau représente environ 50% ou la moitié du poids (ou biomasse humide) d'un arbre vivant.



2. Rôle des forêts

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et d'autres comités scientifiques estiment que jusqu'à 25% de l'absorption du CO₂ de l'atmosphère est le fait des forêts (figure 1).

Lorsque les forêts et les autres écosystèmes sont perturbés et que les plantes meurent, le matériel végétal se décompose ou est brûlé, et le CO₂ est à nouveau libéré dans l'atmosphère. Le GIEC estime que 10 à 20 % du CO₂ libéré provient du changement d'utilisation des terres, en particulier de la dégradation et de la diminution de la forêt tropicale.

Par conséquent, la conservation du carbone dans les forêts existantes, ou du moins la réduction du rythme de libération de CO₂ peut réduire de façon significative les émissions du gaz à effet de serre. En même temps, l'accroissement de la quantité de CO₂ absorbée par les forêts, grâce à la plantation ou à la replantation d'arbres, peut accélérer l'absorption du CO₂, réduisant ainsi la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

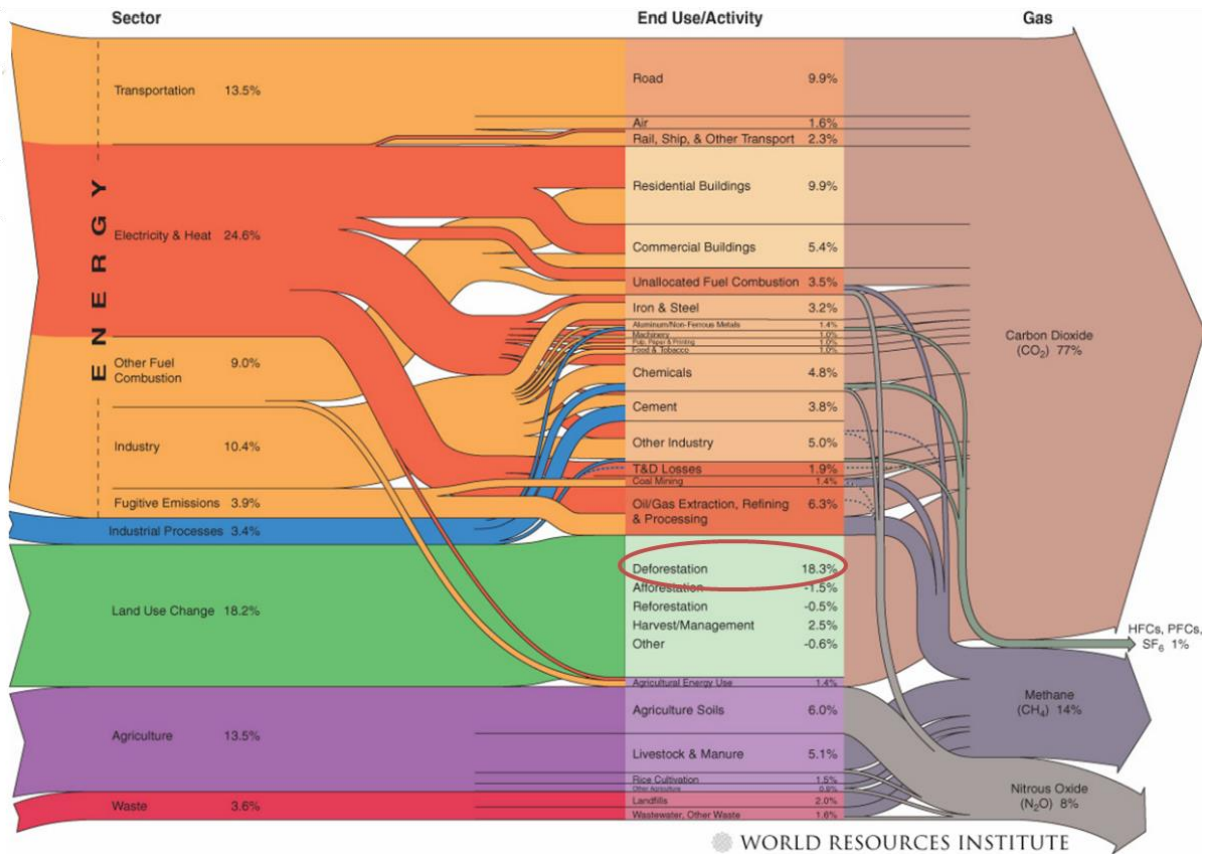


Figure 1: Les émissions mondiales de GES par secteur (source : WRI, IPCC)

3. Cycle de carbone et sa séquestration par les écosystèmes

Des processus écologiques dirigent tout notre système biologique. Un des liens principaux dans le système réside dans le transfert de carbone entre les organismes et l'atmosphère. Ce processus est connu sous le nom de Cycle du carbone (figure 2).

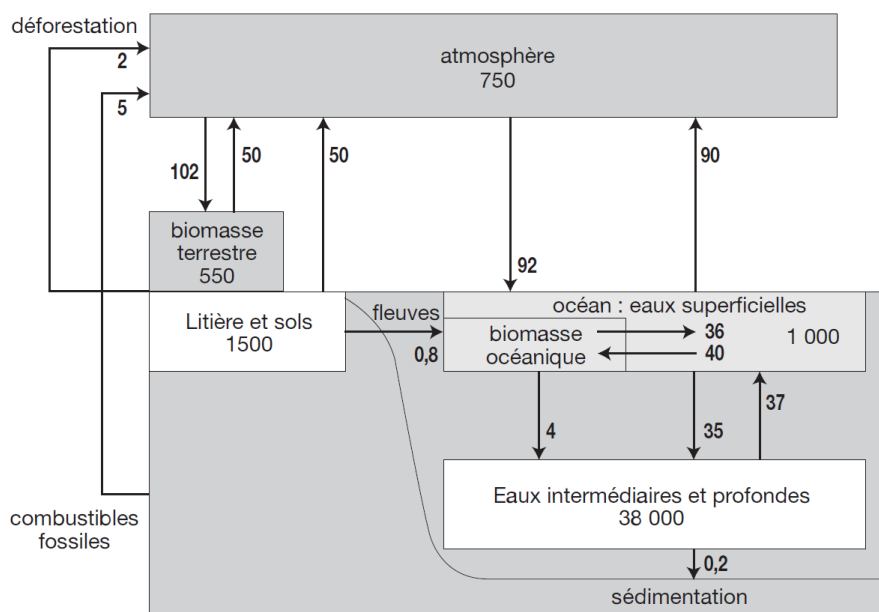


Figure 2: Cycle global du Carbone (source: B. SAUGIER)

L'eau représente la plus grosse partie de la matière vivante. Cependant, le reste est principalement constitué de molécules de carbone (95% ou plus), y compris les composés utilisés dans le transfert et le stockage d'énergie. L'énergie emmagasinée se dissipe finalement lorsque les composés carbonés sont oxydés et deviennent du dioxyde de carbone par des réactions métaboliques à tous les niveaux de la chaîne alimentaire. Le dioxyde de carbone dans l'atmosphère est alors recyclé en composés de carbone plus complexes par les plantes et d'autres organismes autotrophes (qui se nourrissent seuls). Cependant, tout le carbone n'est pas recyclé rapidement. Une partie est emmagasinée dans les sédiments de l'océan et une autre dans la terre, alors que la biomasse accumule le carbone. Les forêts, par exemple, emmagasinent d'importantes quantités de carbone sous des formes durables.

En règle générale, environ la moitié du poids d'un arbre arrivé à maturité est constitué de carbone. Tant que cet arbre est en vie et productif, il retient plus de carbone qu'il n'en libère dans l'atmosphère. Les forêts sont donc considérées comme des puits de carbone. Les plus anciens sols forestiers contiennent des strates profondes de composés carbonés à désintégration lente, des strates qui se forment au fil du temps. Les arbres en vie ajoutent du carbone au sol en perdant leurs feuilles et les vieux arbres laissent du bois mort quand ils sont endommagés ou morts. Ici, la leçon est simple : la plantation d'arbres peut aider à l'absorption du carbone atmosphérique. Toutefois, le stockage du carbone sur le long terme nécessite un système dans lequel la matière végétale morte peut s'accumuler au fil du temps.

II. REDD/REDD+ : un mécanisme visant à Réduire des Emissions provenant de la Déforestation et de la Dégradation des forêts (REDD+)

REDD repose sur le fait que lorsqu'une forêt est abîmée ou détruite, du CO₂ est libéré. Si l'on parvient à diminuer le rythme de la déforestation (disparition complète des forêts) ou de la dégradation (forêts abîmées, par exemple à cause de l'exploitation), alors on pourra diminuer la quantité de CO₂ libéré.

Pour calculer l'ampleur de la diminution des émissions de CO₂, il faudra déterminer une base ou un scénario de référence auquel comparer les émissions réelles. La méthodologie permettant de déterminer cette base n'a pas encore été approuvée, mais elle s'appuiera probablement sur le taux d'émissions dans le temps et sur la tendance estimée à l'avenir en l'absence de programme de contrôle de la diminution forestière.

Les émissions réelles seront ensuite mesurées (c'est une opération compliquée qui demandera beaucoup de travail pour trouver les méthodologies appropriées) et les deux courbes seront comparées. La différence entre le scénario de référence et les émissions réelles équivaut à la réduction des émissions provenant de la déforestation et de la dégradation des forêts un mécanisme visant à Réduire des Emissions provenant de la Déforestation et de la Dégradation des forêts (REDD+).

Encadré (2) : UN-REDD Programme

UN-REDD
PROGRAMME



Le Programme de collaboration des Nations Unies sur la réduction des émissions liées au déboisement et à la dégradation des forêts dans les pays en développement (ONU-REDD) est un partenariat basé sur la collaboration entre l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). Il a été créé suite à la décision de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) concernant la réduction des émissions liées au déboisement et à la dégradation des forêts dans les pays en développement (REDD) lors de la 13e conférence des Parties (COP 13) et Plan d'action de Bali (PAB), et en vue de soutenir cette décision.

Ce programme apporte un soutien aux pays pour les aider à développer leur capacité à réduire les émissions liées au déboisement et à la dégradation des forêts et à mettre en œuvre un mécanisme de REDD futur dans le cadre d'un régime climatique post-2012. Il se base sur le pouvoir de rassemblement de ses organes onusiens participants, sur la diversité de leurs connaissances techniques spécialisées et sur leurs vastes réseaux. Le programme ONU-REDD opère aux échelles nationales et mondiales, à travers des mécanismes de soutien aux stratégies REDD impulsées par les pays et le développement de consensus au niveau international sur les processus REDD.

Au départ, il était pertinent de considérer REDD uniquement dans les pays ayant un taux de déforestation élevé pouvant être diminué. Cependant, il existe également de nombreux pays qui conservent toujours la majeure partie de leur couvert forestier, et dont les taux de déforestation sont historiquement bas. On s'est rapidement rendu compte qu'il était nécessaire, à la fois du point de vue politique et du point de vue technique, d'inclure ces pays dans un mécanisme global :

- D'un point de vue politique, il est important que les mesures de la CCNUCC emportent un large soutien, car ce processus est basé sur le consensus. Il est peu probable que les pays tropicaux possédant des forêts vastes dont les taux de déforestation sont bas appuient un mécanisme dont ils ne peuvent pas profiter.
- D'un point de vue technique, de nombreux facteurs de déforestation, en particulier l'exploitation industrielle et l'agriculture à grande échelle, sont très mobiles. Par conséquent, si un mécanisme est appliqué uniquement dans les pays ayant actuellement un taux de déforestation élevé, le risque est grand d'observer des déplacements internationaux vers les pays dont les taux de déforestation étaient auparavant plus faibles.

Par conséquent, le concept REDD a été étendu à REDD+ qui comprend également des mesures de conservation des stocks forestiers existants (c'est à dire conserver les forêts dans les pays qui ont toujours des taux de déforestation bas), la gestion durable des forêts et l'accroissement des stocks forestier (c'est à dire l'accroissement de carbone forestier par le biais de la restauration ou de la plantation de nouvelles forêts).

L'idée phare au cœur du mécanisme de réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts (REDD) est de récompenser les individus, les communautés, les projets et les pays qui réduisent les émissions de gaz à effet de serre (GES) liées aux forêts. Le mécanisme REDD est en mesure de réduire en peu de temps et à faible coût les émissions de CO₂ tout en contribuant en même temps à la réduction de la pauvreté et au développement durable.

III. Estimation des stocks de carbone au Mali

1. Intérêt du mali pour la séquestration du carbone

Pays continental, le Mali couvre une superficie de 1 241 238 km². La population est estimée à 14 517 176 d'habitants avec un taux d'accroissement annuel de 3%. La pluviométrie varie de 0 à 1200 mm du Nord au Sud. Le vent dominant est l'harmattan. La plus grande partie du territoire est désertique soit 61%. Sur l'autre moitié près de 30% est touché par la désertification. Dans l'ensemble, les écosystèmes sont fragiles. Les sols sont en général pauvres. La synergie de facteurs anthropiques et climatiques a entraîné une accélération du processus de désertification. Le stade ultime de cette désertification est l'ensablement qui est le lot quotidien des zones nord (Gao, Tombouctou et Kidal). Cet ensablement touche les infrastructures routières, les habitations, les sols cultivés et même le fleuve Niger.

Le zonage réalisé en 1996 subdivise le pays en 12 grandes régions naturelles et 49 zones agro-écologiques.

La vocation agro-pastorale du pays explique la forte pression exercée sur ses ressources naturelles. L'agriculture est de type itinérant sur brûlis. Des études antérieures ont montré que près de 300 000 ha sont défrichés chaque année. L'accroissement des besoins pour l'alimentation en relation avec l'augmentation de la population fait que dans la plupart des cas tous les sols cultivables sont cultivés. Ceci s'est traduit par une diminution de la durée de la jachère ce qui a eu comme conséquence un appauvrissement généralisé des sols.

L'élevage extensif domine le système de production pastorale. Il se manifeste à travers la transhumance avec son corollaire de dégradation des ressources naturelles. Cette dégradation est la conséquence du piétinement par les animaux, les coupes abusives par les chevriers mais surtout dans la pratique des feux de brousse comme système de rajeunissement des pâturages par les pasteurs.

La productivité naturelle des formations naturelles est faible. Elle est nulle au nord et varie de 2,7 à 3,5 m³/ha /an au Sud. Le besoin annuel en bois est estimé à 3,7 million de m³. La consommation par personne et par jour est estimée à 2,5 kg. Le déséquilibre entre la productivité des formations naturelles et les besoins donne pour l'ensemble du pays une situation de quasi pénurie à l'exception de la région de Kayes.

La séquestration du carbone est une nécessité pour le Mali pour l'amélioration de la production et de la productivité.

2. Techniques existantes

Il est nécessaire d'estimer les stocks de carbone pour déterminer les émissions nettes liées aux forêts, ces estimations étant obtenues en combinant l'étendue de la superficie déboisée ou dégradée avec les mesures de densité du carbone.

Les approches existant pour estimer les stocks de carbone forestier dans les pays tropicaux peuvent être regroupées en moyennes des biomes, en mesures au sol et en mesures de télédétection (Gibbs et al. 2007). Le Tableau 1 récapitule les bénéfices et les limitations propres à chaque méthode.

Des relations allométriques seront nécessaires pour convertir les inventaires forestiers et les données captées par les instruments de télédétection de mesure de carbone. Un certain nombre de relations existe au niveau mondial (par ex. Chave 2008), mais il est préférable d'élaborer des équations spécifiques aux pays dans ce domaine. Comme la plupart des pays dont les couverts forestiers sont denses ont des services de recherche forestière et que la création de relations allométriques est facile à réaliser, ils ne devraient pas avoir de difficultés à mettre au point les équations appropriées.

Il est souvent tentant d'utiliser les données des inventaires forestiers parce qu'un grand nombre de pays ont déjà dressé au moins un inventaire. Mais peu de pays en développement disposent d'inventaires nationaux exhaustifs et les données qui y figurent se rapportent souvent à des forêts de valeur commerciale seulement (DeFries et al. 2006).

Tableau 1: Bénéfices et limitations des méthodes existantes pour estimer les stocks de carbone forestier au niveau national
(Source : Gibbs et al. 2007)

Méthode	Description	Bénéfices	Limitations	Incertitude	
Moyennes des biomes	Estimations des stocks moyens de carbone forestier par grande catégorie de forêt, sur la base d'une série d'intrants de diverses sources	<ul style="list-style-type: none"> immédiatement disponible des données étoffées peuvent améliorer la précision globalement cohérents 	<ul style="list-style-type: none"> plutôt généralisées l'échantillonnage des sources de données ne donne pas une description adéquate des grandes superficies 	Elevée	
Inventaires forestiers	Relient les mesures au sol des diamètres des troncs ou des volumes des arbres aux stocks de carbone forestier en utilisant des relations allométriques	<ul style="list-style-type: none"> relations génériques facilement accessibles méthode peu complexe facilement compréhensible peut être relativement peu coûteux, le facteur le plus onéreux étant la main d'œuvre sur le terrain 	<ul style="list-style-type: none"> les relations génériques ne sont pas adaptées à toutes les régions peut être lent la nécessité de produire des résultats globalement cohérents constitue un défi 	Faible	
Télé-détection	Télé-détection optiques	Utilise fréquences visibles et infrarouges pour mesurer les indices du spectre ; est en corrélation avec les mesures au sol de carbone forestier (par ex. Landsat, MODIS)	<ul style="list-style-type: none"> collecte régulière de données satellite librement et globalement accessibles globalement cohérents 	<ul style="list-style-type: none"> capacité limitée d'élaborer de bons modèles pour les forêts tropicales saturation des indices du spectre quand les stocks de carbone sont plutôt bas peut être exigeant sur le plan technique 	Elevée
	Télé-détection optiques aériens à résolution fine	Utilise des images à résolution fine (10 à 20 cm) pour mesurer la hauteur des arbres et le houppier et l'allométrie pour estimer les stocks de carbone (par ex. photos aériennes, imagerie aérienne numérique en 3-D)	<ul style="list-style-type: none"> réduit le temps et le coût de collecte des données pour dresser les inventaires forestiers degré de précision raisonnable excellente vérification au sol pour le niveau de référence de déforestation 	<ul style="list-style-type: none"> ne couvre que de petites superficies (10 000 ha) peut être onéreux et complexe sur le plan technique relations allométriques basées sur le houppier non accessibles 	Faible à moyenne
	Télé-détection radar	Utilise micro-ondes ou signal radar pour mesurer la structure verticale de la forêt (par ex. ALOS PALSAR, ERS-1, JERS-1, Envisat)	<ul style="list-style-type: none"> données satellite généralement libres d'accès et gratuites nouveaux systèmes lancés en 2005 devraient fournir des données améliorées peuvent être précis pour les jeunes forêts ou les forêts clairsemées 	<ul style="list-style-type: none"> moins précis pour les canopées complexes de forêts arrivées à maturité parce que le signal sature un terrain accidenté (montagne) accroît aussi le risque d'erreur peut être coûteux et complexe sur le plan technique 	Moyenne
	Télé-détection Laser (par ex. Lidar)	Lidar utilise la lumière laser pour estimer la hauteur et la structure verticale de la forêt (par ex. le système satellite Carbon 3-D combine la Vegetation canopy Lidar (VCL) avec l'imagerie horizontale)	<ul style="list-style-type: none"> estime avec exactitude la variabilité spatiale complète des stocks de carbone forestier le système satellite a le potentiel suffisant pour estimer les stocks globaux de carbone forestier 	<ul style="list-style-type: none"> la seule option est celle des capteurs embarqués à bord des avions pas encore de financement pour le système satellite nombreuses données à recueillir sur le terrain à des fins de calibrage peut être coûteux et complexe sur le plan technique 	Faible à moyenne

3. Méthodologie adoptée

La méthodologie utilisée pour la quantification de la teneur en carbone superficiel et enfoui et le potentiel de séquestration à l'échelle nationale a été structurée autour de deux étapes combinant l'utilisation de deux techniques:

- 1) Des inventaires in situ pour mesurer les volumes de la biomasse et des stocks de carbone dans des placettes réparties sur les différentes régions bioclimatiques du Mali.
- 2) Une extrapolation des résultats obtenus en utilisant un indice de végétation moyen (NDVI) calculé sur une période de 12 ans (2000-2012).

a. Mesures sur terrain

- **Mise en place des placettes**

Au Mali, le potentiel de production de bois des écosystèmes de savane est quantifié à partir des inventaires forestiers dans le cadre des programmes de recherche développement.

Ces inventaires forestiers ont concerné l'ensemble des grandes zones bioclimatiques représentatives des écosystèmes de savanes au Mali. Ces zones sont :

- La sub-saharienne ;
- La zone sahélienne ;
- La zone soudanienne
- La zone soudano-guinéenne
- La région du delta intérieur du Niger

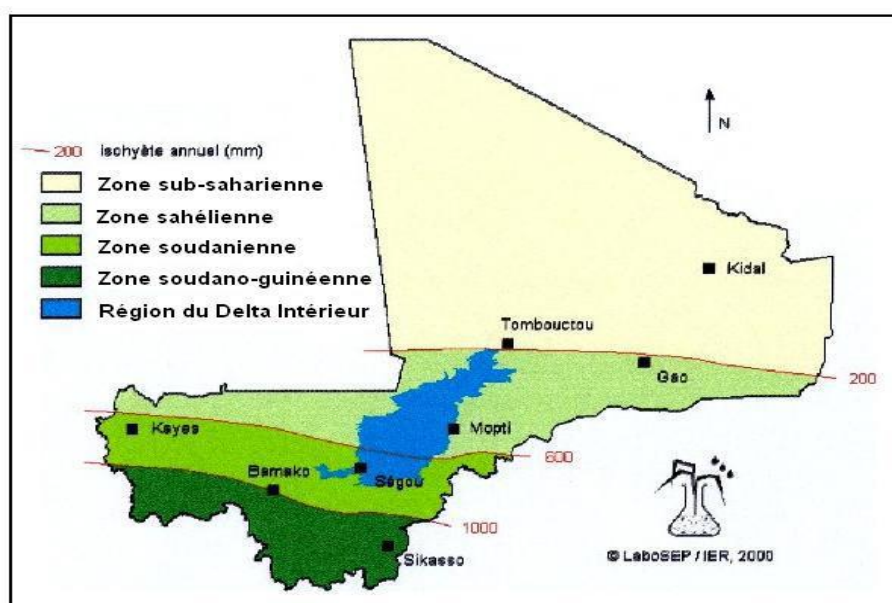


Figure 3: Découpage du Mali en zone bioclimatique

Dans chacune des zones bioclimatiques, des inventaires forestiers ou phytoécologiques ont été réalisés pour déterminer le potentiel en production de bois et de la biodiversité végétale voire faunique.

Dans chacune des zones, on procède d'abord à un échantillonnage stratifié qui consiste à faire une carte de végétation sur la base des imageries satellitaires (Landsat, SPOT) afin de déterminer les principales formations végétales (steppe, prairie, savane arbustive, savane arborée, savane boisée, galerie forestière, forêt claire).

Chaque unité cartographique constitue une strate homogène à l'intérieur de laquelle sont placées des placettes de sondage pour réaliser l'inventaire forestier. Les superficies des placettes de sondages varient en fonction des zones bioclimatiques et des types de formations végétales. Elles sont comprises entre **10 000 m² (1 hectare)** et **1000 m²**.

La formule utilisée pour déterminer soit le taux de sondage ou le nombre de placettes à inventorier est la suivante :

$$t(\%) = \frac{sp * N}{SF} * 100$$

- t : taux de sondage
- sp : superficie de la placette (ha) ;
- SF = superficie de l'unité cartographique ou type de formation végétale
- N : nombre de placette.

Dans chaque placette à inventorier, tous les pieds d'arbre de diamètre basal supérieur ou égal à 10 cm font l'objet de mesure :

- Nom latin de l'espèce
- la circonférence à 1,30 m couramment appelée DBH ;
- la hauteur totale ;
- l'état du bois de l'espèce (bois vert ou bois mort).

Encadré (3) : Mesure des diamètres des arbres

Une des mesures forestières les plus ordinaires acquises au niveau mondial est le **diamètre à hauteur de poitrine** ou le **DHP** des arbres. Dans le domaine de la foresterie, à hauteur de poitrine, définie à 1.3 mètres (ou 4.5 pieds) au-dessus du sol, est la hauteur standard internationalement reconnue à laquelle le diamètre des arbres est mesuré.

Les mesures de DHP sont utilisées dans le calcul des estimations du volume, de la surface terrière et de la biomasse aérienne de bois (carbone) des arbres individuels et des forêts entières. Le fait de prendre la mesure DHP d'un arbre est relativement facile à faire, et avec un peu de pratique, les mesures de nombreux arbres peuvent être obtenues rapidement et avec précision dans le champ.

Un appareil de mesure approprié devrait être utilisé pour obtenir le DHP d'un arbre. Les deux outils les plus couramment utilisés pour le mesurage de DHP sont le ruban de diamètre et l'étrier.



Ruban du diamètre (en orange) et étrier (en argent / bleu)

Source : Woods Hole Research Center

Dans la placette des informations relatives au niveau de la pression anthropique (pâturage, coupe de bois, feu de brousse) et l'état de surface sont notées.

- **Calcul du volume de bois et masse de carbone séquestrée**

Après l'inventaire, le volume de bois est déterminé sur la base de la formule mise au point par Morel en 1987 au Mali, présentée comme suit :

$$V = 10 * G * P$$

- V : volume de bois en m³
- 10 : constante
- G : surface terrière = $\frac{C^2}{4\pi}$; C=circonférence de l'arbre à 1,30 m au-dessus du sol
- P : précipitation moyenne annuelle sur le site ou la station la plus proche exprimé en m.

Pour passer des volumes de bois aux quantités de carbones, on utilise les relations suivantes :

- 1 m³ de bois exploité = 1 tonne CO₂
- 1 tonne de matière sèche (TMS) = 0,5 tonnes de carbone
- 1 tonne de carbone = 3,667 tonnes CO₂ ; soit 1 tonne CO₂ = 0,27 tonnes de carbone = 1 m³ de bois

Sur la base de ces calculs :

1 m³ de bois exploité = 1 tonne CO₂=0,27 tonnes de Carbone

Dans la littérature, la fertilisation organique par compostage donne un taux de 0,054 tonne carbone à l'hectare.

Ce sont ces coefficients de conversion qui ont été aussi utilisés pour estimer le potentiel de carbone séquestré dans formations végétales des savanes au Mali.

Encadré (4) : Calcul de la biomasse vivante sèche (AGB)

L'utilisation de l'équation allométrique de Chave et al. (2005) pour des espèces de forêt tropicale humide, (voir Figure 5.1), la biomasse aérienne sèche vive (AGB en tonnes métriques) d'un seul arbre peut être calculée comme suit:

$$AGB_{\text{arbre}} = (\rho * \exp(-1.499 + (2.148 * \ln(D)) + (0.207 * \ln(D)^2) - (0.0281 * \ln(D)^3)) * 0.001$$

Là où ρ est la densité du bois (g/cm³) et D est le diamètre à hauteur de poitrine (cm).

A titre d'exemple, pour un arbre qui a une densité de 0.60 g/cm³ bois et un DHP de 6.3 cm, l'AGB est calculé comme suit:

$$AGB_{\text{arbre}} = (0.60 * \exp(-1.499 + (2.148 * \ln(6.3)) + (0.207 * \ln(6.3)^2) - (0.0281 * \ln(6.3)^3)) * 0.001.$$

Typiquement, l'AGB est rapporté par hectare. La Figure 5.3 illustre la relation spatiale potentielle entre le terrain-échantillon de 40 m x 40 m et un terrain d'un hectare. La formule de conversion d'une estimation **du terrain** par AGB (en tonnes métriques) à une estimation **par hectare** (en tonnes métriques par hectare) peut être calculée comme suit:

$$AGB_H = (A_H/A_P) * AGB_P$$

Là où l'AGB_H est l'estimation de la biomasse aérienne en tonnes métriques par hectare, l'A_H est la superficie d'un hectare en mètres carrés, l'A_P est la superficie du terrain en mètres carrés et l'AGB_P est l'estimation du niveau du terrain de la biomasse aérienne en tonnes métriques.

Source: Woods Hole Research Center

La biomasse souterraine des arbres est le volume ou le poids du système racinaire. Au Mali elle est estimée à **50% du volume de bois sur pieds**.

L'équation qui prend en compte les données disponibles sur le stock de Carbone au Mali :

L'équation dénommée AFAT = Agriculture, foresterie et autres affectations des terres est celle qui prend en compte toutes les affectations des terres qui abritent nos sites géo référencés où le stock de Carbone a été évalué :

$$\Delta CAFAT = \Delta CTF \Delta CTC + \Delta CP + \Delta CTH + \Delta CE + \Delta CAT$$

Où :

- ΔC = Variations des stocks de carbone

Les indices inférieurs indiquent les catégories d'affectation des terres suivantes :

- AFAT = Agriculture, foresterie et autres affectations des terres
- TF = Terres forestières
- TC = Terres cultivées
- P = Prairies
- TH = Terres humides
- E = Établissements
- AT = Autres terres

Encadré (5) : Calcul des émissions de CO₂ pour une superficie déboisée

La quantité de dioxyde de carbone (CO₂) qui serait émise dans l'atmosphère si les 28 arbres dans le terrain-échantillon par exemple ont été coupés et brûlés complètement peut être calculée comme suit:

$$CO_2 = AGB_p * PMCO_2 / PM_C$$

Là où l'AGB_p est la biomasse aérienne sèche et vivante totale dans le terrain-échantillon (voir la case B), le $PMCO_2$ est le poids moléculaire du dioxyde de carbone et de la PM_C est le poids moléculaire du carbone.

À titre d'exemple, là où la biomasse aérienne totale sèche et vivante dans le terrain-échantillon est d'environ 24.5 tonnes métriques, la masse moléculaire de dioxyde de carbone est de 44 et le poids moléculaire du carbone est de 12, le poids de dioxyde de carbone émis à l'atmosphère est calculé comme suit:

$$CO_2 = 24.5 * 44/12$$

$$CO_2 = 24.5 * 3.67$$

$$CO_2 = 89.92 \text{ tonnes métriques.}$$

Source: Woods Hole Research Center

b. Calcul du stock de carbone à l'échelle nationale

Cette étape consiste à extrapoler les points de mesures obtenus à partir de l'inventaire terrain en utilisant l'indice de végétation normalisé du Mali (moyenné sur la période 2000 – 2012).

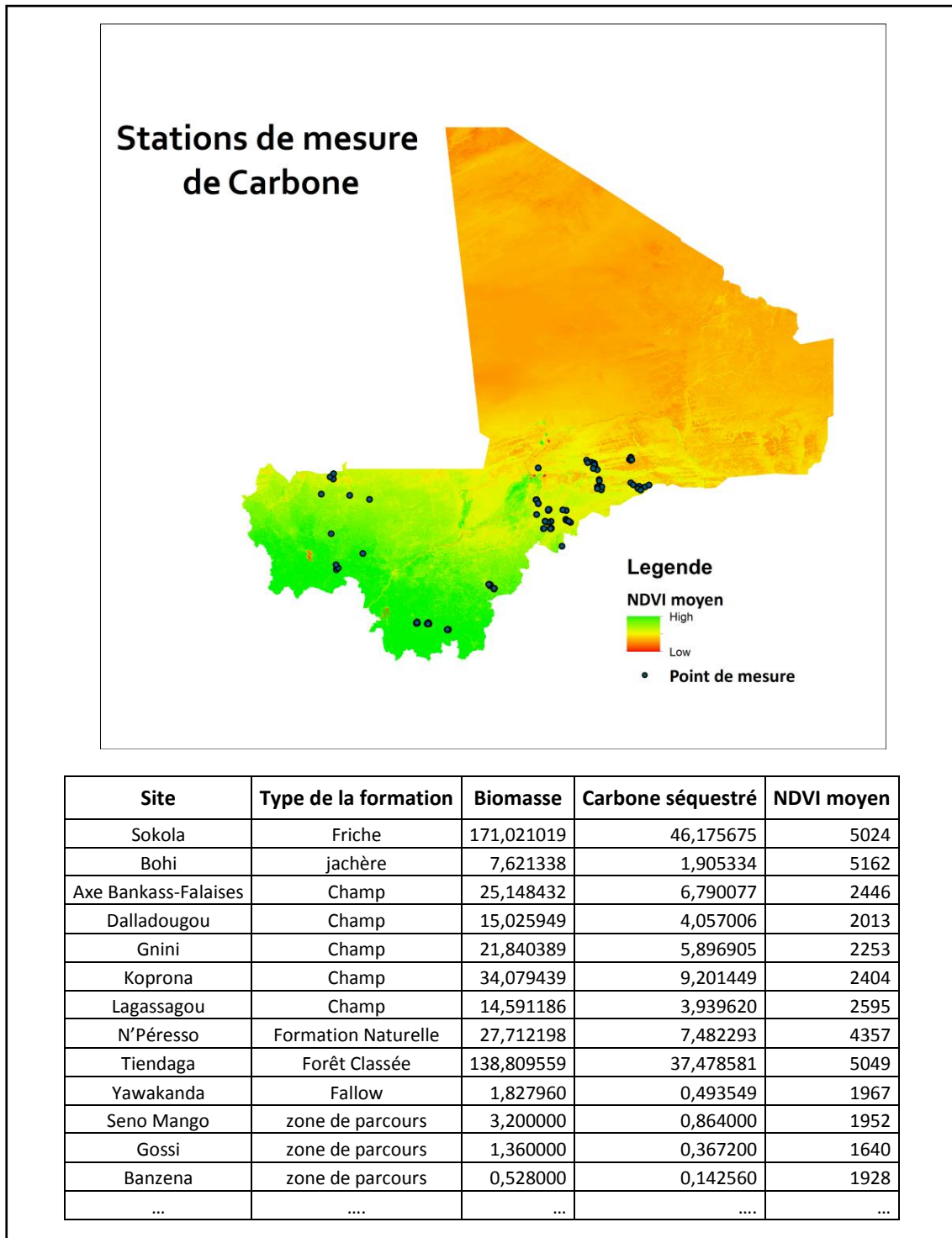


Figure 4: Stations de mesure superposées avec le NDVI moyen

Encadré (6) : Les indices de végétation

Les indices de végétation les plus simples sont basés sur des opérations arithmétiques entre deux bandes spectrales, généralement le rouge et le proche infrarouge, mais également les bandes du proche et du moyen infrarouge.

Parmi les indices les plus élémentaires et les plus anciens, on trouve l'indice de végétation brut, ou **indice différentiel de végétation (DVI)** qui est égal à la simple différence des bandes du proche infrarouge et du rouge (Bacour et al., 2006) ; liste des références ?

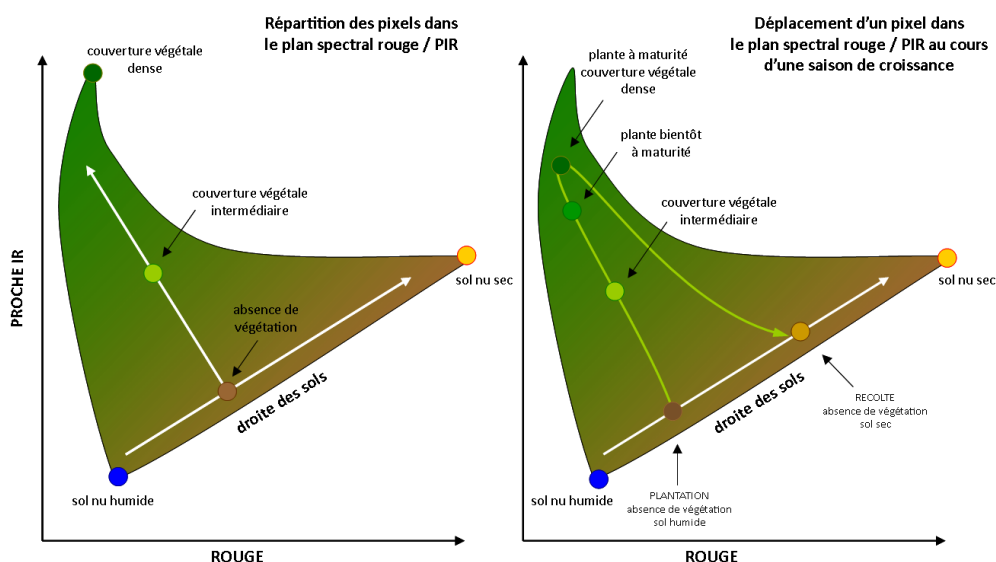
L'**indice de végétation par quotient (RVI)**, s'exprime également de façon très simple. Il est égal au rapport entre les bandes du PIR et du rouge (Krieger et al., 1969; Jordan, 1969).

L'inconvénient de ces indices est qu'ils sont très sensibles aux variations atmosphériques, ainsi qu'à la contribution spectrale des sols. En outre, lorsque la végétation est très dense, la réflectance dans la bande rouge devient très faible, ce qui entraîne une saturation des valeurs de l'indice RVI.

L'indice le plus connu et le plus utilisé est l'**indice de végétation par différence normalisé ou indice de Tucker (NDVI)** (Rouse and Haas, 1973; Tucker, 1979). Son expression est la suivante :

$$NDVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R}$$

Les valeurs du NDVI sont comprises en théorie entre -1 et +1, les valeurs négatives correspondant aux surfaces autres que les couverts végétaux, comme la neige, l'eau ou les nuages, pour lesquelles la réflectance dans le rouge est supérieure à celle du proche infrarouge. Pour les sols nus, les réflectances étant à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge, le NDVI présente des valeurs proches de 0. Les formations végétales quant à elles, ont des valeurs de NDVI positives, généralement comprises entre 0,1 et 0,7 ; les valeurs les plus élevées correspondant aux couverts les plus denses.



Source: Uved : ENVCAL

Elaboration d'une relation quantitative entre les valeurs du NDVI et les mesures de carbone séquestré en traçant la régression exponentielle correspondante (figure 5). L'équation obtenue est la suivante : **Carbone Séquestré= $0.0157 e^{0.0009 \text{ NDVI}}$**

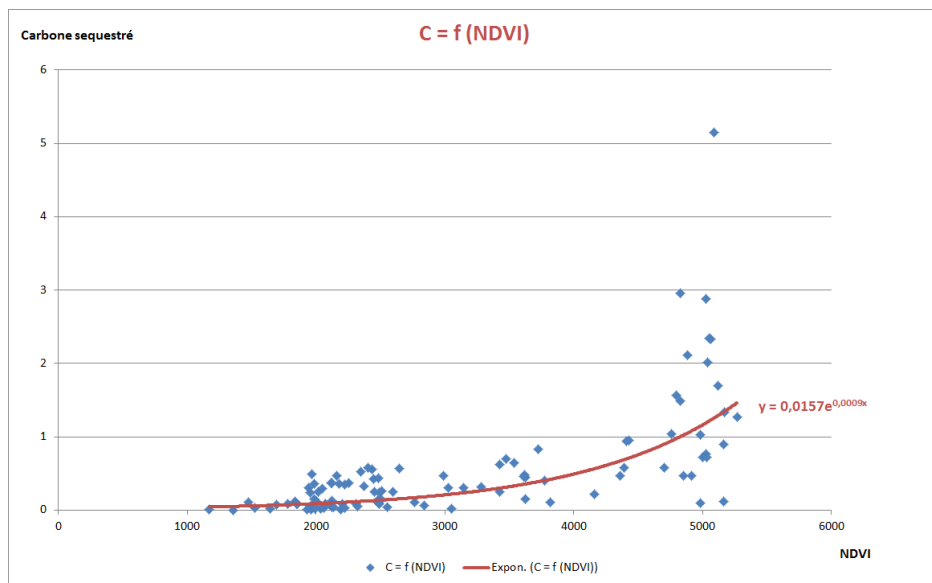


Figure 5: Courbe de tendance : Carbone = f (NDVI)

En appliquant cette équation, on obtient une couche qui représente la quantité de Carbone séquestré sur tout le Mali (figure 6).

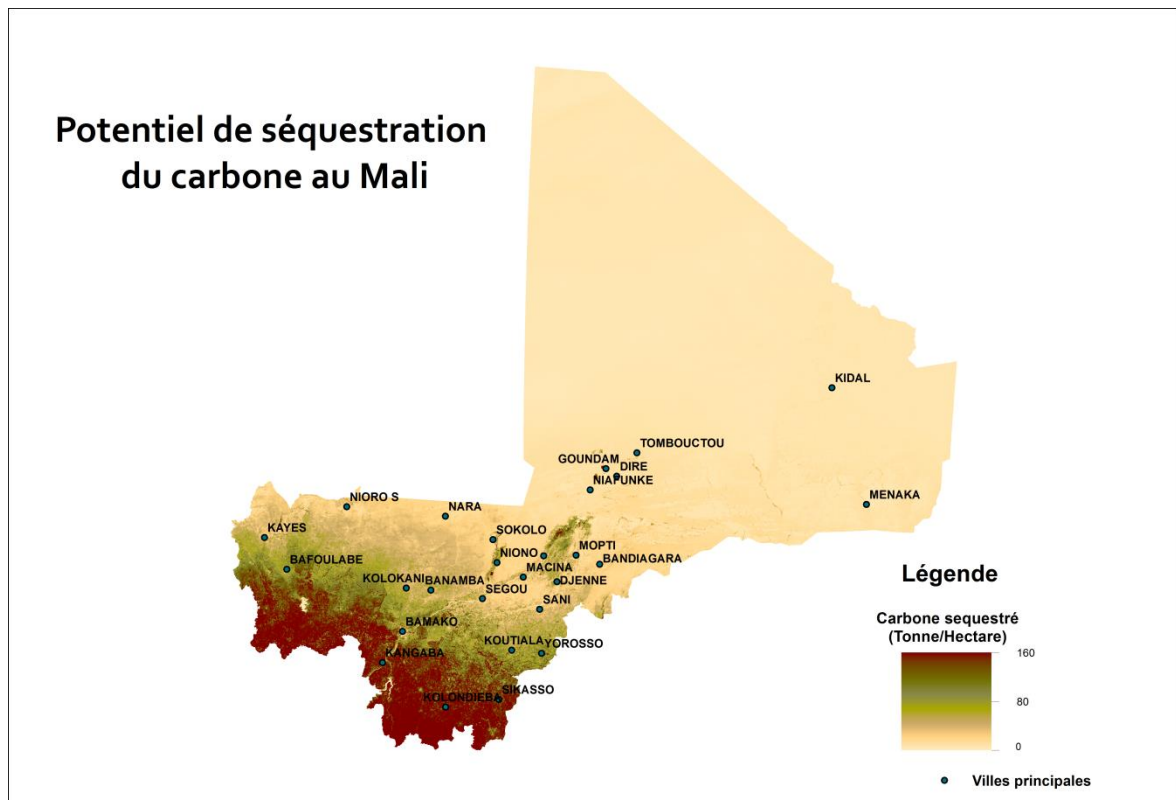


Figure 6: Carbone séquestré sur tout le Mali

Références

- **Angelsen, A. - CIFOR (2009)**, Faire progresser la REDD : Enjeux, options et répercussions.
- C. Bacour, F. Baret, D. Beal, M. Weiss, **and K. Pavageau (2006)**, Neural network estimation of LAI, fAPAR, fCover and LAIxCab, from top of canopy MERIS reflectance data: Principles and validation. *Remote Sensing of Environment* 105(4):313--325 (December 2006)
- **Christopher A Williams, Niall P Hana, Jason C Neff, Robert J Scholes, Joseph A Berry, A Scott Denning and David F Baker (2007)** - Africa and the global carbon cycle. In *Carbon Balance and Management 2007*, 2:3 Published: 7 March 2007
- **CIRAD & FAO (2012)**, Manuel de construction d'équations allométriques pour l'estimation du volume et la biomasse des arbres: de la mesure de terrain à la prédiction
- **CIRAD (2002)**, Dossier séquestration du carbone
- **DeFries, R., A. Hansen, B. L. Turner, R. Reid, and J. Liu (2007)**. Land use change around protected areas: management to balance human needs and ecological function. *Ecological Applications* 17:1031–1038
- **FAO (2002)**, la séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion des terres
- **FAO (2004)**, Assessing carbon stocks and modelling win-win scenarios of carbon sequestration through land-use changes
- **Forum international**, Carbone en forêt et REDD+
- **Holly K Gibbs, Sandra Brown, John O Niles and Jonathan A Foley (2007)**, Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality
- **Mariana Deheza et Valentin Bellassen, (2010)**- VALORISATION CARBONE DE LA FILIERE FORET-BOIS EN France. Dans *cdc climat Recherche*, n° 20, avril 2010
- **Proforest (2011)**, Interactions FLEGT - REDD+ : Qu'est-ce que REDD+ ?
- **Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., and Deering D. W. (1973)**, Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I, 309-317
- **Sassan S. Saatchia,b, Nancy L. Harrisc, Sandra Brownc, Michael Lefskyd, Edward T. A. Mitcharde, William Salasf, Brian R. Zuttaa,b, Wolfgang Buermannb, Simon L. Lewisg, Stephen Hagenf, Silvia Petrovac, Lee Whiteh, Miles Silmani, and Alexandra Morelj, (2011)** - Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents. Edited* by Susan E. Trumbore, University of California, Irvine, CA, and approved May 5, 2011 (received for review December 28, 2010).
- **Saugier B. (1999)**, Bilan carboné des écosystèmes forestiers
- **Stringer a, A.J. Dougill a, A.D. Thomas b, D.V. Spracklen a, S. Chesterman c, C. Ifejika Speranza d, H. Rueff d, M. Riddell e, M. Williams f, T. Beedy g, D.J. Abson a, P. Klintenberg h, S. Syampungani i, P. Powell j, A.R. Palmer k, M.K. Seely h, D.D. Mkwambisi l, M. Falcao m, A. Siteo m, S. Ross n, G. Kopoloo (2012)** - Challenges and opportunities in linking carbon sequestration, livelihoods and ecosystem service provision in drylands. In *environmental science & policy* 19 – 20 (2012) 121 – 135
- **Tucker, C. J., (1979)** Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.*, 8, 127–150
- **Woods Hole Research Center (2011)**, Guide de Terrain pour l'Estimation de la Biomasse et le Carbone Forestier