

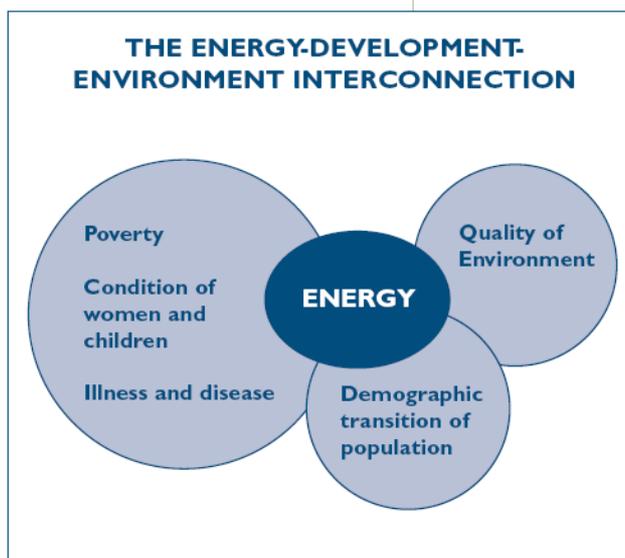
Mariam Segmani
Thierry Lecoq
Navid Hedayati Dezfouli
Abdrahamane Diawara

Les Energies Renouvelables

Paris, le 16 février 2007

Projet « Plateforme Solaire au Mali »





Bonjour,

Dans le cadre d'une volonté de coopération en développement durable, nous élaborons un projet de plateforme solaire au Mali.

Ce projet consiste à intégrer l'énergie solaire dans les plateformes multifonctionnelles actuelles.

Mariam Segmani -Thierry Lecoq – Navid Heydayati Dezfouli– Abdrahamane Diawara
L'équipe du projet « Malideal »

Nyesuma1!!

Contact : malideal.ensta@gmail.com

¹ Bien-être en bambara

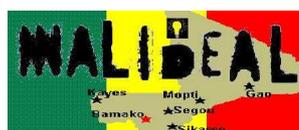


Table des matières

1. INTRODUCTION.....	5
1.1 Présentation générale.....	6
1.2 Pauvreté & Mali.....	9
2. SITUATION ENERGETIQUE	10
2.1 Problèmes énergétiques :	10
2.1.1 Contraintes géographiques :	10
2.1.2 Exploitation abusive des ressources forestières : problèmes de déboisement.....	11
2.1.3 Dépendance aux produits pétroliers importés de l'extérieur.....	11
2.1.4 Manque d'investissements	12
2.2 Leviers énergétiques :	12
2.2.1 La biomasse :	12
2.2.2 Potentiel Hydroélectrique :	13
2.3 Points d'appuie, cibler les fondations :	13
2.3.1 Les ménages ruraux :	13
2.3.2 Le transport :	15
3. STRATEGIE D'UTILISATION DES LEVIERS D' ACTIONS	16
3.1 Biomasse et biocarburant en zone rurale :	16
3.2 Développement de l'électricité en zone rurale :	16
4. CONCEPT DE PLATEFORME SOLAIRE	19
5. LA BIOMASSE.....	20
5.1 Introduction.....	20
5.2 Situation énergétique	20
5.3 Pourghère	20
6. Electricité solaire: une énergie peu coûteuse	25
6.1 Le NEPAD veut développer l'électricité dans les zones rurales.....	25
6.2 'Le soleil est gratuit'	26
6.3 Financement novateur.....	26
6.4 Une aide pour les entreprises.....	27
6.5 Système d'énergie solaire : Exemple d'énergie solaire	28
6.6 Cas pratique	29
6.7 L'ensoleillement.....	30
6.8 Principe de fonctionnement d'une centrale photovoltaïque en site isolé	31
7. ENERGIE EOLIENNE.....	33
7.1 Introduction.....	33
7.2 Caractéristiques techniques des éoliennes.....	34
7.3 Eoliennes de grandes tailles	35
7.4 Eoliennes de grandes tailles	36
7.5 Les coûts	36
7.6 Une éolienne typique sur le marché actuel	37
7.7 Coûts d'installation d'une éolienne	37
7.8 Coûts d'exploitation et d'entretien.....	37
7.9 Opportunité de l'énergie éolienne au Mali	37



8. ANNEXES	39
8.1 Unités de travail des ENR.....	39
8.2 Programme National de Développement des Plates-formes Multifonctionnelles	40



1. INTRODUCTION

Aujourd'hui, un quart de la population mondiale consomme les trois quarts de l'énergie produite, environ 2 milliards de personnes dans le monde n'ont pas accès à l'électricité. 80% de la consommation énergétique mondial repose sur des énergies fossiles.



Figure 1 : Accès à l'électricité dans le monde

Une étude sur la contribution de l'énergie au développement propose un certain nombre de leçons à retenir en fonction du rôle joué par les services énergétiques dans le développement du Mali. Les messages politiques importants tirés de cette étude sont les suivants:

- *Accroître le rôle des services énergétiques, en zone rurale, dans les stratégies de réduction de la pauvreté, au niveau national et au niveau macro.* L'expérience du Mali prouve qu'il y a une corrélation positive entre la fourniture de services d'énergie et l'accomplissement des OMD liés à la réduction de la pauvreté, à l'éducation, à l'égalité de genre et à la santé. Bien que l'expérience malienne le conseille, les gouvernements manquent souvent de politiques appropriées ou de cadre institutionnel précis pour apporter des services d'énergie décentralisés aux populations rurales. Faire correspondre les expériences d'accès à l'énergie sur une petite échelle avec la formulation de politiques au niveau macro reste pour le Mali un défi. C'est pour cette raison qu'il faut encourager les politiques à intégrer dans leur processus décisionnel, au niveau macro, l'impact des services d'énergie sur le développement humain.

- *Associer l'accès aux services énergétiques avec des activités productives, afin de mettre en valeur les revenus produits dans les zones rurales.* La manière dont l'accès à énergie peut mettre en valeur les revenus produits, offre un bon aperçu du rapport existant entre les services énergétiques et les activités productives (particulièrement celles liées à l'agriculture). Comme le montre le projet Plate-forme Multifonctionnelle, l'augmentation des revenus dans les villages et l'accès aux Plate-formes sont étroitement liés à l'augmentation de la productivité et à la mise en valeur de l'activité économique. Grâce aux services de la Plate-forme Multifonctionnelle, le temps gagné et le travail épargné permettent aux ménages de produire de plus grandes quantités de produits agricoles et de meilleure qualité.
- *Réduire les préjugés entre les genres, caractéristique de la pauvreté énergétique.* En dépit de son succès relatif, les résultats préliminaires du projet Plate-forme Multifonctionnelle au Mali démontrent que la fourniture d'énergie – en particulier la mécanisation - est capable d'accroître les revenus des femmes, mais est également fonction de l'environnement socio-économique et/ou culturel dans lequel elles vivent. Afin de s'assurer que les projets d'accès à l'énergie en zones rurales soient bénéfiques aux hommes comme aux femmes, les responsables doivent tout d'abord identifier la dynamique existant autour de la question de l'énergie. Pour être certain que les problèmes de genre en matière de pauvreté énergétique ne s'accroissent pas, une plus grande attention devra être portée sur la réduction de la dépendance des femmes au travail et de s'assurer que les femmes soient à même de faire des choix en matière d'énergie.
- *Se concentrer sur les besoins en services modernes d'énergie, nécessaires à la transformation des produits alimentaires, de l'agriculture, de la cuisine et des entreprises rurales afin de maximiser les impacts dans les zones rurales les plus reculées.* Comme le prouve l'expérience du Mali, l'introduction de l'énergie vise à réduire le temps et les efforts dépensés par les ménages pour des activités de transformation de produits alimentaires (production de riz et de céréales) et à améliorer la probabilité pour les femmes et les enfants de tirer profit d'une meilleure éducation, d'une meilleure santé et de meilleurs revenus. Malgré les avantages multiples et immédiats pour les populations pauvres, cet aspect du développement, de l'accès à l'énergie en milieu rural reçoit actuellement peu de support de la part des partenaires extérieurs, par rapport à l'électrification rurale, par exemple. Ceci démontre qu'au Mali, où des activités fortement consommatrices de temps, telles que la préparation des repas, continuent à aggraver la dépendance des femmes et des enfants au travail, une meilleure approche du problème de l'accès à l'énergie en milieu rural doit être prise.

1.1 Présentation générale

Subdivisé en trois grandes régions climatiques, vaste pays au cœur de l'Afrique de l'ouest, le Mali avec sa superficie totale de **1.241.231 km²**, un fleuve de 1700 km de long (**le Niger**) qui traverse le Sahel et la partie du sud-est du pays, y compris la capitale Bamako. Le pays est



découpé en huit régions administratives et un District urbain (Bamako). Les régions sont subdivisées en 49 cercles et 703 communes.

L'ensemble des réserves en eau du Mali représente dans les conditions moyennes un volume de 2 720 milliards de mètres cubes. En règle générale, les températures sont élevées avec des moyennes annuelles comprises entre 16 et 30 °C. Les cumuls pluviométriques annuels varient de plus de 1 400 mm au sud de Sikasso à moins de 100 mm par an à Tessalit, traduisant une diminution des précipitations en latitude.

De 4,2 millions d'habitants en 1960, la population du Mali a plus que doublé en 35 ans, passant à environ 9 012 858 millions en 1995 et à environ 13 millions d'habitants en 2006. Elle s'accroît en moyenne de 3,2 % par an, ce qui conduit à prévoir un effectif de 23 millions d'habitants en 2025.

Années	1960	1995	2000	2006	2020	2025
Population en Millions	4,2	9,01	10,55	12,74	19,80	23,18

Les Maliens restent encore en majorité des ruraux, malgré une hausse continue du taux d'urbanisation, lequel est passé de 5% en 1960 à 24% en 1995. La population en 1995 était à 77% rurale. On obtient le tableau suivant :

En Millions d'habitants	1995		2003		2006		2010		2025	
Population Rurale	6,94	77%	8,11	70%	8,54	67%	9,25	64%	11,82	51%
Population Urbaines	2,07	23%	3,48	30%	4,20	33%	5,20	36%	11,36	49%

Source : <http://perspective.usherbrooke.ca/bilan/stats/0/2000/fr/1/carte/SP.RUR.TOTL.ZS/x.html>

En zone rurale, la population vit de l'agriculture de subsistance. La densité de population varie considérablement d'une région à une autre mais reste faible pour l'ensemble du pays.

La grande majorité des Maliens se consacre à des activités agricoles; culture, élevage, pêche. Les activités agricoles occupent 80% de la main-d'œuvre malienne, assurant approximativement 40% du PIB du pays et constituant approximativement 75% des revenus de l'exportation.

La culture du coton et de l'arachide est la seule véritable recette du pays, avec le riz, le maïs, le sorgho, le millet, et le manioc qui représentent les principales récoltes vivrières. L'or, le phosphate, le sel et la chaux sont exploités mais le pays a encore des ressources minières étendues inexploitées, telles que la bauxite, le manganèse, le minerai de fer, le lithium, l'uranium, l'étain, le cuivre, et le diamant.



MALIDEAL

Zones agroclimatiques	Superficie(km ²)	Pluviométrie (mm)	Formation Forestière
Zone soudano-guinéenne	75 000	Plus de 1200	Savanes boisées à forêt claire
Zone soudanienne	215 000	600 à 1200	Savane arbustive, boisée, arborée, galerie forestière
Zone sahélienne	3820 000	200 à 600	Steppe, herbeuse parsemée d'épineux
Zone saharienne	632 000	moins de 200	Quasi inexistant

Tableau 1 : zones agroalimentaires (source: projet Inventaire des ressources terrestres)

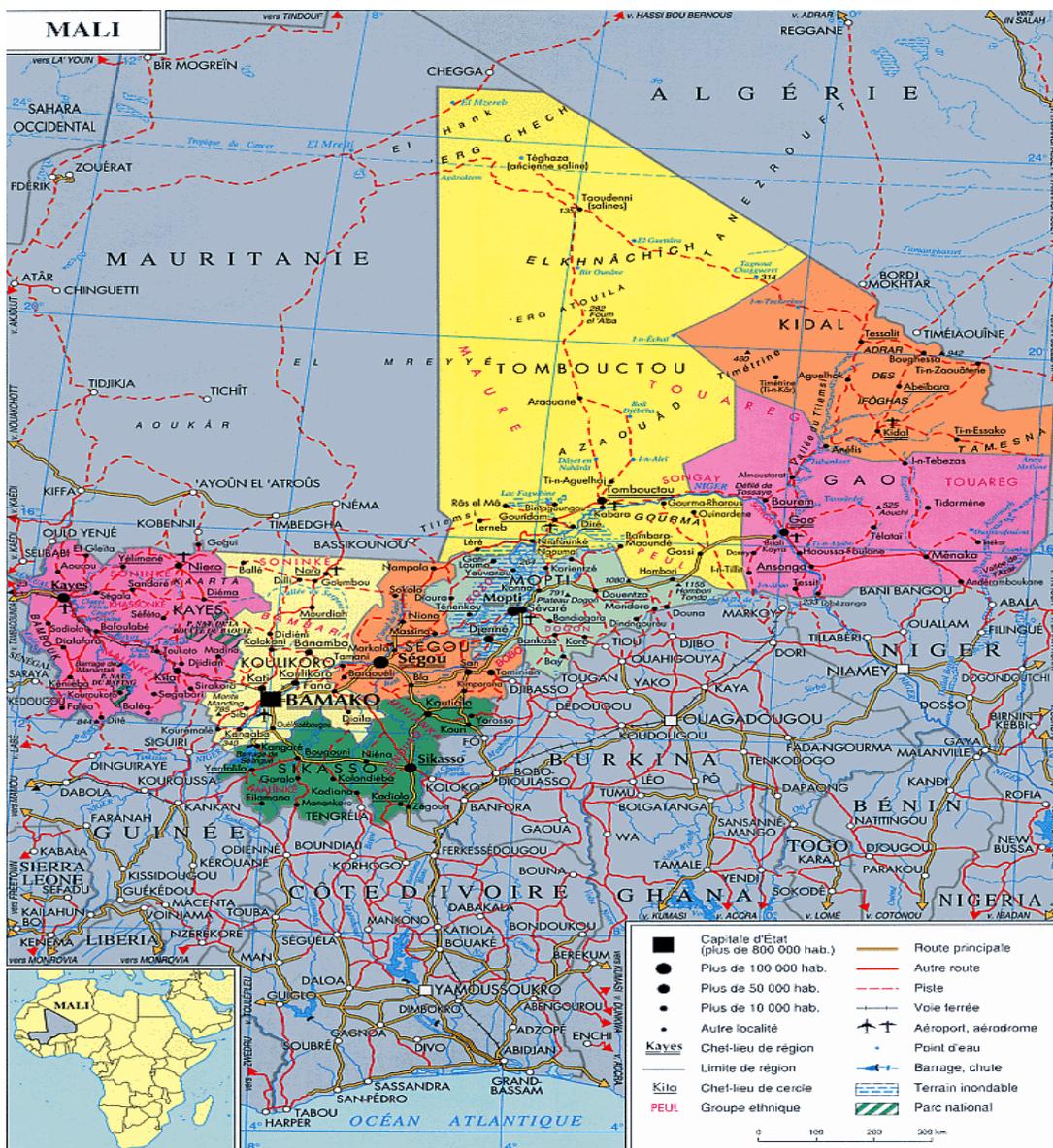


Figure 2 : carte du Mali



1.2 Pauvreté & Mali

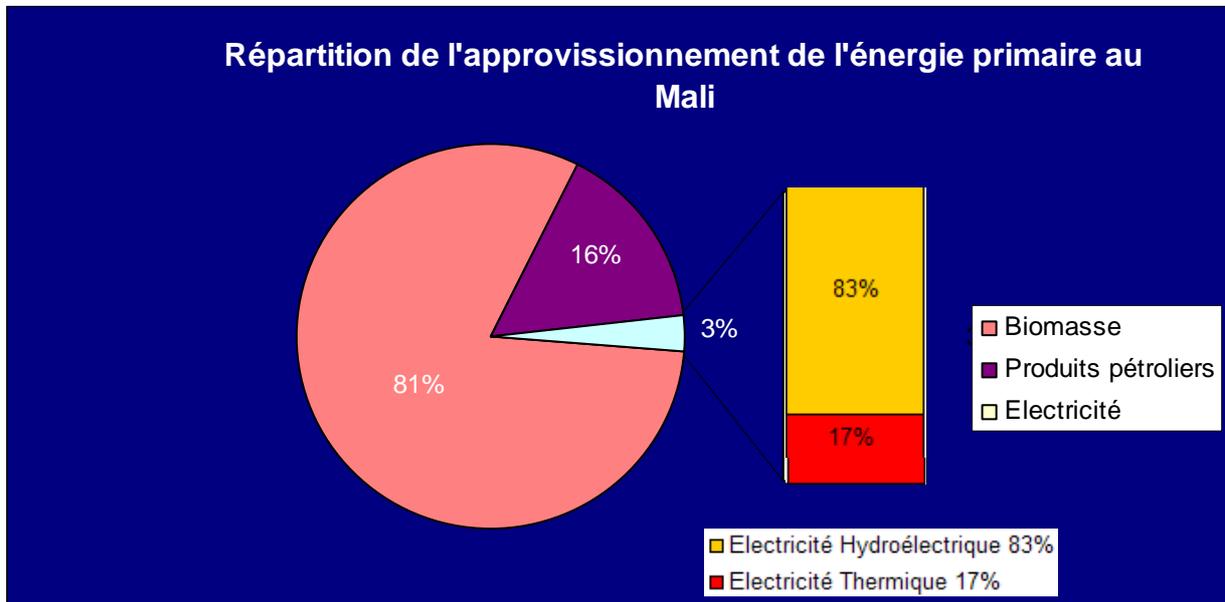
Malgré toutes ces richesses, la pauvreté au Mali est endémique et étendue, faisant du Mali l'un des pays les plus pauvres du monde. Près des deux-tiers (8 millions de personnes) de la population n'ont pas accès aux services sociaux de base (éducation, santé, logement, eau potable, etc.), et **un tiers vit dans l'extrême pauvreté (4 millions de personnes)**. La pauvreté au Mali revêt des formes multidimensionnelles comme l'analphabétisme, la malnutrition, le faible taux d'espérance de vie, le chômage, les infrastructures dégradées, les ressources environnementales incertaines et un accroissement de l'exode rural. Voici les principales raisons pour lesquelles le Mali se classe régulièrement parmi les pays les plus pauvres (classement HDI) et est considéré comme faisant partie des Pays les Moins Avancés (PMA).

Le niveau et la nature de la pauvreté au Mali diffèrent selon les régions. Le niveau de pauvreté est plus élevé dans les régions isolées du nord et du centre telle que Kidal. Le niveau de pauvreté est, d'autre part, moins élevé dans les régions méridionales et occidentales, y compris la zone de Bamako, où les précipitations sont plus régulières et plus abondantes.

La pauvreté au Mali est étendue et plus sévère dans les zones rurales. Selon les estimations du gouvernement malien, **environ 88% de la population pauvre vit dans des zones rurales**. Le niveau de pauvreté est de 75.9% dans les zones rurales contre 30.1% dans les zones urbaines. Les faibles perspectives de développement des zones rurales ont accentué l'exode rural faisant pression sur la capacité de production alimentaire du pays.



2. SITUATION ENERGETIQUE



Biomasse	81%
Produits pétroliers	16%
Electricité	3%

Hydroélectrique	524
Thermique	107
Total	631

2.1 Problèmes énergétiques :

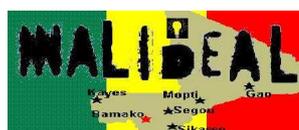
Le taux d'électrification du Mali est de 13% avec 631 GWh produit par an.

En 2002, la consommation énergétique globale du Mali était de 3.212.559 Tep composé de la biomasse, les produits pétroliers, l'électricité et les énergies renouvelables.

Les problèmes énergétiques sont caractéristiques de nombreux pays Africains.

2.1.1 Contraintes géographiques :

Enclavement du pays soumis à des distances de transport à partir des façades maritimes (situées à plus de 1000 km) qui élève le prix des produits et des équipements énergétiques importés.



Dû à l'étendue territoriale, à la faible densité d'habitation de 8,87 hab./km² (93,59 hab./km² en France), et étant donné que la majorité de la population du Mali vit dans de petits villages dispersés, le réseau d'électrification rurale est pratiquement inexistant, laissant l'approvisionnement en énergie mécanique et électrique décentralisée la seule option viable. Actuellement cependant, il n'existe aucune politique énergétique claire pour apporter de l'énergie en zone rurale. En conséquence, la majorité des Maliens n'ont toujours pas accès aux services énergétiques de base.

2.1.2 Exploitation abusive des ressources forestières : problèmes de déboisement

La fragilité de l'écosystème s'explique par la consommation énergétique des ménages qui représentent 90% de la consommation totale et qui utilise 99% de bois (6 millions de tonnes/an).

En raison d'une confiance élevée dans les combustibles traditionnels qui répondent aux besoins énergétiques domestiques, les Maliens - en particulier ceux qui vivent près des centres urbains- épuisent rapidement les forêts par l'achat de combustibles de ménage. Ils créent ainsi des couloirs de déboisement le long des voies d'accès qui génèrent des problèmes d'érosion et d'appauvrissement des sols. Le déboisement lié à la consommation d'énergie est l'un des enjeux environnemental majeur pour le Mali.

Régions	Superficie totale forêts 1 000 ha	Volume (1000 m ³)	Productivité (m ³ /ha/an)
1. Kayes	10 644	159 087,4	0,81
2. Koulikoro	7 565,6	1040341,3	0,94
3. Sikasso	5 516,9	165 722,0	1,48
4. Segou	4 727,7	51 9 05,1	0,68
5. Mopti	4342,9	34 138,0	0,36
6. Tombouctou	n.d.	-	-
7. Gao	n.d.	-	-
8. Kidal	n.d.	-	-
TOTAL	32 797,9	515 203,8	-

Tableau 1: principales données sur les ressources forestières (Source: Stratégie énergie domestique)
n.d.: non déterminé

2.1.3 Dépendance aux produits pétroliers importés de l'extérieur

L'absence des ressources pétrolières nationales exploitables impose l'importation de tous les besoins du pays en produits pétroliers.



En effet le Mali s'approvisionne en hydrocarbure à partir de la Cote d'Ivoire, du Sénégal, du Bénin et du Togo.

En 2001 les importations s'élevaient à 545 085 TM².

2.1.4 Manque d'investissements

Insuffisance des structures et des mécanismes financiers locaux, faiblesse des capacités des opérateurs privés du secteur et faiblesse du pouvoir d'achat constituent le socle ternaire de l'inhibition du développement énergétique au Mali.

La consommation directe a été identifiée comme représentant une contrainte financière forte. Les grands barrages exigent des investissements substantiels difficiles à réaliser pour le pays, aux vues des circonstances économiques et financières présentes. La production décentralisée d'énergie est une alternative valable ; mais la plupart des collectivités rurales ne sont pas en mesure d'acheter elles-mêmes les générateurs.

2.2 Leviers énergétiques :

En 2000, la demande nationale annuelle était évalué au Mali à 2,5 MTEP toutes énergies confondues, c'est-à-dire à 0,24 TEP/ habitant soit 2790 kWh/habitant/an.

2.2.1 La biomasse :

La superficie cultivable est estimée au Mali à 43,4 millions d'hectares, soit 28% du territoire national. Par suite de contraintes diverses (carences graves en sels minéraux, aridité, faible teneur en matière organique), seulement 12 millions d'hectares (soit 30% du potentiel disponible) sont des sols cultivés.

Les productions agricoles comprennent :

- les céréales : millet (900.000 T), sorgho (750.000 T), riz (470.000 T), maïs (320.000T),
- le coton : produit principalement sous encadrement de la Compagnie Malienne de Développement des Textiles (CMDT), il constitue en valeur la première source de recettes nationales d'exportation ; en 1995-96, le Mali a récolté 406.000 T de coton-graine et vendu pour 138 milliards de F CFA de coton-fibre....,
- la canne à sucre (260.000 T),
- l'arachide.

La biomasse constituée essentiellement de bois, de charbon de bois occupe une place centrale (81%) dans la consommation énergétique du Mali avec les produits pétroliers à hauteur de 16% et l'électricité à 3%.

Les ENR sont utilisées actuellement à un niveau insignifiant.

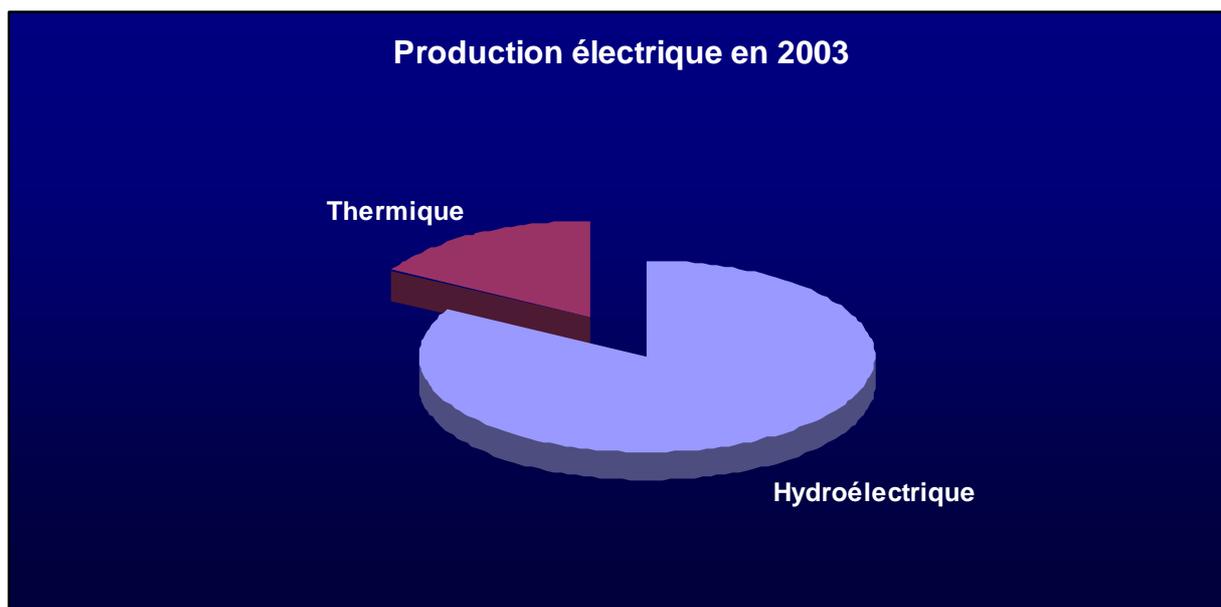
² Tonne Métrique



Les actions de maîtrise de l'offre menées par les pouvoirs publics et des ONG expliquent sa faible progression entre 2 354 000 tep (1997) et 2 928 300 tep (2000).

2.2.2 Potentiel Hydroélectrique :

Le potentiel hydroélectrique national est estimé à 1050 MW (soit 5000 GWh de productible par an contre 524 GWh exploité actuellement.)

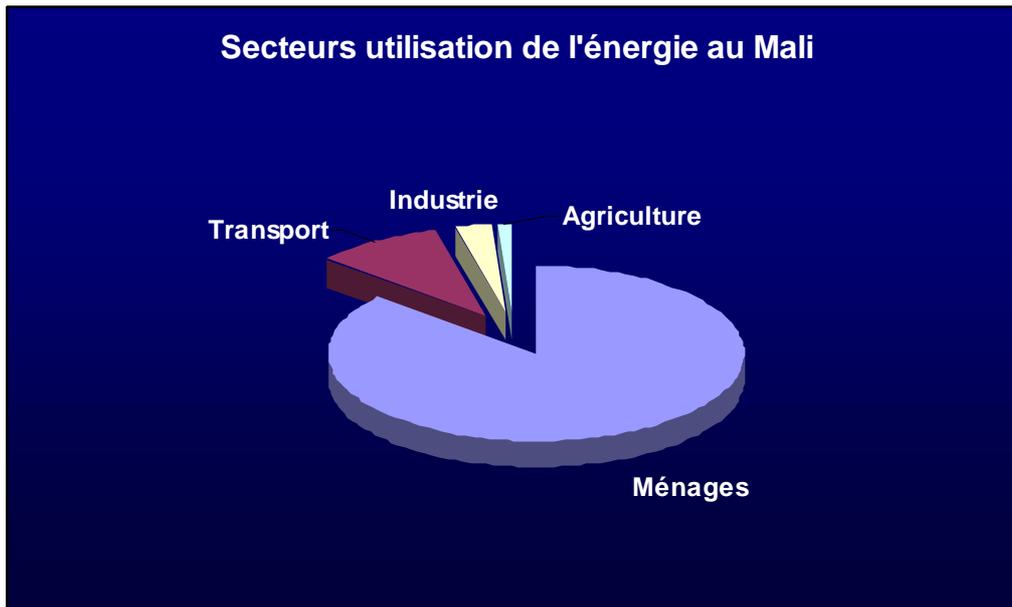


Production électrique en GWh en 2003		
Hydroélectrique	524	83%
Thermique	107	17%
Total	631	

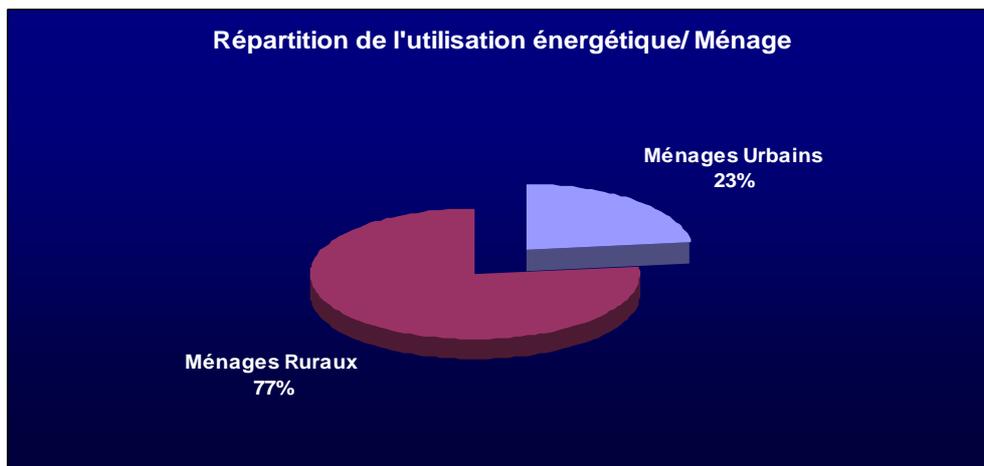
2.3 Points d'appui, cibler les fondations :

2.3.1 Les ménages ruraux :

Dans notre politique de levier d'actions, il faut s'appuyer sur des populations stratégiques. Concernant l'énergie au Mali, l'évidence est de favoriser les ménages ruraux étant de loin le plus important (86% ET 77%).

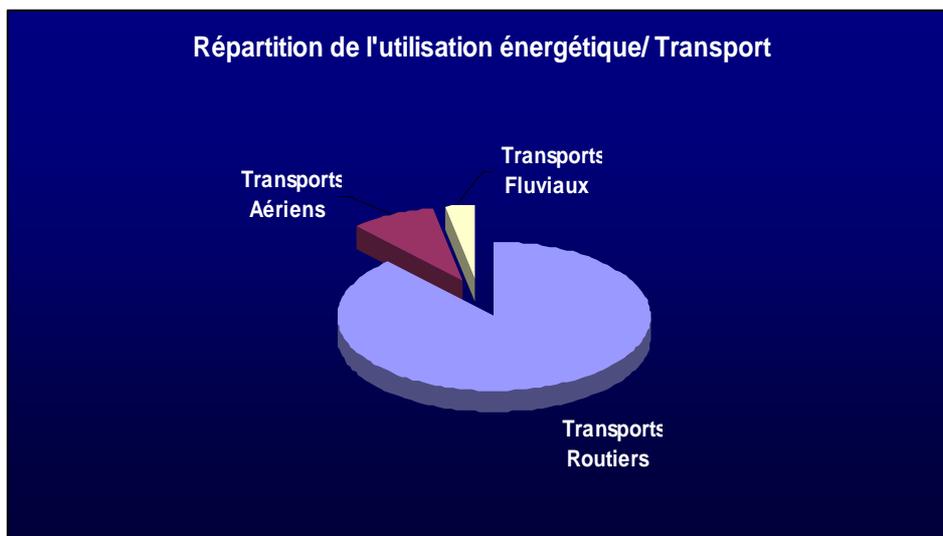


Utilisation de l'énergie par secteur	
Ménages	86%
Transport	10%
Industrie	3%
Agriculture	1%



2.3.2 Le transport :

Le second secteur concerne le transport et est directement lié avec les problèmes de dépendance des hydrocarbures.



Répartitions de l'utilisation énergétique/ Transport	
Transports Routiers	88%
Transports Aériens	9%
Transports Fluviaux	3%

Le problème du prix des hydrocarbures couplé à un transport routier important nous amène à considérer ce couple pétrole/carburant de plus près.

3. STRATEGIE D'UTILISATION DES LEVIERS D' ACTIONS

3.1 Biomasse et biocarburant en zone rurale :

A travers le développement dans ce rapport de la culture de la Pourghère, nous avons essayé d'introduire la notion de biocarburant dans un milieu rural en fonctionnement proche de l'autarcie.

En effet en couplant la plantation, la culture et le traitement de la Pourghère autour d'une plateforme multifonctionnelle³, cela permet de créer des emplois, du biocarburant moins cher et du savon.

3.2 Développement de l'électricité en zone rurale :

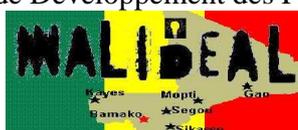
Notre projet se veut dans la continuité du Programme National de Développement des Plates-formes Multifonctionnelles. C'est dans cette optique là que nous vous présenteront notre concept de plateforme solaire.

Afin de mieux appréhender la problématique du Mali, nous avons mené une étude stratégique globale sur le développement au Mali.

En 2003, seulement 13% de la population avait accès à l'électricité, dont 1% en zone rurale.

Nombre d'hab. sans électricité en 2003		
En Millions d'hab.	Avec électricité	Sans électricité
Population Rurale	0,120	7,994
Population Urbaines	1,390	2,088
Total	1,510	10,082
<hr/>		
Consommation éventuelle (GWh)	631	4 213
Total estimation CONSO 2003 (GWh)		4 844
<hr/>		
Capacité Hydraulique (GWh)	524	4 476
Capacité totale en 2003		5 000
<hr/>		
Production thermique (GWh)	107	0
Total		107
<hr/>		
électricité à vendre (GWh)		-263

³ Cf Annexes, Programme National de Développement des Plates-formes Multifonctionnelles



En 2003, si le potentiel hydroélectrique avait été maîtrisé, le Mali aurait pu vendre 263 GWh d'électricité soit environ 23,67 M€ et l'ensemble de sa population aurait accès à l'électricité.

	2015	2025
Consommation rurale (GWh)	1 984	2 470
Hydroélectricité (80%)	1 587	1 976
Thermique	329	291
Energie Solaire (Plan APD)	68	203

En faisant l'hypothèse que le Mali maîtrisera une partie de son potentiel hydroélectrique d'ici 7 ans, nous pouvons extrapoler l'implication de l'énergie solaire dans la consommation de la population rurale.

Fin décembre 2006, la plus grande centrale photovoltaïque de France a été inaugurée sur l'île de La Réunion. Pour un investissement de 5M€, sur 8500 m² (2,5 terrains de football) de panneaux solaires, elle devrait produire 1,35 GWh par an. (Puissance de 1,3MW)

A titre d'exemple de centrale solaire, la plus grande actuellement est située au Portugal sur 114 hectares de panneaux solaires, pour un investissement global de 257 millions d'euros et une capacité de production de 62 MW.

L'APD (Aide au Développement) Française était de 8,1 milliard d'euros en 2005, donc en effectuant un investissement annuel dans une centrale solaire malienne de 50 M€⁴ (85 000 m² de panneaux solaires, soit l'équivalent de 25 terrains de football) avec une puissance de 13 MW, la centrale fournirait de l'électricité à environ 40 000 foyers⁵.

De plus, le prix de l'électricité en France est de 90,5⁶ €/MWh HT.

En vendant l'électricité produite par cette centrale, on calcul un chiffre d'affaire de 1,2 M€ soit un retour sur investissement possible⁷ sur 50 ans.

Dans le cas de cet APD qui est perdu chaque année, cela pourrait se traduire par un prêt à 0%.

⁴ 0,6 % de l'APD Française de 2005

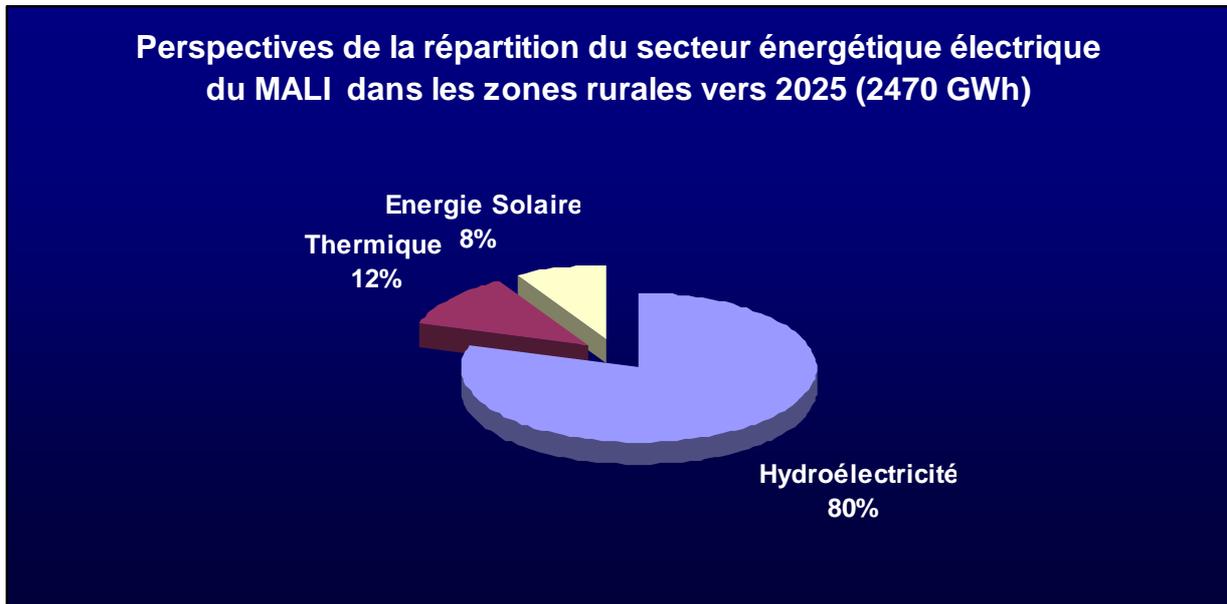
⁵ Consommation moyenne d'un foyer avec 3 enfants en France : 30 kWh/15jours, soit 720 kWh/an.
En faisant l'hypothèse d'une consommation malienne plus faible (de moitié), on arrive à 350 kWh/an.

⁶ 90,5 €/MWh HT pour les particuliers et 53,3€/MWh pur les entreprises.

⁷ Tout dépend du prix de l'électricité, du prix de la maintenance et du remplacement du matériel



Cette stratégie se traduirait en terme de répartition de secteur de la manière suivante :



4. CONCEPT DE PLATEFORME SOLAIRE

Notre étude du Mali nous a amené aux conclusions suivantes :

- Il faut une énergie en zone rurale, dans un village et de même que le concept de micro-crédit, la communauté doit prendre en charge financièrement sa plateforme solaire.

- L'énergie doit être solaire car en plus d'être une solution stratégique, elle assure un meilleur rendement au Mali que celui de l'éolien. De plus, s'adressant à une population rurale, il ne faut pas compliquer les recours énergétiques.

- Cette plateforme serait composée d'un bâtiment composé de 3 pièces avec un toit servant d'appui aux panneaux solaires.

- Une pièce servirait d'atelier avec toutes les machines utiles reliées au réseau électrique.

- Une pièce servirait de bibliothèque, ou de salle d'études où les gens pourraient se retrouver à n'importe quelle heure de la journée.

- La dernière pièce servirait de cuisine, regroupant un réfrigérateur (médicaments), quelques plaques chauffantes...

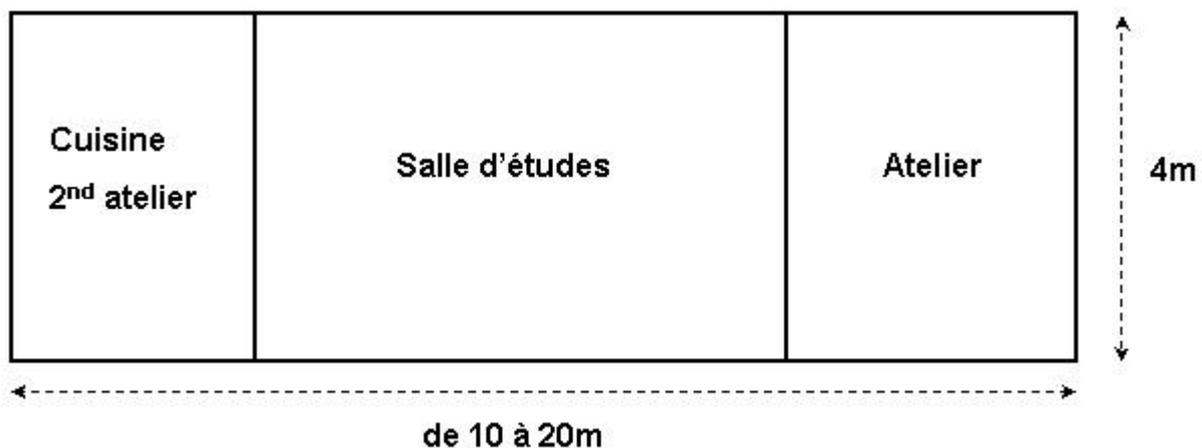


Figure 3 : schéma d'une plate-forme

Financièrement, notre budget oscille entre 10 000\$ et 20 000\$ en cofinancement avec le village, cette partie sera traité dans un dossier investisseurs à part.

5. LA BIOMASSE

5.1 Introduction

La forte hausse des prix des hydrocarbures impose au Mali de développer d'autres alternatives en tirant le meilleur parti de leur potentiel en biomasse. En effet, l'Afrique dispose d'un grand potentiel naturel en ressources énergétiques, qui est largement sous-exploité et qui pourrait contribuer à la fourniture de services énergétiques modernes pour permettre une croissance économique durable.

Il s'agit entre autres de l'éthanol, de l'huile de colza, de l'huile de soja et de l'huile de pourghère. Cette dernière est en pleine expansion actuelle au Mali à travers un vaste programme de valorisation de la plante pourghère.

Nous nous intéresserons principalement à cette source d'énergie.

5.2 Situation énergétique

La biomasse est la deuxième énergie renouvelable dans le monde. Elle est définie comme l'ensemble des matières organiques directement issues du vivant, accessibles sur une base renouvelable et durable. Elle permet de produire de l'électricité, de la chaleur via la combustion de déchets et de résidus de matières organiques végétales ou animales.

La biomasse constituée essentiellement de bois et de charbon de bois, occupe une place prépondérante (81%) dans la consommation énergétique nationale du Mali. En effet, le secteur de l'énergie au Mali se caractérise par une prédominance de la consommation de bois comme énergie (énergie traditionnelle) avec comme combustibles utilisés pour la cuisine le bois de feu et les résidus agricoles bruts, qui dominent en milieu rural, suivis du charbon de bois dont l'usage se répand de plus en plus en ville. Cette utilisation de ressources naturelles pose de graves problèmes de déforestation d'où la nécessité de trouver des produits de substitution de qualité équivalente.

5.3 Pourghère

La production de biodiesel à partir du pourghère qui est un arbuste haut de 4 à 6 m, peut contribuer à diminuer la dépendance énergétique. Avec une croissance rapide, il survit à des pluviométries inférieures à 500mm/an et peut être replanté dans des sols dégradés. La culture du Pourghère se fait par semence et sa durée de vie est estimée à environ 50-60 ans. Cette plante n'est pas comestible. Elle résiste à la sécheresse.



Le Pourghère est souvent utilisé comme plante de haies dans l'agriculture mais aussi comme plante médicinale. Il est connu pour ses propriétés laxatives, les femmes haoussa, vendeuses de médicaments traditionnels, l'utilisent généralement. Mais l'usage le plus convoité et le plus prometteur aujourd'hui, est celui de l'huile de Pourghère comme carburant dans les moteurs. Elle peut être utilisée comme substitut au gasoil dans les moteurs stationnaires, dans les véhicules de transport, et pour la fabrication de savon.

De la graine de Pourghère, on extrait une huile qui représente environ 30% du poids de la graine. Son procédé d'extraction est très simple, elle est extraite des graines avec une presse puis filtrée. Elle n'exige pas de traitements chimiques. Une modification au niveau du moteur est la seule condition technique pour permettre l'alternance entre l'huile de Pourghère et le gasoil.

Pour produire un litre équivalent de gazole, il faut 3 à 4 kg de graines de Pourghère avec une presse artisanale qu'on peut trouver dans les villages.

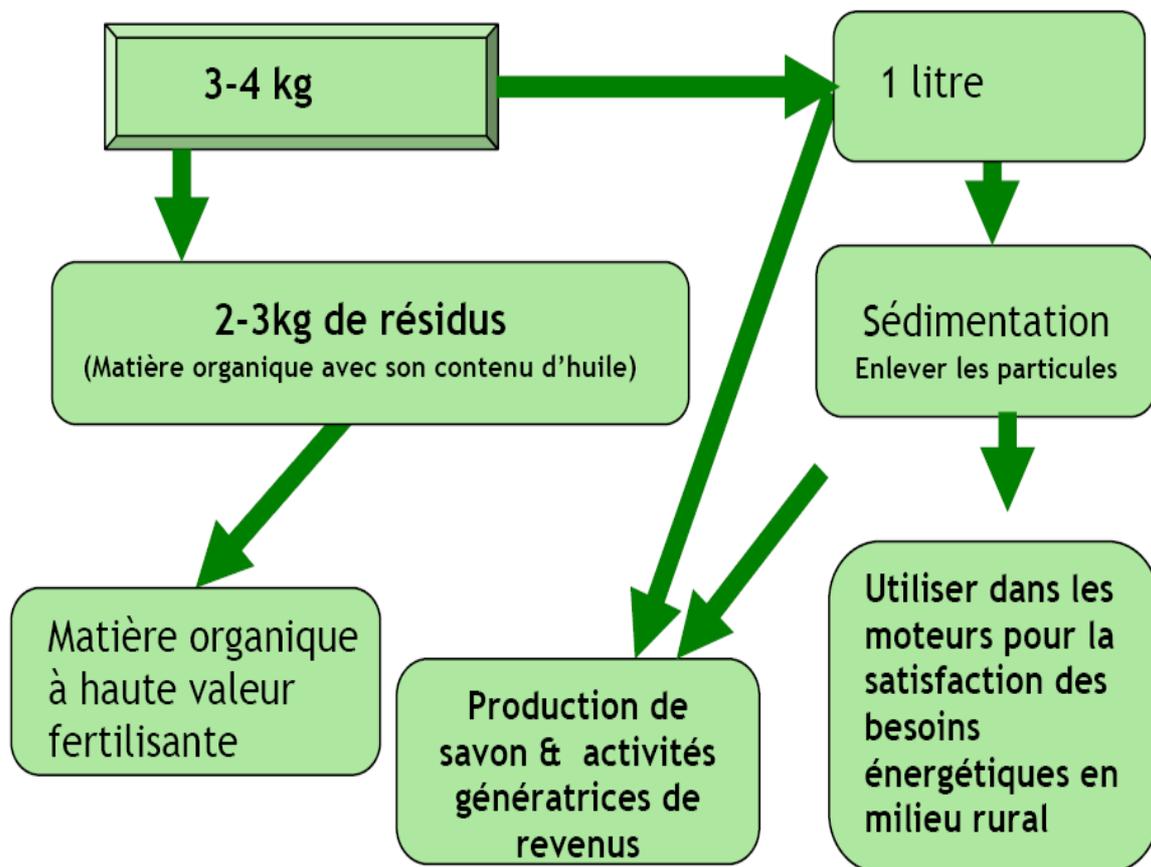
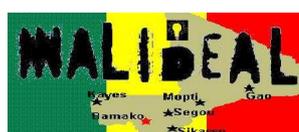


Figure 4: schéma de pressage

En milieu rural là où le gasoil pétrolier n'est pas accessible faute de l'absence de station d'essence, le biocarburant sera apprécié. L'électrification de village peut alors être envisagée avec des générateurs fonctionnant à l'huile de Pourghère. Elle pourra faire fonctionner les moulins motorisés, les motopompes, les groupes électrogènes et même les véhicules diesel.

Ainsi, cette huile peut donc servir de substitut aux hydrocarbures pour résoudre la pauvreté énergétique et générer des revenus pour les populations du monde rural. De plus, l'utilisation de son huile comme carburant donne une émission nette de CO₂ égale à zéro. Ainsi, l'huile de



Pourghère pourrait avoir un grand impact positif dans le développement socio-économique pour les pays de la région, et en particulier pour ceux qui sont enclavés et dépendent de l'importation des hydrocarbures.

On a listé les facteurs favorables à l'utilisation d'huile de Pourghère produite localement comme carburant :

- La transformation des graines du Pourghère permet de valoriser les ressources locales,
- Les haies vives de Pourghère protègent les sols contre l'érosion éolienne,
- L'arbuste pousse facilement sur des sols pauvres sans apports d'intrants importants,
- La production d'huile de Pourghère crée des opportunités pour des activités génératrices de revenus, comme la fabrication de savons,
- Les possibilités d'accroissement de la production nationale sont énormes, car toutes les parcelles impropres aux autres cultures peuvent être plantées en Pourghère,
- L'utilisation d'huile de Pourghère comme combustible ne génère pas d'excédent de gaz carbonique : en effet, en brûlant, l'huile ne dégage pas plus de gaz carbonique que les quantités absorbées pendant la croissance de la plante.

De même, les facteurs pouvant faire obstacle à l'utilisation d'huile de Pourghère sont listés :

- Les volumes nécessaires : il faut 3 à 4 kg de graines de Pourghère pour produire un litre d'huile. Cela correspond au rendement de 3 à 4 mètres linéaires d'arbustes. En supposant une consommation d'huile de Pourghère à peu près équivalente à la consommation de diesel, il faudrait 2 à 2,5 tonnes d'huile de Pourghère par an, soit la production de 2 à 2,5 km de haies vives.
- Le temps nécessaire pour ramasser les graines de l'arbuste et fabriquer l'huile. Les graines du Pourghère sont généralement ramassés par les femmes et les enfants. Il faut ensuite les décortiquer, puis mettre les graines à sécher et les presser. Aucune donnée n'était disponible quant au temps nécessaire à ces activités, qui viendrait s'ajouter à l'emploi du temps déjà chargé des femmes dont les ressources en temps et en énergie sont déjà fortement sollicitées par ailleurs.

Une étude de rentabilité de la plante Pourghère révèle que l'huile de Pourghère peut être produite à moindre coût en milieu rural et concurrencer ainsi le carburant diesel. Un des objectifs est d'arriver à vulgariser la plante pour que l'approvisionnement énergétique en milieu rural soit satisfaisant, du moins pour les zones où la plante est présente.

Partant des frais d'investissement dans les graines (achat, transport et autres), ainsi que des frais d'amortissement des installations (moteur, presse), des frais de main d'oeuvre et d'entretien, le prix de revient du litre d'huile de Pourghère est estimé à 250 F CFA (francs CFA) soit 0.38 €. Ce coût représente 40 à 65% du prix du gazole de la pompe en milieu urbain.

Carburant	Gazole (en ville)	Huile de pourghère
Coût (FCFA/litre)	535	250
Coût (€/litre)	0.815	0.38

Figure 5 : coûts comparatifs



Néanmoins il est à noter également que cette analyse ne tient compte ni des effets écologiques de la plante (non quantifiables), ni de la valeur marchande du tourteau de Pourghère (le résidu de pressage) utilisable comme engrais organiques.

Des analyses plus fines de la faisabilité de l'huile de Pourghère comme combustible sont nécessaires, notamment en ce qui concerne les aspects suivants :

- Les conditions requises dans les différentes zones pour le stockage des graines de Pourghère (humidité, récipients, durée, etc.), pour assurer une production d'huile de bonne qualité,
- Le temps nécessaire pour le ramassage, le transport et la transformation (décorticage, pressage, etc.) et les conséquences pour l'emploi du temps des différents groupes de la communauté,
- Une analyse de marché (prix et débouchés) pour le savon et le tourteau de Pourghère dans différentes zones,
- Une analyse comparative des coûts et avantages des combustibles traditionnels et de l'huile de Pourghère,
- Informations sur les variétés de Pourghère dont les fruits ne sont pas toxiques,
- Moyens permettant de réduire le coût de l'huile (augmentation des rendements : intensification de la transformation et / ou nouvelles possibilités de valorisation).

Tous ces points doivent être analysés selon les contextes spécifiques.



Nous avons fait une estimation dans le cas d'un village de 500 personnes.

Plantation de 50 ha environ, 125 000 arbustes.

Groupe électrogène :

Production :

- 3 à 4 kg de graines par pourghère pour un litre de biocarburant,
- 375 000 à 500 000 kg par an,
- 125 000 à 170 000 litre d'huile de pourghère par an,
- un litre d'huile de pourghère peut fournir 4 à 6 kWh,
- 500 MWh à 850 MWh par an,
- un litre de carburant utilisé pour broyer les graines de pourghère permet d'obtenir jusqu'à 21 litres d'huile de biocarburant,
- 1 litre de gazole : 535 F CFA,
- 8100 litres de carburant par an soit 4,3 millions F CFA soit 6600€,
- coût de pressage d'un kilo de pourghère : 60 F CFA par litre d'huile sorti de la presse.

Activité connexes :

- 2 à 3 kg de tourteau par litre d'huile de pourghère,
- 375 000 kg de tourteau
- prix de vente du tourteau comme engrais organique : 15 F CFA le kilogramme,
- vente du tourteau : 5 550 kF CFA soit 8500 euros.
- coût de fabrication d'un kg de savon à partir d'un litre d'huile : 340 F CFA
- prix de vente d'un kg de savon : 500 FCFA
- bénéfice : 160 FCA/ kg de savon

Création d'emplois :

- 8 à 10 emplois permanents par an (agriculture),
- 20 à 30 emplois saisonniers par an (récolte),
- divers emplois dans les activités connexes (fabrication du savon).



6. ELECTRICITE SOLAIRE: UNE ENERGIE PEU COUTEUSE

6.1 Le NEPAD veut développer l'électricité dans les zones rurales

Lampes au kérosène et fatigue oculaire constituaient il y a peu encore le quotidien des instituteurs africains. Mais l'électricité solaire a tout changé. Caroline Hombe, enseignante de 35 ans de la région rurale de Mhondoro (Zimbabwe) peut maintenant corriger la pile de cahiers qui se trouve sur sa table sans redouter que la tombée de la nuit ne mette fin à son travail. Ensoleillés toute l'année, les pays africains exploitent dorénavant cette source d'énergie propre et gratuite pour éclairer des foyers isolés qui n'ont aucun espoir d'être prochainement reliés au réseau national d'électricité.



Entretien de panneaux solaires au Mali: l'Afrique peut exploiter son ensoleillement important pour produire de l'électricité

“J’avais toujours mal aux yeux, et aussi mal à la tête à cause de la fumée”, se souvient Mme Hombe. “Imaginez : corriger une centaine de cahiers d’exercice dans de mauvaises conditions d’éclairage et avec de la fumée. La seule solution était de faire ce travail avant le coucher du soleil, mais je ne pouvais alors pas passer de temps avec mes deux jeunes enfants avant qu’ils se couchent, ni préparer le dîner assez tôt. Heureusement, le problème ne se pose plus.”

L'électrification des zones rurales présente des défis particuliers pour les gouvernements africains car il est souvent coûteux et peu pratique de relier au réseau d'électricité des foyers éloignés et éparpillés. Dans le cadre du Nouveau Partenariat pour le développement de l'Afrique (NEPAD), les pays africains cherchent de nouveaux moyens de permettre aux familles rurales de cuisiner et de s'éclairer. Des sources d'énergie autonome — solaire, éolienne ou hydraulique (avec des minis générateurs) — peuvent constituer une solution.

Le NEPAD part du constat selon lequel il faut, pour parvenir à la prospérité sociale et économique, renforcer l'accès à des sources d'énergie moins coûteuses et plus fiables. En dehors de l'Afrique du Sud et de l'Égypte, seuls 20 % des Africains (et dans certains pays seulement 5 %) ont l'électricité. Dans les régions rurales où vivent la majorité des Africains, ce chiffre n'est



que de 2 % en moyenne, ce qui est nettement inférieur au taux d'au moins 35 % que comptent atteindre les dirigeants africains.

6.2 'Le soleil est gratuit'

Les cours d'eau (au potentiel hydraulique) et les réserves de pétrole, de charbon et de gaz de l'Afrique sont après tout parmi les plus importants du monde. Pour faire progresser le NEPAD, ajoute-t-il, il faut que les pays trouvent des sources d'énergie moins coûteuses, en minimisant les risques pour l'environnement et en en assurant la viabilité. De l'avis de ce spécialiste de l'énergie, l'énergie solaire, propre et renouvelable, satisfait cette équation.

“Les pays africains doivent faire preuve de créativité. Le soleil est gratuit et inépuisable. Les panneaux photovoltaïques convertissent directement les rayons du soleil en électricité, sans pollution et sans nuire à l'environnement. Ils peuvent produire suffisamment d'électricité pour alimenter des cuisinières, pomper de l'eau, éclairer des dispensaires et faire fonctionner des téléviseurs. L'Afrique a l'un des meilleurs climats pour ce type d'énergie.

Mais malgré les avantages incontestables de l'énergie solaire, la majorité des Africains dépendent encore de sources d'énergie traditionnelles. Le bois ou d'autres formes de biomasse comme les résidus des récoltes constituent les principales sources d'énergie pour la cuisine — ce qui a des conséquences très néfastes sur l'environnement.

Au début des années 1990, de nombreux villages se sont tournés vers l'énergie solaire. C'est au Zimbabwe que le plus ambitieux de ces projets a sans doute été mené, avec le soutien financier du PNUD et dans le cadre du Fonds pour l'environnement mondial (FEM). Cette initiative financée par le FEM (à hauteur de 7 millions de dollars) et le Zimbabwe (à hauteur de 400 000 dollars) a consisté à installer quelque 9 000 systèmes d'énergie solaire dans l'ensemble du pays, dans le but d'améliorer les conditions de vie de la population mais également de réduire la dégradation des terres et la pollution.

Situé près de Shamva, à 70 kilomètres de Harare, la capitale du Zimbabwe, la communauté de River Estate a l'un des meilleurs systèmes solaires locaux du pays. Cinquante deux exploitations agricoles familiales se partagent des générateurs d'électricité solaire, à raison d'un pour deux foyers. Chaque famille a deux lampes, ainsi que la possibilité de brancher une radio ou un petit téléviseur. Ces nouveaux systèmes d'éclairage ont amélioré la qualité de vie de la communauté : les élèves peuvent ainsi étudier plus longtemps, l'exode rural est réduit dans la région et les soins de santé se sont améliorés grâce à l'électrification d'un dispensaire.

6.3 Financement novateur

“Malgré tous leurs avantages, l'installation de ces systèmes solaires est d'un coût élevé, explique M. Jem Porcaro, analyste du Groupe de l'énergie et de l'environnement du PNUD. En Afrique subsaharienne, il faut compter de 500 à 1 000 dollars en moyenne pour équiper un foyer, c'est-à-



dire éclairer de trois à six pièces et faire fonctionner un téléviseur noir et blanc tous les soirs. La plupart des foyers africains n'en ont pas les moyens”.

Le recours à de nouvelles modalités de financement, comme la facturation à l'usage, est un moyen de surmonter le problème des coûts initiaux prohibitifs, indique M. Porcaro. L'installation de panneaux solaires alimentant plusieurs foyers à la fois peut également permettre de réduire les coûts. D'après la Banque mondiale, un plus grand nombre de foyers africains pourrait bénéficier de l'énergie solaire si les pouvoirs publics supprimaient certains obstacles, par exemple les droits d'importation.

La volonté de faire bénéficier les foyers ruraux de cette forme d'énergie est manifeste chez les dirigeants africains. Par exemple, d'après un rapport du PNUD et du FEM sur le financement et les modes de distribution, le marché de l'énergie solaire était à l'origine dominé en Afrique du Sud par le secteur privé, c'est-à-dire des concessionnaires. Mais le Gouvernement, l'un des principaux artisans du NEPAD, a par la suite lancé un grand programme hors réseau qui est maintenant entièrement opérationnel. Le Botswana, la Namibie, le Swaziland, la Zambie et la plupart des pays de la région ont développé les marchés de l'énergie solaire, souvent avec des fonds spéciaux visant à faciliter les crédits à la consommation.

6.4 Une aide pour les entreprises

L'énergie solaire sert également à faire fonctionner de petites entreprises. Abina Lungu, entrepreneur, gère une fabrique de pilage du maïs à Nyimba, dans l'Est de la Zambie. Source d'énergie fiable, l'électricité solaire lui permet de travailler tard dans la nuit pour répondre à toutes les commandes de ses clients. M. Lungu est l'un des nombreux villageois desservis par Nyimba Energy Service Company (NESCO), une entreprise financée par l'Agence suédoise de développement international. NESCO installe dans les résidences ou ateliers un système comprenant un panneau, une batterie, un contrôleur de charge et des points d'alimentation. Le coût s'élève à 33,33 dollars, frais de contrat inclus. Par la suite, les consommateurs doivent s'acquitter de frais de location mensuels.

Il n'est pas difficile de convaincre les Africains de recourir à l'énergie solaire et la demande est importante. NESCO a environ 360 personnes sur sa liste d'attente. “Nous avons du mal à répondre à la demande”, admet M. Stanislas Sankhani, chef de projet. Les efforts concertés du NEPAD devraient permettre aux Africains de ne plus attendre longtemps. D'après la Banque mondiale, l'électricité solaire, convient aussi bien que les réseaux électriques aux foyers ruraux, car leur consommation est faible.

L'ordre de grandeur de la consommation annuelle d'une famille de 3 à 5 personnes qui vit sans gaspiller l'énergie est de 1000 kWh. Ces 1000 kWh peuvent être fournis par 10 mètres carrés de capteurs solaires photovoltaïques placés sur le toit du logement

Une famille française moyenne, composée de 4 à 5 personnes et vivant en habitat individuel, consomme environ 4000 kWh/an ce qui équivaut à une dépense de 406.12 €/an (2664 francs par an).



6.5 Système d'énergie solaire : Exemple d'énergie solaire

Dans le sud du mali, deux villages : Falani-Fadia et Tinankolomba, ont installé des systèmes solaires pour subvenir à leurs besoins d'électricités. Concrètement : ils ont installé pour quatre mètres carrés public, un système de lumière constitué par un panneau solaire de 1x50 W, pour trois mosquées, des panneaux 2x50W pour la lumière et un PA system, pour l'appel de la prière. De plus, pour une maternité, ils ont installés un panneau solaire de 1x50W pour la lumière, et deux autres panneaux de 1x50W pour chacune des deux salles de conférence. Enfin MFC(Morila mining company) a installé deux stations pour pouvoir recharger les batteries personnelles.

La plupart des villages développent les installations solaires dans les écoles dans les squares publics, et les centres de santé construis par MaliFolkecenter, une ONG, qui travaille dans l'énergie renouvelable. Les pompes d'eau solaire seront installées plus tard actuellement, toute l'eau est pompée à la main dans les puits. Ces nouveaux équipements auront une variété d'avantages pour le village de Tabakoro. Les équipements d'éducation devraient s'améliorer avec la possibilité d'employer l'école en soirées pour les leçons d'instruction des femmes. De plus, le niveau des soins de santé qui peut être administré dans le village, devrait également s'améliorer. Comme aujourd'hui des opérations mineures peuvent être effectuées dans l'obscurité ; cependant l'éclairage devrait permettre des accouchements nocturnes beaucoup plus facilement (réduisant des taux de mortalité maternelle et infantile). La lumière sur la place publique devrait permettre l'émergence de réunions publiques nocturnes et aider à alimenter le débat social. Le pompage électrique de l'eau réduira le fardeau lourd des travaux très physiques qui sont menés quotidiennement par les femmes du village. En plus de ces avantages pratiques, le Mali-Folkecenter espère qu'en fournissant l'électricité aux villageois ils contribueront à combattre l'exode rural de masse qui se produit dans beaucoup de pays en voie de développement pendant que les populations rurales gonflent. Chaque année, beaucoup de gens vont rechercher le travail à Bamako pendant la saison sèche, quand il n'y a aucun travail à faire dans les domaines ruraux, et tous les ans, un peu plus de gens décident de rester à Bamako, et ne reviennent pas à leur village. Ceci pose des problèmes dans la ville et la campagne. Le capital du Mali Bamako a doublé en taille sur les 15 dernières années. Avec un tel taux de croissance, il est inévitable qu'il n'y ait plus assez de travail. Les gens sont conduits au crime et à la prostitution. Tous les ans des ouvrières sexuelles tombent enceintes et ont trop honte pour retourner dans leurs familles. Dans le secteur rural, les villages manquent maintenant de jeune main d'œuvre. Or ce sont les jeunes qui sont les plus actifs, les plus innovateurs et dynamiques, et qui peuvent provoquer un changement positif du secteur rural. En fournissant à des villages de meilleurs équipements, Le Mali-Folkecenter espère que le secteur rural sera plus attrayant pour ces jeunes et qu'ils décideront de moins en moins de quitter leurs villages pour rejoindre Bamako.



6.6 Cas pratique

Prenons le cas d'une famille française typique de 3 à 5 personnes, puis de ces données, nous extrapolerons pour avoir une idée de la consommation de notre plateforme solaire pour subvenir aux besoins de 20 foyers.

Consommation électrique d'une famille en énergie (kWh par an)		
Type de matériel	Élément spécifique	Consommation kWh/an
Éclairage	Lampe à incandescence et halogène	775
	Lave-linge	200
Electroménager	Réfrigérateur- congélateur	566
	Cafetière	30
	Aspirateur	15
	Four	100
	Téléphone	20
Appareils	TV	150
	Chaîne hi-fi, radio	40
	Pôle multimédia	130
Total		2026

Consommation électrique de la plateforme SOLAIRE (par an)		
Type de matériel		Consommation kWh/an
Éclairage	Cuisine	50
	Salle d'étude	200
	Atelier	50
Appareils Principaux Cuisine	2 Réfrigérateurs / congélateur	566
	Four	100
	Cafetière	30
	4 x Plaque chauffante	200
	Moulin à céréales	40
Appareils Principaux Atelier	Scie sauteuse	50
	Presse à huile	40
	Décortiqueuse à céréales	40
	Total	1932



6.7 L'ensoleillement

La puissance de sortie délivrée par un système solaire varie en fonction de l'ensoleillement direct reçu à la surface des panneaux solaires. La quantité d'énergie solaire disponible est évidemment dépendante de la météo, de la saison et de la localisation sur le globe terrestre.

Déterminer la ressource solaire :

L'unité de mesure adoptée pour quantifier la ressource solaire journalière est le kWh/m²/jour (kilowattheure/mètre carré/jour). Une surface d'un mètre carré reçoit 1kW par heure d'ensoleillement, dans des conditions optimales (ciel dégagé). Nous, au Mali, l'ensoleillement n'est pas un problème. Ce qui donne une moyenne de 5 à 7 kWh/m²/jour

Ajuster la position des panneaux solaires :

L'ajustement sur le plan horizontal (azimut) s'obtient en pointant les modules photovoltaïques : vers le Sud lorsqu'on est dans l'hémisphère Nord, vers le Nord lorsqu'on est dans l'hémisphère Sud. Les panneaux solaires doivent être placés perpendiculairement aux rayons du soleil pour obtenir un résultat optimal. L'ajustement sur le plan vertical nécessite de connaître la trajectoire du soleil, en fonction de la saison et du lieu géographique.

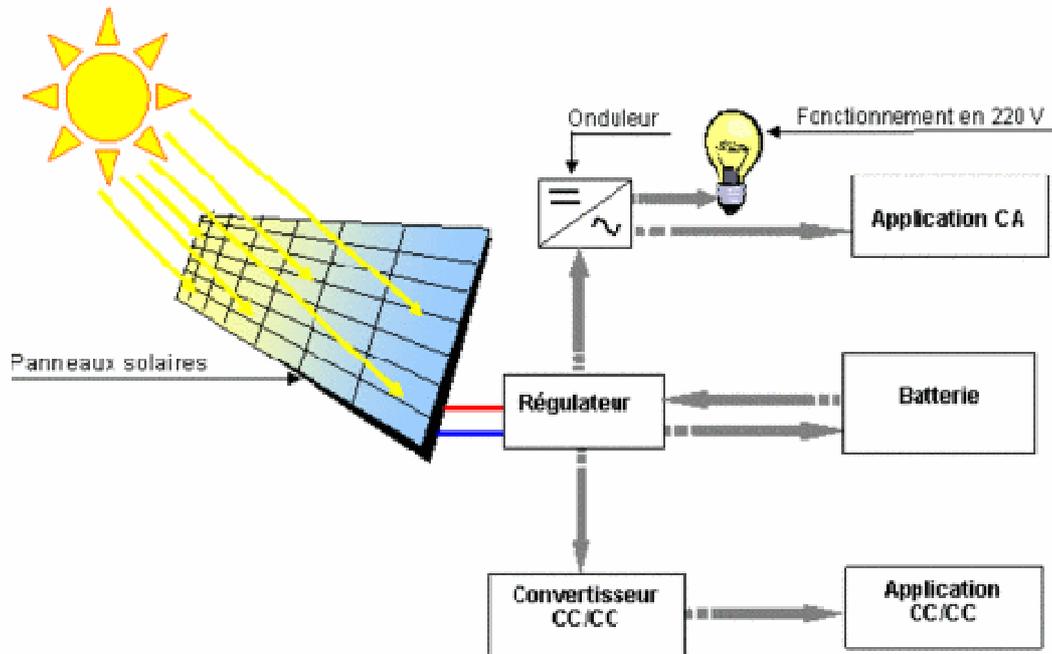
L'angle d'inclinaison optimal en moyenne annuelle correspond à la latitude du lieu. Cet angle est souvent pondéré en fonction de l'application et de l'utilisation souhaitée :

Productivité annuelle suivant l'inclinaison et l'orientation des modules

	0°	30°	60°	90°
SUD	93%	100%	91%	68%
SUD-EST SUD-OUEST	93%	96%	88%	66%
EST OUEST	93%	90%	78%	55%



6.8 Principe de fonctionnement d'une centrale photovoltaïque en site isolé



Quantification financière du système :

Dans le cas de sites isolés, les installations photovoltaïques s'imposent comme de véritables systèmes autonomes capables de subvenir localement aux besoins en électricité. Grâce à un jeu de batteries, ces installations photovoltaïques sont capables d'emmagasiner le surplus d'électricité non consommée pour le restituer lorsque l'ensoleillement devient insuffisant. L'énergie produite est directement utilisée, soit à usage domestique (éclairage, ordinateur...), agricole (éclairage, électrification de barrière, pompage de l'eau...), ou autre. Le prix d'un système photovoltaïque raccordé au réseau est aujourd'hui de 5 € par Watt crête (Wc).

En sachant que la plateforme va consommer 2000 kWh/an et qu'un système de 1kWc (10 m²) produit 1000 kWh/an en moyenne, il faut une installation de 20 m² pour subvenir aux besoins électriques.

Un système d'une puissance d'1 kWc, qui comprend 20 m² de capteurs, revient donc à **10000 €** pose comprises.

Choix de la batterie :



La capacité de votre batterie est : Consommation en Wh x Autonomie en Jrs x 1,25 Tension en Volts

Si on souhaite faire fonctionner l'ensemble des appareils durant deux jours deux frigo 200 W 12h/jour et l'éclairage 150W 5h / jour.

Soit un besoin journalier de : $(2 \times 200 \text{ W} \times 12\text{h}) + (300\text{W} \times 5\text{h}) = 63000$ Watts heure par jour (Wh/j).

La tension de la batterie est de 12V et l'installation est située au Mali. On choisira 5 jours d'autonomie

Capacité = $(6300\text{Wh} / 12\text{V}) \times 5\text{jrs} \times 1,25 = 3500$ Ah (ampère heure)

On choisira donc une batterie d'au moins 3500 Ah en 12 Volts ou du 1750 Ah en 24 Volts

Les batteries coûtent approximativement 500 euros.

	Prix (en euros)
Panneau solaire	10000
Batteries	500
Deux réfrigérateurs	2 x 700
TOTAL	11900

On arrive à un total de 11900 euros, ce qui rentre complètement dans le budget qui était discuté au départ.



7. ENERGIE EOLIENNE

7.1 Introduction

Le rendement énergétique (la puissance développée) des éoliennes est fonction de la vitesse du vent au cube. Ainsi les éoliennes actuellement commercialisées ont besoin d'un vent dans la gamme de 11 à 90 km/h (3 à 25m/s) au minimum.

La capacité d'une éolienne à produire de l'énergie est appelée sa puissance (maximale) nominale et elle s'exprime en kilowatts (KW) ou en MWatts (1MW = 1000 KW). Plus la puissance nominale d'une éolienne est élevée, plus elle produira d'énergie dans des conditions identiques (de vent et de durée d'utilisation).

La puissance nominale des éoliennes va de moins de cent kilowatts (KW) pour les petits pré-générateurs à usage privé jusqu'à plus de 5MW pour les éoliennes off-shore de nouvelle génération, en passant par 1 à 2 MW pour les éoliennes terrestres les plus souvent installées.

Cependant il faut souligner le fait que l'énergie électrique fournie par une éolienne est fortement variable au cours du temps. En effet, une éolienne ne délivre sa puissance maximale (dite encore nominale) que dans une fourchette de vitesses de vent assez restreinte : trop lent, le vent n'entraînerait pas les pales assez vite, trop rapide, il les entraînerait trop vite et il faut réduire la vitesse de rotation (en faisant pivoter les pales).

Vitesse du vent (m/s) et (Km/h)		Puissance délivrée (KW)
8	28,8	30
10	36	115
12	43,2	175
14	50,4	180
16	57,6	172
16	64,8	168
20	72	165

Tableau 2:Exemple ci-dessous pour une éolienne de 175 KW de puissance nominale.



On a représenté la courbe de puissance délivrée en fonction de la vitesse du vent pour une autre éolienne de 750 KW.

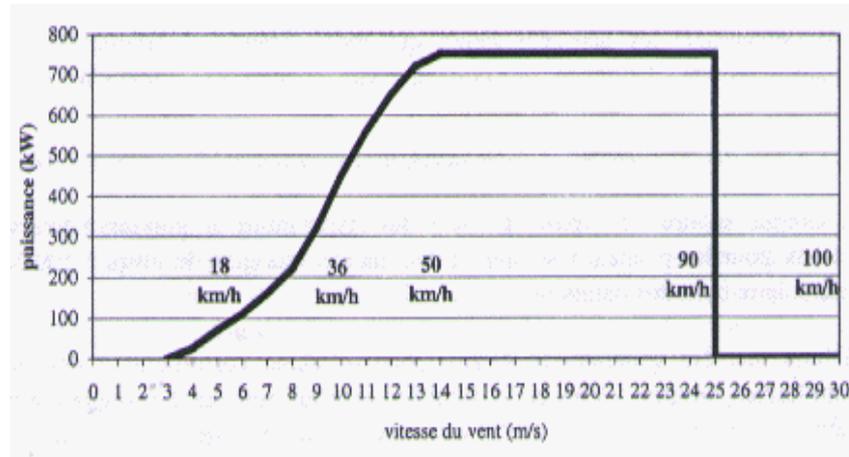


Figure 6 : puissance délivrée en fonction de la vitesse du vent

Même si les éoliennes modernes ont certes des puissances unitaires qui peuvent aller jusqu'à 2,5 MW sur terre, cela ne change pas la manière dont la puissance est délivrée en fonction de la vitesse du vent.

Or, les conditions ne sont pas toujours optimales: Parfois, il n'y a pas de vent, parfois il y a du vent mais pas suffisamment ou de manière trop irrégulière pour que l'éolienne fonctionne à 100% de ses capacités.

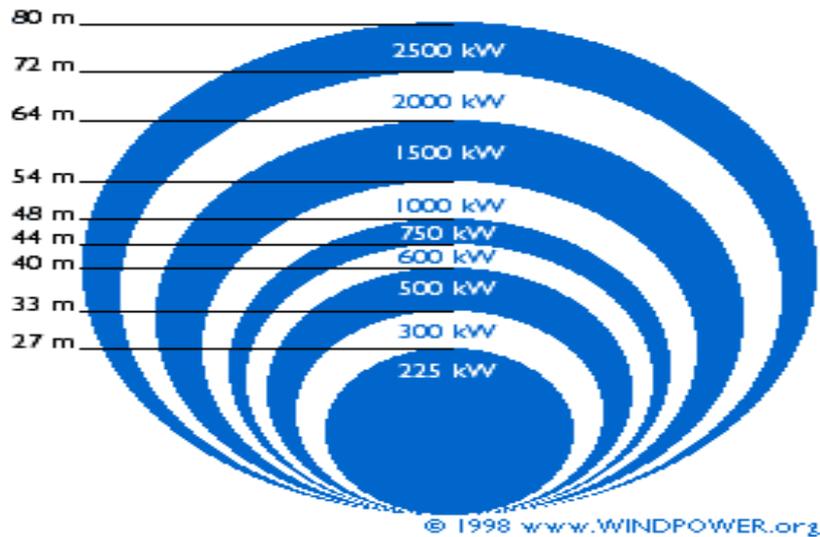
Dans un environnement donné, une éolienne a donc un facteur de capacité qui est généralement voisin de 30%, ce qui signifie qu'une éolienne ne fournit que 30% de l'énergie qu'elle pourrait réellement produire du fait d'un environnement qui n'est pas optimal.

Le facteur de charge c'est à dire de la durée de fonctionnement et de production de l'équipement dans une année. Pour l'éolien, le facteur de charge est d'au plus 20%.

7.2 Caractéristiques techniques des éoliennes

La surface de disque balayée par le rotor (ainsi que la vitesse du vent, évidemment) détermine la quantité d'énergie que l'éolienne est susceptible de récolter en une année.





L'image peut vous donner une idée des diamètres généraux du rotor, valables pour les différentes tailles d'éoliennes. Une éolienne, dont la puissance de la génératrice est de 600 kW, aura typiquement un diamètre de rotor de quelque 43 mètres. Si vous doublez le diamètre du rotor, vous obtiendrez une surface qui est quatre fois plus grande (le carré de deux). Cela signifie également une augmentation de quatre fois de la puissance de sortie du rotor.

Les diamètres de rotor peuvent varier un peu par rapport aux chiffres indiqués sur l'image, étant donné qu'une grande partie des fabricants cherche à optimiser aux conditions locales prévalant sur le site en question. Une plus grande génératrice exige évidemment plus de puissance (c.-à-d. plus de vent) afin de tourner. Dans une région de vents faibles, il est donc souvent possible de maximiser la production annuelle de l'éolienne en utilisant une génératrice relativement plus petite pour un diamètre de rotor donné (ou bien un plus grand diamètre de rotor pour une génératrice donnée). Dans le cas d'une éolienne de 600 kW, les diamètres de rotor varient normalement entre 39 et 48 m. S'il est possible, sur les sites de vents faibles, d'augmenter la production annuelle d'énergie en utilisant une génératrice plus petite que normalement, c'est parce que cette solution permet à l'éolienne de fonctionner pendant plus d'heures au cours de l'année.

Le principe des économies d'échelle vaut évidemment également pour les éoliennes. Ainsi, une grande éolienne produit normalement de l'électricité à un moindre coût qu'une petite. La raison pour cela est que les coûts de fondations, de construction, de raccordement au réseau et d'autres composants de l'éolienne (le système contrôle-commande, p.ex.) sont plus ou moins les mêmes, quelque soit la taille de l'éolienne.

7.3 Eoliennes de grandes tailles

Les grandes éoliennes sont particulièrement appropriées à l'installation en mer. Le coût des fondations n'augmente pas proportionnellement avec la taille de l'éolienne, et les coûts d'entretien sont dans une large mesure indépendants de la taille.



Dans les zones où il est difficile de trouver des sites pour plus qu'une seule éolienne, une grande éolienne avec une tour haute tire mieux partie de la ressource éolienne qu'une petite.

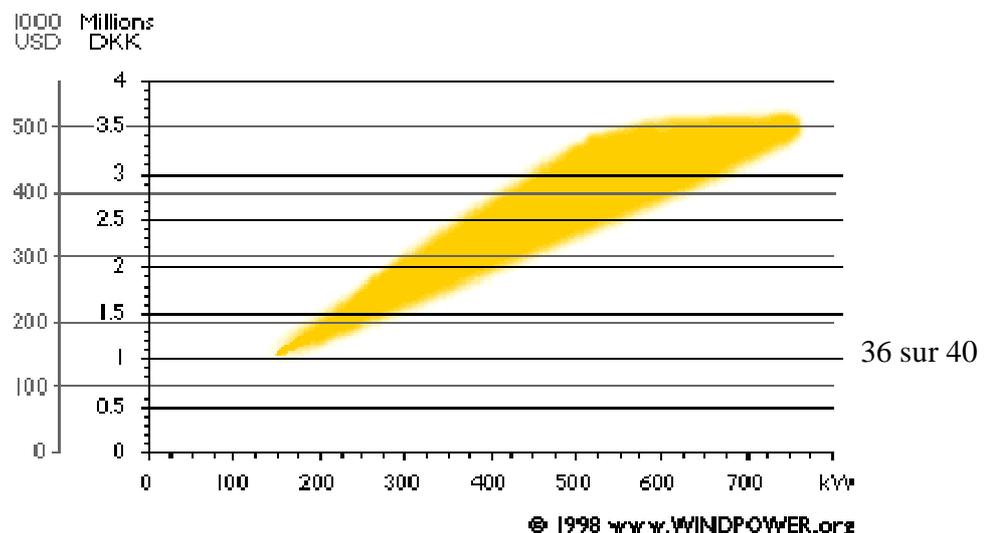
7.4 Eoliennes de grandes tailles

Il arrive que le réseau électrique local soit trop faible pour supporter la production électrique d'une grande éolienne. C'est souvent le cas dans les parties les plus extérieures du réseau où la densité de la population et les besoins en électricité sont très bas.

1. La production d'électricité est moins fluctuante dans un parc éolien composé de plusieurs petites éoliennes, étant donné que les variations du vent sont aléatoires, ayant donc tendance à s'annuler.
2. Les coûts liés à l'usage de très grandes grues et à la construction de chemins suffisamment robustes pour supporter le transport des composants de l'éolienne constituent un autre facteur qui, dans certains endroits, rend plus économique le choix de petites éoliennes.
3. Avec plusieurs éoliennes d'une moindre puissance, on assure la répartition du risque en cas de défaillance temporaire d'une éolienne (à cause de la foudre).
4. Des considérations esthétiques du paysage peuvent parfois dicter le choix d'éoliennes plus petites. Cependant, il faut savoir, que la vitesse de rotation d'un grand rotor est en général beaucoup moins rapide que celles d'un petit, ce qui a pour résultat qu'une seule grande éolienne attire souvent moins l'attention que plusieurs petites.

7.5 Les coûts

Le graphe ci-dessous donne une idée de la gamme des prix des éoliennes modernes. Comme vous pouvez le voir, les prix pour chaque taille de générateur sont variables, dépendant de la hauteur de la tour et du diamètre du rotor. Ainsi, un rallongement d'un mètre de la tour coûtera environ 1.500 EUR/USD, tout comme une éolienne spécialement conçue pour les zones de vents faibles et munie d'un diamètre de rotor assez grand, coûtera plus chère qu'une éolienne avec un petit diamètre de rotor, destinée à des zones bien ventées.



7.6 Une éolienne typique sur le marché actuel

Bien que les prix des éoliennes appartenant à la gamme de 600 à 750 KW soient très similaires, il n'est pas forcément avantageux de choisir une éolienne avec une génératrice aussi puissante que possible. Ainsi, il est très probable qu'une éolienne ayant une grande génératrice de 750 KW (et un diamètre de rotor relativement petit) produira moins d'électricité qu'une éolienne de 600 KW, si l'éolienne est installée dans une zone de vents faibles. L'éolienne la plus utilisée en ce moment est typiquement une éolienne de 1000 KW avec une hauteur de moyeu de 60 à 80 m et un diamètre de rotor de quelque 54 m.

7.7 Coûts d'installation d'une éolienne

Les coûts d'installation comprennent les fondations (en béton armé, le plus souvent) la construction de voies (nécessaires pour transporter la génératrice et les sections de la tour au site), le transformateur (nécessaire pour convertir le courant à basse tension produit par l'éolienne en courant à haute tension correspondant à celui du réseau électrique local (10-30 KV)), la liaison téléphonique permettant de contrôler et surveiller l'éolienne à distance, ainsi que les coûts du câblage (pose du câble reliant l'éolienne au réseau électrique).

7.8 Coûts d'exploitation et d'entretien

Une éolienne moderne est conçue pour fonctionner pendant environ 120.000 heures durant ses 20 années de durée de vie - donc sensiblement plus longtemps qu'une voiture dont la durée de vie, à titre de comparaison, n'est que de quelque 4.000 à 6.000 heures.

L'expérience a démontré que les coûts d'entretien sont en général peu élevés lorsque l'éolienne est toute neuve, alors qu'ils tendent à augmenter au fur et à mesure qu'elle prend de l'âge.

La plus grande partie des coûts d'entretien est constituée d'un montant fixe par an couvrant le service régulier de l'éolienne, Pour les nouvelles éoliennes, les coûts annuels de maintenance se situent donc plutôt autour de 1,5 à 2 % de l'investissement initial.

Mais certains préfèrent calculer avec un montant fixe par KWh de production électrique, normalement environ 0,01 EUR/USD par KWh. Le raisonnement derrière cette dernière méthode est que l'usure et la fatigue de l'éolienne tend à s'accroître avec l'augmentation de la production d'électricité.

7.9 Opportunité de l'énergie éolienne au Mali

Ces systèmes conviennent aux régions très ventées et relativement peu ensoleillées. Au mali le gisement éolien se résume en un modeste gisement essentiellement concentré dans les zones



sahéliennes et sahariennes du pays. Il s'agit notamment des régions Nord du pays en l'occurrence Tombouctou, Gao, Kidal et Nara et dans la région de Koulikoro. La vitesse du vent oscille entre 3 et 7 m/s

Avec d'une part de telles vitesses (peu élevées) et d'autre part les infrastructures existantes (Barrage hydraulique dans le sud et centrale thermique dans le Nord) l'utilisation de l'énergie éolienne à grande échelle et de façon (solitaire) c'est à dire indépendamment d'une autre source d'appoint ne semble pas être justifiée.

Par contre à l'échelle d'une exploitation de taille modeste les services énergétiques fournis par ces systèmes éoliens sont non négligeable surtout pour la fourniture d'eau potable et la création d'activités génératrices de revenus (jardinage/maraîchage) et l'hydraulique pastorale. Aussi les aéro-générateurs sont utilisés pour l'éclairage des écoles et des centres de santé. Les groupes cibles sont très souvent les femmes, les enfants, les communautés villageoises et les éleveurs.



8. ANNEXES

8.1 Unités de travail des ENR

Unités de travail				
	Kwh (Kilowattheure)	J (Joule)	Cal (Calorie)	Tep (Tonne équivalent pétrole)
Kwh (Kilowattheure)		3,60E+06	8,60E+05	8,60E-05
J (Joule)	2,78E-07		2,39E-01	2,39E-11
Cal (Calorie)	1,16E-06	4,19E+00		1,00E-10
Tep (Tonne équivalent pétrol)	1,16E+04	4,20E+10	1,00E+10	

Combustible	Chaleur de réaction	Production d'électricité
	MJ/kg	kwh/kg
Houille	26	7,22
Lignite	17	4,72
Pétrole brut, gazole	42	11,67
GPL	46	12,78
1 stère de bois	6170	1 713,89
essence	44	12,22

Unités de mesure de l'énergie

1 J (joule) = 1 Ws = 0,2388 cal

1 GJ (gigajoule) = 10⁹ J

1 TJ (terajoule) = 10¹² J

1 PJ (petajoule) = 10¹⁵ J

1 (kilowattheure) kWh = 3.600.000 Joule

1 tep (tonne équivalent pétrole)

= 7,4 barils de pétrole brute en énergie primaire

= 7,8 barils de pétrole raffinée pour consommation finale

= 1270 m³ de gaz naturel

= 2,3 tonnes de charbon

1 Mtep (million de tonnes équivalent pétrole) = 41,868 PJ



8.2 Programme National de Développement des Plates-formes Multifonctionnelles

AU TITRE DU MINISTRE DE LA PROMOTION DE LA FEMME, DE L'ENFANT ET DE LA FAMILLE :

Le Conseil des Ministres a examiné et adopté le Programme National de Développement des Plates-formes Multifonctionnelles pour la lutte contre la pauvreté pour la période 2006-2008.

C'est en vue de contribuer à l'amélioration des conditions de vie des populations en milieu rural que le Gouvernement avec l'appui de certains partenaires au développement, a initié le programme de plates-formes multifonctionnelles.

Une plate-forme multifonctionnelle est un appareillage constitué d'un moteur diesel capable d'entraîner divers machines et équipements tels que les moulins, décortiqueuses, alternateurs, chargeurs de batteries, postes de soudure, machines de menuiserie etc. Elle peut également rendre possible la distribution de l'eau potable ainsi que l'éclairage électrique.

Les plates-formes multifonctionnelles ont le grand avantage de doter les villages d'une source d'énergie, de créer de nouvelles activités génératrices de revenus, de libérer les femmes de certaines corvées longues et pénibles.

Le programme a été lancé en 1995. Le bilan des réalisations fait apparaître qu'au 31 décembre 2004, ce sont, au total, 501 plates-formes qui ont été installées dont 19 avec réseau d'eau, 07 avec réseau d'éclairage et 01 avec réseau d'eau et d'éclairage.

Plus de 700 études de faisabilité ont été réalisées dans les villages demandeurs dont 600 attendent d'être équipés. Plus de 3.000 femmes ont été alphabétisées et formées en gestion et à l'exploitation technique des plates-formes. Près d'une centaine d'artisans ont été formés pour assurer la fabrication, l'installation et la maintenance de plates-formes.

Compte tenu de tous les avantages que procurent les plates-formes et notamment de leur impact en termes de réduction de la pauvreté en milieu rural, le Gouvernement a décidé de poursuivre le projet en mettant en oeuvre un vaste programme dont l'objectif est d'équiper 1.500 nouveaux villages dans les trois prochaines années (2006-2008).

**KOULOUBA, LE 22 DECEMBRE 2005
LE SECRETAIRE GENERAL DU GOUVERNEMENT.**

