



## Etude de pré faisabilité d'une centrale électrique à paille de riz

Contrat DANIDA 1711

Faisabilité des ressources d'énergies renouvelables au Mali

Décembre 2012

**Auteurs :** Felicia Fock, Ivan Nygaard, Boureima Kone, Famakan Kamissoko, Nanourou Coulibaly, Ousmane Ouattara.

**Décembre 2012**

**Titre:** Etude de préféabilité d'une centrale électrique à paille de riz

**ISBN:** 978-87-92706-70-6

**Contrat:**

DANIDA 1711

**Premier Page:**

Battage du riz à l'Office du Niger.

**Photo:** Rasmus Borgstrøm

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

# Sommaire

<b>1</b>	<b>Préface.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Résumé et recommandations .....</b>	<b>6</b>
	2.1 Choix du cas.....	6
	2.2 Objectif principal du projet .....	7
	2.3 Conclusions technologiques .....	7
	2.4 Conclusions économiques .....	8
	2.5 Recommandations.....	10
<b>3</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>12</b>
	3.1 Objectif .....	12
	3.2 Contexte .....	12
	3.3 Portée de l'analyse .....	15
<b>4</b>	<b>Description du cas .....</b>	<b>17</b>
	4.1 Situation géographique .....	17
	4.2 Ressources disponibles.....	17
	4.3 Puissance de la centrale électrique .....	21
	4.4 Connexion au réseau électrique.....	23
	4.5 Exploitation.....	24
	4.6 Sucrieries de la région .....	25
<b>5</b>	<b>Technologies .....</b>	<b>28</b>
	5.1 Chaudière à grille.....	28
	5.2 Lit fluidisé bouillonnant (LFB) .....	28
	5.3 Lit fluidisé circulant (LFC).....	29
	5.4 Combustion de poussière .....	30
	5.5 Autres technologies de centrales à biomasse .....	31
	5.6 Technologie retenue.....	31
	5.7 Recommandations techniques pour la centrale électrique .....	32

<b>6</b>	<b>Évaluation économique</b> .....	<b>38</b>
6.1	Coûts d'investissement.....	38
6.2	Coût d'exploitation et de maintenance.....	41
6.3	Rendement et disponibilité de la centrale électrique .....	42
6.4	Coût du combustible .....	43
6.5	Coût d'élimination des cendres.....	46
6.6	Subventions .....	47
6.7	Hypothèses de financement.....	47
6.8	Calcul du prix de l'électricité .....	48
6.9	Analyses de sensibilité.....	49
6.10	Prix de l'électricité prévus (coûts évités).....	53
<b>7</b>	<b>Impacts sur le climat et l'environnement local</b> .....	<b>55</b>
7.1	Influence sur le climat .....	55
7.2	Influence sur l'environnement local.....	56
<b>8</b>	<b>Évaluation du risque</b> .....	<b>57</b>
<b>9</b>	<b>Références</b> .....	<b>59</b>
	<b>Annexe A : Manutention de paille de la rizière à la centrale électrique</b> .....	<b>61</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 préfaisabilité 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-Abderhamabe Baba Touré (ENI-ABT) et Mali Folkecenter Nyetaa (MFC).

La rédaction du présent rapport et l'étude approfondie sur laquelle il s'appuie ont été dirigées par Felicia Fock, d'Ea Energy Analyses, avec la participation et le soutien des autres auteurs.

## 2 Résumé et recommandations

Le fleuve Niger et son cycle de crues annuel permettent de nombreuses possibilités de cultures dans le centre et le sud du Mali. La riziculture, qui fait partie de ces possibilités de cultures, crée des résidus utilisables pour produire de l'énergie renouvelable : la paille de riz et la balle de riz, qui peuvent être brûlées dans une centrale électrique à biomasse.

Le Mali

Le Mali est un pays d'Afrique de l'Ouest d'une superficie d'1,24 million de km<sup>2</sup> et peuplé de 14,5 millions d'habitants. Seule la partie sud du pays est adaptée à la production agricole.

Le réseau d'électricité du Mali

La fourniture électrique de la zone interconnectée repose sur l'hydroélectricité (environ 150 MW installés) et les centrales thermiques à moteur diesel (environ 100 MW installés). À ce jour, le réseau interconnecté du Mali n'est raccordé à aucun pays voisin. La demande est supérieure à la production des centrales hydroélectriques et, par conséquent, les moteurs diesel ne sont pas uniquement utilisés en charge maximale, mais, généralement, en charge de base. Il s'agit d'un moyen de production d'électricité très coûteux, en particulier avec l'augmentation du prix des produits pétroliers. Il existe par conséquent un besoin de production d'électricité meilleur marché au Mali.

Actuellement, la demande d'électricité augmente d'environ 10 % par an. Cette situation représente des défis énormes pour le gouvernement malien et les opérateurs nationaux, qui doivent réduire l'importation de combustibles fossiles, ainsi que pour la société nationale EDM (Énergie du Mali) et les investisseurs privés, qui doivent fournir suffisamment d'électricité à un prix raisonnable. Il existe donc un besoin de production d'énergie durable à partir de ressources énergétiques nationales.

### 2.1 Choix du cas

Riziculture dans l'Office du Niger

Les résidus agricoles, tels que la paille de riz et la balle de riz, produits dans la zone rizicole le long du Niger constituent l'une des sources d'énergie renouvelable envisageables. Dans le périmètre de l'Office du Niger, la zone cultivée en riz se développe proportionnellement aux possibilités d'irrigation. Au cours des 10 dernières années, la production de riz a augmenté en moyenne de 5 % par an dans le périmètre de l'Office du Niger.

Il est prévu de développer la production de riz au Mali et dans la zone de l'Office du Niger. La paille de riz et la balle de riz sont les deux sous-produits



de la riziculture. Dans la mesure où ils ne sont pas utilisés à d'autres fins (alimentation animale, amendement du sol, etc.), ces sous-produits peuvent être utilisés pour la production d'énergie. Il est donc intéressant d'étudier la possibilité de mettre en place une centrale électrique alimentée à la paille/balle de riz.

Emplacement d'une centrale électrique à paille de riz

La ressource durable de paille de riz pour la production d'énergie a été estimée à environ 56 000 tonnes/an pour l'ensemble du périmètre de l'Office du Niger avec une augmentation prévue de l'ordre de 158 000 tonnes/an. Actuellement, la paille produite est brûlée sur place.

La ville de Niono est située dans le périmètre de l'Office du Niger, et les trois zones rizicoles voisines, Niono, N'debougou et Molodo, produisent actuellement 167 000 tonnes de paille de riz dont environ 30 000 tonnes sont brûlées et donc disponibles pour la production d'énergie.

En mars 2012, la ville de Niono devrait être raccordée au réseau d'électricité interconnecté par une ligne de transport de 63 kV.

En raison de sa proximité avec une importante source de paille de riz et de la connexion relativement importante prévue avec le réseau (après le raccordement de Niono au réseau interconnecté central du Mali), la ville a été sélectionnée pour le cas de référence d'une centrale électrique alimentée à la paille de riz au Mali.

## 2.2 Objectif principal du projet

L'objectif principal du projet est de faire une première évaluation de la faisabilité technique, de la viabilité économique, de la durabilité et du caractère recommandable de la construction d'une centrale électrique à paille de riz à Niono au Mali.

## 2.3 Conclusions technologiques

Puissance de la centrale électrique

En fonction de la ressource disponible en paille de riz et des possibilités de connexion au réseau, il a été décidé d'analyser une centrale de 5 MW pour ce projet.

Combustible utilisé

Pour des raisons techniques, la paille de riz devrait être le combustible principal, mais la balle de riz peut être utilisée en co-combustion. La centrale peut brûler jusqu'à 20 % environ de balle de riz au lieu de paille de riz.

Technologie retenue

Différentes technologies de production d'énergie à partir de biomasse ont été évaluées dans le cadre du projet. Ces technologies sont les suivantes :

- Chaudière à grille
- Lit fluidisé bouillonnant
- Lit fluidisé circulant
- Chaudière à poussière
- Gazéification
- Moteur Stirling
- Cycle de Rankine organique

La chaudière à grille est la technologie la plus pertinente dans notre cas, compte tenu du combustible, de la puissance de la centrale, du besoin de produire de l'électricité uniquement, sans production de chaleur, et du besoin de technologie robuste et éprouvée.

Pour une centrale à chaudière à grille, le calcul du processus thermodynamique a été effectué afin de déterminer le rendement électrique de la centrale. Le cas comprend une centrale électrique à chaudière à grille de 5 MW à turbines à vapeur et condenseur refroidi par air dont le rendement est de 24,6 % à pleine charge (20 % en moyenne annuelle).

## 2.4 Conclusions économiques

Évaluation économique

Pour le système choisi, les différents facteurs économiques ont été estimés. Les facteurs clés sont :

- les coûts d'investissement
- les coûts d'exploitation et de maintenance
- les coûts de collecte et de transport de la paille de riz
- les coûts d'élimination des cendres
- le coût d'investissement moyen

Les coûts d'investissement et les coûts d'exploitation et maintenance sont considérés à partir de l'expérience de centrales électriques danoises mais ajustés aux conditions locales du Mali. Les coûts de collecte et de transport de la paille de riz et d'élimination des cendres ont été spécifiquement estimés pour ce projet. Le coût d'investissement moyen a été estimé à partir d'hypothèses de fonds propres, de prêts internationaux et de prêts locaux/financement bancaire. Le tableau ci-dessous résume les chiffres clés des calculs économiques.

	Unité	Valeur
Investissement		CFA 20 160
Exploitation & Maintenance	% de l'investissement par an	4
Prix de la paille de riz	CFA/kg	30
Coût d'élimination des cendres	CFA/kg	23
Coût d'investissement moyen	%	5
Rendement (moyenne annuelle)	%	18,4
Durée de vie technique	années	20
Disponibilité (heures de pleine charge par an)	heures	6 381

Tableau 1. Chiffres clés des calculs économiques

Coût de production d'électricité obtenu

En fonction du coût d'investissement, d'exploitation et maintenance (E&M) et d'élimination des cendres ainsi que des hypothèses financières, nous avons effectué une analyse des flux de trésorerie afin de calculer le coût de l'électricité correspondant à une Valeur Actualisée Nette (VAN) de l'investissement égale à zéro.

Pour le système de référence, le coût de l'électricité calculé est de 125 CFA/kWh.

Des analyses de sensibilité ont été effectuées, en variant le coût du combustible, le coût d'investissement, le niveau de subvention, le coût moyen pondéré du capital, le coût d'exploitation et de maintenance et le rendement à pleine charge. Ces analyses révèlent que le prix du combustible, le niveau de subventionnement et le coût moyen pondéré du capital sont les éléments les plus importants pour déterminer le coût de l'électricité. Le coût du combustible, le niveau de subventionnement, le coût moyen pondéré du capital et le coût d'investissement ne peuvent pas être déterminés avec certitude. Avant de poursuivre le projet d'une centrale électrique à paille de riz à Niono, il serait donc pertinent de déterminer ces éléments en détail.

Coûts de production d'électricité alternative

Le coût marginal de la production d'électricité au Mali à l'avenir est très incertain. Si les interconnecteurs internationaux sont construits conformément aux prévisions, le coût marginal de l'électricité devrait être compris entre 65 et 100 CFA/kWh. Dans le cas contraire, le coût marginal de l'électricité pourrait se situer entre 100 et 120 CFA/kWh, en fonction du prix du pétrole brut.

Conclusions économiques

Si l'on calcule le coût de production d'électricité avec une centrale à paille de riz à Niono et si on le compare au coût marginal de l'électricité prévu dans le réseau interconnecté du Mali, une centrale à paille de riz semble difficilement

concurrentielle. Seules de bonnes conditions (telles qu'un faible prix de la paille de riz et un faible taux d'intérêt) ou un bon niveau de subvention (20 à 40 %) rendraient la centrale compétitive sur le plan économique.

## 2.5 Recommandations

Les analyses du présent rapport ont révélé qu'il est techniquement faisable et, dans certaines circonstances, économiquement viable de construire une centrale électrique à paille de riz à Niono. Toutefois, certains risques et certaines incertitudes sont associés au projet et doivent être clarifiés plus précisément avant d'envisager sa réalisation.

Les avantages et les inconvénients de la construction d'une centrale électrique à paille de riz à Niono sont résumés ci-dessous :

- Avantages
  - Création d'emplois locaux (55 temps plein et 800 emplois saisonniers)
  - Utilisation des ressources nationales
  - Réduction de la dépendance vis-à-vis du combustible importé
  - Réduction des émissions de gaz à effet de serre
- Inconvénients
  - Incertitude quant au coût de l'électricité produite
  - Investissement présentant un risque moyen à élevé en raison des incertitudes
    - Première centrale à paille de riz de la région (risque technique)
    - Incertitude quant au volume et au coût de la paille
    - Conflits potentiels avec les autres utilisateurs de la paille de riz

Recommandations pour les étapes ultérieures

Des analyses et des essais approfondis sont nécessaires avant toute décision d'investissement dans une centrale à biomasse. Nous recommandons de suivre les étapes suivantes :

- Essais pratique de collecte de paille à petite échelle. Acquisition d'expérience sur les barrières et les coûts
- Analyses de la connexion entre l'investissement local dans une centrale à biomasse et la stratégie énergétique globale du Mali. Plus particulièrement, projets d'expansion du réseau électrique, projets relatifs aux interconnecteurs internationaux et à l'hydroélectricité et projets d'utilisation de la biomasse.
- Optimisation de la puissance et de l'emplacement de la centrale
  - Ressources en riz

- Capacité de transport
- Consommation électrique locale
- Étude de faisabilité détaillée
  - Contact avec différents fournisseurs de technologie de centrales à biomasse
  - Visite du site. Entretiens avec les parties prenantes, dont les producteurs de riz et la société d'électricité.
  - Calcul de l'intégration de la centrale dans le réseau d'électricité. Calculs du flux de charge, avec PSS/E, Power Factory ou des outils similaires.
- Considérations relatives à la propriété, c'est-à-dire association d'investissement privé et d'EDM et/ou de la Direction Nationale de l'Énergie. Une collaboration avec l'une des sucreries peut également être envisagée.
  - Analyses et clarification du mode de financement du projet

Les étapes sont présentées dans le schéma ci-dessous avec un calendrier indicatif.

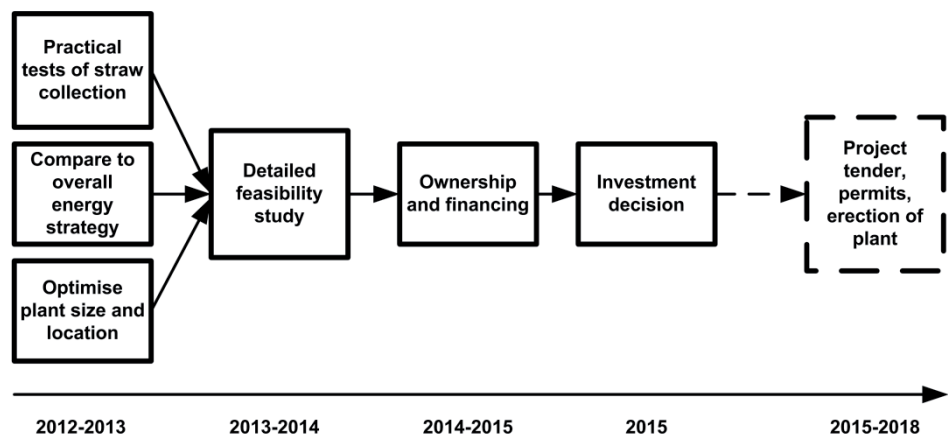


Figure 1. Étapes ultérieures du processus de création d'une centrale électrique à paille de riz à Niono.

La décision d'investissement pourra être prise après analyse et clarification des étapes ci-dessus. Après cette décision, les étapes suivantes seront l'appel d'offres, les autorisations des autorités locales, les accords avec les agriculteurs locaux et la mise en place d'une chaîne logistique pour la collecte et le transport de la paille et la construction de la centrale.

## 3 Introduction

La présente étude de préfaisabilité a été effectuée dans le cadre du projet « Faisabilité des Ressources d'Énergies Renouvelables au Mali », soutenu par le DANIDA (Contrat n° 1711), pour faire une première évaluation relative à la construction d'une centrale électrique à paille/balle de riz à Niono au Mali.

### 3.1 Objectif

Objectif principal	L'objectif principal du projet est de faire une première évaluation de la viabilité économique, de la durabilité et du caractère recommandable de la construction d'une centrale électrique à la paille/balle de riz à Niono au Mali.
Technologies pertinentes	Si la construction d'une centrale électrique à paille de riz est recommandée, quelles sont les technologies les plus pertinentes ?
Association de combustibles	Quelle est l'association de combustibles (paille de riz / balle de riz) recommandée en termes d'environnement/de technologie/de risque/... ?
Recommandations pour l'analyse approfondie	La présente étude a également pour objectif de faire des recommandations relatives à l'analyse approfondie du système, préalable à la décision d'investissement.

### 3.2 Contexte

Le Mali est un pays d'Afrique de l'Ouest subsaharienne, qui couvre une superficie de 1,24 million de km<sup>2</sup>. Il est enclavé et frontalier de sept pays : l'Algérie, le Burkina Faso, la Guinée, la Côte d'Ivoire, la Mauritanie, le Niger et le Sénégal. Le nord du Mali est essentiellement désertique (Sahara). Au centre et au sud, le fleuve Niger (qui parcourt le pays sur 1 500 km) et son cycle de crues annuel permettent de nombreuses possibilités de cultures.



Figure 2. Carte du Mali

### Riziculture dans la zone de l'Office du Niger

Le fleuve Niger permet notamment la riziculture. Dans le périmètre de l'Office du Niger, la zone cultivée en riz se développe en fonction des possibilités d'irrigation.



Figure 3. Situation de Niono dans l'Office du Niger, Mali

Augmentation de la production de riz

Au cours des 10 dernières années, la production de riz a augmenté en moyenne de 5 % par an dans le périmètre de l'Office du Niger. La production de riz était d'environ 500 000 tonnes en 2009 et 2010. Selon le contrat-plan de l'Office du Niger (AGETIER 2004), la zone cultivée devrait plus que doubler d'ici 2020, ce qui signifie que la production de riz au sein de l'Office du Niger pourrait atteindre 1,4 million de tonnes d'ici 2012 (Nygaard, Bruun 2012).

La paille de riz et la balle de riz sont deux sous-produits de la riziculture. Dans la mesure où ils ne sont pas utilisés à d'autres fins (alimentation animale,



amendement du sol, etc.), ces sous-produits peuvent être utilisés pour la production d'énergie.

## Réseau d'électricité

- 6) Le réseau interconnecté du Mali ne couvre qu'une zone limitée de la partie centrale/sud du Mali (lignes continues dans le cercle de la carte ci-dessous). Le reste du pays n'est pas alimenté en électricité, ou dispose de petites unités de production (essentiellement à moteurs diesel) qui alimentent les réseaux isolés. Le rapport « Examen des applications réalisables de production d'énergie éolienne et solaire au Mali » (Nygaard, Nørgård 2012) donne des informations détaillées sur le réseau électrique existant et prévu. La présente section contient un extrait de ce rapport.



Figure 4. Réseau électrique interconnecté du Mali and et connexions futures prévues.

Capacité de production existante du réseau interconnecté

La fourniture électrique de la zone interconnectée repose sur l'électricité produite par les centrales hydrauliques sur les fleuves Sénégal et Niger (environ 150 MW installés) et par les centrales à moteurs diesel (environ 100 MW installés). À ce jour, le réseau interconnecté du Mali n'est raccordé à aucun pays voisin. La demande est supérieure à la production des centrales hydroélectriques et, par conséquent, les moteurs diesel ne sont pas uniquement utilisés en charge maximale, mais, généralement, en charge de base. Il s'agit d'un moyen de production d'électricité très coûteux, en particulier avec l'augmentation du prix des produits pétroliers. Il existe par conséquent un besoin de production d'électricité à meilleur coût au Mali.

Augmentation de la demande

La demande d'électricité augmente et cette augmentation devrait se poursuivre. Dans la zone interconnectée, la demande d'électricité devrait augmenter en moyenne de 10 % par an. Cette prévision comprend l'accroissement de la demande due aux extensions de réseau.



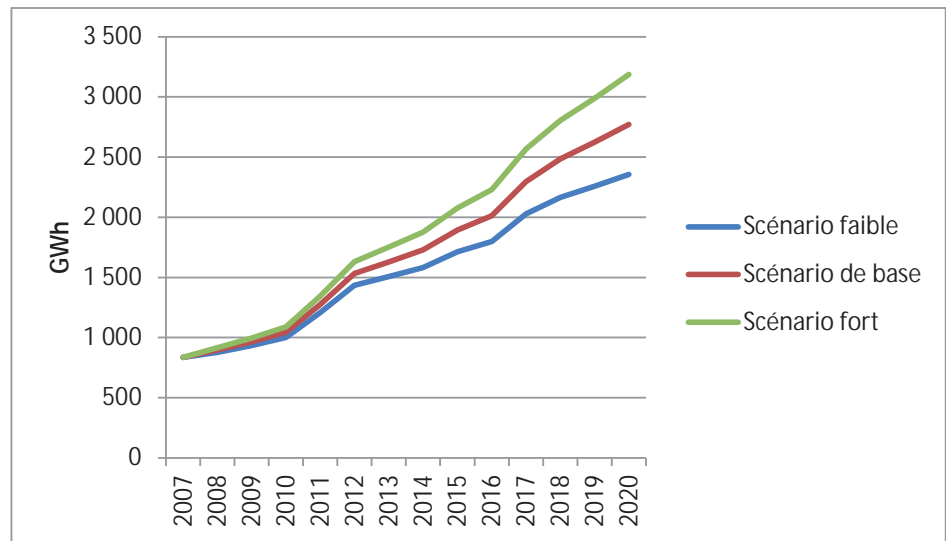


Figure 5. Prédiction de la consommation d'électricité dans le réseau interconnecté du Mali (SOGREAH 2008).

Nouvelle capacité de production prévue

Des projets d'installation de nouvelle capacité pour le réseau interconnecté, ainsi que des projets de mise en place d'interconnecteurs avec les pays voisins, ont été conçus pour satisfaire la forte augmentation de la consommation d'électricité.

Les premiers projets pour 2012 comprennent un complément de production thermique avec alimentation au fuel lourd (110 MW) et un interconnecteur vers la Côte d'Ivoire (100 à 200 MW). Par la suite, différents projets concernent l'hydroélectricité (pour un total de 200 MW en 2013-18) et un interconnecteur vers la Guinée (200 MW en 2021).

L'augmentation rapide de la consommation d'électricité et la dépendance aux produits pétroliers pour la production d'électricité sont les deux éléments majeurs qui imposent à ce pays très pauvre de trouver une fourniture électrique nationale durable et abordable.

### 3.3 Portée de l'analyse

La portée de la présente analyse est d'étudier la préfaisabilité d'une centrale électrique à paille de riz à Niono au Mali.

Calculs économiques d'un cas

Les calculs économiques, les évaluations de risque et les effets secondaires positifs seront effectués et évalués pour un cas. Ce cas comprend une centrale électrique à chaudière à grille de 5 MW à turbines avec vapeur et condenseur refroidi par air dont le rendement est de 24,6 % à pleine charge (20 % en moyenne annuelle). La centrale sera une tranche de base utilisant 80 % de

paille de riz et 20 % de balle de riz, située près de la ville de Niono, dans la zone de l'Office du Niger au Mali.

Une analyse de sensibilité sera effectuée pour établir l'impact de différents mélanges de combustibles (paille de riz uniquement ou complétée de balle de riz en différentes proportions), du prix des autres combustibles, de l'évolution du prix de l'électricité, des différents niveaux de coûts d'investissement, de la réduction de la puissance de la centrale (3 MW au lieu de 5 MW), etc.

Différentes technologies possibles seront discutées, mais la chaudière à grille sera la seule utilisée pour le calcul économique.

Beaucoup d'analyses reposeront sur des expériences au Danemark, parce que ce pays a acquis des expériences uniques d'utilisation de la paille pour produire de l'électricité dans de petites centrales (Skøtt 2011; Nicolaisen, Nielsen 1998). Aucun autre pays ne présente une telle proportion de production d'électricité à partir de centrales alimentées uniquement à la paille.

## 4 Description du cas

### 4.1 Situation géographique

La ville de Niono se trouve au centre du périmètre de l'Office du Niger. L'Office du Niger est la plus vaste zone irriguée du Mali, qui couvre actuellement environ 77 000 hectares de rizières irriguées au cours de la saison des pluies et produit du riz ainsi que des légumes à la saison sèche. Le gouvernement malien a approuvé un contrat-plan pour l'extension de la zone irriguée in 2008 (AGETIER 2004). Selon ce contrat-plan, la zone irriguée devrait passer à 220 000 ha d'ici 2020. Les zones de riziculture existantes et futures sont présentées à la Figure 6.

### 4.2 Ressources disponibles

- 7) Le rapport « Résidus agricoles pour la production d'énergie au Mali » (Nygaard, Bruun 2012) donne des informations détaillées sur le développement du secteur agricole dans l'Office du Niger et alentour et sur les ressources techniques et durables de paille utilisable à des fins énergétiques dans l'Office du Niger. La présente section comporte un extrait des principaux résultats de ce rapport.

Paille actuellement disponible dans l'Office du Niger

Les ressources de paille actuellement disponible dans l'Office du Niger sont présentées au Tableau 2. Le tableau présente la récolte moyenne de riz paddy en 2009 et 2010 et les ressources potentielles et durables en paille associées à ces récoltes. La ressource potentielle est définie comme étant la quantité de paille récoltée. La ressource durable est définie comme étant la quantité de paille actuellement brûlée sur place. La ressource durable représente en moyenne 15 % de la ressource potentielle.

Zone	Macina	Bewani	Niono	Molodo	Kourou-mari	N'debou-gou	Total
Récolte moyenne 2009-2010	105 455	70 153	85 640	52 081	104 699	85 522	503 549
Rapport paille/grains	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
Ressource technique	79 091	52 614	64 230	39 060	78 524	64 141	7 661
Proportion brûlée	2 %	18 %	22 %	12 %	18 %	19 %	15 %
Ressource durable	1 582	9 471	14 131	4 687	14 134	12 187	56 191

Tableau 2. Récolte de riz et ressources potentielles et durables de paille dans l'Office du Niger (en tonnes/an)

Ressources en paille durables disponibles près de Niono

Les trois zones, Niono, N'debougou et Molodo, sont situées près de la ville de Niono. La ressource durable dans les trois zones est actuellement d'environ 30 000 tonnes/an sur un total d'environ 56 000 tonnes dans l'Office du Niger.

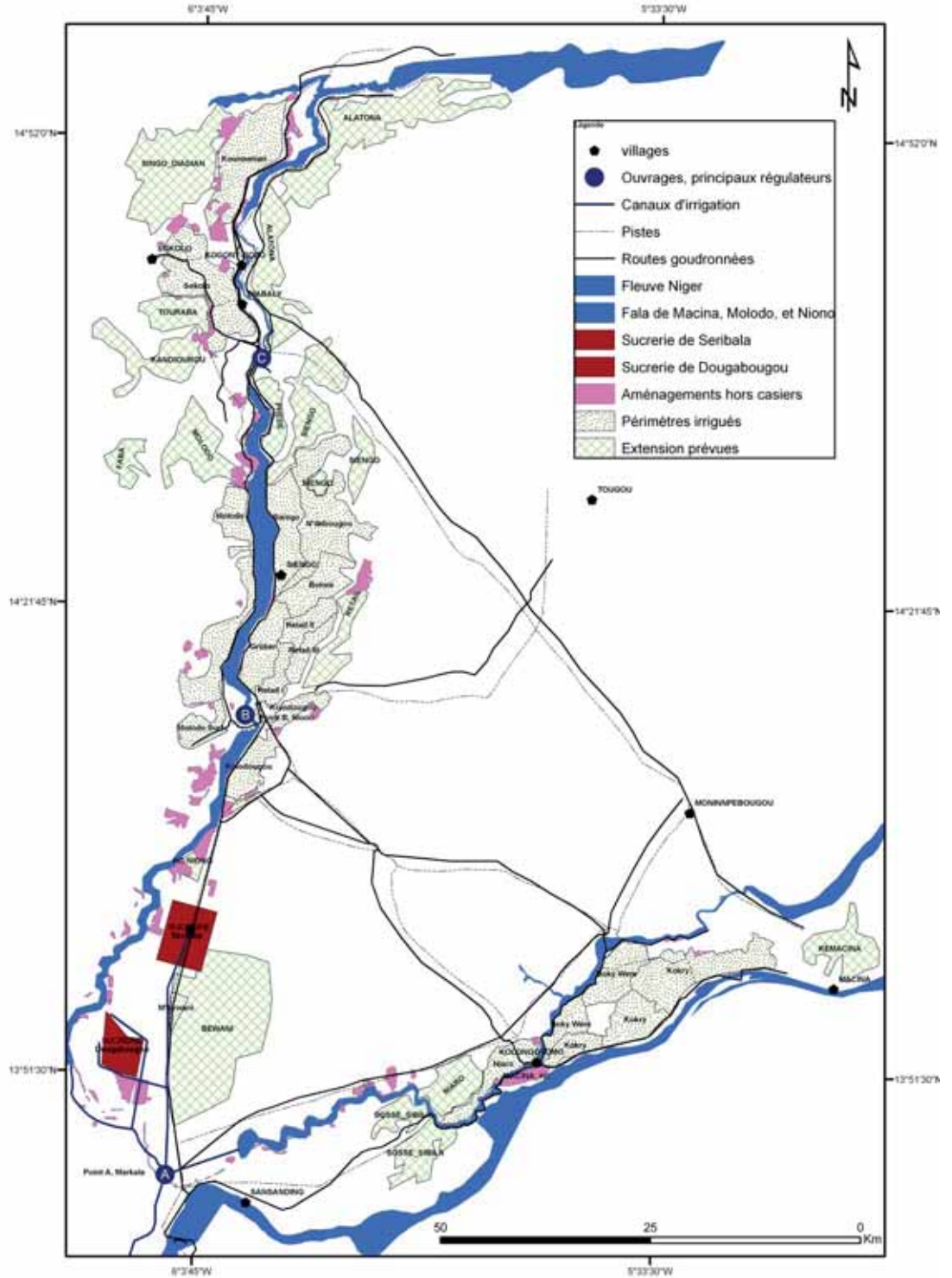


Figure 5. Carte de l'Office du Niger indiquant les zones cultivées en 2004 et l'extension prévue d'ici 2020. Niono se trouve au point B (AGETIER 2004)

Augmentation du potentiel de paille en raison de l'extension de la zone cultivée

Comme illustré par la carte en Figure 6, la zone cultivée s'étend au nord et au sud de Niono. Étant donné que les zones cultivées seront étendues selon les prévisions, le ratio paille/grain restant inchangé, le potentiel durable de paille de riz sera de 158 000 tonnes/an en 2020.



Figure 6. Paille de riz inutilisée

Balle de riz disponible pour la production d'énergie dans l'Office du Niger

Le potentiel technique de balle de riz disponible pour la production d'énergie dans l'Office du Niger est actuellement estimé à environ 100 000 tonnes et pourrait passer à 280 000 tonnes d'ici 2020.

Les décortiqueuses de riz mobiles actuellement utilisées dans l'Office du Niger produisent un mélange de brisures de riz, de balle et de son (USAID 2005). Selon une étude récente de l'USAID (2009) sur la chaîne de valeur du riz, le rendement net des décortiqueuses mobiles est très médiocre, de l'ordre de 50 à 60 %. La quantité relativement importante de brisures de riz dans le résidu signifie qu'il présente une valeur nutritive relativement élevée pour le bétail, comparativement à la balle « pure » et, toujours selon l'USAID (2005), cette fraction est actuellement utilisée par les agriculteurs pour l'alimentation animale. Pour autant, comme l'indique la photo en Figure 8, ce résidu existe en grandes quantités, qui sont actuellement stockées en tas près des décortiqueuses, puis en partie brûlées et en partie laissées à se dégrader sur place.

Afin de réduire les pertes et d'améliorer la qualité du riz traité, de mini-rizeries sont progressivement installées dans l'Office du Niger. L'USAID (2005) fait état de 10 de ces mini-rizeries en service à Seriwali, à 7 km seulement de Niono, et de projets d'installation de 10 autres dans le secteur. Selon la même source, les mini-rizeries sont des blanchisseuses à cylindres de caoutchouc/polisseuses acier et peuvent produire un riz blanchi de meilleure

qualité (moins de brisures), associé à deux sous-produits, la balle et le son. Les 10 mini-rizeries produisent environ 15 000 tonnes de balle de riz par an, qui seront disponibles pour la production d'énergie, la balle pure ne convenant pas à l'alimentation animale en raison de sa forte teneur en silice.

Dans la mesure où les mini-rizeries reprendront le marché du blanchissage du riz dans l'Office du Niger, le potentiel durable de balle de riz sera égal au potentiel technique mentionné ci-dessus.



Figure 7. Balle de riz inutilisée

### Caractéristiques de la paille et de la balle de riz à des fins de production d'énergie

Forte teneur en cendres de la paille de riz

La teneur en cendres de la paille (et de la balle) de riz est très élevée comparativement à la paille de blé et plus encore comparativement au bois. Ceci réduit la valeur calorifique et complique le processus de manutention des cendres à la centrale et, ensuite, dans le parc à cendres.

		Paille de riz	Balle de riz	Paille de blé	Bois
Teneur en cendres	%	15-20	15-20	8,5	1
Teneur en eau type	%	15-30	9-11	7-15	5-15
Pouvoir calorifique (à l'état humide)	GJ/tonne	14	13	16	16,2

Tableau 3. Teneur en cendres, teneur en eau type et pouvoir calorifique bas de différents types de biomasse.<sup>1</sup>

Composition des cendres

La comparaison des cendres de la paille de riz avec celles de la paille de blé ou du bois révèle également des différences. Selon Baxter (1993), les cendres de

<sup>1</sup> [http://www.biofuelsb2b.com/useful\\_info.php?page=Typic](http://www.biofuelsb2b.com/useful_info.php?page=Typic)



paille de riz présentent une teneur en silice (75 %) supérieure à celle des cendres de paille de blé (55 %), ce qui a un impact sur l'usure de la chaudière. À l'inverse, le titre alcalimétrique des cendres de paille de riz est inférieur (15 %) à celui des cendres de paille de blé (25 %). Ceci implique un niveau de corrosion inférieur à quantité de cendre égale, mais, la teneur en cendres étant plus élevée, il faut prévoir que les problèmes de corrosion associés à l'utilisation de la paille de riz ne seront pas inférieurs à ceux associés à la paille de blé.

La forte teneur en cendres ainsi que la forte teneur en silice des cendres font de la paille de riz et de la balle de riz un combustible relativement peu intéressant. L'avantage de ces combustibles réside essentiellement dans le fait qu'ils sont un sous-produit agricole relativement bon marché et disponible.

### **4.3 Puissance de la centrale électrique**

La centrale de l'étude de cas est dimensionnée en fonction de la paille disponible localement, d'une distance de transport raisonnable de la paille vers la centrale, d'une puissance de centrale raisonnable et de la puissance de l'interconnecteur.

#### **Paille de riz et balle de riz disponibles localement**

Comme mentionné ci-dessus, la production de riz de l'Office de Niger depuis 2000 est de 350 000 à 500 000 tonnes/an. Avec un rapport paille/grain de 0,75, cette production représente environ 260 000 à 375 000 tonnes de paille par an (Nygaard, Bruun et al. 2012).

Paille de riz disponible

Aujourd'hui, l'essentiel de la paille est utilisé pour nourrir le bétail, mais 15 % environ de la production est brûlée ou laissée sur place (Nygaard, Bruun et al. 2012). Cette partie de la paille (environ 40 000 à 55 000 tonnes/an) peut être utilisée à d'autres fins, par exemple pour alimenter une centrale électrique.



Figure 8. Paille de riz brûlée sur place

Cette quantité de paille de riz suffirait à alimenter une centrale électrique de 5 MW.

Outre la paille de riz, une partie de la balle de riz peut aussi être utilisée pour la production d'énergie.

Balle de riz disponible	Avec un ratio balle/grain de 0,2 (Nygaard, Bruun et al. 2012) et une production de 350 000 à 500 000 tonnes de riz par an, la production de balle de riz est de 70 000 à 100 000 tonnes par an. Comme décrit ci-dessus, le ratio balle/grain dépend de la technologie utilisée pour le blanchissage.
Utilisation de balle de riz dans la centrale électrique	Pour des raisons techniques, la paille de riz devrait être le combustible principal, mais la balle de riz peut être utilisée en co-combustion. La centrale peut brûler jusqu'à 20 % environ de balle de riz au lieu de paille de riz (sur la base de la fraction massique).
Quantité de paille et de balle suffisante pour une centrale de 6 MW	Pour une teneur en cendres et un pouvoir calorifique quasi-similaire, la balle de riz peut représenter 20 % du combustible, en termes énergétiques, ce qui signifie que la centrale peut produire jusqu'à 6 MW à partir du combustible disponible (paille et balle).

Il faut tenir compte cependant qu'une partie de la paille et de la balle ne sera pas collectée. La centrale ne devrait donc pas avoir une puissance supérieure à 4 ou 5 MW. Toutefois, une puissance de 4 à 5 MW peut être trop élevée compte tenu de la paille et de la balle disponibles actuellement. Si une centrale de cette puissance est prévue, des combustibles de secours doivent être envisagés, sauf s'il existe des projets très sûrs d'expansion de la production de riz.



Paille à distance raisonnable	<p><b>Distance de transport raisonnable de la paille vers la centrale</b></p> <p>Si l'on envisage d'utiliser la paille de l'ensemble de la zone de l'Office de Niger, la plus grande distance de transport vers une centrale située à Niono sera d'environ 50 à 80 km. Cette distance de transport est importante, mais reste réaliste.</p>
Puissance raisonnable d'une première centrale malienne	<p><b>Puissance type d'une centrale de ce type</b></p> <p>Les trois premières centrales électriques à paille construites au Danemark de 1989 à 1990 ont une puissance de 2,3 MW, 5 MW et 11 MW. Une puissance de 5 MW pour Niono serait donc raisonnable pour une première petite centrale malienne.</p>
Interconnexion	<p><b>Puissance de l'interconnecteur électrique</b></p> <p>Comme exposé ci-après, la ville de Niono va être raccordée au réseau central interconnecté du Mali. La ligne pourra transporter une puissance de 10 à 15 MW, ce qui est plus que suffisant pour une centrale de 5 MW.</p>
Ligne de transport vers Niono	<p><b>4.4 Connexion au réseau électrique</b></p> <p>En mars 2012, la ville de Niono devrait être raccordée au réseau d'électricité interconnecté par une ligne de transport de 63 kV. La ligne fera 100 km de long et utilisera un câble Almelec de 148 mm<sup>2</sup>. Elle pourra transporter 10 à 15 MW.</p>
Point de raccordement d'une centrale électrique	<p>De décisions techniques doivent être prises en ce qui concerne le point de raccordement d'une centrale électrique. Ces décisions dépendent, notamment, de la distance entre la centrale et la ligne de transport.</p>

Pour raccorder une centrale de 5 MW au réseau, il existe deux options de base.

1) La centrale peut être raccordée à 15 kV si elle est distante de moins d'1 km du poste abaisseur de tension 33 kV/15 kV. Cela signifie que la centrale sera raccordée directement à la barre omnibus 15 kV du réseau interconnecté.

2) Si la distance entre le poste abaisseur de tension 33 kV/15 kV et la centrale est supérieure à 1 km, la centrale doit être raccordée à la barre omnibus du poste abaisseur de tension de 63 kV / 33 kV vers la ligne 63 kV du réseau interconnecté à Ségou. Cela signifie qu'un poste 15 kV / 33 kV (2 x 5 MVA) doit être installé à la centrale.

## 4.5 Exploitation

Charge de base

Il serait optimal qu'une centrale à paille de riz installée à Niono puisse être exploitée en charge de base. Les coûts d'investissement d'une centrale à paille de riz sont plus élevés que ceux d'une centrale au fioul, qui, en raison de ses faibles coûts d'investissement et de ses coûts de combustible élevés, convient mieux en charge de pointe.

L'exploitation et la maintenance de la centrale bénéficieront également de cette exploitation en charge de base. Les expériences danoises indiquent qu'il est possible de passer en charge partielle ou de démarrer et arrêter la centrale fréquemment. Cette conclusion repose sur de longues expériences d'exploitation de centrales à chaudière à grille au Danemark, mais, pour une première centrale malienne, sans expérience préalable de l'exploitation et de la maintenance de centrales de ce type, il n'est pas recommandé de prévoir une exploitation avec de nombreuses heures de charge partielle ou de nombreux démarrages/arrêts.

Disponibilité

La disponibilité moyenne des centrales danoises est de 90 %. Dans la mesure où il s'agit de la première centrale du Mali, il convient de prévoir une disponibilité moins élevée, peut-être de l'ordre de 70 à 75 %.

Approvisionnement en combustible

La disponibilité du combustible (paille de riz) sera naturellement saisonnière. Pour que l'économie de la centrale soit intéressante, il est nécessaire de stocker le combustible afin de maintenir un approvisionnement stable toute l'année. L'essentiel de ce combustible devra être stocké dans les rizières ou à proximité, dans de petites unités de stockage réparties. Il peut y avoir des variations annuelles de prix du combustible, en fonction des possibilités de stockage et de la disponibilité du combustible. Ceci peut légèrement affecter le profil d'exploitation, qui restera toutefois une exploitation en charge de base.

Demande/prix de l'électricité

On considère que le coût marginal de la production d'électricité sera suffisamment élevé pratiquement chaque heure de l'année pour qu'une centrale à paille de riz soit exploitée en permanence. Il n'est pas prévu que de courtes périodes à coût de production d'électricité plus bas rendent intéressant l'arrêt de la centrale ou son fonctionnement à charge réduite. Il est donc prévu que le prix de l'électricité n'affectera pas le profil d'exploitation.

## 4.6 Sucreries de la région

### SUKALA

Usines existantes

Près de Niono, dans la commune de Markala, deux petites sucreries, situées à Dougadoubou et Siribala, produisent du sucre à partir de canne à sucre. Ces sucreries appartiennent à une co-entreprise entre le gouvernement malien et une société chinoise, dénommée SUKALA (ou N'SUKALA). Les deux usines produisent actuellement environ 39 000 tonnes de sucre par an (SUKALA 2010). Comme la plupart des sucreries, elles possèdent leur propre centrale électrique alimentée en bagasse. Les centrales existantes ont une capacité d'environ 5 MW et la totalité de la production est utilisée par la sucrerie.

Nouvelle sucrerie

Selon un article publié par Mali Web en septembre 2011, une nouvelle sucrerie devait entrer en service en 2012. Sa production annuelle est estimée à 100 000 tonnes de sucre et à 9,6 millions de litres d'alcool par an. (Mali Web 2011). Le projet comprend une nouvelle centrale électrique de 15 MW destinée à la consommation de la sucrerie.

### SoSuMar

Un autre projet, SOciété SUcrière de MARKala (SoSuMAR), est en cours de développement depuis plusieurs années et, selon un entretien avec la direction en février 2012 (SOSUMAR 2012), la société était alors en train de conclure des accords financiers et prévoyait de démarrer la production de sucre en 2015 et de passer en pleine production en 2018. L'actionnaire principal de la société est la plus grosse société sucrière d'Afrique, Illova Holding, dans le cadre d'un partenariat public-privé avec le gouvernement du Mali (6 %).

Ce projet de sucrerie est associé à :

- 14 000 ha de canne à sucre (appartenant pour 60 % à la société et pour 40 % à des producteurs locaux)
- une unité de production d'électricité de 30 MW, alimentée à la bagasse, aux feuilles et à d'autres résidus de la canne à sucre
- une usine de bioéthanol produisant 15 millions de litres de bioéthanol par an (50 tonnes/jour) à partir des résidus de la production de sucre

Production d'électricité pour le réseau

Contrairement à SUKALA, SoSuMAR ne produira pas uniquement de l'électricité pour la sucrerie, mais alimentera également le réseau (environ 10 % de la production).

Un contrat d'achat/vente d'électricité a été signé avec EDM. Il s'agit du premier contrat de ce type pour la production d'électricité à partir de biomasse au Mali.

Combustible pour la centrale électrique

Le combustible principal de la centrale sera la bagasse, complété par des feuilles et d'autres résidus de la canne à sucre. Trente pour cent seulement du total des résidus potentiels de la canne à sucre seront utilisés par la centrale, parce que 70 % de la canne seront récoltés manuellement, ce qui implique que la canne est brûlée sur pied avant récolte. Cette méthode de récolte ne laisse pas de résidus. Les 30 % restant de la canne à sucre seront récoltés mécaniquement et les résidus seront disponibles pour produire de l'électricité.

La récolte manuelle crée des emplois

La récolte de la canne est manuelle à 70 % parce que la production de canne fait partie d'un projet pour l'emploi. Selon notre entretien avec la direction, la récolte mécanique donne un meilleur rendement, mais crée moins d'emplois que la récolte manuelle.

### **Possibilités de coopération avec les sucreries**

Il existe des similarités entre le projet de centrale à bagasse/canne à sucre et le projet de centrale à paille de riz. Ces deux types de centrales utilisent des résidus agricoles, qui doivent être récoltés, transportés et stockés. Elles doivent utiliser une technologie robuste en raison de la nature difficile et irrégulière du combustible.

Échange de combustibles

Il semble évident d'envisager une coopération, que ce soit par un échange de combustibles entre les deux projets de centrales, lors de variations d'approvisionnement, ou par un projet de centrale commune multi-combustibles. Cette dernière option n'est sans doute pas réaliste dans notre cas, puisque la planification des sucreries est trop avancée pour ajouter un combustible supplémentaire et augmenter la capacité prévue.

Potentiel de réduction du risque en ajoutant un autre combustible

Si, à l'avenir, les 70 % de récolte manuelle de canne du projet SoSuMar venaient à être récoltés mécaniquement, et si les résidus supplémentaires étaient utilisés dans une centrale, on peut estimer que la capacité de production de la centrale serait augmentée de 4 MW. Il s'agit d'une quantité de résidus considérable qui vient s'ajouter à la de paille de riz. Si une centrale à paille de riz de 5 MW est construite, la ressource potentielle en combustible supplémentaire des champs de canne pourrait réduire le risque de variation de la ressource.

Échange de savoir-faire  
et d'ouvriers qualifiés

Ce potentiel de deux nouvelles centrales dans une même région offre, bien que les résidus agricoles utilisés soient différents, des possibilités d'échange de savoir-faire et de création d'un pool de spécialistes et d'ouvriers qualifiés pour la maintenance des centrales, voire la planification d'une maintenance coordonnée, etc., ce qui réduirait l'important risque technique lié à « l'unicité » d'une petite centrale à paille de riz à Niono.

## 5 Technologies

Différentes technologies sont utilisées pour la production d'énergie à partir de biomasse. Les technologies courantes sont la chaudière à grille, le lit fluidisé bouillonnant, le lit fluidisé circulant et la combustion de poussière. Ces technologies sont essentiellement utilisées pour la biomasse ligneuse, les résidus de l'industrie de la pâte et du papier, les résidus de l'industrie sucrière, la tourbe et, dans certains cas, la paille.

Production d'électricité à partir de paille

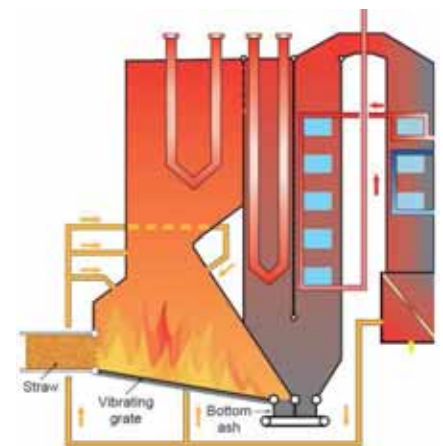
Les expériences internationales de production d'électricité par combustion de paille sont limitées. Des expériences menées au Danemark depuis 20 ans utilisent essentiellement la technologie de chaudière à grille ou la co-combustion de poussière avec du charbon ou des granulés de bois.

Dans la section suivante, nous discuterons des technologies recommandées pour une centrale électrique de 5 MW située à Niono, au Mali, alimentée à la paille de riz.

### 5.1 Chaudière à grille

Avantages

La technologie de chaudière à grille est ancienne, éprouvée, relativement bon marché et largement utilisée dans plusieurs pays avec une grande variété de combustibles, y compris des combustibles difficiles tels que la paille de blé. Au Danemark, de nombreuses chaudières à grille sont utilisées pour produire de l'électricité à partir de bois, d'ordures ménagères ou de paille. Une chaudière à grille est très résistante en termes de variation de dimensions du combustible, de teneur en eau, de composition des cendres, etc. Les chaudières à grille sont construites dans des puissances de 3 à 50 MW<sub>e</sub>.



Inconvénients

Les inconvénients des chaudières à grille sont notamment leur rendement réduit et leur coût d'exploitation et de maintenance relativement élevé.

### 5.2 Lit fluidisé bouillonnant (LFB)

Dans une chaudière à LFB, un lit de sable bouillonne dans la partie inférieure du foyer. La zone de combustion retient toute la chaleur du combustible, ce qui rend ce procédé de combustion bien adapté à la biomasse.

La technologie LFB est également largement répandue pour les petites centrales électriques à biomasse. En Suède et en Finlande, particulièrement, les chaudières à LFB sont utilisées dans le secteur de la pâte et du papier, mais on trouve des chaudières à LFB pour biomasse dans le monde entier.

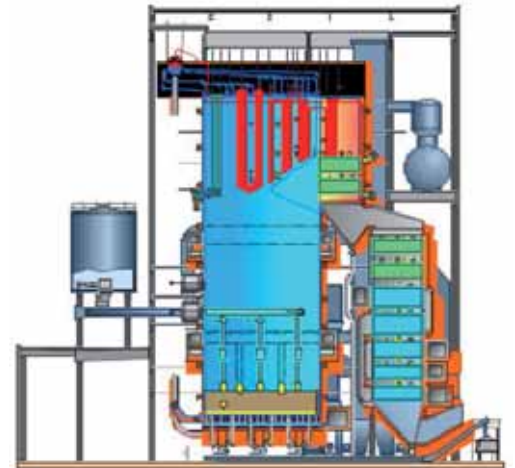
#### Avantages

Comparativement à la chaudière à grille, le LFB donne des rendements légèrement supérieurs et des coûts d'exploitation et de maintenance plus bas. Les chaudières à LFB sont essentiellement utilisées dans le secteur du bois et du papier, pour brûler des résidus ligneux. Les chaudières à LFB permettent des puissances légèrement supérieures à celles des chaudières à grille et vont de très petites puissances à 100 MW<sub>e</sub> environ.

#### Inconvénients

Les chaudières à LFB exigent que le combustible ait une certaine teneur en eau pour maintenir la température à un niveau acceptable. La chaudière à LFB n'est par conséquent pas recommandée pour un combustible sec tel que la paille. De plus, la teneur en alcalis de la paille posera problème dans une chaudière à LFB.

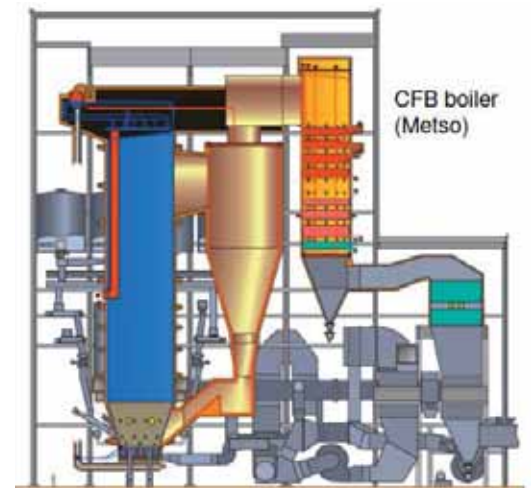
Dans la mesure où il n'existe pas de documentation sur des expériences positives d'utilisation de la paille dans une chaudière à LFB, il n'est pas recommandé d'étudier plus avant cette technologie dans notre cas.



### 5.3 Lit fluidisé circulant (LFC)

Dans une chaudière à LFC, le matériau du lit circule avec le gaz de combustion dans le foyer, avant d'en être séparé par des cyclones et de revenir dans la partie basse du foyer.

La technologie LFC est également utilisée dans le secteur de la pâte et du papier en Suède et en Finlande, mais essentiellement dans des installations plus puissantes que la technologie LFB. Des centrales à LFC utilisant du charbon



et, dans une certaine mesure, du bois, existent dans le monde entier.

**Avantages** Le lit fluidisé circulant permet d'utiliser du combustible de dimensions et de teneur en eau variés. Les chaudières à LFC permettent de plus grandes puissances que les chaudières à grille et les chaudières à LFB (jusqu'à 300 – 400 MW<sub>e</sub>). La plus grande puissance permet également un meilleur rendement.

**Inconvénients** Les chaudières à LFC émettent plus d'oxyde nitreux que les autres types de chaudières. La consommation propre d'électricité des chaudières à LFC est supérieure d'environ 1 % à celle des chaudières à grille (2 à 3 % pour les chaudières à grille et 3 à 4 % pour les chaudières à LFB/LFC selon Evald and Witt (2006)). Les chaudières à LFC sont sensibles à la teneur en alcalis du combustible et ne sont donc pas recommandées pour la paille.

En raison du titre alcalimétrique de la paille, il n'est pas utile de poursuivre l'étude de la technologie LFB dans notre cas.

#### **5.4 Combustion de poussière**

Les chaudières à poussière sont largement utilisées pour le charbon. Quelques centrales au charbon ont été adaptées pour utiliser des granulés de bois et leur nombre devrait croître.

**Avantages** Une chaudière à poussière peut être de plus grande puissance et offrir un meilleur rendement électrique.

**Inconvénients** Une chaudière à poussière ne peut utiliser que des combustibles très fins. Pour la biomasse, ces combustibles peuvent être des granulés, de la sciure ou de la paille pulvérisée. La pulvérisation de la paille est coûteuse et n'est intéressante que pour une centrale de grande puissance, lorsque le rendement élevé est une priorité.

Pour une petite centrale, la construction d'une chaudière à poussière avec pulvérisation de la paille n'est guère faisable.



## 5.5 Autres technologies de centrales à biomasse

### Moteur Stirling

Des moteurs Stirling ont été développés pour la biomasse, et, notamment pour la paille. Cette technologie manque de maturité en ce qui concerne la paille, mais elle fonctionne.



#### Avantages

Ce moteur est très robuste et convient à l'utilisation de la paille et à de très petites unités.

#### Inconvénients

Les principaux inconvénients sont :

- le rendement électrique est faible
- la technologie n'est pas bien éprouvée
- jusqu'à présent, les moteurs construits sont de très faible puissance

Lorsque cette technologie sera plus éprouvée, elle pourra être intéressante pour de petites installations de production d'électricité.

### Gazéification

La gazéification n'est pas une technologie nouvelle en soi, mais l'utilisation de combustibles complexes tels que la paille dans un gazéifieur est nouvelle. Potentiellement, un gazéifieur associé à un moteur à gaz peut donner un rendement élevé, même pour une petite centrale à biomasse. À ce jour, aucun gazéifieur n'a été utilisé avec succès avec de la paille sur une longue période.

### Cycle de Rankine organique (CRO)

Le CRO est une technologie très résistante pour les centrales électriques à biomasse. Son inconvénient est son faible rendement électrique. Cette technologie n'est donc intéressante que si la production de chaleur est la demande principale et si la production d'électricité est secondaire.

## 5.6 Technologie retenue

La chaudière à grille est la technologie la plus pertinente dans notre cas, en raison du combustible, de la puissance de la centrale, du besoin d'électricité uniquement, sans production de chaleur, et du besoin d'une technologie résistante et éprouvée. La technologie de chaudière à grille est également la seule dotée de références positives importantes pour l'utilisation de paille.

## 5.7 Recommandations techniques pour la centrale électrique

Manutention du combustible de la rizière à la centrale

La manutention de la paille de la rizière à la centrale est décrite à l'Annexe A. La présente section couvre la manutention de la paille dans la centrale.

### Description de la centrale

Stockage à la centrale électrique

La paille de riz doit être livrée à la centrale en grosses balles de 500 kg. À la centrale, les grosses balles seront stockées dans un local fermé, d'une capacité correspondant à 2 jours de production.



Stockage décentralisé

Le reste de la paille sera stocké de façon décentralisée, près des rizières, ce qui réduira le risque d'incendie et les coûts d'investissement. En stockage décentralisé, une partie de la paille de riz peut être stockée en plein air.



Manutention du combustible à la centrale électrique

La paille est transportée par grue du stockage au transporteur de réception. Sur le transporteur de paille, la paille est lestée et des joints empêchent tout retour de flamme de la chaudière vers la paille stockée. Les ficelles qui entourent les balles sont retirées automatiquement et les balles sont défaites avant que la vis pousse la paille dans la chaudière.

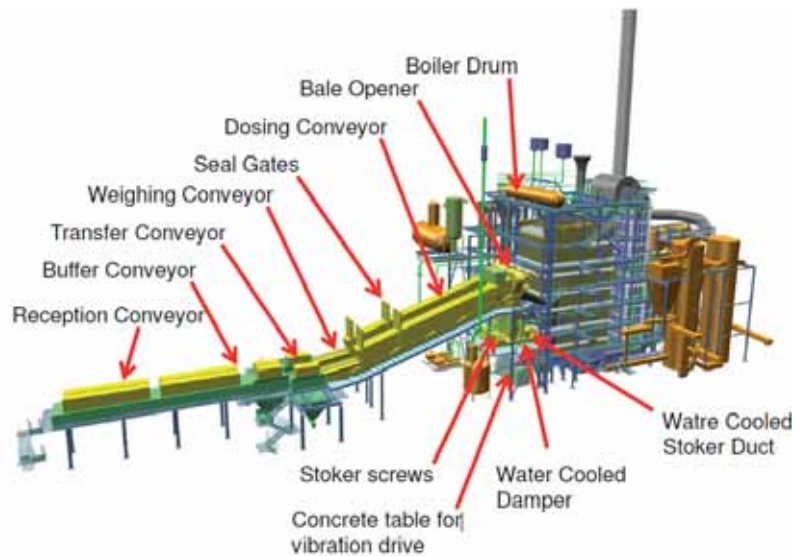


Figure 9. Exemple de manutention de paille et de chaudière d'une centrale électrique à paille (de blé) en Allemagne. La puissance est deux fois celle de Niono (Petersen 2012).

### Chaudière à grille

Dans la chaudière, la paille est déposée sur la grille. La grille peut être mobile, vibrante ou à gradins. Avec une grille vibrante, par exemple, le combustible descend légèrement sur la grille à chaque vibration.

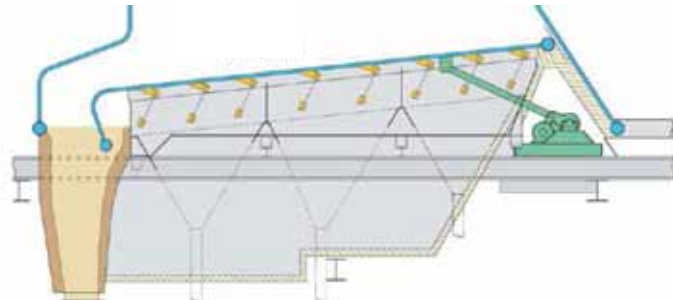


Figure 10. Exemple de grille vibrante

Lorsque le combustible atteint le bas de la grille, la combustion est achevée et il ne reste que des cendres, qui tombent dans un réceptacle à scories rempli d'eau. Les cendres récoltées dans le réceptacle peuvent être ramenées aux champs et servir d'engrais.



### Circulation du gaz de combustion

Le gaz de combustion traverse des surchauffeurs et des économiseurs pour chauffer l'eau/la vapeur pour la turbine. Ensuite, un filtre à sac ou un dépoussiéreur électrostatique nettoie les particules du gaz de combustion, qui est alors assez propre pour être éliminé par la cheminée.

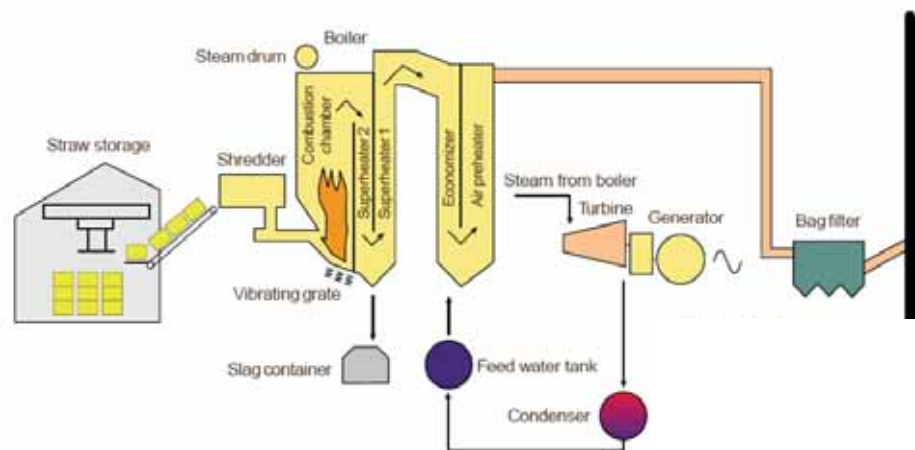


Figure 11. Schéma du principe de fonctionnement d'une centrale à chaudière à grille alimentée en paille

### Cycle de la vapeur

La vapeur surchauffée est dirigée des surchauffeurs vers la turbine à vapeur. La turbine actionne l'alternateur pour produire de l'électricité. En aval de la turbine, la vapeur doit être condensée dans le condenseur avant que la pompe d'eau d'alimentation augmente la pression de l'eau. L'eau sous pression est renvoyée vers les économiseurs et les surchauffeurs pour évaporation.

### Refroidissement de la vapeur dans le condenseur

La vapeur sortant de la turbine doit être refroidie pour se condenser en eau, au moyen de condenseurs de différents types. On utilise de préférence un condenseur refroidi par eau si l'on dispose d'une source d'eau froide suffisante, parce que l'eau assure un meilleur transfert thermique, ce qui permet d'utiliser un équipement plus petit et moins coûteux.

### Condenseur refroidi à l'eau

Le condenseur refroidi à l'eau offre les plus faibles coûts d'investissement, en raison du meilleur transfert thermique. Il optimise également le rendement de la centrale en raison de sa capacité de refroidissement à une température plus basse.

Le problème de ce type de condenseur est la quantité d'eau qu'il nécessite. Avec un rendement de chaudière de 90 %, un rendement électrique d'environ 20 % et une augmentation de 5°C de la température de l'eau de refroidissement, il faut environ 2 500 à 3 000 m<sup>3</sup>/h (0,75 m<sup>3</sup>/s) d'eau de refroidissement. Il n'est pas possible de trouver une telle quantité d'eau pour une centrale à l'endroit prévu.

Condenseur refroidi à l'eau avec tour de refroidissement

Un condenseur refroidi à l'eau peut être associé à une tour de refroidissement si la quantité d'eau froide disponible n'est pas suffisante. Une tour de refroidissement peut être par voie sèche ou humide, l'énergie de l'évaporation étant dans ce cas utilisée pour refroidir l'eau dans le condenseur. Une tour de refroidissement par voie humide pour une centrale telle que celle du présent cas utiliserait 30 à 50 m<sup>3</sup>/h d'eau propre.

Condenseur refroidi à l'air

Le condenseur refroidi à l'air constitue la solution la plus simple pour une centrale située dans un secteur où l'eau propre ou froide est une ressource rare. Le coût d'investissement est un peu plus élevé et le rendement légèrement inférieur, mais cette solution réduit sensiblement le problème de l'alimentation en eau et de la maintenance du condenseur.



Il est recommandé d'utiliser un condenseur refroidi à l'air dans ce cas spécifique.

### Calculs de rendement

Un calcul de bilan thermique a été effectué pour estimer le rendement électrique de la centrale. Les éléments suivants ont été utilisés pour calculer le bilan thermique : chaudière, vannes haute pression, turbine (avec extraction de vapeur à 4 niveaux de pression différents), démultiplicateur, condensateur, 2 préchauffeurs et un réservoir d'eau d'alimentation. Le schéma général du processus est présenté en Figure 13.

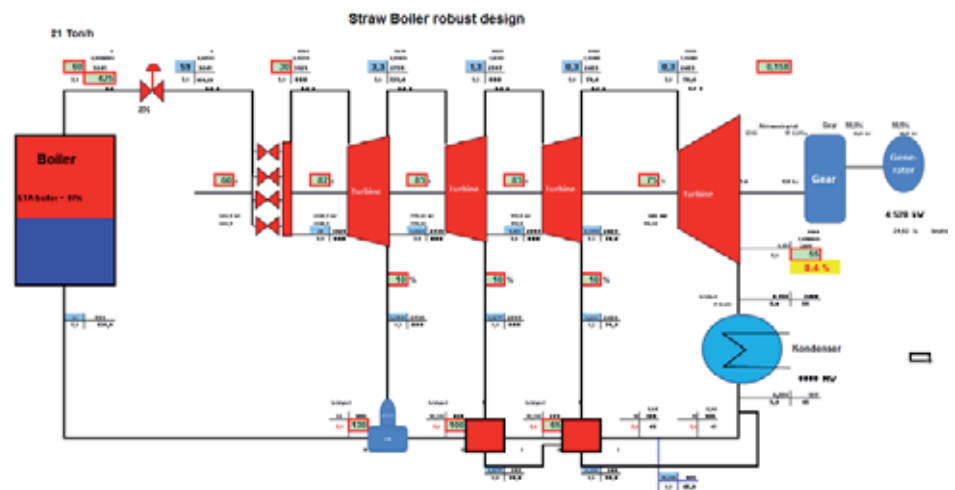


Figure 12. Modèle de processus de centrale (calcul de bilan thermique).

Le bilan thermique, le bilan massique et les équations thermodynamiques sont calculés pour chacun de ces éléments. Les niveaux de pression de chaque point d'extraction de la turbine sont optimisés pour obtenir le meilleur rendement possible.

Rendement des composants

Le rendement de certains composants est estimé :

- Rendement de la chaudière : 87 %
- Perte de charge de vanne : 2 %
- Rendement isentropique des étages de turbine : 75-83 %
- Rendement du démultiplicateur : 98 %
- Rendement de l'alternateur : 98,5 %

Pression et température

Les points les plus importants en termes de pression et de température sont les suivants :

- En aval de la chaudière : 60 bars et 425 °C
- En aval de la turbine : 0,16 bar et 55 °C
- À l'extraction 1 de la turbine : 3,3 bars et 139 °C
- À l'extraction 2 de la turbine : 1,3 bars et 106 °C
- À l'extraction 3 de la turbine : 0,3 bars et 70,4 °C
- Dans le réservoir d'eau d'alimentation/en amont de la chaudière : 66 bars et 130 °C

Rendement

Le rendement électrique total calculé pour la centrale modélisée est de 24,6 % brut et 22,7 % net. Les flux et pertes d'énergie principaux sont présentés en Figure 14.

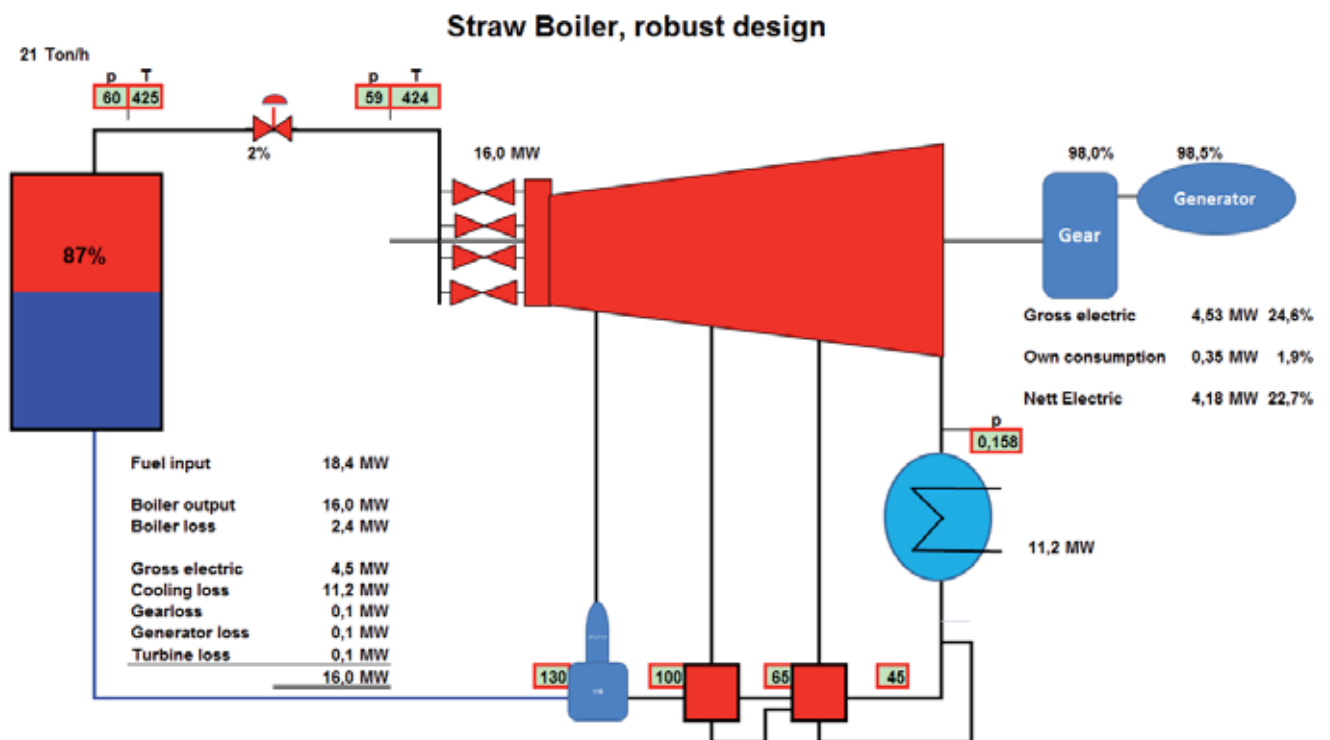


Figure 13. Schéma général du modèle de processus de centrale

#### Recommandation

Pour une centrale d'une puissance de 4 à 5 MW à Niono, un processus comparable à celui décrit ci-dessus pourrait être utilisé. Les composants et les niveaux de température et de pression ci-dessus peuvent être recommandés.

En aval du processus de décision, des calculs et optimisations de processus plus détaillés seront nécessaires.



## 6 Évaluation économique

Les paramètres les plus importants de l'évaluation économique de la construction et de l'exploitation d'une centrale électrique à paille de riz sont le coût d'investissement (y compris le coût d'investissement du raccordement au réseau), le coût d'exploitation et de maintenance, le coût du combustible (paille), le coût de l'élimination des cendres et les éventuelles subventions.

À partir de ces paramètres, et de l'hypothèse que le taux de rendement interne (TRI) du projet calculé sur une période de 23 ans (3 ans de construction plus 20 ans d'exploitation) doit être de 5 %, on peut calculer le prix de l'électricité moyen accepté minimum.

### 6.1 Coûts d'investissement

#### Centrale électrique

Au Danemark, de nombreuses centrales de ce type, alimentées à la paille de blé, ont été construites au cours des 25 dernières années. Il est donc raisonnable de consulter les prix spécifiques danois pour ce type de centrale afin d'estimer le coût d'investissement au Mali. Des ratios spécifiques moyens ont été calculés pour ce type de centrale à partir de l'expérience de nombreuses centrales de différentes puissances sur de nombreuses années (DEA 2010). Cet investissement spécifique moyen constitue la base des présents calculs, qui donnent un coût d'investissement spécifique de 3 556 millions de CFA par MW<sub>e</sub> pour une centrale comparable aux centrales à paille de blé du Danemark.

Comparaison avec le coût d'investissement de 7 centrales à paille danoises

L'investissement spécifique de 7 centrales à paille danoises a été étudié, pour vérifier si le montant de 3 556 millions de CFA par MW<sub>e</sub> est représentatif pour une nouvelle centrale de la puissance envisagée pour Niono. Les données de ces 7 centrales figurent dans Nicolaisen, Nielsen (1998).



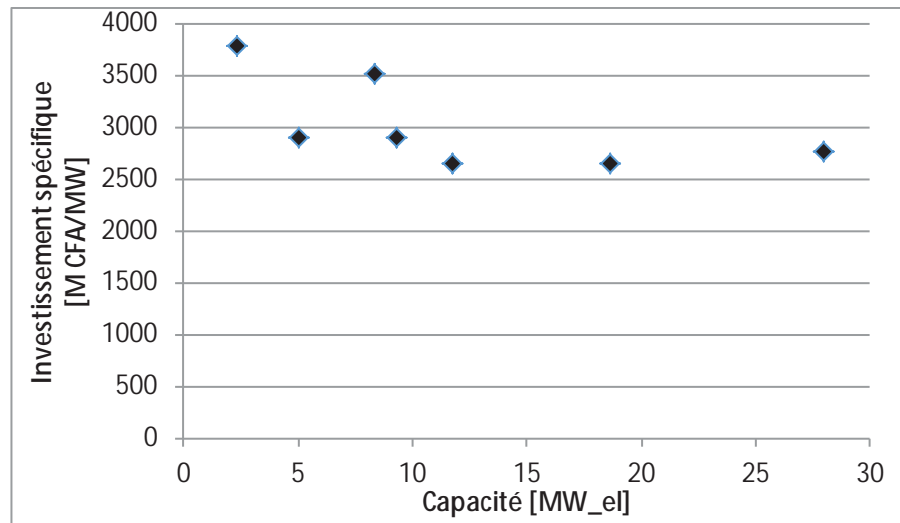


Figure 14. Investissement spécifique de 7 centrales de cogénération (chaleur-électricité) au Danemark d'une capacité installée de 2,3 à 18,6 MW. En millions de CFA/MW<sub>e</sub>.

On peut voir en Figure 15 que le coût spécifique des petites unités (2 à 10 MW<sub>e</sub>) est de l'ordre de 3 000 à 4 000 millions de CFA par MW<sub>e</sub>. Par conséquent, 3 556 millions de CFA par MW<sub>e</sub> semblent un calcul raisonnable.

Les 7 centrales danoises évaluées ont été mises en service entre 1989 et 2000.

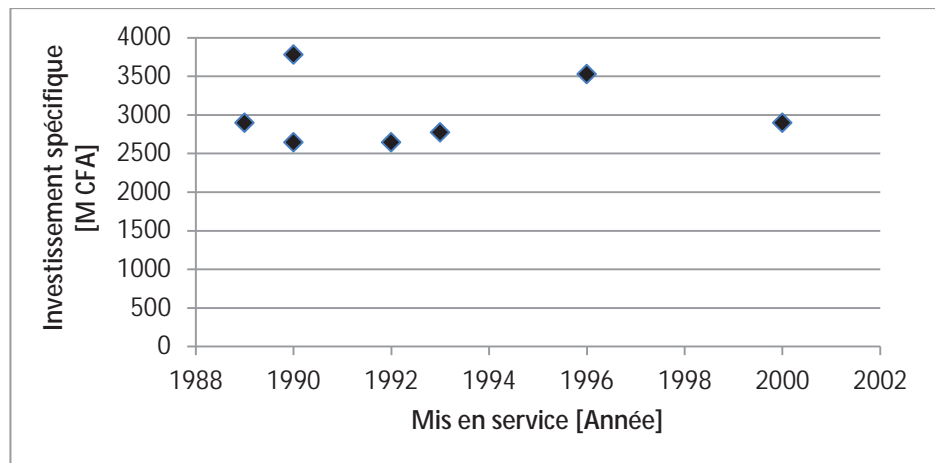


Figure 15. Investissement spécifique de 7 centrales de cogénération –chaleur-électricité) au Danemark, mises en service entre 1989 et 2000. En millions de CFA/MW.

Comme l'indique la Figure 16, le coût d'investissement n'a pas sensiblement évolué au fil des ans.

Condensation/  
Cogénération

Toutes les centrales à biomasse du Danemark produisent à la fois de l'électricité et de la chaleur utilisée pour le chauffage urbain. Une centrale à Niono ne devra pas satisfaire de besoins en chauffage et devra donc inclure

un processus de condensation. L'investissement spécifique de 3 556 millions de CFA par MW<sub>e</sub> correspond à des centrales de cogénération, dont le rendement électrique est inférieur à celui des centrales à condensation. Par conséquent, l'investissement spécifique doit être ajusté au ratio de rendement avec un facteur de 22,7/24,5 (ratio du rendement d'une centrale à cogénération/centrale à condensation). Pour une centrale de 5 MW, on obtient un investissement de 15 940 millions de CFA.

Outre cet ajustement, le coût d'investissement est ajusté en fonction des différences techniques pour l'installation effective et de la situation.

Moyens de condensation	La centrale étant à condensation, et non à cogénération, elle doit être refroidie par d'autres moyens que le chauffage urbain. D'un point de vue technique, cela signifie qu'à défaut de chauffage urbain, la centrale doit être équipée d'une turbine plus importante et d'un condenseur. Dans la mesure où il y a peu d'eau disponible, nous partons sur l'hypothèse d'un condenseur refroidi à l'air. Comparativement à un condenseur refroidi à l'eau, son rendement est plus faible et son coût d'investissement légèrement plus élevé. La turbine plus grosse et le condenseur refroidi par air représentent un investissement d'environ 10 % en plus des 15 940 millions de CFA.
Installations de stockage	Outre la centrale, le site doit être préparé et des installations de stockage doivent être ajoutées. Ceci augmente l'investissement spécifique d'environ 5 % en plus des 15 940 millions de CFA.
Construction au Mali	Les équipements et le savoir-faire nécessaires à la construction de ce type de centrale à biomasse n'existent pas au Mali, puisqu'il s'agira de la première de ce type dans le pays. Il faut donc prévoir un coût supplémentaire en raison du transport des équipements sur une longue distance et de la nécessité de faire venir des experts et des ouvriers spécialisés compétents pour la construction et la mise en service. Il convient pour cela d'ajouter 10 % au coût d'investissement total.
Coût d'investissement total	Le coût d'investissement estimé pour une centrale à paille de riz de 5 MW à Niono est de 20 164 millions de CFA, aux prix de 2012.
Durée de service	La durée de vie technique d'une centrale à paille de riz de cette puissance est de 20 ans. Si la centrale doit rester en service au-delà de 20 ans, des investissements supplémentaires seront nécessaires, en plus de la maintenance extraordinaire. Ils ne seront pas inclus dans ces calculs.

Temps de construction Le temps de construction d'une centrale à paille est généralement de 2 à 3 ans. En raison du temps de transport supplémentaire des équipements et de la nécessité de faire venir des experts au Mali pendant la durée de construction, il convient de prévoir une durée de construction de 3 ans. Pour les calculs économiques, les investissements seront répartis sur les 3 ans, avec 10 % de l'investissement la première année et 45 % chacune des deux années suivantes.

### Lignes de transport

On considère que l'électrification de Niono prévue en mars 2012 créera des lignes de transport suffisantes pour raccorder une centrale de 5 MW au réseau (Nygaard, Nørgård *et al.* 2012). Il n'y a par conséquent pas de coûts d'investissement supplémentaires pour le développement du réseau de transport d'électricité.

## 6.2 Coût d'exploitation et de maintenance

Les coûts d'exploitation et maintenance (E&M) de la centrale sont estimés selon les coûts d'investissement calculés à l'aide des ratios clés du DEA (2010). Pour une centrale à paille de riz de faible puissance, les coûts annuels d'E&M représentent en moyenne 4 % du coût d'investissement. C'est le chiffre utilisé pour les présents calculs économiques.

Utilisation de main d'œuvre locale ou étrangère

Il convient de discuter dans quelle mesure la maintenance peut être effectuée par une main d'œuvre locale. Nous considérons que l'exploitation au jour le jour et la maintenance courante peuvent être assurées par des ouvriers spécialisés locaux, mais que la maintenance extraordinaire doit être effectuée par des spécialistes, qui ne se trouveront pas dans le pays puisque la centrale de Niono sera la première de ce type au Mali. Le salaire des ouvriers spécialisés locaux est considérablement moins élevé que celui des ouvriers spécialisés danois. L'E&M sera donc moins coûteuse qu'au Danemark. Pour les besoins de maintenance extraordinaire, par contre, le prix sera beaucoup plus élevé qu'au Danemark, puisque les pièces de rechange et les techniciens viendront de l'étranger, vraisemblablement d'Europe. De plus, comme il s'agira de la première centrale à biomasse du pays, on considère également qu'il faudra plus d'E&M que pour une centrale moyenne au Danemark.

Compte tenu de tous ces éléments, le coût d'E&M devrait être supérieur de 10 % à celui du Danemark, à l'instar du coût d'investissement. Cela signifie que le coût d'E&M au Mali sera également de 4 % du coût d'investissement.

### 6.3 Rendement et disponibilité de la centrale électrique

Le rendement de la centrale et le nombre total d'heures à pleine charge sont importants pour le calcul de la consommation de combustible.

Rendement à pleine charge

Le rendement électrique calculé pour une centrale à paille de riz à Niono est de 24,6 % brut et de 22,7 % net (Cf. 5.7 Recommandations techniques pour le calcul du bilan thermique), soit un peu moins que le rendement moyen (24,4 %) des 7 centrales à paille danoises décrites dans Nicolaisen, Nielsen (1998). Pour ces 7 centrales, il n'existe pas de corrélation entre la puissance de l'installation et le rendement. On observe une tendance à une légère augmentation du rendement électrique au fil des ans, comme exposé en Figure 17.

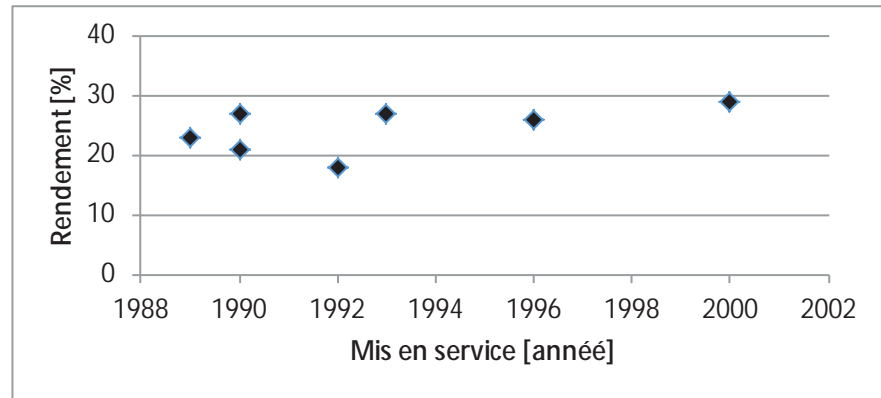


Figure 16. Rendement électrique de 7 centrales de cogénération (chaleur-électricité) au Danemark, mises en service entre 1989 et 2000.

Dans la mesure où la centrale de Niono sera la première de ce type au Mali, il convient de prévoir un rendement inférieur à celui des centrales danoises les plus récentes.

Corrélation entre le rendement moyen annuel et le rendement à pleine charge

Le rendement d'une centrale n'est pas le même à charge partielle et à pleine charge. De plus, les variations de charge et les démarrages impliquent une consommation supplémentaire. Par conséquent, le rendement moyen annuel est moins élevé que le rendement à pleine charge. Le rendement à pleine charge, la consommation de combustible annuelle et la production électrique des 7 centrales à paille danoises ont été mesurés (Nicolaisen, Nielsen 1998). Le ratio entre le rendement moyen annuel et le rendement à pleine charge pour ces 7 centrales se situe entre 0,74 et 0,9, avec une valeur médiane de 0,81. Cette valeur médiane est utilisée pour la centrale de Niono, ce qui donne un rendement moyen annuel de 18,4 %.

Nombre d'heures de service à pleine charge par an / disponibilité

La disponibilité d'une centrale à paille danoise est en moyenne de 91 % (DEA 2010). On estime que le fonctionnement à pleine charge sera de 80 % de cette moyenne, en partie en raison de la moindre disponibilité au Mali, due au délai d'acheminement des pièces de rechange et des experts, et en partie en raison des variations de l'accès au combustible, de la demande d'électricité, etc. On obtient ainsi une estimation de 6 381 heures équivalent pleine charge par an. Pour une centrale de 5 MW, on obtiendra ainsi une production annuelle d'électricité de 32 000 MWh.

## 6.4 Coût du combustible

### Quantité de combustible utilisée

La quantité annuelle de combustible utilisée par la centrale est calculée à partir des données suivantes :

- Rendement moyen annuel
- Nombre d'heures de service à pleine charge par an
- Fraction de balle de riz brûlée avec la paille de riz
- Valeur calorifique de la balle de riz et de la paille de riz / teneur en eau de la balle de riz et de la paille de riz

Fraction de balle de riz brûlée avec la paille de riz

Il est possible de brûler de la balle de riz avec la paille de riz. La quantité de balle doit être limitée en raison de la grille de la chaudière. Si l'on ajoute une trop grande quantité de balle de riz, celle-ci risque de traverser la grille et d'atteindre le système de circulation d'air, ce qui provoquera une combustion et une température irrégulières. On juge acceptable jusqu'à 20 % de balle de riz en co-combustion.

Valeur calorifique et teneur en eau de la balle de riz et de la paille de riz

La valeur calorifique du combustible mélangé (80 % de paille de riz et 20 % de balle de riz) est de 13,4 GJ/tonne, calculée à partir des valeurs de teneur en eau et des valeurs calorifiques inférieures de la balle de riz et de la paille de riz communiquées sur [www.biofuelsb2b.com](http://www.biofuelsb2b.com)<sup>2</sup>.

Consommation annuelle de carburant en tonnes/an

Sur la base de la capacité de la centrale (5 MW), du rendement annuel moyen (18,4 %) et du nombre d'heures équivalent pleine charge par an (6 381 heures), la consommation de combustible en énergie sera de 174 000 MWh/an.

Avec une co-combustion de 20 % de balle de riz, la consommation de combustible en poids sera de 46 800 tonnes/an (37 400 tonnes de paille de riz/an et 9 400 tonnes de balle de riz/an).

---

<sup>2</sup> [http://www.biofuelsb2b.com/useful\\_info.php?page=Typic](http://www.biofuelsb2b.com/useful_info.php?page=Typic)

Coût de manutention, de transport et de stockage de la paille

### Prix de la paille de riz

Le coût de manutention et de transport de la paille vers la centrale est analysé à l'Annexe A « Manutention de la paille de la rizière à la centrale ». Les coûts sont ventilés entre les processus suivants :

- Transport de la rizière au dépôt local
- Mise en balle et stockage
- Installations de stockage local
- Transport du dépôt local jusqu'à la centrale.

Les coûts sont également répartis en coût d'investissement, E&M et main d'œuvre. Les résultats des analyses sont récapitulés au tableau ci-dessous.

	Coût d'investissement	E&M	Main d'œuvre	Total
Transport de la rizière au dépôt local	0,8	0,1	5,5	6,4
Mise en balle et stockage	5,1	4,9	0,3	10,3
Installations de stockage local	4,0	0,6	1,1	5,7
Transport du dépôt local jusqu'à la centrale.	1,2	1,4	0,1	2,8
<b>Total</b>	<b>11,1</b>	<b>7,0</b>	<b>7,1</b>	<b>25,2</b>

*Coût global de la collecte, du transport et du stockage de la paille en CFA/kg de paille.*

La distance de transport des installations de stockage local à la centrale ne peut pas être déterminée avec certitude, dans la mesure où cette distance dépend des zones proches de Niono qui fourniront la centrale. Le coût du transport jusqu'à la centrale ne représentant que 6 % du coût total, une distance de transport plus longue n'aura pas une influence notable.

Prix de la paille

Dans le calcul suivant, on considère que la paille est vendue par les producteurs 5 CFA/kg en tas dans les rizières, puis transportée par les producteurs ou des entrepreneurs locaux jusqu'au dépôt local. Si les producteurs choisissent d'effectuer ce transport, cela représente un revenu supplémentaire pour eux. À l'Annexe A, le coût de la collecte, du transport, de la manutention et du stockage de la paille est estimé à 25,2 CFA/kg. Le prix total de la paille, prix d'achat à 5 CFA/kg compris, est par conséquent estimé à 30,2 CFA/kg.

Coût de la balle de riz

### Prix de la balle de riz

Le coût de la collecte, du transport et du stockage de la balle de riz est estimé approximativement sur la base des calculs pour la paille de riz en Annexe A.

On considère que le coût du transport de la balle de riz de la rizière au dépôt local est comparable à celui du transport de la paille de riz. Il pourrait être possible de transporter plus de balle de riz à la fois, parce qu'elle est plus dense que la paille, mais il existe une limite à la charge d'une charrette tirée par un âne sur une digue. Le coût du transport de la balle de riz de la rizière au dépôt local est par conséquent fixé légèrement en-dessous de celui de la paille. Ce coût est estimé à 5 CFA/kg (contre 6,4 CFA/kg pour la paille).

Le coût de la mise en balle n'est pas pertinent pour la balle de riz. La balle peut être mise en tas ou en silo au dépôt local. Le coût de la manutention de la balle de riz au dépôt local est estimé à 2 CFA/kg.

Le coût des installations de stockage de la balle de riz est estimé similaire ou inférieur à celui du stockage de la paille de riz. Il est estimé à environ 5 CFA/kg.

Le coût du transport des dépôts locaux à la centrale est estimé similaire à celui du transport de la paille. Il est estimé à 2,8 CFA/kg.

Le coût total du transport, de la manutention et du stockage de la balle de riz est par conséquent estimé à 14,8 CFA/kg.

Prix de la balle de riz

Comme pour la paille de riz, on considère dans les calculs ci-dessous qu'un prix de vente de 5 CFA/kg est inclus dans le prix de la balle de riz. Le coût du transport, de la manutention et du stockage de la balle de riz étant estimé à 14,8 CFA/kg, le prix total est par conséquent estimé à 19,8 CFA/kg.

### **Coût total du combustible**

Avec une consommation de paille annuelle de 37 400 tonnes/an et un prix de la paille de 30,2 CFA/kg, le coût annuel total de la collecte, du stockage et du transport de la paille s'élèvera à 1 130 millions de CFA par an.

Avec une consommation de balle annuelle de 9 400 tonnes/an et un prix de la balle de 19,8 CFA/kg, le coût annuel total de la collecte, du stockage et du transport de la balle s'élèvera à 185 million de CFA par an.

Le coût total du combustible pour la centrale sera de 1 300 millions de CFA par an.

## 6.5 Coût d'élimination des cendres

La paille de riz et la balle ont une forte teneur en cendres. Les cendres peuvent être utilisées comme engrais et épandues sur les rizières, mais le transport des cendres jusqu'aux rizières et leur épandage représente un coût.

### Production annuelle de cendres

Selon<sup>3</sup> et (Jenkins et al. 1998), la teneur en cendres de la balle de riz et de la paille de riz est estimée à environ 17 %. Avec une consommation de combustible de 46 800 tonnes/an et une teneur en eau moyenne de 20 % pour le mélange paille/balle, la production de cendres sera de 6 400 tonnes/an.



Cendres  
résiduelles/cendres  
volantes

Lors de la combustion de paille dans une centrale à chaudière à grille, 80 % de cendres sont des cendres résiduelles et 20 % des cendres volantes. Les cendres résiduelles humides se déposent sous la grille, puis sont transportées vers un réceptacle mobile. Les cendres volantes peuvent être collectées dans un filtre à poche ou dans un dépoussiéreur électrostatique. Les cendres volantes seront sèches.

La totalité des cendres volantes peut être rapportée aux champs pour servir d'engrais. En fonction de la teneur en cadmium et de la réglementation malienne relative au cadmium, une partie des cendres volantes peut être mélangée aux cendres résiduelles et également utilisée aux champs. Dans la présente étude, on considère que la totalité des cendres volantes peut être rapportée aux champs.

### Coût d'élimination des cendres

On considère que la dispersion des cendres amende légèrement le sol, mais pas suffisamment pour que les producteurs soient disposés à payer pour obtenir ces cendres. Le coût d'élimination des cendres est par conséquent composé du coût de transport vers les dépôts locaux, du coût de transport jusqu'aux champs et de la rétribution des agriculteurs pour l'épandage.

Le coût du transport, du stockage et de l'épandage des cendres est estimé approximativement sur la base des calculs pour la paille de riz en Annexe A et des calculs pour la balle de riz.

<sup>3</sup> [http://www.biofuelsb2b.com/useful\\_info.php?page=Typic](http://www.biofuelsb2b.com/useful_info.php?page=Typic)



Stockage à la centrale électrique	Le coût du stockage des cendres à la centrale est inclus dans les coûts d'investissement et le coût de manutention des cendres à la centrale est inclus dans les coûts d'E&M.
Transport de la centrale aux dépôts locaux	Le coût du transport des cendres de la centrale vers les dépôts locaux est estimé similaire aux coûts de transport de la paille/balle. Ce coût de transport est estimé à 2,8 CFA/kg.
Manutention des cendres	Les cendres peuvent être mises en silo au dépôt local. Le coût de manutention des cendres au dépôt local est estimé à 2 CFA/kg.
Dépôt local	Le coût des installations de stockage des cendres (silos) est estimé équivalent à celui des installations de stockage de la balle de riz, soit environ 5 CFA/kg.
Transport d'un dépôt local à la rizière	Le coût du transport des cendres d'une installation de stockage local à la rizière est équivalent à celui de la balle de riz. Il est estimé à 5 CFA/kg.
Épandage des cendres sur les rizières	Le coût d'épandage des cendres sur les rizières est estimé à 3 CFA/kg. Cette estimation est basée sur le temps d'épandage prévu, comparativement au temps de transport local.
Coût total d'élimination des cendres	Le coût total du transport, de la manutention, du stockage et du transport des cendres est estimé à 17,8 CFA/kg.
Rétribution de l'élimination des cendres	Outre les coûts de manutention, une rétribution de 5 CFA/kg est prévue pour la manutention des cendres. Le prix total de l'épandage des cendres est par conséquent estimé à 22,8 CFA/kg.
Coût annuel d'épandage des cendres	Avec un prix spécifique d'épandage des cendres de 22,8 CFA/kg et une production annuelle de cendres de 6 400 tonnes/an, le coût annuel d'élimination des cendres sera de 145 millions de CFA.

## 6.6 Subventions

Les calculs de base ne tiennent pas compte des subventions. Pour l'analyse de sensibilité, différents niveaux de subvention sont étudiés : 20 %, 40 % et 60 % des coûts d'investissement.

## 6.7 Hypothèses de financement

Pour les calculs économiques d'une centrale à biomasse, on fait certaines hypothèses de financement.

Prix fixés en 2012	Les calculs sont en prix fixes, l'unité est le CFA de 2012. Tous les prix de systèmes et équipements d'énergie renouvelable sont hors taxe.
Décision d'investissement	On considère qu'une décision d'investissement peut être prise début 2014, pour un investissement et une construction effectifs en 2014-2016.
Frais de financement	Outre le coût d'investissement technique, on ajoute 1,5 % de l'investissement pour les frais de financement et 1,5 % de l'investissement pour couvrir les frais de juristes, conseillers financiers, etc.
CMPC	<p>Le Coût Moyen Pondéré du Capital (CMPC) est calculé sur la base de la fraction de l'investissement couverte par :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• les fonds propres</li> <li>• les prêts internationaux (par exemple de la Banque Mondiale)</li> <li>• les prêts locaux/financements bancaires</li> </ul>

Pour chaque fraction du financement, le taux d'intérêt (TI) ou le taux de Rendement Interne (TRI) (pour les fonds propres) est établi. Le CMPC peut donc être calculé comme suit :

$$\text{Fraction\_Fonds propres} \times \text{TRI} + \text{Fraction\_international} \times \text{TI\_int} + \text{Fraction\_local} \times \text{TI\_local}$$

Exemple : 20 % de l'investissement sont couverts par des fonds propres, 60 % par des prêts internationaux et 20 % par des prêts locaux. Le Taux de Rendement Interne sur les fonds propres est de 10 %, le taux d'intérêt des prêts internationaux est de 2,5 % et le taux d'intérêt des prêts locaux est de 8 %. On obtient un Coût Moyen Pondéré du Capital de :

$$\text{CMPC} = 20 \% \times 10 \% + 60 \% \times 2,5 \% + 20 \% \times 8 \% = 5,1 \%$$

Pour le calcul de référence, on utilise un CMPC de 5 %. Dans l'analyse de sensibilité, on utilise une variation du CMPC de 2,5 % à 10 %.

## 6.8 Calcul du prix de l'électricité

### Électricité produite

Comme exposé plus haut, le rendement moyen annuel d'une centrale de 5 MW est estimé à 18,4 %. Avec 6 381 heures équivalent pleine charge, la production d'électricité annuelle sera de 31 900 MWh/an.

### **Prix de l'électricité**

Sur la base du coût d'investissement, d'exploitation et maintenance et d'élimination des cendres ainsi que des hypothèses financières, nous avons effectué une analyse des flux de trésorerie afin de calculer le coût de l'électricité correspondant à une Valeur Actuelle Nette (VAN) de l'investissement égale à zéro.

Pour le cas de référence, le coût de l'électricité calculé est de 125 CFA/kWh.

### **6.9 Analyses de sensibilité**

Nombre des données d'entrée des calculs économiques ne sont pas déterminées avec certitude. Des analyses de sensibilité permettent de vérifier la solidité du prix de l'électricité calculé. Les données d'entrées suivantes, qui ont également un impact significatif sur le prix de l'électricité calculé, sont les plus incertaines : le coût du combustible (comprenant la rémunération des producteurs), le coût d'investissement (comprenant l'impact de la réduction de puissance de la centrale), le niveau de subvention, le coût moyen pondéré du capital, le coût d'exploitation et de maintenance et le rendement à pleine charge.

#### **Prix du combustible**

Le prix du combustible peut varier en fonction de l'importance de la zone de collecte, du niveau de rémunération des travailleurs, du prix de vente de la paille sur place, etc. Pour la présente analyse de sensibilité, on utilise une variation du prix du combustible de 20 à 36 CFA/kg. Le prix de 20 CFA/kg correspond à un prix de vente de la paille de zéro, une distance de transport réduite de 20 % et des salaires réduits de 20 %. Le prix de 36 CFA/kg correspond à un doublement du prix de vente de la paille (10 CFA/kg), une augmentation de 20 % de la distance de transport et une augmentation de 20 % des salaires, ou à un prix de vente et coût du travail inchangé assortis d'une distance de transport 5 fois plus longue.

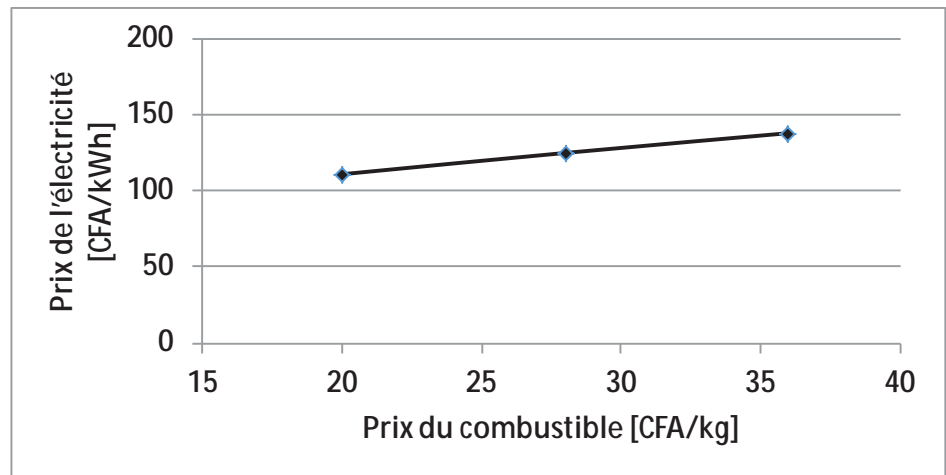


Figure 17. Prix de l'électricité calculé en CFA/kWh avec une variation du prix du combustible. Le prix du combustible du cas de référence est de 28,2 CFA/kg.

Compte tenu des prix élevés du combustible, le prix de l'électricité calculé augmente de 125 à 136 CFA/kg, soit une augmentation de 10 %.

### Coût d'investissement

Si une centrale moins puissante est construite, le prix d'investissement spécifique augmentera probablement. Pour montrer l'effet de cette variable et d'autres incertitudes sur les coûts d'investissement, on applique une variation de +/- 20 % par rapport au cas de référence.

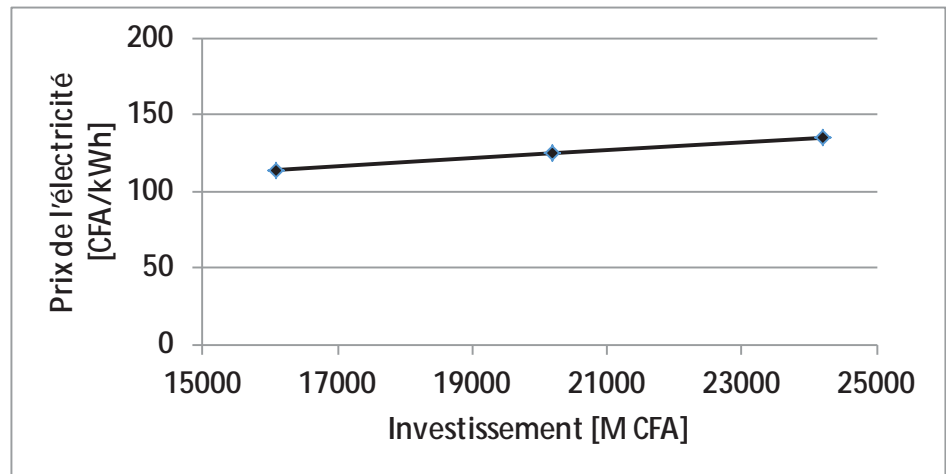


Figure 18. Prix de l'électricité calculé en CFA/kWh avec une variation des coûts d'investissement. Le coût d'investissement du cas de référence est de 20 000 MCFA.

Une augmentation de 20 % de l'investissement augmente le prix de l'électricité de 8 % seulement. L'augmentation ou la réduction de la puissance de la centrale (ce qui influence les coûts d'investissement spécifiques et le

coût du combustible en raison de l'impact sur la distance de transport) n'aura pas d'effet significatif sur le prix de l'électricité.

### Niveau de subvention

Le prix de l'électricité calculé pour le cas de référence est difficilement concurrentiel avec celui de l'électricité produite à partir de combustible fossile et le projet ne sera vraisemblablement pas mis en œuvre sans subventions. Le prix de l'électricité obtenu est calculé avec différents niveaux de subvention, dans le cas où des subventions sont accordées à l'investissement (20 %, 40 % et 60 % des coûts d'investissement).

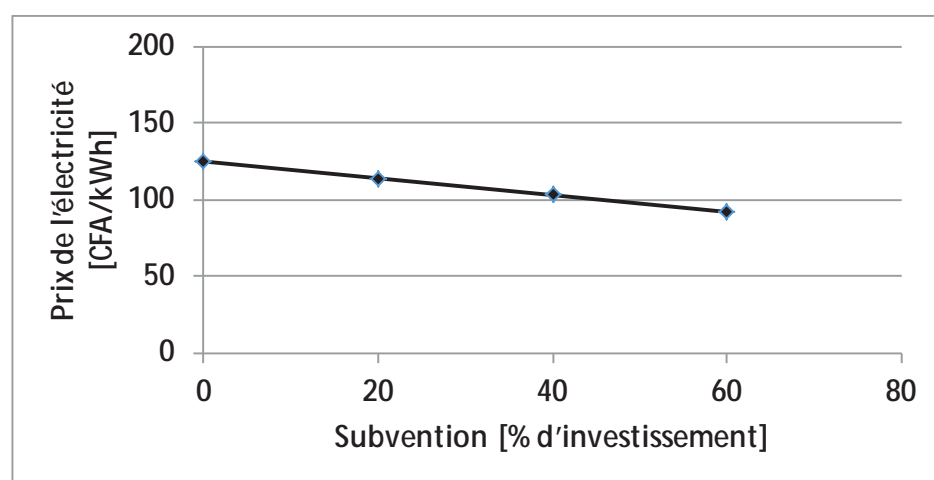


Figure 19. Coût de l'électricité calculé en CFA/kWh avec une variation du niveau de subvention. Dans le cas de référence, aucune subvention n'est incluse.

Le prix de l'électricité baisse de 5 CFA/kWh par tranche de 10 % de subvention à l'investissement. D'autres options d'amélioration de l'économie de la centrale pourraient être de subventionner l'électricité vendue par la centrale ou le combustible acheté par la centrale.

### CMPC

Comme décrit ci-dessus, le Coût Moyen Pondéré du Capital (CMPC) est calculé sur la base de la fraction de l'investissement couverte par :

- les fonds propres
- les prêts internationaux
- les prêts locaux

Si des prêts à faible taux d'intérêt peuvent être levés pour le projet, un CMPC plus bas peut être obtenu.

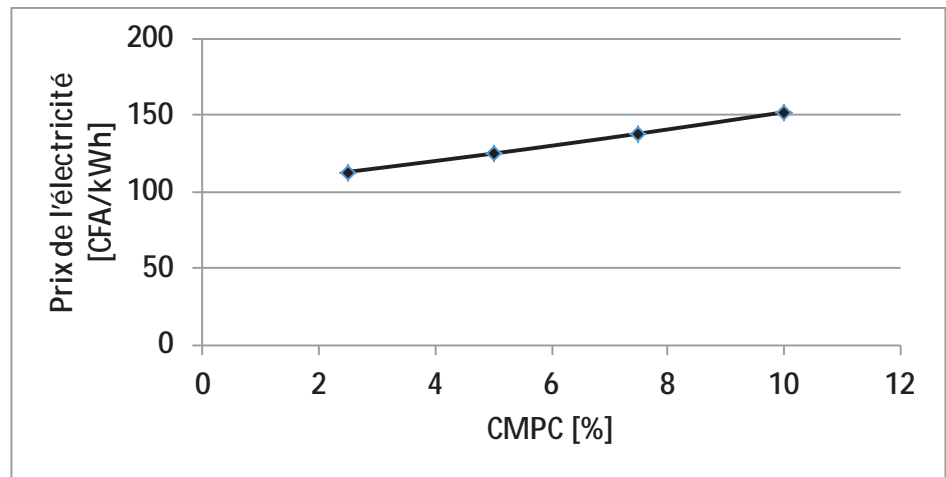


Figure 20. Coût de l'électricité calculé en CFA/kWh avec une variation du CMPC. Pour le calcul du cas de référence, on utilise un CMPC de 5 %.

L'abaissement du CMPC a une influence significative sur le prix de l'électricité. En réduisant le CMPC de 2,5 % (de 5 à 2,5 %) on réduit le prix de l'électricité de 10 %. Pour améliorer l'économie de la centrale, on peut également envisager des prêts à taux d'intérêt bas.

### E&M

On applique aux coûts d'exploitation et de maintenance une variation de 500 à 1 100.

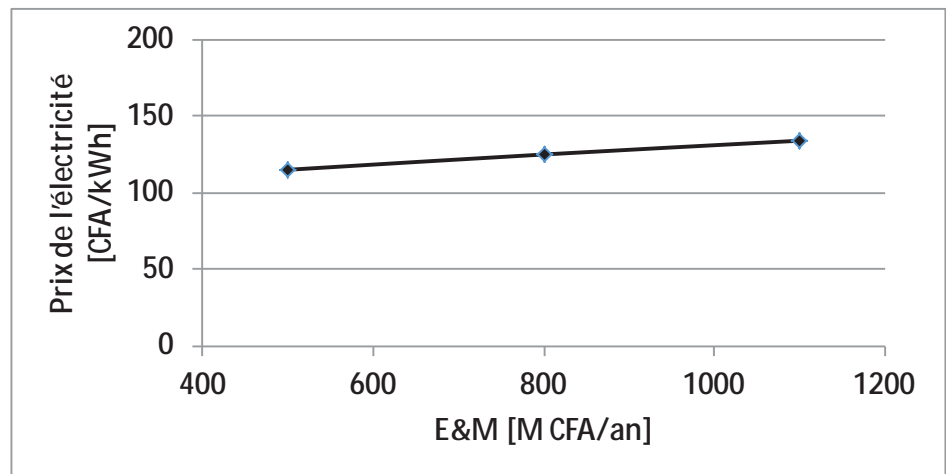


Figure 21. Prix de l'électricité calculé en CFA/kWh avec une variation des coûts d'E&M. Les coûts d'E&M du cas de référence sont de 802 MCFA/an.

Comme indiqué dans le graphique ci-dessus, le prix de l'électricité calculé ne varie pas sensiblement, même avec de fortes variations des coûts d'E&M. Une augmentation de 37 % du coût d'E&M augmente le prix de l'électricité de 7 % seulement.

### Rendement à pleine charge

Le rendement de la centrale peut être affecté par la technologie retenue ou par le niveau d'E&M. Un rendement élevé entraînera une moindre consommation de combustible et, par conséquent, un coût de l'électricité calculé plus bas. On applique au rendement de la centrale une variation de 17 à 28.

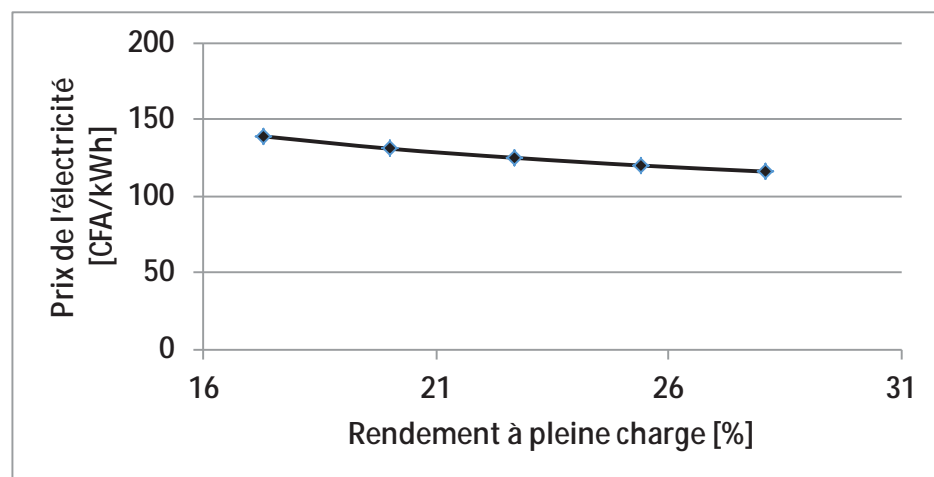


Figure 22. Prix de l'électricité calculé en CFA/kWh avec une variation du rendement à pleine charge. Pour le calcul du cas de référence, le rendement à pleine charge est de 22,7 %.

Même en changeant sensiblement le rendement de la centrale, le prix de l'électricité calculé ne change pas significativement.

### 6.10 Prix de l'électricité prévus (coûts évités)

Le coût marginal de la production d'électricité au Mali à l'avenir a été calculé par (Nygaard, Nørgård 2012). Si les interconnecteurs prévus vers les pays voisins sont installés conformément aux prévisions, le coût marginal de production d'électricité sera déterminé par le prix de l'électricité importée. Le coût marginal de production d'électricité, dans ce cas, est estimé entre 65 et 100 CFA/kWh, en fonction du résultat des négociations relatives à l'interconnecteur Ghana – Burkina Faso – Mali.

Si la mise en place des interconnecteurs et les centrales hydroélectriques prévus sont retardée et si la consommation d'électricité du Mali augmente comme prévue, le coût marginal de la production d'électricité sera déterminé par les centrales thermiques. Le coût marginal de production d'électricité est estimé dans ce cas entre 100 et 120 CFA/kWh (avec un prix du pétrole brut compris entre 100 et 125 USD/baril).

Avec un prix de l'électricité calculé de 125 CFA/kWh pour une centrale à paille de riz à Niono, la compétitivité avec l'électricité importée semble irréaliste. Une centrale à paille de riz à Niono aurait une chance d'être compétitive avec les centrales thermiques, à condition que le prix du pétrole soit élevé et que celui de la paille reste relativement bas, et uniquement si la mise en place des interconnecteurs est retardée ou annulée.



## 7 Impacts sur le climat et l'environnement local

La centrale à paille de Niono aura des effets sur les émissions de gaz à effet de serre et sur la pollution locale dans la mesure où elle réduira la production d'électricité d'autres centrales. Par ailleurs, la centrale à paille aura des effets sur l'environnement local en raison du transport de la paille, de l'élimination des cendres, etc.

### 7.1 Influence sur le climat

L'utilisation de la biomasse en tant que combustible est considérée neutre sur le plan des émissions de CO<sub>2</sub>.

Comme décrit à la section 6.10, la nouvelle centrale à biomasse remplacera la production de centrales à moteur diesel ou une production importée, probablement d'origine gaz naturel.

Émissions de CO<sub>2</sub> en cas de remplacement des moteurs diesel

Si la nouvelle centrale à biomasse remplace la production d'électricité provenant de moteurs diesel, la réduction d'émissions de CO<sub>2</sub> s'élèvera à 25 000 tonnes de CO<sub>2</sub>/an. Ce chiffre est obtenu à partir des données suivantes :

- le remplacement de 32 000 MWh/an d'électricité produite par les centrales au fioul existantes au Mali par la production de la centrale à paille de riz. (L'électricité produite par la centrale à paille de riz est calculée au chapitre 6.3)
- Une consommation des centrales existantes de 200 à 300 grammes de fioul par kWh d'électricité produit (moyenne de 245 g/kWh), ce qui correspond à un rendement électrique de 30 à 40 % (35 % en moyenne) (EDM, 2010).
- Le fioul émet 2,65 kg CO<sub>2</sub>/l.
- La densité du fioul est de 0,85 kg/l

Émissions de CO<sub>2</sub> en cas de remplacement d'électricité importée

Si la production de la nouvelle centrale à biomasse remplace de l'électricité importée, cette dernière sera produite par des centrales au gaz naturel, soit à cycle direct, soit à cycle combiné (Nygaard, Nørgård *et al.* 2012). La réduction des émissions de CO<sub>2</sub> s'élèvera dans ce cas à 10 000 – 20 000 tonnes CO<sub>2</sub>/an, en fonction de la technologie et du rendement des centrales au gaz naturel. Ce chiffre est obtenu à partir des données suivantes :

- Une production d'électricité de 32 000 MWh/an par les centrales au gaz naturel existant dans les pays voisins, qui pourrait être remplacée

par la production de la centrale à paille de riz. (L'électricité produite par la centrale à paille de riz est calculée au chapitre 6.3)

- Un rendement électrique estimé de 35 % pour les centrales à cycle direct et de 55 % pour les centrales à cycle combiné (DEA 2010).
- Le gaz naturel émet 56,8 kg CO<sub>2</sub>/GJ

## 7.2 Influence sur l'environnement local

Réduction des émissions locales des centrales au fioul

Si l'électricité d'une centrale à paille de riz remplace l'électricité produite par des moteurs diesel, la baisse de production des centrales au fioul présentera des avantages pour l'environnement local des centrales au fioul en plus de la réduction des gaz à effet de serre. Elle permettra en effet une réduction des émissions de NO<sub>x</sub>, de SO<sub>2</sub> et de particules.

### Effets de la centrale à biomasse sur l'environnement local

La centrale à biomasse aura également un impact sur l'environnement local, en raison du transport du combustible, des émissions atmosphériques locales, des eaux usées de la centrale et de l'élimination des cendres.

Transport du combustible et des cendres

L'impact environnemental du transport du combustible et des cendres n'a pas été évalué en détail pour ce projet. Toutefois, différentes études, telles que celle de Nielsen (2001), indiquent que l'énergie utilisée pour collecter et transporter le combustible est très faible par rapport à la valeur énergétique de la paille.

Pollution de l'air

La combustion de la paille de riz dans une centrale électrique émet du SO<sub>2</sub>, des NO<sub>x</sub> et des particules. Toutefois, une grande partie de la paille est actuellement brûlée sur place, ce qui crée une pollution de l'air. Dans une centrale à paille, la combustion peut être contrôlée pour réduire les émissions de SO<sub>2</sub>, de NO<sub>x</sub> et de particules. Par conséquent, le niveau d'émissions d'une centrale à paille de riz sera inférieur à celui du brûlage de la paille dans les champs.

En outre, la pollution atmosphérique des centrales au fioul sera réduite, si la production d'une centrale à paille peut remplacer celle des centrales au fioul existantes.

Élimination des cendres

Si l'on considère que les cendres volantes de la centrale ne contiennent pas trop de cadmium, les cendres peuvent être utilisées pour fertiliser les rizières. Par conséquent, les nutriments de la paille de riz peuvent être recyclés dans le sol. Si la teneur en cadmium est trop élevée, par contre, les cendres doivent être mises au rebut, ce qui présentera un inconvénient économique majeur et un problème environnemental.

## 8 Évaluation du risque

Les précédents chapitres du présent rapport indiquent une faisabilité technique de la construction d'une centrale à paille à Niono et un prix de production d'électricité pouvant être concurrentiel dans certaines circonstances. Pour autant, différents risques associés au projet ont été identifiés :

- Conflits relatifs à l'utilisation de la paille
- Exploitation et maintenance
- Risque technique
- Sécurité
- Situation politique locale
- Évolution des prix de l'électricité
- Évolution de la quantité de combustible disponible

Conflits relatifs à l'utilisation de la paille

Aujourd'hui, l'essentiel de la paille est utilisé pour l'alimentation du bétail, mais 15 % environ sont brûlés sur place. On considère que cette fraction de la paille pourrait être collectée et utilisée pour alimenter une centrale à l'avenir. Toutefois, d'autres usages de la paille de riz pourraient être en concurrence avec la production d'énergie et, par conséquent, réduire la fraction disponible pour la centrale ou augmenter le prix de la paille.

La fraction utilisée pour l'alimentation du bétail (cheptel propre des producteurs ou appartenant à des éleveurs nomades) est très variable d'un secteur à l'autre et d'un producteur à l'autre. Cette fraction peut évoluer si la possession de bétail devient plus intéressante ou si les autres sources d'alimentation du bétail se raréfient. Dans la mesure où l'utilisation de la paille pour produire de l'électricité est considérée comme une menace pour l'alimentation des troupeaux transhumants, elle peut générer des conflits entre producteurs et éleveurs nomades.

Exploitation et maintenance

Nous considérons que l'exploitation au jour le jour et la maintenance courante peuvent être assurées par des ouvriers spécialisés locaux, mais que la maintenance extraordinaire doit être effectuée par des spécialistes, qui ne se trouveront pas dans le pays puisque la centrale de Niono sera la première de ce type au Mali. L'absence de travailleurs spécialisés disponibles pour le projet, ou le manque d'expérience de ces travailleurs, présente un risque significatif et implique une difficulté à exploiter la centrale sans interruptions.

Risque technique

Dans la mesure où la centrale sera la première de ce type au Mali et où il n'y a pas de pratique d'utilisation d'autres combustibles solides pour les centrales thermiques (charbon, bois, etc.) dans le pays, il existe un risque que les techniciens et spécialistes locaux ne parviennent pas à résoudre les problèmes techniques. Ceci peut impliquer des coûts élevés de mise en service de la centrale et de résolution de problèmes spécifiques lors de la maintenance ultérieure. Dans le pire des cas, la centrale ne fonctionnera pas pendant de longues périodes ou sera même arrêtée si la mise en service ou la maintenance spécifique deviennent trop coûteuses en raison de la nécessité de faire appel à des spécialistes étrangers.

**Sécurité** La sécurité s'est récemment sérieusement dégradée au Mali. Si cette situation doit perdurer, il sera très difficile de faire venir des experts dans le secteur pour la construction de la centrale, puis pour l'assistance à l'exploitation et à la maintenance. Dans la situation actuelle, l'investissement dans une centrale à biomasse n'est pas faisable.

**Situation politique locale** L'obtention de toutes les autorisations relatives à l'environnement, la construction, etc. auprès des autorités locales est un pré requis à la construction d'une centrale à biomasse. Il existe un risque que ce processus soit long et difficile. En outre, le soutien des autorités locales et des politiciens peut contribuer à l'acceptation du projet, tandis que leur résistance peut sérieusement l'entraver.

**Évolution des prix de l'électricité** Le prix de la production d'électricité est du même ordre de grandeur que le prix marginal de production d'électricité du réseau. Par conséquent, une baisse des prix de l'électricité du réseau éliminerait la faisabilité économique de la centrale à biomasse. Cela pourrait se produire en cas de baisse des prix pétroliers ou d'expansion rapide du réseau d'électricité malien avec une production meilleur marché (hydro-électricité ou même électricité solaire si les prix continuent de baisser) ou si une électricité moins chère provenant des pays voisins devenait disponible grâce aux interconnecteurs. Cela semble toutefois peu probable dans la mesure où l'on prévoit une augmentation de 10 % par an de la consommation d'électricité et une progression lente des investissements dans le réseau d'électricité.

**Évolution de la quantité de combustible disponible** On a considéré une utilisation du sol inchangée pendant la période d'exploitation de la centrale à biomasse. Il existe toutefois un risque de changement d'usage des terres agricoles, ce qui réduirait la quantité de paille disponible pour la production d'électricité. Les changements climatiques peuvent également réduire la surface agricole consacrée à la riziculture et, par conséquent, la quantité de paille disponible.

## 9 Références

AGETIER (2004) : *Étude du Schéma Directeur de Développement pour la Zone de l'Office du Niger (Étape Finale) : Document 2a, Plan d'action*, Agence d'Exécution des Travaux d'Infrastructures et d'Équipements Ruraux (AGETIER) MALI, Consultants for Development Programmes, (CDP), Ségou, Mali.

BAD (2010) : *Stratégie de développement de la maîtrise de l'énergie au Mali*, Groupe de la Banque Africaine de Développement (BAD).

Baxter, L. L. (1993): 'Ash deposition during biomass and coal combustion: A mechanistic approach'. *Biomass and Bioenergy*, vol. 4, no. 2, pp. 85-102

DEA (2010): *Technology Data for Energy Plants*, Danish Energy Agency & Energinet.dk ([http://www.ens.dk/Documents/Netboghandel%20-%20publikationer/2010/Technology\\_data\\_for\\_energy\\_plants.pdf](http://www.ens.dk/Documents/Netboghandel%20-%20publikationer/2010/Technology_data_for_energy_plants.pdf))

EDM (2010) : *Rapport annuel d'activités 2010, Annexe II*.

Evald, A. & Witt, J. (2006): *Biomass CHP best practice guide: Performance comparison and recommendations for future CHP systems utilising biomass fuels*, European Bio-CHP & Altener  
<http://ing.dk/modules/fsArticle/download.php?fileid=60>.

Jenkins et al. (1998): B.M. Jenkins, L.L. Baxter, T.R. Miles Jr., T.R. Miles : "Combustion properties of biomass", *Fuel Processing Technology* 54 17-46.

MMEE (2007) : *Stratégie nationale pour le développement des énergies renouvelables*, Ministère des Mines, de l'Énergie et de l'Eau, Bamako.

Nicolaisen, L. ; Nielsen, C.; Larsen, M. G. et al. (1998) : *Straw for Energy Production : Technology - Environment - Economy*, Agence danoise pour l'énergie.  
[http://193.88.185.141/Graphics/Publikationer/Vedvarende\\_energi\\_UK/Halm\\_UK\\_1998pdf.pdf](http://193.88.185.141/Graphics/Publikationer/Vedvarende_energi_UK/Halm_UK_1998pdf.pdf).

Nielsen (2001): Høst og levering af energikorn, *Dansk BioEnergi* 55. Février 2001. <http://www.videncenter.dk/BioEnergi/Energikorn.pdf>.

Nygaard, I.; Bruun, T. B.; Traoré, O. F. et al. (2012): *Résidus agricoles pour la production d'énergie au Mali*, UNEP Risø Centre, Université technique du Danemark ([www.frsemali.org](http://www.frsemali.org)).

Nygaard, I.; Nørgård, P.; Dewilde, L. et al. (2012) : *Applications de production d'énergie éolienne et solaire au Mali : évaluation basée sur les cartes des ressources éoliennes et solaires du Mali*, UNEP Risø Centre, Université technique du Danemark ([www.frsemali.org](http://www.frsemali.org))

Petersen, Carsten Bo (2012): A Modern Straw Fired Boiler Plant:, Présentation par Burmeister & Wain Energy A/S, Emlichheim/Germany/BEKW lors du séminaire sur la combustion de la biomasse de l'IDA à Copenhague, 15 mars 2012.

Skøtt, T. (2011): *Straw to Energy: Status, Technologies and Innovation in Denmark 2011*, Innovation Network for Biomass (INBIOM), Agro Business Park A/S  
([http://www.inbiom.dk/download/viden\\_biomasse/halmpjeceuk\\_2011.pdf](http://www.inbiom.dk/download/viden_biomasse/halmpjeceuk_2011.pdf)).

SOGREAH (2008) : *Étude de la demande et du plan directeur d'investissement optimaux dans le secteur de l'électricité au Mali : Étude de la demande*, Ministère de l'Énergie, des Mines et de l'Eau – Direction Nationale de l'Énergie et SOGREAH.

SOSUMAR (2012) : *Entretien avec le Directeur général, Haruna Niang, et le Directeur régional Nick Morris à Bamako, 1<sup>er</sup> février 2012.*

SUKALA (2010) : *Complexe Sucrier - projet de CLETC au Mali*, Présentation de l'atelier sur « l'agriculture, la sécurité alimentaire et le Développement rural pour la croissance et la réduction de la pauvreté » organisé par l'International Poverty Reduction Center in China (IPPRC) et l'OCDE à Bamako 27-28 avril 2010 [http://www.iprcc.org/userfiles/file/Feng%20Sheyong-FR\(1\).pdf](http://www.iprcc.org/userfiles/file/Feng%20Sheyong-FR(1).pdf).

USAID (2005): *Rice Husk to Energy: A preliminary assessment*, Rapport remis à USAID par Schaffer & Associates International, LLC & The Louisiana State University AgCenter : [http://pdf.usaid.gov/pdf\\_docs/PNADI702.pd](http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNADI702.pd).

USAID (2009): *Global food security response case study: Mali*, USAID ([http://www.aec.msu.edu/fs2/promisam\\_2/references/USAID\\_2009\\_FS\\_RESP\\_ONSE\\_MALI.pdf](http://www.aec.msu.edu/fs2/promisam_2/references/USAID_2009_FS_RESP_ONSE_MALI.pdf)).

## Annexe A : Manutention de paille de la rizière à la centrale électrique

---

AGETIER (2004): *Etude du Schéma Directeur de Développement pour la Zone de l'Office du Niger (Etape Finale): Document 2a, Plan d'action*, Agence d'Exécution des Travaux d'Infrastructures et d'Equipements Ruraux (AGETIER) MALI, Consultants for Development Programmes, (CDP), Segou, Mali.

Nicolaisen, L.; Nielsen, C.; Larsen, M. G.*et al.* (1998): *Straw for Energy Production: Technology - Environment - Economy*, Danish Energy Agency. [http://193.88.185.141/Graphics/Publikationer/Vedvarende\\_energi\\_UK/Halm\\_UK\\_1998pdf.pdf](http://193.88.185.141/Graphics/Publikationer/Vedvarende_energi_UK/Halm_UK_1998pdf.pdf).

Nygaard, I.; Bruun, T. B.; Traoré, O. F.*et al.* (2012): *Agricultural residues for energy production in Mali*, UNEP Risø Centre, Technical University of Denmark ([www.frsemali.org](http://www.frsemali.org)).

Nygaard, I.; Nørgård, P.; Dewilde, L.*et al.* (2012): *Screening of feasible applications of wind and solar in Mali: Assessment using the wind and solar maps for Mali*, UNEP Risø Centre, Technical University of Denmark ([www.frsemali.org](http://www.frsemali.org)).

Skøtt, T. (2011): *Straw to Energy: Status, Technologies and Innovation in Denmark 2011*, Innovation Network for Biomass (INBIOM), Agro Business Park A/S ([http://www.inbiom.dk/download/viden\\_biomasse/halmpjeceuk\\_2011.pdf](http://www.inbiom.dk/download/viden_biomasse/halmpjeceuk_2011.pdf)).

SOGREAH (2008): *Etude de la demande et du plan directeur d'investissement optimaux dans le secteur de l'électricité au Mali: Etude de la demande*, Ministère de l'Energie, des Mines et de l'Eau – Direction Nationale de l'Energie et SOGREAH.

SOSUMAR (2012): *Interview with General Director, Haruna Niang, and Regional Director Nick Morris in Bamako, 1 February*.

USAID (2005): *Rice Husk to Energy: A preliminary assessment*, Report submitted to USAID by Schaffer & Associates International, LLC & The Louisiana State University AgCenter: [http://pdf.usaid.gov/pdf\\_docs/PNADI702.pdf](http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNADI702.pdf).

USAID (2009): *Global food security response case study: Mali*, USAID ([http://www.aec.msu.edu/fs2/promisam\\_2/references/USAID\\_2009\\_FS\\_RESP\\_ONSE\\_MALI.pdf](http://www.aec.msu.edu/fs2/promisam_2/references/USAID_2009_FS_RESP_ONSE_MALI.pdf)).

# Annexe A : Manutention de paille de la rizière à la centrale électrique

Auteurs : Ivan Nygaard, Bouréma Kone

## Sommaire

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Définition des systèmes</b>	<b>3</b>
2.1	Le système de référence	3
2.1.1	Transport de la rizière au stockage local	4
2.1.2	Installation de stockage local	5
2.1.3	Pressage et stockage	6
2.1.4	Transport du stockage local à la centrale	6
2.2	Autres systèmes	7
2.3	Conclusion	9
<b>3</b>	<b>Évaluation de la capacité</b>	<b>10</b>
3.1	Capacité de stockage local et distances de transport	10
3.2	Évaluation de la capacité du système	12
<b>4</b>	<b>Évaluation du coût</b>	<b>13</b>
4.1	Récapitulatif des coûts de manutention	13
4.2	Coûts de manutention par élément de système	14
4.2.1	Transport de la rizière au stockage local	14
4.2.2	Pressage et stockage dans les installations de stockage local	15
4.2.3	Stockage	15
4.2.4	Transport du stockage local à la centrale	16
<b>5</b>	<b>Analyse de sensibilité</b>	<b>17</b>
<b>6</b>	<b>Références</b>	<b>18</b>



## Sommaire des figures

Figure 2.1.	Système de référence pour la manutention de la paille de la rizière à la centrale.....	4
Figure 2.2.	La paille est battue près des digues et laissée en tas, Niono 2010 (Photos : Rasmus Borgstrøm, Ivan Nygaard) .....	4
Figure 2.3.	Transport par charrette à âne à Niono en 2010 (Photos : Ivan Nygaard, Koldo Salinas) .....	5
Figure 2.4.	Exemples d'installations de stockage ouvertes et semi-ouvertes au Danemark (Skøtt 2011, Nielsen 2003).....	5
Figure 2.5.	Presse Hesston 4900 en fonctionnement dans un champ au Danemark (Skøtt 2011) .....	6
Figure 2.6.	Transport avec tracteur et remorque (www.skovulbjerg.dk ; Nielsen 2003).....	7
Figure 2.7.	Routes sur digue utilisées pour le transport de la paille en vrac. Motoculteur (Photo:Oumar Traoré).....	7
Figure 2.8.	Équipement léger pour la production de petites balles de 12 kg (Nielsen 2003).....	8
Figure 3.1.	Vue aérienne des principales routes et routes sur digues de Molodo .....	10
Figure 3.2.	Modèle de calcul de distance de transport moyenne pour une quantité de paille donnée.....	11
Figure 3.3.	Évaluation de la capacité des trois principaux éléments du système .....	12
Figure 4.1.	Coût global du ramassage, du transport et du stockage de la paille en CFA/kg de paille. ....	13
Figure 4.2.	Impact sur l'emploi du ramassage, du transport et de la manutention de la paille pour la centrale.....	13
Figure 4.3.	Production de revenu (en CFA/an) induite par le ramassage, le stockage et la manutention de la paille .....	14
Figure 4.4.	Évaluation du coût du transport de la rizière au stockage local.....	14
Figure 4.5.	Évaluation du coût du pressage et du stockage de la paille dans les installations de stockage local.....	15
Figure 4.6.	Évaluation du coût du stockage de la paille dans les installations de stockage local .....	16
Figure 4.7.	Évaluation du coût du transport du stockage local vers la centrale .....	16
Figure 5.1.	Coûts de manutention totaux en fonction de la capacité de pressage en tonne/heure.....	17
Figure 5.2.	Analyse de sensibilité des coûts de manutention totaux (en CFA/kg) en fonction de la distance de transport en km (aller-retour).....	17

# 1. Introduction

Les pays développés ont une longue expérience de la manutention de grands volumes de paille pour l'alimentation de centrales électriques. Au Danemark, plus de 2 millions de tonnes de paille sont actuellement collectés et transportés vers de grandes centrales pour la production d'électricité. Vous trouverez des données historiques sur la manutention et le stockage de la paille dans Nielsen (2003) et des informations spécifiques sur la manutention de la paille à des fins énergétiques dans Nicolaisen, Nielsen (1998) et Skøtt (2011).

L'objectif de la présente évaluation est de transférer les expériences de manutention de paille du contexte de l'agriculture très mécanisée du Danemark dans le contexte de l'Office du Niger.

La présente étude résulte de consultations avec différents partenaires au Mali au cours de la période du projet. Le processus a démarré au Mali Folkecenter en décembre 2010, avec un membre du CNESOLER, un membre du Mali Folkecenter et le consultant de l'IER. Le projet actuel a été coréalisé par les trois auteurs.

## 2. Définition des systèmes

Différentes configurations de système ont été envisagées au cours des étapes initiales du projet. Nous avons choisi de décrire ici un système de référence et de discuter des avantages et des inconvénients d'autres systèmes. Le présent chapitre décrit tout d'abord le système de référence, avant de discuter des configurations des systèmes alternatifs.

### 2.1 Le système de référence

Le système de référence a été sélectionné en tant que système le plus simple et le plus éprouvé. Ce système est visualisé en Figure 2.1.

Dans le système de référence, la paille empilée dans les rizières à proximité des digues est transportée en vrac par charrette à âne jusqu'aux installations de stockage local, où elle est déchargée. La paille est ensuite pressée en balles de 500 kg dans les installations de stockage local par des presses qui circulent entre 2 ou 3 installations de stockage grâce à un chargeur télescopique pour empiler les balles. Les balles sont transportées de l'installation de stockage local à la centrale électrique par tracteur avec remorque et chargées et déchargées au moyen de différents chargeurs télescopiques.

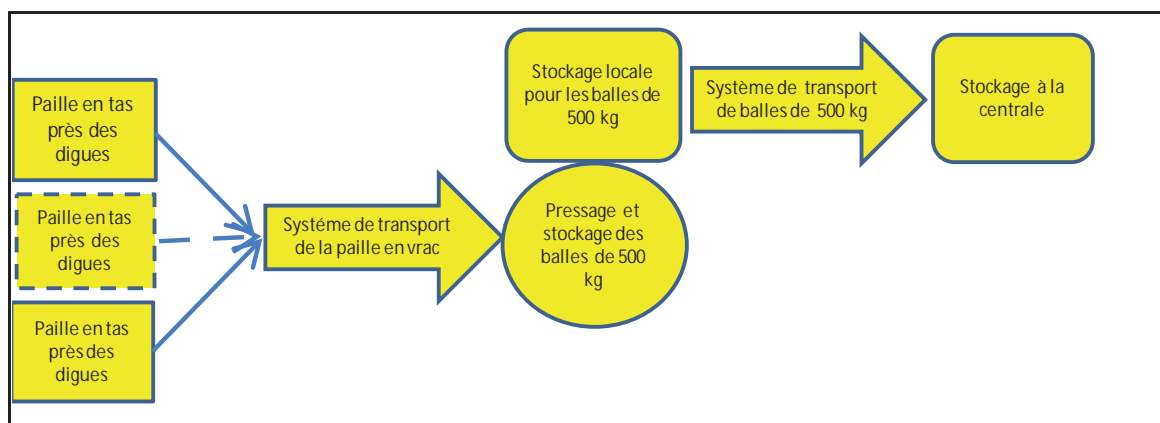


Figure 2.1. Système de référence pour la manutention de la paille de la rizière à la centrale

Le système de référence est décrit plus en détail ci-dessous.

### 2.1.1 Transport de la rizière au stockage local



Figure 2.2. La paille est battue près des digues et laissée en tas, Niono 2010 (Photos : Rasmus Borgstrøm, Ivan Nygaard)

La paille est laissée en tas près des digues après le battage, comme illustré en Figure 2.2. Le transport de la rizière au stockage local se fait par charrette à âne. La paille est transportée en vrac. La charge prévue est de 100 kg. Le temps de chargement est d'une demi-heure et le temps de déchargement de 15 minutes. La vitesse de transport est fixée à 3 km/h.



Figure 2.3. Transport par charrette à âne à Niono en 2010 (Photos : Ivan Nygaard, Koldo Salinas)

### 2.1.2 Installation de stockage local

La paille sera stockée dans 18 installations de stockage local, chacune contenant environ 2 400 balles ou 1 200 tonnes de paille. La Figure 2.4. présente des exemples de stockage de balles au Danemark. Les photographies illustrent un stockage à ciel ouvert, qui peut être bâché, et un stockage fermé. Dans le système de référence, les installations de stockage seront des bâtiments ouverts, uniquement couverts d'un toit pour protéger la paille de la pluie. Le sol sera en béton. L'installation couvrira 1 150 m<sup>2</sup> pour un volume d'environ 9 000 m<sup>3</sup>, les balles étant empilées par six (6 x 1,3 mètre). La forme de l'installation de stockage peut varier en fonction du lieu, mais peut être par exemple de 24 mètres de large sur 46 mètres de long. L'installation de stockage comprendra également une zone de 2 000 m<sup>2</sup> pour réceptionner et stocker la paille en vrac apportée par les agriculteurs et pour la presser en balles.



Figure 2.4. Exemples d'installations de stockage ouvertes et semi-ouvertes au Danemark (Skøtt 2011, Nielsen 2003)

L'installation de stockage et de réception doit être clôturée, pour la protéger du bétail et pour prévenir les risques d'incendie et autres dommages. L'installation devra être surveillée en permanence par un gardien pour prévenir les risques d'incendie ou les dommages pouvant être provoqués par des bergers en quête de nourriture pour leurs troupeaux.



### 2.1.3 Pressage et stockage

Les balles sont pressées à l'aide d'un tracteur (100 ch.) et d'une presse (Hesston 4900 ou équivalent) comme présenté en Figure 2.5. La presse prendra automatiquement la paille en vrac stockée en lignes sur l'installation de stockage ouverte. La capacité de pressage sur site au Danemark est d'environ 15 tonnes/heure. Dans le cas malien, la paille est prélevée dans un tas et la capacité prévue est sensiblement réduite, de l'ordre de 7,5 tonnes/heure.

Le tracteur et la presse serviront 3 installations de stockage local par jour. On estime à une demi-heure le déplacement d'une installation à l'autre. Le tracteur et la presse seront suivis d'un chargeur télescopique, qui empilera les balles (deux par deux) par piles de 6. Un total de 6 tracteurs, presses et chargeurs seront nécessaires pour traiter les 36 000 tonnes en 90 jours.

Outre l'opérateur du tracteur et de la presse, deux ouvriers suivent l'équipement de presse pour apporter une assistance manuelle si nécessaire.



Figure 2.5. Presse Hesston 4900 en fonctionnement dans un champ au Danemark (Skøtt 2011)

### 2.1.4 Transport du stockage local à la centrale

Le transport du lieu de stockage à la centrale sera effectué par deux tracteurs (100 ch.) équipés de remorques pouvant porter 20 balles (10 tonnes). Des exemples de transport par tracteur avec différentes charges (8 et 14 tonnes) sont présentés en Figure 2.6. Les deux tracteurs serviront une même installation de stockage local. Un chargeur télescopique suivra les deux tracteurs pour charger les balles dans l'installation de stockage local. Les conducteurs de tracteur feront fonctionner le chargeur sur le lieu de stockage. La capacité de chargement est fixée à 20 tonnes/heure. La vitesse de transport est fixée à 20 km/h.

Un autre chargeur télescopique sera disponible à la centrale pour décharger les deux tracteurs et pour charger la centrale. La capacité de déchargement est fixée à 20 tonnes/heure.



Figure 2.6. Transport avec tracteur et remorque ([www.skovulbjerg.dk](http://www.skovulbjerg.dk) ; Nielsen 2003)

## 2.2 Autres systèmes

Plusieurs autres systèmes ont été envisagés lors des phases initiales de la présente étude. Ils sont présentés ici avec un bref commentaire sur leurs avantages et leurs inconvénients.

- a) Identique au système de référence, mais de petits motoculteurs chinois sont utilisés au lieu des charrettes à âne.



Figure 2.7. Routes sur digue utilisées pour le transport de la paille en vrac. Motoculteur (Photos :Oumar Traoré)

Cette option offre deux avantages : une charge plus importante (200 kg au lieu de 100 kg) et une vitesse de transport plus élevée (5 km/heure au lieu de 3 km/heure). Ces avantages sont contrebalancés par des coûts d'investissement et de maintenance plus élevés, des coûts de carburant plus importants et un moindre avantage en termes d'emploi. Cette option devrait présenter des coûts globaux similaires, voire inférieurs, à ceux du système de référence.

- b) Production de balles de 12 kg avec un tracteur et une presse mobile circulant sur les digues. Transport et stockage local de balles de 12 kg. Transport de balles de 12 kg vers la centrale. Stockage à la centrale et alimentation de la centrale par balles de 12 kg.



Figure 2.8. Équipement léger pour la production de petites balles de 12 kg (Nielsen 2003)

Cette option présente l'avantage de n'utiliser que des équipements plus légers, moins chers et mieux adaptés aux conditions maliennes. Elle augmente également les besoins en main d'œuvre. Son inconvénient majeur est la difficulté de transporter et de stocker de grandes quantités de balles de 12 kg, dont la densité est pratiquement inférieure de moitié à celles des balles de 500 kg ( $90 \text{ kg/m}^3$  contre  $140 \text{ kg/m}^3$  par balle et  $68 \text{ kg/m}^3$  contre  $120 \text{ kg/m}^3$  pour la paille stockée) (VHF 1998). Le problème se posera également à la centrale, dont le fonctionnement continu nécessite 240 tonnes de paille stockée. Une consommation de 120 tonnes/jour implique un flux de 10 000 balles par jour, de 420 balles par heure ou de 7 balles par minute. Ce système nécessite plusieurs stations de stockage et de déchargement près de la centrale qui laissent un espace suffisant pour l'accès des véhicules au stockage et pour charger la centrale manuellement.

- c) Production de balles de 12 kg avec un tracteur et une presse mobile circulant sur les digues. Transport vers le stockage local par charrette à âne ou par motoculteur. Déchargement et pressage de nouvelles balles de 500 kg sur le site de stockage central comme dans le système de référence. Stockage et transport ultérieur comme dans le système de référence.

Cette option présente l'avantage d'un transport plus efficace des digues vers le stockage local, puisque la densité de la paille est plus élevée. Elle implique par contre un processus de pressage supplémentaire sur les digues, ce qui peut en pratique créer certains problèmes techniques de séparation des balles sur le lieu de stockage pour en faire des balles de 500 kg.

- d) Production de balles de 15-20 kg (Type CAFON)<sup>1</sup> avec un tracteur et une presse circulant sur les digues. Transport et stockage local de balles de 15-20 kg. Transport de balles de 15-20 kg vers la centrale. Stockage à la centrale et alimentation de la centrale par balles de 15-20 kg.

<sup>1</sup> La CAFON produit des presses manuelles (10-13 kg) et des presses motorisées (15-20 kg).

Cette option est comparable à l'option c) et présente l'avantage d'utiliser des équipements plus légers, moins coûteux, produits localement et mieux adaptés à la situation malienne. De plus, comme l'option c), elle nécessite davantage de main d'œuvre. Son inconvénient, comme pour l'option c), est la difficulté de transporter et de stocker de grandes quantités de balles de 15-20 kg, dont la densité est inférieure à celle des balles de 500 kg. Le problème se posera tout autant à la centrale.

- e) Transport de la paille en vrac de la rizière à la centrale.  
Cette option n'est pas praticable en raison des grandes quantités de paille à presser.
- f) Pressage manuel de balles de 12 kg par la presse manuelle CAFON.  
Cette option n'est pas jugée praticable en raison des grandes quantités de paille à presser.

### **2.3 Conclusion**

L'option a) semble très pertinente et pourrait présenter des coûts similaires, voire inférieurs, à ceux du système de référence. Les options b), c) et d) peuvent être envisagées, mais, en ce qui concerne les calculs économiques, rien ne permet de prévoir que leurs coûts de manutention seront sensiblement inférieurs. Les options e) et f) ne sont pas jugées réalisables à grande échelle.



### 3. Évaluation de la capacité

Le système de référence décrit à la section 2.1 est le fruit de nombreux éléments d'appréciation qui seront décrits ci-dessous.

#### 3.1 Capacité de stockage local et distances de transport

Un modèle simple a été développé pour obtenir une première estimation des distances de transport et du nombre et des dimensions des installations de stockage local. Ce modèle est présenté en Figure 3.2.

La fourniture durable de paille dans le secteur est de l'ordre d'1 tonne/h<sup>2</sup>. Cela revient à dire que si la paille est répartie également autour de la centrale, la zone de collecte sera d'environ 36 000 ha, soit un carré de 19 x 19 km.

Il y a économie d'échelle en ce qui concerne les installations de stockage local. Les dimensions des installations de stockage, par contre, doivent être limitées pour limiter les distances de transport de paille en vrac par charrette à âne, mais aussi pour réduire le risque d'incendies importants. Dans le cas présent, une installation de 1 200 tonnes a été envisagée.



Figure 3.1. Vue aérienne des principales routes et routes sur digues de Molodo

---

2 La ressource durable du secteur est de l'ordre d'une tonne par hectare. (Cf. Nygaard, Bruun 2012)

Consommation totale	36 000 tonnes	Résidus par ha	1 tonne
Zone de collecte totale	36 000 ha	Nombre de stockages locaux	18 Unités
Zone de collecte	360 km <sup>2</sup>	Zone de collecte, stockage local	20,0 km <sup>2</sup>
Diamètre (zone de collecte)	19 km	Diamètre (zone de collecte local)	4,5 km
Distance moyenne théorique pour une zone circulaire		0,66 rayon	
Facteur tenant compte de la distance supplémentaire en raison de routes		1,5	

### Résultat

La distance moyenne de transport entre le stockage local et la centrale (aller-retour)	18,8 km
La distance moyenne de transport entre le champ et le stockage local (aller-retour)	4,4 km

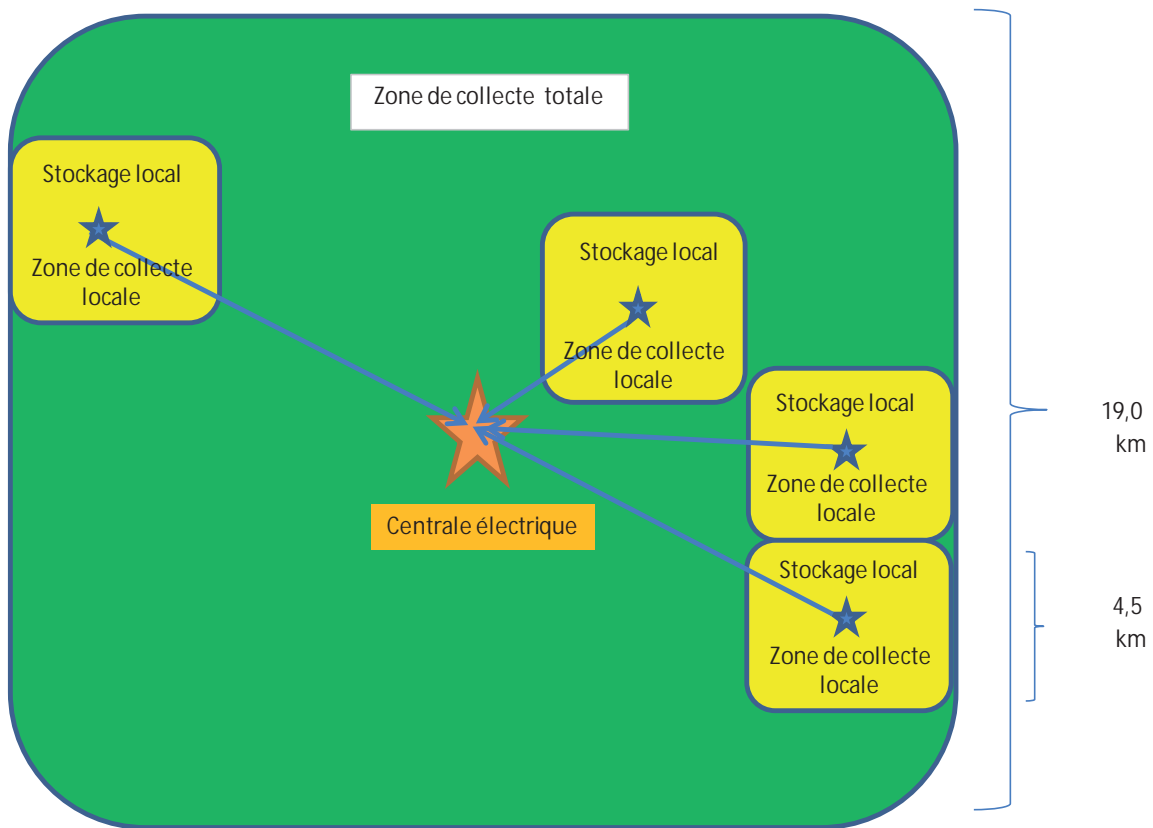


Figure 3.2. Modèle de calcul de distance de transport moyenne pour une quantité de paille donnée

La paille empilée sur les digues est transportée sur une période de quatre mois, de décembre à avril. Le temps de fonctionnement moyen de la centrale est de 6 381 heures de pleine charge ou 265 jours de pleine charge. Dans ce calcul, la capacité de stockage est basée sur 300 jours de pleine charge, en tenant compte des variations annuelles des heures de pleine charge. Cela signifie qu'il existe un besoin de stockage de  $300 - 120 = 180$  jours de consommation, soit 21 600 tonnes. Avec un volume de stockage de 1 200 tonnes, ceci équivaut à 18 installations de stockage.

À partir de ces données, le modèle calcule une distance de transport moyenne entre le stockage local et la centrale de 18,8 km (aller-retour) et une distance de transport moyenne entre les rizières et le stockage local de 4,4 km (aller-retour).

Ce niveau de précision est suffisant pour les calculs économiques à ce stade. L'étape suivante de l'étude de faisabilité consistera à situer précisément la centrale et les installations de stockage local et de faire des calculs précis à partir d'une carte SIG du secteur.

### 3.2 Évaluation de la capacité du système

La capacité des éléments du système de référence est évaluée comme indiqué en Figure 3.3.

Les capacités sont calculées sur la base de 36 000 tonnes manutentionnées par an, d'une capacité de stockage de 21 600 tonnes et de 18 installations de stockage local. Les champs de données d'entrées du modèle sont marqués en jaune.

Transport par charrette à âne		Pressage et stockage		Transport du stockage local à la centrale	
<p>Jours ouvrables par an 120 jours</p> <p>La capacité quotidienne 300 tonnes</p>		<p>Jours ouvrables par an 120 jours</p> <p>Capacité quotidienne 300 tonnes</p> <p>Nombre de balles 600 balles/j.</p> <p>Paille entrant par stockage 16,7 t./jour</p>		<p>Jours ouvrables par an 300 jours</p> <p>La capacité quotidienne 120 tonnes</p> <p>Nombre de balles 240 balles/j.</p>	
<p>Charge 100 kg</p> <p>Chargement 200 kg/heure</p> <p>Vitesse de transport 3,0 km/heure</p> <p>Distance de transport (aller-retour) 4,4 km</p> <p>Déchargement 400 kg/heure</p>		<p>Montant pressé par stockage 16,7 t./jour</p> <p>Capacité de mise en balles 7,5 t./jour</p> <p>Temps de mise en balles par stockage 2,2 heures</p> <p>Temps de transport par stockage 0,5 heures</p> <p>Nombre de stockage par jour 3,0 par jour</p> <p>Temps de transport par jour 1,5 heures</p> <p>Temps de mise en balles par jour 6,7 heures</p> <p>Nombre d'heures par jour (Résultat) 8,2 heures</p>		<p>Charge 10 tonne</p> <p>Chargement (stockage local) 20 t./heure</p> <p>Vitesse de transport 20 km/heure</p> <p>Distance de transport (aller-retour) 18,8 km</p> <p>Déchargement à la centrale 20 t./heure</p>	
<p>Chargement 0,5 heures</p> <p>Temps de transport 1,5 heures</p> <p>Déchargement 0,3 heures</p> <p><b>Temps (aller-retour) 2,2 heures</b></p> <p>Capacité par heure 45,1 kg/heure</p> <p>Journée de travail 8,0 heures</p> <p>Capacité par jour 0,4 t./jour</p>		<p>Capacité totale par jour et par groupe de travail 50,0 t./jour</p>		<p>Chargement 0,5 heures</p> <p>Temps de transport 0,9 heures</p> <p>Déchargement 0,5 heures</p> <p><b>Temps (aller-retour) 1,9 heures</b></p> <p>Capacité par heure 5,2 t./heure</p> <p>Journée de travail 8,0 heures</p> <p>Capacité par jour 41,2 t./jour</p>	
<p><b>Ressources</b></p> <p>Charettes 831 charettes</p> <p>Personnel 831 personnes</p>		<p><b>Ressources</b></p> <p>Tracteur 6,0 unités</p> <p>Presse 6,0 unités</p> <p>Chargeur 6,0 unités</p> <p>Personnel Tracteur 6,0 personnes</p> <p>Personnel Chargeur 6,0 personnes</p> <p>Personnel Manuel 2 12,0 personnes</p> <p>Personnel Stockage 3 54 personnes</p>		<p><b>Ressources</b></p> <p>Tracteurs 2,9 unités</p> <p>Remorques 2,9 unités</p> <p>Chargeur stockage à la centrale 1,5 unités</p> <p>Chargeur stockage local 1,5 unités</p> <p>Personnel, tracteur- chargeur 2,9 personnes</p>	
<p><b>Heures de fonctionnement</b> heures par an</p> <p>Charrette à âne 960</p>		<p><b>Heures de fonctionnement</b> heures par an</p> <p>Tracteur 980</p> <p>Presse 800</p> <p>Chargeur (50% du temps du tracteur) 490</p>		<p><b>Heures de fonctionnement</b> heures par jour Heures par an</p> <p>Tracteur 3,9 1 163</p> <p>Remorque 3,9 1 163</p> <p>Chargeur (stockage à la centrale) 4,1 1 237</p> <p>Chargeur (stockage local) 4,1 1 237</p>	

Figure 3.3. Évaluation de la capacité des trois principaux éléments du système

## 4. Évaluation du coût

L'évaluation du coût de la présente section est basée sur les coûts calculés, avec un taux d'intérêt de 5 % sur le capital. Les coûts d'investissement sont calculés en remboursement de prêt annuel fixe sur la période d'amortissement. La valeur à la casse est fixée à zéro. Le coût du carburant est fixé à 800 CFA/litre. L'évaluation de coût ne prévoit aucun bénéfice pour un exploitant potentiel. Le paiement de la paille aux agriculteurs n'est pas inclus dans cette évaluation et sera traité séparément. Le lecteur doit savoir que ce modèle de calcul utilise le transport de 36 000 tonnes de paille à titre d'exemple. Afin de produire des résultats échelonnables, le modèle utilise des fractions d'équipements, par exemple 1,5 tracteur, ce qui se justifie parfaitement dans ce calcul des coûts de manutention par kg de paille. Dans une étude de faisabilité pour un investissement concret, par contre, les équipements devront figurer en nombres entiers.

### 4.1 Récapitulatif des coûts de manutention

Les coûts de manutention totaux de la paille de la rizière jusqu'à la centrale sont estimés à 25,2 CFA/kg. La ventilation des coûts est exposée en Figure 4.1.

Coûts de manutention (CFA/kg)	Coût capital	E&M	Personnel	Totale
Transport de la rizière au stockage local	0,8	0,1	5,5	6,4
Pressage et stockage	5,1	4,9	0,3	10,3
Stockage	4,0	0,6	1,1	5,7
Transport du stockage local à la centrale	1,2	1,4	0,1	2,8
<b>Total</b>	<b>11,1</b>	<b>7,0</b>	<b>7,1</b>	<b>25,2</b>

Figure 4.1. Coût global du ramassage, du transport et du stockage de la paille en CFA/kg de paille.

L'impact sur l'emploi saisonnier et l'emploi à l'année est présenté en Figure 4.2. Le calcul est basé sur l'évaluation de capacité de la Figure 3.3. L'emploi saisonnier concerne dans ce cas une saison de quatre mois, de décembre à avril.

Processus	Activité	Saisonnier		Temps plein	
		Non qualifié	Qualifié	Non qualifié	Qualifié
Transport	Charette à âne	831			
Pressage et stockage	Presse		6		
	Chargeur		6		
	Assistance manuelle	12			
Stockage	Gardien			54	
Transport	Tracteur				3
<b>Totale</b>		<b>843</b>	<b>12</b>	<b>54</b>	<b>3</b>

Figure 4.2. Impact sur l'emploi du ramassage, du transport et de la manutention de la paille pour la centrale

L'impact en termes de production de revenu est indiqué en Figure 4.3. La production de revenu est basée sur un salaire de 2 000 CFA/jour pour les travailleurs non qualifiés et de 5 000 CFA/jour pour les travailleurs qualifiés (conducteurs d'engins). La main d'œuvre locale représente 30 % du coût de manutention de la paille, Cf. Figure 4.1.

Génération de revenus annuels (CFA)		Saisonnier		Temps plein		Revenu total
Processus	Activité	Non qualifié	Qualifié	Non qualifié	Qualifié	
Transport	Charette à âne	199 500 000				199 500 000
Pressage et stockage	Presse		3 600 000			3 600 000
	Chargeur		3 600 000			3 600 000
	Assistance manuelle	2 880 000				2 880 000
Stockage	Gardien			39 420 000		39 420 000
Transport	Tracteur				5 238 000	5 238 000
<b>Total</b>		202 380 000	7 200 000	39 420 000	5 238 000	254 238 000

Figure 4.3. Production de revenu (en CFA/an) induite par le ramassage, le stockage et la manutention de la paille

## 4.2 Coûts de manutention par élément de système

### 4.2.1 Transport de la rizière au stockage local

Le coût est estimé à 6,4 CFA/kg pour le transport de la paille en vrac par charrette à âne sur une distance moyenne de 4,4 km (aller-retour). L'investissement dans un âne et une charrette est de 150 000 CFA. Le coût de maintenance, couvrant l'alimentation de l'animal et l'entretien de la charrette, est fixé à 3 %. Le salaire quotidien pour une saison de 4 mois de décembre à avril est fixé à 2 000 CFA. Selon l'évaluation de capacité en Figure 3.3, le besoin est de 830 ânes et charrettes. Le résultat de cette évaluation est présenté en Figure 4.4 ci-dessous.

Equipement	Unités	Investissement par unité (FCA)	Investissement total (FCA)	Amortissement (ans)	Coût d'investissement annuel (CFA)	Coût par kg (CFA)
Charrette à âne	831	150 000	124 687 500	5	28 799 670	0,8
Personnel	Personnes	Jours ouvrables	Salaire journalier (CFA)		Coût annuel du personnel (CFA)	Coût par kg (CFA)
Charretier	831	120	2 000		199 500 000	5,5
Exploitation et maintenance	Unités			Maintenance (% des investis.)	Coût annuel (CFA)	Coût par kg (CFA)
Ane et charrette	831			3,0%	3 740 625	0,1
<b>Coût du transport de la rizière au stockage local</b>						<b>6,4</b>

Figure 4.4. Évaluation du coût du transport de la rizière au stockage local

#### 4.2.2 Pressage et stockage dans les installations de stockage local

Le coût du système de pressage et de stockage est estimé à environ 5,1 CFA/kg. Les détails de l'évaluation sont présentés en Figure 4.5. Les coûts sont basés sur le prix d'équipements importés du Danemark. Un tracteur de 100 chevaux coûte 58,6 MCFA. Une presse Hesston 4900 coûte environ 66,7 MCFA. Le chargeur télescopique Manitou LMT 735 coûte environ 58 600 CFA

Équipement	Unités	Investissement par unité (FCA)	Investissement total (FCA)	Amortissement (ans)	Heures de fonctionnement par an	Coût d'investissement annuel	Coût par kg (CFA)
Tracteur 100 CV	6,0	58 600 000	351 600 000	10	980	45 533 809	1,3
Presse	6,0	66 700 000	400 200 000	5	800	92 436 114	2,6
Chargeur	6,0	58 600 000	351 600 000	10	490	45 533 809	1,3
Personnel	Personnes	Jours ouvrables	Salaire journalier (CFA)			Coût annuel du personnel (CFA)	Coût par kg (CFA)
Tracteur 100 CV	6,0	120	5 000			3 600 000	0,1
Chargeur	6,0	120	5 000			3 600 000	0,1
Travailleur manuel	12,0	120	2 000			2 880 000	0,1
Exploitation et maintenance	Unités	Combustible: l/heure	Coût combust. / Coût ficelle	Maintenance (% des investis.)	Maintenance (CFA)	Coût annuel (CFA)	Coût par kg (CFA)
Tracteur 100 CV	6,0	10	47 040 000	3,0%	10 548 000	57 588 000	1,6
Presse	6,0	Ficelle (2 CFA/kg)	72 000 000	6,0%	24 012 000	96 012 000	2,7
Chargeur	6,0	5	11 760 000	3,0%	10 548 000	22 308 000	0,6

Figure 4.5. Évaluation du coût du pressage et du stockage de la paille dans les installations de stockage local

L'amortissement est fixé à 10 ans pour le tracteur et le chargeur et à 5 ans pour la presse. Le coût de maintenance est fixé à 3 % du coût d'investissement pour le tracteur et le chargeur et à 6 % pour la presse. La consommation de carburant est fixée à 10 litres/heure pour le tracteur (heures de service) et à 5 litres/heure pour le chargeur. Le coût de la ficelle à balles est fixé à 2 CFA/kg, sur la base des coûts au Danemark.

#### 4.2.3 Stockage

Les coûts de stockage sont estimés à 5,7 CFA/tonne. Ce coût est divisé par la quantité totale de paille, bien que 21 600 tonnes seulement sur 36 000 soient effectivement stockés. Cela signifie que les coûts de stockage par tonne de paille effectivement stockée sont supérieurs. Les détails sont exposés en Figure 4.6.

Selon (Hinge and Maegaard 2005) le prix de l'installation de stockage au Danemark serait d'environ 1,4 million de DKK (123 MCFA). Les coûts étant plus bas au Mali, ce coût a été utilisé pour intégrer la zone consolidée de réception de la paille en vrac de 2 000 m<sup>2</sup>, ainsi que la clôture ceinturant l'installation de 3 200 m<sup>2</sup>.

Le coût de maintenance de l'installation de stockage est fixé à 1 %, avec un amortissement sur 30 ans.

Équipement	Unités	Investissement par unité (FCA)	Investissement total (FCA)	Amortissement (ans)	Coût d'investissement annuel (CFA)	Coût par kg (CFA)
Stockage	18	123 000 000	2 214 000 000	30	144 023 877	4,0
Personnel	Personnes	Jours ouvrables	Salaire journalier (CFA)		Coût annuel du personnel (CFA)	Coût par kg (CFA)
Gardien	54	365	2 000		39 420 000	1,1
Exploitation et maintenance				Maintenance (% des investis.)	Coût annuel (CFA)	Coût par kg (CFA)
Stockage				1,0%	22 140 000	0,6
<b>Coût du stockage</b>						<b>5,7</b>

Figure 4.6. Évaluation du coût du stockage de la paille dans les installations de stockage local

#### 4.2.4 Transport du stockage local à la centrale

Le coût du transport du stockage local à la centrale est estimé à 2,6 CFA/kg. Le coût de tracteur et de chargeur est le même qu'à la section précédente.

Comme décrit à la section 2.1.4, deux tracteurs avec remorque et un chargeur travailleront en équipe sur la même installation de stockage local. À la Figure 3.3 et dans le calcul ci-dessous, la demande est de 2,9 tracteurs avec remorque et de 1,5 chargeur. Ce besoin peut être satisfait (pour un coût quasi équivalent) avec deux tracteurs et deux remorques et un chargeur fonctionnant ensemble, plus un chargeur et une remorque fonctionnant séparément.

Équipement	Unités	Investissement par unité (FCA)	Investissement total (FCA)	Amortissement (ans)	Heures de fonctionnement par an	Coût d'investissement annuel	Coût par kg (CFA)
Tracteur	2,9	58 600 000	170 526 000	10	1 163	22 083 897	0,6
Remorque	2,9	3 636 364	10 581 818	10	1 163	1 370 394	0,0
Chargeur stock. local	1,5	50 869 565	74 015 217	10	1 237	9 585 309	0,3
Chargeur à la centrale	1,5	50 869 565	74 015 217	10	1 237	9 585 309	0,3
Personnel	Personnes	Jours ouvrables	Salaire journalier (CFA)			Coût annuel du personnel (CFA)	Coût par kg (CFA)
Tracteur	2,9	360	5 000			5 238 000	0,1
Exploitation et maintenance	Unités	Combustible: l/heure	Coût combust. / Coût ficelle	Maintenance (% des investis.)	Maintenance (CFA)	Coût annuel (CFA)	Coût par kg (CFA)
Tracteur	2,9	10	27 072 000	3,0%	5 115 780	32 187 780	0,9
Remorque	2,9			3,0%	317 455	317 455	0,0
Chargeur stock. local	1,5	5	7 200 000	3,0%	2 220 457	9 420 457	0,3
Chargeur à la centrale	1,5	5	7 200 000	3,0%	2 220 457	9 420 457	0,3
<b>Coût du transport du stockage local vers la centrale</b>							<b>2,8</b>

Figure 4.7. Évaluation du coût du transport du stockage local vers la centrale

## 5. Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité est effectuée sur deux principaux paramètres. L'impact de la variation de capacité de pressage est présenté en Figure 5.1 et l'impact de la variation de la distance de transport est présenté en Figure 5.2.

La capacité de pressage sur site au Danemark est d'environ 15 tonnes/heure. Pour la présente étude, la capacité est fixée à 7,5 tonnes/heure, dans la mesure où la presse travaille sur de la paille déchargée en vrac dans l'installation de stockage, ce qui peut réduire la capacité. La capacité de pressage est considérée comme un paramètre très sensible. Le coût, par contre, n'est pas très sensible à la variation de distance de transport. Dans le système de base, les distances sont de 4,4 km et de 18,8 km.

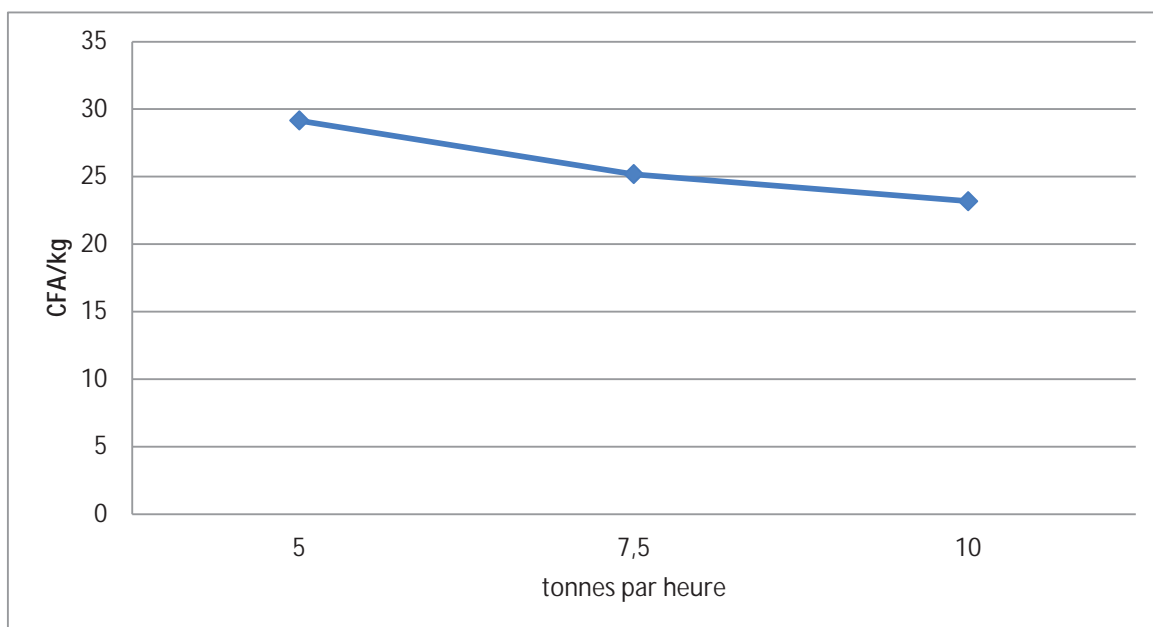


Figure 5.1. Coûts de maintenance totaux en fonction de la capacité de pressage en tonne/heure

Analyse de sensibilité		Distance de transport du stockage à la centrale			
Coût de base	25,2	10,0	20,0	30,0	40,0
Transport du	2,0	22,1	22,9	23,8	24,6
champ au	3,0	23,1	23,9	24,7	25,5
stockage local	4,0	24,1	24,9	25,7	26,5
	5,0	25,0	25,9	26,7	27,5

Figure 5.2. Analyse de sensibilité des coûts de maintenance totaux (en CFA/kg) en fonction de la distance de transport en km (aller-retour).



## 6. Références

- Hinge, J. & Maegaard, E. (2005): *Prisen på halm til kraftvarme?* Skejby: Dansk Landbrugsrådgivning Landscentret, Byggeri og Teknik  
<http://www.landbrugsinfo.dk/Byggeri/Filer/1403joh.pdf>.
- Nicolaisen, L.; Nielsen, C.; Larsen, M. G.*et al.* (1998): *Straw for Energy Production: Technology - Environment - Economy*, Danish Energy Agency.  
[http://193.88.185.141/Graphics/Publikationer/Vedvarende\\_energi\\_UK/Halm\\_UK\\_1998pdf.pdf](http://193.88.185.141/Graphics/Publikationer/Vedvarende_energi_UK/Halm_UK_1998pdf.pdf).
- Nielsen, V. (2003): *Teknik til halmbjærgning siden midten af det forrige århundrede*. Horsens: Danmarks Jordbrugsforskning, Forskningscenter Bygholm,  
[http://www.videncenter.dk/Halmbjergning\\_1950\\_2000.pdf](http://www.videncenter.dk/Halmbjergning_1950_2000.pdf).
- Nygaard, I.; Bruun, T. B.; Traoré, O. F.*et al.* (2012): *Agricultural residues for energy production in Mali*, UNEP Risø Centre, Technical University of Denmark ([www.frsemali.org](http://www.frsemali.org)).
- Skøtt, T. (2011): *Straw to Energy: Status, Technologies and Innovation in Denmark 2011*, Innovation Network for Biomass (INBIOM), Agro Business Park A/S  
([http://www.inbiom.dk/download/viden\\_biomasse/halmpjeceuk\\_2011.pdf](http://www.inbiom.dk/download/viden_biomasse/halmpjeceuk_2011.pdf)).
- VHF (1998): *Halmballer: Typer, størrelser, volume, vægt og densitet*, Videnblad no. 130. Videncenter for halm- og flisfyring.





