



## Analyse des possibilités de production durable de bioéthanol à partir du manioc au Mali

Contrat DANIDA 1711

Faisabilité des ressources d'énergies renouvelables au Mali

Décembre 2012

**Auteurs:** Kjeld Rasmussen, Thilde Bech Bruun, Torben Birch-Thomsen, Bo Elberling, Ronja Egsmose, Niels Fold, Søren Kristensen, Ousmane Ouattara, Laura Vang Rasmussen, Ibrahim Togola, Oumar Traoré,

**Titre:** Analyse des possibilités de production durable de bioéthanol à partir du manioc au Mali

**Décembre 2012**

**ISBN:** 978-87-92706-74-4

**Contrat:** DANIDA 1711

**Premier page:**

Photo:  
Laura Vang Rasmussen

Department of Management Engineering  
Technical University of Denmark  
Risø Campus  
Frederiksborgvej 399, P.O. Box 49  
Building 142  
4000 Roskilde,  
Denmark  
Direct + 45 46775115  
Fax + 45 46321999  
Skype: ivan.nygaard3  
ivny@dtu.dk

# Contenu

1.	Préface.....	3
2.	Introduction et objectifs.....	5
3.	Organisation du rapport.....	6
4.	Analyse fonctionnelle d'une unité de production de bioéthanol à partir du manioc.....	6
5.	Sélection du site d'étude.....	8
5.1.	Critères.....	8
5.2.	Sélection des zones potentielles.....	9
5.3.	Evaluation des sites.....	11
6.	Utilisation des terres et systèmes de production.....	11
7.	Méthodes et données.....	12
7.1.	Présentation de la zone et des villages étudiés.....	12
7.2.	Villages.....	14
7.3.	Histoire de l'utilisation des terres.....	15
8.	Résultats de l'enquête par questionnaire auprès des villageois.....	16
8.1.	Système de production.....	16
8.2.	Production de manioc dans la zone d'étude.....	17
8.3.	Calendrier culturel.....	18
8.4.	Main d'oeuvre.....	19
8.5.	Rendements du manioc.....	19
8.6.	Intérêt des paysans pour l'expansion de la culture du manioc.....	20
9.	Evaluation de la viabilité environnementale de la production de bioéthanol.....	21
10.	Méthodologie et sources de données.....	22
10.1.	Evolution probable de l'utilisation des terres.....	22
10.2.	Modifications des stocks de carbone au dessus du sol dues à l'évolution de l'utilisation des terres ou du couvert végétal.....	22
10.3.	Dette de carbone induite par l'évolution de l'utilisation des terres.....	24
10.4.	Echantillonnage et analyse des sols.....	25
10.5.	Echantillonnage des sols.....	25
10.6.	Horizons de sol.....	26
10.7.	Analyses statistiques.....	26
11.	Résultats.....	26
11.1.	Evolution escomptée de l'utilisation des terres ou du couvert végétal due à l'expansion de la production de manioc.....	26
11.2.	Impacts de l'augmentation de la production de manioc sur les stocks de carbone au dessus du sol.....	29
11.3.	Délai de remboursement de la dette de carbone.....	31
12.	Changements dans les stocks de carbone tous-terrains.....	33
12.1.	Réservoir de carbone dans les racines.....	33
12.2.	Types de sols.....	33
12.3.	Scénarios d'utilisation des terres envisagés.....	33
12.4.	Calcul des modifications dans les stocks de carbone.....	34
12.5.	Explication des changements dans les stocks de carbone dans le sol.....	35

<b>13. Analyse, conclusions et incidences politiques relatives aux impacts sur les stocks de carbone .....</b>	<b>36</b>
13.1. Incertitudes.....	37
13.2. Incidences politiques.....	37
<b>14. Impact social et durabilité.....</b>	<b>38</b>
14.1. Impacts sur l'économie des ménages et les moyens de subsistance.....	38
14.2. Analyse de la chaîne de valeur du manioc.....	39
14.3. Impacts sur l'égalité .....	41
14.4. Implications en termes de sécurité alimentaire.....	42
<b>15. Analyse de la sensibilité aux changements climatiques .....</b>	<b>43</b>
<b>16. Analyse et conclusions sur la faisabilité et la viabilité de la production de bioéthanol à partir du manioc dans la zone d'étude.....</b>	<b>45</b>
<b>17. Références.....</b>	<b>49</b>

# 1. Préface

La fourniture de services énergétiques abordable, fiable et respectueux de l'environnement est une condition préalable importante du développement de la société malienne. Actuellement, la demande d'électricité augmente d'environ 10 % par an, et la demande de carburant pour le transport augmente encore plus (BAD 2010). Cette situation se traduit par d'énormes difficultés pour le gouvernement malien et les opérateurs nationaux cherchant à réduire les importations de combustibles fossiles, ainsi que pour la société d'électricité nationale et les investisseurs privés s'efforçant de fournir suffisamment d'électricité à un prix raisonnable.

Une grande partie de la production d'électricité vient de l'hydroélectricité à grande échelle produite sur les fleuves Sénégal et Niger, mais les génératrices diesel petites et moyennes fournissent encore environ 20 % de la production totale. Même si des interconnexions sont prévues et installées pour satisfaire une partie de la demande avec l'électricité produite à partir du gaz naturel au Ghana et en Côte d'Ivoire, il existe encore de bonnes raisons politiques et économiques d'exploiter les abondantes ressources énergétiques renouvelables du pays, telles que l'hydro-énergie, l'énergie solaire, l'énergie éolienne, les résidus de la biomasse issus de l'agriculture et les cultures énergétiques destinées à la production de biocarburants liquides.

Depuis les années 1980, le Mali a lancé, en coopération avec un certain nombre de partenaires du développement, divers projets et programmes de développement visant à augmenter l'utilisation des sources d'énergie renouvelable. Le Ministère des mines, de l'énergie et de l'eau a élaboré une stratégie pour le développement des énergies renouvelables au Mali, qui a été adoptée par le Conseil des ministres le 26 décembre 2006 (MMEE 2007). Cette stratégie combine les efforts de réduction de la pauvreté, de validation des ressources énergétiques nationales, de garantie de la sécurité à long terme et de la viabilité environnementale de l'approvisionnement énergétique. Compte tenu de l'augmentation rapide des prix des carburants importés, tels que le gazole et l'essence, l'évaluation de la possibilité de donner aux sources d'énergie renouvelable un rôle central dans le futur système énergétique présente un intérêt croissant : ces sources d'énergie renouvelable respectueuses de l'environnement sont abondantes au Mali et deviennent de plus en plus concurrentielles.

Afin de planifier leurs futurs investissements dans le secteur des énergies renouvelables, les autorités énergétiques maliennes, Electricité du Mali (EDM), les opérateurs privés et les partenaires de la coopération internationale ont souhaité avoir une évaluation plus précise de l'importance et des variations des ressources d'énergies renouvelables au Mali. Par conséquent, l'Agence danoise pour le développement international (DANIDA), a financé une cartographie des ressources d'énergies renouvelables intitulée « Faisabilité des ressources d'énergies renouvelables au Mali ».

Une première phase d'évaluation du projet a eu lieu en 2007-2008. Le rapport du projet soumis en 2008 et intitulé « Carte provisoire des ressources d'énergie renouvelable du Mali » s'appuie entièrement sur des données satellite et des modèles météorologiques.

Le présent projet a poussé la première étude plus loin en ajoutant des mesures au sol des ressources éoliennes et solaires, ainsi que des études approfondies sur le terrain visant à évaluer les possibilités d'utiliser les déchets de la biomasse pour produire de l'énergie et les impacts socio-économiques de la culture du manioc pour produire du biocarburant. Toutefois, les ressources d'énergies renouvelables n'ont pas toutes été cartographiées. L'exception la plus importante est le stock de ressources d'énergie contenu dans la végétation ligneuse du Mali, qui ne peut pas être facilement évalué à l'aide de données satellite et est en cours d'évaluation par d'autres projets.

Le présent projet a produit 5 rapports principaux :

- 1) Analyse des possibilités de production durable de bioéthanol à partir du manioc au Mali
- 2) Résidus agricoles pour la production d'énergie au Mali
- 3) Etude de pré faisabilité d'une centrale électrique à paille de riz
- 4) Estimation des ressources éoliennes et solaires au Mali
- 5) Applications de production d'énergie éolienne et solaire au Mali : évaluation basée sur les cartes des ressources éoliennes et solaires du Mali

Ce projet est mené par un groupe incluant des départements universitaires, des institutions de recherche et des consultants, dirigé par le Centre Risø du PNUE (CRP) de l'Université technique du Danemark (DTU), en collaboration avec la Direction nationale de l'énergie (DNE) et le Centre national de l'énergie solaire et des énergies renouvelables (CNESOLER) du Mali. Les institutions sous-traitantes sont DTU Wind Energy, DTU Electrical Engineering, Geographic Resource Analysis & Science A/S (GRAS), Department of Geography and Geology (DGG), Université de Copenhague, Ea Energy Analyses, 3E, Ecole nationale d'ingénieurs-Abderhamane Baba Touré (ENI-ABT) et Mali Folkecenter Nyetaa (MFC).

## 2. Introduction et objectifs

L'objectif de la composante C, « Analyse des possibilités de production durable de bioéthanol à partir du manioc au Mali », est d'évaluer si la production de bioéthanol à partir du manioc (*Manihot esculenta*) serait viable sur les plans économique, environnemental et social. Cette question se pose dans le contexte suivant : (1) le Mali a besoin d'élargir son approvisionnement énergétique (électricité, mais également carburants liquides), (2) il a intérêt à réduire sa dépendance vis-à-vis d'un approvisionnement coûteux et précaire en carburants importés, (3) il dispose de ressources foncières relativement importantes ce qui permet l'expansion de l'agriculture, (4) l'augmentation des recettes agricoles est indispensable pour réduire la pauvreté rurale généralisée et (5) le remplacement de l'essence par le bioéthanol réduit les émissions de CO<sub>2</sub>, ce qui rend cet agrocarburant intéressant pour les pays de l'Annexe 1, notamment dans le contexte du « Mécanisme pour un développement propre » du protocole de Kyoto. Les raisons pour lesquelles nous avons choisi d'étudier les possibilités d'utiliser le manioc, plutôt qu'une série d'autres plantes telles que le jatropha, la canne à sucre et le sorgho à sucre, comme produit de départ pour la production de biocarburants sont les suivantes : (1) le manioc a comparativement de bons rendements (jusqu'à 20 t/ha dans le sud du Mali, soit beaucoup plus que le sorgho à sucre), (2) il est relativement bien connu des agriculteurs, et plus particulièrement des petits exploitants, à la différence de la canne à sucre qui le plus souvent est cultivée dans de grandes exploitations, (3) il peut être réaffecté à une utilisation alimentaire en cas de crise alimentaire (contrairement au jatropha) et (4) il est considéré comme étant relativement inoffensif pour l'environnement.

L'intérêt pour le bioéthanol produit à partir du manioc croît rapidement, le manioc étant déjà une culture qui occupe une place importante dans de nombreux systèmes agricoles d'Afrique subsaharienne, ainsi que dans d'autres régions du monde. Cela s'explique par son faible coût de production et les avantages que cette plante offre aux plus pauvres (de Vries et al., 2011) étant donné qu'il a été démontré que les plantes généralement cultivées par les petits exploitants telles que le manioc sont plus efficaces que les systèmes de production de biocarburant à grande échelle pour augmenter les revenus des ménages les plus démunis (Arndt et al., 2010).

Plus précisément, nous nous efforçons de répondre aux questions suivantes, qui correspondent aux objectifs énumérés dans le document du projet :

- Les terres disponibles sont-elles suffisantes pour éviter les impacts négatifs de la concurrence entre la production alimentaire de subsistance et la production de manioc pour le bioéthanol ?
- La production à grande échelle de manioc pour le bioéthanol sera-t-elle écologiquement viable, et aura-t-elle les effets d'atténuation escomptés sur les changements climatiques ?
- Est-il réaliste de considérer que les agriculteurs seront capables et désireux d'accroître la production de manioc pour fournir des produits de départ à la production de bioéthanol à un prix qui rendra cette production possible et rentable ?

- Quels seront les impacts sur les revenus des ménages et l'égalité ?
- Quels sont les principaux acteurs de la chaîne de valeur du manioc au Mali, et quels seront les effets de la mise en place d'une production de bioéthanol sur ces acteurs ?
- Quel sera l'effet global de la production de manioc pour le bioéthanol sur la sécurité alimentaire à l'échelle locale, régionale, nationale et mondiale ?
- L'augmentation de la production de manioc pour le bioéthanol sera-t-elle affectée par les changements climatiques à venir ?

Ces questions sont représentatives des préoccupations qui surgissent le plus souvent lorsqu'il s'agit d'encourager la production de bioénergie dans les PMA. Nous souhaitons répondre à ces préoccupations en cherchant des réponses aux questions ci-dessus.

Le présent rapport présente les conclusions d'une étude de cas menée dans la commune de Loulouni dans la région de Sikasso au sud du Mali. La zone d'étude a été choisie à cause des nombreuses possibilités qu'elle offre et de sa tradition de culture du manioc. Nous sommes convaincus que les constatations sont en partie transférables à d'autres régions du sud du Mali.

### **3. Organisation du rapport**

Le présent rapport s'articule comme suit : pour commencer nous effectuons une brève « analyse fonctionnelle » d'une unité de production de bioéthanol, afin de tracer les grandes lignes de l'analyse de sa faisabilité et de sa viabilité qui suivra. Ensuite, nous présentons les résultats de la mission qui a eu lieu en novembre 2009 et a abouti à l'identification du site d'étude. Nous examinons également les implications probables en termes d'utilisation des terres du lancement d'une production de bioéthanol à partir du manioc dans la zone d'étude, en essayant d'apporter une réponse à la troisième question de la liste ci-dessus. La section suivante traite de la viabilité écologique, en s'intéressant plus particulièrement aux effets de cette production sur les stocks de carbone dans la végétation et les sols. Puis nous analysons les effets économiques et sociaux de la mise en place d'une production de bioéthanol à partir du manioc, en nous basant sur l'enquête auprès des ménages effectuée en 2010 et complétée par des entretiens individuels et en groupe, ainsi que par une analyse de la chaîne de valeur du manioc. Dans cette section, vous trouverez également une analyse sur les impacts probables de cette production sur les revenus des agriculteurs et sur la sécurité alimentaire locale, régionale et nationale. Elle est suivie d'un rapide examen des connaissances sur les impacts possibles des changements climatiques sur la production de manioc. Enfin, nous présentons nos conclusions, en analysant les incidences politiques.

### **4. Analyse fonctionnelle d'une unité de production de bioéthanol à partir du manioc**

Afin d'évaluer la viabilité de la production de bioéthanol à partir du manioc dans la zone étudiée, nous devons définir avec précision l'échelle de cette production, de manière à calculer les changements nécessaires en matière d'utilisation des terres, les changements



qui en découleront pour les réservoirs de carbone, les revenus, etc. Les unités de production de bioéthanol peuvent être de tailles très différentes, mais la réalisation d'économies d'échelle exige une production annuelle minimum de 10.000 litres de bioéthanol (Stefan Maard, NOVOZYMES, pers. com.). Les unités sont modulaires, ce qui implique qu'une unité de cette taille peut être progressivement agrandie, mais avec des réductions mineures des coûts marginaux de production. Etant donné l'importance du volume et de la masse des produits de départ, les coûts de transport du manioc représenteront un facteur de taille à prendre en compte, par conséquent il est probable que les unités de production actuelles ne seront pas beaucoup plus grandes. Nous utiliserons donc cette dimension d'unité de production dans nos calculs.

Selon les données existantes, la production d'un litre de bioéthanol nécessite entre 5 et 7 kg de manioc. Nous ne savons pas si ce chiffre dépend de la variété de manioc utilisée. Par conséquent, la production de 10.000 litres de bioéthanol nécessitera entre 50.000 et 70.000 tonnes de manioc, réparties équitablement sur l'année étant donné que le manioc frais ne peut pas être stocké longtemps dans les conditions climatiques du Mali. Dans l'hypothèse de rendements de l'ordre de 10 à 20 tonnes/ha, la superficie des terres nécessaires se situera entre 2.500 et 7.000 ha. Compte tenu de l'intensité d'utilisation des terres actuelle, une augmentation des terres cultivées de cette importance pourrait être réalisée dans un rayon de 10 à 20 km, ce qui serait réaliste en termes de transport. Si les rendements augmentent, ce qui est faisable à la fois d'un point de vue agronomique et économique, la zone nécessaire serait encore plus réduite.

Sur le plan économique, il est évident que la condition préalable pour que la production de bioéthanol soit rentable est que ce carburant puisse concurrencer l'essence (étant donné qu'il est destiné à être un additif à l'essence) ou d'autres carburants (par ex. kérosène, gaz propane, bois de chauffage ou charbon pour les usages domestiques). L'analyse du prix de production nécessaire pour remplir cette condition préalable est difficile. Certains des problèmes qu'elle pose sont les suivants :

- Les prix de l'essence et du pétrole ont considérablement fluctué ces dernières années.
- Les subventions ont faussé le marché, parfois au détriment des biocarburants.
- A cause du manque d'infrastructures au Mali pour mélanger le bioéthanol et l'essence, l'ajout d'éthanol à l'essence ne peut être effectué qu'à l'extérieur du pays, ce qui entraîne des coûts de transport supplémentaires élevés.
- L'internalisation des coûts de protection de l'environnement et sociaux, et les effets positifs des externalités de la production/consommation du bioéthanol et de l'essence, ainsi que des autres carburants, sur les prix influenceront énormément le résultat.
- L'ampleur des financements MDP (ou systèmes similaires après 2012) qui pourront être mobilisés aura également un impact sur l'analyse.
- Nous ne connaissons pas la valeur économique des résidus de la production de bioéthanol (qui pourraient être utilisés comme aliments pour le bétail).

Plutôt que d'essayer d'effectuer une analyse détaillée de l'économie de la production de bioéthanol, nous choisirons un « seuil de rentabilité » auquel cette production deviendra économiquement faisable, en partant du principe que les modifications de ce seuil dépendront principalement des fluctuations du prix du pétrole sur le marché mondial.

Si nous considérons que le seuil de rentabilité est de l'ordre de 0,5 USD par litre de bioéthanol (correspondant à un prix de l'essence d'environ 0,7 USD, étant donné qu'1 litre d'essence peut être remplacé par environ 1,4 litre de bioéthanol), le prix des matières premières de la production de bioéthanol ne devrait pas excéder 0,4 USD par litre de bioéthanol, ou 0,06 à 0,08 USD par kg de manioc, ce qui correspondrait à 30-40 CFA/kg. Ces chiffres pourraient augmenter de manière substantielle si les prix du pétrole augmentent, comme cela devrait être le cas à moyen et long terme.

En résumé, notre conclusion est que la création d'une unité de production de bioéthanol est faisable si un certain nombre de conditions préalables sont remplies. Ces conditions sont les suivantes :

- Le marché (au Mali ou dans les pays voisins les plus proches) peut absorber une production de 10 millions de litres de bioéthanol.
- L'unité de production est située à proximité d'une zone de concentration de la production de manioc capable de produire entre 50.000 et 70.000 tonnes/an environ.
- Dans la zone concernée, la production de manioc doit être couplée avec une culture vivrière en quantités suffisamment importantes pour assurer la sécurité alimentaire.
- Les rendements obtenus doivent être au minimum de 10 tonnes/ha, ou bien ce niveau (ou de préférence un niveau plus élevé) doit être atteignable grâce à une utilisation accrue d'intrants et une expertise agronomique.
- Les petits paysans doivent être disposés à produire une quantité garantie à un prix garanti de 30 à 40 CFA/kg.

## 5. Sélection du site d'étude

### 5.1. Critères

Un certain nombre de critères ont été appliqués à la sélection du site d'étude. Ils peuvent être répartis en trois groupes :

1. La disponibilité des facteurs de production de base nécessaires pour augmenter la production de manioc. Ces facteurs sont principalement les ressources foncières et en main d'oeuvre.
2. Les critères environnementaux, à savoir :
  - a. L'état des sols et les conditions climatiques,
  - b. Les impacts acceptables de la production accrue de manioc sur les écosystèmes, la biodiversité et les ressources en eau,
  - c. Les impacts acceptables sur les stocks de carbone dans la végétation et les cultures,
3. Les critères institutionnels (au sens large), à savoir :
  - a. La présence et la compétence des institutions locales, publiques aussi bien que privées, offrant un cadre à la participation des petits paysans à la production,
  - b. L'expérience en matière d'agriculture sous contrat,
  - c. Les droits fonciers, permettant une expansion flexible de la production de manioc,

4. Les critères économiques, notamment un prix réel ou potentiel du manioc permettant une production de bioéthanol rationnelle sur le plan économique,
5. Les facteurs infrastructurels, à savoir :
  - a. Les possibilités de transport du manioc entre les champs et les villages jusqu'au site de transformation à un coût raisonnable,
  - b. L'accès aux marchés concernés, au Mali et/ou dans les pays voisins.

En outre, le site sélectionné doit permettre d'effectuer l'étude de préfaisabilité en respectant le cadre budgétaire disponible.

## **5.2. Sélection des zones potentielles**

Le premier site visité se trouve dans le district de Bafoulabé, à l'ouest du Mali. Le deuxième site comprend deux sous-sites dans la région de Sikasso au sud du Mali, à savoir les communes de Bougouni et de Loulouni, situées au sud de la ville de Sikasso. La première sélection de sites potentiels était fondée sur certains des critères ci-dessus, mais la liste des critères a été rallongée dans la procédure de sélection finale, qui a été plus rigoureuse. Un troisième site, situé à Ségou, avait été suggéré mais il n'a pas été retenu à cause du niveau plus faible des précipitations, et donc du rendement potentiel, combiné avec l'intensité relativement élevée d'utilisation des terres dans cette zone, engendrant des risques de concurrence foncière entre la production de bioéthanol et la production alimentaire destinée à la consommation locale.

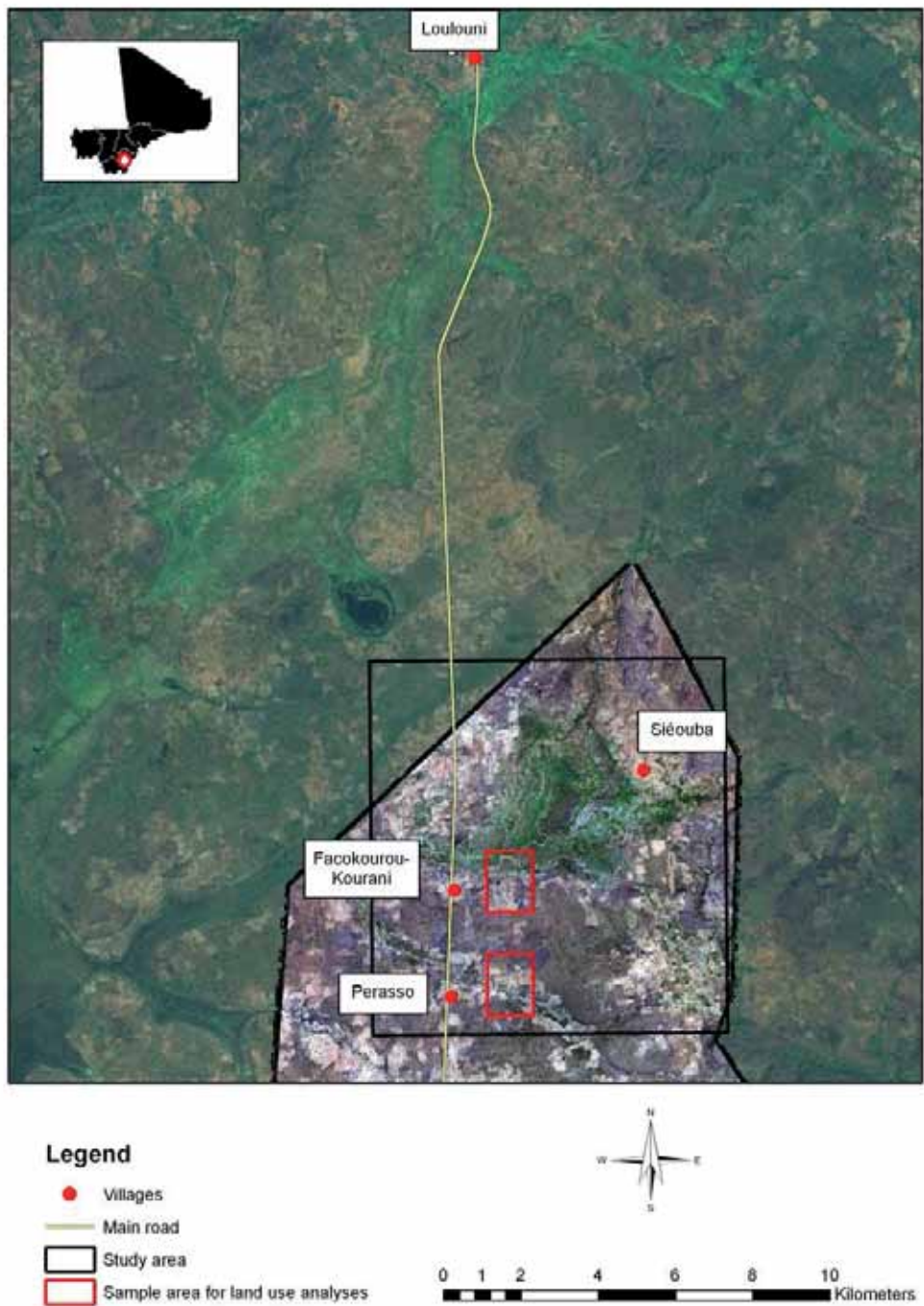


Figure 1 La zone d'étude au sud du Mali

Nous avons visité les sites pendant cinq jours et discuté avec les autorités et les principaux acteurs concernés. Après que nous ayons expliqué l'objectif de notre mission, les participants ont posé des questions sur la plupart des critères énumérés ci-dessus. Ces participants étaient des acteurs politiques, administratifs et techniques au niveau de la région, des districts et des communes, et toutes les questions ont reçu des réponses.

Sur le site situé au sud de Sikasso, nous avons eu le temps de visiter des villages spécialisés dans la production de manioc, ce qui a permis d'approfondir l'analyse des contraintes de production. Lors de notre visite au village de Sièouba, nous avons questionné le chef du village et un certain nombre de producteurs de manioc actifs.

### **5.3. Evaluation des sites**

L'application des critères énumérés ci-dessus nous a permis de déterminer que la région au sud de Sikasso était le meilleur choix pour l'étude : (1) Cette région souffre d'un manque de cultures de rente susceptibles de remplacer le coton, qui est en déclin depuis plusieurs années. Par conséquent, du point de vue de la réduction de la pauvreté, la création d'un débouché commercial stable pour le manioc serait accueillie très favorablement par les paysans et les autorités locales. (2) Les terres disponibles semblent être en nombre suffisant, surtout celles laissées en jachère suite à la réduction des terres cultivées en coton. Par conséquent, il ne semble pas y avoir de concurrence foncière sérieuse, ni d'effets locaux négatifs sur la sécurité alimentaire. Ce constat initial a été étayé par la suite par l'analyse de l'utilisation des terres (voir ci-après). (3) Les pertes de carbone dues à l'évolution dans l'utilisation des terres devraient être relativement réduites, le couvert arboré étant limité. Là encore, ce postulat de départ a été confirmé par la suite, comme expliqué un peu plus loin. (4) Les paysans ont semblé bien organisés et se sont dit très intéressés par l'augmentation de la production de manioc, à condition qu'il existe un marché et que les prix soient raisonnables et stables. (5) Les paysans ont beaucoup d'expérience dans la culture du manioc. (6) La zone est proche d'un axe routier important, et le temps de transport jusqu'à Bamako est d'environ 5 heures, ce qui permettrait d'en faire une zone de production pour le marché malien. Elle est proche des frontières du Burkina Faso et de la Côte d'Ivoire. La zone sélectionnée est présentée à la Figure 1.

Les données présentées dans la suite de ce rapport concernent le site sélectionné. Les possibilités d'appliquer les conclusions de cette étude à d'autres sites seront décrites chaque fois que cela se justifiera.

## **6. Utilisation des terres et systèmes de production**

Comme nous l'avons vu plus haut, les implications sur l'utilisation des terres ont fait partie des préoccupations exprimées lors des débats publics sur la production de bioénergie dans les PMA, aussi bien à cause des effets possibles sur l'environnement, qui pourraient compenser les impacts de l'atténuation des changements climatiques, qu'à cause des impacts négatifs potentiels sur la sécurité alimentaire en cas de concurrence entre production alimentaire et production de bioénergie pour s'accaparer les rares terres disponibles. Dans cette section, nous examinons l'utilisation actuelle des terres et les conséquences probables de la création d'une production de bioéthanol à partir du manioc. Sur le terrain, la mission s'est concentrée sur quelques villages, mais les résultats peuvent être extrapolés à une zone plus large, nécessaire pour fournir assez de manioc pour couvrir les besoins d'une unité de production de bioéthanol produisant 10.000 litres par an.

## 7. Méthodes et données

L'analyse présentée dans ce rapport s'appuie sur un travail sur le terrain qui a été réalisé dans la municipalité de Loulouni, district de Kadiolo, région de Sikasso au sud du Mali, en novembre 2009 et février 2010. Cette zone nous a permis d'étudier les possibilités d'expansion de la production de manioc dans différents environnements biophysiques. La mission a consisté notamment à effectuer une enquête par questionnaire auprès des paysans dans 2 zones agro-écologiques différentes, complétée par des entretiens avec des acteurs clé (paysans, associations paysannes, autorités locales). Au total, 65 paysans ont répondu au questionnaire qui portait sur le système agricole et les possibilités d'expansion de la culture du manioc. Par ailleurs, nous avons utilisé des images satellite haute résolution, une image QuickBird multispectrale d'une résolution spatiale approximative de 2 m. datant de janvier 2010, complétée par des images Landsat ETM plus anciennes d'une résolution de 15 m., pour cartographier l'utilisation des terres en nous appuyant sur les observations sur le terrain.

### 7.1. Présentation de la zone et des villages étudiés

La zone d'étude est un paysage complexe présentant de grandes différences en termes de type de sols, de topographie et d'humidité des sols. La Figure 2 montre les principales unités de paysage du site étudié. La classification a été effectuée à partir de l'image QuickBird. Les principales unités de paysage identifiées sont au nombre de quatre :

A) Plaine alluviale plate : la plupart des cultures en sec sont effectuées dans une plaine située entre l'escarpement et les plaines latéritiques élevées d'une part et les zones à basse altitude inondées de façon saisonnière d'autre part. La plupart des champs sont cultivés selon le système de culture itinérante, dans lequel les paysans les laissent en jachère pendant quelques années après avoir alterné des cultures vivrières, telles que le maïs, le mil, le manioc (essentiellement la variété attiéké) et les haricots, et des cultures de rente, auparavant le coton et aujourd'hui principalement l'arachide et le manioc.

B) Plaine latéritique/interfluves : zones de haute altitude, qui conviennent moins bien aux cultures arables. Ces zones sont essentiellement recouvertes d'arbustes et de forêts. Elles sont utilisées pour la collecte de bois de chauffage et comme pâturages, avec quelques cultures disséminées.

C) Escarpement/plateau : cette zone ressemble à des inselbergs, avec des pentes abruptes et des surfaces rocheuses. Les plateaux ne conviennent aux cultures vivrières que par endroits.

D) Zone inondée de manière saisonnière : zones à basse altitude inondées de façon saisonnière, dont certaines parties sont cultivées de manière intensive. L'abondance des précipitations permet d'effectuer plusieurs cultures par an. Les plantes cultivées sont celles qui produisent bien sur les sols humides, telles que le riz, le manioc et les patates douces.

Le Tableau 1 indique les zones que couvrent ces unités de paysage dans la région représentée par la Figure 2.

Tableau 1 : Zones couvertes par les unités de paysage de la zone d'étude délimitée à la Figure 2

Classification des terres	Kilomètres carrés	Pourcentage de la zone totale (%)
Plaine alluviale plate	46,0	53
Plaine latéritique/interfluves	22,9	26
Escarpement/plateau	8,1	9
Zone inondée de manière saisonnière (bas fond)	10,3	12
Zone totale	87,3	100

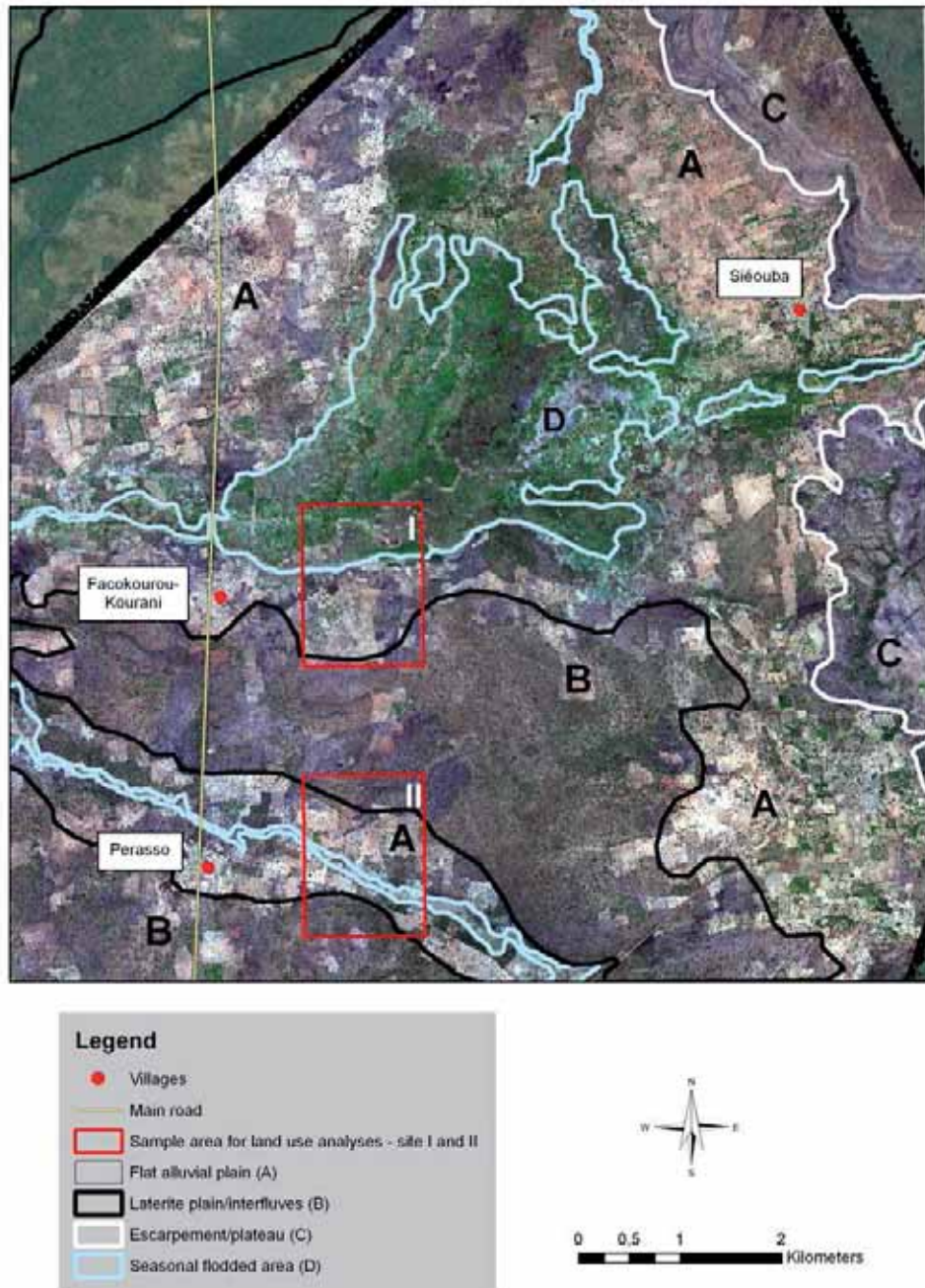


Figure 2 Unités de paysage de la zone d'étude.

## 7.2. Villages

Deux zones différentes, comprenant trois villages et représentant des milieux biophysiques légèrement différents, ont été choisies pour les enquêtes détaillées :

1) Des zones représentatives caractérisées par une production importante de manioc, aussi bien dans les zones humides que dans les plaines alluviales, et deux villages, Siéouba et Facokourou Courani, ont été sélectionnés. Les deux villages sont situés



respectivement au nord-est et au sud-est de la grande zone humide (plaine alluviale ; *bas fond*) (voir Figure 2 et site I sur la Figure 3).

2) Des zones représentatives caractérisées par une production limitée de manioc et un accès limité à la zone humide, le village de Perasso a été sélectionné. Il est représentatif de la partie sud de la commune de Loulouni et de la zone plus au sud (vers la frontière avec la Côte d'Ivoire). Le manioc est cultivé sur de petites surfaces, principalement dans des zones humides petites ou étroites à proximité des rivières (voir Figure 2 et site II sur la Figure 3).

Les habitants des trois villages appartiennent pour la plupart aux groupes ethniques des Samogho et des Sénoufos, et sont de petits paysans. En raison de la longue histoire de culture du coton, les paysans sont bien organisés et axés sur le marché. Leur production actuelle de manioc est pour une grande partie destinée à un marché externe et ils récoltent même « à la demande » lorsque les acheteurs les sollicitent.

Dans chaque village, environ 30 ménages ont été choisis par échantillonnage stratifié pour répondre au questionnaire.

### **7.3. Histoire de l'utilisation des terres**

Le coton était cultivé de manière extensive sur des sols sablonneux et, dans une moindre mesure, graveleux. De larges zones autrefois plantées de coton sont aujourd'hui en jachère. Beaucoup de ces parcelles sont en jachère depuis 5 à 10 ans, étant donné que le déclin de la production de coton remonte à cette période. Au cours des dernières décennies, les cultures se sont étendues dans la grande zone humide située entre Sièouba et Facacourou Courani. Dans les parties les plus humides, les cultures traditionnelles sont principalement le riz et, de plus en plus, le manioc (voir site I sur la Figure 3). Un abaissement du niveau de la nappe phréatique a été observé, ce qui a permis d'étendre les cultures dans les zones précédemment inondées.

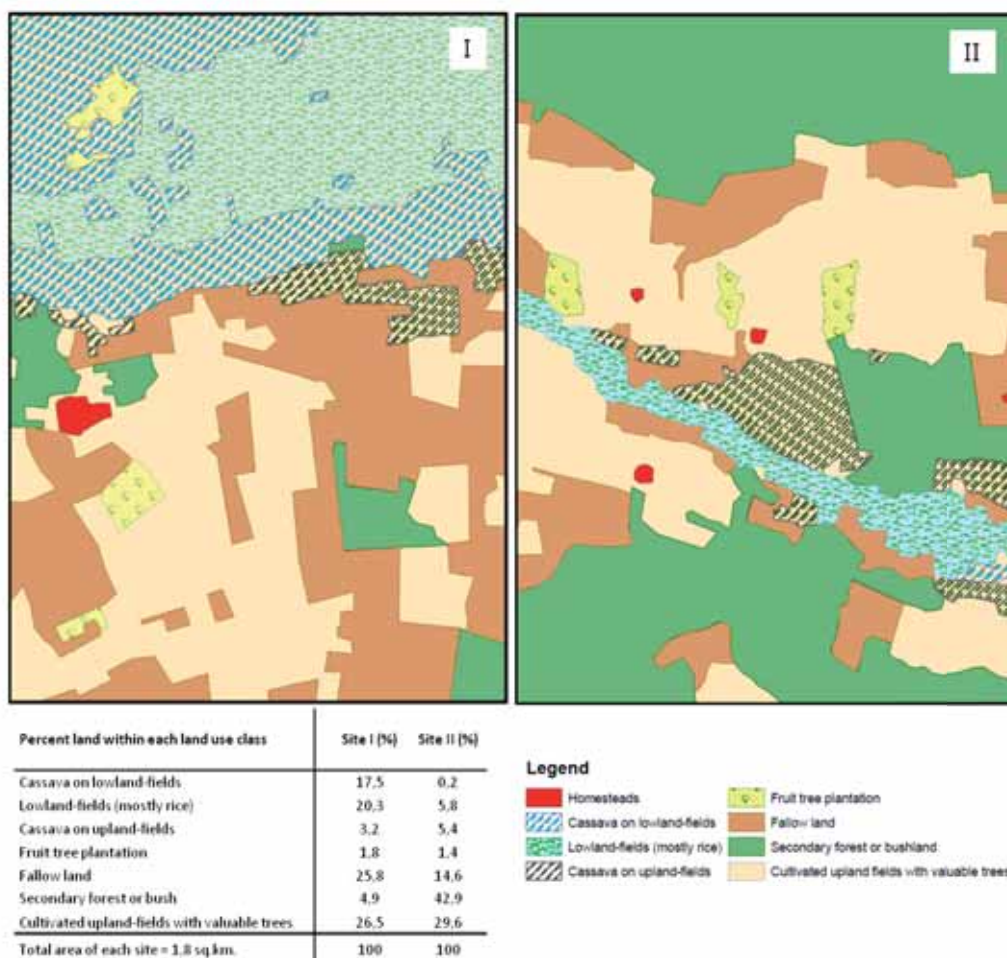


Figure 3 Utilisation des terres dans les deux sous-zones délimitées sur la Figure 2

## 8. Résultats de l'enquête par questionnaire auprès des villageois

### 8.1. Système de production

La production arable se compose d'un mélange de cultures de rente et de subsistance. Autrefois, le coton vendu à l'organisme semi-public CMDT était la principale culture de rente en sec, mais elle a quasiment été abandonnée au cours des cinq dernières années à cause de la chute de la rentabilité. Les principales cultures de rente des paysans qui ont accès aux terres en basse altitude des bas-fonds humides sont le riz, les ignames et les patates douces, en plus du manioc. Ceux dont les champs sont situés dans les plaines alluviales sèches cultivent des arachides et du maïs. Les cultures de subsistance sont le mil, le sorgho et le maïs, ainsi que divers légumes et courges.

Comme nous l'avons vu plus haut, les villages de Sièouba et Facocourou Courani ont un meilleur accès aux zones humides que les habitants de Perasso (voir Tableau 2 et Figure 3). La taille de l'exploitation moyenne est 31 % plus grande dans les villages de Sièouba et Facocourou Courani (17,7 ha contre 13,3 ha à Perasso), mais également la

proportion de terres actuellement cultivées (65 % contre 50 % à Perasso). En outre, la proportion de terres laissées en jachère pour une longue durée est bien plus réduite (8 % contre 30 % à Perasso). Par conséquent, Sièouba et Facocourou Courani produisent plus d'excédents et sont plus axés sur la commercialisation que Perasso.

*Tableau 2 Taille des exploitations, zones cultivées et jachères*

	Sièouba et Facocourou Courani	Perasso
Taille moyenne des exploitations (ha)	17,7	13,3
Taille moyenne des zones cultivées (ha)	11,5	6,7
Taille moyenne des jachères de courte durée (< 20 ans) (ha)	4,5	3,3
Taille moyenne des jachères de longue durée (> 20 ans) (ha)	1,5	3,3

Dans les deux sous-zones, une proportion importante de paysans utilisent des engrais minéraux et organiques. Le dosage courant est 100 kg d'ammonium (N) et 50 kg d'engrais « super complexe » (P)/ha, à 30-40.000 CFA/ha. Les jachères courte durée (< 20 ans) et longue durée (> 20 ans) sont également utilisées pour permettre aux nutriments des sols de se régénérer après une période de culture.

La propriété des terres est un mélange complexe de propriété individuelle et collective. Cette complexité reflète la composition des ménages, selon laquelle les familles nucléaires sont réunies pour former de grandes familles et ont un accès différencié aux terres et à la main d'œuvre, ainsi qu'aux ressources importantes en fonction de leur âge et de leur rang social dans la communauté. Dans les deux sous-zones, la majorité des producteurs de manioc possèdent les terres où sont cultivées le manioc, ce qui signifie qu'ils peuvent prendre des décisions concernant leur gestion sans l'interférence de tierces personnes (70 % à Sièouba et Facocourou Courani contre 92 % à Perasso).

## **8.2. Production de manioc dans la zone d'étude**

Les principales unités de paysage de la zone d'étude sont délimitées sur la Figure 2. La production de manioc est localisée à la fois dans les zones humides (D), les plaines sèches aux sols sablonneux (A) et les plateaux (B et C), mais les systèmes de production varient considérablement entre ces unités de paysage : dans les zones humides et les vallées fluviales, la variété produite, souvent de manière permanente, est le bonouma. Dans les plaines sablonneuses, le manioc fait souvent partie d'une rotation des cultures incluant également le maïs, le sorgho et plusieurs autres plantes. Les deux variétés cultivées sont

le bonouma et l'attiéké, cette dernière étant la plus fréquente. Les plateaux sont cultivés de manière moins intensive, mais on y trouve des champs de manioc attiéké. D'une manière générale, les paysans préfèrent planter du bonouma sur les sols limoneux et du manioc attiéké sur les sols sablonneux et graveleux. En termes de production, le rapport entre les zones cultivées en manioc bonouma et les champs d'attiéké est de 4 pour 1 environ.

Le cycle de culture du *bonouma* est de 9 à 12 mois. C'est une variété de manioc doux qui peut être consommé avec peu de préparation (par ex. bouilli). Le cycle de culture de l'*attiéké* est court (6 à 9 mois). Pour pouvoir être consommée, cette variété de manioc amer nécessite plusieurs étapes de transformation visant à réduire la teneur en glucosides cyanogéniques. Cela fait environ 10 ans qu'elle est cultivée dans la région. Elle a été introduite par les immigrants venant de Côte d'Ivoire où elle est cultivée depuis longtemps.

Les variétés *abidjanka* et *agassi* sont également cultivées, mais en plus petites quantités (moins de 5 % de la production).

Tableau 3 Le manioc dans la zone d'étude.

	Sièouba et Facocourou Courani	Perasso
% des personnes interrogées qui cultivent le manioc	100	83
Taille moyenne de la zone de production de manioc (ha)	4,8	1,2
Passé de culture du manioc (nombre d'années)	18	5,4

Comme le montre le tableau 3, il existe des différences importantes entre les deux sous-zones. Dans les villages de Sièouba et de Facocourou Courani, toutes les personnes interrogées cultivent le manioc dans des champs assez grands (4,8 ha en moyenne) et cette culture est assez ancienne (18 ans en moyenne). Par contre, à Perasso, 17 % des personnes interrogées ne cultivent pas le manioc et les champs de manioc ont une taille moyenne relativement petite (1,2 ha), cette culture étant assez récente (5 ans en moyenne).

### 8.3. Calendrier culturel

Dans le cas du manioc bonouma dans les zones humides, la plantation a généralement lieu de juillet à novembre et les dates effectives dépendent de la disponibilité des terres et de la main d'œuvre (en particulier lorsque des équipes de travail sont constituées selon le système d'entraide). Les boutures sont plantées sur des billons ou buttes, ce qui favorise le développement des tubercules et les met à l'abri d'un excès d'humidité. Au bout de quelques mois les champs sont sarclés et les mauvaises herbes sont enterrées dans les billons/buttes. Chaque plant reçoit de l'engrais. Certains paysans ont indiqué que la

plantation dépendait de l'humidité des sols et pouvait se poursuivre au-delà du mois de septembre. Toutefois, un certain degré d'humidité est nécessaire pour le premier sarclage et les paysans doivent en tenir compte lorsqu'ils décident de la période de plantation. La principale période de récolte s'étend du début de la saison des pluies (mai-juin) jusqu'au mois de septembre. Dans le cas de l'attiéké, la plantation et la récolte sur les sols plus légers peuvent être effectuées toute l'année. Les paysans ont indiqué qu'après le début des pluies, le poids des tubercules augmente car les plants profitent des premières pluies, même après qu'ils soient arrivés à maturité.

#### 8.4. Main d'œuvre

Le manioc est cultivé à la fois par la main d'œuvre familiale, les équipes d'entraide et des ouvriers agricoles. Dans les villages de Sièouba et Facocourou Courani, 91 % des paysans ont indiqué qu'ils utilisaient une main d'œuvre rémunérée, ce chiffre étant de 78 % à Perasso (voir Tableau 4). Cette main d'œuvre rémunérée peut être le groupe du village (appelé « ton ») ou d'autres groupes recrutés temporairement (à la journée ou à la semaine) ou pour une activité précise (par ex. préparation des champs). Même si le manioc peut être récolté pendant les périodes de faible demande en main d'œuvre, la plupart des activités coïncident avec celles des autres cultures (plantation pendant la période où les précipitations sont suffisantes). Cette situation peut engendrer une concurrence pour la main d'œuvre, ce qui peut être particulièrement problématique pour les ménages qui ne disposent que de peu de bras. Le manioc, et en particulier le bonouma cultivé dans les zones humides, est une culture très prenante à cause des opérations de plantation et de récolte qui nécessitent beaucoup de main d'œuvre. En effet, 68 % des paysans dans les deux sous-zones ont indiqué qu'ils passaient plus de temps sur la culture du manioc que sur les autres plantes.

Tableau 4 Main d'œuvre dans la production de manioc.

	Sièouba et Facocourou Courani	Perasso
Passent plus de temps sur le manioc que sur les autres cultures (% des ménages)	69	68
Utilisent une main d'œuvre rémunérée (% des ménages)	91	78

#### 8.5. Rendements du manioc

Les niveaux de rendement moyens varient de manière considérable entre les deux sous-zones. Selon l'enquête par questionnaire, les bas-fonds fertiles donnent des rendements moyens de 1 t/ha aux paysans de Sièouba et de Facocourou Courani, tandis qu'à Perasso, les rendements sont plus ou moins inférieurs de 30 %. Dans les deux cas, ces niveaux de rendement sont beaucoup plus bas que les moyennes nationales de 15-20 t/ha, selon les statistiques de la FAO.

Les rendements sont très variables d'un champ à l'autre, depuis les valeurs très faibles enregistrées sur les sols sablonneux (sur la plaine alluviale plate) sur lesquels le manioc est cultivé depuis plusieurs années sans apport d'engrais, jusqu'aux rendements de l'ordre de 20 t/ha sur les sols humides bien gérés et recevant des quantités adéquates d'engrais. Selon les informations obtenues, les essais sur le terrain effectués dans la zone avec de nouvelles variétés et techniques de culture donneraient des rendements de l'ordre de 30 t/ha. Il convient de noter qu'il arrive assez souvent que le manioc ne soit pas récolté s'il n'y a pas d'acheteurs sur le marché.

### **8.6. Intérêt des paysans pour l'expansion de la culture du manioc**

Dans les deux sous-zones, la grande majorité des producteurs de manioc ont exprimé leur intérêt pour l'expansion de leur production de manioc (90 %). La question de l'incitation par les prix nécessaire pour entraîner une augmentation substantielle de la production de manioc reste entière. Nous l'avons abordée de diverses manières lors de notre mission sur le terrain : premièrement, la question a été posée dans le questionnaire. Deuxièmement, elle a été discutée lors des entretiens avec chaque paysan et avec les représentants des villages. Troisièmement, la question a été posée lors des entretiens en groupe avec les paysans, dans le cadre de l'analyse de la chaîne de valeur du manioc. Par ailleurs, les informations économiques sur les ménages relatives aux sources actuelles de revenus et à la productivité de la main d'œuvre peuvent fournir des informations indirectes. Enfin, les informations obtenues sur les prix actuels peuvent être utilisées comme référence pour une extrapolation à partir de l'hypothèse d'une forte hausse de la demande. Les réponses aux questions hypothétiques concernant les prix susceptibles d'entraîner une augmentation de la production ne sont probablement pas fiables, compte tenu des considérations tactiques des paysans et du manque de spécificité des conditions dans lesquelles la production peut être effectuée. Par conséquent, il n'est pas étonnant que les réponses obtenues varient énormément. Dans les réponses aux questionnaires, les chiffres donnés sont élevés et correspondent probablement à des réponses tactiques. Les prix indiqués sont souvent le double des prix actuels et, s'ils étaient réels, rendraient certainement la production de bioéthanol non rentable. Lors des entretiens, les paysans ont donné des chiffres très différents, montrant ainsi de réelles différences dans leurs préférences et les réponses tactiques. Lors des entretiens en groupe, qui ont permis d'animer une discussion sur les conditions de production, la disponibilité des terres dans le village, etc., les réponses obtenues ont été plus cohérentes. Nous en sommes arrivés à la conclusion qu'un prix de 30-35 CFA pour la variété attiéké récoltée en dehors de l'hivernage était réaliste, à condition de garantir un quota et un prix aux paysans.

Toutefois, les réponses au questionnaire indiquent que des incitations économiques supplémentaires pourraient s'avérer nécessaires si la majorité des paysans devaient étendre leur production de manioc dans les jachères et les champs existants. Une différence statistiquement importante ( $p < 0,01$ ) a été observée entre les trois villages. Des comparaisons post-hoc des moyennes montrent que le prix moyen qui susciterait une expansion est beaucoup plus ( $p < 0,01$ ) élevé à Perasso qu'à Sièouba et Facocourou-Courani. Ce qui démontre un peu plus que les paysans de Sièouba et Facocourou-Courani sont plus motivés que ceux de Perasso pour augmenter leur production de manioc.

L'estimation du prix de 30-35 CFA, nécessaire pour susciter une augmentation de la production, correspond aux prix les plus bas actuellement obtenus pour le manioc attiéké, mais les comparaisons avec les revenus générés par d'autres cultures de rente

(par zone et main d'œuvre) indiquent qu'il serait économiquement attractif pour les paysans. Il correspond au « seuil de rentabilité » mentionné un peu plus haut, c'est-à-dire le niveau de production de bioéthanol économiquement faisable compte tenu d'une série d'hypothèses. Il correspond également aux prix les plus élevés obtenus en Asie du Sud-est pour la production de bioéthanol.

## **9. Evaluation de la viabilité environnementale de la production de bioéthanol**

Pour évaluer la viabilité, nous devons prendre en compte les aspects environnementaux, économiques et sociaux. Dans le contexte actuel, nous n'examinerons que certains aspects de la viabilité environnementale, en nous focalisant sur les impacts sur les stocks de carbone dans la végétation et les sols.

La viabilité environnementale soulève les questions suivantes :

1. Comment la production de bioéthanol à partir du manioc influera-t-elle sur les émissions nettes de GES, à la fois directement et indirectement, au niveau local comme au niveau mondial ? Cette question englobe également l'estimation des effets directs et indirects sur l'utilisation des terres : quelle végétation ou quelles cultures la production étendue de manioc remplacera-t-elle, quels seront les effets indirects sur l'utilisation des terres (liés notamment au déplacement des paysans concernés, au remplacement d'autres plantes et cultures) et quels gains ou pertes en termes de stockage du carbone dans la végétation et les cultures cette production induira-t-elle ?
2. Est-ce que l'expansion ou l'intensification de la production de manioc prendra sur les ressources en eau et en éléments nutritifs des sols, et est-ce que cela sera viable ?
3. Est-ce que l'expansion de la production de manioc provoquera une perte de diversité biologique, à l'échelle locale ou mondiale ?
4. Est-ce que l'expansion de la production de manioc entraînera des changements dans la pollution aux pesticides et aux insecticides, et accélèrera le lessivage des nutriments dans les sols, avec des effets sur les eaux souterraines et de surface ?

Comme indiqué plus haut, nous nous concentrerons sur la première de ces quatre questions. En effet, comparativement, les trois autres semblent poser peu de problèmes :

Ad 2) La production de manioc n'est pas plus exigeante en termes d'utilisation de l'eau par unité de produit que les cultures qu'elle remplace. Les paysans n'irriguent pas. Pour obtenir des rendements élevés, ils doivent utiliser des engrais, mais ceci est vrai pour toutes les cultures.

Ad 3) La question de savoir si l'augmentation de la production de manioc pour le bioéthanol entraîne une perte de biodiversité dépend, bien évidemment, des changements directs et indirects qu'elle induit sur l'utilisation des terres. Selon notre évaluation, une perte de biodiversité n'est constatée que lorsque la forêt est remplacée par des cultures. Le manioc ne remplace directement la forêt que dans quelques rares cas, toutefois nous ne pouvons pas exclure l'éventualité de changements indirects dans l'utilisation des terres.

Ad 4) Actuellement, les producteurs de manioc ne semblent pas utiliser plus de pesticides et d'insecticides que pour les autres cultures. Si le manioc remplace le coton comme culture de rente, la pollution causée par les pesticides et les insecticides devrait être moindre.

Pour toutes ces raisons, nous avons estimé qu'il était justifié de se focaliser sur les effets en termes de carbone.

## **10. Méthodologie et sources de données**

### **10.1. Evolution probable de l'utilisation des terres**

Etant donné que dans la zone d'étude la plupart des terres sont cultivées ou en jachère, l'expansion de la culture du manioc se fera principalement sur des terres déjà cultivées ou en jachère. Pour identifier l'évolution probable de l'utilisation des terres en cas d'expansion de la production de manioc, nous avons utilisé des questionnaires destinés aux ménages (et remplis lors d'entretiens), comme décrit un peu plus haut. Nous avons demandé aux paysans d'expliquer premièrement quelles zones ils utiliseraient s'ils agrandissaient leur production de manioc et deuxièmement quel est le prix au kilo qui les inciterait à étendre leur production. Aux paysans qui ont indiqué leur réticence à augmenter la production de manioc, nous avons demandé d'expliquer quels étaient les obstacles. Les données recueillies sur l'évolution probable de l'utilisation des terres ont été analysées à l'aide de statistiques descriptives.

### **10.2. Modifications des stocks de carbone au dessus du sol dues à l'évolution de l'utilisation des terres ou du couvert végétal**

Les questionnaires destinés aux ménages ont également été utilisés pour évaluer les modifications des stocks de carbone au dessus du sol qu'entraînerait l'expansion de la production de manioc. Nous avons demandé aux paysans d'indiquer s'ils conserveraient ou supprimeraient les arbres dans les champs et les jachères en cas d'agrandissement de la zone cultivée en manioc. Les données recueillies grâce aux questionnaires nous ont permis de structurer l'inventaire relatif à la biomasse au dessus du sol. Pour collecter ces données, nous avons appliqué un échantillonnage systématique et visité les zones dans lesquelles les paysans avaient indiqué qu'ils avaient l'intention de planter du manioc en cas d'expansion de leur production. Ces zones comprenaient des champs déjà cultivés ou en jachère : nous avons demandé aux paysans qui ont indiqué qu'ils avaient l'intention d'utiliser des jachères de les localiser. Lorsque nous avons visité les jachères et les champs cultivés, les paysans nous ont montré les arbres qu'ils avaient l'intention de conserver et de supprimer en cas d'extension de la zone cultivée en manioc. Etant donné que les paysans conserveraient les arbres « utiles », les données relatives aux espèces ont été consignées en séparant les arbres conservés des arbres supprimés. Nous avons choisi cette méthode d'échantillonnage de manière à mesurer à la fois la biomasse conservée et la biomasse détruite au dessus du sol en cas d'expansion de la production de manioc.

Nous avons effectué des évaluations de la biomasse et des stocks de carbone par échantillonnage spatial. Pour échantillonner les jachères, qui couvrent généralement 1 à 2 ha (dimensions typiques d'un champ abandonné), nous avons sélectionné de manière aléatoire 11 parcelles de 20 m. x 20 m. Pour les arbres destinés à être supprimés en cas



d'expansion de la production de manioc, les données recueillies étaient l'espèce et le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) pour tous les troncs dont le DHP  $\geq 0,05$  m. Nous avons également estimé l'âge de la jachère, en inspectant le développement de la végétation et en interrogeant les paysans sur son passé cultural. Nous avons comptabilisé un total de 65 arbres « non utiles » sur les 11 parcelles.

En ce qui concerne les arbres que les paysans ont l'intention de conserver en cas d'expansion de la production de manioc, ils sont moins nombreux et plus dispersés dans les jachères et les champs cultivés. Nous avons donc sélectionné 16 parcelles de 1 ha. Le DHP de tous les arbres dont le DHP  $\geq 0,05$  m. et les espèces ont été recensés. Nous avons comptabilisé un total de 134 arbres conservés sur l'ensemble des 16 parcelles.

Pour effectuer une vérification indépendante des résultats obtenus par l'enquête sur le terrain, nous avons comptabilisé les arbres sur les images satellite haute résolution de janvier 2010. Le nombre d'arbres a été calculé dans les zones de 1 ha dans les parcelles agricoles.

Pour évaluer la biomasse ligneuse, nous avons utilisé cinq équations allométriques. Leurs formes sont comparées dans le Tableau 5. FAO1, FAO2 et FAO3 ont été développées par Brown (Brown, 1997), et chacune de ces équations est associée à des zones climatiques spécifiques, quelles que soient les espèces. Le site d'étude est situé dans la zone associée à FAO1, mais cependant il n'est pas loin du seuil de l'année pluviale<sup>-1</sup> de 1.500 mm. Les deux derniers modèles du Tableau 5 ont été élaborés par Mbow (2009) sur la base des données des savanes guinéennes et soudano-guinéennes à proximité du Sénégal.

*Tableau 5. Equations allométriques pour l'estimation de la biomasse des arbres tropicaux. Y = biomasse par arbre en kg, DHP= diamètre à hauteur de poitrine. Les équations FAO1, FAO2 et FAO3 ont été développées par Brown (1997) et les équations quadratique et polynomiale par Mbow (2009).*

Nom de l'équation	Equation	Fourchette de DHP (cm)	Zone climatique
FAO1	$Y = \exp(-1,996 + 2,32 * \ln(DHP))$	5-40	Zones sèches, année pluviale <sup>-1</sup> <1500 mm
FAO2	$Y = 42,69 - 12,8(DHP) + 1,242(DHP^2)$	5-148	Zones humides, année pluviale <sup>-1</sup> >1500 mm
FAO3	$Y = \exp(-2,134 + 2,530 * \ln(DHP))$	Pas de fourchette	Zones humides, année pluviale <sup>-1</sup> >1500 mm
Quadratique	$49,84 - (10,34 * DHP) + (0,89 * DHP^2)$	Pas de fourchette spécifiée	Savanes guinéennes et soudano-guinéennes au Sénégal
Polynomiale	$0,0225 * DHP^3 - 0,5167 * DHP^2 + 13,613 * DHP - 58,18$	Pas de fourchette spécifiée	Savanes guinéennes et soudano-guinéennes au Sénégal

Les quatre modèles sont illustrés par la Figure 4. Les équations des zones humides (FAO2 et FAO3) donnent à peu près les mêmes estimations de biomasse jusqu'à un DHP de 65 cm. C'est également le cas pour les équations polynomiale et quadratique. L'équation des zones sèches (FAO1) donne des estimations plus basses pour tous les DHP, mais la limite supérieure de DHP est de 40 cm dans FAO1. Pour prendre ces différences en compte, la biomasse des troncs a été calculée pour tous les arbres répertoriés avec un DHP de 40 cm maximum, en utilisant à la fois l'équation des zones sèches et l'équation polynomiale. Pour les DHP entre 40 et 60 cm, la différence est plus grande entre les équations des zones humides et les équations quadratiques, tandis qu'à partir d'un DHP de 60 cm le modèle polynomial donne les estimations de biomasse les plus élevées. Etant donné que le site d'étude est situé dans la zone sèche, les modèles quadratique et polynomial sont utilisés pour les arbres dont le DHP est supérieur à 40 cm.

Comme indiqué dans Fargione et al. (2008) et Williams et al., 50 % de la biomasse ligneuse sèche est considérée comme étant du carbone.

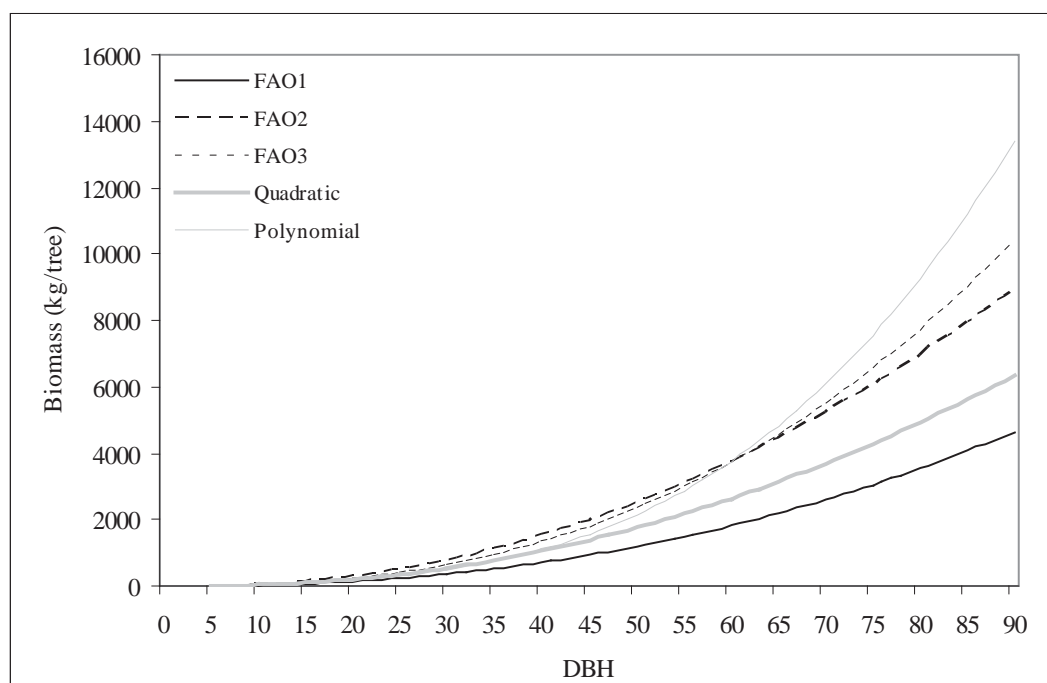


Figure 4 Equations allométriques pour l'estimation de la biomasse des arbres tropicaux. Les équations FAO1, FAO2 et FAO3 ont été développées par Brown (Brown, 1997) et les équations quadratique et polynomiale par Mbow (Mbow, 2009).

### 10.3. Dette de carbone induite par l'évolution de l'utilisation des terres

Pour évaluer les impacts sur le cycle du carbone de l'évolution de l'utilisation des terres, deux approches sont possibles : l'une se focalise sur les changements dans les réservoirs de carbone et l'autre mesure les flux. Aux fins de cette analyse, nous avons choisi la première approche. Elle est fondée sur la méthodologie recommandée dans GIEC (2006) concernant l'estimation des variations dans les stocks de carbone. Nous calculons les

variations des stocks de carbone au dessus du sol lorsque les jachères sont transformées en champs de manioc. Nous ne **prenons pas en compte** les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) et de méthane (CH<sub>4</sub>) dues à l'apport d'engrais, étant donné qu'elles n'ont pas été mesurées dans cette étude. Mais on peut considérer qu'elles sont faibles en se basant sur les estimations effectuées en suivant les directives pratiques internationales en matière de comptabilité des gaz à effet de serre (GIEC, 2006). L'approche choisie comprend trois étapes :

- Estimation des pertes de carbone dans l'atmosphère causées par l'abattage d'arbres, qui est appelée « dette de carbone » (ou plus exactement une partie de la « dette de carbone » étant donné que les pertes dues à la réduction des stocks de carbone tous-terrains ne sont pas prises en compte). Il convient de noter que cette approche ne prend pas en compte la transformation d'une partie du bois en produits (par ex. bois de construction pour les maisons) à longue durée de vie ou en charbon, destiné en principe à remplacer d'autres sources d'énergie. Par conséquent, la « dette de carbone » calculée peut représenter une limite supérieure.
- Estimation de la réduction de l'émission de carbone dans l'atmosphère due au remplacement des combustibles fossiles par du bioéthanol à base de manioc. A terme, ce remplacement pourrait rembourser la dette de carbone calculée.
- Calcul du nombre d'années nécessaire pour rembourser la dette de carbone.

La dette de carbone est calculée à partir de l'estimation du stock de carbone contenu dans la biomasse au dessus du sol. Le taux de remplacement annuel est calculé en multipliant les rendements du manioc ha<sup>-1</sup> dans la zone d'étude par les estimations de quantité de manioc nécessaires pour 1 litre de bioéthanol et un rapport de substitution entre l'essence et le bioéthanol. Enfin, le délai de remboursement est estimé en divisant la dette de carbone par le remboursement annuel de carbone, obtenu par le remplacement des combustibles fossiles par le bioéthanol à base de manioc.

#### **10.4. Echantillonnage et analyse des sols**

La plus grande partie de l'échantillonnage des sols a été effectuée dans le village de Sièouba, où tous les types de sols qui nous intéressent et les passés culturaux sont bien représentés. Nous avons organisé des entretiens en groupe et individuels pour déterminer les types de sols définis par les paysans et l'évolution de l'utilisation des terres à prévoir en cas d'expansion de la culture du manioc. Après avoir fait un tour d'horizon des différents scénarios probables de l'évolution de l'utilisation des terres, nous avons visité les champs et prélevé des échantillons de sols.

#### **10.5. Echantillonnage des sols**

Nous avons creusé un profil de sol (à l'extrémité supérieure d'un billon ou d'une butte dans les champs de manioc) de 50 cm de profondeur, 50 cm de largeur et 50 cm de longueur, en notant les différents horizons du profil. Cinq échantillons spécifiques au volume ont été prélevés sur toute la longueur du profil, avec des intervalles de 10 cm. Dans les champs de manioc, nous avons également prélevé un échantillon de billon.

Dans les champs de riz ou de manioc inondés, où la nappe phréatique était au dessus du niveau du sol entre les billons/buttes, nous n'avons pas pu prélever de profils. Nous avons donc enfoncé un tube en plastique à 50 cm dans le sol (à l'extrémité supérieure d'un billon dans les champs de manioc), puis nous l'avons extrait et emporté pour analyse. Pour la plupart des échantillons, nous avons sectionné les tubes à intervalles de

10 cm (après avoir noté les couleurs aux deux extrémités), puis fait tomber la terre en tapotant doucement dans un anneau spécifique au volume.

Nous avons dispersé les échantillons pour les faire sécher au soleil après en avoir écrasé certains avec une pierre. Ensuite, les échantillons ont été séparés en utilisant la méthode de la pyramide, pesés et emballés pour être envoyés au Danemark. Au Danemark, ils ont encore été écrasés à l'aide d'un broyeur à boulets. Le carbone total a été analysé au laboratoire d'Ecologie physiologique du Département de biologie à l'Université de Copenhague sur un déterminateur de carbone-azote LECO TruSpec.

### **10.6. Horizons de sol**

Le manioc est cultivé sur des billons/buttes de tailles différentes (dépendant, entre autres, de la main d'œuvre disponible). Le système de culture du manioc crée des horizons assez caractéristiques, étant donné qu'il comporte à la fois une couche de terre active dans les billons, par dessus et entre les billons. A chaque récolte, et lors des plantations ultérieures, les billons sont déplacés et reformés dans l'espace entre les billons précédents. Par conséquent, la plus grande partie de la terre reste dans les billons, mais il arrive qu'une petite partie reste sur les buttes précédentes. Lors du sarclage, une partie de la terre entre les billons se mélange à celle des billons. Dans les champs de manioc, nous avons calculé le stock de carbone des sols en additionnant les stocks des billons à des intervalles de 10 cm et sur une profondeur de 50 cm.

### **10.7. Analyses statistiques**

Les données ont été analysées à l'aide du programme statistique R, en utilisant les méthodes décrites dans Bibby et al. (2006). Nous avons effectué une analyse de la variance à un facteur (ANOVA) pour déterminer les différences significatives dans le stock de carbone du sol à une profondeur de 50 cm entre les différentes utilisations des terres dans les scénarios. Des analyses similaires ont été effectuées sur le pourcentage C. Nous avons également effectué une comparaison du stock de carbone des sols cultivés en manioc dans les différents scénarios. Le modèle testé dans R est le suivant :

$$\text{Modèle A : } Y_i = \alpha(\text{Landuse}_i) + e_i, i = 1, \dots, N$$

où  $e_1, \dots, e_N$  sont des variables  $N(0, \sigma^2)$  aléatoires indépendantes et réparties de manière identique. Il convient de noter que les données proviennent d'un plan d'expérience complètement aléatoire, qui n'est pas équilibré. Pour obtenir un graphique des résidus avec une homogénéité de la variance, certaines des réponses doivent être transformées avant d'effectuer l'analyse de la variance à un facteur (ANOVA).

## **11. Résultats**

### **11.1. Evolution escomptée de l'utilisation des terres ou du couvert végétal due à l'expansion de la production de manioc**

Comme décrit ci-dessus, la superficie des terres activement cultivées par ménage est de 7,6 ha en moyenne dans la zone d'étude, mais elle va de 0,5 à 30 ha. L'analyse ANOVA à un facteur ne montre pas de différences statistiquement significatives entre les trois villages. Les dimensions des parcelles de manioc s'échelonnent de 0,1 à 10 ha avec une

moyenne de 2,4 ha. Une différence statistiquement différente ( $p < 0,01$ ) est observée entre les trois villages et les comparaisons post-hoc des moyennes indiquent que les dimensions des parcelles à Perasso sont bien inférieures à celles de Sièouba ( $p < 0,05$ ).

Etant donné que 77 des 82 paysans interrogés cultivent le manioc, cette culture occupe déjà une place importante dans la zone. Cependant, la plupart des paysans sont intéressés par l'expansion de la culture du manioc à cause de l'abandon de la production de coton. Pour l'accroissement de la production de manioc, 74 % des producteurs actuels de manioc indiquent qu'ils exploiteront les jachères (Figure 5), et 60 % en remplaçant le riz, le maïs, le mil ou le sorgho dans les champs déjà cultivés. 45 % des paysans indiquent qu'ils préféreraient utiliser à la fois les jachères et les champs cultivés, tandis que 88 % prévoient d'utiliser soit les jachères, soit les champs cultivés. Ils ont expliqué que leur intérêt pour l'augmentation de la production de manioc est motivé par le revenu supplémentaire qu'elle peut leur apporter. Seulement 12 % des paysans ont indiqué qu'ils n'augmenteraient pas la production de manioc ni dans les champs cultivés, ni sur les jachères. Le motif invoqué est le manque de moyens financiers pour recruter de la main d'œuvre et acheter des intrants (principalement des engrais) pour la production de manioc.

Il convient de préciser que « jachères » qualifie des terres qui n'ont pas été cultivées depuis plusieurs années ou décennies. La période de jachère la plus courte est un an et la plus longue 20 ans. Les espèces ligneuses qui prédominent sur les jachères sont le *kundje* (*Guiera senegalensis*) et le *guesembe* (*Bauhinia rufescens*). Les paysans protègent les arbres utiles dans les champs et les jachères, principalement le *karité* (*Vitellaria paradoxa*), le *nééré* (*Parkia biglobosa*), le *manguier* (*Mangifera indica* L.) et l'*allumeterie* (*Gmelina arborea*). Ces arbres sont préservés parce qu'ils fournissent de la nourriture, des produits médicinaux et de l'ombre.

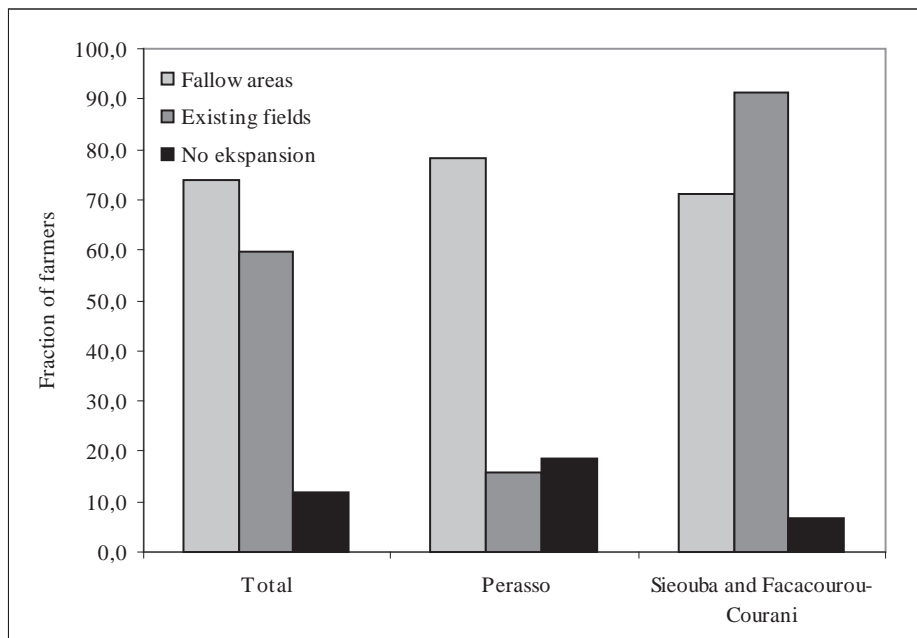


Figure 5. Attitudes des paysans concernant l'expansion de la culture du manioc dans les jachères et les champs déjà cultivés.

Toutefois, en examinant séparément les trois villages, on se rend compte que l'analyse est moins claire. Un test du chi carré montre que le pourcentage de paysans qui ont l'intention d'augmenter la production de manioc en utilisant les jachères ne diffère pas beaucoup entre les trois villages, alors que celui des paysans prêts à planter du manioc dans des champs existants diffère de manière significative ( $p < 0,01$ ). 92 % des paysans de Facocourou-Courani et Sièouba ont l'intention d'utiliser des champs déjà cultivés, alors qu'à Perasso ce pourcentage n'atteint que 16 %. Les paysans de Perasso qui ne souhaitent pas augmenter leur production de manioc sur les champs déjà cultivés expliquent qu'ils préfèrent conserver leurs cultures existantes, probablement pour préserver leur sécurité alimentaire, et que les types de sols dans ces champs ne conviennent pas au manioc.

Par conséquent, la tendance générale dans la zone d'étude est que, dans le cas du manioc attiéké, les paysans préféreraient utiliser les jachères, autrefois plantées en coton, ou l'intégrer dans la rotation actuelle des cultures avec le maïs, le sorgho et le mil. Les impacts sur la sécurité alimentaire locale seraient donc réduits. Par ailleurs, l'expansion de la production de manioc bonouma risque d'entrer en conflit avec la riziculture sur les terres humides à fort rendement. Les impacts de l'augmentation de la production de manioc diffèrent entre les villages à cause des différences en termes de disponibilité des terres : les paysans de Facocourou-Courani et Sièouba ont moins de possibilités que ceux de Perasso d'étendre la zone cultivée et sont donc plus nombreux à exprimer leur intention d'utiliser les champs déjà cultivés.

L'intérêt de chaque ménage pour l'expansion de la production de manioc sera probablement différent en fonction de son accès à la terre. Afin de définir les caractéristiques des paysans indiquant leur intention d'augmenter leur production de manioc et de ceux qui refusent, nous avons effectué quatre tests t pour des échantillons indépendants. Premièrement, nous avons comparé la taille moyenne des terres cultivées des uns et des autres. Deuxièmement, nous avons comparé la taille moyenne des parcelles de manioc de ces deux groupes. Les troisième et quatrième test se sont également focalisés sur la taille moyenne des terres cultivées et des parcelles de manioc, mais les deux groupes comparés sont les paysans désireux d'augmenter la production de manioc sur les champs existants et ceux qui ne le souhaitent pas.

*Tableau 6 Comparaison entre la taille moyenne des terres cultivées et la taille moyenne des parcelles de manioc des paysans ayant l'intention d'augmenter leur production de manioc et ceux qui ne le souhaitent pas.*

Zone d'expansion	Taille moyenne des terres cultivées (ha)		Taille moyenne des champs de manioc (ha)	
	<i>Oui</i>	<i>Non</i>	<i>Oui</i>	<i>Non</i>
Jachères	8,5 ± 5,3	6,3 ± 3,9	2,5 ± 2,4	1,8 ± 1,4
Champs existants	8,7 ± 5,7	6,9 ± 3,7	3,3 ± 2,4	1.1 ± 0,9

Aucune différence significative n'a été constatée lors de la comparaison entre la taille des terres cultivées des paysans désireux d'augmenter leur production sur les jachères et celle des paysans ne souhaitant pas le faire. Par contre, nous avons constaté une différence significative ( $p < 0,05$ ) en comparant la taille des champs de manioc des deux groupes. La taille moyenne des champs de manioc est de 2,5 ha pour les paysans ayant l'intention d'augmenter leur production, tandis qu'elle est de 1,8 ha pour ceux qui ne le souhaitent pas (Tableau 6).

La comparaison entre les paysans désireux d'augmenter la production de manioc sur les champs existants et ceux qui ne le souhaitent pas montre qu'il n'existe pas de différence importante dans la taille des champs cultivés. Toutefois, on constate une différence significative ( $p < 0,05$ ) lorsqu'on compare la taille des champs de manioc. La taille moyenne de ces champs est de 3,3 ha pour les paysans ayant l'intention d'augmenter leur production sur les champs cultivés et de 1,1 ha pour ceux qui ne le souhaitent pas.

Toutefois, étant donné que la superficie des terres cultivées par ménage est bien corrélée avec la taille des champs de manioc ( $R=0,65$ ,  $p < 0,01$ ), la corrélation la plus forte ayant été constatée à Sièouba ( $R=0,88$ ,  $p < 0,01$ ) et la plus faible à Perasso ( $R=0,52$ ,  $p < 0,01$ ), cela pourrait indiquer que les paysans ayant les superficies cultivées les plus grandes et les plus grands champs de manioc sont ceux qui augmenteraient le plus leur production. Ce qui implique que les paysans ayant un bon accès aux terres perçoivent l'expansion de la production de manioc comme une spécialisation potentielle génératrice de revenus, tandis que ceux qui ont moins de terres s'attacheraient plus à garantir la suffisance et la sécurité alimentaires locales, et partant, se focaliseraient plus sur les cultures de subsistance les plus consommées.

### **11.2. Impacts de l'augmentation de la production de manioc sur les stocks de carbone au dessus du sol**

Lors des entretiens et des visites sur le terrain, il est devenu évident qu'en cas d'augmentation de leur production de manioc, les paysans préserveraient les « arbres utiles ». Lorsqu'ils font référence aux arbres utiles, les paysans désignent ceux qui fournissent de la nourriture et ont des propriétés médicinales. La protection des arbres qui fournissent de l'ombre est également essentielle car les paysans ont besoin d'endroits ombragés lorsqu'ils travaillent dans les champs. Seuls 8,5 % des paysans intéressés par l'augmentation de la production de manioc ont indiqué qu'ils supprimeraient tous les arbres. A l'inverse, 61 % des paysans ont affirmé qu'ils conserveraient tous les arbres utiles et les 30,5 % restants qu'ils préserveraient particulièrement les arbres à karité et à néré. Cette tendance claire de préserver les arbres utiles souligne l'importance de faire la distinction entre les arbres préservés et les arbres supprimés lors de l'analyse des effets de l'augmentation de la production de manioc sur les stocks de carbone.

En ce qui concerne les jachères, le DHP moyen des 65 arbres non utiles est de 12 cm, allant de 5 à 33 cm. Le facteur de densité (nombre de troncs d'arbre par ha ayant un DHP  $\geq 0,05$  m) varie entre 25 et 525 arbres  $ha^{-1}$  sur les 11 parcelles, la moyenne étant de 139 arbres  $ha^{-1}$ . En utilisant le modèle allométrique FA01, on obtient une estimation du stock de carbone des troncs de 0,050 Mg C arbre<sup>-1</sup>, qui correspond à 6,9 Mg C  $ha^{-1}$  en termes de facteur de densité. Les valeurs des parcelles s'échelonnent de 0,7 à 16,2 Mg C  $ha^{-1}$  à cause des âges différents des jachères (Figure 6), de la qualité des sols et probablement de l'intensité de pâturage/brotage. L'utilisation du modèle polynomial élaboré par Mbow (Mbow, 2009) donne une estimation du stock de carbone de 9,3 Mg C  $ha^{-1}$  avec des valeurs de parcelles allant de 1,1 à 21,8 Mg C  $ha^{-1}$ .

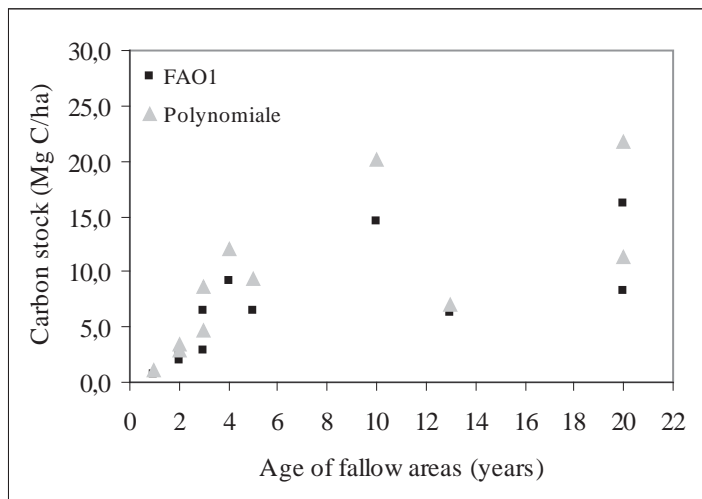


Figure 6. Stock de carbone au dessus du sol ( $Mg\ C\ ha^{-1}$ ) des arbres des jachères sèches que les paysans ont l'intention de supprimer en cas d'augmentation de la production de manioc. Les calculs sont effectués avec le modèle allométrique de FAO (Brown, 1997) et Mbow (2009).

Le DHP moyen des 134 arbres utiles que les paysans ont l'intention de préserver est de 38 cm, allant de 9 à 91 cm. Le facteur de densité varie de 4 à 20 arbres  $ha^{-1}$  avec une moyenne de 8 arbres  $ha^{-1}$ . Aucune différence significative n'a été constatée entre les jachères et les champs cultivés. Le facteur de densité mesuré correspond aux estimations précédentes de densité d'arbres des terres agricoles au Burkina Faso (Gijsbers et al., 1994; Kessler, 1992), confirmé également par la comptabilisation des arbres utilisant les images satellite haute résolution. L'estimation moyenne des stocks de carbone obtenue est respectivement de 0,832 et 0,607  $Mg\ C\ arbre^{-1}$  lorsque les modèles polynomial et quadratique sont appliqués, ce qui équivaut à 7 et 5,1  $Mg\ C\ ha^{-1}$  en termes de facteur de densité.

Par conséquent, nos résultats indiquent que les études considérant que, dans les jachères, l'intégralité de la biomasse au dessus du sol sera détruite lorsqu'elles seront mises en culture surestiment la perte de carbone au dessus du sol de 42 %, comme le montre la Figure 7. Cependant, étant donné que la plupart des paysans préféreraient étendre la production dans les zones ayant été mises en jachère pendant une période relativement courte, de l'ordre de 5 ans, les jachères les plus récentes sont celles qui auront le plus de chances d'être utilisées. Si l'on prend ces données en considération, l'hypothèse selon laquelle la biomasse au dessus du sol serait entièrement détruite signifierait une surestimation de 52 % des pertes de carbone résultant de l'évolution de l'utilisation des terres.



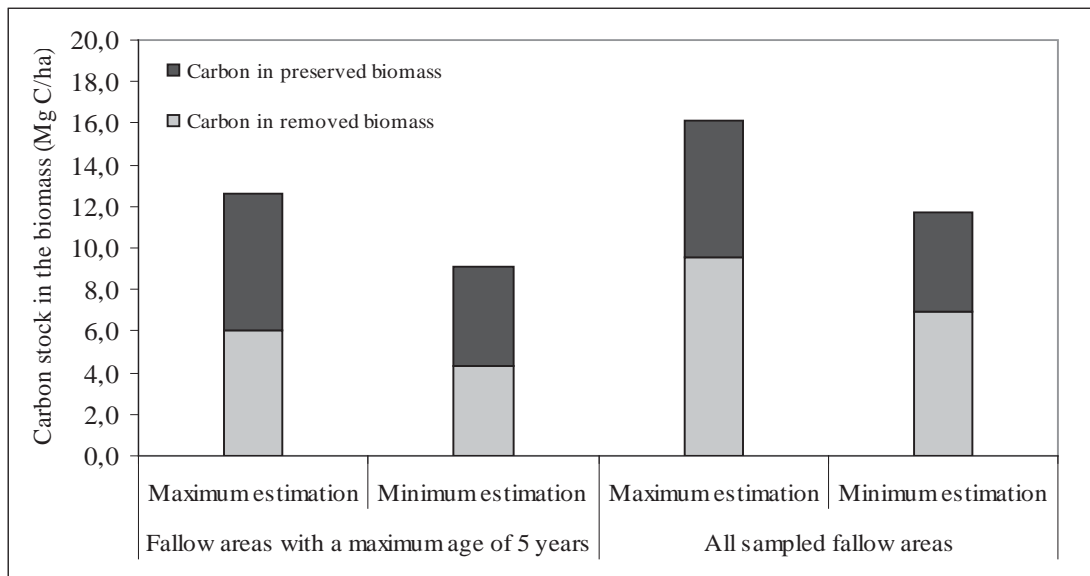


Figure 7 Stock de carbone au dessus du sol ( $Mg\ C\ ha^{-1}$ ) de la biomasse que les paysans ont l'intention de préserver et de supprimer en cas d'expansion de la production de manioc. La valeur maximum représente les calculs effectués à l'aide du modèle allométrique polynomial, tandis que les valeurs minimum représentent les calculs effectués à l'aide du modèle FAO1 pour la biomasse supprimée (DHP entre 9 et 91 cm).

### 11.3. Délai de remboursement de la dette de carbone

Pour calculer le délai de remboursement de la dette de carbone (uniquement pour les pertes de carbone au dessus du sol), la perte de carbone résultant de l'évolution de l'utilisation des terres, estimée ci-dessus, doit être divisée par la réduction annuelle nette des émissions de carbone dans l'atmosphère obtenue par le remplacement des combustibles fossiles par du bioéthanol. Pour évaluer cette réduction nette, nous devons déterminer les émissions annuelles engendrées par la pratique culturale, sans oublier l'utilisation d'engrais. Si l'on se base sur les quantités actuelles d'engrais utilisées dans la zone d'étude, en tenant compte des lignes directrices du GIEC concernant les émissions provenant des engrais, les émissions correspondent à moins de  $0,06\ Mg\ C/ha$  par an. Compte tenu des incertitudes qui existent et du fait que cette émission n'atteint que 0,5-1,5 % des émissions de carbone causées par les changements provoqués dans la biomasse au dessus du sol, nous n'en avons pas tenu compte dans nos calculs ultérieurs.

Etant donné que 7 kg maximum de tubercules de manioc frais sont nécessaires pour obtenir 1 litre de bioéthanol (Nguyen et al., 2007; Silalertruksa et al., 2009), un rendement de  $9,3\ Mg$  de tubercules de manioc  $ha^{-1}$  pour la variété bonouma et de  $9,7\ Mg\ ha^{-1}$  pour l'attiéké permet d'obtenir respectivement 1239 et 1292 litres de bioéthanol  $an^{-1}\ ha^{-1}$ . Ces quantités de bioéthanol peuvent remplacer 805 et 840 litres d'essence, étant donné que le taux de remplacement de l'essence par l'éthanol est de 1:0.65 (Henke et al., 2005). Ce remplacement implique un bénéfice de carbone de  $0,59\ Mg\ C\ an^{-1}$  pour le bonouma et de  $0,61\ Mg\ C\ an^{-1}$  pour l'attiéké (considérant que la combustion de 1 l. d'essence émet  $0,00267\ Mg\ CO_2$  (EPA (United States Environmental Protection Agency), 2005)). Etant donné que l'écart entre les deux variétés est insignifiant, la dette de carbone et le nombre d'années de remboursement de cette dette sont calculés en

utilisant le taux de remboursement annuel applicable au bonouma, étant donné qu'il s'agit de la variété dominante dans la zone d'étude.

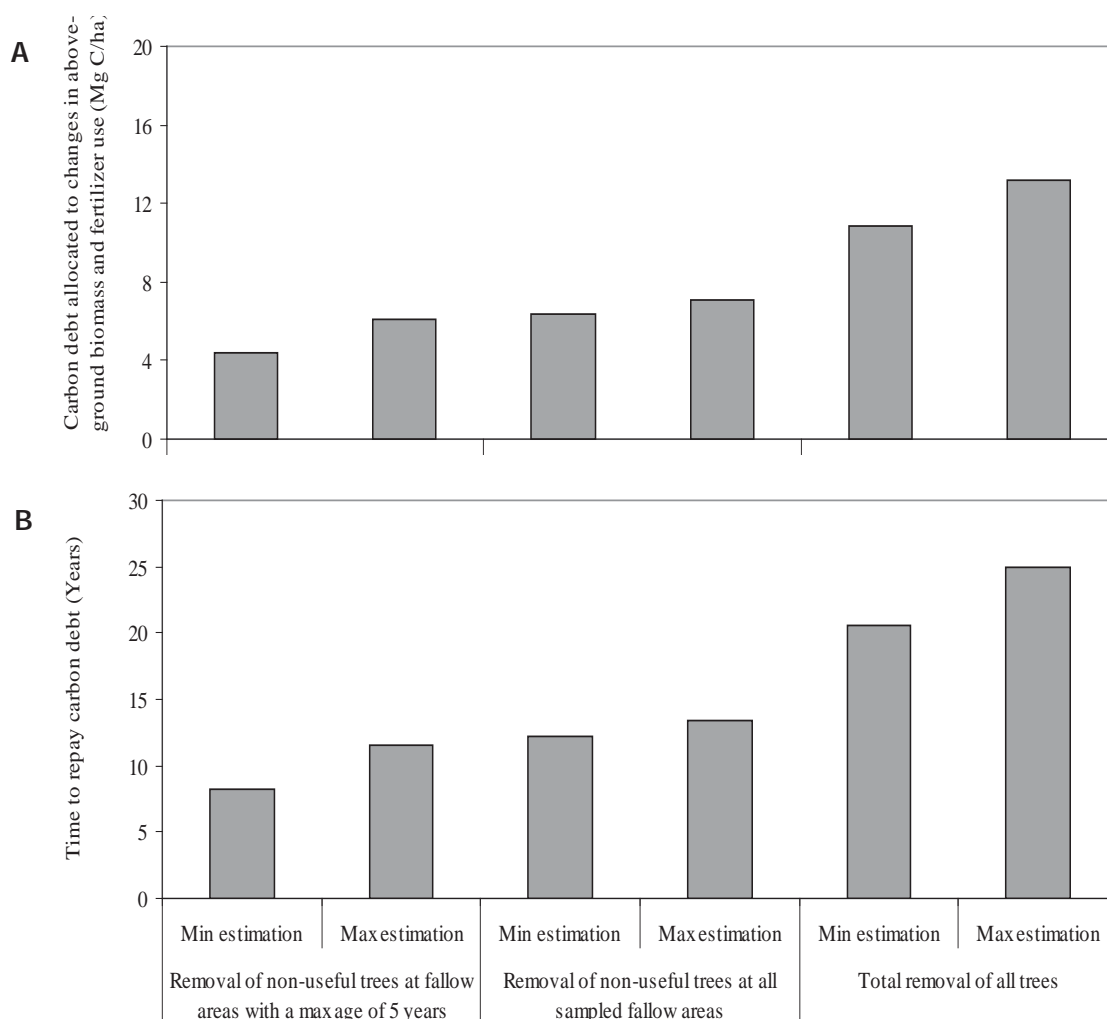


Figure 8 Dette de carbone et délai de remboursement pour trois scénarios de transformation de jachères en champs de manioc. Les valeurs maximum représentent les calculs effectués avec le modèle allométrique polynomial, tandis que les valeurs minimum représentent les calculs utilisant le modèle FAO1 pour la biomasse détruite (DHP < 40 cm) et le modèle quadratique pour la biomasse conservée (DHP entre 9 et 91 cm). (A) Dette de carbone correspondant aux changements en termes de biomasse au dessus du sol et d'application d'engrais. (B) Nombre d'années nécessaire après la transformation des jachères en champs de manioc pour rembourser la dette de carbone lorsque l'essence est remplacée par du bioéthanol.

Nos résultats montrent que la transformation de jachères en champs de manioc génère des dettes de carbone de 6,4 à 7,1 Mg C ha<sup>-1</sup> (en fonction du modèle allométrique utilisé) lorsque les paysans préservent les arbres utiles. Par conséquent, le délai de remboursement de la dette de carbone serait de 12 et 14 ans (Figure 8). Une analyse de la sensibilité montre que premièrement, si les paysans n'utilisent que les jachères n'ayant

pas plus de 5 ans, il faudra entre 8 et 12 ans pour rembourser la dette de carbone. Deuxièmement, les études qui considèrent que la mise en culture des jachères entraînerait une suppression totale de la biomasse au dessus du sol donneraient une estimation de 21 à 25 ans pour le remboursement de la dette de carbone. Si les paysans plantent du manioc à la place d'autres cultures, il y aura peu ou pas de réduction des stocks de carbone au dessus du sol, étant donné que les arbres présents dans les champs ne seront pas touchés, et donc pas de dette de carbone.

## **12. Changements dans les stocks de carbone tous-terrains**

### **12.1. Réservoir de carbone dans les racines**

Nous disposons de très peu d'informations sur l'importance du réservoir de carbone dans les racines et comment il est affecté par la destruction des arbres. Nous partirons de l'hypothèse standard que le « rapport des systèmes racinaire/foliacé » est 1:1, et que tout le carbone dans les racines finit par disparaître lorsque les jachères sont remplacées par du manioc, ce qui doublerait les pertes de carbone au dessus du sol indiquées ci-dessus, multipliant par deux donc les délais de remboursement. Il s'agit évidemment d'une hypothèse approximative, mais tant que nous ne disposerons pas de données plus empiriques sur le réservoir de carbone dans les racines ce sera la meilleure estimation.

### **12.2. Types de sols**

Les entretiens en groupe nous ont permis d'identifier différents types de sols, notamment « lè bogo » et « tien tien ». En langue Bambara, « lè » signifie « humide », « bogo » signifie « terre » et « tien » signifie « sable ». Le « lè bogo », localisé dans les bas-fonds, est plus argileux que le « tien tien » et pose parfois des problèmes de drainage. Pendant l'hivernage, le niveau d'eau dans les zones humides de « lè bogo » peut être élevé et atteindre jusqu'à 10-20 cm au dessus du sol entre les billons/buttes. Les sols sablonneux « tien tien » ne retiennent pas beaucoup d'eau. Ils sont situés entre les zones humides et l'escarpement (voir Figure 1).

### **12.3. Scénarios d'utilisation des terres envisagés**

A Siéouba, trois scénarios différents d'expansion de la culture du manioc entraînant des changements dans l'utilisation des terres ont été étudiés. Sur les sols « lè bogo », le scénario prévoit que les paysans remplacent les jachères et le riz par du bonouma. Sur les sols « tien tien », ils étendront la culture du manioc en utilisant les jachères. Les premières années d'utilisation des jachères, ils cultiveront de l'attiéké. Toutefois, après avoir fait des bénéfices sur la production d'attiéké, ils pourront acheter de l'engrais et le remplacer par du bonouma. Nous avons établi un calendrier (chronoséquence) artificiel pour chaque scénario, contenant trois points avec trois ou quatre valeurs en double pour chacun. Le point de départ est le sol de référence, c'est-à-dire l'utilisation actuelle des terres qui seront transformés en champs de manioc. Les deux points suivants du calendrier représentent respectivement les cultures à court terme (2 à 3 ans) et à long terme (5 à 10 ans) du manioc dans l'ordre.

#### 12.4. Calcul des modifications dans les stocks de carbone

Le stock de carbone calculé dans le sol à une profondeur de 50 cm sur une étendue de un hectare se situe entre 33 et 74 Mg C/ha (voir Figure 9).

L'analyse statistique ne montre aucune modification importante du stock de carbone dans le sol en cas de passage d'une jachère à un champ de manioc sur un sol « tien tien » ou d'un champ de riz à un champ de manioc sur un sol « lè bogo ». Cependant, lorsqu'une jachère est remplacée par du manioc sur un sol « lè bogo », une augmentation importante (\*,  $p = 0,02$ ) du stock de carbone dans le sol est prévisible, surtout à court terme (dans les 2-3 premières années). Il n'y a pas de différence importante entre le scénario à court terme et le scénario à long terme. Selon les estimations, le stock de carbone serait d'environ 50 Mg C/ha dans le sol de la jachère « lè bogo » à une profondeur de 50 cm, 64 Mg C/ha dans les terres cultivées en manioc à court terme et 72 Mg C/ha dans les terres cultivées en manioc à long terme.

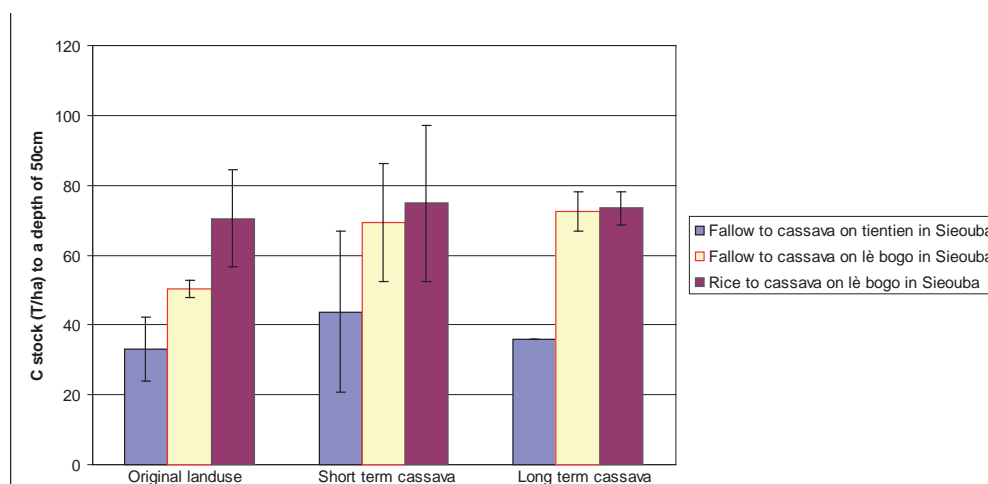


Figure 9 Stocks de carbone dans le demi-mètre supérieur du sol pour les trois scénarios de changement dans l'utilisation des terres

Lorsque les terres cultivées en manioc à court terme et à long terme (dont l'histoire de l'utilisation des terres et les types de sol sont similaires) sont regroupées, l'analyse ANOVA à un facteur montre que le stock de carbone (\*\*\*,  $p=0,0003$ ) est beaucoup plus important dans les sols « lè bogo » (respectivement 69 Mg C/ha après une jachère et 73 Mg C/ha après le riz) que dans les sols « tien tien » (38 Mg C/ha).

La Figure 10 illustre le pourcentage de contenu C dans l'horizon A correspondant aux différents types de sol et utilisations des terres. Les analyses statistiques montrent qu'il n'existe pas de différence importante entre le pourcentage C de l'horizon A avant et après le passage de la jachère à la culture du manioc sur les sols « tien tien » et du riz au manioc sur les sols « lè bogo ».

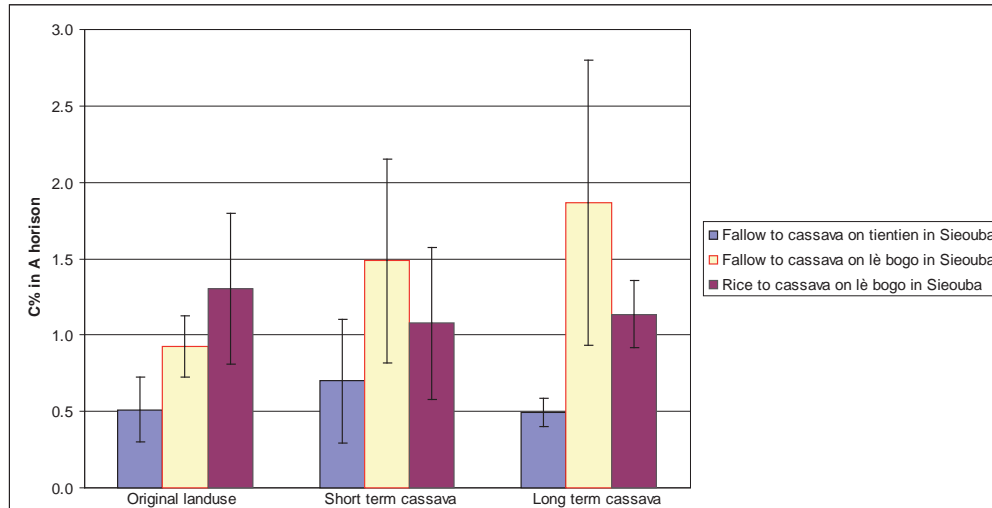


Figure 10 Concentration de carbone (en %) dans l'horizon A pour trois scénarios d'utilisation des terres

Cependant, le pourcentage C augmente de manière importante (\*,  $p=0,09$ ) dans le scénario de passage de la jachère (0,91 % C) à la culture du manioc à court terme (1,3 % C) sur des sols « lè bogo », et de manière encore plus importante (\*,  $p=0,02$ ) dans le scénario de passage de la jachère à la culture du manioc à long terme (1,66 % C), bien qu'il n'y ait pas de différence importante entre la culture du manioc à court terme et à long terme. Il n'existe pas de différence importante du pourcentage C dans l'horizon B entre la jachère et la culture du manioc sur des sols « lè bogo ».

### 12.5. Explication des changements dans les stocks de carbone dans le sol

Les résultats des six semaines de travail sur le terrain effectué à Sièouba montrent que le stock de carbone dans le sol mesuré est assez cohérent avec les valeurs de la cartographie mondiale du carbone actualisée par le PNUE (Sharlemann et al. 2009). Toutefois, ils montrent également de grandes variations du stock de carbone dans le sol à l'intérieur d'une zone très limitée, indiquant que le type de sol et l'utilisation des terres ont des impacts importants sur ce stock.

Si la culture du manioc devait être étendue dans cette zone, à la place des jachères sur les sols « « tien tien » et « lè bogo » et des champs de riz sur les sols « lè bogo », le stock de carbone ne devrait pas diminuer à une profondeur de 50 cm. Au contraire, une augmentation du stock de carbone serait à prévoir dans le scénario de remplacement d'une jachère « lè bogo ». Cette augmentation du pourcentage de carbone serait limitée à l'horizon A. Cette constatation pourrait indiquer que l'augmentation du carbone résulterait du changement de gestion lors de la mise en culture des terres. La fertilisation augmente la production de matière végétale et le sarclage entre les billons de manioc permet d'introduire fréquemment de l'engrais vert dans le sol. Cependant, l'écart standard dans les estimations est considérable, ce qui implique que dans certains cas les changements ne sont significatifs que sur le plan statistique.

Il convient de noter également que les champs de manioc émettent probablement moins de  $CH_4$  que les champs de riz, car ils sont inondés pendant une courte période et seulement partiellement. D'autres analyses seront nécessaires pour tester cet aspect.

### **13. Analyse, conclusions et incidences politiques relatives aux impacts sur les stocks de carbone**

Le débat autour des émissions de carbone et des changements dans l'utilisation des terres résultant de l'expansion de la production de biocarburants, ainsi que le soutien aux politiques de développement des biocarburants, doivent s'appuyer sur une étude empirique détaillée portant sur un site donné, comme celle présentée dans le présent document. Les conclusions qui peuvent être tirées des résultats présentés sont les suivantes :

- L'expansion de la production de manioc pour le bioéthanol entraînera probablement la transformation de jachères, dont certaines étaient auparavant cultivées en coton, en champs de manioc. Dans d'autres cas, cette expansion se fera par le remplacement d'autres cultures ou par l'intensification de la rotation des cultures.
- Les estimations de réduction des stocks de carbone dans la biomasse au dessus du sol, résultant de la transformation de jachères en champs de manioc, sont de l'ordre de 4 – 13 Mg C ha<sup>-1</sup>, en fonction de (a) l'âge de la jachère, (b) l'équation allométrique appliquée et (c) la décision de supprimer ou non tous les arbres ou de conserver les arbres les plus grands et ceux ayant une utilité.
- Le remplacement des combustibles fossiles par le bioéthanol produit à partir du manioc cultivé sur des jachères entraînera une réduction des émissions de l'ordre de 0,5 Mg C ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>.
- Cela implique que l'estimation du « délai de remboursement » de la « dette de carbone » correspondant à la perte de biomasse au dessus du sol se situe entre 8 et 25 ans.
- Nous en savons très peu sur le réservoir de carbone dans la biomasse racinaire, mais nous supposons que son importance, ainsi que les changements résultant de la suppression de la végétation sur les jachères, ont le même ordre de grandeur que ceux du réservoir de carbone au dessus du sol, entraînant la multiplication par deux du « délai de remboursement ».
- Les modifications des stocks de carbone dans le sol, dues à l'augmentation de la production de manioc à la fois dans les zones humides « lè bogo » (bonouma) et sur les plateaux « tien tien » (cultivés principalement en attiéké), sont relativement réduites et n'influent pas beaucoup sur le délai de remboursement. La réduction des émissions de CH<sub>4</sub> due au remplacement du riz par du manioc dans les zones humides pourrait être importante, mais nécessite des études supplémentaires.

Le délai de remboursement présenté peut être considéré comme court dans le contexte d'autres systèmes de production de biocarburant. Les résultats confirment largement les conclusions de Gibbs et al (2008) qui utilisent une nouvelle base d'emplacements et de rendements des cultures, ainsi que des estimations actualisées de la biomasse de la végétation et du sol. Pour un rendement du manioc et un facteur de conversion du bioéthanol similaires, ils estiment que le délai de remboursement atteindra respectivement 19 et 50 ans, après transformation des terres arbustives et des prairies en champs de manioc dans les régions tropicales sèches de l'Afrique sub-saharienne. Mais

étant donné que les jachères de notre zone d'étude ne sont pas à strictement parler des zones arbustives, ni des prairies (ni des régions « sèches »), une comparaison rigoureuse n'est pas possible. Notre étude diffère également des conclusions de Gibbs et al (2008) sur le fait que nous prévoyons la conservation des arbres utiles.

### **13.1. Incertitudes**

Comme nous l'avons indiqué ci-dessus, les données relatives au stockage du carbone dans la biomasse sous-terrainne sont rares, car la méthode standard pour mesurer la biomasse racinaire demande beaucoup de main d'œuvre (Bruun et al., 2009) et il n'existe pas de données empiriques représentatives de la zone d'étude. En ce qui concerne les pertes de carbone dans le sol, Elberling et al. (2003) ont trouvé des valeurs de l'ordre de 11 Mg C ha<sup>-1</sup> (sur une période de 40 ans) lorsque les jachères ou les zones de savane sont cultivées dans un environnement un peu plus sec. Pour ce qui est du rapport des systèmes racinaire/foliacé, Mokany et al. (2006) suggèrent un rapport de 2 pour les zones arbustives. Cependant, les deux estimations doivent être prises avec circonspection, car les pertes de carbone dans le sol peuvent varier en fonction de la profondeur de labour, etc., et les rapports calculés par Mokany et al. (2006) pour les zones arbustives se situent entre 0,3 et 4,3 à cause de facteurs tels que la disponibilité de l'eau et des nutriments.

Des études supplémentaires portant sur plusieurs points sont nécessaires dans des environnements comparables à la zone d'étude, afin d'obtenir des estimations plus précises des pertes de carbone et des délais de remboursement :

- Les équations allométriques ont besoin d'être validées.
- Etudes empiriques du rapport biomasse souterraine/biomasse au dessus du sol.
- Evaluation des effets de l'expansion de la production de manioc dans les zones humides sur les émissions de CH<sub>4</sub>.
- Estimation empirique des changements dans les émissions de N<sub>2</sub>O associées à l'utilisation d'engrais dans les champs de manioc. Cette analyse est en cours.
- Analyse des possibilités d'augmenter les rendements du manioc au-delà du niveau observé. Des rendements de l'ordre de 20 – 40 Mg ha<sup>-1</sup> sont décrits dans des environnements similaires, ce qui réduirait beaucoup les délais de remboursement.
- Les produits dérivés du manioc et la production de bioéthanol remplaceraient probablement d'autres produits, par ex. dans l'alimentation du bétail, et les conséquences de ces stocks/flux de carbone doivent être prises en compte.

### **13.2. Incidences politiques**

Les principales conclusions de la présente étude sur la viabilité environnementale ont des incidences politiques.

Premièrement, la « dette de carbone » et le « délai de remboursement » liés à l'augmentation de la production de manioc pour produire du bioéthanol dépendent bien évidemment des changements que cela implique dans l'utilisation des terres : si des forêts sont remplacées par des champs de manioc, les dettes de carbone seront élevées et le délai de remboursement extrêmement long. Mais ce n'est quasiment pas le cas. Si le manioc remplace une jachère âgée de 10-15 ans, le délai de remboursement (prenant en compte les niveaux de rendement actuels) sera de l'ordre de quelques décennies, et s'il

remplace d'autres cultures annuelles, la dette de carbone sera nulle. Dans le cas du remplacement de jachères par des champs de manioc, qui est l'hypothèse la plus probable dans la zone d'étude, il est intéressant de noter qu'une bonne partie de ces jachères étaient plantées en coton il y a 5 à 10 ans, avant la chute des prix du coton au Mali, et que l'estimation précise de la dette de carbone dépendra donc de l'année de référence choisie. Du point de vue des paysans, ils remplacent une culture, le coton, par une autre, n'engendrant pas de dette de carbone. L'équilibre à trouver entre soutenir le développement d'un marché du manioc exploitant les jachères et réduire au minimum les émissions involontaires de carbone est donc un problème difficile dont les responsables politiques doivent tenir compte.

Deuxièmement, même si l'on part souvent du principe que lorsqu'on agrandit la zone cultivée l'intégralité du stock de carbone dans la végétation ligneuse est perdue, nous affirmons que ce n'est pas le cas. La conservation de ce que les paysans considèrent comme des « arbres utiles » permet de préserver la moitié environ du stock de carbone. Cette pratique doit être conservée et encouragée.

Troisièmement, pour obtenir des rendements suffisamment élevés, l'utilisation d'engrais est nécessaire dans les champs de manioc, engendrant à la fois des émissions de N<sub>2</sub>O et des problèmes de qualité de l'eau. Les effets nets des changements dans l'utilisation des terres dépendent, là encore, de la situation de référence, à savoir coton ou jachère.

## **14. Impact social et durabilité**

Les impacts sociaux et la viabilité de l'augmentation de la production de bioénergie ont été abondamment débattus, comme nous l'avons indiqué dans l'introduction. Nous répondrons aux questions suivantes :

- Quels sont les impacts probables de la production de bioéthanol à partir de manioc sur la pauvreté et les moyens de subsistance ?
- Comment sont structurées les chaînes de valeur, et quelles sont leurs implications en termes de conséquences sociales de la production de bioéthanol à partir du manioc ?
- Est-ce que les inégalités qui existent (liées à l'ethnie, au statut social, à l'âge ou au genre) en matière d'accès aux ressources naturelles et aux opportunités de revenus seront affectées par le lancement d'une production de bioéthanol à partir du manioc ?
- Est-ce que la sécurité alimentaire aux niveaux local, régional, national et international sera menacée par le lancement d'une production de bioéthanol à partir du manioc ?

### **14.1. Impacts sur l'économie des ménages et les moyens de subsistance**

Les informations sur les impacts de l'augmentation hypothétique de la production de manioc pour le bioéthanol ont été recueillies via une enquête par questionnaire auprès des ménages, des entretiens en demi-groupes et des entretiens approfondis avec les personnes interrogées. Comme nous l'avons vu plus haut, le manioc occupe déjà une



place importante dans l'économie locale, spécialement à Sièouba et Facocourou Courani. Les principaux problèmes que les paysans rencontrent en ce qui concerne l'économie des ménages sont les suivants :

- Revenus insuffisants, suite au déclin de l'« économie du coton »,
- Incertitude liée à la demande de manioc sur le marché, ce qui implique que dans beaucoup de champs le manioc n'est jamais récolté et les paysans perdent les intrants investis,
- Peu de revenus en espèces pendant la saison sèche, où la demande de manioc est limitée et particulièrement instable.

Par conséquent, la création d'un marché du manioc stable, garanti et pendant toute l'année, avec des prix garantis, serait vraiment la bienvenue. Cependant, comme nous l'avons vu plus haut, la question qui persiste est de savoir si le prix proposé pour le manioc destiné à la production de bioéthanol sera suffisamment élevé pour stimuler la production. Si elle n'est pas subventionnée, la production de bioéthanol ne sera probablement pas rentable, à moins que le manioc soit disponible à un prix n'excédant pas 30-35 CFA/kg. Les avis des paysans sur cette question divergent, mais il semble toutefois qu'un prix garanti de 30 CFA/kg pour une quantité contractuelle de manioc par ménage entraînerait l'augmentation nécessaire de la production. Dans la zone d'étude, aucune autre culture ne pourrait produire une valeur brute de 300-600.000 CFA/ha. L'agriculture sous contrat, telle qu'elle est décrite ici, a pour effet supplémentaire que l'utilisation de main d'œuvre – et d'apports en capital, y compris des engrais - deviennent moins risqués, ce qui pourrait se traduire par une augmentation des rendements.

Une augmentation de la zone cultivée et/ou de l'intensité de main d'œuvre exigera que la main d'œuvre soit disponible au moment opportun. Selon les réponses aux questionnaires et les informations recueillies lors des entretiens, la majorité des ménages de paysans déclarent qu'ils disposent d'une main d'œuvre abondante. Si l'on prend en compte la concentration des tâches agricoles pendant l'hivernage, il n'est pas du tout évident que ce surplus de main d'œuvre soit disponible de juillet à septembre, période pendant laquelle se concentre la majeure partie du travail de récolte, de préparation des champs (y compris la construction des billons/buttes) et de plantation du bonouma. Les prix élevés obtenus pour le bonouma pendant l'hivernage (> 45 CFA/kg), soit de juillet à septembre, incitent les paysans à donner la priorité à cette production. Par ailleurs, les réponses indiquent qu'il est très probable que la main d'œuvre soit abondante en dehors de l'hivernage.

Du point de vue aussi bien des coûts que de la main d'œuvre, il apparaît que la production de manioc pour le bioéthanol devrait être localisée principalement dans les plaines sablonneuses et les interfluves, et que la variété attiéké, qui peut être récoltée et plantée toute l'année, serait la plus adaptée.

#### **14.2. Analyse de la chaîne de valeur du manioc**

Les résultats suivants qui concernent la chaîne de valeur du manioc découlent de l'observation directe, des entretiens menés lors d'une mission en novembre 2010 et complétés par les réponses aux questionnaires :

- Selon nos observations, la chaîne de valeur du manioc peut être divisée en deux volets distincts : l'un concerne (presque) exclusivement la variété bonouma et l'autre (presque) exclusivement la variété attiéké.
- Le volet bonouma (environ 80 % de la production de manioc) se caractérise par une récolte qui a lieu pendant l'hivernage (juillet à septembre), avec de petites quantités récoltées entre avril et juin, ainsi qu'en octobre-novembre. Les tubercules entiers de bonouma sont transportés principalement vers les marchés du nord du pays, en particulier à Ségou et Mopti, où ils sont utilisés pour la consommation humaine pendant l'hivernage lorsque les autres produits alimentaires se raréfient. Les prix proposés aux paysans par les commerçants varient (entre 30 et 100 CFA/kg), mais en général ils sont relativement élevés (>45 CFA/kg).
- Le volet attiéké (environ 20 % de la production) se caractérise par des récoltes qui ont lieu toute l'année (avec probablement des quantités plus réduites pendant l'hivernage lorsque la main d'œuvre est occupée à récolter et planter du manioc bonouma). Les récoltes de manioc attiéké sont achetées principalement par les groupements féminins qui transforment les tubercules en couscous attiéké, vendu soit « mouillé » pour une consommation immédiate, soit séché. Il est consommé localement, en grande partie à Sikasso. Des quantités plus petites sont vendues à Bamako, mais dans la capitale la majeure partie de l'attiéké vendu est importée de Côte d'Ivoire. Les prix proposés aux paysans varient moins que ceux du bonouma et se situent entre 30 et 45 CFA/kg.
- Étant donné que la production de bioéthanol nécessite un flux régulier de produits de départ toute l'année, elle ne peut pas être basée sur le bonouma, sauf si les pratiques agricoles changent de manière importante. L'expansion de la production de bonouma pour le bioéthanol est peut-être possible, mais elle entrerait en concurrence avec sa présente utilisation pour la consommation humaine dans les régions de Ségou et Mopti, et les prix obtenus actuellement sur le marché du manioc sont si élevés que la production de bioéthanol ne pourrait pas rivaliser.
- La production d'attiéké correspond mieux aux besoins de la production de bioéthanol. Le niveau des prix est plus compatible avec le niveau réaliste pour la rentabilité de la production de bioéthanol.

Par conséquent, la chaîne de valeur aboutit à la conclusion qu'il serait préférable de se concentrer sur l'attiéké dans la planification de la production des produits de départ d'une unité de production de bioéthanol. Heureusement, cette conclusion coïncide avec les résultats de l'analyse reposant sur les coûts et la main d'œuvre. Le principe est illustré par la Figure 11.

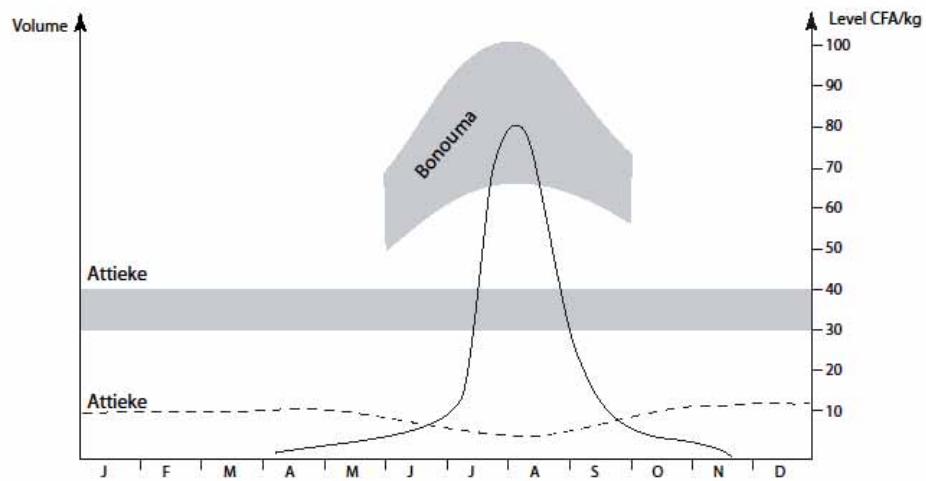


Figure 11 Variations sur l'année des volumes de production et des niveaux de prix des variétés de manioc bonouma et attiéké. Les lignes pleines et en pointillés indiquent les volumes relatifs, les zones en gris montrent les écarts de prix.

Actuellement dans les villages, la production de manioc est vendue aux commerçants. Dans le cas du bonouma, les commerçants viennent à la fois de Sikasso, de Ségou et de Mopti pendant la haute saison (juillet à septembre), tandis que la commercialisation de l'attiéké qui dure toute l'année est essentiellement aux mains des commerçants et transporteurs de Sikasso, cette production étant vendue principalement sur le marché de Sikasso. Les commerçants sont en relation avec des « hôtes » dans chaque village. Ces hôtes reçoivent les commandes des commerçants et s'organisent pour que les quantités demandées de manioc soient livrées à la date et à l'endroit fixés. Ils négocient également le prix. Par conséquent, les hôtes jouent un rôle clé dans l'organisation de la commercialisation. Une unité de production de bioéthanol peut être mise en place sur la base de ce système, ou sur des contacts avec les coopératives. Les coopératives sont bien connues dans la zone d'étude, mais elles se concentrent surtout sur la production de manioc et commencent à peine à s'intéresser à la commercialisation.

### 14.3. Impacts sur l'égalité

Les effets différentiels escomptés du lancement d'une production de bioéthanol dans le secteur sur les revenus et l'accès aux ressources peuvent être déduits des résultats obtenus :

- Les ménages ayant un bon accès à la terre seront probablement en meilleure position pour tirer parti des nouvelles opportunités de revenus, ce qui entraînera une augmentation des différences de revenus. Ces différences existent à la fois dans chaque village et entre les villages. Ainsi, un village tel que Perasso, doté d'un assez grand nombre de terres « tien tien », devrait être en meilleure position pour tirer profit de la demande accrue d'attiéké toute l'année. Toutefois, même les personnes venant d'autres régions du Mali peuvent obtenir des terres à cultiver, ce qui indique qu'actuellement les terres ne manquent pas. Cette situation est facilitée en outre par l'existence de jachères relativement étendues.
- Les paysans qui participent à la commercialisation du manioc, en tant que négociants, hôtes ou transporteurs, seront fortement affectés par les éventuels changements dans le système de commercialisation existant. Soit ces changements se traduiront par de nouvelles opportunités, si la société qui fera fonctionner l'unité de production du bioéthanol utilise le système existant, soit leur position sera affaiblie si ce système est remplacé par une autre organisation, par exemple des contacts directs entre les paysans et la société ou des coopératives jouant le rôle d'intermédiaires. Les entretiens menés, en particulier à Sièouba, ont indiqué que le système actuel reposant sur des commerçants et des hôtes est menacé par le développement des coopératives. D'autres études sont en cours pour approfondir cette question. Il convient de noter que si la production de bioéthanol n'était basée que sur la variété attiéké, comme nous le recommandons, l'impact sur la chaîne de valeur du bonouma ne serait probablement pas très important.

#### **14.4. Implications en termes de sécurité alimentaire**

Les observations ci-dessus montrent qu'une augmentation de la demande de manioc, en particulier l'attiéké, pour la production de bioéthanol, influera de manière significative sur la production agricole locale et la situation économique des ménages. En ce qui concerne les effets sur la sécurité alimentaire locale, au niveau des ménages et des villages, nous estimons que même si l'expansion de la zone cultivée en attiéké peut se faire partiellement au détriment des cultures de subsistance, notamment en renforçant le rôle du manioc dans la rotation des cultures, il semble peu probable que cela aura des impacts négatifs sur la sécurité alimentaire locale, pour les raisons suivantes :

- La production agricole de la zone d'étude est supérieure à la demande alimentaire locale.
- Il existe des jachères disponibles (dont certaines étaient des champs de coton) qui pourront être mises en culture si nécessaire.
- Le manioc est également une culture de subsistance (à fort rendement), qui pourrait être utilisée pour la consommation locale en cas de crise alimentaire. En fait, le manioc est considéré localement comme une « culture de secours » importante pour la consommation humaine pendant les années de sécheresse.
- La génération de revenus du manioc plus élevés et garantis entraînera probablement une augmentation de l'utilisation des engrais minéraux, et partant une augmentation des rendements.

Lors des entretiens en groupe, des questions ont été posées à ce sujet et tous se sont accordés pour dire qu'il n'y aurait probablement pas de problèmes de sécurité alimentaire.

Comme nous l'avons vu plus haut, le manioc, et plus particulièrement le bonouma, joue un rôle important pendant la « période de soudure » dans les régions de Ségou et Mopti plus au nord. Par conséquent, des perturbations dans cette chaîne de valeur fortement saisonnière pourraient avoir des implications considérables en termes de sécurité alimentaire. Ce risque peut être évité si la production de bioéthanol est basée exclusivement sur l'attiéké. La question est de savoir comment y parvenir, étant donné qu'il peut sembler difficile d'éviter les perturbations lorsque le bonouma peut être utilisé de la même manière (voire plus) comme produit de départ pour la production de bioéthanol. La solution que nous proposons consiste à (a) signer des contrats avec des paysans uniquement pour la production d'attiéké et à (b) s'appuyer sur les forces du marché qui garantissent que les paysans donneront la priorité à la satisfaction des besoins en bonouma pendant la période de juillet à septembre, simplement parce que les prix sont beaucoup plus élevés que ceux proposés par le producteur de bioéthanol.

Dans la zone d'étude, le manioc aide non seulement à traverser la période de soudure dans les régions de Ségou et Mopti, mais également à couvrir les besoins en couscous attiéké produit localement et à Sikasso. Comme nous l'avons vu, cette production est essentiellement entre les mains des coopératives de femmes dans les villages et à Sikasso. Cette demande est susceptible de concurrencer plus directement l'utilisation du manioc pour le bioéthanol, mais il est probable que les coopératives seront en mesure de payer un prix plus élevé que le producteur de bioéthanol, s'assurant ainsi que leurs besoins seront couverts. Il y aura probablement des possibilités de collaboration entre les coopératives et le producteur de bioéthanol, ce qui permettra d'assurer un approvisionnement stable en manioc.

## **15. Analyse de la sensibilité aux changements climatiques**

L'analyse de la sensibilité d'une production de bioéthanol à partir du manioc dans le sud du Mali comprend :

- Une étude théorique des résultats du modèle climatique, c'est-à-dire à la fois les informations des MCG, présentées dans le 4<sup>ème</sup> Rapport d'évaluation du GIEC, et des MCR, extraites de la banque de données du projet ENSEMBLES.
- Des entretiens avec les paysans sur la sensibilité au climat de la production de manioc dans différents endroits de la zone d'étude.
- Un entretien avec le Dr. Daouda Zan Diarra de la « Direction nationale de la météorologie » à Bamako.

La deuxième partie a été menée principalement pendant la mission sur les impacts de la production de manioc sur le carbone dans le sol. La troisième partie a été effectuée pendant la mission de novembre 2010.

Lors des activités sur le terrain, nous avons demandé aux paysans participant à l'échantillonnage des sols si la production de manioc pouvait être considérée comme vulnérable aux changements climatiques, plus particulièrement à la pluviométrie. Comme l'on pouvait s'y attendre, la plupart des paysans ont indiqué que les rendements obtenus

dans les zones les plus sèches étaient affectés par la pluviométrie, tandis qu'ils l'étaient moins dans les zones humides. Ils ont expliqué que dans les zones humides le niveau d'eau avait été légèrement en baisse depuis la sécheresse des années 1970, ce qui avait permis de cultiver des surfaces plus larges dans ces zones. Dans les champs de manioc, les billons ne doivent pas être inondés.

## Sahel (10W–10E/10N–20N)

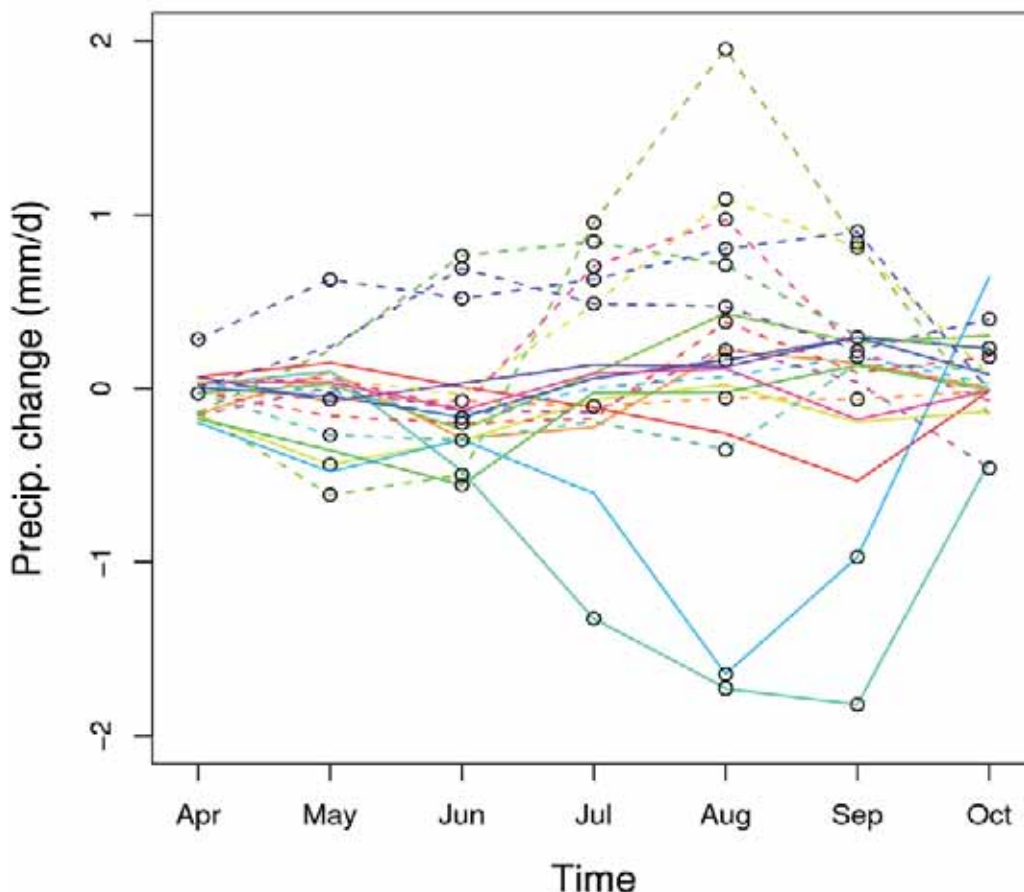


Figure 12 *Prévisions de 16 modèles climatiques régionaux, faisant partie du projet ENSEMBLES et portant sur les changements moyens dans la pluviométrie (mensuelle pendant l'hivernage) en Afrique de l'Ouest pendant la période 2040-50. Le changement moyen prévu par tous les modèles pris globalement est proche de zéro, mais nous pouvons observer des écarts de plusieurs centaines de mm entre les modèles les plus extrêmes pendant la durée de l'hivernage.*

L'étude théorique des résultats du modèle climatique a montré que les modèles mondiaux et régionaux produisaient des résultats très différents concernant l'évolution future de la pluviométrie. L'augmentation des précipitations pourrait être aussi probable que leur baisse, comme le montre la Figure 12. En cas d'augmentation des précipitations,

la conséquence pourrait être une augmentation du niveau d'eau dans les zones humides, ce qui risquerait de rendre les champs situés à la marge des zones inondées de façon saisonnière inutilisables pour la culture du manioc, tout en augmentant la productivité dans les zones plus sèches, où la variété dominante est l'attiéké. Les principaux problèmes que le changement dans la pluviométrie risquent de poser seront une plus grande variabilité des précipitations et des taux de précipitation maximum plus élevés, ce qui entraînerait des inondations temporaires des champs situés dans les bas-fonds, sans augmentation significative des rendements dans les zones plus sèches, car une partie plus importante ruissellera.

Ces conclusions, tirées des publications et de la base de données ENSEMBLES, ont été confirmées par le Dr. Daouda Zan Diarra de la « Direction nationale de la météorologie ». Nos discussions ont porté sur l'incertitude actuelle concernant les futures tendances de la pluviométrie qui rend très difficile l'évaluation des conséquences probables d'une manière générale et plus particulièrement pour la production de manioc, d'où la difficulté de faire des recommandations sur l'adaptation aux changements climatiques.

## **16. Analyse et conclusions sur la faisabilité et la viabilité de la production de bioéthanol à partir du manioc dans la zone d'étude**

Les résultats présentés ci-dessus dressent un portrait de la situation agricole dans la région étudiée caractérisée par une baisse importante des revenus, une réduction des zones cultivées et une sous-utilisation des ressources en main d'œuvre pendant la saison sèche, cette situation étant due au déclin de la production de coton. Les paysans sont très motivés par la perspective de se lancer dans des productions de remplacement génératrices de revenus en espèces. Actuellement, le manioc joue partiellement ce rôle, mais la demande est très saisonnière (dans le cas du bonouma pendant la période de soudure dans le nord du pays), les prix varient beaucoup pendant l'année et à certaines périodes le manioc n'est même pas récolté car il n'y a pas de demande. Par conséquent, un marché garanti sur toute l'année pour le manioc, même au prix le plus bas que les paysans obtiennent actuellement, les incitera probablement à augmenter la production de manière substantielle. Cette expansion peut se faire par l'agrandissement des zones cultivées en manioc, soit en remplaçant d'autres cultures telles que le maïs et le riz, soit en plantant du manioc dans les anciens champs de coton devenus des jachères, ou en améliorant les rendements en augmentant l'apport d'engrais et la main d'œuvre employée. Ces deux options sont réalistes : selon les paysans, les terres sont en nombre suffisant pour permettre une expansion, et l'analyse des images satellite le confirme. Des variations importantes dans les rendements de la culture du manioc peuvent être observées, et des facteurs tels que l'apport d'engrais, le type de sol, la disponibilité de l'eau et la main d'œuvre sont susceptibles d'influencer les rendements. Si le marché est garanti et des services de vulgarisation sont mis en place, nous avons des raisons de penser que les rendements moyens peuvent être multipliés au moins par deux. Par conséquent, nous estimons qu'une augmentation de la production de manioc de l'ordre de 50.000 à 70.000 tonnes est envisageable dans une zone de moins de mille kilomètres carrés dans la région étudiée, ce qui impliquerait de faibles coûts de transport.

Les études fondées sur des enquêtes par questionnaire auprès des ménages et des entretiens montrent que les paysans sont très intéressés par l'expansion de la production de manioc et ont l'intention de le faire en exploitant les jachères (autrefois cultivées en coton et âgées pour la plupart de 5 à 10 ans) et/ou en remplaçant d'autres cultures, par exemple le riz dans les bas-fonds ou le maïs sur les terres sèches, par du manioc. Les effets d'un tel changement dans l'utilisation des terres sur les émissions de GES doivent donc être analysés. Nous pensons que les effets les plus importants que l'augmentation de la production de manioc auront sur l'environnement seront les modifications des réservoirs de carbone. Les effets sur les stocks de carbone dans la végétation et les sols ont été étudiés en détail, et d'après les données publiées, la suppression des jachères entraînerait une perte de carbone dans la végétation au dessus et en dessous du sol de l'ordre de 8 – 24 Mg C/ha, même si les changements dans les réservoirs de carbone dans le sol sont relativement limités et incertains. Avec les rendements actuels du manioc, il faudrait 16 à 50 ans pour « rembourser » la « dette de carbone » résultant de la production continue de manioc pour le bioéthanol sur d'anciennes jachères. Si le manioc remplace d'autres cultures, il n'y aura pas de réduction des stocks de carbone. En cas de doublement des rendements du manioc, le délai de remboursement serait presque divisé par deux. Si l'on se base sur l'utilisation des terres datant de dix ans, les stocks de carbone ne devraient pas diminuer et devraient même plutôt augmenter. Par conséquent, le choix plus ou moins arbitraire des données de référence par rapport auxquelles les effets de l'expansion de la production de manioc sont comparés a des conséquences importantes pour l'évaluation de la viabilité environnementale. L'augmentation de la production de la variété bonouma de manioc dans les zones humides peut avoir un effet sur les émissions de CH<sub>4</sub>, mais les analyses de ces effets ne sont pas encore terminées. Il est probable que le remplacement du riz par le manioc réduira les émissions de CH<sub>4</sub>. Dans tous les cas, nos résultats semblent indiquer que la production de bioéthanol doit être basée principalement sur la variété attiéké, qui ne devrait pas avoir des effets importants sur les émissions de CH<sub>4</sub>. L'intensification de la production de manioc entraînera une plus grande utilisation des engrais minéraux, d'où une augmentation des émissions de N<sub>2</sub>O. Actuellement, les émissions sont relativement faibles, et nous ne pensons pas que l'augmentation des émissions de N<sub>2</sub>O jouera un rôle important dans l'effet global de la culture du manioc dans un contexte d'atténuation des changements climatiques. Les autres impacts sur l'environnement semblent être limités et/ou positifs, surtout s'ils sont mesurés avec le coton comme référence, étant donné que ce dernier n'est pas une culture particulièrement respectueuse de l'environnement. Globalement, nous pouvons affirmer que la viabilité environnementale de la production de bioéthanol à partir du manioc ne pose pas de problèmes majeurs.

La faisabilité économique de la production de bioéthanol à partir du manioc est très difficile à évaluer, à la fois parce que le marché de l'énergie au Mali (et ailleurs) est politiquement lourdement influencé et parce que les futurs prix des combustibles fossiles sur le marché mondial et des sources d'énergie renouvelables concurrentes sont très incertains. L'évaluation préliminaire présentée dans ce rapport repose sur l'hypothèse qu'un prix de 30-35 CFA/kg pour le manioc permettrait à la production de bioéthanol d'être rentable. Il est probable que cette hypothèse pourrait être contestée sur différents points, dont l'absence actuelle de marché pour le bioéthanol au Mali n'est pas le moindre. Dans tous les cas, le lancement d'une production de bioéthanol doit aller de pair avec des efforts de développement d'un marché. Il existe plusieurs options intéressantes, notamment l'utilisation du bioéthanol pour remplacer l'essence (totalement ou en partie)



utilisée pour les automobiles, pour l'électrification des villages et pour remplacer le bois de chauffage ou le charbon dans les foyers. Cette dernière option est particulièrement intéressante à cause de ses effets positifs potentiels sur les réservoirs de carbone dans la végétation, la biodiversité, mais surtout sur la santé humaine. Si l'hypothèse d'un prix réaliste pour la matière première de 30-35 CFA/kg est maintenue, notre étude montre que le fait de proposer ce prix aux paysans dans la zone d'étude déclencherait une augmentation importante de la production, à condition que la demande et le prix soient garantis. Ce niveau de prix est très inférieur à celui payé pour la production fortement saisonnière de bonouma, qui est concentrée sur les terres plus humides des bas-fonds. Par conséquent, sur le plan économique, il est évident que l'augmentation de la production de manioc concernera surtout les sols les plus secs, qui peuvent être cultivés toute l'année avec la variété attiéké, et en particulier pendant les périodes de sous-utilisation de la main d'oeuvre.

Pour ce qui est des impacts sociaux de l'augmentation de la production de manioc pour le bioéthanol, nous pensons que l'aspect le plus concerné est la sécurité alimentaire. Nous avons examiné les impacts sur la sécurité alimentaire aux niveaux local, régional et national. Sur le plan local, il semble que les impacts négatifs sont peu probables. En situation de crise, par exemple en cas de sécheresse, le manioc peut servir de réserve de nourriture, ce qui en réalité améliorerait la sécurité alimentaire. Au niveau régional, nous avons constaté que le couscous attiéké à base de manioc joue un rôle important dans la ville de Sikasso, et qu'il est soit produit localement par des groupements féminins à partir du manioc cultivé dans la zone d'étude, soit importé de Côte d'Ivoire. Toutefois, les quantités concernées sont assez limitées et il n'y a pas de raisons de penser que cette chaîne de valeur ne pourra pas être conservée si une production de bioéthanol était lancée. En termes de sécurité alimentaire, le principal impact que la production de manioc peut avoir concerne les exportations saisonnières de bonouma entre la zone d'étude et les régions de Ségou et Mopti pendant l'hivernage (juillet à septembre principalement), période de soudure. Toutefois, les prix obtenus par les paysans à cette saison sont bien plus élevés que les prix considérés comme réalistes pour la production de bioéthanol. Cela implique que les paysans donneront la priorité à la production de manioc destinée à Ségou et Mopti, excluant d'éventuels effets négatifs de la production de bioéthanol sur la chaîne de valeur. Cette constatation renforce la conclusion de l'analyse économique selon laquelle la production de bioéthanol doit reposer surtout sur la culture de l'attiéké. Le principal problème que pose cette conclusion est que l'approvisionnement en attiéké de l'unité de production de bioéthanol risque de baisser pendant l'hivernage, lorsque les paysans consacreront leur main d'œuvre à la récolte et à la plantation du bonouma destiné aux exportations vers Ségou et Mopti. Il est donc probable que le producteur de bioéthanol devra prévoir des installations de stockage qui lui permettront de stocker des matières premières pendant plusieurs mois. En dehors de l'importance du manioc dans la sécurité alimentaire dans les régions de Ségou et Mopti, il ne joue pas un rôle majeur dans l'approvisionnement alimentaire au Mali, et le lancement d'une production de bioéthanol n'aurait probablement pas d'impacts majeurs sur la sécurité alimentaire au niveau national, pas plus qu'elle ne contribuerait de manière significative à l'augmentation des prix des denrées alimentaires.

Outre la question de la sécurité alimentaire, le lancement de cette production pourrait avoir d'autres effets sociaux. Il s'agit notamment des impacts sur les acteurs des chaînes de valeur actuelles du manioc, et plus particulièrement sur l'organisation de la

production et de la commercialisation du manioc. Actuellement, les principales interactions des producteurs avec les acheteurs se font par le biais d'intermédiaires locaux appelés « hôtes ». Dans certains cas, les producteurs locaux sont également des acheteurs et utilisent des transporteurs spécialisés. En cas de mise en place d'une unité de production de bioéthanol, le système existant pourra soit être utilisé, soit remplacé par un autre. L'une des possibilités, qui fait déjà son apparition dans certains villages, consiste à créer des coopératives de production et de commercialisation du manioc qui traiteront directement avec l'unité de production du bioéthanol. Ces deux systèmes sont déjà concurrents, et il convient de noter que cette concurrence pourrait influencer sur les réactions des paysans à l'arrivée d'un nouvel acteur important. Les paysans avaient traditionnellement l'habitude de s'organiser en coopératives de commercialisation du coton, et il se pourrait qu'une forme d'organisation similaire se mette en place pour le manioc.

## 17. Références

- Arndt, C., K. Pauw, J. Thurlow, 2010. Biofuels and Economic Development in Tanzania. IFPRI Note de réflexion 00966
- Bibby, B. M., Martinusen, T., Skovgaard, I. B. (2006): Experimental design in the agricultural sciences, The Royal Veterinary and Agricultural University, Frederiksberg
- BAD (2010) : Stratégie de développement de la maîtrise de l'énergie au Mali, Groupe de la Banque Africaine de Développement (BAD).
- Brown, S., 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests, a primer. FAO Forestry Paper 134. FAO. Rome.
- Bruun, T. B., A. de Neergaard, D. Lawrence, A. Ziegler, 2009. Environmental consequences of the demise in swidden cultivation in Southeast Asia: Carbon storage and soil quality. *Human Ecology*
- de Vries, S. C., G. W. J. Van de Ven, M. K. van Ittersum, K. E. Giller, 2011. The production-ecological sustainability of cassava, sugarcane and sweet sorghum cultivation for bioethanol in Mozambique. *GCB Bioenergy* doi: 10.1111/j.1757-1707.2011.01103.x,
- Elberling, B., A. Touré, K. Rasmussen, 2003. Changes in soil organic matter following groundnut-millet cropping at three locations in semi-arid Senegal, West Africa. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 96, 37-47.
- EPA 2005. Emission Facts. EPA420, 1-3.
- Fargione, J., J. Hill, D. Tilman, S. Polasky, P. Hawthorne, 2008. Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science* 319, 1235-1238.
- Gibbs, H. K., M. Johnston, J. A. Foley, T. Holloway, C. Monfreda, N. Ramankutty, D. Zaks, 2008. Carbon payback times for crop-based biofuel expansion in the tropics: the effects of changing yield and technology. *Environmental Research Letters* 3,
- Henke, J. M., G. Klepper, N. Schmitz, 2005. Tax exemption for biofuels in Germany: Is bio-ethanol really an option for climate policy? *Energy* 30, 2617-2635.
- IPCC, 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Emission Inventories
- Maard S. (pers.com. Octobre 2009): Entretien avec Stefan Maard, Novozymes
- Mbow, C., 2009. Potentiel et dynamique des stocks de carbone des savanes soudaniennes et soudano-guinéennes du Sénégal. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar
- MME (2007) : Stratégie nationale pour le développement des énergies renouvelables, Ministère des Mines, de l'Énergie et de l'Eau, Bamako

- Mokany, K., R. J. Raison, A. S. Prokushkin, 2006. Mokany, K. Raison, R.J: Prokushkin, A.S. *Glob. Change. Biol.* 12, 84-96.
- Nguyen, T. L. T., S. H. Gheewala, S. Garivait, 2007. Energy balance and GHG-abatement cost of cassava utilization for fuel ethanol in Thailand. *Energy Policy* 35, 4585-4596.
- Scharlemann, J. P.W., Hiederer, R., Kapos, V., Ravilious, C. (2009). Updated global carbon map. UNEP-WCMC & EU-JRC, Cambridge, UK.
- Silalertruksa, T., S. H. Gheewala, M. Sagisaka, 2009. Impacts of Thai bio-ethanol policy target on land use and greenhouse gas emissions. *Applied Energy* 86, S170-S177.
- Williams, M., C. M. Ryan, R. M. Rees, E. Sarnbane, J. Femando, J. Grace, 2008. Carbon sequestration and biodiversity of re-growing miombo woodlands in Mozambique. *For. Ecol. Manage.* 254, 145-155.







